

激光与光电子学进展

离子束抛光去除边界效应延拓修正研究

周迪, 蒋世磊*, 孙国斌, 康乐, 刘卫国

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对离子束抛光光学元件过程中产生的边界效应问题,提出了基于多项式拟合延拓的抑制方法。利用多项式延拓方法对初始面形进行边界延拓,并对得到的延拓面形进行仿真,仿真后面形均方根值为 5.20 nm。采用离子束抛光技术对 100 mm 口径的 K9 光学元件进行加工,加工后的面形均方根值由 19.26 nm 降至 12.23 nm。选取加工后的面形 8% 作为边界面形,边界面形均方根值由 137.23 nm 降至 56.72 nm,通过仿真和实验,验证了该方法的可行性。该研究可以为光学加工提供一种新的方法。

关键词 光学设计; 离子束抛光; 边界效应; 边界延拓; 多项式拟合

中图分类号 TH161.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1322004

Study on Continuation Correction of Ion Beam Polishing to Remove Border Effect

Zhou Di, Jiang Shilei*, Sun Guobin, Kang Le, Liu Weiguo

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Aiming at the border effect caused by ion beam polishing optical components, a suppression method based on polynomial fitting continuation is proposed. The initial surface shape is extended by the polynomial extension method, and the obtained extended surface shape is simulated. The root mean square value of the shape after the simulation is 5.20 nm. The K9 optical element with a diameter of 100 mm is processed by ion beam polishing technology, and the root mean square value of the surface shape after processing is reduced from 19.26 nm to 12.23 nm. Then, 8% of the processed surface shape is selected as the boundary surface shape, and the root mean square value of the boundary surface shape is reduced from 137.23 nm to 56.72 nm. The feasibility of this method is verified through simulation and experiment. This research can provide a new method for optical processing

Key words optical design; ion beam polishing; border effect; border continuation; polynomial fitting

1 引言

离子束抛光^[1]是一种高精度、确定性的非接触式光学表面加工技术,在现代超精密光学元件的加工过程中发挥着重要作用。但当离子源到达工件边界时,离子束在边界的去除量与中心区域的去除量不一致的现象,会造成去除精度的非确定性进而影响光学元件的面形精度,称为“边界效应^[2]”。边界效应的存在会影响光学元件面形精度、粗糙度等,因此在离子束修形技术中抑制边界效应是十分必要且重要的。

前人对边界效应的抑制提出了一些研究方法。文献[3]采用了将驻留时间网格在面形采样网格的基础上进

行延拓的方法来抑制边缘效应的产生。文献[4]在数字化控制精密机械加工(CNC)抛光中,提出基于表面延伸的抛光新方法,实验结果表明,该方法可以抑制倒塌和翘曲的边缘表面产生。文献[5]提出了迭代表面扩展(RISE)方法,该方法通过数据拟合策略解决了边缘问题。

文献[6]提出了边界延拓方法,包括平面延拓、高斯延拓和光滑延拓。对于边界全翘面形,光滑下降延拓得到的残留误差最小;对于边界翘边带塌边情况,光滑延拓和光滑下降延拓方法效果一样。基于前人的研究成果,对于非上述情况,本文提出了不同的延拓方法,即利用多项式延拓的方法修正光学元件的表面面形,使其应用范围更广泛。

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-10-25; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS053)

通信作者: *jiangshilei8@163.com

2 光学表面边界延拓方法

边界延拓方法是基于矩阵进行延拓的。利用 ZYGO 干涉仪检测光学元件表面得到其面形,将得到的面形进行数值化,并将数值进行矩阵化,得到矩阵 R 。 R 中的每一个元素表示其面形的每一个像素,其数值表示面形高度。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当边界延拓处理边界数据时,通常要对边界数据进行去噪处理,以此来减少曲面边缘坏点对边界延拓所造成的影响^[7]。

对数据预处理完成后,再对数据进行延拓。以直径为 D 的圆形待加工镜面为例,延拓区域为 D_1 ,则延拓后的镜面直径为 $D+d$ 。对边界处的数据进行延拓,关键就是要确定原始数据在边界处的变化趋势,因此端点附近的数据是非常重要的参考依据。

以圆心 O 为向量起点,面形端点为终点的行向量和列向量分别为 OR 和 OR_1 。 OR 和 OR_1 所包含的元素个数均为镜面直径 D 所包含的元素的 $1/2$ 。 a 为 OR 同方向的单位向量, b 为 OR_1 同方向的单位向量。

