

文章编号 1004-924X(2009)01-0065-07

离轴非球面数控抛光路径的自适应规划

邓伟杰^{1,2}, 郑立功¹, 史亚莉^{1,2}, 王孝坤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 研究生院, 北京 100039)

摘要:根据质点系平衡的加权平均思想,提出了一种新的适用于离轴非球面数控抛光的路径规划方法。根据影响抛光结果的因素,给出了权因子的组成元素及其计算方法,包括常数、加工残差分布以及与工件边缘的距离,并给出了权因子间影响系数的粗略确定方法。对一组面形数据进行虚拟加工,与常规的 X-Y 直角坐标系型加工路径相比,面形均方根收敛率从 0.36 提高到 0.62,其它各项数值的表现也均优于常规方法。最后,对算法中的一些问题做了简要的说明和讨论。这种规划方法原理简单,效果显著,满足实际使用要求。

关键词:非球面加工;离轴非球面;抛光路径;自适应规划算法

中图分类号:TQ171.68 **文献标识码:**A

Adaptive programming algorithm for generating polishing tool-path in computer controlled optical surfacing

DENG Wei-jie^{1,2}, ZHENG Li-gong¹, SHI Ya-li^{1,2}, WANG Xiao-kun¹, 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. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: In order to improve the fabrication results of polishing off-axis aspheric in Computer Controlled Optical Surfacing(CCOS), a novel algorithm named adaptive programming model to generate a polishing tool-path is discussed based on the balance principle of particle system and the thought of averaging power. Considering the factors influencing the polishing results, the power values are composed of three elements including the constants, error distribution and the dwell distance of work-piece edge. The influence coefficients between the power elements are estimated and simply computed. And then, a groups of error data are simulated with actual parameters using the matrix-based algorithm by two different tool-paths. The first one is X-Y uniform spacing model in common use, and the other is adaptive programming model. The contrasted results show that most of error results of the adaptive programming model are much better than that of the common one, especially the rms convergence rate is improved from 0.36 to 0.62. In the end, several questions on the algorithm are discussed and explained briefly, result show that the theory of the algorithm is simple and exercisable,

收稿日期:2008-03-21;修订日期:2008-04-28.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新基金资助项目

and can satisfy the practical requirement as well.

Key words: aspheric processing; off-axis aspheric; polishing tool-path; adaptive programming algorithm

1 引言

随着成像光学系统的发展,离轴非球面在高分辨率空间传感器^[1]中的应用日益广泛。离轴光学系统的特点是没有中心遮拦,因此系统 MTF 较同轴光学系统能有大幅度提高。计算机控制光学表面成形技术^[2-3](CCOS)是 20 世纪 70 年代发展起来的一项新型光学加工技术,该技术成功地解决了大口径、高精度非球面特别是离轴非球面的加工难题,在国防军事、航天等领域有着广泛的应用。

但是,离轴非球面的形状通常是非回转对称的,所以,适用于回转对称非球面加工的抛光路径规划方法,如同心圆以及螺旋线等,无法用于离轴镜的抛光。在离轴非球面的抛光中,X-Y 直角坐标系型加工路径^[4]是一种常用的路径规划方法,它的优点是适用性广、变量较少、生成方便。总的来说,现阶段的抛光路径都是只考虑工件外形而忽略了面形残差的分布对加工结果的影响,这显然是不合理的。本文从影响抛光结果的因素出发,借鉴质点系平衡的加权平均思想,将所需的驻留点密集程度表示为权因子,并建立了求解驻留点分布的非线性方程,然后迭代求解出了驻留点分布及其路径。最后,对实际抛光中的一组面形残差数据进行了虚拟加工^[5],通过 X-Y 直角坐标系型路径和本文提出的新方法规划出的路径两种路径的结果对比,说明后者有效地提升了加工后的面形质量。

