

文章编号 1004-924X(2007)02-0160-07

# 光学镜面离子束加工的可达性

周 林,戴一帆,解旭辉,焦长君,李圣怡

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**提出了离子束加工可达性问题的理论描述和定义,分析了驻留函数解的存在条件,进而分析了采用不同直径的离子束去除不同频率面形误差时额外去除量的大小,最后进行了仿真实验验证。分析结果表明,对于高斯型的束函数,驻留函数解总是存在的。但是面形误差频率越高,驻留函数解越大,去除面形误差时去除的额外材料越多。额外的材料去除量随着离子束径和空间误差波长之比( $d/\lambda$ )的增加而指数增加。当  $d/\lambda=0.5$  时,额外材料去除量为 15%,还是可以接受的;当  $d/\lambda=1$  时,额外材料去除量迅速上升到 73%,该值即很难被接受。理论分析和仿真结果表明,为了优化加工过程, $d/\lambda$  应该  $<0.5$ 。

**关键词:**离子束加工;驻留时间;加工可达性;光学镜面加工;计算机控制;光学表面成形

**中图分类号:**TQ171.68 **文献标识码:**A

## Machining reachability in ion beam figuring

ZHOU Lin, DAI Yi-fan, XIE Xu-hui, JIAO Chang-jun, LI Sheng-yi

(School of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The conception and theoretical definition of machining reachability problem is proposed, and the existence condition of the solution of Dwell Time(DT) function is analyzed. Furthermore, we analyze and simulate the magnitude of the Extra Material Removal (EMR) in different process condition using different ion beam diameter to remove different spatial frequency surface errors. The analysis results show that the solution of DT function exists for the ion beam removal functions of Gaussian shape. However, for the higher spatial frequency surface error, the larger the solution of DT function is; the larger the magnitude of the EMR is. The magnitude of EMR is an exponential function of the ratio of ion beam diameter to the spatial surface error wavelength (i. e.  $d/\lambda$ ). And when  $d/\lambda=0.5$ , the EMR is 15%, which is acceptable in ion beam figuring process. When  $d/\lambda=1$ , it rapidly increases to 73%, which is unacceptable. Theoretical analysis and simulation results indicate that  $d/\lambda$  should be less than 0.5 in order to obtain acceptable process in IBF.

**Key words:** Ion Beam Figuring (IBF); Dwell Time (DT); machining reachability; optics machining; Computer Controlled Optical Surfacing (CCOS)

收稿日期:2006-04-22;修订日期:2006-11-18.

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(No. 50535020)

## 1 前言

离子束加工(Ion Beam Figuring, IBF)是近20年来用在光学镜面加工中的一种计算机控制光学表面成形(Computer Control Optical Surfacing, CCOS)方法<sup>[1-11]</sup>。光学镜面离子束加工是在真空中将离子(一般为氩离子)束轰击到光学镜面上,通过物理溅射去除材料以实现光学镜面加工的方法。离子束加工是一种高精度、确定性强的非接触式加工方法。由于离子束加工时对材料的去除是原子量级的,所以说离子束加工是高精度的加工方法。由于离子束束流大小容易控制,而且束流分布比较稳定,所以,用离子束加工可以获得稳定的束函数,加工过程确定性高,面形收敛快,也不存在小磨头加工方法中磨头磨损的问题。离子束加工不存在边缘效应,而且离子束加工是非接触式加工方法,非常适合于轻薄型镜子的加工,也适合于异型镜的加工。由于离子束的这些优点,在国外,离子束加工已成为大镜加工的一种常用方法。

最早进行光学镜面离子束加工的是 New Mexico 大学, Wilson 等人用离子束加工技术将 300 mm 的石英光学平面的面形误差(rms)在一个加工迭代过程中从  $0.41 \lambda$  提高到  $0.042 \lambda$ <sup>[1,2]</sup>。最著名的光学镜面离子束加工实例是 Eastman Kodak 公司使用该方法加工了 Keck 望远镜主镜的离轴子镜,其直径为 1.8 m,进行了两次加工迭代,第一次使面形精度(rms)由  $0.726 \mu\text{m}$  提高到  $0.252 \mu\text{m}$ ,第二次提高到了  $0.090 \mu\text{m}$ <sup>[3,4]</sup>。此外,德国的 IOM 利用离子束加工设备将  $\phi 200$  的 SiC 非球面镜面形加工到了  $\lambda/100$ (rms)<sup>[5]</sup>。比利时的 CSL 也开发了相应的离子束加工设备<sup>[6,7]</sup>。