图 1 所示的阴影区域为延拓区域,以 OR 为例, OR_1 同理。对向量 OR 所包含的元素数据进行延拓,延拓区域沿着向量的方向得到 $e = OR + ka$ (k 为 $1, 2, \dots, n$), n 为延拓元素个数。 θ 为向量 c 与 OR 之间的夹角,范围为 $[0^\circ, 360^\circ]$ 。其区域内部向量方程均可用以下向量方程表示 $c = ka \cos \theta + kb \sin \theta$ (k 为 $1, 2, \dots, n$)。

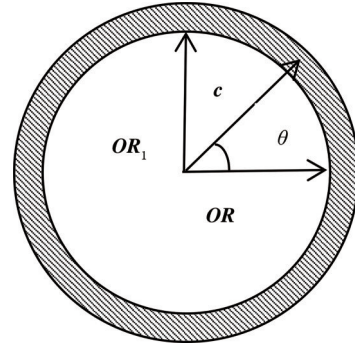


图 1 延拓区域
Fig. 1 Extension area

延拓区域可根据光学元件表面面形计算得出,为了保证不相同的面形都能够在边界得到有效去除,延拓区域可表示为

$$\frac{D}{A} = \frac{d}{2n}, \quad (2)$$

式中: D 为光学元件的口径; d 为离子束束径; A 为光学元件直径所占据的元素个数; n 为延拓元素的个数,计算得到延拓个数,可以确定圆环大小。平面延拓选取边界数值的平均值进行等值延拓,多项式延拓与斜率延拓不同于平面延拓。

多项式拟合延拓^[8]方法如下:取向量 OR 元素中的 n 个边缘数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 所对应的数值为 $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。

采用一个次数低于 $n-1$ ($m < n-1$) 的多项式 $f(x)$ 来拟合,表示为

$$f(x) = p_m x^m + \dots + p_2 x^2 + p_1 x + p_0, m < n-1. \quad (3)$$

采用最小二乘法来确定系数 P_0, P_1, \dots, P_m , 令

$$Q(P_0, P_1, \dots, P_m) = \sum_{i=1}^n [f(x) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n (p_m x_i^m + \dots + p_2 x_i^2 + p_1 x_i + p_0 - y_i)^2. \quad (4)$$

选取合适的 P_0, P_1, \dots, P_m , 使 $Q(P_0, P_1, \dots, P_m)$ 达到最小,将 Q 对 p_k 求偏导数,并令其等于 0, 得到

$$\frac{\partial Q}{\partial p_k} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m p_j x_i^j - y_i \right) x_i^k = 0, k = 0, 1, \dots, m. \quad (5)$$

写成矩阵形式^[9]表示为

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \cdots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \cdots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^m y_i \end{bmatrix}. \quad (6)$$

对 n 值进行优化,采用和方差 (SSE) 评价多项式拟合的数学模型,表示为

$$E_{SSE} = \sum_{i=1}^n [f(x) - y_i]^2. \quad (7)$$

在误差平方和精度范围内,求出拟合函数的自变量最高次方的集合 N , 表示为

$$N = [n_1 \ n_2 \ \cdots \ n_k]. \quad (8)$$

模型阶次越高精度越好,但是计算过程越复杂。本文选择合适的 n 值与离子束束径相匹配,延拓后向量 e 包含的元素为 $\{d_1, \dots, d_{A-n}, y_1, \dots, y_n, y_{n+1}, \dots, y_{2n}\}$ 。多项式拟合充分考虑到曲面边界的面形变化趋势,对中高频的拟合效果比单纯的函数拟合更有优势。

斜率延拓方法同多项式拟合方法一样,取 n 个边界数据,将散点画成曲线,对曲线图进行函数拟合,再对得到的函数进行求导。

其函数求导公式可表示为

$$\begin{cases} f_1(x) = f'(x) \\ f_1(x) = (m) p_m x^{m-1} + (m-1) p_{m-1} x^{m-2} + \dots + 2p_2 x + p_1 \end{cases} \quad (9)$$

