

采用非均匀有理 B 样条曲面延展光学元件面形误差

李 云^{1,2} 邢廷文¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所应用光学实验室, 四川 成都 610209)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 在离子束抛光工艺中,为了提高驻留时间求解算法在工件边缘处的求解精度,通常需要对原始面形误差数据进行边缘虚拟延展。要求原始面形误差数据与虚拟延展面光滑拼接,并在延展区域具有可控的不确定性。非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面常用在机械制造领域对复杂形状物体进行三维建模。引入非均匀有理 B 样条曲面并结合泽尼克(Zernike)多项式拟合对一典型的圆形光学元件面形误差自由曲面数据进行延展。通过对典型面形误差曲面延展前后的等效功率谱密度曲线分析可以看出,延展后在面形误差频率大于 0.05 mm^{-1} 时其面形误差改善量均大于 70%;将该典型延展面应用于特定驻留时间求解算法中,使得预测加工精度的均方根值由 1.18 nm 改善至 0.19 nm。这表明,采用非均匀有理 B 样条曲面延展光学元件面形误差能够获得光滑拼接的虚拟延展曲面,并能大大改善离子束抛光工艺中驻留时间算法的求解精度。

关键词 光学制造;面形误差延展;非均匀有理 B 样条;离子束抛光

中图分类号 O43; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0722001

Surface Error of Optical Components Extended with Non-Uniform Rational B-Spline Surface

Li Yun^{1,2} Xing Tingwen¹

(¹ Laboratory of Applied Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the technique of ion beam figuring, it often needs to extend the original surface error data to improve the dwell time solving precision on the edge. The virtual extended surface should be smoothly stitched with the original surface error data and should have controllable uncertain ability. Non-uniform rational B-spline (NURBS) surface is usually used in the mechanism fabrication field to model three-dimensional (3D) objects. Using the non-uniform rational B-spline surface and combining with the Zernike polynomial fitting method, a typical tested original free-form surface error data set is extended. The power spectral density curves of typical original surface error and the extended surface error show that the surface error is improved by more than 70% when the error spatial frequency is greater than 0.05 mm^{-1} . This extended surface is also used in the dwell time algorithm, and the forecasted machining precision is improved from 1.18 nm to 0.19 nm in root mean square (RMS) value. The results show that smooth virtual extended surface can be got and the computing precision of the dwell time algorithm can be improved by using non-uniform rational B-spline surface to extend the surface error of the optical components.

Key words optical fabrication; surface error extension; non-uniform rational B-spline; ion beam figuring

OCIS codes 220.4610; 220.5450; 220.3630; 240.5450

1 引 言

离子束抛光是实现现代高精度光学元件加工的

重要技术途径^[1,2]。相对于应力盘抛光、气囊抛光和磁流变抛光等其他现代抛光方法^[3~6],离子束抛

收稿日期: 2012-02-14; 收到修改稿日期: 2012-03-15

作者简介: 李 云(1986—),男,博士研究生,主要从事光学元件离子束抛光方面的研究。E-mail: oe_ly2008@163.com

导师简介: 邢廷文(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事应用光学方面的研究。E-mail: xingtw@ioe.ac.cn

光具有精度高、确定性强、无边缘效应和不产生亚表面损伤等优势。在离子束抛光工艺中,一般采用考夫曼离子源或者射频离子源^[7]。这两种离子源均为低能大束流离子源,离子能量为 300~2000 eV。离子束为高斯型,其半峰全宽一般为 1~10 mm。离子束越细,其对面形误差的修形能力越强。在离子束抛光工艺中,一个重要的步骤在于根据干涉仪检测到的光学元件初始面形误差数据和离子束在工件表面的去除函数求解离子源在光学元件表面扫描加工时的驻留时间。驻留时间的求解精度直接关系到最终的面形加工精度。

干涉仪给出的光学元件面形误差数据一般通过矩阵给出。然而,光学元件很多都是圆形或者环形,面形误差数据只在相应的圆域或环域内有效。而运用计算机进行数据处理时,通常采用矩阵运算,因而必须对干涉仪给出的面形误差数据矩阵中的无效数据进行填充。为了简化计算,通常采用简单的 0 值进行填充。但是,采用 0 值填充就意味着有效区域与无效区域的交界处存在跳变,引入额外的中高频面形误差。而在离子束抛光中,多种驻留时间算法要求在整个矩阵区域内的面形误差数据光滑连续^[8~10],否则,由于寄生纹波效应的存在^[9,11],将大大降低有效区域边缘处的驻留时间计算精度。为此必须要对光学元件数据进行虚拟延展,并满足周期延展光滑条件^[9],以满足计算要求。

