2019 年 10 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)05-0877-08

基于等效积分的去除函数误差修正能力分析

郑 楠,邓文辉,陈贤华

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对计算机光学表面成形技术的去除理论中关于材料去除量及去除函数误差修正能 力问题,基于等效去除积分法,对高斯型、三角形、梯形、脉冲随机复合型等多种不同形态的去 除函数修正能力进行研究,通过频域分析去除函数的误差修正能力,获得调制参数与去除函数修 正能力的关联曲线,建立基于等效去除积分法的去除函数截止修正能力评价模型,为去除函数误 差修正的调制及去除函数修正能力评价提供依据,从而在大口径光学元件的超高精确度加工中, 提高超光滑光学元件表面的质量。

关键词:计算机控制光学表面成形;超高精确度光学元件制造;去除函数;误差修正能力;频谱变换

中图分类号: TN911.7 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201905.0877

Analysis of error correction ability of removal function based on equivalent integral

ZHENG Nan, DENG Wenhui, CHEN Xianhua

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Aiming at the problem of removal function correction ability in removal theory of Computer Controlled Optical Surfacing(CCOS), based on the equivalent removal integral method, the correction ability of Gaussian type, triangle type, trapezoid type, pulse random compound type and other removal functions is studied. The correlation curve between the modulation parameters and the correction ability of the removal function is obtained by analyzing the error correction ability of the removal function in frequency domain. An evaluation model of cutoff correction ability of removal function based on equivalent removal integral method is established, which provides a theoretical basis for the adjustment of removal function error correction and the evaluation of removal function correction ability, so as to improve the surface quality of ultra-smooth optical elements in ultra-high precision machining of large aperture optical elements.

Keywords: Computer Controlled Optical Surface; ultra-high precision optical elements manufacturing; removal function; error correction ability; spectrum transform

20 世纪 70 年代初,美国 Itek 公司的 RUPP W J 提出采用计算机控制光学表面成形(CCOS)技术^[1]进行小工 具研磨,实现光学镜面的加工。材料去除量和研抛阶段材料的去除机理,在大口径光学元件的超精密加工中起 到了至关重要的作用,已成为现代光学元件超精密加工的重要手段^[2]。

超高精确度光学制造领域针对激光损坏阈值、亚表面损伤等要求,对大口径光学元件制造技术提出了越来 越高的要求,鉴于 CCOS 技术是利用去除函数模型经多次迭代实现逐步收敛^[3],根据定量的面形检测数据和抛 光加工过程的控制模型,以一定的路径、速度和压力抛光工件表面,通过控制柔性抛光头在工件表面的驻留时 间,精确控制工件表面材料的去除量,从而改善元件的局部面形误差,达到最终的面形精确度要求。每个加工 周期收敛的效果会直接影响最终的加工效率,该抛光技术的核心问题之一即去除函数修整能力评价^[4]。本文通 过分析几种不同形态去除函数的调制能力,结合去除函数修正能力判断修正面形误差的极限能力,将不同形态 去除函数截止频率作为去除函数修形能力的评价指标^[5]。

1 基本原理

CCOS 抛光技术实际加工中,利用干涉仪得到的数据为具有面形高度信息的二维离散数据矩阵。二维矩阵上每一个点的高度均可反映该点所对应被测光学元件某点的高低信息,即材料去除量^[6]。去除材料量和去除函数均已知,CCOS 抛光过程即为一个二维卷积运算,其过程如图 1 所示,由面形数据得到驻留时间分布,将去除函数 r(x,y)与驻留时间 $\tau(x,y)$ 求卷积运算得到去除量 e(x,y),见式(1)。可通过给定预期去除量 e(x,y)反算出驻留时间分布 $\tau(x,y)$,并换算成不同的进给速度^[7]。

$$e(x,y) = \iint_{\text{path}} r(x-\xi,y-\eta)\tau(\xi,\eta) d\xi d\eta = r(x,y) * \tau(x,y)$$
(1)

去除函数是一种三维空间的分布函数,通过分析卷积加工过程可知,在同速轨迹段内某一点的加工量,即去除函数在轨迹方向的积分与驻留时间的乘积^[8]。假定轨迹方向为x方向,则可以计算出去除函数的实际作用积分量在y方向上的归一化去除函数积分分布函数 $R_n(y)$,见式(2)。式中y表示y方向覆盖范围[-r,r],r为y方向去除函数抛光区域半径^[9]。

$$R_n(y) = \frac{R(y)}{\max(R(y))} = \frac{\int_0^T \Delta Z(y) dt}{\max\left(\int_0^T \Delta Z(y) dt\right)}$$
(2)



removal function r(x,y) discrete surface data e(x,y)

