

文章编号 1004-924X(2007)11-1668-06

光学表面中频误差的控制方法—确定区域修正法

周旭升,李圣怡,戴一帆,郑子文,杨智

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:提出了一种有效控制光学表面中频误差的方法——确定区域修正法。给出了确定区域修正法的基本思想和工作流程,并基于最大熵原理对抛光盘运动参数进行了优化选择(行星运动方式转速比为-1或0,偏心率接近于0但不等于0)。最后,在 $\Phi 100$ mm K9玻璃平面镜上进行了抛光对比实验。实验结果表明,应用确定区域修正法,在1.5 min内可使 0.28 mm^{-1} 频率误差对应的PSD值从 $14.76 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 下降到 $3.70 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$,有效地控制了光学表面的中频误差。与其他方法相比,确定区域修正法的突出优点在于其确定性和高效性。

关键词:光学表面;中频误差;确定区域;最大熵原理

中图分类号:TH703;TQ171.684 文献标识码:A

Correcting errors in definite area: a new method for controlling mid-spatial-frequency errors in optical surface

ZHOU Xu-sheng, LI Sheng-yi, DAI Yi-fan, ZHENG Zi-wen, YANG Zhi

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new method for controlling the mid-spatial-frequency errors located in definite area in a large optical surface, correcting errors in definite area, was brought forward. The basic idea and workflow were presented. Then, the processing parameters were optimized based on the maximum entropy principle. The optimized rotate speed ratio is -1 or 0, and the eccentricity ratio approaches 0 but not 0. Finally, a comparative experiment was done on a $\Phi 100$ mm K9 glass flat mirror. The experimental results indicate that the PSD value of 0.28 mm^{-1} frequency errors decreases from $14.76 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ to $3.70 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ within 1.5 min. The mid-spatial-frequency errors in optical surfaces can be controlled effectively by means of correcting errors in definite area. Compared with other methods, the correcting errors method in definite area has the advantages of determinacy and high-efficiency in optical machining.

Key words: optical surface; mid-spatial-frequency error; definite area; maximum entropy principle

收稿日期:2007-03-16;修订日期:2007-06-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50375155)

1 引言

计算机控制小工具抛光技术^[1]的突出优点是抛光盘能够有效地跟踪光学表面形状的变化,从而去除低频面形误差。然而,小工具抛光后会在光学表面留下微小的波纹,即所说的中频误差^[2]。产生中频误差的主要原因有两点:一是去除函数的“卷积效应”;二是抛光过程中不易控制的其他因素如研抛盘的磨损、温度的变化、研抛液浓度的变化等。中频误差在降低系统峰值强度的同时增大了光斑尺寸,从而影响成像质量,降低系统的性能^[2]。近年来,研究人员非常重视这一问题,纷纷寻找消除中频误差的有效方法。

小工具加工后,中频误差会遍及整个工件表面,但是,中频误差在不同区域的含量有所不同。一般来说,在小工具停留时间长的区域(加工前局部高点)中频误差含量会比较大,在小工具停留时间短或不停留的区域中频误差含量相对较小。由此,在计算机控制小工具抛光后,光学表面上各频段误差在不同区域含量不同的情况是经常存在的。一般的观点认为,用尺寸较大的抛光工具对整个光学元件表面进行均匀加工可以减小中频误差^[2-3],但是当中频误差主要存在于大口径光学元件表面的某一局部区域时,这种方法效率较低。本文提出了一种有效消除中频误差的方法—确定区域修正法。主要介绍了该方法的基本思想和针对特定频段误差存在区域的加工参数的选择,最后结合实例对确定区域修正法的有效性进行了验证。

2 确定区域修正法的基本思想

对于光学元件表面的中频误差,一般采用美国 LLNL 实验室在研制国家点火装置的过程中提出的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)特征曲线^[4]来进行评价。当光学元件表面误差的 PSD 在特征曲线之下时是合格的,反之则不合格。但 PSD 特征曲线仅仅是一种评价指标,不能给出特定频段误差在光学元件表面存在的具体位置,因而不能对特定频段误差的确定性消除加工进行指导。

