

连续位相板磁流变加工中高精度边缘延拓技术

唐才学, 颜浩, 罗子健, 张远航, 温圣林

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了提高磁流变加工连续位相板边缘加工质量, 实现元件全口径抛光, 必须对元件原始误差面形进行边缘延拓, 针对现有边缘延拓算法的不足, 提出了采用改进的二维 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。该方法首先采用复调制频谱放大技术 Zoom FFT 对元件原始误差面形进行频谱分析, 计算其高低截止频率; 然后采用改进后的二维 Gerchberg 带宽受限延拓算法进行迭代计算, 在原始面形外围延拓出与原始面形同频的高精度延拓结构面形。采用尺寸为 100 mm×100 mm 具有复杂频谱结构的连续位相板元件进行边缘延拓和磁流变加工实验, 实验结果表明: 采用改进的 Gerchberg 边缘延拓技术延拓的面形边缘更加规整, 边缘效应影响半径由 5 mm 减小到 2 mm, 面形残余误差 RMS 从 19.3 nm 减小到了 9.7 nm。这说明该边缘延拓技术可以明显提高连续位相板面形的边缘加工质量和整体收敛精度。

关键词: 磁流变加工; 边缘延拓; Gerchberg 延拓算法; ZoomFFT 算法; 连续位相板

中图分类号: TH162.1; TP310.6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0442001

High precision edge extrapolation technique in continuous phase plate magnetorheological polishing

Tang Caixue, Yan Hao, Luo Zijian, Zhang Yuanhang, Wen Shenglin

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to improve the edge quality of the continuous phase plate in magnetorheological polishing and realize the full aperture polishing of the components, the edge extrapolation of the original error profile must be carried out. In view of the shortcoming of the existing edge extrapolation algorithm, a two-dimensional Gerchberg bandlimited extrapolation algorithm was proposed to realize the edge extrapolation technique that was frequency domain matching for continuous phase plate. Firstly, Zoom Fourier transform was applied to the original error profile to get its high and low cutoff frequencies. Then, the modified two-dimensional Gerchberg extrapolation algorithm was used to fill data in extrapolation region around the original region to get the same spectral structure as the original region. At last, an magnetorheological polishing experiment was performed on a 100 mm×100 mm continuous phase plate element with complex frequency spectrum structure. The experimental results show that the edge processed by the method is more regular and the edge effect radius is reduced from 5 mm to 2 mm, and the residual error RMS is reduced from 19.3 nm to 9.7 nm. It indicates that the modified Gerchberg edge

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2018-12-26

基金项目: 中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室科研基金(ZZ16008)

作者简介: 唐才学(1983-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事位相光学元件制造及磁流变抛光技术方面的研究。Email: ispw@qq.com

extrapolation technique can obviously improve the edge quality and the overall convergence precision of continuous phase plate.

Key words: magnetorheological finishing; edge extrapolation; Gerchberg extrapolation algorithm; ZoomFFT algorithm; CPP

0 引言

连续位相板(CPP)^[1]是大型激光装置中一种非常重要的控制远场光束质量的衍射光学元件,因其具有高能量利用率、良好的焦斑形态控制能力等优点而被世界各大激光装置广泛应用。连续位相板的显著结构特征是大深度、复杂随机结构、大陡度(小于 10 mm 的空间周期起伏)、高精度,这给 CPP 加工带来了很大的困难,国内外通常采用磁流变抛光技术进行连续位相板的加工。

磁流变抛光技术^[2]是一种高确定性的修形技术,驻留时间计算是磁流变抛光工艺中的关键环节,直接决定了元件面形的修形精度。由于边缘效应影响,在元件边缘处驻留时间的计算精度会下降,越往元件边缘,影响越为严重。为了抑制边缘效应的影响,需要将加工区域扩展到整个元件区域以外,使得磁流变去除函数覆盖整个元件边缘区域,但是在元件边缘外部无有效的面形数据,无法求解驻留时间,因此必须要在元件外围填充有效数据,即边缘延拓。为了提高驻留时间计算精度,要求延拓的区域频谱特征与原始区域尽量相同,且延拓区域和原始区域过渡光滑,不存在明显的分界面。