我国目前还没有其它单位进行过光学镜面离子束加工研究,国防科技大学在国家的资助下,正在开展这方面的研究。

## 2 离子束加工模型

图1是实验开发的离子束加工设备。离子束加工示意图如图2。工件置于离子枪上方,离子枪有5个运动自由度,可以作  $x$ 、 $y$  和  $z$  平动,同时可以绕  $x$  和  $y$  轴转动,工件有1个运动自由度,可以绕  $z$  轴向转动。加工过程中,控制离子枪的位置,

使离子束垂直于被加工的光学镜面以便有效地去除光学镜面材料。离子束对光学镜面的去除能力用单位时间内离子束对镜面的材料去除量  $b(x, y)$  来描述,  $b(x, y)$  称为离子束去除函数(Ion Beam Removal Function),简称束函数。离子束加工过程中,要求稳定束函数,使束函数不随时间变化而变化,同时控制离子枪的运动,使离子束在光学镜面上有效去除材料。



图1 离子束加工设备

Fig. 1 Facility of IBF developed by our group

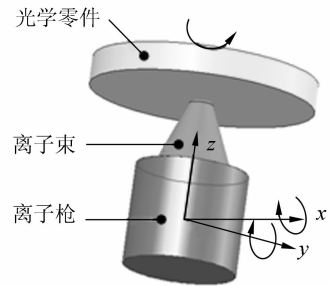


图2 离子束加工示意图

Fig. 2 Schematic of ion beam figuring

设期望去除的材料量为  $r_d(x, y)$ ,  $r_d(x, y)$ , 称为期望去除量函数(Desired Removal Function)。可以通过镜面实际面形  $z_a(x, y)$  减去镜面的期望面形  $z_d(x, y)$  计算出,即

$$r_d(x, y) = z_a(x, y) - z_d(x, y), \quad (1)$$

设离子束在光学镜面上去除的材料总量为  $r_a(x, y)$ ,  $r_a(x, y)$ , 称为实际去除量函数(Actual Removal Function),那么当加工可达时,有

$$r_a(x, y) = r_d(x, y) + \gamma, \quad (2)$$

其中,  $\gamma \geq 0$  为额外的材料去除量。

离子束加工过程有两种不同的基本方法,一种方法是离子束只在特定的空间离散选取点上停留,这些选取的特定点称为驻留点(Dwell

Points), 在这些驻留点上相应的停留时间称之为驻留时间(Dwell Time)。离子束加工工艺求解的主要目的就是要计算出各个驻留点上的驻留时间。文献[8]讨论了这种方法的建模与求解。

离子束加工过程的另外一种方法是离子束连续地在光学镜面上运动, 控制离子束相对于光学镜面的运动速度。在这种加工方法中, 没有第一种方法中所谓的驻留点和驻留时间, 对应于第一种方法中驻留时间的量是驻留时间分布函数  $\tau(x, y)$  (Dwell Time Distribution Function), 简称驻留函数, 工艺求解的目的是要计算出驻留函数。有了驻留函数就可以根据工艺条件确定出离子束相对于镜面的运动速度。例如, 在一维面形的情况下, 驻留函数  $\tau(x)$  的倒数即为离子束相对于光学镜面的运动速度。

在方法二的连续加工过程中, 离子束对镜面的总去除量函数  $r(x, y)$  为束函数  $b(x, y)$  和驻留函数  $\tau(x, y)$  的二维卷积, 即

$$r(x, y) = \int_a^b \int_c^d b(x-x', y-y') \cdot \tau(x', y') dx' dy', \quad (3)$$

