

文章编号 1004-924X(2025)11-1739-11

基于频域滤波面形的毫米级束径离子束 驻留时间补偿

卞 萌^{1,2,3}, 胡海翔^{1,3*}, 唐 瓦^{1,3}, 季 鹏^{1,3}, 张学军^{1,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造全国重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要:为提升细束径去除函数对空间波长接近其特征尺寸的面形误差的修正能力,开展了毫米级束径离子束加工收敛率分析及优化研究,提出基于多频段面形“贝壳纹”加工程度的修形能力分析,通过分析均方根密度的频域分布特性与各频段的收敛率、不同周期面形幅值的加工结果,量化评估细束径去除函数的跨频段误差修正能力。在此基础上通过分析制定加工补偿策略,提出了一种基于频域滤波进行驻留时间补偿的收敛率优化提升方法,提高了可修正频段的收敛率,并通过仿真和实验进行验证。实验结果表明:以加工“贝壳纹”的方式可以实现去除函数多频段面形误差修正能力的高效分析,驻留时间补偿方法可有效提升细束径去除函数可修正频段内的单轮收敛率。针对 2 mm 半宽去除函数收敛能力发生转折的关键频段(0.186~0.385 mm⁻¹),实际平均收敛率从 76.4% 提升至 91.7%。该方法有助于实现单束径去除函数加工时的全频段误差一致性收敛,适用于高精度光学元件加工。

关键词:超精密加工;离子束修形;驻留时间;收敛率;细束径去除函数;修形能力

中图分类号: TN305.2 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253311.1739

CSTR: 32169.14.OPE.20253311.1739

Dwell time compensation for millimeter spot-sized ion beam figuring based on frequency-domain filtered surface

BIAN Meng^{1,2,3}, HU Haixiang^{1,3*}, TANG Wa^{1,3}, JI Peng^{1,3}, ZHANG Xuejun^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: hhx@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2025-03-12; **修订日期:** 2025-04-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62127901, No. 12103054, No. 62405314, No. 62305333, No. 62375260); 国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFB3403405); 中国科学院青年创新促进会(No. 2019221, No. Y2023062); 中国科协青年人才托举工程资助项目(No. 2022QNRC001); 吉林省青年精英科学家赞助计划(No. QT202222); 长春市科技计划资助项目(No. 2024GZZ19); 吉林省科技发展计划资助项目(No. SKL202402021)

Abstract: This study investigates and enhances the corrective capability of small-sized tool influence functions (TIFs) in addressing form errors with spatial wavelengths comparable to their dimensions, through the analysis and optimization of millimeter spot-sized ion beam figuring (IBF). A radial shell ribs evaluation method was established to quantify the corrective performance of small-sized TIFs across multiple frequencies, employing root-mean-square density (RMSD) distribution, convergence rates, and periodic surface processing outcomes. Based on this framework, a dwell time compensation strategy incorporating high-pass filtering was developed, resulting in improved convergence rates within the target spatial frequency bands. Experimental results demonstrate that the radial shell ribs analysis provides an efficient and convenient approach to evaluating TIF corrective capability across frequencies. The introduced dwell time compensation method significantly enhances the single-cycle convergence rate of small-sized TIFs within their effective frequency range. Specifically, for the critical frequency band associated with corrective capacity transitions (0.186 to 0.385 mm^{-1}), the average convergence rate of a 2-mm full width at half maximum (FWHM) TIF increased from 76.4% to 91.7%. This approach enables consistent convergence of form errors throughout the entire frequency spectrum during processing with a single TIF, thereby advancing the manufacturing of high-precision optical components.

Key words: ultra-precision fabrication; ion beam figuring; dwell time; convergence rate; small-sized tool influence function; corrective capability

1 引言

作为一种非接触式光学加工技术,离子束修形^[1-5]通过物理溅射在原子量级上去除材料,具有加工精度高、确定性高、去除函数稳定、无边缘效应和亚表面损伤等特点,广泛应用于光学元件的超精密加工中。该技术的核心特征参数——去除函数,其尺寸调节范围显著优于其他修形方法。通过栅网-光阑组件的组合调控,可灵活实现束流尺寸的调节,使去除函数的半峰值全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)从常规的数十毫米量级精细调控至亚毫米级,从而满足不同的加工需求。

去除函数的修形能力与其尺寸密切相关,束径越小,可修正面形误差的空间频率越高(空间波长越短)^[6]。然而,在修正空间波长接近其特征尺寸的面形误差时,其收敛能力会显著受限。周林等研究发现,当误差空间频率增加到一定程度时,固定束径去除函数的材料去除有效率呈下降趋势,据此提出修形截止频率的概念^[7]。当频率高于截止频率时,需要去除更多的多余材料,花费更多的加工时间,但加工精度并无明显提升。佳能公司与东京理工大学的合作研究也得到该结论,其获得的 0.5 mm FWHM 去除函数的截止

频率为 0.88 mm^{-1} 。

针对频域收敛能力受限的问题,传统方法通常更换更小束径的去除函数以增强对更高空间频率的修正能力,使用迭代加工策略实现面形修正^[8]。徐明进等在加工小结构连续相位板时,探究了不同工艺条件下离子束尺寸的选择原则,通过分析面形功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)将误差频段分解,采用不同束径的去除函数进行迭代修正^[9]。然而,该方法本质上仅通过多组去除函数的组合应用实现频域覆盖,未打破单一束径去除函数修形能力的固有局限。此外,一味缩小去除函数束径的方法存在明显不足:束径缩小导致材料去除量降低,迫使驻留时间成比例增加,而加工时间的延长会影响离子束流的稳定性,进而影响面形修正精度;同时,束径越小,定位误差等因素对加工过程的影响也会更加显著。

