

非球面光学元件面形误差边缘处理方法 (特邀)

吴伦哲, 徐学科*, 吴令奇, 王 哲

(中国科学院上海光学精密机械研究所 精密光学制造与检测中心, 上海 201800)

摘要: 计算机控制光学元件面形修复 (Computer Control Optics Surfacing, CCOS) 需要通过计算驻留时间, 反复迭代, 从而得到更小的误差。因为干涉测试过程中边缘面形测试的条件限制, 只能得到更小孔径的误差分布图, 所以面形的预测性延拓是磁流变抛光、离子束抛光等加工方式的基础技术。基于面形误差的相似性和边缘误差的连续性为出发点, 开发了采用基于 Zernike 拟合和 Laplace 方程配合的方法进行光学元件面形误差边缘延拓技术。开展了相关理论分析, 设计相关算法并实现了延拓过程, 延拓结果符合面形相似形和连续性的加工要求, 采用直接法和残余误差计算方法对延拓结果进行评估, 结果证明了延拓方法的有效性。

关键词: 光学元件测试; 面形误差延拓; Zernike 拟合; Laplace 方程

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220602

Method of edge control on surface error in aspherical optics (*invited*)

Wu Lunzhe, Xu Xueke*, Wu Lingqi, Wang Zhe

(Centre of Precision Optics Manufacture and Metrology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Computer Control Optics Surfacing (CCOS) requires the surface error map for iterative processing to get low error by dwellingtime caculation. Because the smaller aperture of error map will be gotten in interferometer on edge of optic work part, so the predictive extrapolation of surface error map is the basic technology of magneto-rheological polishing, ion beam polishing and other machining methods. Based on the similarity of surface error and the continuity of edge error, the extrapolation of surface error method was developed, based on Zernike fitting and Laplace equation. The theory was studied and the algorithm was developed to get extrapolation of surface error map, fulfilling the similarity and the continuity. The result was evaluated by surface error comparison and residual error calculation, which was proved to be effective.

Key words: optics testing; extrapolation of surface error map; Zernike fitting; Laplace equation

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-08-22

作者简介: 吴伦哲, 男, 工程师, 硕士, 主要从事小工具加工、离子束抛光设备及工艺方面的研究。

通讯作者: 徐学科, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事激光光学元件超精密加工方面的研究。

0 引言

随着国家产业升级和高端制造业的迅猛发展,光学元器件被广泛的应用于光学成像、天文观测、高端制造等领域,加工对象也朝着口径更大、质量更轻、精度更高的复杂曲面方向发展。其中在天文观测领域,为了提升观测分辨率,一般采用非球面元件拼接的方式得到大口径的主镜系统。如 2021 年 12 月升空的詹姆斯·韦伯太空望远镜主镜直径高达 6.5 m,曲率半径 131.4 m,采用 18 块六角形镀金膜的铍镜拼接而成。同时,地基望远镜的主镜尺寸更大,欧洲极大望远镜 (European Extremely Large Telescope, E-ELT) 项目中,主镜尺寸高达 39.3 m,曲率半径 69 m,二次曲面系数-0.996,需要近 800 块六边形子镜拼接完成。对于由大量子镜拼接而成的非球面主镜系统,加工子镜的边缘不平整会增加衍射效应、增加总的散射光和背景噪声、降低波前质量等问题,所以控制边缘误差就显得尤为重要。在常用的非球面元件中,为了增加通光口径,减小元件尺寸等,也需要对边缘加工过程进行控制。目前,非球面元件主要仍采用小工具抛光、磁流变抛光、气囊抛光、离子束抛光等子口径加工方式。运动机构一般采用并联的定制化数控设备或者串联的六轴工业机器人实现。非球面光学元件加工过程中,依据干涉仪测试数据结果,通过程序处理实现工艺路径和驻留时间,从而实现加工过程,并依据上述步骤反复迭代,最终面形误差将达到收敛目标。面形误差迭代收敛过程中,由于干涉测试的条件限制、元件本身的边缘限制等因素,测试得到的面形数据口径往往小于实际运动机构的加工口径,此时需要对面形误差进行预测性的延拓处理。