利用 MATLAB 软件计算斜率延拓方程,选取端点的一个数值求取其斜率,所求端点 b_x 的斜率方程式表示为

$$g(x) = k(x - b_x) + f_1(b_x), \quad (10)$$

然后对得到的拟合斜率函数进行区域延拓。

3 边界延拓修形算法仿真

本次仿真使用的 K9 光学元件,口径为 100 mm。

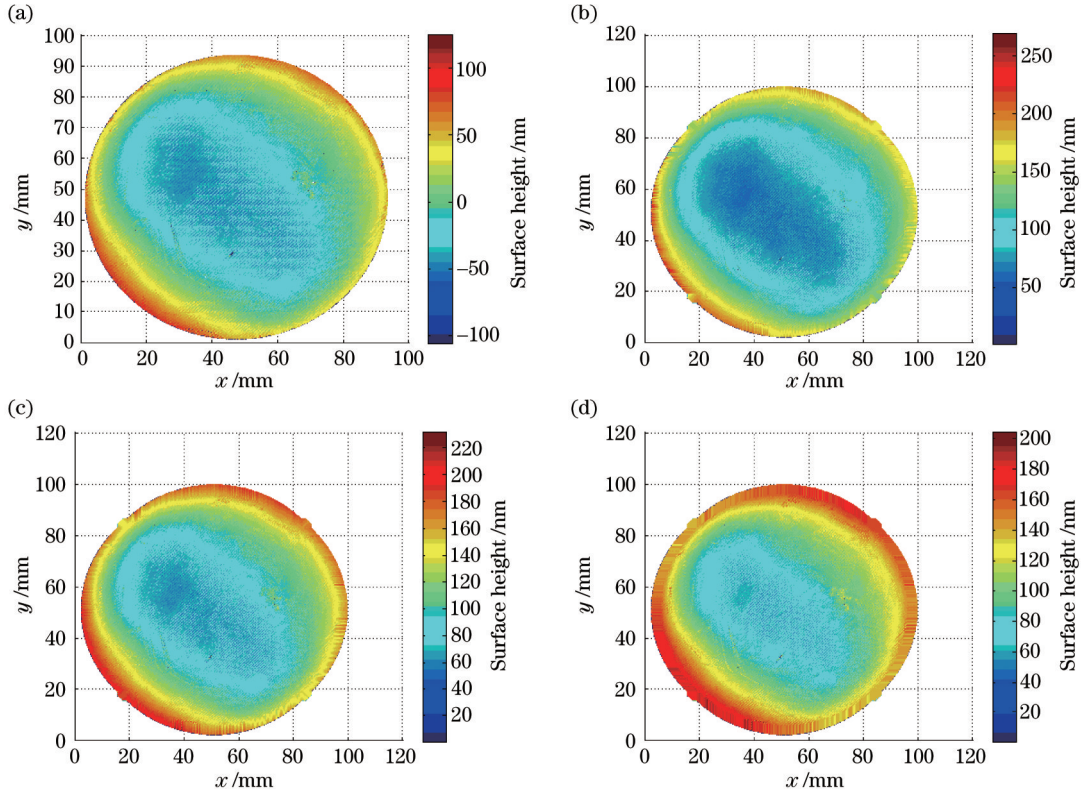


图 2 不同延拓方法仿真去除图。(a)初始面形;(b)多项式延拓后的面形;(c)斜率延拓后的面形;(d)平面延拓后的面形

Fig. 2 Simulation removal diagrams of different continuation methods. (a) Initial surface shape; (b) surface shape after polynomial continuation; (c) surface shape after slope continuation; (d) surface shape after plane continuation

现代光学加工的基本去除理论都是基于 Preston 假设^[10-11],即材料的去除函数与加工过程中磨头与工件的压力以及速度相关,其数学表达式为

$$R(x, y) = k \cdot p(x, y) \cdot v(x, y), \quad (11)$$

式中: $R(x, y)$ 为材料去除函数; k 为加工中的比例因子(与加工时的温度、湿度、磨头材料、工件材料以及磨料等相关); $p(x, y)$ 为磨头与工件之间的压强; $v(x, y)$ 为磨头与工件相对运动速度。

利用 MATLAB 软件对上述延拓的面形进行还原加工过程即仿真^[12](采用 MATLAB 工具对去除函数进行精确拟合,建立离子束仿真抛光的数理模型,模拟不同离子束束径在不同叠加间距下各自的去除特性),抛光系统使用的是射频离子源,离子束刻蚀产生的是类似于高斯分布的去除函数的离子光束^[13],去除函数的形状和大小分别取决于离子在空间的束流密度分布和离子入射光学镜面时产生的溅射产额大小,去除函