最简单的边缘延拓方法是零值填充法和线性外插值法。零值填充法是将延拓区域所有无效数据用零值填充;线性外插值法则只能够利用少数的面形内部区域有效点信息,插值精度不高。这两种方法得到的延拓面形不光滑且形态结构与原始区域往往差异较大,同时在延拓边界处也存在明显的分界面,无法满足实际加工的要求。常见的且用于光学元件延拓的边缘延拓算法有高斯边缘延拓法^[3]及其基于梯度信息的改进算法^[4]、基于非均匀有理均匀 B 样条曲面延拓算法^[5]、基于保形变换的边缘延拓算法^[6]和基于偏微分方程的最小曲率延拓法^[7],这些方法对面形分布均匀、具有回转对称结构的低频面形比较适用,但难以用于结构复杂、梯度变化剧烈的面形结构。

原本用于带宽受限信号延展的 Gerchberg 延拓

算法^[8]是一种基于频率的延拓算法,理论上该方法可以保证延拓区域和原始区域面形具有相同的频谱结构,延拓出的面形相对平滑,而且适应各种复杂结构面形。国内学者^[9-10]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。传统 Gerchberg 延拓算法在实际使用中存在着难以克服的困难, Gerchberg 延拓算法相当于进行了低通滤波,但是其二维频谱结构轮廓形状往往很复杂,难以确定合适的频谱域,实际延拓的面形效果往往不理想。

文中以具有复杂频谱结构的空域面形结构(以连续位相板元件为代表)为研究对象,分析了传统 Gerchberg 延拓算法的性质和特点及在实际应用中的不足,提出采用改进的 Gerchberg 延拓算法^[11]用于复杂结构面形的边缘延拓,解决了传统算法频谱滤波截止频谱域的选取难题,同时建立了复杂频谱结构面形元件的边缘延拓工艺,其对各种复杂面形都很容易获得高质量的延拓面形,最终实现了连续位相板复杂结构面形的高精度边缘延拓。

1 改进的 Gerchberg 边缘延拓算法

1.1 传统 Gerchberg 延拓算法原理

Gerchberg 延拓算法^[11]常用于带宽受限信号的延展,一般是一维形式。为了能够将该算法用于面形数据延拓需要对其进行二维拓展。传统二维 Gerchberg 延拓算法原理如图 1 所示。

设面形二维数据(空域)为 $u(x, y)$ (后续简称 u),其定义域为 T ,对应的频谱数据为 $U(f_x, f_y)$,定义域为 Ω ,设门限函数

$$G_T = \begin{cases} 1, & (x, y) \in T \\ 0, & (x, y) \notin T \end{cases} \quad (1)$$

$$G_\Omega = \begin{cases} 1, & (f_x, f_y) \in \Omega \\ 0, & (f_x, f_y) \notin \Omega \end{cases} \quad (2)$$

u_N 表示第 N 次迭代, u_0 表示初始值, $\text{FFT}()$ 表示傅里叶变换, $\text{IFFT}()$ 表示傅里叶反变换。

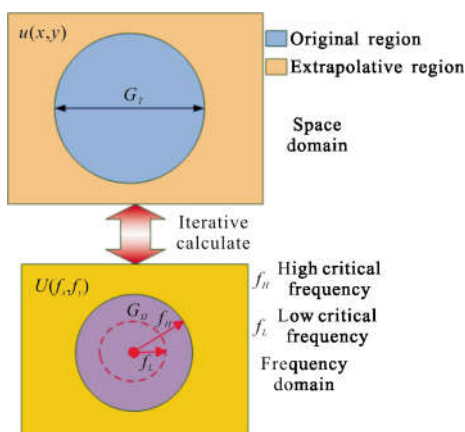


图 1 Gerchberg 延拓算法示意图

Fig.1 Block diagram of Gerchberg extrapolation algorithm

则二维 Gerchberg 延拓算法具体过程如下。

- (1) 设定面形数据 u 初始值: $u_0=uG_T$;
- (2) 对面形数据 u_N 进行频域滤波: $B_N=IFFT(G_\Omega \times FFT(u_N))$;
- (3) 对滤波后的数据 B_N 进行处理: G_T 区域之外的数据保持不变, G_T 区域之内的数据修改原始值: $C_N=(1-G_T)B_N+uG_T$;
- (4) 得到第 $N+1$ 次的面形数据: $u_{N+1}=C_N$;
- (5) 分析 u_{N+1} 面形是否满足要求, 如果满足则终止迭代, 最终结果为 u_{N+1} ; 否则进入步骤(2)再次计算, 直至延拓面形达到要求。