目前,国内外各团队在相关方面均已经进行过一定的研究。David Walker、李洪玉等人利用有限元分析,基于去除函数模型建立了面形延拓算法,从而实现了无明显边缘痕迹的边缘延拓加工方案^[1-2]。焦长君等人在建立基于 Bayesian 原理的平面镜面驻留时间算法过程中,对数据边缘进行 Gaussian 延拓以消除边缘效应^[3]。李云等人推导并提出了一种基于高斯曲线的曲面延展算法,并将该曲面延展算法应用于带有高频噪声的面形误差工件的驻留时间求解过程中,使得光学元件边缘处的残余误差得到了抑制^[4]。除了采

用高斯曲线进行面形延拓,李云等人还引入非均匀有理 B 样条曲面并结合泽尼克 (Zernike) 多项式拟合对一典型的圆形自由曲面光学元件面形误差数据进行延展,使得驻留时间计算的残余误差明显减小^[5]。武建芬等人提出了采用 Gerchberg 延拓算法用于光学元件的边缘延拓,但是其主要用于低频面形的延拓^[6]。唐才学等人采用改进的二维 Gerchberg 带宽受限延拓算法实现连续位相板元件面形频域匹配的边缘延拓^[7]。但是光学加工还需要考虑低阶面形误差的相似性问题。上述研究均在一定程度上解决了子口径光学元件加工的驻留时间计算过程中面形误差的延拓问题,但是目前尚没有基于子口径加工装备特征和光学加工要求为基础的面形误差延拓方案。

综上,文中研究基于光学元件加工的基本要求,以面形的相似性和边缘误差的连续性为出发点,提出采用基于 Zernike 分析和存在边界条件的 Laplace 方程求解配合的方法进行光学元件面形误差边缘处理方案,得到了高质量的面形误差延拓结果。

1 面形误差延拓基础

1.1 光学元件加工装备特征

目前,各种子口径加工方式的共同特点是去除与驻留时间的线性关系。为了保证去除只是时间的函数,需要保证单位时间去除量,即去除函数的稳定性。以离子束抛光,磁流变抛光等为代表的光学元件面形误差收敛方式,去除函数稳定性均高于 98% 以上,去除函数稳定性标定一般可以使用加工沟槽的方式实现,如图 1 所示。

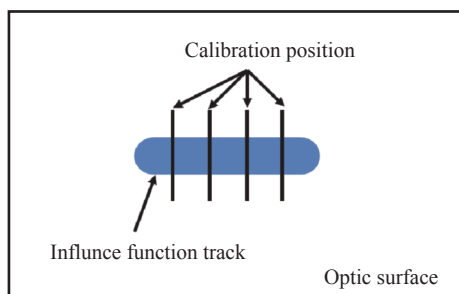


图 1 去除函数标定

Fig.1 Calibration of influence function

在保证去除函数稳定的情况下,子口径光学元件加工过程本质上是设备的运动控制问题。通常情况

下,可以计算机床的加工响应的最小空间频率 f_{\min} :

$$f_{\min} = \frac{V_{\Delta}^2}{2a_{\max}} \quad (1)$$

式中: V_{Δ} 为光学加工专机的线速度变化量; a_{\max} 为最大加速度。

由于空间频率的限制,一般可以采用低通滤波的方式对面形误差进行处理,从而避免无法实现的加工过程。同时,加工过程中设备速度变化不可能阶跃。由于上述原因,需要加工过程中面形误差连续,即面形误差的连续性。