图 2(a)为任意相貌的去除函数三维空间去除量分布;进行轨迹 方向的积分处理得到去除函数分布,如图 2(b)所示;取 x 方向去除 函数积分在 y 方向上分布最大的值,得到 x 方向的总积分二维分布,如图 2(c)所示。其中图 2(c)采用的积分公 式(3)所示的去除函数的实际作用积分量为 y 方向上的分布函数 $R_n(y)^{[10]}$ 。因此去除函数修正能力截止频率的分 析也可以等效在二维分布函数 $R_n(y)$ 上来分析。

对式(2)进行傅里叶变换,得到 R_n(y)的频谱:



图 3 归一化高斯型去除函数

去除函数的截止频率依据去除函数的幅值频谱 |**R**_F(ω)|确定,因此,为便于比较各去除函数的修形能力,本 文选择幅值谱线下降到峰值的 5%处对应的频率为去除函数的截止频率。从去除函数形貌来分析去除函数的误差 修正能力^[11],将去除函数的形貌分为高斯型、三角形、梯形、脉冲随机振荡型形状,分析去除区域大小相同 (*r*=30 mm)的条件下各种形貌去除函数误差修正能力。

2 高斯型去除函数截止修正能力

高斯型去除函数分布如式(4)所示[12]:

$$R(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$
(4)

式中σ为去除函数的形状调节参数。取σ=r/3,即取正态分布的3σ原则,进行模拟分析,得到三维去除分布如图 3(a)所示,三维去除积分分布如图3(b)所示,x方向总积分分布如图3(c)所示,以及归一化幅值频谱图如图3(d)所示。仿真结果表明,此参数条件下的截止频率为0.043 83 mm⁻¹,即该去除函数误差修正能力为可修正大于 22.81 mm空间周期的误差。

有效去除占比(即在去除函数区域内有效去除的体积与矩形区域体积之比)与σ参数密切相关^[13],是高斯型去 除函数的主要调制参数,图4为σ与高斯去除函数截止修正能力的关系。



由分析结果可以看出:

1) 图4(a)表明,随着σ增大,截止修正频谱值越来越小,在σ=15 mm之后开始增大,σ=60 mm之后基本平缓,截止修正频谱在0.037 mm⁻¹附近。

2) 图4(b)表明,随着σ增大,截止修正误差尺度越来越大,在σ=15 mm之后开始减小,σ=60 mm之后趋于平缓,截止修正误差尺度位置在[1.4 mm,31.5 mm]附近。

 图4(c)表明,随着σ增大,其有效去除 占比越来越大,即去除所覆盖的区域更多。

4) 图4(d)表明,随着有效去除占比的增 大,截止修正频率逐渐降低,即所能够修正 的误差尺度范围变小。

3 三角形去除函数截止修正能力

三角形归一化去除函数如图 5 所示。三 角形去除函数方程为:





式中 h 为三角形去除函数的形状调节参数。取 h=1,即中心低边缘高的凹三角形分布,进行模拟分析,其归一化的母线如图 6(a)所示,去除函数三维分布如图 6(b)所示,x 方向总积分分布如图 6(c)所示,以及归一化幅值频

谱图如图 6(d)所示。仿真结果表明,此参数条件下的截止频率为 0.049 33 mm⁻¹,即该去除函数误差修正能力为可修正大于 20.27 mm 空间周期的误差。有效去除占比与 h 参数也密切相关,也是三角形去除函数的主要调制参数,图 7 为 h 与去除函数截止修正能力的关系。



1) 图 7(a)表明, 随着 h 在[-1,1]内增大, 去除函数由最凸变最凹, 其截止修正频谱值越来越大, 即修正能力越来越强, 截止修正频率在[0.031 97 mm⁻¹,0.049 33 mm⁻¹]范围内。

2) 图 7(b)表明, 随着 h 在[-1,1]内增大, 去除函数由最凸变最凹, 其截止修正误差尺度越来越小, 修正能力越来越强, 截止修正误差范围在[20.3 mm,31.3 mm]范围内。

3) 图7(c)表明,随着h增大,其有效去除占比越来越大,即去除所覆盖的区域更多。

(6)