光学元件的表面面形误差一般分为低频、中频和高频成分,其面形误差的波长范围分别为 $\lambda > 1 \text{ mm}$ 、 $1 \mu\text{m} < \lambda < 1 \text{ mm}$ 和 $\lambda < 1 \mu\text{m}$ 。去除函数的稳定性和束斑尺寸共同决定了离子束抛光工艺主要是针对光学元件的低频面形误差,而中高频面形误差一般难以通过离子束抛光的方法去除。因此,初始面形误差和延展后的面形误差数据应该尽量只保留低频面形误差信息。初始面低频面形误差一般为自由曲面。非均匀有理 B 样条曲面能够表达复杂的自由曲面,但通常只能对矩形域的数据进行插值延展。本文将非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面与泽尼克(Zernike)多项式拟合结合起来,将圆域内数据转换到极坐标下对光学元件圆域内的自由曲面面形误差数据进行了虚拟延展,从而获得光滑过渡的延展曲面。

2 NURBS 曲面的数学模型及性质

NURBS 曲面能精确地表示二次规划自由曲面,并在其插值区域具有良好的光滑特性。它是 B 样条曲面的一种特殊形式。

NURBS 曲面定义为^[12~15]

$$M(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{i,j} R_{i,p;j,q}(u, v), \quad u, v \in [0, 1] \quad (1)$$

式中

$$R_{i,p;j,q}(u, v) = \frac{\omega_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}, \quad (2)$$

$P_{i,j}$ 为矩形域上的控制顶点, $i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n; \omega_{i,j}$ 是与 $P_{i,j}$ 相对应的权因子, 4 个顶点处 $\omega_{i,j} > 0$, 其他位置 $\omega_{i,j} \geq 0$, 以防止分母为 0 及保持凸包性质、曲线不因权因子而退化为一; $N_{i,p}(u)$ 和 $N_{j,q}(v)$ 分别是 u 方向和 v 方向的 p 次和 q 次 B 样条基函数^[12,13]。有理基函数 $R_{i,p;j,q}(u, v)$ 具有如下性质:

- 1) 非负性, 即 $R_{i,p;j,q}(u, v) \geq 0$;
- 2) 规范性, 即 $\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,p;j,q}(u, v) = 1, u \in [u_0, u_m]$ 且 $v \in [v_0, v_n]$;
- 3) 局部性, 即 $\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,p;j,q}(u, v) = 0, u \notin [u_0, u_m]$ 且 $v \notin [v_0, v_n]$;
- 4) 可微性, 在节点区间内, 当分母不为 0 时, $R_{i,p;j,q}(u, v)$ 是无限次连续可微的; 在节点处, 若节点 u 方向和 v 方向的重叠度分别为 m 和 n , 则 $R_{i,p;j,q}(u, v)$ 为 u 方向 $p - m$ 阶可微, v 方向 $q - n$ 阶可微;
- 5) 若 $\omega_{i,j} = 0$, 则 $R_{i,p;j,q}(u, v) = 0$; 若 $\omega_{i,j} = +\infty$, 则 $\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n R_{i,p;j,q}(u, v) = 1$; 若 $\omega_{i,j} = +\infty (j \neq i)$, 则 $R_{i,p;j,q}(u, v) = 0$ 。

由于有理基函数 $R_{i,p;j,q}(u, v)$ 具有上述性质, 因而 NURBS 曲面具有极好的连续和光滑特性^[12], 它常常被用在自由曲面插值造型上。曲面延展的本质可以看成是对型值点以外的区域进行插值。在一些要求高精度插值的领域, 其控制顶点必须要尽可能均匀密集地分布于插值区域。由于控制点 $P_{i,j}$ 定义在矩形区域, 因此通常只对矩形区域中的数据进行插值, 即对矩形数据区域进行延展。

NURBS 插值的根本在于通过(1)式求取所需位置点 $M(u, v)$ 处的值。在给定的情况下, (2)式中的有理基函数 $R_{i,p;j,q}(u, v)$ 可以通过型值点 $Q(u, v)$ 递推求出^[12,13]。型值点 $Q(u, v)$ 处的值由原始自由