1.2 光学元件特征

光学元件本身是自仿射分形结构,其示意图如图 2 所示。自仿射分形结构的微观形貌与宏观形貌相似,如图 3 所示。

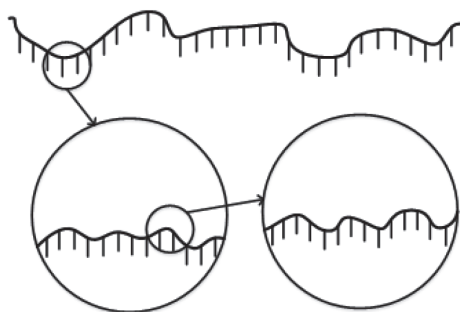


图 2 自仿射分形表面

Fig.2 Self-affine fractal surface

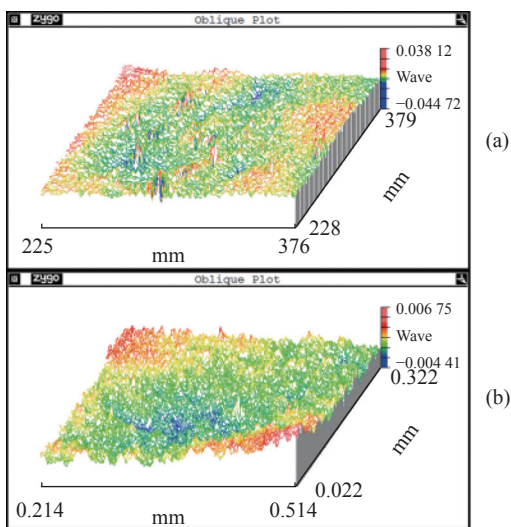


图 3 光学元件低频和高频误差

Fig.3 Surface error of optics in low frequency and high frequency

对于自仿射分形结构,其功率谱密度 PSD 可以表示为:

$$PSD \approx k \cdot q^{-2(H+1)} \quad (2)$$

式中: k 为由面形误差均方根值决定的常数; q 为空间频率;对于各向同性的自仿射分形结构,形状决定因子 H 一般在 0~1 之间。所以,在频率 q 之间的自仿射分形结构的功率谱密度如图 4 所示。

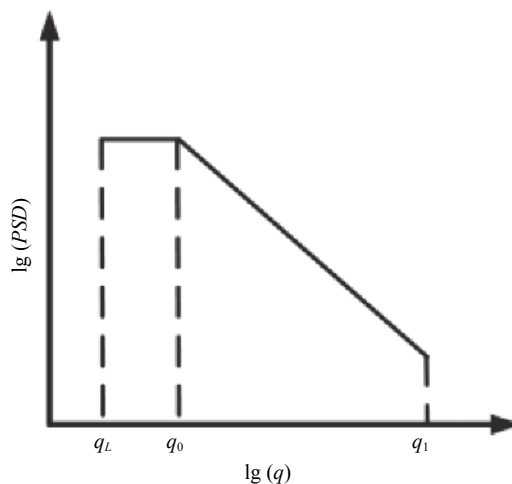


图 4 自仿射分形结构的功率谱密度

Fig.4 PSD diagram of a surface in self-affine fractal

由于光学元件的低频误差在 PSD 中占比较大,需要延拓结果尽量符合低频误差的面形形貌,即面形误差的相似性。

2 Zernike 分析和 Laplace 方程的面形延拓组合算法

2.1 基于 Zernike 分析的面形延拓算法

为了实现面形误差的相似性,需要对分析低阶面形误差采用 Zernike 分析的方式进行延拓,其算法流程示意图如图 5 所示。按照加工需求,采用 Zernike 分析提取低阶面形误差的 Zernike 系数并进行延拓,并将低阶延拓结果与高阶残留误差相加,得到加工面形的延拓结果。

采用 Zernike 分析的方式可以完全复制面形误差的低阶形貌,保证面形误差的连续性,但是无法处理面形误差的边缘连续性问题。所以需要采用基于 Laplace 方程的面形延拓算法对高阶面形误差进行处理。

