

文章编号 1004-924X(2016)12-3076-07

平面光学元件中频误差的磁流变加工控制

颜 浩*, 唐才学, 罗子健, 温圣林

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要: 为了利用磁流变加工实现对大口径平面光学元件波前中频误差的控制, 研究了磁流变抛光去除函数的频谱误差校正能力和磁流变加工残余误差抑制方法。首先, 比较了模拟加工前后元件中频功率谱密度(PSD1)误差和元件 PSD 曲线的变化, 分析了磁流变去除函数的可修正频谱误差范围。然后, 利用均匀去除方法分析了加工深度、加工轨迹间距和去除函数尺寸等磁流变加工参数对中频 PSD2 误差的影响, 提出了抑制中频 PSD2 误差的方法。最后, 对一块 400 mm×400 mm 口径平面元件的频谱误差进行了磁流变加工控制实验。实验显示: 3 次迭代加工后, 该元件的波前 PV 由加工前的 0.6 λ 收敛至 0.1 λ, 中频 PSD1 误差由 5.57 nm 收敛至 1.36 nm, PSD2 由 0.95 nm 变化至 0.88 nm。结果表明: 通过优化磁流变加工参数并合理选择加工策略, 可实现磁流变加工对大口径平面光学元件中频误差的收敛控制。

关键词: 磁流变加工; 平面光学元件; 中频误差; 功率谱密度; 去除函数

中图分类号: TN305.2; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.3076

Control of magnetorheological finishing on mid-spatial frequency error of flat optics

YAN Hao*, TANG Cai-xue, LUO Zi-jian, Wen Sheng-lin

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

* Corresponding author, E-mail: yanhao0808@foxmail.com

Abstract: To control the mid-spatial frequency error of a flat optics by Magnetorheological Finishing (MRF), the correction ability of frequency error by the MRF removal function and the suppression method of residual error created by the MRF were investigated. Firstly, the changes of mid-spatial frequency PSD1 (Power Spectral Density 1) errors of the optics and the PSD curves before and after simulating the MRF were compared and the correctable frequency error range of the MRF removal function was analyzed. Then the effects of MRF processing parameters such as removal depth, tool-path intervals and the size of removal function on mid-spatial frequency PSD2 were analyzed based on uniform remove way and a method to suppress the mid-spatial frequency PSD2 error was established. Finally, the flat optics with a size of 400 mm×400 mm was polished by the MRF. Experimental results indicate that the wavefront PV of the flat optics is converged from 0.6 λ to 0.1 λ, the PSD1 error is converged from 5.57 nm to 1.36 nm, and the PSD2 error changes from 0.95 nm to 0.88 nm. It is concluded that the MRF has the abilities to control mid-spatial frequency error of large aperture flat

收稿日期: 2016-11-08; 修订日期: 2016-11-17.

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资助项目(No. ZZ15012)

optics by optimizing and choosing MRF processing parameters and corresponding strategies.

Key words: magnetorheological finishing; flat optics; mid-spatial frequency error; Power Spectral Density(PSD);removal function; high power laser

1 引 言

激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)工程所使用的高功率强激光装置,对大口径平面光学元件的需求数量巨大,例如美国劳伦斯·利弗莫尔国家重点实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)所建造的国家点火装置(Nation Ignition Facility, NIF),其 192 路激光束中一共使用了超过 2000 件口径大于 400 mm 的平面光学元件^[1]。在对大口径平面光学元件数量随需求巨大的同时,对这些平面光学元件的全频段尤其是中频段频谱误差也提出了极高的要求。LLNL 将 NIF 系统大口径平面元件的面形误差分为低、中、高 3 个不同的空间频率区域。其中,中频段频谱误差的空间周期尺度为 33 mm~0.12 mm,并且采用了基于功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的评价方法。受检测手段的限制,又将中频段细分为 PSD1 和 PSD2 两个频段,两上频段的空间周期尺度分别为 33 mm~2.5 mm 和 2.5 mm~0.12 mm。NIF 要求平面元件中频误差的波前 PSD 曲线要在经验评判曲线之下,同时 PSD1 频段的 $RMS \leq 1.8$ nm, PSD2 频段的 $RMS \leq 1.1$ nm。中频误差对激光系统的影响主要体现在由光束的调制度变大所引起的小尺寸非线性自聚焦,从而造成元件的成丝破坏,危害激光系统的安全运行^[2]。