上述过程, 写成综合的迭代形式为:

$$u_{N+1}=uG_T+(1-G_T)IFFT(G_\Omega FFT(u_N))$$

$$u_0=uG_T \quad (3)$$

公式(3)中, 二维 Gerchberg 延拓算法也可以写成级数形式为:

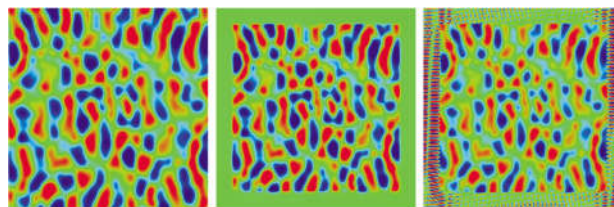
$$u_N=\sum_{n=0}^N H^n uG_T$$

$$u_0=uG_T, H=(1-G_T)IFFT(G_\Omega FFT(u_N)) \quad (4)$$

Papoulis^[12]从数学上证明了随着迭代次数的增加, u_N 会逐渐收敛于原始数据 u , 这保证了该算法的有效性。上述算法存在的明显缺陷是其对频域门限函数 G_Ω 非常敏感, G_Ω 选择不当会导致实际的延拓效果较差, 而 G_Ω 往往又是无法准确估算(图 1 中 f_H 和 f_L), 使得该方法难以准确使用, 典型情况如图 2 所示。

图 2(a)是连续位相板原始面形数据, 图 2(b)是 G_Ω 区域选择过于低频, 延拓区域数据频谱很小, 延拓区域数据几乎全为零, 起不到边缘延拓的效果;

图 2(c)是 G_Ω 区域选择过于高频, 延拓区域充满了微小结构与原始面形完全不匹配, 边缘延拓丧失了准确性; 因此受限于 G_Ω 区域难以准确选择, 传统 Gerchberg 算法往往难以得到较为理想的边缘延拓效果, 需要对其进行改进。



(a) 原始面形 (b) G_Ω 区域频率过低 (c) G_Ω 区域频率过高
(a) Original data (b) Frequency value of G_Ω is too low (c) Frequency value of G_Ω is too high

图 2 频域门限函数 G_Ω 对延拓算法非常敏感

Fig.2 Algorithm is sensitive to spectral pupil G_Ω

1.2 改进的 Gerchberg 延拓算法

针对传统 Gerchberg 延拓算法在 G_Ω 区域选择上的困难, 提出了改进的 Gerchberg 延拓算法^[11], 其核心思想是将难以确定的 G_Ω 分解为易于确定的投影 $G_{\Omega X}$ 和 $G_{\Omega Y}$, 从而巧妙地解决了上述难题。如图 3 所示, 首先进行 X 方向的延拓, 采用一维傅里叶变换形式, 然后再进行 Y 方向延拓, 最终合成二维形式, 这样做的好处是: 将频域定义域 G_Ω 分解成投影 $G_{\Omega X}$ 和 $G_{\Omega Y}$ 后就不需要知道 G_Ω 的区域形状, 只需要知道其在 X 和 Y 方向的边界长度即可。由于处理的面形数据频率分布几乎都集中在低频中心区域, 因此只需要计算面形数

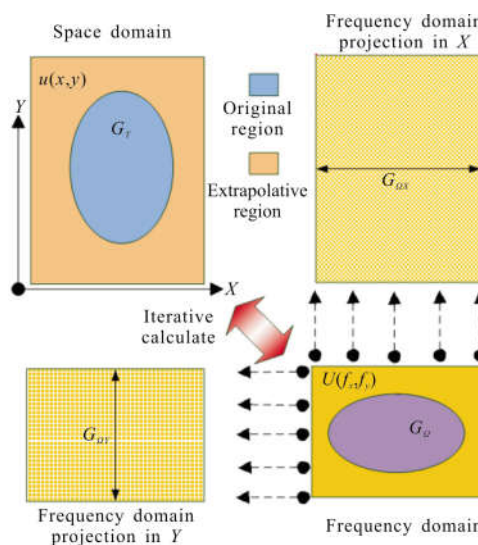


图 3 改进的 Gerchberg 延拓算法示意图

Fig.3 Block diagram of modified Gerchberg extrapolation algorithm

据的频率有效边界即可,这大大简化了 G_Ω 的求解。

定义变量 H_x, H_y 如公式(5)所示:

$$H_x = (1 - G_T) \text{IFFT}_x(G_\Omega \text{FFT}_x(uG_T))$$

$$H_y = (1 - G_T) \text{IFFT}_y(G_\Omega \text{FFT}_y(uG_T)) \quad (5)$$

式中: $\text{FFT}_x(), \text{FFT}_y()$ 分别为 X, Y 方向一维傅里叶变换; $\text{IFFT}_x(), \text{IFFT}_y()$ 分别为 X, Y 方向一维傅里叶反变换。则改进后的 Gerchberg 延拓算法表达式为:

$$u_{N+1} = u_N + v_{N+1}$$

$$v_{N+1} = H_y v_N + w_{N+1}$$

$$w_{N+1} = H_x w_N$$

$$u_0 = v_0 = w_0 = uG_T \quad (6)$$

公式(6)中算法的收敛性在数学上也得到了证明,说明该迭代算法是有效的,同时改进的 Gerchberg 延拓算法具有计算机编程易实现、计算效率高的优点。

2 连续位相板边缘延拓过程及分析

2.1 改进的 Gerchberg 算法进行边缘延拓流程

采用改进的 Gerchberg 延拓算法进行边缘延拓时,首先要计算面形频域定义域 G_Ω 在 X, Y 方向的投影 G_{Ω_x} 和 G_{Ω_y} ,这可以对原始面形数据进行傅里叶变换,在频率内计算在 X 和 Y 方向的频谱长度。通常对于大多数原始面形数据,傅里叶变换后频域只有少数有效数据点难以准确计算 G_{Ω_x} 和 G_{Ω_y} 。文中提出采用基于复调制的 ZoomFFT 法^[13]对原始频谱进行局部放大,从而准确计算出 G_{Ω_x} 和 G_{Ω_y} ,然后输入迭代次数,进行延拓运算,当面形延拓结果满足要求时终止计算,否则修改迭代次数再次进行运算,整个求解过程如图 4 所示。

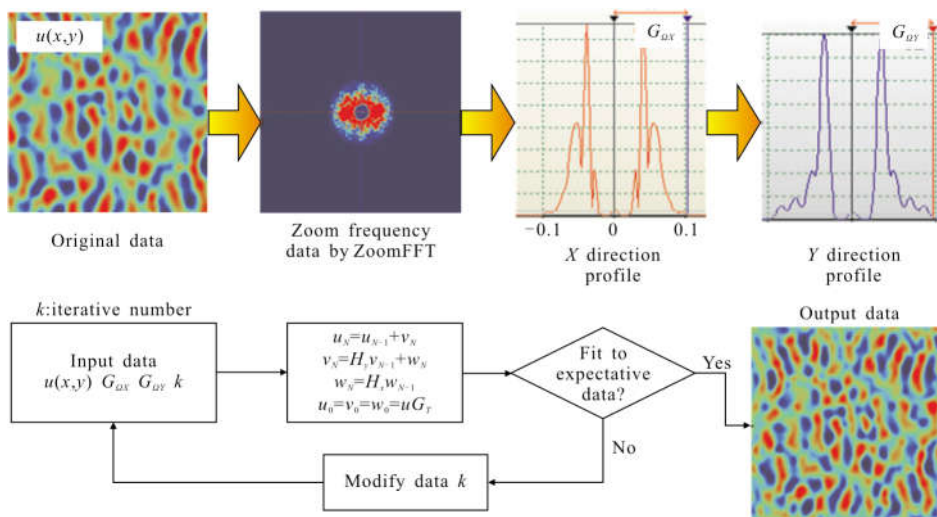


图 4 改进的 Gerchberg 算法进行边缘延拓流程图

Fig.4 Flow-process diagram of modified Gerchberg algorithm for edge extrapolation