确定区域修正法正是以此为背景提出来的。

其基本思想是:首先对面形误差数据进行 PSD 测试分析,找到不合格的频率点,然后利用小波变换找到不合格频段误差对应的区域,最后基于最大熵原理选择抛光盘尺寸、运动方式等工艺参数进行修正加工,直到中频误差满足要求。图 1 是确定区域修正法的流程图。

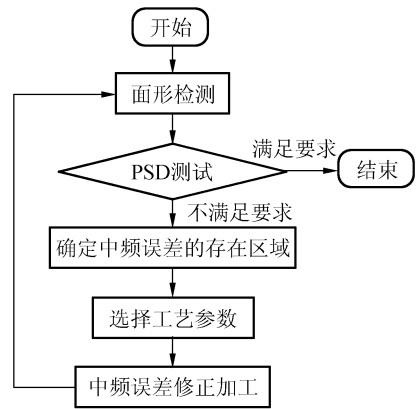


图 1 中频误差的确定区域修正法流程

Fig. 1 Flow chart of correcting errors in definite area

确定区域修正法中的关键步骤有两个,一是利用小波变换确定中频误差的存在区域,二是加工参数的选择。限于篇幅,本文重点阐述加工参数的选择方法,对特定频段误差及其存在区域的确定方法可以参考文献^[5]。

3 确定区域修正法的参数选择

3.1 参数选择依据

图 2 为工件某区域存在中频误差时的加工示意图。对于工件上存在中频误差的区域,可以选择尺寸和硬度加大的抛光盘在此区域运动。在抛光初期,首先是高度相同的凸起点与抛光盘表面接触,形成接触面,如果能够保证抛光盘上所有参与抛光的磨料在与工件接触表面上所形成的轨迹密度分布均匀,随着抛光加工的进行,这个接触面上的工件材料不断地被磨料均匀去除,凸起点的高度逐渐下降,使工件上更多的较低凸起点进入与抛光盘接触,使得工件表面被加工区域的中频误差峰值降低或消除,这一过程符合材料均匀去除原理^[6]。中频误差确定区域修正法的参数选择正是基于材料均匀去除原理进行的。参数选择原则是对已确定的中频误差存在区域进行均匀去

除,同时不影响其它区域,且对光学表面的整体精度不产生较大破坏。

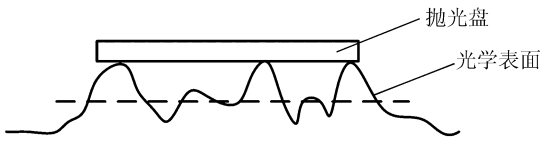


图 2 工件确定区域加工示意图

Fig. 2 Schematic of polishing in definite area

3.2 确定区域内材料去除量的计算

在确定区域加工中,工件静止,抛光盘的运动采用行星运动方式,其运动关系如图 3 所示。其中, O_1 为公转中心; O_2 为自转中心即抛光盘的中心; g 为偏心距,即公转半径; r_0 为抛光盘的半径; 抛光盘的公转和自转角速度分别为 ω_1 和 ω_2 。抛光盘的作用范围即去除函数覆盖区域的半径为 $g+r_0$ 。

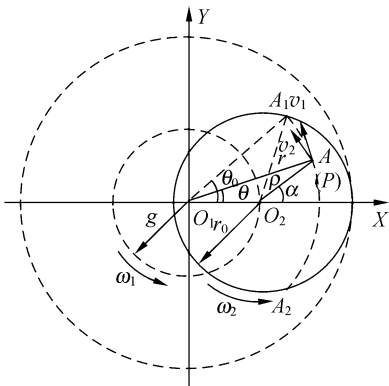


图 3 抛光盘运动示意图

Fig. 3 Moving of polishing tool

Preston 假设指出:在很大的数值范围内,抛光可以描述成一个线性方程^[2]

