

doi:10.3788/gzxb20144307.0722002

一种评价 CCOS 抛光工艺误差抑制能力的方法

王佳^{1,2}, 范斌¹, 万勇建¹, 施春燕¹, 卓彬¹

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:结合光学加工中材料去除的卷积模型和功率谱密度函数,建立了描述 CCOS 抛光工艺抑制不同频段误差能力的数学模型——平滑谱函数.利用 Rigid Conformal 磨盘抛光 620 mm 口径微晶平面玻璃,通过计算平滑谱函数曲线,将 CCOS 抛光工艺抑制不同频段误差的能力表示为归一化且无量纲的频谱曲线.计算结果表明平滑谱函数曲线能以数值大小评价 CCOS 抛光工艺对不同频率误差的抑制能力.

关键词:光学加工;平滑谱函数;功率谱密度;中高频误差;卷积模型

中图分类号:TH74;TP60

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)07-0722002-4

A Method to Evaluate the Error Restraint Ability of CCOS Process

WANG Jia^{1,2}, FAN Bin¹, WAN Yong-jian¹, SHI Chun-yan¹, ZHUO Bin¹

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 621900, China)

Abstract: Base on the convolution model of material removal and power spectral density function in optical manufacturing, a mathematical model named smoothing spectral function was established. A Zerodur plate mirror with diameter of 620 mm was polished using Rigid Conformal tool. By calculating the smoothing spectral curve, the error restraint ability of polishing process can be expressed as a normalized and non-dimensional spectral curve. The calculated result indicates that the error restraint ability of polishing process can be evaluated by the value of smoothing spectral function curve.

Key words: Optical manufacturing; Smoothing spectral function; Power spectral density; Middle spatial frequency error; Convolution model

OCIS Codes: 220.0220, 220.4610, 220.54500

0 引言

现代光学制造工程具有显著的极端制造特征,即在极端技术条件要求的背景下,制造极端尺度、极高性能器件或功能系统的大科学工程^[1].我国目前正面临着完成大口径望远镜系统、纳米尺度光刻系统和高功率激光系统等典型极端光学研制工程的任务.在极端光学系统中,光学元件表面不同频段的误差对光学系统性能的影响越来越受关注,低频误差使系统成像扭曲变形,引入各种像差;中频误差使光线发生小角度散射,从而导致成像产生耀斑,影响像的对比度;高频误差使光线发生大角度散射,降低了镜面的反射率^[2-5].因此分频段控制光学元件表面不同频段制造误差就显

得尤为重要.

目前国内外主要采用峰谷(Peak-Valley, PV)值和均方根(Root Mean Square, RMS)值两项参数作为提高光学元件加工技术误差收敛能力的评价指标.这两项参数是从光学元件制造误差的垂直量角度考虑如何提高元件的加工质量,而对于水平方向加工误差则无法表现出来,所以主要用于评价光学元件的低频面形误差^[6].美国劳伦斯·利夫摩尔国家实验室在“国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)”的研制过程中,提出一种描述波前信息的新方法——功率谱密度^[7].功率谱密度可以综合评价光学元件表面的垂直量和水平量,并体现两者之间的关系.本文结合光学加工中材料去除的卷积模型和功率谱密度函数,建立了

基金项目:国家自然科学基金(61378054)资助

第一作者:王佳(1987—),男,博士研究生,主要研究方向为先进光学制造技术. Email: wangj062778@qq.com

导师:范斌(1977—),男,研究员,博士,主要研究方向为先进光学制造与检测技术. Email: fanbin@ioe.ac.cn

收稿日期:2013-10-15;录用日期:2013-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

描述 CCOS 抛光工艺抑制不同频段误差能力的数学模型,为量化评价 CCOS 抛光工艺抑制不同频段误差的能力提供一种新方法^[8]。

1 理论基础

定义去除函数为 $\text{MRF}(x, y)$, 则归一化去除函数 $h(x, y)$ 的表达式为

$$h(x, y) = \text{MRF}(x, y) / \int_0^\infty \int_0^\infty \text{MRF}(x, y) dx dy \quad (1)$$