在图 5 中,随着迭代次数增多,则边缘延拓区域的中高频结构增多,同时与原始区域频域结构越接

近,如果选择合适的迭代次数,则理论上可以完全收敛到与原始区域有一样的空间频谱结构。

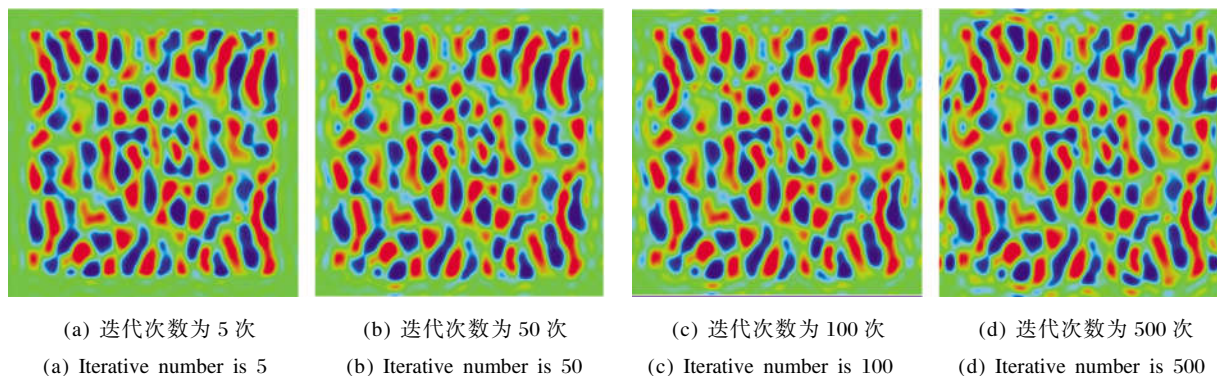


图 5 Gerchberg 延拓算法迭代次数与收敛性关系

Fig.5 Relationship between iterative number and modified Gerchberg algorithm's convergence

在图 6 中, 当迭代次数很少时, 延拓区域 (Extrapolative region) 数据数值很小, 导致整个区域 (Whole region) 数据 RMS 也随之减小; 随着迭代次数的增加, 延拓区域数据 RMS 快速增加, 到特定迭代次数时, 其数据 RMS 等于原始区域 (Original region) 数据 RMS, 延拓区域和原始区域具有相似的面形结构分布, 此时往往具有最佳的边缘延拓质量; 随着迭代次数的进一步增加, 延拓区域数据 RMS 会大于原始区域, 此时延拓区域面形分布更多细小结构, PV、RMS 都偏大, 边缘延拓质量反而下降。因此通常可以选择当延拓区域数据 RMS 等于原始区域数据 RMS 对应的迭代次数为最终的迭代次数。