迭代加工过程本身亦存在局限,定位误差、驻留时间算法残差、机床动态特性误差以及去除函数误差等多重因素均影响加工精度。随着迭代次数的增加,这些误差的累积将导致光学表面误差分布复杂化,对后续加工的负面影响越来越大^[10-11]。真空系统的运行特性会进一步制约工艺效率,离子源配件更换、工件装夹与测量均需破坏真空环境,使得迭代准备时间远超实际加工时

长。因此,迭代处理方法不完全适用于超高精度的面形修正,亟需在维持束径尺寸的前提下,通过提升细束径去除函数在截止频率前的收敛效率来减少迭代次数。此外,常规去除函数频域修正能力评估方法基于单周期正弦面形加工验证,存在实验效率低等局限。

针对上述问题,本文设计存在规律变化的多频段面形(贝壳纹),其正弦周期沿 y 方向连续递增,各频段幅值保持统一。通过单次加工实验即可实现多频段面形误差修正能力分析。该方法更符合实际光学加工中多频误差共存的工况特征,并且显著提升去除函数修形能力的评估效率。在此基础上开展了毫米级束径去除函数收敛率探究,提出基于“贝壳纹”加工程度的去除函数加工能力分析,通过分析均方根密度(Root-Mean-Square Density, RMSD)的频域分布特性与各频段的收敛率、不同周期面形幅值的加工结果,快速评估细束径去除函数的跨频段误差修正能力。通过分析制定加工补偿策略,提出了一种基于频域滤波进行驻留时间补偿的去除函数收敛率优化提升方法。实验表明,通过补偿驻留时间可以提高细束径去除函数在截止频率前的收敛率,从而实现单轮加工收敛率的提高。

2 原 理

2.1 离子束加工机理与去除函数模型

图1为离子束抛光原理。离子源电离工作气体产生离子束,通过控制离子源的入射角度和距离将离子束流发射到元件表面。根据Sigmund溅射原理,射到工件表面的离子与工件原子发生碰撞,入射离子在工件表层内的能量分布呈高斯型,将能量传递给光学元件表面原子,表面原子

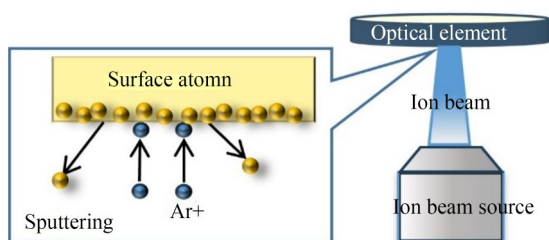


图1 离子束抛光原理

Fig. 1 Schematic principle of ion beam figuring

获得能量后开始运动并与其他表面原子继续碰撞,当表面原子获得一定的能量时,就会从元件表面飞离,实现材料去除。

离子束去除函数呈回转对称的高斯型,在各个方向的修形能力一致,定义如下:

$$R(x, y) = R_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中: $R_{\max}$ 为峰值去除率, σ 为高斯分布系数。

如图2所示,去除函数通常采用半高全宽(FWHM)和 $d_{6\sigma}$ 两种定义方式,分别将峰值去除速率的半值宽度和数学统计中的 $d_{6\sigma}$ 值所对应的宽度作为去除函数束径。两者的关系满足:

$$FWHM \approx \frac{\pi \cdot d_{6\sigma}}{8}. \quad (2)$$

去除函数的修形能力主要与束径有关,大量抛光实验发现^[7,9],对于给定的去除函数,当误差成分的频率增大时,其材料去除有效率迅速减小,当材料去除有效率小于0.1时,很难对相应的频率误差成分进行有效的修正。基于此,定义修形截止频率为:

$$f_c = \frac{3\sqrt{2\ln 10}}{\pi d_{6\sigma}}. \quad (3)$$

因此,修正具有一定空间周期的面形误差所需要的去除函数尺寸为:

$$d_{6\sigma} \approx 2.548 FWHM \leq 2\lambda_c, \quad (4)$$

其中 $\lambda = 1/f$,为面形误差的空间波长。

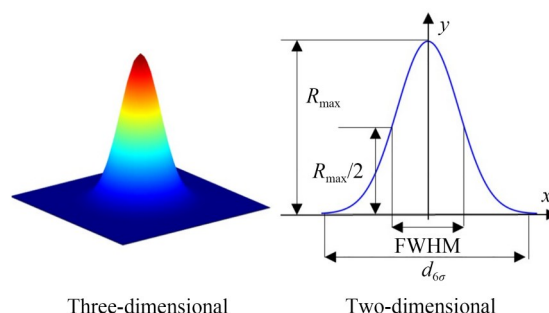


图2 去除函数定义

Fig. 2 Definition of tool influence function

离子束的加工本质上属于计算机控制光学表面成型法(Computer Controlled Optical Surfacing, CCOS)^[12-14]的一种,通过对去除函数与加工路径上各加工点的驻留时间进行卷积,计算得到光学表面的预期材料去除。影响加工的关键因

素之一就是在选定去除函数的基础上准确得到其对应的驻留时间^[15-17]。根据CCOS原理,第*i*次迭代加工过程中的材料去除量*E*可以表示为:

$$E_i(x,y)=R_i(x,y)\otimes T_i(x,y). \quad (5)$$

因此,驻留时间(*T*)由目标去除量与去除函数(*R*)反卷积计算得到。

2.2 “贝壳纹”的设计原理

由于任何连续的表面都可以看作是不同的频率正弦波的叠加,振幅越大,对应频率的主导作用越明显。各频率成分可以视为相互独立,因此,本文设计了具有统一幅值(PV 20 nm)且周期沿*y*轴连续递增的正弦分布(称为“贝壳纹”,见图3)。该设计通过单次加工实验即可实现多频段修正能力分析。

