

文章编号: 0253-2239(2010)01-0192-06

光学元件离子束加工驻留时间优化求解

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 100049

摘要 为了实现光学元件的高精度加工,对离子束加工过程中关键的驻留时间求解算法进行了研究。通过分析离子束加工过程的基本原理,将传统的驻留时间反卷积求解过程转化为求解矩阵方程过程。在将正则化加权因子引入矩阵方程的基础上,又引入额外加工余量这一新的参量,增加了解的自由度,从而扩大了驻留时间解的搜索范围,同时将 Gerchberg 带限外插算法应用于初始面形的优化延拓中,保证了全孔径范围内面形精度一致。实例计算 $\phi 50$ mm 的平面光学元件表明,面形精度从初始的均方根值为 0.5747λ ,峰谷值为 2.3706λ ($\lambda = 632.8$ nm)收敛到全孔径范围内的均方根值为 0.001λ ,峰谷值为 0.0115λ 。由此可见该优化求解过程可有效地求解出驻留时间,为离子束加工过程提供了有力的保障。

关键词 光学制造;驻留时间;矩阵方程;最小二乘正交分解算法;离子束加工

中图分类号 TH161 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0192

Optimized Dwell Time Solution for Optics in Ion Beam Figuring

Wu Jianfen^{1,2} Lu Zhenwu¹ Zhang Hongxin¹ Wang Taisheng^{1,2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The key dwell time solution algorithm in ion beam figuring (IBF) was investigated to get the high-precision optical surface. With the principle analysis of the IBF process, the deconvolved process of dwell time solution was transferred to a dwell time matrix equation. Except the regularization weight fraction, another variable, that is extra removal amounts, was introduced to the dwell time matrix equation to expand the freedom of dwell time solution, so the dwell time solution could be found with larger range. With the Gerchberg band limited extrapolation algorithm for initial surface expansion, the high-precision surface could be gotten within full aperture range. The example calculation of $\phi 50$ mm planar optical surface shows that the final surface precision was reduced to: rms is 0.001λ , PV is 0.0115λ from the initial rms of 0.5747λ , PV of 2.3706λ ($\lambda = 632.8$ nm). The conclusion is that the perfect dwell time solution could be gotten from the revised dwell time matrix equation and initial surface expansion, and so it can be used to instruct the IBF process perfectly.

Key words optical fabrication; dwell time; matrix equation; least squares quadrature resolution (LSQR) algorithm; ion beam figuring

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件磨损、边缘效应、工件负载应力、法向间隙精度要求高等一系列问题,所以作为

一种有效的、灵活的、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^[1~9]。其基本原理是由计算机控制的 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,

收稿日期: 2008-12-29; **收到修改稿日期**: 2009-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(60577004)资助课题。

作者简介: 武建芬(1975—),男,博士研究生,主要从事先进光学元件加工、检测等方面的研究。

E-mail: wjf_85@163.com

导师简介: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事衍射光学、微光学加工等方面的研究。

E-mail: luzw@ciomp.ac.cn

在离子束相对于待加工光学元件运动过程中,惰性离子束和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,期望的面形可以被加工出来。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函数和驻留时间函数的卷积^[3,4],其中驻留时间函数的求解是离子束加工过程的关键步骤。常用的驻留时间求解方法有傅里叶逆变换法^[10,11]、迭代求解法^[11]、线性矩阵求解法^[12]等。傅里叶逆变换法要求离子束驻留点均匀划分,且为保证驻留时间解非负,需多次调整迭代参数^[10,11]。迭代求解法是将原始面形误差数据比例化后作为驻留时间函数带入卷积方程得到新的残留面形误差值,再作为新的驻留时间函数带入卷积方程,如此迭代直到满足残留误差要求。这种方法收敛速度慢,精度不高,且有时会发生面形无法收敛到期望面形的情况^[11]。矩阵方程法是 20 世纪 90 年代发展起来的一种将卷积方程变换为矩阵方程求解的方法,其优点是离子束驻留采样点和面形采样点可以任意划分且可以不一致,通过求解矩阵方程得到驻留时间函数^[12]。不过一般情况下该方程是个病态方程,且解的正负变化范围很大,不能直接作为驻留时间函数用在实际工程中。针对这种情况,文献^[12]引入了正则化加权因子来平衡解的不适定性和残留面形误差的关系;文献^[13]在此基础上给出了一种自适应正则加权因子选择法;文献^[14]则采用截断奇异值法(TSVD)来平衡解的不适定性和残留面形误差的关系。这些基于矩阵方程求解的算法,一般只有一个优化因子,通过找到这个最优的因子来降低解的不适定性得到优化的驻留时间函数解,但是单个优化因子有时不能保证面形收敛。