梯形去除函数截止修正能力 4

郑

梯形归一化去除函数如图 8 所示,梯形去除函数的方程为[14]:

$$y = \begin{cases} 1, & x \in [0, r] \\ 1 - \frac{1}{R - r} (x - r), & x \in (r, R] \end{cases}$$

式中 R=ratio×R, ratio 为上下边比值。取 ratio=0.5, 即上边为下边长的一 半的三标准梯形分布,进行模拟分析。其归一化的母线如图 9(a)所示,去 除函数三维分布如图 9(b)所示, x 方向总积分分布如图 9(c)所示, 以及归一 化幅值频谱如图 9(d)所示。仿真结果表明,此参数条件下的截止频率为 0.040 24 mm⁻¹, 即该去除函数误差修正能力为可修正大于 24.85 mm 空间周 期的误差。ratio 为梯形去除函数的形状调节参数,有效去除占比与 ratio 参



数也密切相关,也是梯形去除函数的主要调制参数。图 10 为 ratio 与去除函数截止修正能力的关系。

1) 图 10(a)表明, 随着 ratio 在[0,1]内增大, 其截止修正频谱值越来越大, 即修正能力越来越强, 在 ratio>0.85 后出现下降,截止修正频率在[0.031 97 mm⁻¹,0.055 16 mm⁻¹]范围内。

2) 图 10(b)表明, 随着 ratio 在[0,1]内增大, 其截止修正误差尺度越来越小, 即修正能力越来越强, 在 ratio>0.85 后出现上升,截止修正误差在[18.1 mm,31.3 mm]范围内。

3) 图10(c)表明,随着ratio增大,其有效去除占比越来越大,即去除所覆盖的区域更多。

4) 图10(d)表明,随着有效去除占比的增大,其截止修正频率也逐渐增大,即所能够修正的误差尺度范围变 大,在ratio>0.7258后,其截止修正频率也逐渐降低。



图 9 梯形去除函数分析



图 10 ratio 值与梯形去除函数修正能力的关系

(7)

5 脉冲随机复合型去除函数截止修正能力

图 11 为脉冲随机复合型归一化去除函数,函数方程为:

 $y = 1 - ratio \times random(0,1)$

式中:*ratio*为随机系数;*random*为随机函数^[14]。取*ratio*=0.5,即随机含量占50%,进行模拟分析,其归一化的母线如图12(a)所示,去除函数三维分布如图12(b)所示,x方向总积分分布如图12(c)所示,以及归一化幅值频谱如图12(d)所示。仿真结果表明,此参数条件下的截止频率为0.043 93 mm⁻¹,即该去除函数误差修正能力为可修正大于22.76 mm空间周期的误差。*ratio*为脉冲随机复合型去除函数的性能参数,去除函数的波动程度与ratio参数密切相关,也是该类型去除函数的主要调制参数^[15]。图13为*ratio*与去除函数截止修正能力的关系。



图 11 脉冲随机复合型去除函数

图 13(a)表明,随着 ratio 在[0,1]内增大,截止修正频谱值
出现振荡变化的程度越来越强,即修正能力的不确定性增强,截止修正频率在[0.039 38 mm⁻¹,0.048 69 mm⁻¹]范
围内。

2) 图 13(b)表明,随着 ratio 在[0,1]内增大,随着 ratio 在[0,1]内增大,截止修正误差尺度振荡变化的程度越 来越强,即修正能力的不确定性也越来越高,截止修正误差范在[20.5 mm,25.4 mm]范围内。

3) 图 13(c)表明, 随着 ratio 增大, 有效去除占比振荡越来越激烈, 其有效去除占比无明显规律。

4) 图13(d)表明,随着有效去除占比增大,截止修正频率变化呈现随机状态,无明显规律,这说明去除函数的无规律波动频率将反映到其修正能力的不确定性。

6 去除函数截止修正能力评价模型验证结果分析

基于等效去除积分法的去除函数截止修正能力评价模型,获得调制参数与去除函数修正能力的关联关系。 调制去除函数误差,并在430 mm×430 mm×10 mm口径的熔石英元件上进行模拟加工,模拟面形分布如图14(a) 所示,元件实际加工后的面形分布如图14(b)所示。从两图面形分布趋势可得,去除函数截止修正能力评价模型 模拟加工的误差及修正补偿与实际加工元件一致,预期面形分布与实际加工面形分布结果基本吻合,从而证实 该模型能够正确评价去除函数截止修正能力,采取有效、准确的补偿,能精确控制光学加工表面质量。

cut-off frequency amplitude/mm⁻¹

effective removal rate

郑



(a) simulative surface figure of the element (b) actual surface f Fig.14 Polishing result of 430 mm×430 mm×10 mm fused silica