综合考虑加工精度与效率,本文选定 FWHM 为 2 mm(*d*_{6σ} 为 5.1 mm)的去除函数为研究对象。根据截止频率的相关定义,该去除函数可以修正空间周期大于 2.5 mm 的面形误差。因此,将测试“贝壳纹”的周期参数设定为 2.6~7

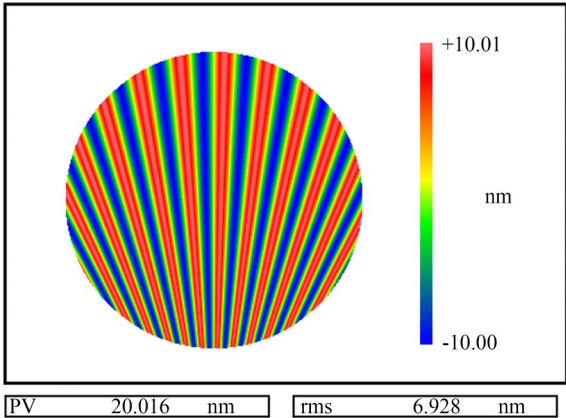


图3 目标面形

Fig. 3 Targeting surface

mm(对应空间频率0.385~0.143 mm⁻¹),后续的理论分析与实验结果均在此频段内进行。

2.3 “贝壳纹”加工误差的理论分析

所用去除函数的峰值去除率为 4.6 nm/s,加工区域直径为 50 mm,步距为 0.2 mm,加工时长为 40 min。仿真加工过程与结果如图4和表1所示。

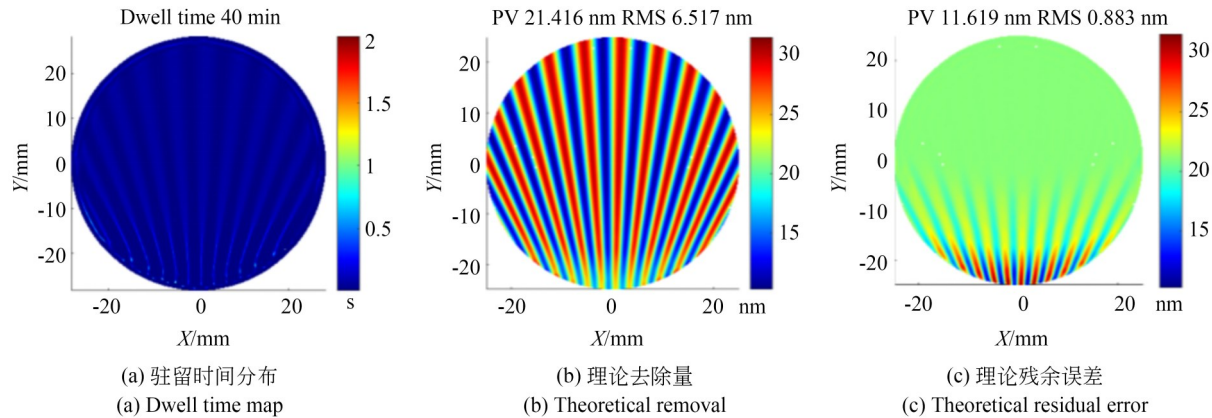


图4 “贝壳纹”仿真加工面形

Fig. 4 Surfaces of shell ribs in simulation processing

表 1 “贝壳纹”仿真加工结果

Tab. 1 Result of simulation processing of shell ribs

加工参数	PV/nm	RMS/nm
目标去除量	20.016	6.928
理论去除量	21.416	6.517
理论残余误差	11.619	0.883

由表1可知,理论上加工后面形误差RMS从6.9 nm降低至0.9 nm,大部分面形误差均得到

修正。由图4(a)可知,在空间频率较低处,驻留时间分布较为一致,随着空间频率的升高,驻留时间分布出现明显变化。将理论驻留时间与去除函数进行卷积运算获得理论去除量,如图4(b)所示,可观察到较高频区域内理论去除量明显低于目标去除量,这表明2 mm FWHM去除函数在极限加工时由于对应频率的收敛率逐渐降低,去除量无法达到设计值,出现“欠加工”现象。通过对比图4(c)与图4(a)可知,随着加工面形空间频

率的升高(即特征尺寸趋近去除函数束径),驻留时间的计算误差呈现单调递增趋势。在相同附加厚度约束条件下,高频段误差的理论残差幅值显著大于低频段。因此,去除函数加工此频段误差时的难点在于无法准确计算驻留时间。

为更好地分析去除函数加工多频段误差的能力,本文提出以频段均方根(Root Mean Square, RMS)及 RMSD 作为评价指标对表面误差进行表征,并以此为基础,分析不同频段内面形误差的收敛率,探究去除函数尺寸与频段误差收敛率变化的对应关系。

RMSD 用来描述处理前后在不同空间波长(空间频率倒数)下面形误差的变化^[18-19]。它是描述二维各向同性表面的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的一种有效方法,可以定量分析不同空间波长的形状误差。式(6)为 RMSD 的定义,并表达了它与 PSD 的关系。

$$RMSD^2(\alpha) = 2\pi \cdot \ln 10 \cdot f^2(\alpha) \cdot PSD_{2Diso}[f(\alpha)], \quad (6)$$

其中 α 为十进制数。

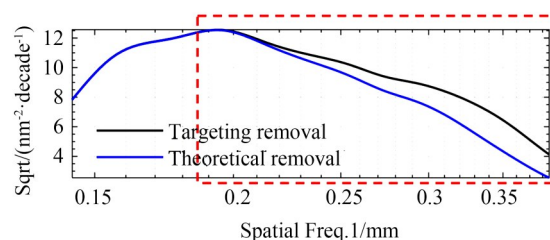
RMSD 定义如下:

$$con.(f) = \left[1 - \frac{RMSD_{error}(f)}{RMSD_{target}(f)} \right] \cdot 100\%, \quad (7)$$