曲面的有效区域内的部分或全部有效数据给出。那么,只要求出控制顶点 $P_{i,j}$ 即可求解出插值公式的全部参数^[12~15]。文献[12]中给出了在矩形区域下的 NURBS 曲面延展方法。

然而,光学元件的面形误差数据一般为有界的圆域或者环域,如图 1 所示。图 1 是直径为 300 mm、曲率半径为 400 mm 的典型实测光学元件面形误差拓扑图。其初始峰谷(PV)值为 60.04 nm,均方根(RMS)值为 8.46 nm。要使用 NURBS 曲面延展方法对圆域进行曲面延展,必须将其型值点数据转换到矩形区域内。为此,必须要改进上述 NURBS 曲面延展算法,使得其能够合理应用到圆域边界的光学元件面形误差数据的延展上。

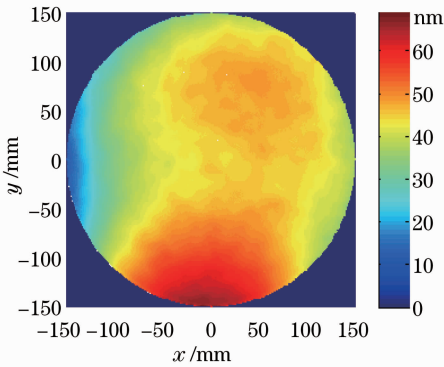


图 1 光学元件面形误差

Fig. 1 Surface error of optical component

3 圆形区域的面形延展方法

光学元件面形误差数据一般是由干涉仪给出的按像素点值标记的圆域内离散数据。由于圆域的圆对称性,可以很自然地想到将圆域内的数据按照极坐标的方式展开。由于 NURBS 曲面拟合方法要求型值点按矩形网格分布,展开后的极坐标数据应按角向 θ 和径向 r 构成矩形控制网格。然而极坐标下的数据点位置无法与圆域内直角坐标系下给出的数据点的位置一一对应,必须要对原直角坐标系下的圆域内面形误差数据进行插值。

由于 NURBS 延展方法的特性,要求初始面必须在 u 方向和 v 方向(这里为 θ 方向和 r 方向)都是光滑的,延展后的自由曲面才能光滑。如果初始面欠光滑,哪怕是由于插值算法不合理引起的微小毛刺(如图 2 所示)都会使延展后的曲面出现如图 3 所示的欠光滑特性,这破坏了原有面形误差的频率特性,是不允许的。

出现图 3 所示现象的根本原因在于通过插值获

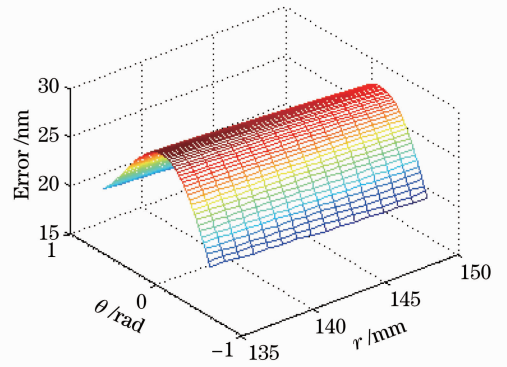


图 2 欠光滑的自由曲面

Fig. 2 Unsmooth free-form surface

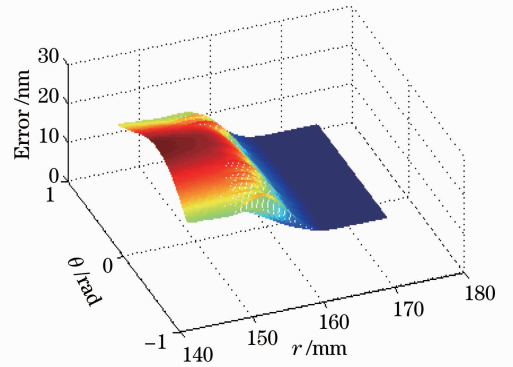


图 3 采用 NURBS 方法延展后的自由曲面

Fig. 3 Extended free-form surface after using NURBS method

取的边缘面形误差数据存在插值误差,导致边缘环带内的初始面形误差欠光滑。寻找合理的插值方法,减小插值误差,在没有过多地偏离原始数据的情况下获取光滑的边缘面形误差数据是解决该问题的有效途径。