$$\frac{dz}{dt} = KPv, \tag{1}$$

式中, P 表示施加的压力; v 为工件与抛光盘的相对速度; K 是取决于抛光过程工艺的参数。

根据 Preston 假设理论,工件加工区域内材料去除量分布函数为^[7]:

$$z(r) = \frac{KP\omega_1}{2\pi} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} [r^2(1+f)^2 + r_0^2 f^2 e^2 - 2rr_0 f e(1+f)\cos\theta]^{1/2} d\theta \tag{2}$$

$$r \in [0, g+r_0],$$

其中, $\theta_0 = \arccos(\frac{r^2 + g^2 - r_0^2}{2rg})$, 转速比 $f = \omega_2/\omega_1$,

偏心率 $e = g/r_0$ 。

同样,可以计算出抛光盘磨损量分布函数为

$$z_{\text{pad}}(s) = \frac{KP\omega_2}{f} \int_0^{2\pi} [s^2(1-f)^2 + r_0^2 e^2 + 2sr_0 e(1-f)\cos\alpha]^{1/2} d\alpha \tag{3}$$

$$s \in [0, r_0].$$

3.3 参数优化结果与分析

参数的选择按照文献[8]中的基于最大熵原理的参数优化方法进行,加工区域各点去除量分布均匀时抛光信息熵最大,因此主要求取加工区域抛光信息熵最大时对应的加工参数。

首先建立加工区域抛光信息熵的数学表达式。设加工区域上一点 A_i , 根据式(1),其在时间 t 内的材料去除量为:

$$z_i = \int_0^t KP_i v_i dt \quad (i = 1, 2, \dots, N), \tag{4}$$

式中, P_i 为 A_i 点的相对压力; v_i 为 A_i 点的相对运动速度; z_i 为 A_i 点在时间 t 内的材料去除量。

加工区域所有点 $A_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的材料去除量之和为:

$$Z = \sum_{i=1}^N z_i, \tag{5}$$

令第 A_i 点的材料去除量占总材料去除量的比例(即概率密度)为:

$$\lambda_i = z_i/Z \quad (i=1, 2, \dots, N), \tag{6}$$

从而有:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \tag{7}$$

$$\lambda_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, N), \tag{8}$$

新引入的物理量 λ_i 描述了材料去除量的分布状况。为了综合反映加工区域材料去除量的分布状况,定义加工区域抛光信息熵函数 H 为

$$H = - \sum_{i=1}^N \lambda_i \ln \lambda_i. \tag{9}$$

由上式定义的加工区域抛光信息熵 H 可反映出不同的抛光加工设计方案中总材料去除量不确定性分布,熵越大材料去除量分布越均匀,这将为确定区域抛光加工工艺参数优化设计提供重要信息。

下面通过数值模拟显示抛光信息熵 H 随抛光参数转速比 f 和偏心率 e 改变的情况。由抛光方式易知,加工区域内同一半径上各点材料去除量相同,为考察不同半径处材料去除量的分布,在

数值模拟中取加工区域半径上 N 个等间距的点为计算点。计算流程如图 4 所示。当参数选取归一化的值为 $K=1, P=1, r_0=1, \omega_1=1$ 、计算点 $N=11$ 时的模拟计算结果见图 5~8。