其中:下标 target 和 error 分别表示目标面形和残余误差。从该收敛率可直接判断不同频段的加工效果。

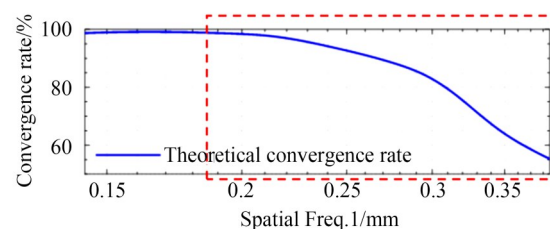
理论加工结果的 RMSD 分析如图 5 所示,由图 5(a)可知,目标在空间波长范围内的面形误差得到了有效收敛。对比发现,两者之间的 RMSD 主体部分基本相同,初步证明了 2 mm 去除函数基本上能够完成整体的面形加工。进一步对比可以看到,加工后的面形在较高频成分处 RMSD 差异性较大。

基于 RMSD 的理论收敛率分析结果如图 5(b)所示,在较低频段,收敛率保持在 100%,理论去除量与目标去除量一致。然而,当面形误差周期缩小至 5.4 mm(即频率为 0.186 mm⁻¹)左右时,此时接近于去除函数的束径尺寸,收敛率开始降低,周期约为 2.6 mm 时,收敛率达到最小 55.3%。在目标频段范围内,理论平均收敛率为 88.5%。由此可知,通过提升该去除函数对空间波长小于 5.4 mm 面形误差的修正能力,可有效



(a) 目标与理论去除量的RMSD对比

(a) RMSD comparison of targeting and theoretical removal



(b) 不同频段的理论收敛率

(b) RMSD comparison of targeting and theoretical removal

图 5 理论加工结果的 RMSD 分析

Fig. 5 RMSD analysis of theoretical processing results

提高目标频段的理论平均收敛率,因此,该频段为修正能力提升的关键频段。由于实际加工收敛率与理论收敛率具有高度相关性,该方法能够提高细束径去除函数在截止频率前的收敛率,以提高单轮加工的收敛率,从而提升加工精度。

3 仿真分析

3.1 加工收敛率优化提升原理

从面形误差的 RMSD 分布可知,较高频段的误差成分没有得到有效收敛,需要对高频成分进行补偿。由式(5)可见,去除量与驻留时间成正比,因此,在去除函数固定的前提下,若在高频区延长驻留时间,可以增加对应区域的去除量,从而提升收敛率。

通过补偿高频面形去除量来增加驻留时间,增加能量积累,克服收敛率下降的问题,进而一次性加工出 PV 全频段接近一致的“贝壳纹”。补偿依据为理论残差,但理论残差成分直接叠加并非最优方案,需要对残差进行滤波处理。高频面形补偿流程如图 6 所示。

“贝壳纹”的面形分布 $E(x, y)$ 可以分解为低频部分 $E_1(x, y)$ 和高频部分 $E_2(x, y)$ 。补偿前加工过程公式如下:

$$E(x, y) = E_1(x, y) + E_2(x, y), \quad (8)$$

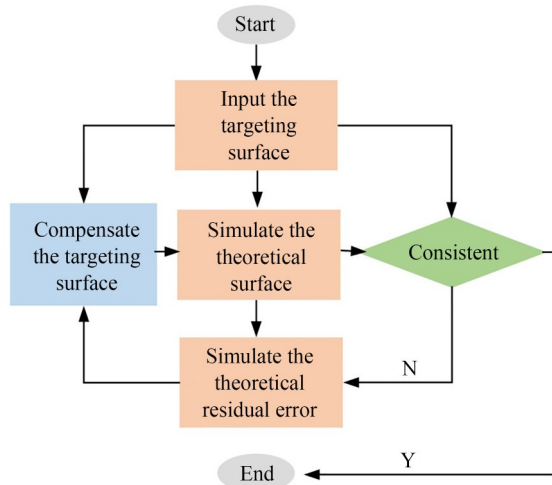


图 6 高频面形补偿流程

Fig. 6 Flowchart of high-frequency residual compensation

$$T(x, y) = \text{dec}[E(x, y), R(x, y)], \quad (9)$$

其中 $T(x, y)$ 为反卷积得到的对应驻留时间。

对高频部分进行补偿后, 对应面形 $E'(x, y)$

与驻留时间 $T'(x, y)$ 如下:

$$E'(x, y) = E_1(x, y) + a \cdot E_2(x, y), \quad (10)$$

$$T'(x, y) = \text{dec}[E'(x, y), R(x, y)]. \quad (11)$$

最后, 使用补偿后驻留时间得到的去除量接近设计的理论去除量, 即有:

$$E(x, y) = \text{dec}[E'(x, y), R(x, y)] \otimes R(x, y). \quad (12)$$

3.2 优化后理论收敛率分析

根据优化前理论收敛率曲线, 当空间频率达到 0.25 mm^{-1} (对应 4 mm 周期) 时, 收敛率呈显著下降趋势, 因此, 确定该频率值为高通滤波的截止参数。补偿两次后, RMSD 分布与理论加工误差呈现良好的一致性。补偿后加工时长由 40 min 延长至 56 min , 虽然驻留时间延长使单次加工周期增加约 40% , 但高频误差的修正效果得到了显著提升。此时的输入面形如图 7(a) 所示, 理论加工结果如图 7(b) 和图 7(c) 所示。其中, 理论加工误差由 0.9 nm 降低至 0.3 nm 。