其初始面形如图 2(a)所示,横纵坐标分别代表尺寸,色度条代表面形高度,通过 MATLAB 软件计算其峰谷(PV)值为 53 nm,均方根(RMS)值为 180.75 nm。对初始面形采用以上延拓方式来进行延拓处理,延拓的区域为 4 mm。分别得到了多项式延拓后的面形[图 2(b)]、斜率延拓后的面形[图 2(c)]、平面延拓后的面形[图 2(d)]。

数 $R(x, y)$ 表示为

$$R(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (12)$$

式中: A 为去除函数峰值去除率参数,为 250 nm/min; σ 为去除函数分布系数参数,为 6.22 mm^[14]。

离子束抛光加工过程中元件表面的材料去除量函数表示为

$$E(x, y) = R(x, y) \otimes T(x, y), \quad (13)$$

式中: $T(x, y)$ 是离子束在光学元件表面的驻留时间函数。通过去除量函数求出仿真所用的时间和仿真后的面形残差。

通过 MATLAB 软件对延拓后的面形进行仿真,得到多项式拟合延拓仿真面形[图 3(a)]、斜率延拓仿真面形[图 3(b)]、平面延拓仿真面形[3(c)]。

不同延拓方法的仿真结果如表 1 所示。

仿真时间为延拓后的面形仿真去除所用的时间,

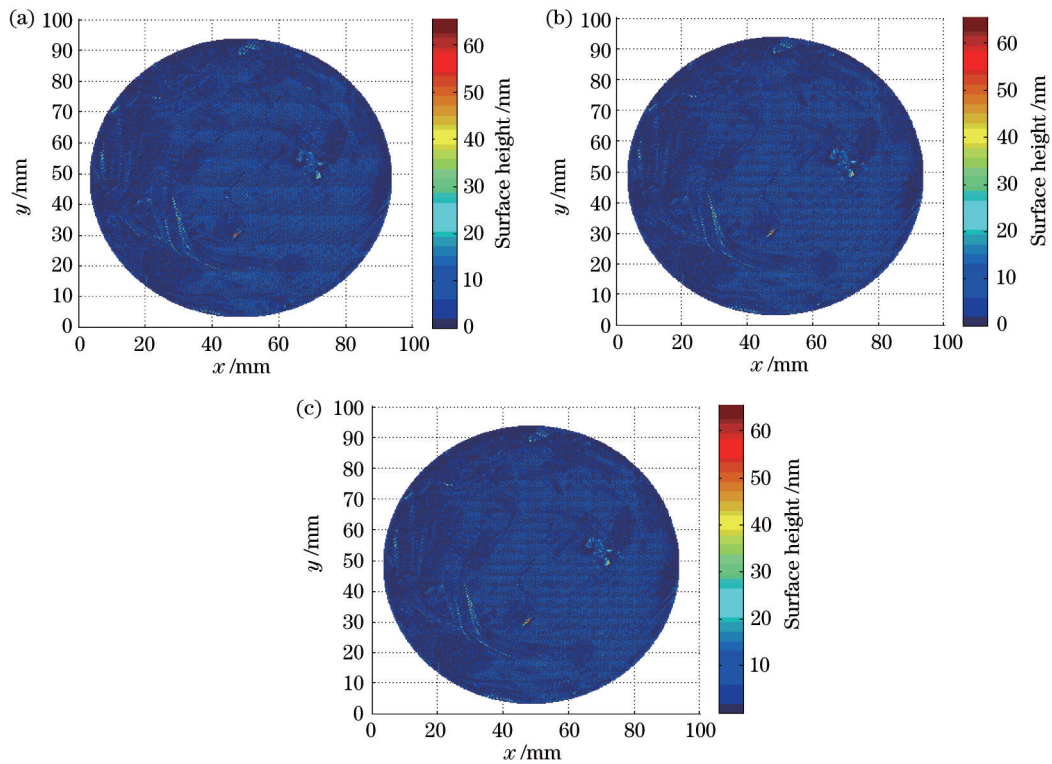


图 3 仿真去除后的面形。(a)多项式延拓仿真后的面形;(b)斜率延拓仿真后的面形;(c)平面延拓仿真后的面形

Fig. 3 Surface shapes after simulation removal. (a) Surface shape after polynomial continuation simulation; (b) surface shape after slope continuation simulation; (c) surface shape after plane continuation simulation