本文将在建立矩阵方程和引入正则加权因子的基础上,再引入一个新的变量(额外加工余量),给驻留时间的求解增加一个自由度,扩大解的搜索范围。由大型稀疏矩阵求解的最小二乘正交分解(LSQR)算法,可以得到不同正则化加权因子和额外加工余量参量下的驻留时间函数解,进而得到残留面形误差随这两个参量变化的关系图,从中找出最优的、适定的非负驻留时间函数解,使残留面形误差最小。在此基础上从保证全孔径范围面形精度一致的角度出发,将 Gerchberg 带限外插延拓算法^[15]应用到待加工光学元件初始面形假想延拓中,很好地保证了全孔径范围内的残留误差精度一致。

2 驻留时间矩阵方程模型的建立

2.1 离子束单位时间材料去除量函数

为保证离子束加工过程中单位时间材料去除量函数不变,需使离子束垂直入射于光学元件表面。其单位时间材料去除量函数可由离子束作用在一个标准平面光学元件表面一定时间前后的面形差值来测得。基于稳定的离子源技术,单位时间材料去除量函数一般为轴对称的圆高斯函数^[5],可表示为 $A(r) = A_0 \exp(-r^2/\sigma^2)$,其直径定义为 $d = 6\sigma$,半峰全宽(FWHM)为 $2\sqrt{\ln 2}\sigma$ 。

2.2 期望材料去除量函数

期望材料去除量函数可表示为测量所得的待加工光学元件初始面形与加工后期望得到的面形相减:

$$R_d(x_k, y_k) = Z_m(x_k, y_k) - Z_d(x_k, y_k), \quad (1)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, N_r$, N_r 是光学元件面形采样点总数; $Z_m(x_k, y_k)$, $Z_d(x_k, y_k)$ 分别为采样点 (x_k, y_k) 处的测量面形值和期望面形值。

2.3 矩阵方程模型

当离子束按扫描路径和驻留时间函数扫描完光学元件表面所有驻留点后,光学元件表面某点的实际材料去除量为

$$R_a(x_k, y_k) = \sum_{i=1}^{N_t} A(x_k - \xi_i, y_k - \eta_i) t_c(\xi_i, \eta_i), \quad (2)$$

式中 N_t 是离子束驻留光学元件表面的驻留点总数; $A(x_k - \xi_i, y_k - \eta_i)$ 为离子束中心驻留在点 (ξ_i, η_i) 处时,离子束在点 (x_k, y_k) 处的材料去除量; $t_c(\xi_i, \eta_i)$ 为离子束中心在驻留点 (ξ_i, η_i) 处的驻留时间。引入符号表示:

$$R_a(x_k, y_k) = r_{a_k}, R_d(x_k, y_k) = r_{d_k},$$

$$A(x_k - \xi_i, y_k - \eta_i) = a_{ki}, t(x_i, y_i, z_i) = t_i,$$

则(2)式可写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} r_{a_1} \\ r_{a_2} \\ \vdots \\ r_{a_{N_r}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N_t} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N_r 1} & a_{N_r 2} & \cdots & a_{N_r N_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N_t} \end{bmatrix} \quad (3)$$