对于一维面形(例如回转对称面形可转化为一维面形计算<sup>[12,13]</sup>)的情况, 式(3)退化为一维卷积方程

$$r(x) = \int_a^b b(x-x') \cdot \tau(x') dx', \quad (4)$$

其中,  $r(x)$  为一维的材料去除量函数,  $b(x)$  为一维的束函数,  $\tau(x)$  为一维的驻留函数。

离子束加工工艺求解的目的就是求出驻留时间或驻留函数。求解驻留时间和求解驻留函数的问题是等价的。驻留函数  $\tau(x, y)$  可以通过方程式由束函数  $b(x, y)$  和总去除量函数  $r(x, y)$  求解出来。然而, 对于方程和方程是第一类的 Fredholm 积分方程, 由于这类积分方程的不适定性<sup>[14,15]</sup>, 并不是对于任意的期望去除函数和束函数, 都存在驻留函数的解。

光学镜面离子束加工可达性问题是指出在特定的离子束加工工艺条件下是否可以加工得到期望的光学面形。据此, 离子束加工可达性问题就等价于: 对于给定的束函数  $b(x, y)$  和总去除量函数  $r(x, y)$ , 方程式是否有解  $\tau(x, y)$ ? 如果有解, 解  $\tau(x, y)$  是否可以应用在实际加工中? 这里把对离子束加工可达性问题的分析称为加工可达性分析。

### 3 加工可达性分析

为了使问题简化, 以一维面形为例来分析离子束加工可达性问题。

#### 3.1 驻留函数解存在条件

对方程式进行傅里叶变换得

$$\hat{r}(\omega) = \hat{b}(\omega) \cdot \hat{\tau}(\omega), \quad (5)$$

其中,  $\hat{r}(\omega)$  表示  $r(x)$  的傅里叶变换;  $\hat{b}(\omega)$  表示  $b(x)$  的傅里叶变换;  $\hat{\tau}(\omega)$  表示  $\tau(x)$  的傅里叶变换。

根据方程, 驻留函数的傅里叶变换为

$$\hat{\tau}(\omega) = \frac{\hat{r}(\omega)}{\hat{b}(\omega)}, \quad (6)$$

如果  $\hat{\tau}(\omega)$  满足以下条件, 那么通过  $\hat{\tau}(\omega)$  进行傅里叶反变换可以计算出驻留函数。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\hat{\tau}(\omega)| d\omega < \infty, \quad (7)$$

即当  $\hat{\tau}(\omega)$  为  $L^1$  可积函数时,  $\tau(x)$  存在<sup>[16,17]</sup>, 并可以通过下式计算。

$$\tau(x) = F^{-1}[\hat{\tau}(\omega)], \quad (8)$$

其中  $F^{-1}[\cdot]$  表示傅里叶逆变换。

在离子束加工中, 束函数通常是高斯函数<sup>[4,6]</sup>, 设归一化的束函数为

$$b(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (9)$$

相应地

$$\hat{b}(\omega) = e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\omega^2}, \quad (10)$$

那么, 条件式可以表示为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\hat{r}(\omega)}{e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\omega^2}} \right| d\omega < \infty, \quad (11)$$

由于  $\hat{r}(\omega)$  为  $L^1$  可积函数, 由式(11)可以看出, 如果  $\hat{r}(\omega)$  具有有限支集(即函数  $\hat{r}(\omega)$  仅在有限区间非零), 那么条件(7)总可以满足, 亦即驻留函数  $\tau(x)$  总是存在的; 如果  $\hat{r}(\omega)$  不具有有限支集, 那么要使驻留函数存在, 则当  $\omega \rightarrow \infty$  时, 必须  $\hat{r}(\omega) \rightarrow 0$ , 并且  $\hat{r}(\omega)$  的下降速率要比指数函数  $e^{-\frac{1}{2}\sigma^2\omega^2}$  的下降速率快。

由于期望去除函数  $r(x)$  一般都是多项式拟合的函数, 其傅里叶变换  $\hat{r}(\omega)$  具有有限支集<sup>[16]</sup>, 所以, 对于束函数为高斯函数的离子束加工, 驻留函数解总是存在的。