表 1 不同延拓方法的仿真结果

Table 1 Simulation results of different continuation methods

Simulation result	Polynomial continuation	Slope continuation	Plane continuation
Simulation time /min	51.73	54.32	55.49
PV /nm	65.32	65.80	67.28
RMS /nm	5.2055	6.0100	6.1279

PV 值为仿真后面形的峰值与谷值的差值, RMS 为仿真后面形残差的均方根值。通过三种方法分别得到光学元件仿真后的面形图, 分析可知, 斜率延拓的面形经过仿真的 PV 值最小, 多项式延拓的面形经过仿真的 RMS 值最小。通过多项式延拓后, 其光学元件表面面

形要比平面延拓和斜率延拓后的面形更符合曲面边缘的面形变化趋势。

4 实验验证

选取一组口径为 100 mm 的 K9 镜片, 分别标为 A、B、C 进行加工实验。离子束的去除速率为 5000 nm/min, 叠加间距为 2 mm。K9 镜片初始面形如图 4 所示, 镜片 A 进行多项式拟合延拓, 镜片 B 进行斜率延拓, 镜片 C 进行平面延拓。分别用离子束对镜片 A、B、C 进行抛光, 得到加工后的 A1、B1、C1, 检测面形如图 5 所示, A1、B1 和 C1 的 RMS 分别为 12.23 nm、19.84 nm 和 16.80 nm

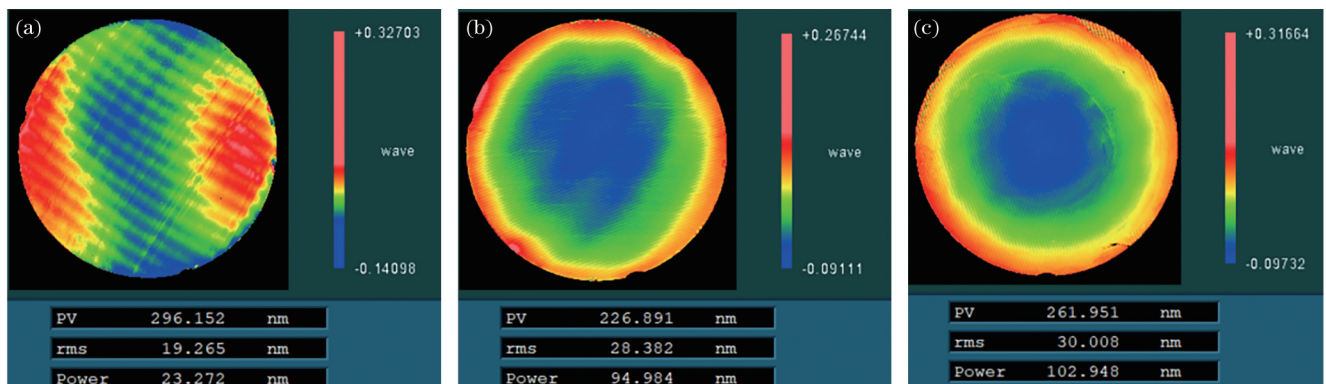


图 4 初始面形。(a)镜片 A 面形;(b)镜片 B 面形;(c)镜片 C 面形

Fig. 4 Initial surface shape. (a) Surface shape of lens A; (b) surface shape of lens B; (c) surface shape of lens C