在强激光装置大口径平面光学元件的加工流程中,基于确定性抛光技术的精密抛光工序是整个高精度元件制造过程中最重要的环节,其承担着光学元件面形误差收敛至要求范围内、提高表面质量的功能。确定性抛光技术中的小工具数控抛光以定量的面形检测结果为输入,基于线性抛光控制理论,使得抛光过程具有极大的可控性,从而大大提高了元件的加工效率和加工质量。相较于其它的小工具抛光技术,磁流变抛光技术是一种先进的柔性小工具抛光技术,其通过电磁场改变抛光液的流变特性,以使抛光工具对光学元件表面误差进行修正。该技术既具有固着磨粒加

工高效的优点,又保留了散粒磨料抛光光滑的优势,加工过程中可控性极强,可使元件具有高面形精度的同时,又能保证超光滑和低缺陷的表面质量以及高抗激光损伤阈值的能力,在强激光光学元件加工领域中有着十分重要而广阔的应用前景^[3-6]。美国 NIF 中所使用的大口径连续位相板、聚焦透镜、采样光栅基板等光学元件均采用了磁流变抛光高精加工手段^[1,7]。但是,由于磁流变抛光使用了比加工元件外形尺寸小得多的去除函数,在快速修正加工元件低频误差的同时,可能还会小尺度制造误差,这些小尺度误差的引入将会导致磁流变加工元件的中频误差恶化,以致无法满足元件中频误差指标的要求^[8]。本文将磁流变加工技术应用于大口径平面光学元件的中频误差加工控制中,讨论了磁流变抛光去除函数的频谱误差校正能力分析方法和磁流变加工残余误差抑制方法,并通过实验证明了该磁流变加工工艺对平面光学元件的中频 PSD1 误差的可以收敛加工,对中频 PSD2 误差增长的具有抑制能力。

2 磁流变加工对中频误差的控制原理

磁流变加工可以看作是一种计算机控制光学表面成形(CCOS)的技术,磁流变抛光去除函数在计算机的控制下,按一定轨迹在元件表面运动,通过控制去除函数的驻留时间和其它工艺参数,可以精确获得所要求的元件材料去除量^[9]。该过程可用二维卷积来表示:

$$E(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N R(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j) \cdot T(\xi_j, \eta_j), \quad (1)$$

其中, $E(x_i, y_i)$ 是元件 (x_i, y_i) 点的去除量。 $T(\xi_j, \eta_j)$ 是第 j 个轨迹点的驻留时间, N 为轨迹点的数量, $R(x_i - \xi_j, y_i - \eta_j)$ 为去除函数位于第 j 个轨迹点时单位时间内对元件 (x_i, y_i) 点的去除量。

一方面,可以将此卷积过程看作去除函数对元件表面的高通滤波过程,即将去除函数看作具有一定截止频率的高通滤波器,对低于截止频率

的元件频谱成分进行滤除,同时保留高于截止频率的元件频谱成分,从而实现对低于去除函数截止频率的元件频谱误差的修正。不同的去除函数具有不同的截止频率,因此可修正的元件频谱误差范围也不一样。

另一方面,由于卷积效应,又会在元件表面形成波浪形的残余误差(如图 1 所示),残余误差的引入会导致元件中频误差的恶化。由此产生的中频误差由去除函数、加工参数等因素综合决定,需要通过选择优化去除函数和加工参数进行控制^[10-12]。