令(3)式左边等于期望的材料去除量函数,即将驻留时间反卷积求解模型变为驻留时间矩阵方程求解模型,且离子束驻留采样点和面形采样点可以任意划分,其残留面形误差均方根可表示为

$$f_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_r} \left[\sum_{i=1}^{N_t} (a_{ki} t_i - r_{d_k}) \right]^2 / N_r}.$$

3 驻留时间矩阵方程的优化求解

当驻留时间采样点数 N_t 和光学元件面形采样点数 N_r 相等,且矩阵方程(3)中的矩阵 \mathbf{A} 的秩为 N_r 时,矩阵方程(3)理论上有着唯一的精确解。但是一般情况下矩阵 \mathbf{A} 为奇异矩阵,其解幅值变化大且有正有负,对矩阵 \mathbf{A} 的微小变化很敏感,因而具有很大的不适定性,不能直接作为驻留时间函数用于实际工程中。当 $N_t < N_r$ 时,矩阵 \mathbf{A} 的秩小于 N_r ,由于实际面形千变万化,所以矩阵方程(3)中的矩阵 \mathbf{A} 的秩和其增广矩阵的秩也不一定总能相等,也即在 $N_t < N_r$ 这种情况下,矩阵方程(3)应用于实际工程中时也不一定总存在精确解。综上所述,实际工程中由矩阵方程(3)求解驻留时间函数时,必须放弃求精确解的思想。针对这种情况,文献[12]引入了正则化加权因子 P 将矩阵方程(3)变为

$$\begin{bmatrix} r_{d_1} \\ r_{d_2} \\ \vdots \\ r_{d_{N_r}} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N_t} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_r 1} & a_{N_r 2} & \cdots & a_{N_r N_t} \\ P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N_t} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

矩阵 \mathbf{A} 扩展为 $(N_r + N_t) \times N_t$ 矩阵。期望材料去除量列向量扩展为 $(N_r + N_t) \times 1$ 列向量。由方程(4)可见扩展矩阵 \mathbf{A} 的各列向量互不相关,其秩为 N_t ,而其增广矩阵的秩为 $N_t + 1$,也即扩展后的矩阵 \mathbf{A} 的各列向量和扩展后的期望材料去除量列向量线性无关,这对实际工程中任何初始面形和采样点分布成立。这样改进后的矩阵方程(4)彻底变成了一个求解亏秩最小二乘问题,提高了矩阵方程(3)的适定性,其驻留时间解 t_i 应使下式最小:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{N_r} \left[\sum_{i=1}^{N_t} (a_{ki} t_i - r_{d_k}) \right]^2 / N_r + P^2 \sum_{i=1}^{N_t} t_i^2}. \quad (5)$$

可见正则化加权因子 P 的引入相当于在残留面形均方根误差和驻留时间解的能量幅度之间加入一个调节权值。较大的 P 可以降低驻留时间解的能量幅度,但同时相当于减小了残留面形均方根误差值的权值,将引起残留面形均方根误差值变大,这样问题就转化为寻找最优的参数 P 来平衡驻留时间解的不适定性和残留面形均方根误差。但计算表明较小的 P 很难得到非负的驻留时间解,要使所得的驻留时间解非负,常常需要较大的正则化加权因子 P ,

有时会发生面形不收敛的情况。为了用较小的正则化加权因子 P ,既保证降低了解的幅度,得到适定的驻留时间非负解,同时又没导致较大残留面形均方根误差值。提出在光学元件表面各点都引入一个相同的额外材料去除量 γ_0 ,这样其最终面形并不发生变化,矩阵方程(4)可变为

$$\begin{bmatrix} r_{d_1} + \gamma_0 \\ r_{d_2} + \gamma_0 \\ \vdots \\ r_{d_{N_r}} + \gamma_0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N_t} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N_r 1} & a_{N_r 2} & \cdots & a_{N_r N_t} \\ P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{N_t} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其驻留时间函数解 t_i 应使下式最小:

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{N_r} \left[\sum_{i=1}^{N_t} (a_{ki} t_i - r_{d_k} - \gamma_0) \right]^2 / N_r + P^2 \sum_{i=1}^{N_t} t_i^2}, \quad (7)$$

这样驻留时间的解 $\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_{N_t}]^T$ 成为正则化加权因子 P 和额外材料去除量 γ_0 两个自由度的函数。这样就可以为驻留时间函数的求解增加一个自由度 γ_0 ,扩大解的搜索范围。当 $\gamma_0 = 0$ 时(6)式变为(4)式;当 $\gamma_0 = 0, P = 0$ 时(6)式变为(3)式。由矩阵的奇异值分解法(SVD)可以得到矩阵方程(6)的满足(7)式的解 \mathbf{t}_{SVD} 的形式为

$$\mathbf{t}_{\text{SVD}} = \sum_{i=1}^M \frac{\sigma_i \boldsymbol{\mu}_i^T (\mathbf{r}_d + \gamma_0)}{\sigma_i^2 + P^2} \mathbf{v}_i, \quad (8)$$

式中 M 为(6)式中的扩展矩阵 \mathbf{A} 的非零奇异值 σ_i 的个数, $\boldsymbol{\mu}_i, \mathbf{v}_i$ 分别为该矩阵的左右正交奇异矩阵的列向量。离子束在整个光学元件表面各点都均匀扫描一个相同的时间 t_0 后,整个光学元件表面的材料去除量将是一个常量,因此均匀额外材料去除量 γ_0 的引入将使(8)式的解相对于未引入 γ_0 时的解,整体上向正方向有一个平移,也即原来负值的一部分驻留时间解将会变为正值,符合实际工程要求,从而扩大了非负可行解的范围。这样就可以用较小的正则化加权因子 P 得到非负驻留时间解,当然 P 的大小仍需能限制解的幅度,保证解的适定性。由(7)式可见 P 的减小相当于增加了残留面形均方根误差的权重,因此必然会使残留面形误差减小,提高最终面形精度。实际离子束光学加工中,离子束直径相对于待加工光学元件孔径较小,在驻留时间采样点和面形

采样点较多的情况下,矩阵方程中的矩阵 \mathbf{A} 为大型稀疏矩阵。SVD 求解法需较长的计算求解时间,而 LSQR 算法正适合求解这种大型稀疏矩阵方程。将合理变化范围内的 P 和 γ_0 各值代入矩阵方程(6),由 LSQR 算法可得各对参数下的驻留时间解 $t_{LS} = t(P, \gamma_0)$,进而可得残留面形均方根误差 $f_{rms} =$

$$\sqrt{\sum_{k=1}^{N_r} \left[\sum_{i=1}^{N_t} (a_{ki} t_{LS} - r_{dk} - \gamma_0) \right]^2 / N_r}$$

随参数 P 和 γ_0 变化的三维函数图 $f_{rms} = f(P, \gamma_0)$ 。为保证驻留时间解的适定性,同时达到高的面形精度,最终优化参数 P 和 γ_0 参数的选取应满足:1) 驻留时间解 t_{LS} 非负;2) 驻留时间解 t_{LS} 的能量 $\|t_{LS}\|_2^2$ 应小于某个给定的边界值 M ;3) 在满足前两个条件的基础上由 $f_{rms} = f(P, \gamma_0)$ 三维函数图找出使 f_{rms} 满足要求的 P 和 γ_0 组合值。