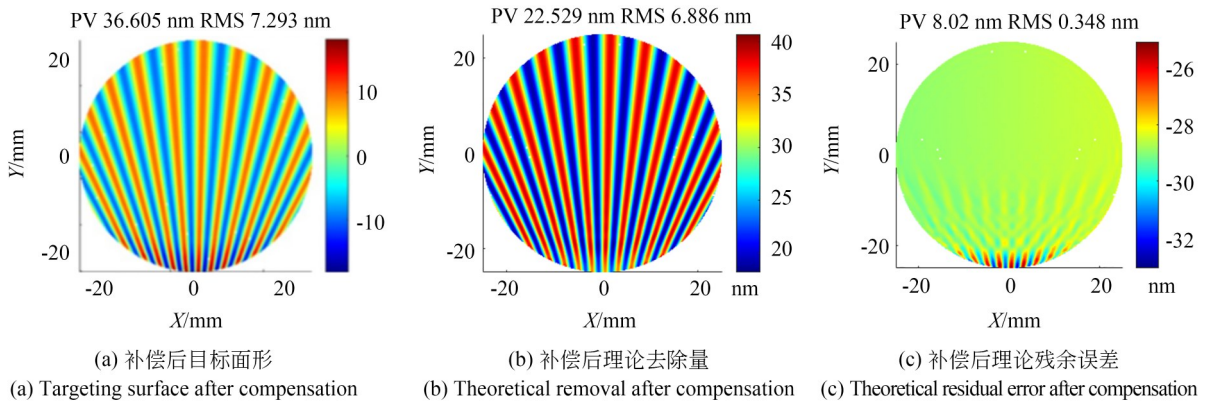


图 7 “贝壳纹”仿真加工面形

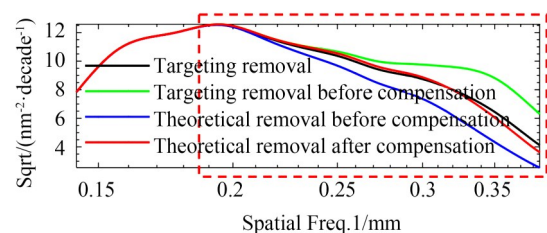
Fig. 7 Surfaces of shell ribs in simulation fabrication

补偿前后理论加工结果的 RMSD 分析如图 8 所示, 由图可知, 补偿后的理论去除量在较高频成分处 RMSD 与目标加工面形高度一致。由图 8(b) 可知, 在较高频成分处, 补偿后理论收敛率有明显提升, 截止频率 (0.385 mm^{-1}) 处理论收敛率由 55.3% 提升至 82.4% , 针对关键频段 ($0.385 \sim 0.186 \text{ mm}^{-1}$), 理论平均收敛率从 84.7% 提升至 95.9% , 获得显著改善。

多频段面形“贝壳纹”的正弦周期沿 Y 方向连续递增, 各频段幅值保持统一设定值。该设计

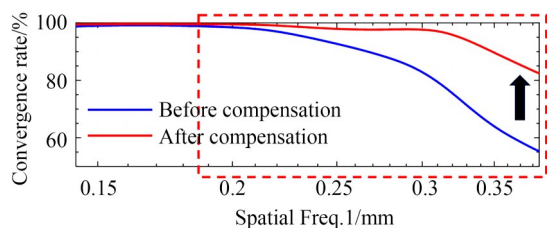
具有双重分析功能: (1) 通过 RMSD 结果量化评估不同空间频段的收敛能力; (2) 沿 X 轴任意截面可提取特定周期的正弦分布, 直接通过加工后幅值衰减程度表征去除函数的收敛特性。

目标加工范围内, 周期与幅值的关系如图 9 所示, 随着周期的减小, 补偿前加工幅值明显下降, 而补偿后加工幅值得到明显改善。图 9 列出了空间频段分别为 $0.37, 0.33, 0.25 \text{ mm}^{-1}$ 时正弦补偿前后的理论加工结果, 对比表明, 本文提出的驻留时间优化方法有效提升了面形中高频成



(a) 理论去除量的RMSD对比

(a) RMSD comparison of theoretical processing results



(b) 不同频段的理论收敛率

(b) Theoretical convergence rates of different frequency bands

图 8 补偿前后理论加工结果的RMSD分析

Fig. 8 RMSD analysis of theoretical processing results before and after compensation

分的加工精度。

相较于传统迭代加工中耗时较多的检测、重复装夹、定位校准、抽放真空和参数调试等准备工序,本方案通过优化高频区驻留时间显著提升了单次加工效率,有利于实现全频段面形误差的一致性收敛。虽然单轮加工时长有所增加,但多次迭代加工中的系统准备时间更长,误差累积风险更高。在超精密加工领域,这种适度延长单次加工时间为代价换取工艺稳定性的技术路线,具有显著的工程实践价值。

4 加工实验与结果分析

4.1 实验过程

实验采用最大加工口径为 1 000 mm 的三轴联动自研离子束抛光设备 IBF μ 1000,离子源类型为射频离子源,工作气体为氩气。离子源选用直径为 20 mm 的栅网与直径为 2 mm 的离子光