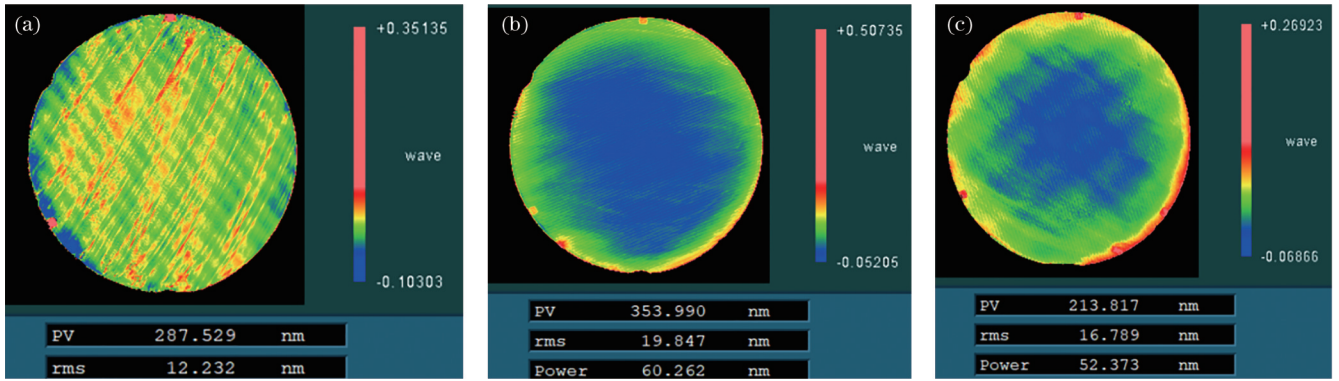


图 5 加工后的面形。(a)多项式延拓;(b)斜率延拓;(c)平面延拓

Fig. 5 Surface shape after processing. (a) Polynomial continuation ; (b) slope continuation ; (c) plane continuation

表 2 为不同延拓方法加工前后的面形 RMS 值。分析可知, 镜片 A 经过加工后的面形 RMS 值小于镜片 B 和 C 的 RMS 值, 即多项式延拟合延拓

表 2 不同延拓方法加工前后的面形 RMS 值

Table 2 RMS values of surface shape before and after processing by different continuation methods

Simulation result	Polynomial continuation	Slope continuation	Plane continuation
Before processing RMS /nm	19.26	31.70	30.00
After processing RMS /nm	12.23	19.84	16.80

对光学元件的边界效应的抑制效果要优于其他两种方法。

为了更进一步探究边界延拓对边界的影响程度, 选取镜片边缘 8% 的面形数据, 图 6 为加工后的边界面形图。

表 3 为不同延拓方法加工前后的边界 RMS 值, 用来对比加工前后镜片经过延拓边界的均方根。

分析表 3 可知, 多项式延拓后的面形经过离子束修形后, 面形的边界 RMS 值由 137.23 nm 降至 56.72 nm, 小于其他两种延拓方法得到的 RMS, 可知多项式延拓对其边界效应的抑制效果更好。

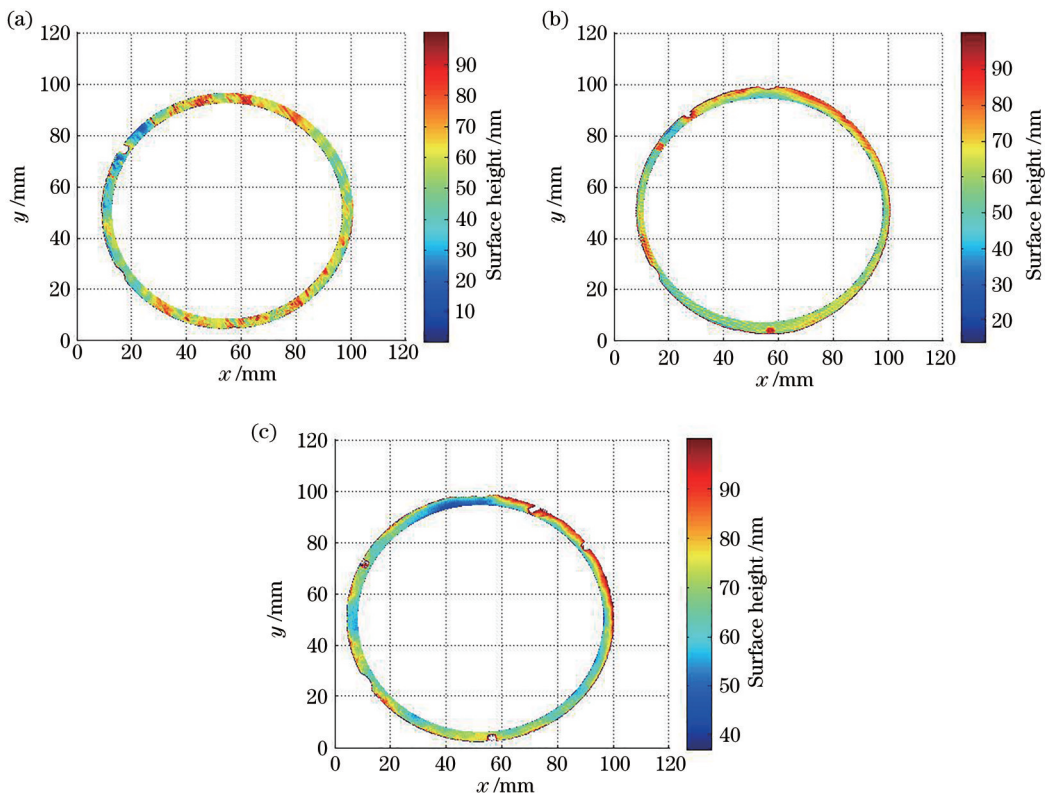


图 6 加工后的边界面形。(a)多项式延拓;(b)斜率延拓;(c)平面延拓

Fig. 6 Boundary surfaces after processing. (a) Polynomial continuation; (b) slope continuation; (c) plane continuation