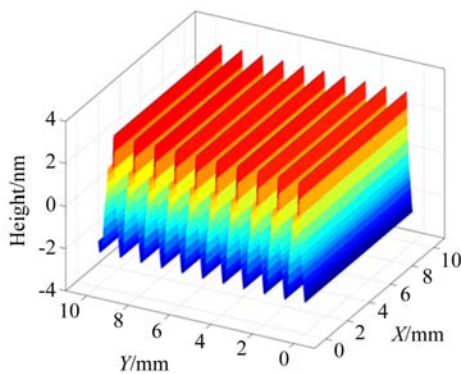


图 1 卷积效应引入的残余误差

Fig. 1 Residual error generated by convolution effect

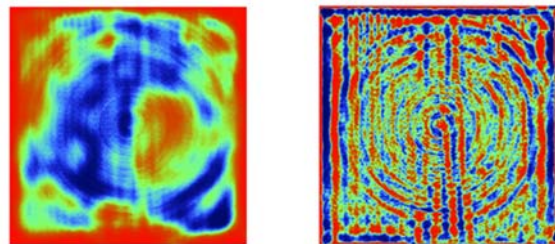
3 中频误差的控制方法

3.1 中频 PSD1 误差的控制

中频 PSD1 误差的频段范围为 $33\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$,在磁流变加工中,去除函数呈倒 D 形态分布,其短轴方向尺寸限制了磁流变加工的修形能力,亦即决定了可修正频谱误差的上限。通过改变磁流变机床参数,能将去除函数短轴尺寸控制在几毫米到十几毫米之间,这个尺寸正好位于 PSD1 频段范围内。因此,当去除函数短轴尺寸大于 PSD1 频段的上限 2.5 mm 时,磁流变加工无法对整个 PSD1 频段误差进行完全修正,不同尺寸去除函数的可校正误差频段范围和能力是不一样的。在元件加工前需要对元件的 PSD1 和去除函数的 PSD1 可修正频段范围和能力进行判断,以便选择合适的去除函数对元件进行加工。

图 2 为一块 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 口径平面元件的初始波前和初始波前 PSD1 频段滤波分布,其 PSD1 值为 5.57 nm ,远远超过了对 PSD1 的

1.8 nm 指标要求。图 3 为 3 个具有不同尺寸的去除函数 spotA, spotB, spotC, 它们的长、短轴长分别为 $8.3\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $13\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$ 和 $21\text{ mm}\times 13\text{ mm}$ 。利用这 3 个去除函数模拟加工元件,当元件波前 PV 均收敛到 0.1λ 时,对不同去除函数得到的模拟波前在 PSD1 频段范围内细分为不同频段误差进行计算,计算结果如图 4(彩图见期刊电子版)所示。其中,黑色圆点线表示元件初始波前在 PSD1 频段范围内进一步细分为 $3\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$, $4\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$, $5\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$, 一直到 $33\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$ 时对应的频谱误差,3 个去除函数模拟加工波前对应的细分频段频谱误差由其余 3 根圆点线表示。可以看到,一方面,在整个 $33\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$ 的 PSD1 频段,去除函数 spotC 对应的模拟加工波前频谱误差超过了 2.2 nm ,未满足 PSD1 指标要求,去除函数 spotB 对应的频谱误差为 1.8 nm ,基本满足 PSD1 指标要求,而去除函数 spotA 对应的频谱误差为 1.3 nm ,完全满足 PSD1 指标要求;另一方面,从细分的频段误差来看,去除函数 spotA 对 $14\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$ 的频段误差无法进行有效修正,去除函数 spotB 对 $9\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$ 的频段误差无法修正,而具有最小尺寸的去除函数 spotC,其可修正的频谱误差上限可以达到 5 mm ,其只是对 $5\text{ mm}\sim 2.5\text{ mm}$ 的频段误差无法修正。



(a) 初始波前

(b) 初始波前 PSD1

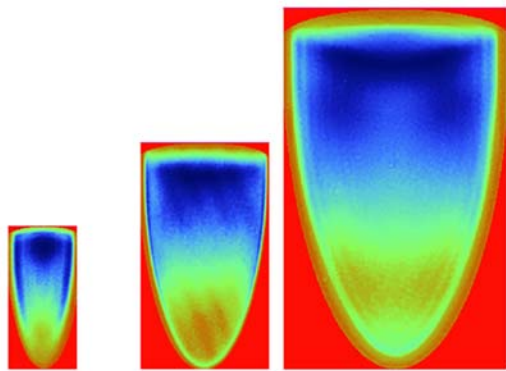
(a) Original wavefront

(b) Original PSD1

图 2 400 mm 口径平面元件初始波前和初始 PSD1

Fig. 2 Original wavefront and original PSD1 of 400 mm plane optical element

进一步对模拟加工前后元件的功率谱密度曲线进行比较,如图 5(彩图见期刊电子版)所示。其中黑线为元件初始 PSD 曲线,去除函数 spotC 对应的 PSD 曲线在大于 5 mm 时,整个曲线都呈下降趋势,即实现了对 $33\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$ 频段误差的修正,在 5 mm 以下频段才和初始 PSD 曲线重