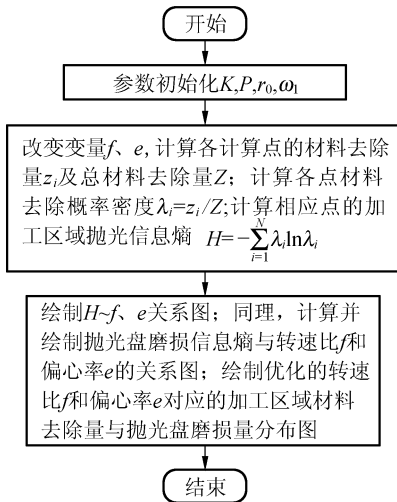


图 4 数值模拟计算流程

Fig. 4 Flow chart of simulation process

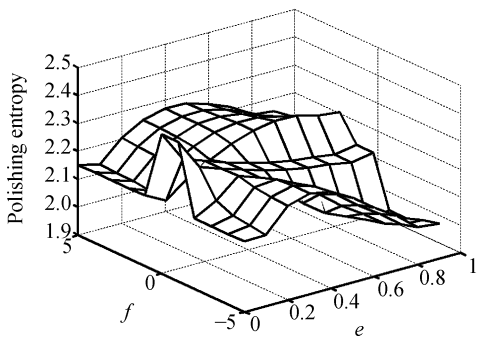


图 5 确定区域抛光信息熵与转速比和偏心率的关系
Fig. 5 Distribution of polishing entropy with rotate speed ratio and eccentricity ratio

图 5 为加工区域抛光信息熵与偏心率、转速比的关系,图 6 为抛光盘磨损信息熵与偏心率、转速比的关系,可以看出转速比为 -1 或 0、偏心率接近 0 时,工件确定区域抛光信息熵与抛光盘磨损信息熵同时达最大值,此时符合材料均匀去除原理。

当抛光盘运动的偏心率为 0 时,不论转速比为 -1 或 0,实际上抛光盘与工件之间无相对运动,即对工件无去除作用。因此可选择较小的偏心率获得近似均匀去除的效果。图 7 为转速比为 -1 或 0、偏心率为 0.1 时加工区域的归一化材料去除量,图 8 为相同参数下抛光盘磨损量分布情

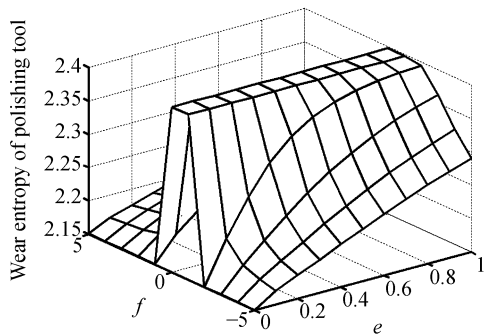


图 6 抛光盘磨损信息熵与转速比和偏心率的关系
Fig. 6 Distribution of wear entropy of polishing tool with rotate speed ratio and eccentricity ratio