4 初始面形的优化延拓

4.1 初始面形讨论

由讨论知优化后的驻留时间求解方法,在保证解的适定性的同时,有力的保证了最终的面形精度。但仿真表明在光学元件边缘处,残留面形误差比中心处大,这影响了光学元件在全孔径范围内的精度,而且驻留时间解在光学元件边缘部分变化剧烈。分析其原因有两点:1) 当离子束驻留在待加工光学元件中心部分区域时,整个离子束都作用在光学元件表面,而当驻留在待加工光学元件边缘部分区域时,则有部分离子束作用在光学元件外面。假设离子束在整个光学元件表面都按相同的驻留时间扫描整个光学元件,则在两区域的去除量将不相同,也即离子束在这两区域的材料去除量权重不同,这是在驻留时间求解方程建立前就存在的,后又引入到矩阵方程中。2) 由光学元件边缘面形突变带来的高频成分引起驻留时间函数值在光学元件的边缘部分有剧烈的变化。这不同于 CCOS 接触加工中的边缘效应,在 CCOS 中由于小磨头在光学元件边缘处时,磨头的压力和速度变化导致单位时间材料去除量函数发生变化,从而产生翘边、塌边等边缘效应。离子束加工是一种非接触加工方式,单位时间材料去除量函数不因玻璃的存在与否发生改变。这就为我们解决边缘、中心精度不同和边缘驻留时间解变化剧烈问题提供了依据。我们可以将初始的面形假想延拓一个离子束直径大小,使假想延拓部分的面形与实际光学元件面形“无缝”衔接,成为一个新的优化

初始面形作为初始光学元件面形代入矩阵方程(6),这样就可以使离子束在整个实际光学元件表面都有相同的材料去除量权重,然后摒弃最外层的半个离子束直径区域的驻留时间解,将剩余部分的解作为待加工光学元件的驻留时间解。这样既能保证全孔径范围内精度一致,也能保证驻留时间解在边缘处平滑,同时对实际待加工光学元件表面没有任何影响。

4.2 Gerchberg 带限外插算法

要使光学元件面形延拓一个离子束直径大小,且消除面形衔接不连续带来的高频面形成份,实现“无缝”衔接,需要一个很好的外插数据算法,将 Gerchberg 提出的一维带限外插算法^[15]扩展为二维应用于光学元件面形数据的外插延拓中。其基本原理如下,设 $u(x, y)$ 表示初始面形函数,其实际存在定义域记为 T_{xy} ,扩展后的定义域记为 T_{xy0} ,且初始扩展部分置零; $U(f_x, f_y)$ 表示扩展后的初始面形函数的傅里叶变换,其带限域记为 $\Omega_{f_x f_y}$; $G_{T_{xy}}$, $G_{T_{xy0}}$ 和 $G_{\Omega_{f_x f_y}}$ 分别为定义在 T_{xy} , T_{xy0} 和 $\Omega_{f_x f_y}$ 内的单位函数。则扩展后的 $u(x, y)$ 可表示为

$$u_N(x, y) = \sum_{n=0}^N H^n u(x, y) G_{T_{xy0}}, \quad (9)$$

式中扩展算子 $H = (G_{T_{xy0}} - G_{T_{xy}}) \mathcal{F}^{-1} G_{\Omega_{f_x f_y}} \mathcal{F}$, \mathcal{F} , \mathcal{F}^{-1} 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换。当 N 趋于无穷大时,可实现带限域 $\Omega_{f_x f_y}$ 内数据的“无缝”衔接^[15],实际工程中将面形函数离散化,利用快速傅里叶变换由(9)式计算到一定的 N 值,使其达到一定精度即可。

5 实例计算

实例计算一个 $\phi 50$ mm 的平面光学元件,该光学元件初始加工前面形参数:均方根值为 0.5747λ ,峰谷值为 2.3706λ ($\lambda = 632.8$ nm)。计算用单位时间离子束材料去除函数的参量为,离子束直径 $d = 10$ mm,方差 $\sigma = 5/3$ mm,顶点峰值材料去除量为 $0.158 \lambda/\text{min}$ 。采用线性均匀扫描方式,采样间隔为 1 mm,图 1 为加工前的初始面形三维图,图 2 为单位时间离子束材料去除函数三维图。