泽尼克多项式多用于拟合光学元件的面形及面形误差数据^[16,17]。高阶的泽尼克多项式能够较好地拟合较为复杂的光学元件低频面形误差,而且还能有效滤去对后续计算不利的高频面形误差。

极坐标下面形误差 $W(r, \theta)$ 用泽尼克多项式表示为^[17]

$$W(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n C_{nm} Z_n^m(r, \theta), \quad (3)$$

式中

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \arctan(x/y), \quad (4)$$

C_{nm} 为依赖于曲面上型值点的展开系数; n 和 m 为大于或等于 0 的正整数,且 $n - m \geq 0$ 。拟合基函数 $Z_n^m(r, \theta)$ 为定义在单位圆内的光滑曲面。拟合的根本在于求取拟合系数 C_{nm} ^[16,17]。

由于泽尼克多项式的基函数具有光顺特性,在

型值点分布的区域,泽尼克多项式能够获得很高的拟合精度、可控的不确定性和极好的光顺特性。利用泽尼克多项式进行拟合插值后,展开的极坐标数据具有较好的光顺性。直角坐标系下圆域内的面形误差展开为在矩形区域内表达的数据后,就能按照前文所述的步骤用 NURBS 曲面延展方法进行延展。

将图 1 中所示的检测面形误差全口径数据采用 64 项泽尼克多项式进行拟合,得到拟合系数。按照得到的拟合系数重构得到的面形误差如图 4 所示。拟合面形与初始面形相比去掉了随机噪声,得到一光滑曲面。同时也引入了一定的拟合误差,但该拟合误差对曲面延展而言是可以接受的。

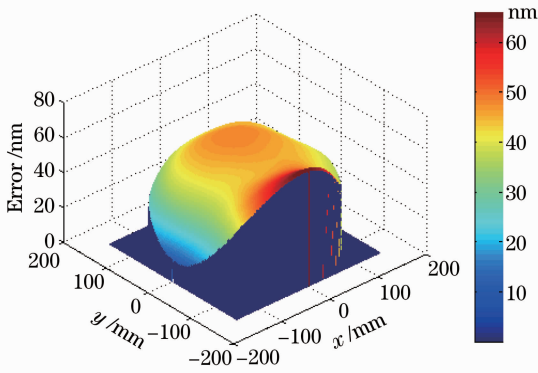


图 4 Zernike 多项式拟合后的面形误差

Fig. 4 Surface error after Zernike polynomial fitting

图 4 其边缘环带面形误差如图 5 所示,所取环带的宽度一般能够体现出面形误差在环带边缘的走向趋势即可。将图 5 所示的边缘面形误差采用上述的泽尼克拟合系数按极坐标展开,在以 θ 、 r 为横纵坐标轴的直角坐标系中表示为如图 6 所示的矩阵型值点。它满足了 NURBS 曲面延展方法对型值点的矩阵网格要求。