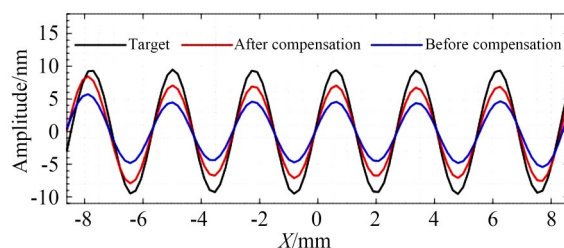
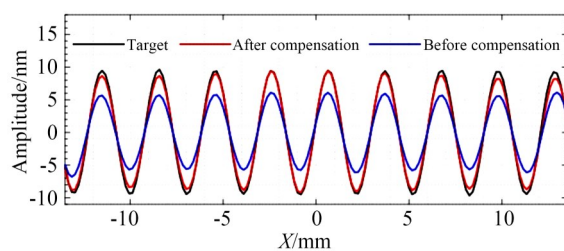
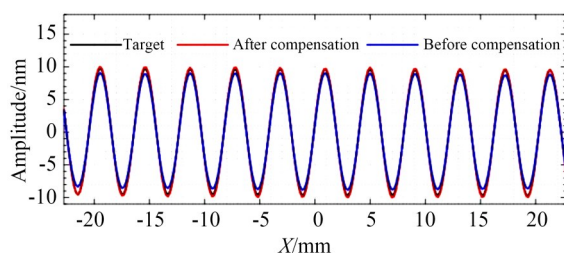
(a) 空间频率为0.37 mm⁻¹(a) Spatial frequency of 0.37 mm⁻¹(b) 空间频率为0.33 mm⁻¹(b) Spatial frequency of 0.33 mm⁻¹(c) 空间频率为0.25 mm⁻¹(c) Spatial frequency of 0.25 mm⁻¹

图 9 补偿前后理论加工结果的幅值分析

Fig. 9 Amplitude analysis of theoretical processing results before and after compensation

阑,离子源参数设置如表 2 所示,峰值去除率为 4.6 nm/s, FWHM 2 mm 的去除函数。由前期标定实验可知,20 小时内去除函数峰值去除率波动维持在 $\pm 1\%$, FWHM 波动为 $\pm 1.5\%$,满足使用要求,实验前进行了充分的预热。本文采用两块直径为 100 mm,初始面形 RMS 优于 $1/60\lambda$ ($\lambda = 632.8$ nm) 的融石英实验片进行对照加工,分析补偿前后的实际加工效果。实验片的初始面形与实验过程分别如图 10 和图 11 所示。

表 2 离子源参数设置

Tab. 2 Experimental parameters of ion source

Gas flow	Beam power	Acceleration power	Radio frequency	Work distance	Neutralization current
4 mL/min	900 V	100 V	120 W	12 mm	50 mA

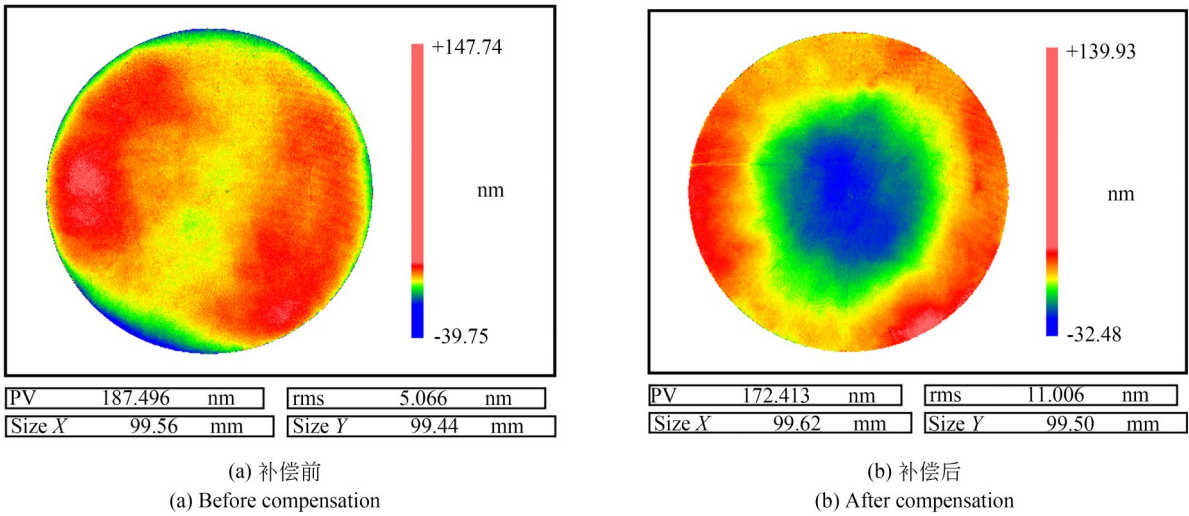


图 10 初始面形
Fig. 10 Initial surface

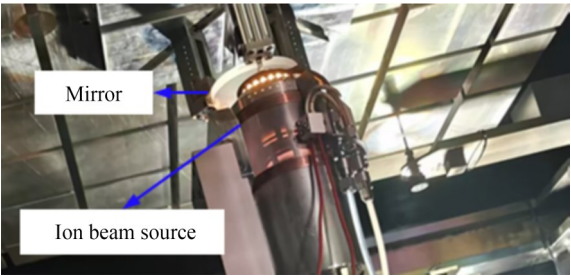


图 11 实验过程
Fig. 11 Experimental process

4.2 实验结果分析

加工结果如图 12 所示,相比于不对驻留时间进行补偿直接加工,补偿后实际加工面形更接近目标面形,高频区域的去除量有明显提升。基于 RMSD 的收敛率分析结果如图 13 所示,补偿前后截止频率处的实际收敛率由 51.6% 提升至 77.2%,关键频段($0.186\sim0.385\text{ mm}^{-1}$)的实际平均收敛率从 76.4% 提升至 91.7%。