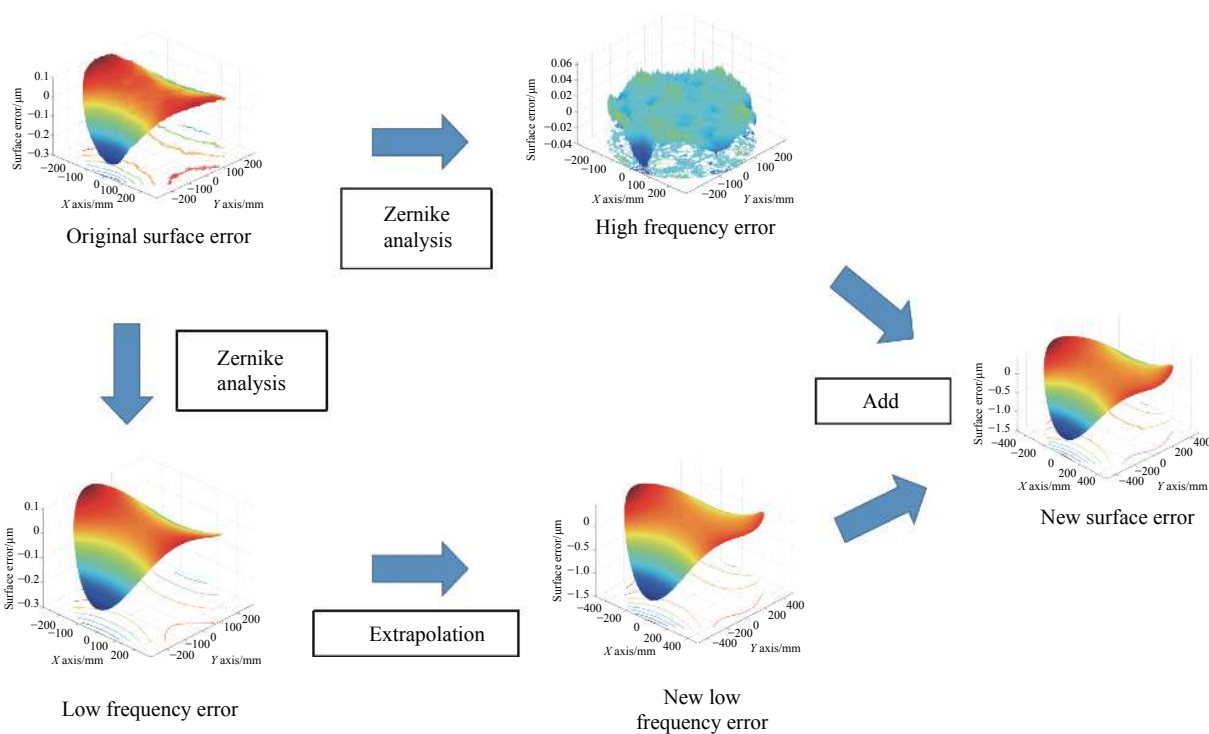


图 5 Zernike 分析面形误差延拓流程

Fig.5 Flow chart of surface error extrapolation in Zernike analysis

2.2 基于 Laplace 方程的面形延拓算法

针对高阶面形误差分布,假设面形误差分布符合 Laplace 方程,即延拓后面形误差 $f(x,y)$ 的 x 、 y 方向的二阶偏导数之和为 0, $f(x,y)$ 与时间无关,属于稳恒过程的 Laplace 方程,如公式 (3) 所示:

$$\frac{f^2}{\delta x^2} + \frac{f^2}{\delta y^2} = 0 \tag{3}$$

其边界条件如公式 (4) 所示:

$$f(x_b, y_b) = f_0(x_b, y_b) \tag{4}$$

式中: $f_0(x,y)$ 为延拓前的面形误差; (x_b, y_b) 为延拓边界点的坐标。综上,上述边界条件属于 Dirichlet 条件,它直接规定未知函数在边界上的数值。