将边缘环带映射到矩形区域后,选取边缘约束

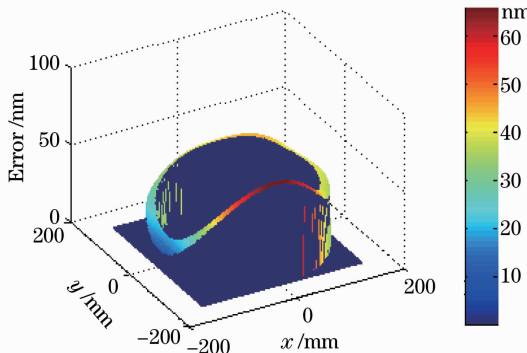


图 5 环带面形误差

Fig. 5 Annulus surface error

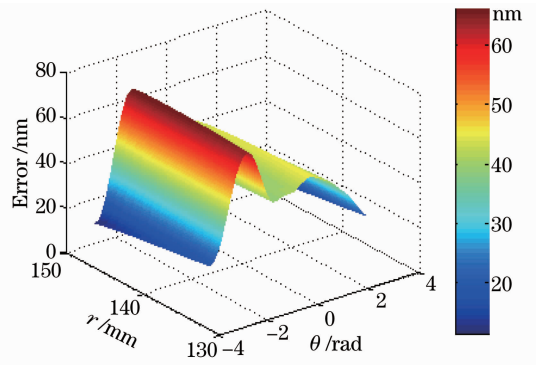


图 6 环带面形误差极坐标展开图

Fig. 6 Annulus surface error extension under polar coordinates

点的值为 0,即可按照文献[12]中提及的 NURBS 曲面延展方法进行延展。为了兼顾延展后驻留时间算法的计算精度和计算量,延展区域沿着 r 方向的宽度需要视离子束抛光中所使用的去除函数束径而定,一般取束径的 3 倍即可。然而,对于大面积高分辨率的面形误差数据来说这个过程将会耗费大量的计算时间,有时甚至使得计算无法进行下去。为了减少计算时间,通常将图 6 中展开的边缘面形误差数据沿着角向 θ 分成若干段,分别求取 NURBS 曲面控制顶点。

求得控制顶点后,原则上可以按照(1)式分别求取控制区域内任意位置的插值数值。但是,反复调用(1)式同样会耗费大量的计算时间。为此,一次性计算控制区域内各个位置的插值数值,得到插值矩阵,如图 7 所示,然后根据(4)式将待插值区域数据映射到该插值矩阵中,并采用邻近插值方法确定插值数据。为了减小插值误差,计算图 7 所示的插值矩阵时必须密集取点。而计算表明,即使是密集取点也会大大节省计算时间。

将图 7 中延展数据按照(4)式重新映射到直角

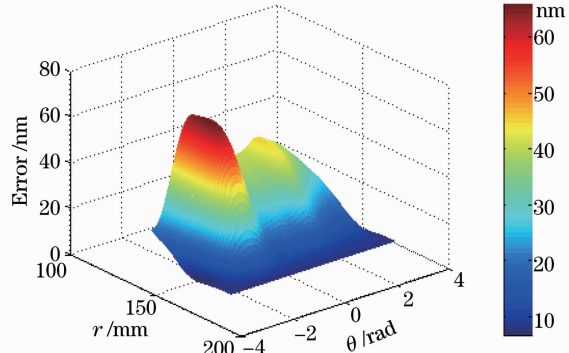


图 7 采用 NURBS 曲面延展后的面形

Fig. 7 Surface error extension using NURBS method

坐标系下,最终的延展面形如图 8 所示。从图 8 可以看出,原有效区域与延展区域过渡光滑。

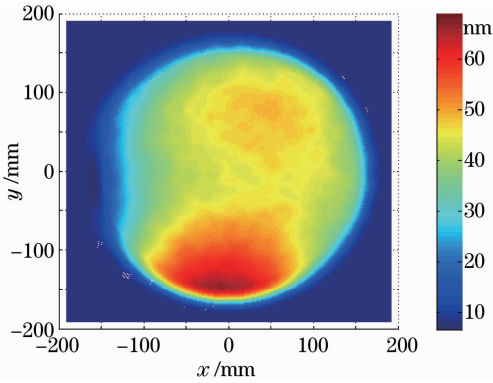


图 8 最终的延展面形误差

Fig. 8 Final extended surface error

图 9 中曲线分别是延展前面形误差和延展后面形误差的等效功率谱密度 (PSD) 曲线^[18]。由 PSD 曲线可以看出,较高频率面形误差延展后明显变小,

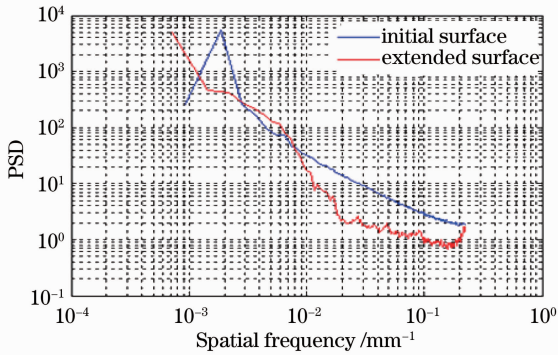


图 9 面形误差延展前后等效功率谱密度

Fig. 9 PSD curves of the surface error before and after extension

这说明该曲面延展方法较好地减小了由于无效区域引起的较高频率面形误差。延展后的面形误差在空间频率大于 0.05 mm^{-1} 时其面形误差改善量均大于 70%。

4 延展曲面在驻留时间算法中的应用

在离子束抛光中,抛光过程可以描述为

$$r'(x, y) = r(x, y) - b(x', y') \otimes \mathbf{d}(x, y), \quad (5)$$

式中 $b(x', y')$ 为去除函数; $\mathbf{d}(x, y)$ 为驻留时间分布矩阵; $r(x, y)$ 为初始面形误差; $r'(x, y)$ 为加工后的残余误差。