### 3.2 加工可达条件

式(11)给出了驻留函数解存在的条件,但是,并不是所有存在的驻留函数解都能实现加工,因为驻留函数解存在条件中并没有对驻留函数的大小进行限制,如果驻留函数值过大,那么材料去除量会很大,导致加工不可实现或者导致额外去除量过大。

假设期望去除量函数为波长的空间误差,其大小为  $\delta_\lambda$ ,则去除函数  $r_\lambda(x)$  表示为

$$r_\lambda(x) = \delta_\lambda \cdot \left( \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) + 1 \right), \quad (12)$$

根据驻留函数解存在条件式(11)可知,对于式(12)所示的期望去除函数和式(9)所示的束函数,存在驻留函数解。根据式(12),可以计算出驻留函数  $\tau(x)$  为

$$\tau(x) = \delta_\lambda \cdot \left[ e^{2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)^2} \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) + 1 \right], \quad (13)$$

由于驻留函数必须  $\geq 0$ ,所以要消除波长为  $\lambda$  的空间面形误差,加工时的驻留函数  $\tau_a(x)$  为

$$\tau_a(x) = \tau(x) - \inf[\tau(x)] = \delta_\lambda \cdot e^{2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)^2} \sin\left(2\pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right) + \delta_\lambda \cdot e^{2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)^2}, \quad (14)$$

此时,加工去除量  $r_a(x)$  为

$$r_a(x) = \int_{-\infty}^{\infty} b(x-x') \cdot \tau_a(x') dx' = \int_{-\infty}^{\infty} b(x-x') (\tau(x) + \delta_\lambda \cdot e^{2\left(\frac{\pi x'}{\lambda}\right)^2} - \delta_\lambda) dx' = r_\lambda(x) + \delta_\lambda \cdot (e^{2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)^2} - 1), \quad (15)$$

式(15)说明要用直径为  $6\sigma$  的离子束去除波长为  $\lambda$ 、幅值为  $\delta_\lambda$  的空间误差时,需要的额外去除量  $\gamma$  为

$$\gamma = r_a - r_\lambda = \delta_\lambda \cdot (e^{2\left(\frac{\pi x}{\lambda}\right)^2} - 1), \quad (16)$$

或者,写为

$$\frac{\gamma}{\delta_\lambda} = e^{2\left(\frac{\pi}{6} \cdot \frac{d}{\lambda}\right)^2} - 1, \quad (17)$$

其中,  $d=6\sigma$ , 表示离子束束径。

由式(17)可以看出,除非是脉冲加工函数 ( $d=0, \gamma=0$ ), 否则离子束加工都需要额外加工量(额外去除量)。离子束径与空间误差波长之比 ( $d/\lambda$ , 简称束径波长比) 越大, 额外加工量越大。也就是说, 对于特定的空间误差波长  $\lambda$ , 用束径大的离子束加工要比用束径小的离子束加工额外去除更多的材料; 对于特定束径  $d$  的离子束, 加工波长短的误差要比加工波长长的误差额外去除更

多的材料。从额外加工量的多少来说, 选择束径  $d$  较小的离子束总是较好的。然而, 如果离子束径较小, 那么加工效率较低, 从加工效率这个意义上来说, 离子束径越大越好。可以看出, 额外加工量和加工效率两者对束径大小  $d$  的要求是矛盾的, 因此只能选择合适的离子束径, 在额外加工量和加工效率两者间折中。通常选能满足额外加工量要求的最大束径来进行实际加工。

式(17)进行整理变形得

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2 \cdot \ln\left(1 + \frac{\gamma}{\delta_\lambda}\right)}, \quad (18)$$

式(18)把空间误差波长、误差大小、离子束径和额外加工量联系起来。如果用额外加工量和误差大小之比 ( $\gamma/\delta_\lambda$ ) 作横坐标, 用束径波长比 ( $d/\lambda$ ) 作纵坐标, 则可以做出 ( $d/\lambda$ ) vs. ( $\gamma/\delta_\lambda$ ) 的加工可达条件关系图(如图 3 所示)。表 1 为加工可达条件中的一些典型值。