基于上述问题,可以设计基于 Laplace 方程的面形延拓算法,如图 6 所示。

采用上述算法可以避免 Zernike 分析中高阶项由于次数过大,在延拓过程中带来的过大的塌边和翘边。但是上述算法无法保证延拓过程中低阶面形误差的相似性,所以需要上述算法组合使用,从而达到光学加工要求。

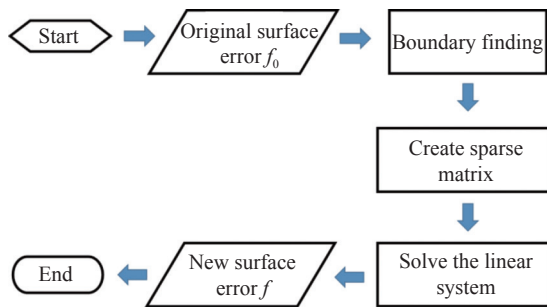


图 6 Laplace 方程的面形延拓算法流程

Fig.6 Flow chart of surface error extrapolation in Laplace's equation

2.3 面形延拓组合算法 (Z-L 算法)

综合 Zernike 分析和 Laplace 方程可以设计组合算法,流程如图 7 所示。对原始数据进行低通滤波处理后,通过 Zernike 分析提取出低频误差和高频误差,对于低频误差,基于 Zernike 系数并进行延拓得到结果;对于高频误差,通过寻边算法找到边界像素,创建稀疏矩阵并求解,从而得到高频误差的延拓结果,将延拓得到的低阶误差和高阶误差结合,得到最终的延拓结果。

组合算法需要考虑到加工装备的运动特征和光学元件面形误差的特征,实现加工过程中低阶面形误差

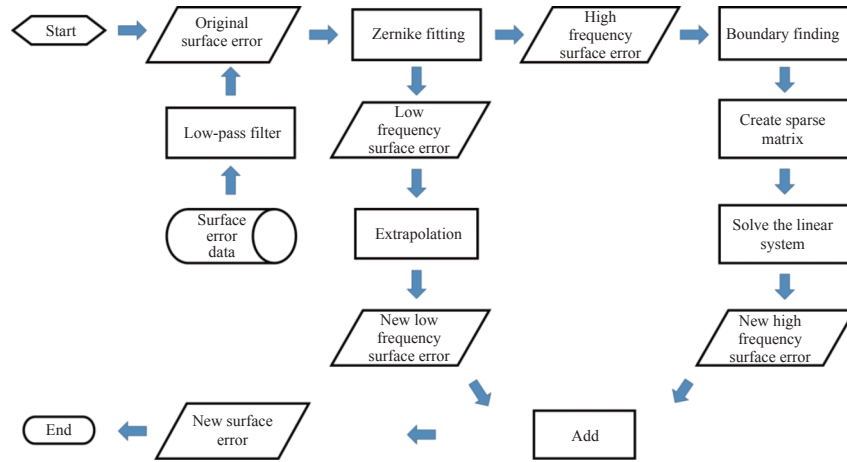


图 7 组合面形延拓算法流程

Fig.7 Flow chart of surface error extrapolation in Z-L

差的相似性和高阶面形误差的连续性。

3 边缘延拓验证实验与结果

3.1 延拓效果评估方式与结果

为了对延拓效果进行评估,设计并采用图 8 所示的方式进行对比评估。将原始数据按照延拓需要的口径裁剪,并将裁剪后的数据按照原始数据口径进行延拓。通过对比延拓数据和原始数据,对延拓效果进行评估。