为了说明改进方法的优越性,先计算直接将 $\phi 50$ mm 平面光学元件的初始面形减去该面形中负的最小值,使其都变为正值作为期望的材料去除量代入矩阵方程(4)。计算得当 $P = 1.4$ 才能保证所有的驻留时间非负,且该参数下的驻留时间用于面

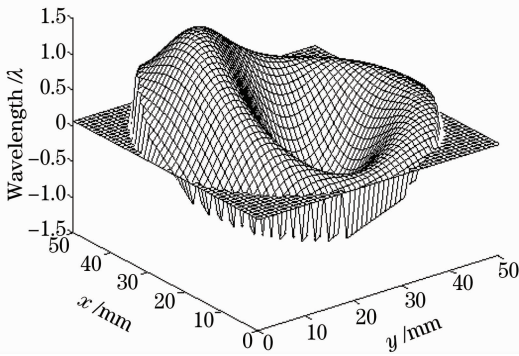


图 1 加工前的面形三维图

Fig. 1 Optical surface before ion beam figuring

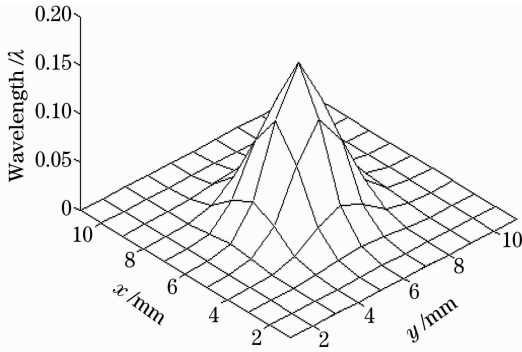


图 2 离子束材料去除函数

Fig. 2 Material removal function of ion beam

形加工后得最终面形精度为均方根值为 0.6925λ , 峰谷值为 1.3274λ 。这比未加工前的面形均方根还大,可见这种情况下单一寻找优化的 P 参数将不能保证加工过程收敛。基于前述的方法,在原期望材料去除量的基础上增加一均匀额外材料去除量,将其作为初始期望的材料去除量代入矩阵方程(6),一般情况下均匀额外材料去除量的选取应小于待加工光学元件均方根误差的一半,且没有引起总加工时间大的增加,如果不能满足上面两个条件则说明用于该光学表面加工的离子束直径偏大,不能保证加工后高的面形精度。本例选取 $\gamma_0 = 0.1 \lambda$, 计算

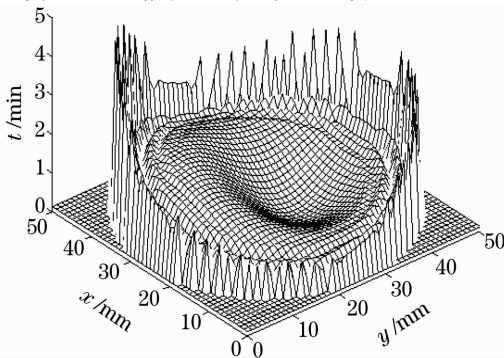


图 3 驻留时间解

Fig. 3 Dwell time solution

得当 $P = 0.045$ 时即可保证所有驻留时间非负,且该参数下的驻留时间用于面形加工后得面形精度为均方根值为 0.0157λ , 峰谷值为 0.2106λ 。面形精度得到极大的提高且收敛因子很大。图 3 为该参数下的驻留时间解三维图,图 4 为加工后的光学元件面形三维图。