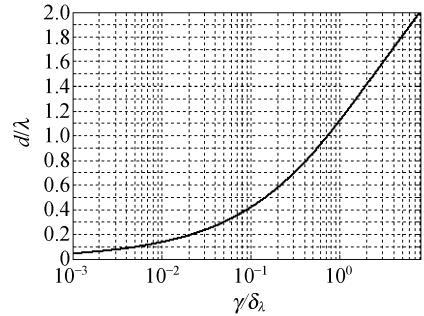


图 3 离子束加工可达条件

Fig. 3 Machining reachability condition of IBF

表 1 离子束加工可达条件

Tab. 1 Machining reachability condition of IBF

$d/\lambda$	$\gamma/\delta_\lambda$
0.42	0.1
0.5	0.147
0.86	0.5
1	0.73
1.12	1
1.5	2.43
2	8.0

## 4 仿真实验

离子束实际加工过程是二维的, 为了使仿真验证更符合实际加工过程, 采用二维模型进行验

证。仿真使用的面形如图 4 所示,该面形由正弦函数生成,其幅值( $\delta_\lambda$ )为  $1 \mu\text{m}$ 。

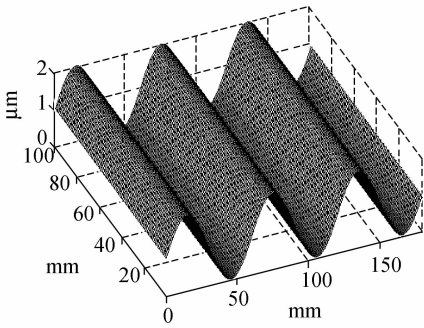


图 4 空间误差(波长:60 mm;大小:1  $\mu\text{m}$ )

Fig. 4 Spatial error (wavelength: 60 mm; amplitude: 1  $\mu\text{m}$ )

如果离子束的束径为 30 mm,其束函数如图 5 所示。对于波长为 60 mm 的面形(如图 4 所示),那么加工条件就为  $d/\lambda=0.5$ 。在这样的加工条件下,对驻留时间进行求解(求解使用了离散模型<sup>[8]</sup>和 TSVD 算法<sup>[18]</sup>,将另文讨论),求解得到的残留误差如图 6 所示,此时额外的去除量  $\gamma=0.141 \mu\text{m}$ ,即  $\gamma/\delta_\lambda=0.141$ 。为了清晰地显示期望去除量(原空间误差)、实际去除量和额外去除量之间的关系,仅用二维图形显示一个截面,如图 7 所示。

保持离子束径  $d=30 \text{ mm}$  不变,当  $\lambda=30 \text{ mm}$ ,即  $d/\lambda=1.0$  时,额外去除量  $\gamma=0.71 \mu\text{m}$ ,即  $\gamma/\delta_\lambda=0.71$ ;当  $\lambda=20 \text{ mm}$ ,即  $d/\lambda=1.5$  时,额外去除量  $\gamma=2.45 \mu\text{m}$ ,即  $\gamma/\delta_\lambda=2.45$ ;当  $\lambda=15 \text{ mm}$ ,即  $d/\lambda=2.0$  时,额外去除量  $\gamma=8.1 \mu\text{m}$ ,即  $\gamma/\delta_\lambda=8.1$ 。把这些结果列表 2,以作对比。

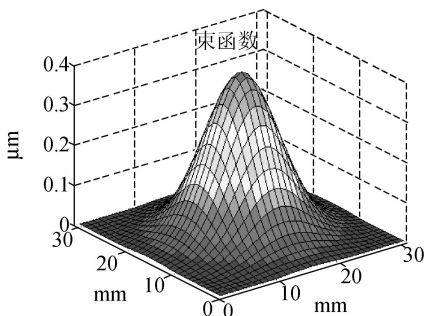


图 5 束函数(直径:30 mm)

Fig. 5 Profile of beam function (diameter:30 mm)