式中 x, y 表示光学元件表面的位置坐标, $h(x, y)$ 描述材料去除量的分布情况。

CCOS 光学加工中的材料去除是去除函数与驻留时间或面形误差的卷积,信号处理则是滤波器的滤波函数和信号的卷积,两者都是通过卷积运算实现对不同频率数据的过滤,所以去除函数在频域起滤波器的作用。定义光学元件抛光前的面形误差为 $s_{\text{bef}}(x, y)$, 抛光后的面形误差为 $s_{\text{aft}}(x, y)$, 则由材料去除的卷积模型可得光学元件抛光后的面形误差 $s_{\text{aft}}(x, y)$ 可表示为^[9-10]

$$s_{\text{aft}}(x, y) = s_{\text{bef}}(x, y) - h(x, y) \otimes s_{\text{bef}}(x, y) \quad (2)$$

对式(2)两端同时作傅里叶变换后得到

$$S_{\text{aft}}(f_x, f_y) = S_{\text{bef}}(f_x, f_y) - H(f_x, f_y) \cdot S_{\text{bef}}(f_x, f_y) \quad (3)$$

式(3)中 $S_{\text{aft}}(f_x, f_y)$ 、 $S_{\text{bef}}(f_x, f_y)$ 、 $H(f_x, f_y)$ 分别为 $s_{\text{aft}}(x, y)$ 、 $s_{\text{bef}}(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 的傅里叶变换。将式(3)的两端同时乘以自身的共轭得

$$S_{\text{aft}} S_{\text{aft}}^* = (1 - H)(1 - H)^* \cdot S_{\text{bef}} S_{\text{bef}}^* \quad (4)$$

根据功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)的定义,光学元件抛光前后面形误差的功率谱密度表示为^[11-13]

$$\text{PSD}_{\text{bef}} = S_{\text{bef}} S_{\text{bef}}^* \cdot l_x l_y \quad (5)$$

$$\text{PSD}_{\text{aft}} = S_{\text{aft}} S_{\text{aft}}^* \cdot l_x l_y \quad (6)$$

l_x, l_y 是采样间隔。将式(5)、(6)代入式(4)可得

$$\text{PSD}_{\text{aft}} = (1 - H)(1 - H)^* \cdot \text{PSD}_{\text{bef}} \quad (7)$$

根据复数运算法则,对式(7)两边取模运算得

$$\text{PSD}_{\text{aft}} = |1 - H|^2 \cdot \text{PSD}_{\text{bef}} \quad (8)$$

由于平滑谱函数(Smoothing Spectral Function, SSF) H 为归一化去除函数的傅里叶变换, $|H| < 1$, 求解式(8)得到平滑谱函数表达式为

$$H = 1 - \sqrt{\frac{\text{PSD}_{\text{aft}}}{\text{PSD}_{\text{bef}}}} \quad (9)$$

则平滑谱函数 H 将 CCOS 抛光工艺对不同频段误差的抑制能力表示为功率谱密度的归一化函数,可根据平滑谱函数值的大小来评价 CCOS 抛光工艺抑制不同频段误差能力的大小。

2 实验验证

利用 Rigid Conformal(RC) 抛光磨盘对口径 $\varphi = 620 \text{ mm}$ 经过传统研抛的平面微晶玻璃进行一次完整

的抛光。RC 抛光磨盘的参数和规格如表 1^[14]。面形检测设备为 24 英寸 Zygo 干涉仪,检测波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。干涉仪实际只能获得口径为 610 mm , 像素大于 450×450 的面形图。面形图的分辨率为 1.36 mm , 本文中 PSD 分析的面形误差的空间频率小于 0.4 mm^{-1} , 所以 24 英寸 Zygo 干涉仪获得的面形图的分辨率可以满足本文中 PSD 分析的要求。

表 1 RC 抛光磨盘的规格参数

Table 1 Specification of RC polishing tool

Tool diameter	110 mm
Thickness of base plate	4~8 mm
Non-Newton material	Silly-Putty
Thickness of Non-Newton material	10~15 mm
Material of diagram	Nylon fabric and plastic membrane
Thickness of pitch	2~5 mm

在进行抛光实验之前,微晶玻璃已经被抛光到一定的面形精度。如图 1,抛光实验前,微晶玻璃的面形误差为 $0.8753 \lambda \text{ PV}$ 和 $0.0690 \lambda \text{ RMS}$ 。利用 RC 磨盘对微晶玻璃进行一次完整的抛光,在抛光过程中保持工艺参数不变及去除函数的稳定。由于抛光实验是为了验证所提出的数学模型的正确性,所以没有刻意对微晶玻璃各频段面形误差进行精度提升,而是希望实验的结果能够充分反映不同频段面形误差在抛光过程中的产生与受抑制的情况。抛光完成后微晶玻璃的面形误差为 $0.5697 \lambda \text{ PV}$ 和 $0.0578 \lambda \text{ RMS}$, 如图 2。