2 基本原理

如图 1 所示的质点系,质点 m_1, m_2, m_3 分别在 x 轴上的 x_1, x_2, x_3 处,若质点系的质心在 m_2 处,则有

$$x_2 = (m_1 x_1 + m_3 x_3) / (m_1 + m_3), \quad (1)$$

质心坐标是邻近质点位置坐标的加权平均值。 x_2 的位置会趋近于质量较大的点,这就是最简单的加权计算^[6],质量 m_1, m_3 就是图 1 系统的权重。

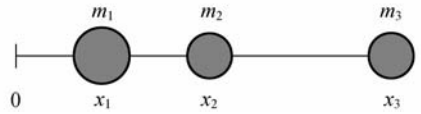


图 1 质点系示意图

Fig. 1 Schematic of particle system

因此,对于二维分布的质点系,假设位置为 (x_i, y_i) 处的质量为 m_i ,则所有质点的集合为 $D = \{d_i | i = 1, 2, \dots, M\}$,式中 $d_i = (x_i, y_i, m_i)$ 。

令 (x_i, y_i) 相邻质点的集合为 S_i ,且 $d_i \notin S_i$ 。若有 $d_j \in S_i$,则 $d_i \in S_j$ 。

每个 d_i 和它的邻域 S_i 构成子质点系,其平衡条件是 d_i 为对应邻域 S_i 的质心。当子质点系都达到平衡时,总系统平衡。

因此,质点系中的任意 (x_i, y_i) 都满足方程:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{\sum_{d_j \in S_i} x_j m_j}{\sum_{d_j \in S_i} m_j} \\ y_i &= \frac{\sum_{d_j \in S_i} y_j m_j}{\sum_{d_j \in S_i} m_j} \end{aligned} \right\} \forall d_i \in D. \quad (2)$$

由式(2)求解各质点坐标时,各个点的位置和它的邻域是相互影响变化的,因此方程是非线性的,需采用数值迭代方法进行求解。

令矢量 $\mathbf{v}_i = (x_i; y_i)$,则迭代计算式可表示为:

$$\mathbf{v}_i^{(t+1)} = \sum_{d_j \in S_i} m_j^{(t)} \mathbf{v}_j^{(t)} / \sum_{d_j \in S_i} m_j^{(t)} \quad \forall d_i \in D, t \text{ 为迭代次数}. \quad (3)$$

在迭代过程中,系统要实时更新网格节点位置矢量。迭代的收敛准则可以有以下几种方式:

1. $t \leq N$, N 为给定的迭代次数。
2. 当 \mathbf{v}_i 满足 $\|\mathbf{v}_i^{(t+1)} - \mathbf{v}_i^{(t)}\|_2 / \|\mathbf{v}_i^{(t)}\|_2 \leq \epsilon$ 时,停止迭代。 ϵ 为给定的精度, $\|\cdot\|_2$ 为 2-范数。

3 自适应规划算法

常用的离轴非球面加工路径是 X-Y 直角坐

标系型抛光路径,它不考虑加工过程中的残差分布,驻留点的密度从参数域上看是均匀的。本文在 X - Y 直角坐标系型抛光路径的基础上,构造出可以表示驻留区域需要的密集程度的权因子,自适应迭代求解出驻留点分布及其路径。

3.1 权因子的构造

在抛光路径自适应规划中,每个驻留点的权值代表质点系中的质量。不过,每个驻留点的权值和它的位置有关,即迭代求解系统非线性方程的过程中,驻留点的权值也会随之改变。

首先,必须考虑抛光阶段的面形残差分布对抛光结果的影响。残差值大的区域其驻留点应该密一些,残差值小的区域其驻留点应该稀疏。即面形残差和权因子的值是成正比的,可以直接参考面形残差分布。由于干涉仪获得的是工件面形的离散点残差,要获得任意点的面形残差,需采用插值和拟合两种方式求得。考虑到加工的实际作用,CCOS 去除的残差大部分是低频的,因此,采用多项式拟合的方式,既不影响加工参量的理论计算,又可以过滤一部分测量噪声。