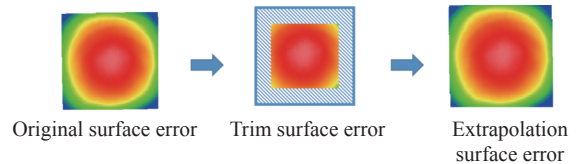


图 8 延拓评估方式

Fig.8 Evaluation method of extrapolation in Z-L

得到裁剪数据、原始数据和延拓数据,结果如图 9 所示。延拓数据整体与原始数据保持相似,同时对于高阶误差保持连续性。

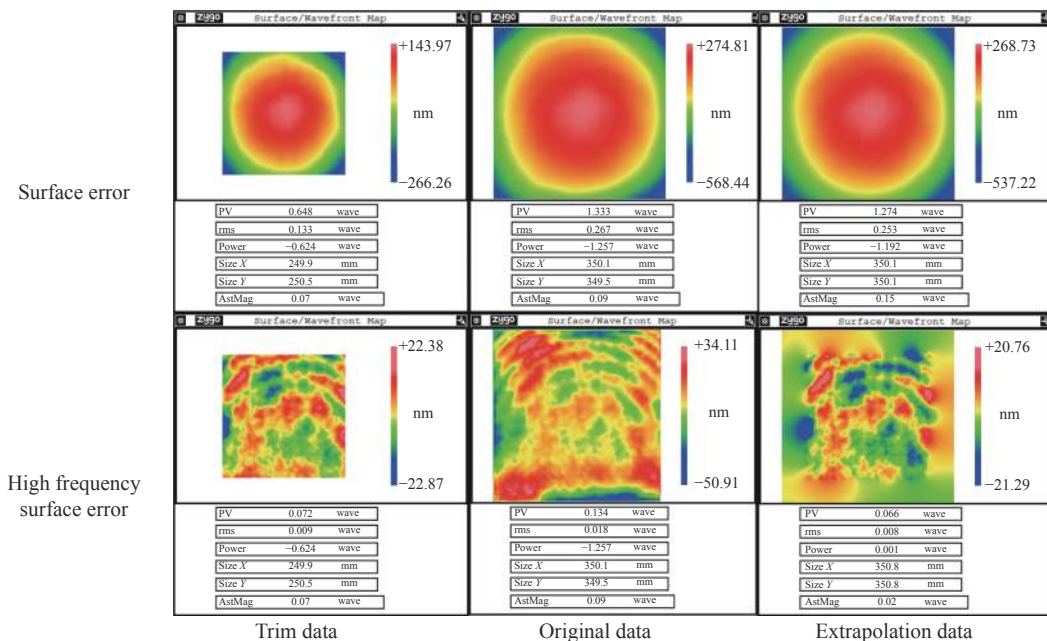


图 9 Z-L 面形延拓结果

Fig.9 Extrapolation surface error in Z-L

3.2 延拓效果评估

可采用两种方式对延拓结果进行评估,即直接对比和计算残余误差对比。采用直接对比,将延拓数据与原始数据相减,并截取不同口径的数据进行对比,结果见图 10。随着参考口径的放大,延拓结果与原始数据的误差逐渐放大,并显现出原始数据的误差特征。在 10 mm 边缘(实验中 279.4 mm 口径结果)预测

性延拓中,面形误差 PV 值小于 10λ ($\lambda=632.8$ nm),基本符合加工要求。

基于上述延拓结果,采用 40 mm 口径高斯型去除函数进行残余误差计算,去除函数和计算残余误差见图 11。全口径 (250 mm \times 250 mm) 计算残余误差 PV 为 6.894 nm, rms 为 0.492 nm。上述结果证明,采用 Z-L 延拓算法进行延拓的结果符合光学加工要求。