将计算所得的延展面形误差(图 8)应用于文献[9]中提及的基于快速傅里叶变换的离子束抛光驻留时间算法。驻留时间算法中采用半峰全宽为 8 mm 的去除函数;垂直入射工件表面时离子束的去除函数的峰值去除速率为 5 nm/s ,相应的体去除速率为 $1.31 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。由于离子束去除函数与离子束相对工件的入射角度有关,在 SiO_2 材料表面峰值去除速率与入射角度之间的关系为^[2]

$$\frac{p(x)}{p(0)} = 1 + 8.89 \times 10^{-4} x + 5.65 \times 10^{-4} x^2 + 4.38 \times 10^{-6} x^3 - 1.46 \times 10^{-7} x^4, \quad (6)$$

其中 x 为离子束相对工件表面的入射角度, p 为对应角度下的材料去除速率。

图 10 中分别是未采用曲面延展时通过上述驻留时间算法求得的驻留时间和按照(5)式仿真计算得到的相应的预测加工残差。预测到的残差 PV 值为 18.4 nm , RMS 值为 1.18 nm 。从残差拓扑图可以看出,其残留的面形误差主要在边缘处。

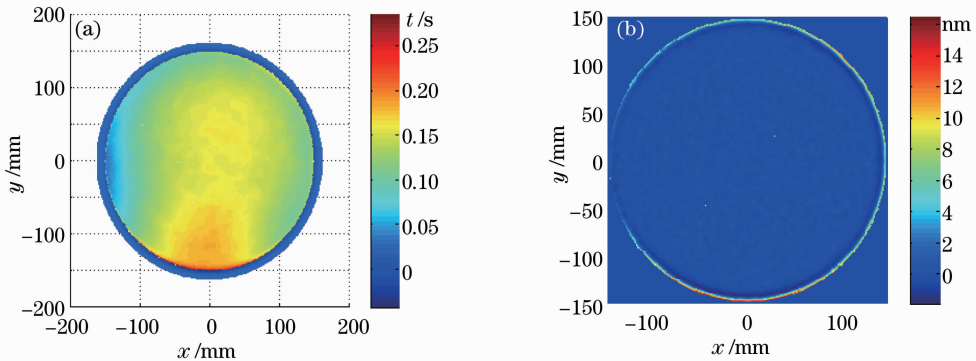


图 10 直接计算得到的驻留时间和相应预测残差。(a) 驻留时间; (b) 预测残差

Fig. 10 Dwell time map and forecasted residual error by direct computation. (a) Dwell time map; (b) forecasted residual error

采用根据 NURBS 曲面延展方法得到的图 8 所示的面形误差数据在相同条件下进行驻留时间计算,得到如图 11 所示的驻留时间分布和预测加工残差。其预测残差 PV 值为 4.13 nm, RMS 值为

0.19 nm。由残差拓扑图可以看出,边缘残差大大减小,较好地克服了由于寄生纹波效应使得边缘计算精度下降的问题。

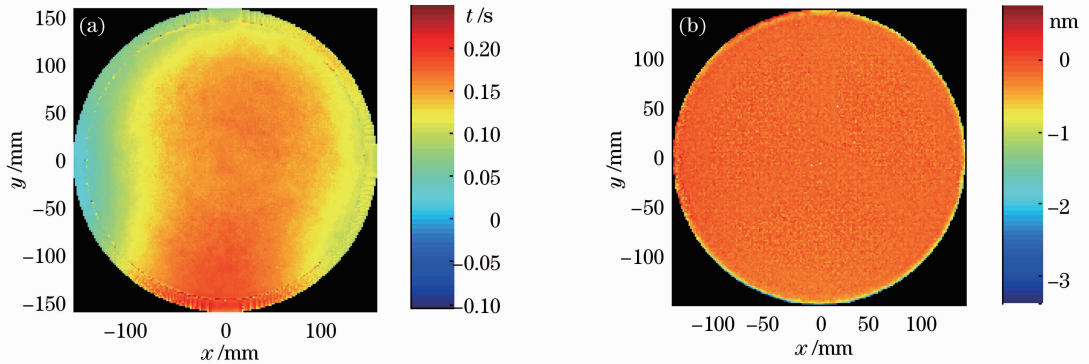


图 11 采用 NURBS 曲面延展后计算得到的驻留时间和相应预测残差。(a) 驻留时间; (b) 预测残差

Fig. 11 Dwell time map and forecasted residual error by using NURBS extension. (a) Dwell time map; (b) forecasted residual error