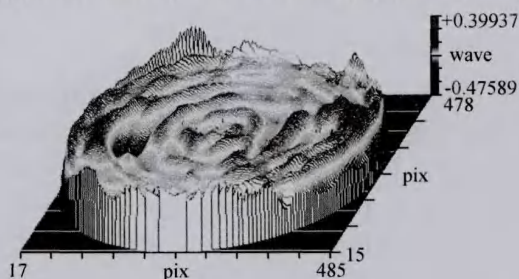


图 1 抛光实验前镜子的面形图

Fig. 1 Surface figure of mirror before polishing experiment

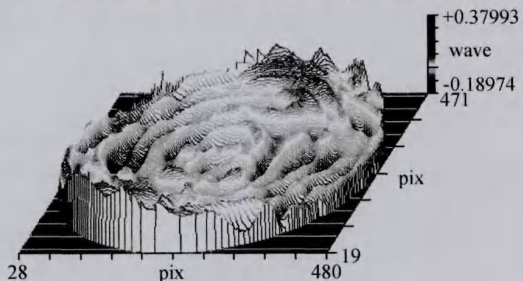


图 2 抛光实验后镜子的面形图

Fig. 2 Surface figure of mirror after polishing experiment

利用快速傅里叶变换计算微晶玻璃面形误差的功率谱密度函数曲线(PSD 曲线),如图 3,其中实线为抛

光实验前微晶玻璃面形误差的 PSD 曲线(标记为 PSD_0),虚线为抛光后微晶玻璃面形误差的 PSD 曲线(标记为 PSD_1). 便于分析,将图 3 中的频域范围分为 3 个频段,分别为小于 10^{-2} mm^{-1} 、 $10^{-2} \text{ mm}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 、大于 10^{-1} mm^{-1} . 从 PSD 曲线可以观察到,小于 10^{-2} mm^{-1} 的面形误差抑制效果较好, PSD_1 曲线比 PSD_0 曲线有所降低. $10^{-2} \text{ mm}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 的面形误差变差,在该频段范围某些频率处出现 $PSD_1 > PSD_0$ 的情况. 大于 10^{-1} mm^{-1} 的面形误差,抑制效果最好,抛光后的 PSD 曲线数值比抛光前大幅减小.

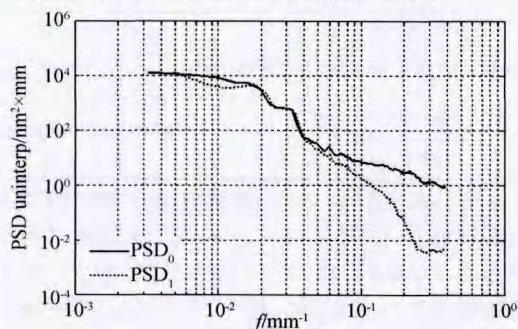


图 3 图 1、2 中面形图的功率谱密度曲线

Fig. 3 Power spectral density curves of surface in Fig. 1 and Fig. 2

为了更直观地显示抛光工艺对不同频段误差的抑制情况,基于平滑谱函数模型,计算平滑谱函数曲线. 式(9)可变为

$$H(f_m) = 1 - \sqrt{\frac{PSD_{aft}(f_m)}{PSD_{bef}(f_m)}} \quad (10)$$

利用图 3 中 PSD 曲线的计算结果,计算不同频率 f_m 处的平滑谱函数值,由此获得平滑谱函数曲线. 计算结果如图 4,可以看到平滑谱函数曲线将抛光工艺的误差抑制能力表示为一条归一化且无量纲的频谱曲线. 平滑谱函数曲线的数值越大表明误差抑制能力越强,正值表示对误差有抑制作用,负值表示会导致某种频率的误差.