其次,由于抛光盘对工件边缘进行抛光时行程所限的不充分卷积效应,边缘区域的驻留点也应该适当加密来进行补偿。离工件边缘近的区域权值应增大,且驻留点离边缘的距离较大而抛光盘没有露边时,可以不考虑边缘部分的影响。

另外,由于实际抛光可以改善工件表面的粗糙度,所以,抛光驻留点不能在某一区域过于集中,以免出现没有被抛光的区域,即使这一区域不需要材料去除。因而,构造的权因子需要有一个常数项来调节驻留点位置对面形残差以及边缘效应的敏感程度。

综上,令 $z(x, y)$ 为 (x, y) 处的残差值, r 为抛光盘半径, e 为偏心距, L_e 为驻留点与边缘的距离,本文算法所构造的权因子如下:

$$P = 1 + p_1 + p_2;$$

$$\text{其中, } p_1 = \frac{z(x, y) - \min(z(x, y))}{\max(z(x, y)) - \min(z(x, y))}, \quad (4)$$

$$p_2 = \begin{cases} \frac{r+e-L_e}{r+e}, & L_e < (r+e) \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (5)$$

3.2 权因子的改进

在计算中发现,简单地把权因子 P 中各项等比例叠加,规划得到的驻留点分布对应的计算结

果并不够理想,因此,需要对其进行改进。给 p_1 , p_2 赋影响系数 q_1, q_2 来调整各项之间的比例。因此,有:

$$P = 1 + q_1 \cdot p_1 + q_2 \cdot p_2. \quad (6)$$

影响系数 q_1, q_2 的最优数值的计算还没有找到较好的方法,如果对计算时间没有要求,可以使用遗传算法等优化方法进行搜索。

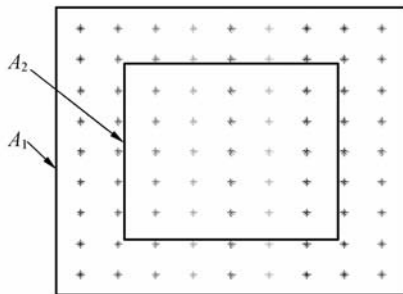


图 2 计算 q_2 的示意图

Fig. 2 Schematic of computing q_2

q_1 相对常数项的大小决定了驻留点分布对面形残差的敏感度,值越大,驻留点就越集中。一般视面形情况可取 2~8 之间的数值,面形残差分布越平缓, q_1 取值越小。 q_2 对 q_1 的比值表明了边缘区域需要的相对驻留密度。如图 2 所示, A_1 为工件整个面形的面积, A_2 为内部无边缘效应区域的面积。令驻留点落在 A_1, A_2 内的数量分别为 m_1, m_2 , 且 s_1, s_2 分别为 A_1, A_2 内的材料去除量,则有:

$$\frac{q_1}{q_2} = \left(\frac{s_2}{s_1 - s_2} \right) \left(\frac{m_1 - m_2}{A_1 - A_2} \right) \left(\frac{A_2}{m_2} \right). \quad (7)$$

通过 q_1 的取值可设定规划结果中驻留点分布的集中程度,然后按式(7)计算得到 q_2 。本节所述的粗略估计的方法得到的结果也是满足要求的,并且计算简便。

3.3 迭代求解

可见,权因子的作用类似于原理部分所叙述的质点系中的质量。不过,与质量值恒定不同,权因子的值是随着驻留点的位置不同而变化的。由前两节公式可以计算任意驻留点的权值,因而可以对驻留点进行迭代求解。首先,规划出等间隔的驻留点矩阵,计算各个驻留点的权,然后进行自适应迭代。每次迭代除了更新位置坐标外,还需要重新计算权因子矩阵。为了计算简便,每个点的邻域取它的四邻域。在求解时必须加上一些边