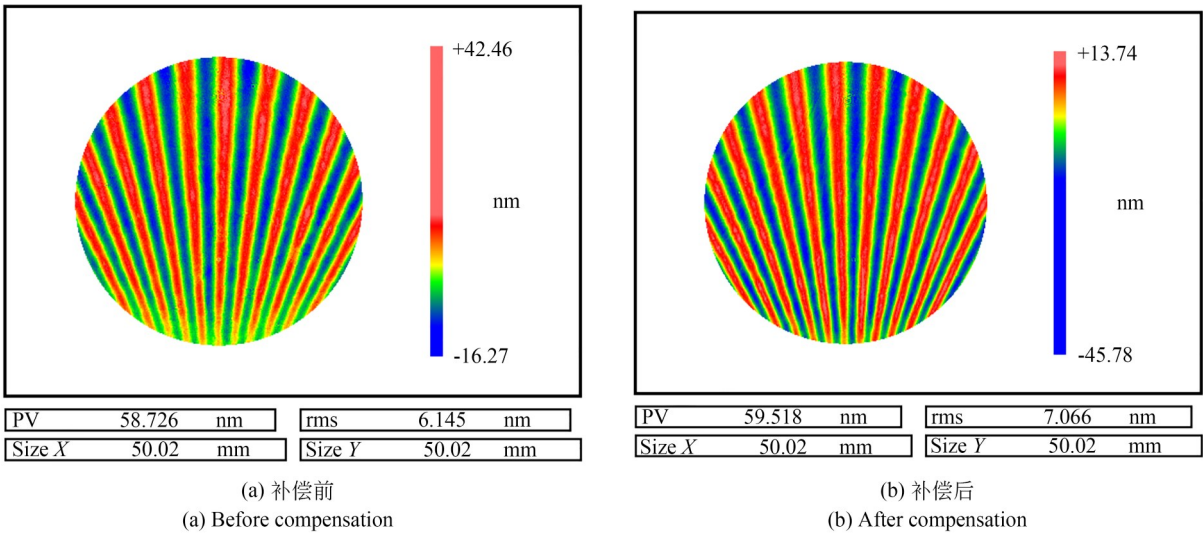


图 12 补偿前后加工面形对比
Fig. 12 Comparison of processing surfaces before and after compensation

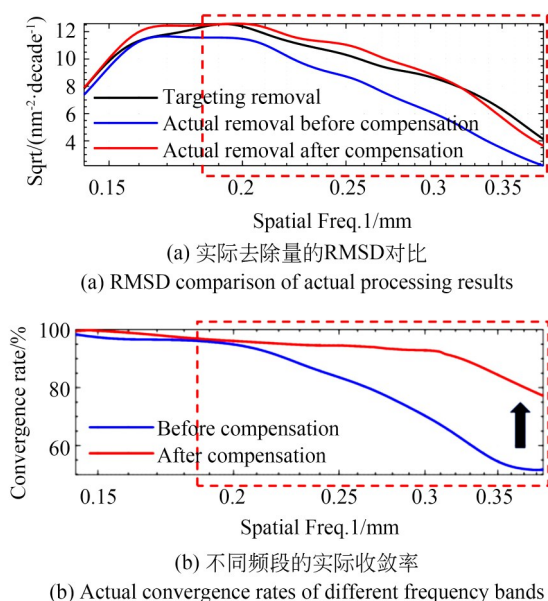


图 13 补偿前后实际加工结果的 RMSD 对比

Fig. 13 Comparison of RMSD between actual processing results before and after compensation

图 14 分别列出了空间频段分别为 0.37, 0.33, 0.25 mm^{-1} 时补偿前后的实际加工结果,与图 9 中对应的理论结果基本相符。由上述加工结果可知,基于频域滤波面形的驻留时间补偿方法可以有效提升细束径去除函数修正频段内的单轮收敛率。

5 结 论

针对离子束修形中细束径去除函数在截止频率前收敛率不足的问题,本文提出基于多频段面形(贝壳纹)的加工能力评估方法和基于频域滤波进行驻留时间补偿的收敛率优化提升方法。通过设计周期连续递增(2.6~7 mm)、幅值统一(PV 20 nm)的“贝壳纹”,分析 RMSD 的频域分布特性与各频段的收敛率、不同周期面形幅值的加工结果,实现多频段面形误差修正能力的高效分析。采用频域滤波方法对高频误差成分进行驻留时间补偿以提升收敛率,通过仿真与实验验证了方法的有效性。仿真结果表明,截止频率(0.385 mm^{-1})处理论收敛率由 55.3% 提升至 82.4%,关键频段(0.186~0.385 mm^{-1})内理论平均收敛率从 84.7% 提升至 95.9%。实验结果表明,针对 2 mm FWHM 去

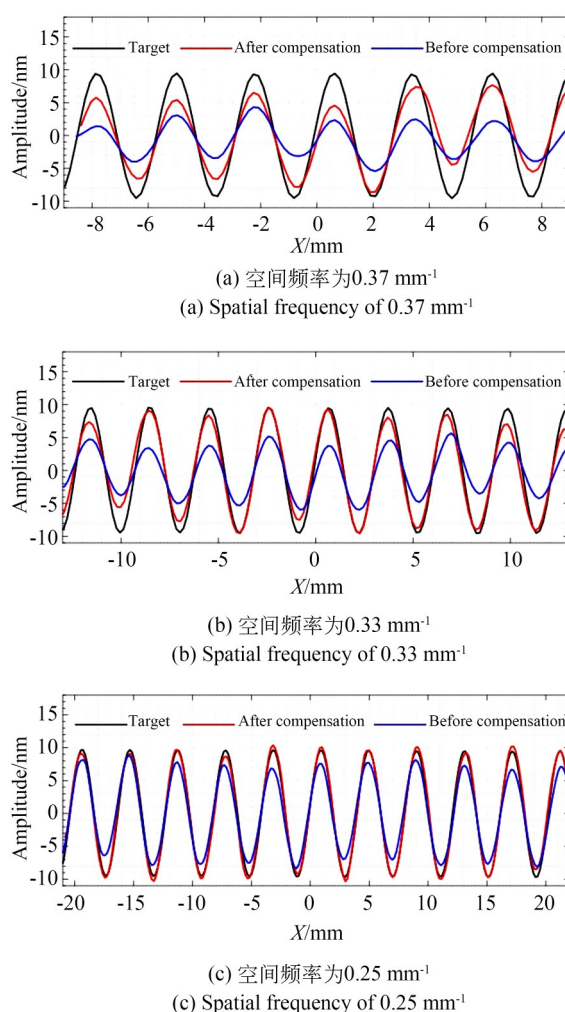


图 14 补偿前后实际加工结果的幅值分析

Fig. 14 Amplitude analysis of actual processing results before and after compensation