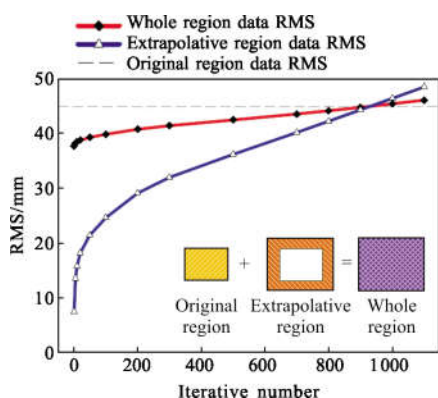


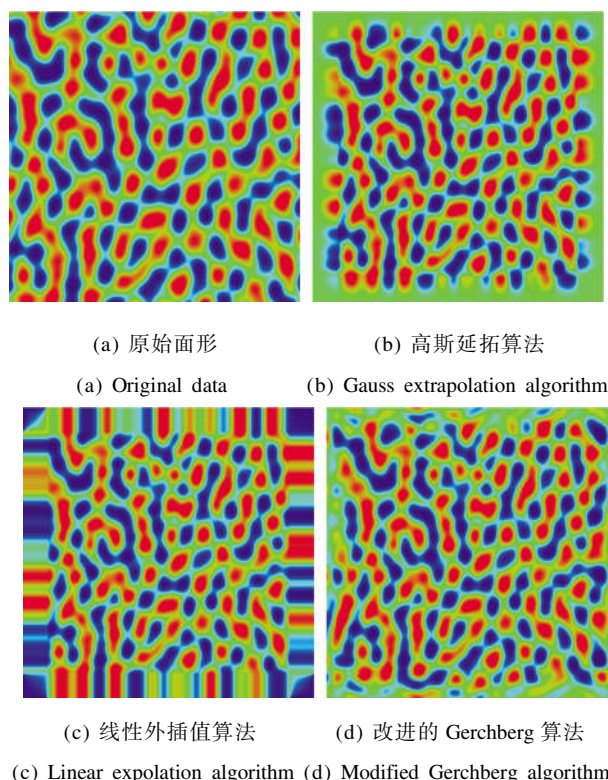
图 6 延拓区域面形 RMS 与迭代次数的关系

Fig.6 Relationship between iterative number and original region, extrapolative region, whole region

2.2 不同延拓算法延拓效果比较分析

为了比较不同边缘延拓算法在连续相位板边缘延拓中的差异, 分别采用线性外插值法^[14]、高斯边缘延拓法^[3]、改进的 Gerchberg 延拓法对同一连续相位板面形进行边缘延拓, 结果如图 7 所示。

在图 7 中, 高斯函数延拓法是将边缘数据按照高斯函数进行插值, 只能延拓出平滑的低频面形数据; 线性外插值算法只能利用少量最接近边缘的原始数据信息, 延拓的面形近似把原始边缘数据外推, 效果最不理想; 改进的 Gerchberg 延拓法可以延拓出与原始面形同频的结构, 延拓的面形频谱丰富, 与原始数据融为一体, 面形也比较光滑。因此对于具有复杂频谱结构的面形如连续相位板, 在上述几种边缘延拓算法中采用改进的 Gerchberg 延拓法通常是最佳选择。



(a) 原始面形 (b) 高斯延拓算法
(a) Original data (b) Gauss extrapolation algorithm

(c) 线性外插值算法 (d) 改进的 Gerchberg 算法
(c) Linear extrapolation algorithm (d) Modified Gerchberg algorithm

图 7 采用不同延拓算法对连续相位板面形进行延拓

Fig.7 Results of CPP edge extrapolation compared with several extrapolation algorithms

改进的 Gerchberg 边缘延拓算法虽然能够在延拓区域构造和原始区域结构非常相似的面形, 但是也存在一个问题: 延拓区域和原始区域连接处过渡不光滑, 存在分界面, 影响最终边缘延拓质量, 这可以通过优化迭代次数、 G_{OX} 和 G_{OY} 频率参数进行抑制; 也可以借鉴图像拼接融合算法^[15]进行匀滑。

3 边缘延拓验证实验与结果

为了验证改进的 Gerchberg 边缘延拓算法在连续相位板加工中的实际效果, 采用磁流变机床加工相同图案的连续相位板, 综合比较不同边缘延拓算法对面形最终加工质量的影响。

连续相位板设计口径为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 实验采用尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 熔石英元件进行全口径加工。CPP 设计 $PV=2.014\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 设计 $RMS=218.9\text{ nm}$, 如图 8 所示。

为了保证加工时磁流变抛光头运动轨迹能够完全覆盖元件, 元件上下左右各边的延拓量至少要大于去除函数尺寸的一半, 由于磁流变去除函数不对称, 面形总体延拓量应为去除函数长边的尺寸。实验

采用的去除函数尺寸 5.9 mm×18.8 mm,故总体延拓量为 18.8 mm,近似为 19 mm,所以延拓后元件尺寸应该为 119 mm×119 mm。

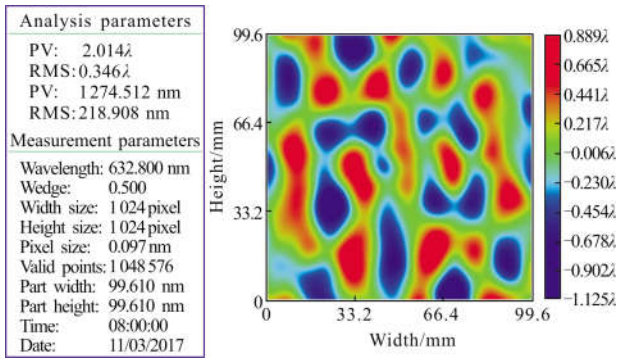


图 8 连续位相板(CPP)设计面形

Fig.8 Design data of CPP

边缘延拓结果如图 9 第一排所示,图 9(4)示出改进的 Gerchberg 边缘延拓相比于图 9(2)线性外插值延拓、图 9(3)高斯边缘延拓,其延拓区域面形和原始区域的面形结构更加相似,RMS 值和原始面形更加接近,边界过渡也更光滑,综合评价其具有更好的边缘延拓质量,这也充分说明了该方法的有效性。