5 结 论

通过引入 NURBS 曲面造型方法,结合泽尼克多项式拟合,将圆域内的光学元件表面低频面形误差数据转化为极坐标下的面形误差数据进行光滑延展。对这一实测的典型光学元件面形误差进行延展,并对延展前后的面形误差进行了等效功率谱密度分析,从等效功率谱密度曲线可以看出在延展后的面形误差中,空间频率大于 0.05 mm^{-1} 的面形误差改善量均大于 70%,由此说明较高频率面形误差得到了较好的抑制。将该典型面形误差的延展面应用于驻留时间算法中,较好地克服了由于寄生纹波效应带来的工件边缘计算精度下降的问题,使得其预测加工残差 RMS 值由 1.18 nm 降低为 0.19 nm。这表明,在离子束抛光驻留时间求解算法中采用非均匀有理 B 样条曲面进行面形误差延展能有效提高驻留时间算法的求解精度,为高精度的面形加工提供支持。

参 考 文 献

- 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形的实现[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1131~1135
- Neue Technologien GmbH. Ion Beam Finishing Technology for High Precision Optics Production [OL]. <http://www.ntgl.de/eng/produkte/formgeb/formgeb.htm>, 2009
- Cui Xiangqun, Gao Bilie, Wang Daxing *et al.*. A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 402~407

- 崔向群, 高比烈, 汪达兴等. 一种大口径大非球面度天文镜面磨制新技术[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 402~407
- Gao Bilie. The mathematical analysis for the active lap deformation on proceeding condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 525~532
高比烈. 对主动抛光盘在加工、测量状态下盘面的变形及提升的数学分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 525~532
- 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, 李红玉, 于国威. 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
- Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnet orheological finishing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 198~205
戴一帆, 石峰, 彭小强等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 198~205
- Wang Dengfeng. A Study on the Processing Parameters of Ion Beam Polishing [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007
王登峰. 光学离子束抛光系统工艺参数研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007
- Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin *et al.*. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 192~197
武建芬, 卢振武, 张红鑫等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 192~197
- Yun Li, Tingwen Xing, Xin Jia *et al.*. Filter model based dwell time algorithm for ion beam figuring [C]. *SPIE*, 2010, **7655**: 76551K
- Jianfen Wu, Zhenwu Lu, Hongxin Zhang *et al.*. Dwell time algorithm in ion beam figuring [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(20): 3930~3937
- Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. 194~200
邹谋炎. 反卷积与信号复原 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 194~200
- Fan Yiyun. Study and Development on Free-Form Surface Reconstruction Technology Based on NURBS [D]. Tianjin:

- Tianjin University, 2004
- 范宜艳. 基于 NURBS 的自由曲面重构技术研究及开发[D]. 天津:天津大学,2004
- 13 Gao Zhanheng. The Smooth Connection Between B-Spline Patches [D]. Changchun; Jilin University, 2004
- 高占恒. B 样条曲面间的光滑拼接算法[D]. 长春: 吉林大学, 2004
- 14 Li Yingjie. Study and Realization on Construction, Fairing and Smooth Joining Between Adjacent of the NURBS Surface[D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2010
- 李英杰. NURBS 曲面构造, 拼接及光顺的研究与实现[D]. 西安:西安理工大学,2010
- 15 Song Liping. Research on the Theory and the Application in Modeling of C-B-Spline Curve & Surfaces [D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2008
- 宋丽平. C-B 样条曲线曲面理论及其在造型中的应用[D]. 西安: 西安理工大学,2008
- 16 Shan Baozhong, Wang Shuyan, Niu Hanben *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, **10**(3): 319~323
- 单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨 等. Zernike 多项式拟合方法及应用 [J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(3): 319~323
- 17 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing*(Third Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007
- 18 Xu Jiancheng, Xu Qiao, Chai Liqun. Statistical measurement of power spectrum density of large aperture optical component[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1905~1908
- 徐建程, 许 乔, 柴立群. 大口径光学元件功率谱密度的统计法测量[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(8): 1905~1908

栏目编辑: 谢 婧