界条件,例如:有效驻留区域的边角点位置总是不变;其它的边界点只能沿着边界移动;域中的内部点可以自由移动。

可以列出以下方程迭代求解,其中 (i, j) 为驻留点在点阵中的索引。

$$\begin{cases} x_{i,j}^{t+1} = \left(\sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} P_{m,n}^t \cdot x_{m,n}^t \right) / \sum P_{m,n}^t \\ y_{i,j}^{t+1} = \left(\sum_{m=i-1}^{i+1} \sum_{n=j-1}^{j+1} P_{m,n}^t \cdot y_{m,n}^t \right) / \sum P_{m,n}^t \end{cases}, \quad (8)$$

令矢量 $\mathbf{v}(i) = (x_i; y_i)$, 当 $\| \mathbf{v}^{(t+1)} - \mathbf{v}^{(t)} \|_2 / \| \mathbf{v}^{(t)} \|_2 \leq \epsilon$ 时, 停止迭代, ϵ 为设定的精度。

3.4 算法流程

综上,图 3 为实际加工中的路径规划的操作步骤。从干涉仪获得抛光阶段面形残差分布后,需要进行多项式拟合来达到低通滤波以及残差分布解析化,这一步可以采用最小二乘法或者 Householder 变换。经验设定 q_1 以及加工参数后,就可以根据式(4)(5)(6)(8)迭代计算得到驻留点分布和抛光路径。

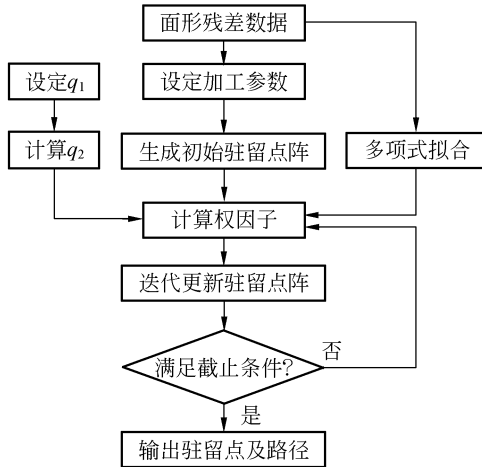


图 3 自适应规划算法的计算流程

Fig. 3 Flow chart of adaptive programming algorithm

4 仿真实验

本文所提出的适用于离轴非球面加工的抛光路径规划方法,充分考虑了对加工结果影响较大的因素,如面形残差分布、边缘不充分卷积效应等,因此,与以前常用的 X-Y 直角坐标系型加工路径相比,其加工结果有一定的提升。本章选取了抛光阶段的实际测量所得的面形数据(图 4)进

行虚拟加工。工件为 $640 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 的体育场型,初始面形残差为 PV:485.4 nm, RMS:63.1 nm。使用平转动的工作方式,选择的抛光盘直径为 60 mm,偏心距为 10 mm。为了控制加工边缘区域时出现的压强变化,抛光盘露边最多不超过直径的 $1/3$,这在某种程度上加剧了边缘不充分卷积的影响。分别采用常规方法规划的加工路径(X-Y 直角坐标系型)以及本文方法所得路径进行虚拟加工(见图 5)。常规方法的驻留点间隔均匀,间隔值为 $d=8 \text{ mm}$,共 2 042 个驻留点。本文算法的驻留点数量和 X-Y 直角坐标系型路径相同。系数 q_1 取值为 4,计算得到的 q_2 值为 5.6,经过 322 次迭代后,位置差矢量 2-范数小于 $\epsilon = 10^{-3}$ 后符合截止条件,输出路径后完成规划。