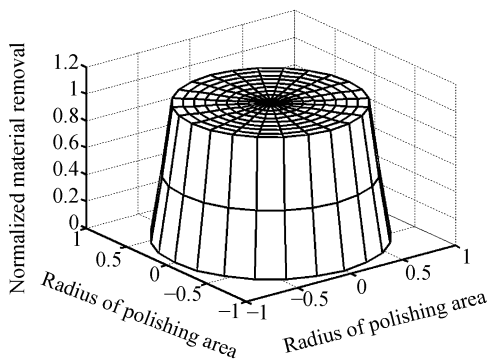


图 7 加工区域的材料去除量分布
Fig. 7 Material removal distribution map of polishing area

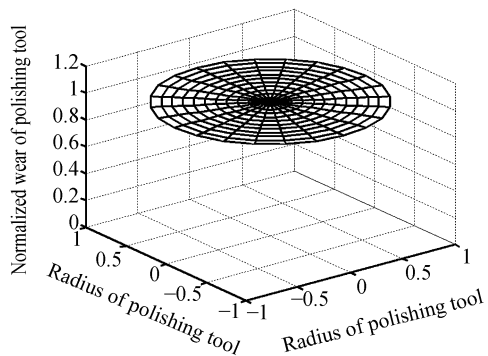


图 8 抛光盘磨损分布

Fig. 8 Wear extent of polishing tool

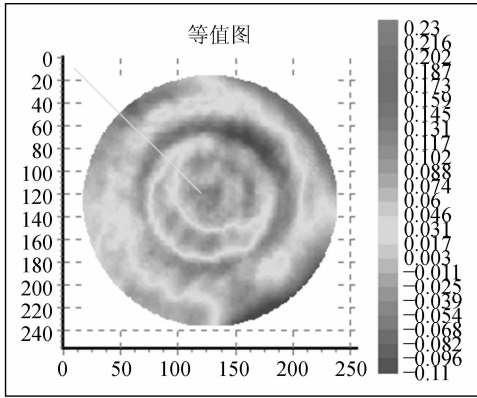
况。可以看出,此时抛光区域 82% 直径范围内为均匀去除,而在加工区域边缘材料去除量为零,而且此时抛光盘的磨损是均匀的,说明这种情况下符合前面提出的不破坏光学表面整体精度的参数选择原则。由此可以选择转速比为 -1 或 0,偏心率为 0 到 0.1 之间。

需要说明的是,进行数值模拟是为了寻找符

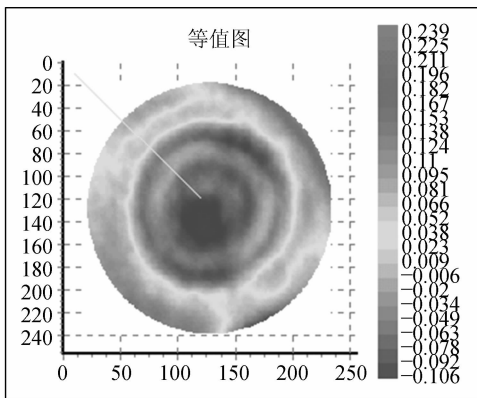
合材料均匀去除原理的最优工艺参数组合,事实上所期望的实际材料去除量分布(高点去除)与模拟得到的材料去除量分布应是不同的。转速比和偏心率确定后,抛光盘的直径可以选择为恰好使存在中频误差的区域(如果此区域较大或不规则,可以将其分块处理)落在均匀抛光加工区域内的尺寸,对于高陡度非球面而言,选择抛光盘尺寸时还应考虑抛光盘与光学表面不吻合度的影响。加工时间则根据误差大小和材料去除效率决定,计算过程从略。

4 应用实例

为验证确定区域修正法控制中频误差的有效性,本文在 $\Phi 100\text{ mm}$ K9 玻璃平面镜上做了相



(a) 加工前
(a) Before polishing



(b) 加工后
(b) After polishing

图 9 确定区域修正加工前后的误差分布图
Fig. 9 Error distribution before and after correcting errors in definite area

关实验。图 9 为确定区域修正加工前后的误差分布图(坐标为像素点数,像素间距为 0.422 mm),图 10 为确定区域修正加工前后的 PSD 测试曲线对比,根据加工前 PSD 曲线选定一个中心频率是 0.28 mm^{-1} 的不合格频段(图 10 已标),图 11 为利用小波方法计算出的该频段误差在不同区域的权重,由此确定出该频段误差主要存在于直径为 55 mm 的中心区域。确定区域修正加工主要参数是:抛光盘材料为聚氨酯,直径为 60 mm ,偏心率为 0.1 ,公转速度为 30 r/min ,转速比为 -1 。经过确定区域抛光加工 1.5 min 后的误差分布和 PSD 曲线分别见图 9(b)和图 10,加工后面形精度稍有下降(加工前后峰谷值分别为 0.34λ 和 0.345λ ,RMS 值分别为 0.069λ 和 0.081λ , $\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$),同时 0.28 mm^{-1} 频率误差的含量大大降低(PSD 值从 $14.76\text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 下降到 $3.70\text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$),从而说明确定区域修正法可以用于控制光学表面的中频误差,且其效率较高。

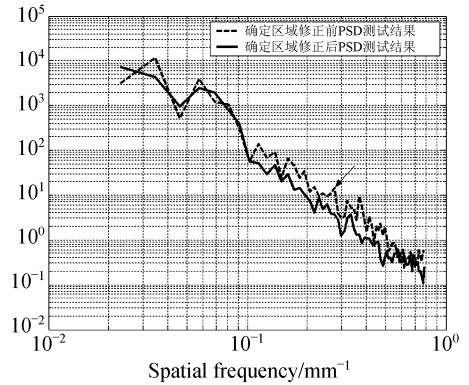


图 10 确定区域修正加工前后的 PSD 测试曲线对比
Fig. 10 PSD curve before and after correcting errors in definite area