(b) actual surface figure of the element after polishing 10 mm fused silica

图 14 430 mm×430 mm×10 mm 熔石英元件验证结果

7 结论

本文对高斯型、三角形、梯形、脉冲随机复合型等不同形态的去除函数修正能力进行分析,将去除函数的 尺寸作为固定参数,基于傅里叶变换将去除函数的空域信息变换到频域中,通过频域分析去除函数的误差修正 能力。建立了基于等效去除积分法的去除函数截止修正能力评价模型,基于评价模型获得调制参数与去除函数 修正能力的关联曲线,为去除函数误差修正的调制提供了理论依据。同时,提出的等效去除积分分析方法,可 以类推到任意去除分布的去除函数分析,获得其相应的修正能力评价参数,并可作为子口径抛光技术修正能力 的重要评价方法之一。

参考文献:

- [1] RUPP W J. Conventional optical polishing techniques[J]. Acta Optical Sinica, 1971,18(1):3-16.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社, 2001. (YANG Li. Advanced optical manufacturing technology[M]. Beijing:Science Press, 2001.)
- [3] 李圣怡,戴一帆.大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M].北京:国防工业出版社, 2011. (LI Shengyi,DAI Yifan. New technology for manufacturing and measuring of large and middle-scale aspheric surface[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011.)
- [4] 周林,戴一帆,解旭辉,等. 计算机控制光学表面成形中的频域分析[J]. 中国科学:技术科学, 2009(3):402-408. (ZHOU Lin,DAI Yifan,XIE Xuhui,et al. Frequency domain analysis in computer controlled optical surface forming[J]. Scientia Sinica Technologica, 2009(3):402-408.)
- [5] SHANG Wenjin, DAI Yifan, ZHOU Xusheng. The amendment of the removal function model in edge effect[C]// Advanced Optical Manufacturing Technologies. Xi'an, China: [s.n.], 2005:3-4.
- [6] HOYO J D,KIM D W,BURGE J H. Super-smooth optical fabrication controlling high-spatial frequency surface irregularity[C]// Optical Manufacturing and Testing. California,United States:SPIE, 2013:8838-8848.
- [7] LI H Y, WALKER D, YU G, et al. Edge controlling CNC polishing, paper 2:simulation and validation of tool influence functions on edge[J]. Optics Express, 2013,21(1):370-381.
- [8] ZHONG B,CHEN X H,RI P,et al. The effect of tool wear on the removal characteristics in high-efficiency bonnet polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017,91(9-12):3653-3662.
- [9] LEE E S,CHA J W,KIM S H. Evaluation of the wafer polishing pad capacity and lifetime in machining of reliable elevation[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacturing, 2013(66):82-94.
- [10] HOYO J D,CHOI H,BURGE J H,et al. Experimental power spectral density analysis for mid to high-spatial frequency surface error control[J]. Applied Optics, 2017,56(18):5258-5267.
- BUDE J,MILLER P,BAXAMUSA S,et al. High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. Optics Express, 2014,22(5):5839-5851.
- [12] BAXAMUSA S,MILLER P E,WONG L,et al. Mitigation of organic laser damage precursors from chemical processing of fused silica[J]. Optics Express, 2014,22(24):29568-29577.
- [13] KIM D W, MARTIN H M, BURGE J H, et al. Optical surfacing process optimization using parametric smoothing model for mid to high spatial frequency error control[C]// Proceedings of SPIE. NY, United States:[s.n.], 2013:12.
- [14] WANG Huijun, XU Jin, WANG Peng, et al. Study on optical fabrication and metrology of precise convex aspheric mirror[C]// Eighth International Symposium on Advanced Optical. Suzhou, China: SPIE, 2016:7.
- [15] OWEN J D,SHULTZ J A,SULESKI T J,et al. Error correction methodology for ultra-precision three-axis milling of freeform optics[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2017,66(1):97–100.

作者简介:



郑 楠(1982-), 女,河北省邢台市人, 硕士,主要从事先进光学制造技术工作. email:nanceerie@163.com. **邓文辉**(1985--),男,南昌市人,硕士,主要 从事先进光学制造技术工作.

陈贤华(1980-),男,四川省乐山市人,博 士,主要从事先进光学制造技术工作.