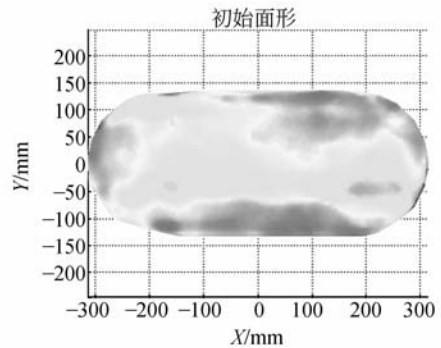
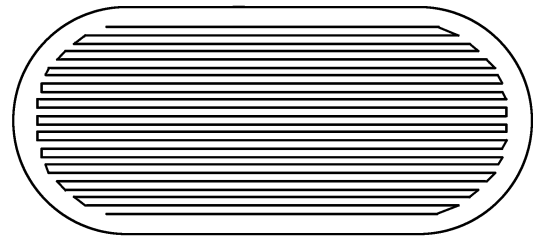


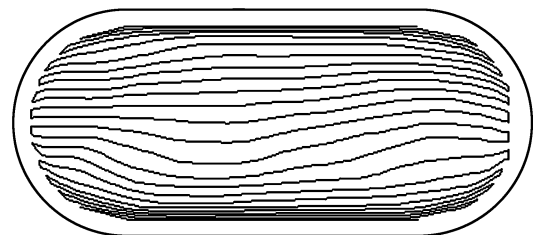
图 4 初始面形残差分布

Fig. 4 Distributions of initial surface errors



(a) X-Y 直角坐标系型

(a) X-Y uniform spacing model



(b) 自适应规划型

(b) Adaptive programming model

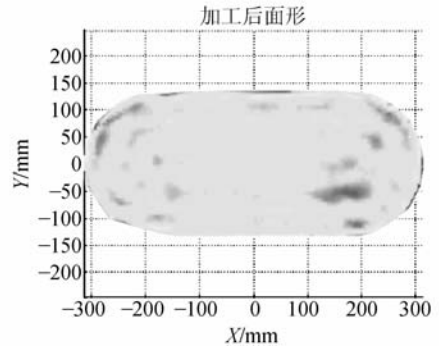
图 5 两种抛光路径

Fig. 5 Two different polishing paths

与常规方法(X-Y 直角坐标系型)相比,在驻留点数目相同的情况下,对不同驻留区域的驻留点稀疏分布按实际要求做出了自适应优化,残差值较小区域的驻留点明显减少,边缘及残差值较大区域的驻留点得到加密。在采用同样加工参数的情况下,加工结果得到了很大的改善,虚拟加工结果如图 6。

常规方法的虚拟加工结果(图 6(a))“印迹”十分明显,主要原因是抛光路径过于规则,而与驻留点数量关系不是很大。这是常规方法比较突出的缺点。自适应规划方法(图 6(b))的“印迹”明显减少,这也得益于它的不规则性。

两种抛光路径对应的结果对比见表 1。收敛率的定义为 $C=(\delta_1-\delta_2)/\delta_1$; δ_1, δ_2 分别为加工前



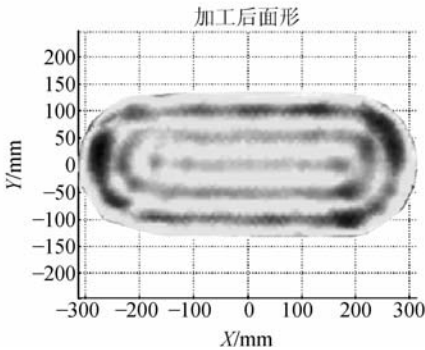
(b) 自适应规划型

(b) Adaptive programming model

图 6 两种抛光路径对应的虚拟加工结果

Fig. 6 Results of two different polishing paths

后的面形残差参数,如 PV,RMS 等。由于面形数据被二次采样,表中中频残差是指空间波长在 6.21~33 mm 范围内的误差。其近似计算方法是:面形结果中扣除多项式拟合得到的低频误差后的误差信息就是中频残差^[7]。因工件形状更接近于矩形,所以使用 Rectangular-Zernike 多项式^[8]进行拟合,结果表明中频残差被很好地抑制。表中第 4 项所指的边缘区域是指与工件边缘距离 $<(r+e)$ 的区域。表中第 5 项去除量比定义为实际去除量与输入面形残差量的比值,说明本文算法在提升抛光结果的同时并没有增加额外去除量。