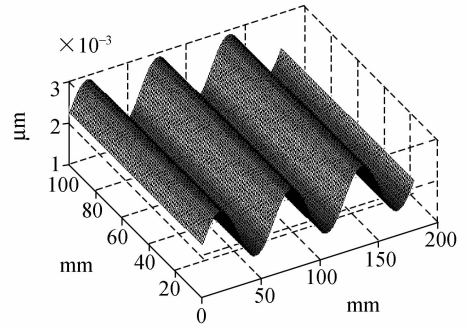


图 6 求解得到的残留误差(RMS:0.002  $\mu\text{m}$ )

Fig. 6 Residual error solved (RMS:0.002  $\mu\text{m}$ )

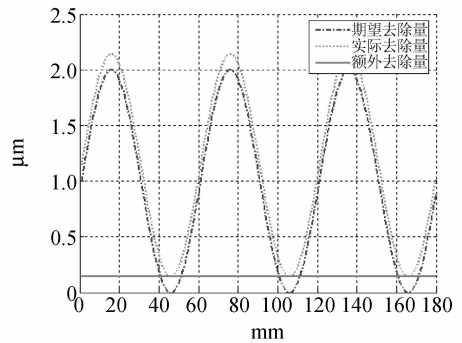


图 7 额外去除量( $d/\lambda=0.5$  时,  $\gamma/\delta_\lambda=0.141$ )

Fig. 7 Extra material removal ( $\gamma/\delta_\lambda=0.141$  at  $d/\lambda=0.5$ )

表 2 仿真结果

Tab. 2 Simulation results

$\lambda$ (mm)	$d/\lambda$ ( $d=30\text{mm}$ )	$\gamma/\delta_\lambda$ (理论值)	$\gamma/\delta_\lambda$ (仿真值)
60	0.5	0.147	0.141
30	1	0.73	0.71
20	1.5	2.43	2.45
15	2	8.0	8.1

从仿真结果表 2 可以看出,仿真的额外去除量与理论值基本吻合。虽然仿真的额外去除量与理论计算值基本吻合,但也有少量偏差。我们认为偏差产生主要有两个原因:(1)离散导致的计算误差;(2)仿真二维模型与一维分析模型之间的偏差。其中,离散导致的计算误差又可分为两部分:(1)空间离散并且截断导致的误差,其中束函数的空间离散并截断是误差的主要来源;(2)数值离散导致的数值截断误差。

## 5 结 论

光学镜面离子束加工可达性分析结果表明,对于高斯型的束函数,驻留函数解总是存在的。但是面形误差频率越高,驻留函数解越大,去除面形误差时去除的额外材料越多,而且额外的材料去除量随着离子束径和空间误差波长之比( $d/\lambda$ )的增加而指数增加。当 $d/\lambda=0.5$ 时,额外材料去除量为15%,还是可以接受的;当 $d/\lambda=1$ 时,额外材料去除量迅速上升到73%,该值已经很难被接受了。理论分析和仿真结果表明,为了优化加工过程, $d/\lambda$ 应该小于0.5。

离子束加工可达性分析对离子束加工工艺求解及工艺优化具有重要的指导意义。除了可以利用加工可达条件选择适合加工的离子束径之外,根据驻留函数解存在的条件,可以知道要使驻留函数有解,则期望去除量函数的谱值在频率无穷大时必须趋于零,且其下降速率要快于束函数谱值的下降速率。根据这一条件,可以提出修改期望去除函数的方法,使不满足驻留函数解存在的

期望去除函数修正为满足驻留函数解存在的期望去除函数。一个很自然的修正方法就是对期望去除函数进行滤波,滤波有两个优点,一是可以消除高频量测噪声,二是可以减小驻留函数解的数值或者说减小额外加工去除量。驻留函数解存在条件同时对选取滤波器参数提供了指导。

离子束驻留函数解存在条件除了可以指导修正期望去除函数之外,也可以指导构造束函数。从驻留函数解存在条件可以看出束函数的谱越丰富,则该束函数对高频误差的去除能力就越强。例如当束函数为脉冲函数时,其包含的谱最丰富,其对高频误差的去除能力最强,理论上可以消除一切频率的误差。