(a) 去除函数 A (b) 去除函数 B (c) 去除函数 C
(a) SpotA (b) SpotB (c) SpotC

图 3 不同尺寸的去除函数

Fig. 3 Removal functions with different sizes

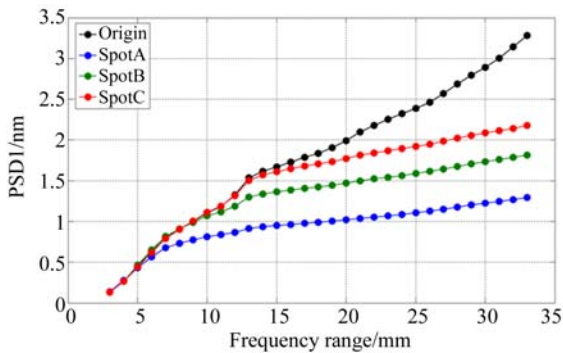


图 4 去除函数的 PSD1 频段误差修正能力比较

Fig. 4 Comparison of error correction abilities on PSD1 of removal function

合,即无法实现对这些频谱误差的有效修正;去除函数 spotB 则是在 9 mm 以下频段和初始 PSD 曲线重合,而去除函数 spotA 对 14 mm 以下频段的误差都无法有效修正。

从对中频 PSD1 误差的控制角度讲,较小尺寸的去除函数具有更好的频谱误差修正能力,但是去除函数尺寸太小,其去除效率会受到影响,元件的实际加工时间就会过长,过长的加工时间可能导致加工过程中也出现不稳定因素,从而影响元件的收敛效果。因此,在实际加工元件时,需要通过对比元件初始 PSD 曲线和加工 PSD 曲线以及 PSD1 频段误差进行模拟加工计算,选择能使 PSD1 误差收敛至指标要求的去除函数。

3.2 中频 PSD2 误差的控制

中频 PSD2 误差的频段范围为 2.5 mm ~ 0.12 mm,在磁流变加工中,去除函数以一定的轨迹在元件表面运动以实现对其加工,磁流变

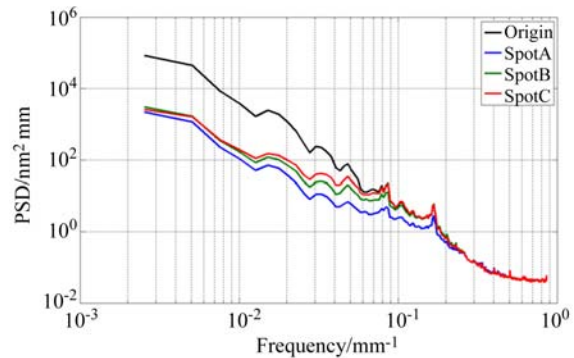


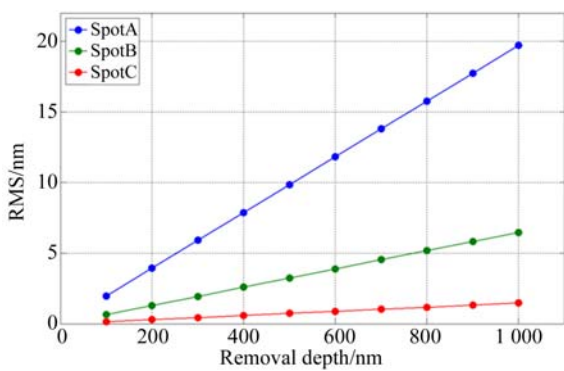
图 5 去除函数的 PSD 曲线修正能力比较

Fig. 5 Correction ability on PSD curve comparing of Removal function

加工的轨迹间隔一般在 1 mm 左右,位于 PSD2 误差的频段范围内,因此由于卷积效应形成的残余误差正好对 PSD2 有影响。此外,不同的去除函数、不同的去除深度等也会形成不同程度的残余误差。因此,在元件加工前需要定量分析加工轨迹间隔、去除函数和去除深度等因素对残余误差的影响情况,从而选择合适的去除函数和加工参数,再通过一定的加工策略最大程度地抑制残余误差增长幅度。