(a) X-Y 直角坐标系型

(a) X-Y uniform spacing model

表 1 两种抛光路径的虚拟加工结果对比

Tab. 1 Results of two different polishing paths

	PV 收敛率	RMS 收敛率	中频残差 RMS/mm	边缘区域 RMS/mm	去除量比
(a) 常规方法	0.21	0.36	22.3	54.3	1.002
(b) 本文方法	0.41	0.62	10.2	34.1	0.992

5 讨论

5.1 迭代的收敛性

列出 3.3 节所示的非线性方程后,需要使用迭代计算最后的驻留点分布。每次迭代更新的数据为位置矢量,权因子矩阵 P 也将随之而变化,因而,很难从理论上去证明本文方法的绝对收敛性。

图 7 所示为上章路径规划时,每一步迭代对应的驻留点位置变化量的范数。大量的仿真试验

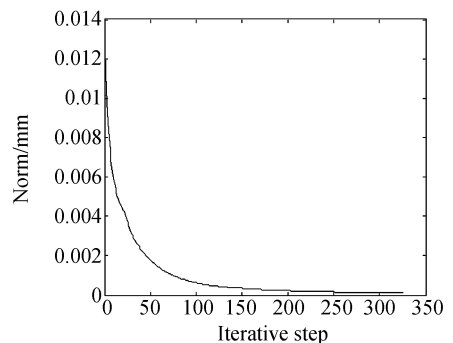


图 7 每步迭代对应的范数值

Fig. 7 Norm value of every iterative step

表明,对于中频误差较小面形,本文算法是能够保证收敛的。从另一个方面来说,如果中、高频误差占面形残差的绝大部分,加工时就应该采用大抛光盘对表面进行全面平滑,这时不以面形收敛率为目的,权因子应该重新构造,故不在本文的讨论范围内。总的来说,对于以低频残差为主的分布,本文算法是可以收敛的。

5.2 可操作性

本文算法最后输出的驻留点分布,改变了其在参数域上的均匀性,提升了最后加工的质量。但是,随之而来的是改变了路径的规则性。经研究,初始驻留点阵为两个分别对应 X 坐标和 Y 坐标的方阵时,在迭代时邻域通过矩阵索引查找,因此,各点的邻域不发生变化,点间的相对位置也不变。即实际数控加工驻留点的加工顺序和 X-Y 直角坐标系型路径一致,不存在杂乱交叉的现象。

另一个问题就是抛光路径长度,即抛光盘从驻留点移动到它的下个驻留点所移动距离的总和。路径长度过大会使加工时间浪费在点间的移动上,降低加工效率。以上章的结果为例,常规方法(X-Y 直角坐标系型)的路径长度为 1.6416×10^4 mm,本文方法的路径长度为 1.6860×10^4 mm。即本文方法的路径长度比常规方法长

2.6%,这个结果是完全可以接受的。

6 结 论

常规的用于离轴非球面加工的 X-Y 直角坐标系型加工路径,只是根据工件的外形进行规划,有很大的局限性。经验表明,面形残差值大的区域以及边缘区域需要更大的驻留密度。因此,本文根据质点系平衡的加权平均思想,提出了一种新的 CCOS 数控抛光路径的规划方法,根据实际面形改变驻留点的分布密度,构造出了可以表示驻留区域所需密集程度的权因子,自适应迭代求解出了驻留点分布及其路径。对一组抛光阶段的面形残差数据进行了对比仿真实验,结果表明:与常规方法相比,本文方法的加工结果有较大的提升,尤其是 PV 收敛率和 RMS 收敛率,分别从 0.21 和 0.36 提高到 0.41 和 0.62。