从图 4 中可以观察到,小于 10^{-2} mm^{-1} 的误差得到一定的抑制,在该频段 H 大部分为正值,且在 $f_m =$

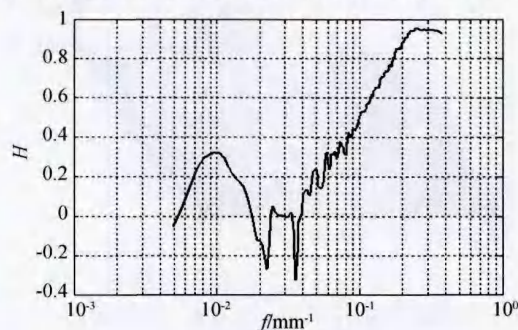


图 4 抛光工艺的平滑谱函数曲线

Fig. 4 Smoothing spectral function curve of polishing process

10^{-2} mm^{-1} 处具有正极大值; $10^{-2} \text{ mm}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 的误差变严重,在该频段大部分区域 $H < 0$,在 0.087 mm^{-1} 和 0.075 mm^{-1} 处有两个负极大值,表明在这两个频率处的面形误差遭到严重的破坏;大于 10^{-1} mm^{-1} 的误差抑制效果最好,在该频段 H 均为正值,且呈现出频率越高,面形误差得到抑制情况越好的趋势. 从整个平滑谱函数曲线来看,小于 10^{-2} mm^{-1} 的误差得到了一定的抑制,大于 10^{-1} mm^{-1} 误差被抑制的情况最好,而 $10^{-2} \text{ mm}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$ 的面形误差则遭到了严重的破坏. 由图 4 中平滑谱函数曲线分析得到的结果与 PSD 曲线分析得到的结果相符.

为了进一步验证平滑谱函数的正确性,利用微晶玻璃抛光前后的 36 项泽尼克多项式拟合面形图和残差图分析低频和中高频误差的抑制情况. 36 项泽尼克多项式拟合截止频率的下限约为 10^{-2} mm^{-1} ,所以其拟合面形图和残差图能以 10^{-2} mm^{-1} 为分界点将不同频段面形误差分离开来. 如图 5 和 6,微晶玻璃抛光前的 36 项泽尼克多项式拟合面形图的误差为 $0.737 \text{ 3}\lambda\text{PV}$ 和 $0.057 \text{ 3}\lambda\text{RMS}$,抛光后的拟合面形误差为 $0.313 \text{ 4}\lambda\text{PV}$ 和 $0.046 \text{ 6}\lambda\text{RMS}$. 可知抛光后微晶玻璃小于 10^{-2} mm^{-1} 的面形误差得到了一定的抑制.

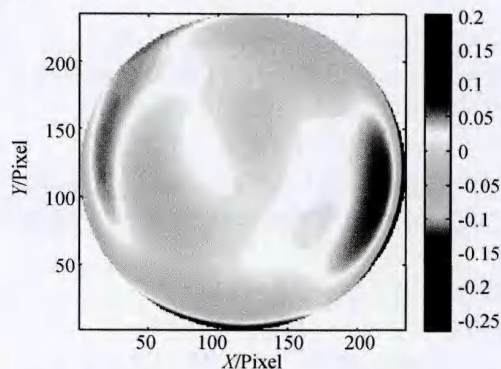


图 5 抛光实验前镜子的 36 项泽尼克多项式拟合面形图
Fig. 5 36 terms Zernike fit surface figure of mirror before polishing experiment

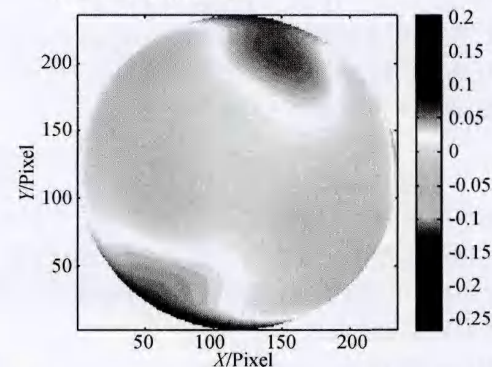


图 6 抛光实验后镜子的 36 项泽尼克多项式拟合面形图
Fig. 6 36 terms Zernike fit surface figure of mirror after polishing experiment

如图 7 和 8, 微晶玻璃抛光前的 36 项泽尼克多项式残差面形图的误差为 0.6467λ PV 和 0.0482λ RMS, 抛光后的残差面形误差为 0.3729λ PV 和 0.0367λ RMS, 可知抛光后微晶玻璃大于 10^{-2}mm^{-1} 的面形误差得到了一定的抑制, 抑制的效果主要体现在大于 10^{-1}mm^{-1} 的面形误差.