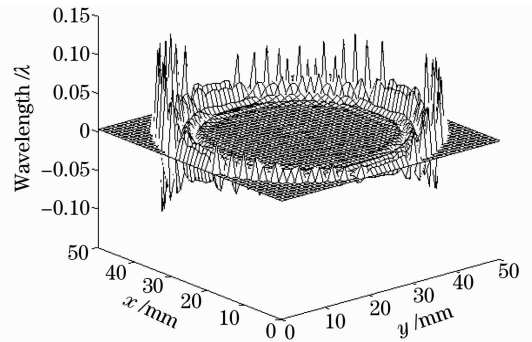


图 4 加工后的面形三维图

Fig. 4 Optical surface after ion beam figuring

可见在引入正则化加权因子 P 的基础上再引入均匀的额外材料去除量 γ_0 可以极大地扩展驻留时间的搜索范围有力保证面形精度。但是由图 3、图 4 也可可见在光学元件的边缘部分驻留时间和最终面形均有剧烈的变化,且边缘部分面形精度比中心部分低。驻留时间的剧烈变化要求离子束控制系统必须有较快的反应速度,这可能出现控制系统不能实现的情况,边缘部分面形精度低对拼接光学元件的面形加工是不利的。为此用初始面形延拓方法将图 1 所示的初始待加工面形延拓一个离子束直径作为初始待加工面形,并引入均匀额外材料去除量($\gamma_0 = 0.1 \lambda$),将其作为期望的材料去除量代入矩阵方程(6)。图 5 为延拓一个离子束直径后的初始待加工面形三维图,图 6 为延拓半个离子束直径后的驻留时间解三维图,此时 $P = 0.03$, $\gamma_0 = 0.1 \lambda$ 。图 7 为加工后的光学元件实际面形部分三维图,其均方根值为 0.001λ , 峰谷值为

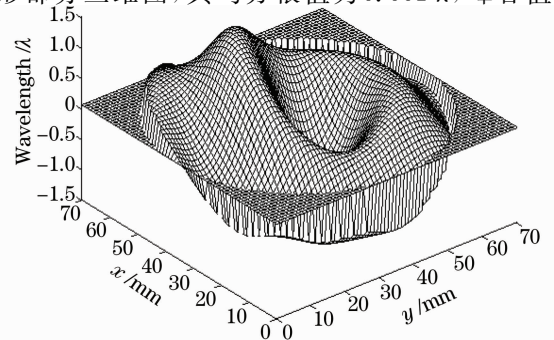


图 5 延拓一个离子束直径后的面形三维图

Fig. 5 Optical surface after expanding an ion beam diameter

0.0115 λ 。由图 6 和图 7 可见,将面形延拓和均匀额外去除量都引入矩阵方程(6)后,不仅极大地保证最终面形精度且在光学元件全孔径范围内面形精度一致,完全符合目前光学拼接元件的要求,而且驻留时间在延拓半个离子束直径后的范围内基本平稳,消除了边缘部分的剧烈变化。

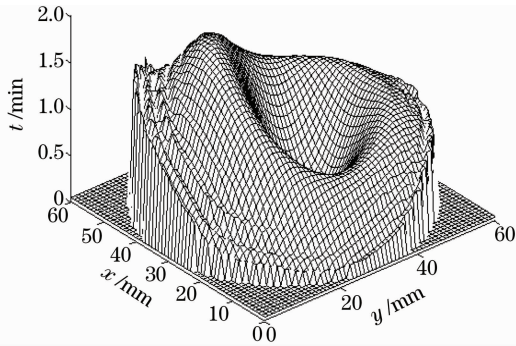


图 6 延拓半个离子束直径后的驻留时间解
Fig. 6 Dwell time solution after expanding half ion beam diameter