除函数,截止频率处实际收敛率由 51.6% 提升至 77.2%,实际平均收敛率从 76.4% 提升至 91.7%。仿真与实验的结果有很好的 consistency。该方法提高了细束径去除函数单轮加工的收敛率,有助于实现单束径去除函数加工时的全频段一致性收敛,适用于高精密光学加工。

作者贡献声明:

卞萌:论文构思、数据管理、形式分析、方法论、软件、验证、可视化呈现、初稿写作、审核与编辑写作;

胡海翔:论文构思、获取资助、项目管理、提供资源、指导、审核与编辑写作;

唐瓦:提供资源、指导、软件、审核与编辑

写作;

季鹏:论文构思、项目管理、软件、调查研究

提供资源、审核与编辑写作;

张学军:提供资源。

参考文献:

- [1] HU J, HU H, PENG X Q, *et al.* Multi-dimensional error figuring model for ion beams in X-ray mirrors [J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 29458-29473.
- [2] WANG Y B, DAI Y F, HU H, *et al.* Study on rapid convergence strategy of nano-precision optical surface by ion beam figuring[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127614.
- [3] SHURVINTON R, WANG H C, PRADHAN P, *et al.* Ion beam figuring for X-ray mirrors: history, state-of-the-art and future prospects [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2024, 31(Pt 4): 655-669.
- [4] WANG J, FAN B, WAN Y J, *et al.* Method to calculate the error correction ability of tool influence function in certain polishing conditions [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(7): 075106.
- [5] GHIGO M, CANESTRARI R, SPIGA D, *et al.* Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of ion beam figuring[C]. *Optical Manufacturing and Testing VII. San Diego, CA. SPIE*, 2007: 667114.
- [6] XIE X H, ZHOU L, DAI Y F, *et al.* Ion beam machining error control and correction for small scale optics [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(27): 5221-5227.
- [7] ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Analysis of correcting ability of ion beam figuring[J]. *Key Engineering Materials*, 2007, 364/365/366: 470-475.
- [8] ZHOU L, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Frequency-domain analysis of computer-controlled optical surfacing processes [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(7): 2061-2068.
- [9] XU M J, DAI Y F, XIE X H, *et al.* Fabrication of continuous phase plates with small structures based on recursive frequency filtered ion beam figuring[J]. *Optics Express*, 2017, 25(10): 10765-10778.
- [10] YUAN L Y, XIE J N, HE Z P, *et al.* Optical design and evaluation of airborne prism-grating imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17686-17700.
- [11] GENG Z C, TONG Z, JIANG X Q. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 211.
- [12] BAJT S, PRASCIOLU M, FLECKENSTEIN H, *et al.* X-ray focusing with efficient high-NA multilayer Laue lenses [J]. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 17162.
- [13] DENG Y H, HOU X, LI B C, *et al.* Review on mid-spatial frequency error suppression in optical components manufacturing [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(11): 4827-4847.
- [14] LI W, XIN Q, FAN B, *et al.* A review of emerging technologies in ultra-smooth surface processing for optical components [J]. *Micromachines*, 2024, 15(2): 178.
- [15] 曾沛, 舒志文, 陈艺勤, 等. 宽束离子束刻蚀快速加工金属纳米间隙结构 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(1): 109-118.
- ZENG P, SHU ZH W, CHEN Y Q, *et al.* Rapid fabrication of metallic nanogap structures by slower ion beam etching [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(1): 109-118. (in Chinese)
- [16] 蔡根, 朱蓓蓓, 秦琳, 等. 多光谱硫化锌光学窗口离子束抛光工艺研究及参数优化 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(14): 2247-2255.
- CAI G, ZHU B B, QIN L, *et al.* Ion beam polishing process parameters optimization and polishing experiment of ZnS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(14): 2247-2255. (in Chinese)
- [17] WANG T Y, KE X L, HUANG L, *et al.* A comprehensive review of dwell time optimization methods in computer-controlled optical surfacing [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(3): 1.
- [18] XU Z, DA-SEN W, CHAO-XIANG X, *et al.* In-situ Fast Calculation of Removal Function of Ion Beam Polishing and Polishing Experiment [J]. *Surf Technol*, 2024: 1-9.

- [19] SIDICK E. Power spectral density specification and analysis of large optical surfaces[C]. *Model-*

ing Aspects in Optical Metrology II. Munich, Germany. SPIE, 2009: 73900L.

作者简介:



卞 萌(1999—),女,山东济宁人,硕士研究生,2021年于长春理工大学获得学士学位,主要从事离子束加工方面的研究。E-mail: bianmeng22@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



胡海翔(1990—),男,安徽淮南人,博士,研究员,2012年于中国科学技术大学获得学士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事先进光学制造技术、皮米精度光学制造技术及装备、超大口径光学加工诊断与决策、宽动态高精度大口径光学检测仪器技术方面的研究。E-mail: hhx@ciomp.ac.cn