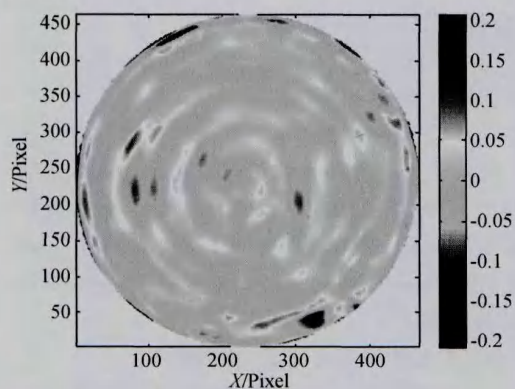


图 7 抛光实验前镜子的 36 项泽尼克多项式残差面形图
Fig. 7 36 terms Zernike Residual surface figure of mirror before polishing experiment

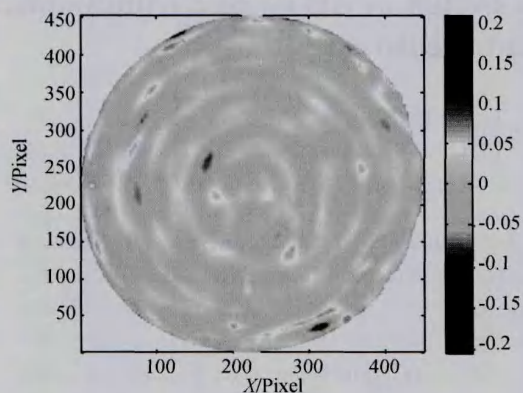


图 8 抛光实验后镜子的 36 项泽尼克多项式残差面形图
Fig. 8 36 terms Zernike Residual surface figure of mirror after polishing experiment

3 结论

提出了一种 CCOS 抛光工艺对不同频段误差抑制能力的评价方法, 并结合光学加工中材料去除的卷积模型和功率谱密度函数, 建立了该方法的数学模型——平滑谱函数. 利用 RC 磨盘进行了 CCOS 抛光实验, 并计算得到了抛光工艺的平滑谱函数曲线. 平滑谱函数曲线能将 CCOS 抛光工艺对不同频段的误差抑制能力表示为归一化且无量纲的频谱曲线. 其中正值

表示对误差有抑制作用, 负值表示产生了某种频率的误差. 平滑谱函数曲线显示的结果和 PSD 曲线、原始面形图及 36 项泽尼克多项式拟合面形图、残差图分析的结果相符.

参考文献

- [1] WAN Yong-jian, SHI Chun-yan, WU Fan. Research on middle and high spatial-frequency errors by discrete particles abrasion[C]. SPIE, 2010, 7655; 765511-765515.
- [2] HARVEY J E, THOMPSON A K. Scattering effects from residual optical fabrication errors[C]. SPIE, 1995, 2576; 155-174.
- [3] YOUNG WORTH R N, STONE B D. Simple estimates for the effects of mid-spatial-frequency surface errors on image quality[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(13): 2198-2209.
- [4] TAMKIN J M, MILSTER T D. Effects of structured mid-spatial frequency surface errors on image performance[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6522-6536.
- [5] TAMKIN J M, DALLAS W J, MILSTER T D. Theory of point-spread function artifacts due to structured mid-spatial frequency surface errors[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 4814-4824.
- [6] CHEN Wei. Analysis of impact factors on frequency distribution of optic surface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(5): 967-970.
陈伟. 光学元件表面频谱分布影响因素的分析方法[J]. *应用光学*, 2011, **32**(5): 967-970.
- [7] HULL T, M. RISO J, BARENTINE J M, et al. Mid-spatial frequency matters: examples of the control of the power spectral density and what that means to the performance of imaging systems[C]. SPIE, 2012, 8353; 835329-835329.
- [8] ZHOU Lin, DAI Yi-fan, XIE Xu-hui. Frequency domain analysis in computer controlled optical surfacing[J]. *Science China E*, 2009, **39**(3): 402-408.
周林, 戴一帆, 谢旭辉等. 计算机控制光学表面成形中的频域分析[J]. *中国科学 E 辑*, 2009, **39**(3): 402-408.
- [9] BURGE J H, ANDERSON BENJAMIN B S, CHO M K, et al. Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces[C]. SPIE, 2001, 4451; 153-164.
- [10] JONES R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(7): 1162-1169.
- [11] CHEN Wei, YAO Han-min, WU Fan, et al. Design of band-pass filters for the power spectral density analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 130-132.
陈伟, 姚汉明, 伍凡, 等. 波前功率谱密度 PSD 测量滤波器的设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 130-132.
- [12] ELSON J M, BENNETT J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(1): 201-208.
- [13] KIM D W, BURGE J H. Rigid conformal polishing tool using non-linear visco-elastic effect[J]. *Optical Express*, 2010, **18**(3): 2242-2257.