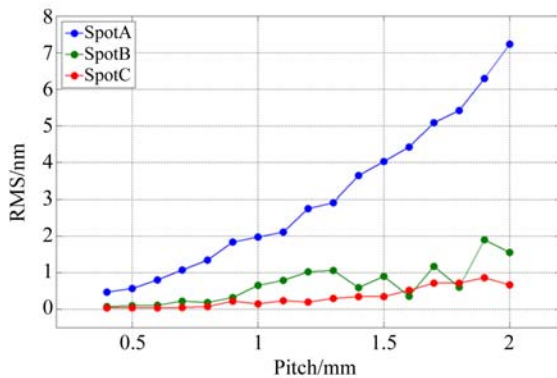
通过均匀去除方法可以对轨迹间隔、去除函数和去除深度等因素导致的残余误差进行判断。图 6(a)(彩图见期刊电子版)为去除深度对残余误差的影响曲线,可以看到,当去除函数和轨迹间隔(1 mm)相同时,残余误差均方根随着去除深度的增加呈线性增长的趋势,同时去除函数尺寸越大,对残余误差的抑制能力也就越强;图 6(b)(彩图见期刊电子版)为轨迹间隔对残余误差的影响曲线,可以看到,对于同一个去除函数和相同的去除深度(100 nm),残余误差均方根随着轨迹间隔的增加呈现一种震荡增长的情况,对于尺寸较小的去除函数,这种增长的幅度随间隔的增加变化得更加剧烈。

从对中频 PSD2 误差的控制角度讲,选择较小的加工轨迹间隔、每次加工选择较浅的去除深度、并且采用大尺寸的去除函数能更好地抑制频谱误差增长。但是轨迹间隔越密,加工时间会过长,从而影响去除函数稳定性,元件面形的收敛能力也会受到影响;若每次去除深度很浅,同样也会影响元件的加工效率和收敛能力;同时去除函数尺寸越大,其对中频 PSD1 误差的修正能力也会



(a) 去除深度对残余误差的影响

(a) Effect of removal depth on residual error



(b) 轨迹间隔对残余误差的影响

(b) Effect of pitch on residual error

图 6 加工参数对残余误差的影响

Fig. 6 Effect of processing parameters on residual error

减弱。因此,在实际加工元件时,首先选择满足 PSD1 收敛指标的去除函数,然后通过均匀去除和加工仿真模拟对轨迹间距和去除深度进行优化,使得加工参数在满足元件面形收敛的条件下,对 PSD2 误差增长的抑制也能满足指标要求。

4 加工实验与结果

4.1 加工参数的选择优化

所需加工的平面元件波前 PV 为 0.60λ , 分布见图 2(a), PSD1 为 5.57 nm , 分布见图 2(b), PSD2 为 0.95 nm , 为 12 个采样检测区域 PSD2 的平均值^[13], 某个采样区域的 PSD2 误差分布如图 7 所示。可以看到,对于此块平面元件,虽然初始 PSD1 比较大,但通过模拟加工已知,采用 spotB 和 spotC 尺度的去除函数均能使 PSD1 收敛至合格指标。而初始 PSD2 已经接近 1.1 nm

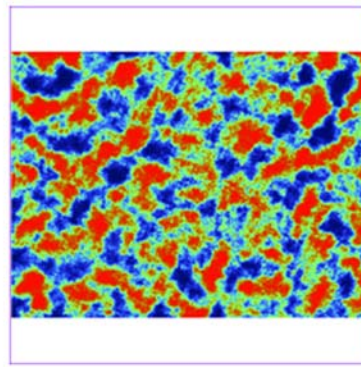


图 7 初始 PSD2

Fig. 7 Original PSD2

的指标要求,由于去除函数越大,就越能有效抑制残余误差的恶化,因此,选择更大尺寸的去除函数 spotB,同时在加工过程中选择较小的加工间距,并且每次加工采用多个子程序的浅深度去除加工策略。整个元件加工过程中的主要加工参数见表 1。