表 3 不同延拓方法加工前后的边界 RMS 值

Table 3 Boundary RMS values of surface shape before and after processing by different continuation methods

Simulation result	Polynomial continuation	Slope continuation	Plane continuation
Before processing RMS /nm	137.23	107.17	105.58
After processing RMS /nm	56.72	62.43	68.85

5 结 论

本文采用多项式拟合延拓方法,在离子束抛光去除时,有效抑制了“边界效应”。多项式延拓得到的加工后面形 RMS 由 19.2 nm 降至 12.23 nm,加工后边界 RMS 由 137.23 nm 降至 56.72 nm。相较于斜率延拓与平面延拓的结果,多项式延拓实验结果更符合面形变化的趋势,对中高频的拟合效果比单纯的函数拟合更有优势。并且,通过多项式函数延拓的方法在解决一些工程问题上,要优于其他延拓方法。

参 考 文 献

- [1] 唐瓦. 离子束抛光大口径非球面去除模型与工艺研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
Tang W. Research on removal model and technology for ion beam figuring large aspherical mirror[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [2] Cordero-Dávila A, González-García J, Pedrayes-López M, et al. Edge effects with the Preston equation for a circular tool and workpiece[J]. Applied Optics, 2004, 43(6): 1250-1254.
- [3] 李晓静, 王大森, 王刚, 等. 光学元件表面离子束抛光过程边缘效应抑制[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 349-355.
Li X J, Wang D S, Wang G, et al. Edge effect suppression of ion beam figuring process on optical component surface[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 349-355.
- [4] Huang J Y, Hu Q, Xie L, et al. Research on surface extension process technology for restraining edge effect in CNC polishing[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11427: 114270C.
- [5] Wang T Y, Huang L, Choi H, et al. RISE: robust iterative surface extension for sub-nanometer X-ray mirror fabrication[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 15114-15132.
- [6] 杨兵. 大口径光学元件离子束抛光系统及加工工艺研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
Yang B. Research on ion beam figuring system and processing technology for large aperture optics[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [7] 李志彬, 刘宏立, 马子骥, 等. 斜率匹配波形延拓法抑制 EMD 端点效应[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(5): 673-679.
Li Z B, Liu H L, Ma Z J, et al. Slope matching waveform extension method suppressing the EMD end effect[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(5): 673-679.
- [8] 许金鑫, 由强. 任意阶次多项式最小二乘拟合不确定度计算方法与最佳拟合阶次分析[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 388-392.
Xu J X, You Q. Uncertainty calculation for arbitrary order polynomial least-square fitting and analysis of the best fitting order[J]. Acta Metrologica Sinica, 2020, 41(3): 388-392.
- [9] 张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(4): 637-639, 654.
Zhang Y T, Jia Y M. Analysis and program implementation of least squares polynomial curve fitting[J]. Computer & Digital Engineering, 2017, 45(4): 637-639, 654.
- [10] Preston F W. The theory and design of plate glass polishing machines[J]. Journal of Glass Technology, 1927, 11(44): 214-256.
- [11] 梅林宇. 离子束抛光确定性修形技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
Mei L Y. Research on deterministic processing technology of ion beam figuring[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- [12] 康乐, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 光阑法变口径离子束修形仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810016.
Kang L, Jiang S L, Sun G B, et al. Simulation study on ion beam polishing with changing aperture by diaphragm method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810016.
- [13] 周林. 光学镜面离子束修形理论与工艺研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
Zhou L. Study on theory and technology in ion beam figuring for optical surfaces[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [14] 王玉宁, 蒋世磊, 孙国斌, 等. 离子束抛光等量去除的实现及抛光实验[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 032501.
Wang Y N, Jiang S L, Sun G B, et al. Ion beam polishing equivalent removal and polishing experiments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 032501.