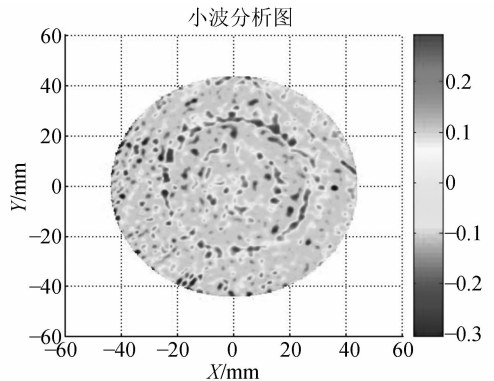


图 11 修正前 0.28 mm^{-1} 频段误差在不同区域的权重
Fig. 11 Weight dirtribution of 0.28 mm^{-1} error before correcting

5 结 论

本文针对光学表面存在的中频误差问题,提出了一种确定区域修正方法,通过数值模拟计算和相关实验得到如下结论:

(1)在确定区域抛光加工中,选择双旋转抛光盘转速比为一1或0、偏心率接近0(但不能等于0)时,加工区域内材料去除量近似均匀分布,且此时抛光盘为均匀磨损;

(2)应用确定区域修正法在 1.5 min 内使 $\Phi 100$ mm K9玻璃平面镜上 0.28 nm^{-1} 频率误差对应的 PSD 值从 $14.76 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$ 下降到 $3.70 \text{ nm}^2 \cdot \text{mm}$;

(3)初步实验结果表明,确定区域修正法可以用于控制光学表面的中频误差。相对于其他方法而言,中频误差确定区域修正法的特点在于其确定性和高效性,这将为大口径光学零件的中频误差控制提供指导。

参考文献:

- [1] 张学军. 数控光学成形的计算机模拟及工艺实验[J]. 光学精密工程, 1993, 1(5): 64-68.
ZHANG X J. Computer simulation and technology experiment for CCOS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993, 1(5): 64-68. (in Chinese)
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Manufacturing Technology of Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [3] 牛海燕, 张学军. $\Phi 124$ mm 口径碳化硅质非球面镜面数控研抛技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 539-544.
NIU H Y, ZHANG X J. Research on computer controlled polishing technology of $\Phi 124$ mm aspheric reaction-burned silicon carbide mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 539-544. (in Chinese)
- [4] AIKENS D M. The origin and evolution of the optics specifications for the national ignition facility[J]. *SPIE*, 1995, 2536: 2-12.
- [5] YANG ZH, DAI Y F, WANG G L. Use of wavelet in specifying optics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(1): 44-46.
- [6] 杨建东, 田春林. 高速研磨技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
YANG J D, TIAN CH L. *High Speed Lapping Technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 王权陡, 余景池, 张峰, 等. 数控抛光中不同运动方式下小抛光盘抛光特性之比较[J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 73-80.
WANG Q D, YU J CH, ZHANG F, *et al.*. Comparing the feature of small polishing tools in different movement style [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(5): 73-80. (in Chinese)
- [8] 周旭升, 李圣怡, 郑子文. 基于最大熵原理的平面研抛工艺参数优化[J]. 中国机械工程, 2005, 16(11): 1001-1004.
ZHOU X SH, LI SH Y, ZHENG Z W. Optimization of plane polishing parameters based on maximum entropy principle[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(11): 1001-1004. (in Chinese)

作者简介: 周旭升(1977—), 男, 国防科学技术大学博士研究生, 主要研究方向为光学非球面制造。E-mail: zhouxushengcyh@sina.com;

李圣怡(1946—), 男, 国防科学技术大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密工程与微机电系统。E-mail: syli@nudt.edu.cn