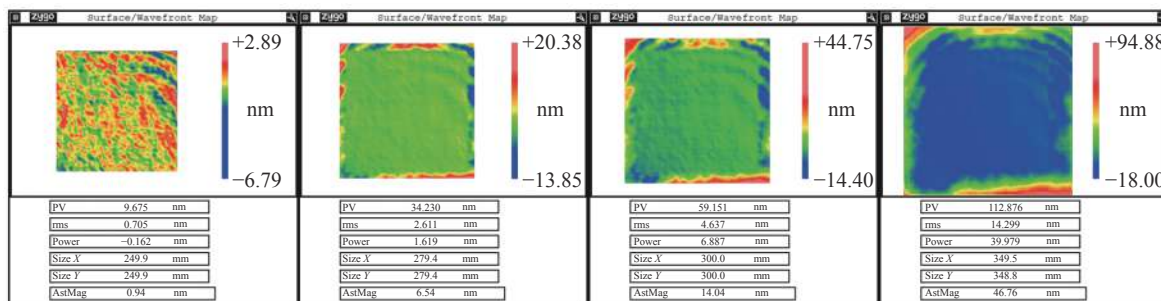


图 10 Z-L 延拓结果与原始数据对比结果

Fig.10 Extrapolation surface error in Z-L compared with original data

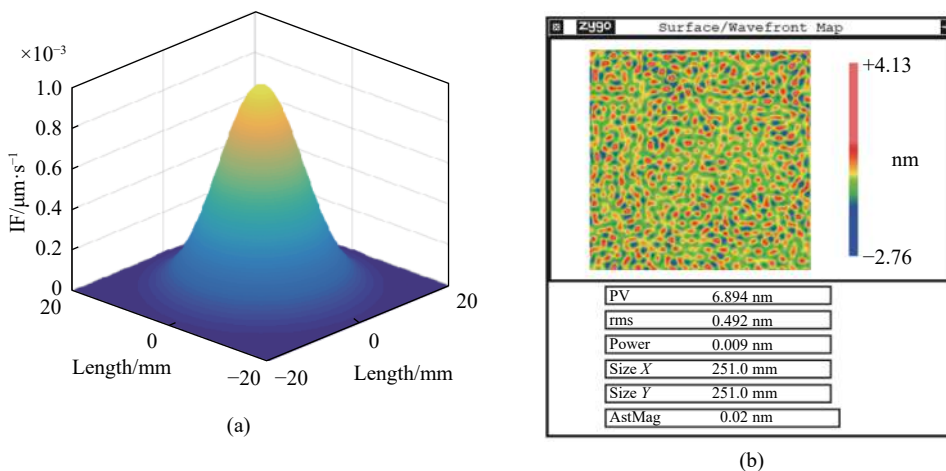


图 11 (a) 去除函数和 (b) 计算残余误差

Fig.11 (a) Influence function and (b) residual error

4 结论

为了实现非球面元件全口径的高精度加工,文中采用基于 Zernike 分析和存在边界条件的 Laplace 方程求解配合的方法进行光学元件面形误差边缘处理,设计裁剪延拓实验,通过直接评估和计算残余误差的方式对延拓结果进行评估,预测性延拓结果在 5 mm 边缘内,预测面形误差与实际误差小于 1/10 wave、

RMS<2.7 nm; 全口径内计算残余误差 PV<7 nm, RMS<0.5 nm, 符合光学元件加工需求。上述结果证明了采用 Z-L 延拓算法进行误差延拓的有效性。

参考文献:

[1] Walker D, Yu G, Li H, et al. Edges in CNC polishing: From mirror-segments towards semiconductors, paper 1: Edges on processing the global surface [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18):

- 19787-19798.
- [2] Li H, Walker D, Yu G, et al. Edge control in CNC polishing, paper 2: Simulation and validation of tool influence functions on edges [J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 370-381.
- [3] Jiao Changjun, Li Shengyi, Xie Xuhui, et al. Bayesian principle based dwell time algorithm for ion beam figuring of low gradient mirrors [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 253-259. (in Chinese)
- [4] Li Yun, Duan Guping, Xing Tingwen. Smoothly extending algorithm for the surface error of optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 408-412. (in Chinese)
- [5] Li Yun, Xing Tingwen. Surface error of optical components extended with non-uniform rational B-spline surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0722001. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] Tang Caixue, Yan Hao, Luo Zijian, et al. High precision edge extrapolation technique in continuous phase plate magnetorheological polishing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0442001. (in Chinese)