本文主要分析讨论了离子束垂直入射,束函数呈高斯形状且束函数形状空间不变(Spatially Invariant)时的加工可达性。当离子束以一定角度入射时,束函数将不再是高斯形状;当考虑束函数与被加工表面的面形有关系时,束函数将不再是空间不变的。对于这两种情况的加工可达性问题还有待进一步分析研究。

## 参考文献:

- [1] WILSON S R, MCNEIL J R. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces[J]. *SPIE*, 1987, 818: 320-324.
- [2] WILSON S R, REICHER D W, MCNEIL J R. Surface figuring using neutral ion beams[J]. *SPIE*, 1988, 966: 74-81.
- [3] ALLEN L N, 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: 192-204.
- [4] ALLEN L N. Progress in ion figuring large optics[J]. *SPIE*, 1994, 2428: 237-247.
- [5] FRUIT M, SCHINDLER A, HANSEL T. Ion beam figuring of SiC mirrors provides ultimate WFE performances for any type of telescope[J]. *SPIE*, 1999, 3739: 142-154.
- [6] GAILLY P, COLLETTE J P, TOCK J P, *et al.*. Ion beam figuring of small BK7 and Zerodur optics: thermal effects[C]. *THE EUROPTO Conference on Optical Fabrication and Testing, Berlin, Germany*, 1999.
- [7] TOCK J P, COLLETTE J P, GAILLY P, *et al.*. Figuring sequences on a super-smooth sample using ion beam technique[C]. *THE EUROPTO Conference on Optical Fabrication and Testing, Berlin, Germany*, 2000.
- [8] CARNAL C L, EGERT C M, HYLTON K W. Advanced matrix-based algorithm for ion beam milling of optical components[J]. *SPIE*, 1992, 1752: 54-62.
- [9] 王孝坤,张学军,王丽辉,等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 527-532.  
WANG X K, ZHANG X J, WANG L H, *et al.*. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 527-532. (in Chinese)
- [10] 牛海燕,张学军.  $\phi 124$  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)
- [11] 侯溪,伍凡,杨力,等. 环形子孔径拼接检测大口径非球面镜的规划模型及分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):

207-212.

WU X, WU F, YANG L, *et al.*. Layout model and analysis of subaperture stitching technique for testing large aspheric mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):207-212. (in Chinese)

- [12] 彭小强, 戴一帆, 李圣怡, 等. 基于矩阵的回转对称非球面磁流变抛光驻留时间算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(3):89-92.
- PENG X Q, DAI Y F, LI S Y, *et al.*. Dwell time algorithm for MRF of axis-symmetrical aspherical parts[J]. *J. Natl. Univ. Def. Technol.*, 2004, 26(3):89-92. (in Chinese)
- [13] 王贵林. SiC 光学材料超精密研抛关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学博士论文, 2002.
- WANG G L. A study on key techniques in ultra-precision lapping and polishing for optical SiC materials[D]. *National University of Defense Technology, Changsha*, 2002. (in Chinese)
- [14] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- ZHOU M Y. *Deconvolution and signal recovery*[M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2001. (in Chinese)
- [15] 李睿凡, 郭学彬, 瞿安连. 基于奇值分解的三维光学切片显微图像恢复算法研究[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(3):212-215.
- LI R F, GUO X L, QU A L. Image restoration algorithms based on singular value decomposition of 3-D optical sectioning microscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3):212-215. (in Chinese)
- [16] 成礼智, 王红霞, 罗永. 小波的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- CHEN L Z, WANG H X, LUO Y. *Theory and application of wavelet*[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [17] 许树新, 赵继, 王洪刚. 自由曲面数控加工中刀具破损的小波分析[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(4):360-364.
- XU S X, ZHAO J, WANG H G. Analysis of tool breakage in CNC manufacturing using wavelet transform[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(4):360-364. (in Chinese)
- [18] HANSEN P C. Truncated singular decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank[J]. *J. Sci. Comput.*, 1990, 11(3):503-518.

**作者简介:**周 林(1979—),男,分别于 2001 年和 2003 年在国防科技大学获得学士学位和硕士学位,现为该校博士研究生,主要研究方向为光学加工。E-mail:zhoulin\_cn@sohu.com