实验基于 MRP1200 型磁流变机床,使用氧化铈抛光液,磁流变液流量 1 200 mL/min,缎带厚度 1.3 mm,浸入深度 0.4 mm。实验分为四组,第一组是不延拓,第二组是采用线性外插值延拓,第三组采用高斯延拓,第四组采用改进的 Gerchberg 延拓;实验中每组元件采用相同的去除函数,多次迭代加工,直到面形无法再进一步收敛为止;经过三四次加工最终完成各组 CPP 的加工,结果如图 9 所示。

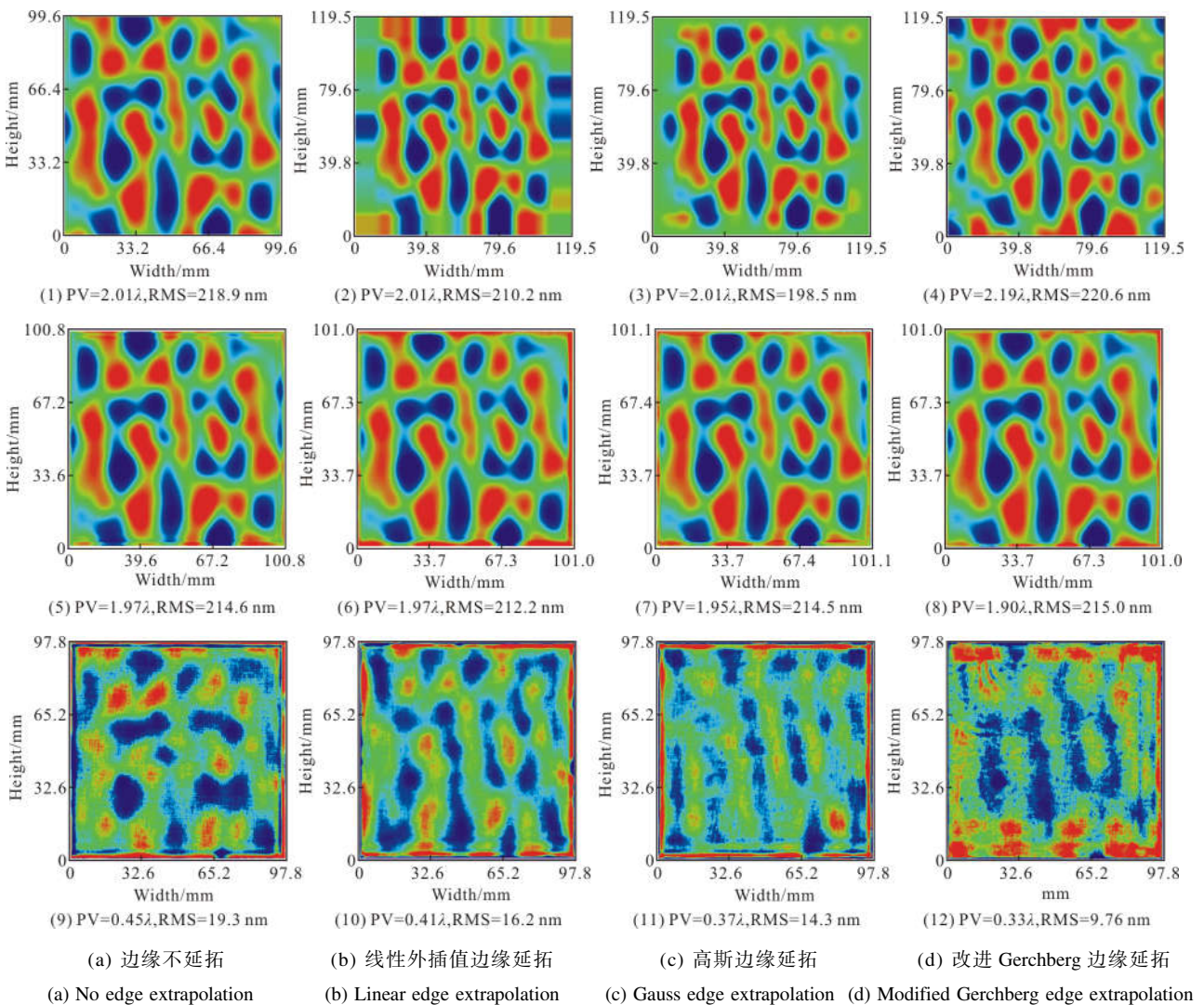


图 9 CPP 边缘延拓及不进行延拓 MRF 实验结果

Fig.9 Result of MRF experiment for CPP between edge extrapolation and normal process

图 9 中,第一排是 CPP 设计面形边缘延拓后的面形;第二排是实验完成后 CPP 全口径加工面形(100 mm×100 mm);第三排是 CPP 残余误差分布面形。第一列即图 9(a)是面形不延拓实验结果,其加工面形边缘处产生不规则的形状,影响加工质量,最大宽度约为 5 mm,同时残余 RMS 值为 19.3 nm,是实验中收敛精度最差的;图 9(b)是采用线性外插值延拓、图 9(c)是采用高斯延拓的实验结果,这两种方法要比不延拓好,延拓后加工面形边缘更加规整,边缘影响半径约 3 mm,总体而言,高斯延拓要优于线性外插值延拓;图 9(d)是改进的 Gerchberg 延拓实验结果,加工面形边缘最为匀滑,边缘影响半径约 2 mm,同时残差面形边缘也更加平整,面形 RMS 值收敛到 9.7 nm,是实验中收敛精度最好的。因此在连续位相板磁流变加工中,采用改进的 Gerchberg 边缘延拓方法进行全口径加工可以明显提高元件边缘加工质量和残差面形的收敛精度。

4 结 论

为了抑制磁流变加工过程中的边缘效应,提高连续位相板边缘加工精度,必须对元件边缘进行延拓。文中采用改进后的 Gerchberg 边缘延拓算法在元件误差面形外围延拓出与原始区域相同频谱结构的面形,实现了高质量的边缘延拓。磁流变加工验证实验结果表明进行边缘延拓后,元件边缘加工质量得到明显提高,相比于不延拓的元件,边缘效应影响区域半径由 5 mm 减小到 2 mm,面形残余 RMS 由 19.3 nm 收敛到 9.7 nm,提高了连续位相板的加工精度。这充分说明文中提出的边缘延拓算法在连续位相板磁流变加工中具有明显改善作用。

参考文献:

- [1] Xu Mingjin, Dai Yifan, Xie Xuhui, et al. Error analysis of ion beam figuring for fabrication of continuous phase plates with small feature structures [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2975–2982. (in Chinese)
- [2] Yan Hao, Tang Caixue, Luo Zijian, et al. Control of magnetorheological finishing on mid-spatial frequency error of flat optics [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3076–3082. (in Chinese)
- [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 componets extended with non uniform rational B-spline surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 212–218. (in Chinese)
- [6] Li Longxiang. Study on the key techniques of magnetorheological finishing for large aspheric optics [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [7] Wang Wanyin, Qiu Zhiyun. The research to a stable minimum curvature gridding method in potential field data processing[J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(6): 2003–2010. (in Chinese)
- [8] Jones M C. The discrete Gerchberg algorithm [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, 34(3): 624–626.
- [9] 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)
- [10] Cheng Haobo. Independent Variables for Optical Surfacing Systems[M]. New York: Springer, 2014.
- [11] Robert J Marks. Gerchberg's extrapolation algorithm in two dimensions[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(10): 1815–1820.
- [12] Papoulis A. A new algorithm in spectral analysis and band-limited extrapolation[J]. *IEEE Trans Circ Sys*, 1975, 22(9): 735–742.
- [13] Ding Kang, Xie Ming, Yang Zhijian. The Theory and Technology of Discrete Spectrum Correction [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [14] William Press, Saul Teukolsky, William Vetterling, et al. Numerical Recipes-The Art of Scientific Computing[M]. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [15] Luo Yuan, Zhang Ke, Ji Ming. Color image fusion method for enhancing situation awareness of ICA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S126002. (in Chinese)