在面形残差主要组成为低频误差时,本文算法的结果是可行且效果显著的。以中、高频误差为主的面形残差,需要重新构造能够代表驻留需求的权因子,这也是需要进一步探讨的内容。本文所述的自适应规划方法对于点驻留方式的离子束抛光^[9]也同样是适用的。

参考文献:

- [1] 金光,张亮,胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. 光学精密工程, 2007,15(2):155-159. JIN G, ZHANG L, HU F SH. Investigation on space optical system of high F number and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(2):155-159. (in Chinese)
- [2] ZIMMERMAN J. Computer-controlled optical surfacing for off-axis aspheric mirrors [J]. *SPIE*, 1990,12(36):663-668.
- [3] JONES R A. Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion [J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(6):785-790.
- [4] 程灏波,张学军,郑立功. 离轴非球面加工、检测轨迹优化研究[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 247-250. CHENG H B, ZHANG X J, ZHENG L G. Optimizing the moving-orbit for off-axis aspheric manufacturing and testing [J]. *Optical Technology*, 2003, 29(2): 247-250. (in Chinese)
- [5] 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.

DENG W J, ZHENG L G, SHI Y L, *et al.*. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1009-1015. (in Chinese)

- [6] LI S Z. Adaptive sampling and mesh generation [J]. *Computer Aided Design*, 1995, 27(3):235-240.

- [7] 程灏波. 基于空间频率评价磁流变抛光非球面中频误差 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 917-919.

CHENG H B. Error-regulating method for magnetorheological finished aspheric focused on spatial frequency [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(6): 917-919. (in Chinese)

- [8] MAHAJAN V N, DAI G M. Orthonormal polynomials in wavefront analysis; analytical solution [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007, 24(9):2994-3016.

- [9] 周林,戴一帆,解旭辉. 光学镜面离子束加工的可达性[J]. 光学精密工程, 2007,15(2):160-167.

ZHOU L, DAI Y F, XIE X H. Machining reach ability in ion beam figuring [J]. *Opt. Precision*

Eng., 2007, 15(2):160-167. (in Chinese)

作者简介:



邓伟杰(1983—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要从事光学表面数控成型及其检测等方面的研究。E-mail: mr-deng@163.com

郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要研究方向为大口径非球面数控加工和检测技术。E-mail: ligongz@yahoo.com

史亚莉(1982—),女,山西运城人,博士研究生,主要研究方向为光学机械结构设计与分析。E-mail: shiyali0825@126.com

王孝坤(1980—),男,江苏丹阳人,博士,主要从事光学超精密加工和检测技术研究。E-mail: jimwxk@sohu.com

通讯作者:

张学军(1968—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为大口径非球面加工与检测、新型空间反射镜制造、空间相机总体设计等。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

● 下期预告

薄膜反射镜静电成形机理研究

张 鹰^{1,2}, 金 光¹

(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)

为了控制薄膜反射镜面形,建立了静电拉伸薄膜反射镜物理模型,对静电成形控制原理、空间电势分布特性、基于数值方法的电场力和基于有限元方法的反射镜面形进行了研究。首先,根据静电力与薄膜变形的载荷作用力之间的平衡关系和静电拉伸薄膜反射镜成形的复杂过程介绍了薄膜反射镜静电成形的控制原理。接着,以三等分环状电极为例分析了静电场中空间电势分布特性,即从拉普拉斯方程推导出静态场势函数的表达式。然后,利用差分与电势方程结合的方法,对单电极电场力和三等分环状电极电场力进行了数值求解。最后,将计算面形与理想抛物面进行了比较,单电极情况下得到的薄膜反射镜面形不是理想抛物面,若采用多电极控制可获得更高的控制精度。模拟结果和实验结果表明:多电极控制情况比单电极情况下受力更接近均布力分布,口径 180 mm 的薄膜反射镜在相同口径单电极控制下,施加 10 000 V 电压可得到反射镜最大变形为 0.001 094 8 mm。系统长时间工作安全稳定,薄膜变形的对称性较好。