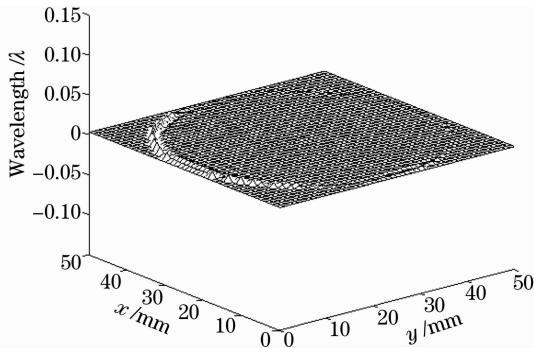


图 7 加工后的实际面形部分三维图
Fig. 7 Factual optical surface after ion beam figuring

6 结 论

在研究已有驻留时间求解方法的基础上,根据离子束加工技术的原理和特点,将传统的驻留时间反卷积求解过程转化为求解矩阵方程过程,使面形采样点和驻留采样点可以任意划分。在将正则化加权因子引入驻留时间矩阵方程的基础上,又引入额外加工余量这一新的参量,在保证驻留时间适定的同时,扩大了解的搜索范围。另外从保证全孔径范围内面形精度一致角度出发,将 Gerchberg 带限外插算法应用于初始面形的优化延拓,保证了全孔径范围内面形精度一致。实例计算 $\phi 50$ mm 的平面光学元件表明,面形精度从初始的均方根值为 0.5747 λ ,峰谷值为 2.3706 λ ($\lambda = 632.8$ nm) 收敛到全孔径范围内的均方根值为 0.001 λ ,峰谷值为 0.0115 λ 。由此可见引入额外加工余量和初始面形

的优化延拓方法后求得的驻留时间解,可以很好地保证光学元件的最终面形精度,该驻留时间求解方法可以有效地指导离子束加工过程。

参 考 文 献

- 1 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of Cassegrain systems primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767
付联效, 吴永刚, 李兴隆等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 764~767
- 2 Zhang Wei, Li Hongyu, Yu Guoyu. Current situation of ultra-precision bonnet polishing key technology of optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 27~34
张伟, 李洪玉, 于国戎. 光学元件超精密气囊抛光关键技术研究现状[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 27~34
- 3 S. R. Wilaon, J. R. Mcneil. Neutral ion beam figuring of large optical surfaces [C]. *SPIE*, 1987, **818**: 320~322
- 4 S. R. Wilson, D. W. Reicher, C. F. Kranenberg *et al.*. Ion beam milling of fused silica for windows fabrication[C]. *SPIE*, 1990, **1441**: 82~85
- 5 N. A. Lynn, E. K. Robert, S. L. Timothy. Surface error correction of a Keck 10 m telescope primary mirror segment by ion figuring[C]. *SPIE*, 1991, **1531**: 195~204
- 6 M. S. Prashant, R. F. Michael, S. Guido *et al.*. Ion-beam machining of millimeter scale optics [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(4): 599~611
- 7 A. Lutz, S. Fredi, G. K. Joer *et al.*. Flatness correction of NZTE mask blank substrates[C]. *SPIE*, 2001, **4343**: 646~653
- 8 G. Mauro, C. Paolo, S. Marco *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[C]. *SPIE*, 2004, **5488**: 475~480
- 9 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1131~1135
戴一帆, 周林, 解旭辉等. 应用离子束进行光学镜面确定性修行的实现[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1131~1135
- 10 Li Quansheng, Cheng Ye, Cai Fuzhi *et al.*. Dwell time algorithm in computer controlled optical surfacing [J]. *Optical Technique*, 1999, **3**: 56~59
李全胜, 成晔, 蔡复之等. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J]. *光学技术*, 1999, **3**: 56~59
- 11 Yang Li. *Advanced Optical Manufacture Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2001
杨力. *先进光学制造技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- 12 L. C. Charles, C. M. Egert, W. H. Kathy *et al.*. Advanced matrix-based algorithm for ion beam milling of optical components [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 54~62
- 13 Deng Weijie, Zheng Ligong, Shi Yali *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Optical Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1009~1015
邓伟杰, 郑立功, 史亚莉等. 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
- 14 Zhou Lin, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Model and method to determine dwell time in ion beam figuring [J]. *Nanotechnol. Precision Engineering*, 2007, **5**(2): 107~112
- 15 J. Robert, Marks. Gerchberg's extrapolation algorithm in two dimensions [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(10): 1815~1820