表 1 加工参数

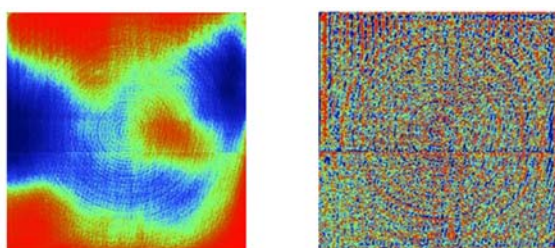
Tab. 1 Processing parameters

加工次数	去除函数尺寸 长轴×短轴 (mm)	加工间距 (mm)	子程序 个数	加工时间 (h)
1	13.2×7.5	0.5	5	17.5
2	14.2×7.2	0.4	4	10
3	14.6×7.8	0.4	3	5.5

4.2 加工结果及分析

经过 3 次迭代加工,采用 ZYGO 公司的 800 mm 口径 VERIFIRE MST 干涉仪(检测精度优于 0.05λ)进行检测,测得波前 PV 为 0.1λ , 分布如图 8(a)所示,波前 PSD1 为 1.356 nm , 分布如图 8(b)所示,达到了 PSD1 指标。由于每次迭代加工均采用了多个子程序进行浅去除以更好地抑制 PSD2 的增长,故加工效率会受到一定程度的影响,整个加工时间为 33 h 。

对于元件的 PSD2,通过 ZYGO NewView 7200 轮廓仪检测 12 个采样区域,取平均值 0.88 nm , 满足 PSD2 指标要求。其中一个采样区域的 PSD2 分布如图 9 所示,其和初始 PSD2 分布相比,带有典型的磁流变加工轨迹特征。经过磁流变加工后,元件的 PSD2 反而更小,究其原因,可能是元件表面初始 PSD2 的分布极不均匀,通过



(a) 磁流变加工波前 (b) 磁流变加工波前 PSD1

(a) Wavefront after MRF (b) PSD1 after MRF

图 8 400 mm 口径平面元件磁流变加工波前和 PSD1

Fig. 8 Wavefront and PSD1 of 400mm plane optical element after MRF

磁流变加工后整个元件表面 PSD2 的分布趋于一致, 所以使得平均下来的 PSD2 更小。

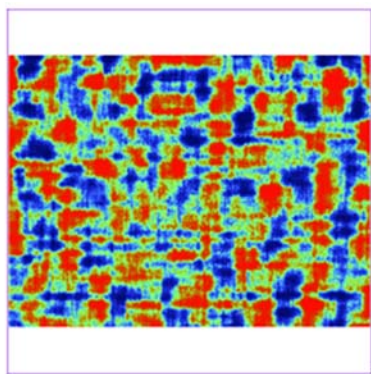


图 9 磁流变加工后 PSD2

Fig. 9 PSD2 after MRF

图 10(彩图见期刊电子版) 是元件迭代加工过程中波前 PSD 曲线的变化过程, 可以看到, 由于采用了 spotB 尺寸的去函数, PSD 曲线在

9 mm 以上频段均进行了有效收敛, 而在 9 mm 以下去除函数无法进行有效修正的频段, 加工和初始 PSD 曲线在整体上保持一致, 同时由于小尺度残余误差的引入使得加工后 PSD 曲线在中高频区域出现毛刺现象。

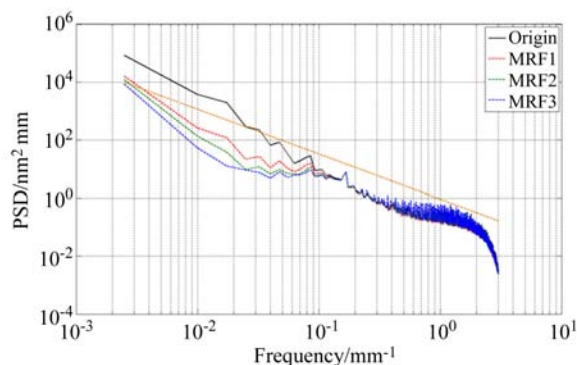


图 10 磁流变加工前和加工后的 PSD 曲线

Fig. 10 PSD curves before and after MRF

5 结 论

作为一种高确定性加工技术, 磁流变加工可以实现对光学元件尤其是大口径平面光学元件的高面形精度加工。对于光学元件的中频 PSD1 误差和 PSD2 误差, 可以通过灵活选择去除函数和加工参数及优化策略达到较好的修正和抑制效果。大口径平面元件的磁流变加工实验结果表明: 400 mm 口径元件的波前 PV 为 0.1λ ; 中频 PSD1 误差为 1.36 nm; 中频 PSD2 误差为 0.88 nm, 满足了对大口径平面光学元件中频误差的要求。

参考文献:

- [1] BAISDEN P A, ATHERTON L J, HAWLEY R A, *et al.*. Large optics for the National Ignition Facility [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 295-351.
- [2] SPAETH M L, MANES K R, KALANTAR D H, *et al.*. Description of the NIF Laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [3] 许乔, 王健, 马平, 等. 先进光学制造技术进展[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3098-3105.
- XU Q, WANG J, MA P, *et al.*. Progress of ad-

vanced optical manufacturing technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3098-3105. (in Chinese)

- [4] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 高精度光学表面磁流变修形技术研究[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1859-1864.
- SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Magneto-rheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1859-1864. (in Chinese)
- [5] 李龙响, 郑立功, 邓伟杰, 等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10):

- 2819-2826.
- LI L X, ZHENG L G, DENG W J, *et al.*. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2819-2826. (in Chinese)
- [6] 彭小强,戴一帆,唐宇. 基于灰色预测控制的磁流变抛光液循环控制系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1):100-105.
- PENG X Q, DAI Y F, TANG Y. Circulatory system for MR fluid based on gray forecast control algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 100-105. (in Chinese)
- [7] MENAPACE J A, EHRMANN P E, BAYRAMI-AN A J, *et al.*. Imprinting high-gradient topographical structures onto optical surfaces using magnetorheological finishing: manufacturing corrective optical elements for high-power laser applications [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 5240-5248.
- [8] 钟波,陈贤华,王健,等. 400 mm 口径平面窗口元件中频误差控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3287-3291.
- ZHONG B, CHEN X H, WANG J. Controlling mid-spatial frequency error on 400 mm aperture window [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3287-3291. (in Chinese)
- [9] LI L X, ZHENG L G, DENG W J. Optimized dwell time algorithm in magnetorheological finishing [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81: 833-841.
- [10] HU H, DAI Y, PENG X. Restraint of tool path ripple based on surface error distribution and process parameters in deterministic finishing [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22973-22981.
- [11] 贾阳,吉方,张云飞,等. 磁流变加工驻留时间对中频误差的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(9): 116-123.
- JIA Y, JI F, ZHANG Y F, *et al.*. Effect of dwell time on mid-spatial in magnetorheological finishing [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(9): 116-123. (in Chinese)
- [12] 贾阳,吉方,张云飞,等. 基于梯度聚类离散思想的磁流变抛光自适应轨迹[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(12): 60-64.
- JIA Y, JI F, ZHANG Y F, *et al.*. Adaptive tool path of magnetorheological polishing base on discrete gradient clustering [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 60-64. (in Chinese)
- [13] 邓燕,王翔峰,嵇保建,等. 大口径光学元件中频波前的检测[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3333-3337.
- DENG Y, WANG X F, JI B J, *et al.*. Measurement of mid-frequency wavefront for large-aperture optics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3333-3337. (in Chinese)

作者简介:



颜浩(1983—),男,重庆人,助理研究员,2006年、2008年于北京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事位相光学元件的研制工作。E-mail: yan-hao0808@foxmail.com



唐才学(1983—),男,四川宜宾人,助理研究员,2007年、2010年于四川大学分别获得学士、硕士学位,主要从事位相光学元件的研制工作。E-mail: ispw@qq.com