文章编号:1002-2082(2011)05-0967-04

光学元件表面频谱分布影响因素的分析方法

陈 伟

(西安科技大学 通信与信息工程学院,陕西 西安 710054)

摘 要:精密光学系统对光学元件的表面频谱误差的分布提出了控制要求,在加工中如何检测和控制光学元件表面的频谱分布成为一个新的问题。利用功率谱密度对频率的定量化描述功能,对检测数据进行样条插值,在同一极坐标系下计算功率谱密度,求取功率谱密度比值信息,分析小磨具技术的加工工具性能、形状及其运动方式对光学元件表面的频率分布影响。指出在加工中合理地改变加工参数可以快速有效地控制元件表面频谱的分布特征。在 670 mm 大口径非球面镜加工中做了验证。

关键词:光学检测;小磨具加工(CCOS);功率谱密度;空间频率

中图分类号: TN205 **文献标志码**: A

Analysis of impact factors on frequency distribution of optic surface

CHEN Wei

(Department of Communicaiton & Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The precision optical system has increasingly tighter tolerance demand on optics for applications in science and industry. The detection and control of the frequency distribution of optical surface is a problem. Power spectral density (PSD) was used as a measure to characterize the frequency information about optical surface. The wavefront phase measurement data were transformed to the data in the system of polar coordinates by cubic spline interpolation, and the PSD's ratio was calculated. The influence of the tool performance and its motion in computer controlled optical surfacing (CCOS) technique on the frequency distribution was analyzed. It was pointed out that the characteristics of frequency distribution could be efficiently controlled if the machining parameters were selected properly, which was validated by the manufacture process of a 670 mm diameter aspheric mirror.

Key words: optical detection; computer controlled optical surfacing; power spectral density; spatial frequency

引言

在精密光学系统中大口径非球面光学元件的中高频误差对能量集中度影响很大,因此对元件表面的频率进行评价和限制是非常必要的[1-3]。不同的加工工具和加工方法对镜面中高频误差的形成和收敛差别很大。研究加工工具及其运动方式对镜面表面的误差频率的影响可以为进一步完善大口径非球面镜面加工工艺提供理论基础。

目前主要的加工技术有:计算机控制小磨具加工技术、应力盘加工技术、磁流变抛光技术、离

收稿日期:2010-11-28; **修回日期**:2011-04-27

基金项目:陕西省教育厅专项基金(09JK566)

作者简介:陈伟(1972—),男,江苏洪泽人,博士,讲师,主要从事光电检测与光信息处理方面的研究工作。
E-mail: c. vikings@163. com

子束抛光技术、喷射抛光加工技术[4-5]。国内外研究大口径非球面加工技术主要集中在以 PV 值和 RMS 值两项指标为导向提高相应加工技术的误差收敛能力上。而在不同频率误差的形成原因和抑制不同频率误差对加工状态的要求两方面尚属空白。

波前功率谱密度是一种描述波前信息的新方法,它与以往各种表面评价参数相比最大的优点在于,功率谱密度可以综合评价表面起伏的垂直量和水平量,并体现两者间的关系。传统的光学评价指标如 PV 和 RMS 仅能从空域信息来评价光学元件的质量,而波前功率谱密度可以从频域信息来评价光学元件的质量,因此采用波前功率谱密度作为指标来评价采用小磨具加工后的光学元件的表面频率分布,进而分析小磨具技术的加工工具性能、形状及其运动方式对元件表面的频率分布的影响是可行的。

1　理论基础

波前功率谱密度基于傅里叶变换,可对波前进行频域分析,定量给出波前畸变的空间频率分布,为限定光学元件的中、高频差的指标提供依据,更真实地描述了高质量光学系统的传输行为,全面地反映系统对光学元件加工质量的要求。功率谱密度的基本计算推导在本文不予繁述[6-9]。

光学元件面形检测在不同的加工阶段选用不同的检测设备,主要有三坐标仪、哈特曼仪、相移干涉仪等,这些设备测试所得的波面相位数据均为一组离散的采样数据,在数据分析时要把它转化为极坐标下数据,保持曲面的连续光滑输出,文中选用了分段低次插值算法[10]。

2　频率分布的功率谱密度分析

功率谱密度具有定量化的频率描述功能,能提供丰富的波前误差频率信息。然而功率谱密度也存在缺陷,它仅仅是一种评价指标,不能为消除局域误差的修正加工提供确定性的指导。所以在采用 PSD 之余,研究新的评价方法以对加工进行确定性指导具有重要的意义。

采用功率谱密度分析小磨具技术的加工工具性能、形状及其运动方式对光学元件表面的频率分布的影响。将第一次测得的数据的功率谱密度记为 P_1,第二次的记为 P_2,依此类推,将第 N 次的记为 P_N,即

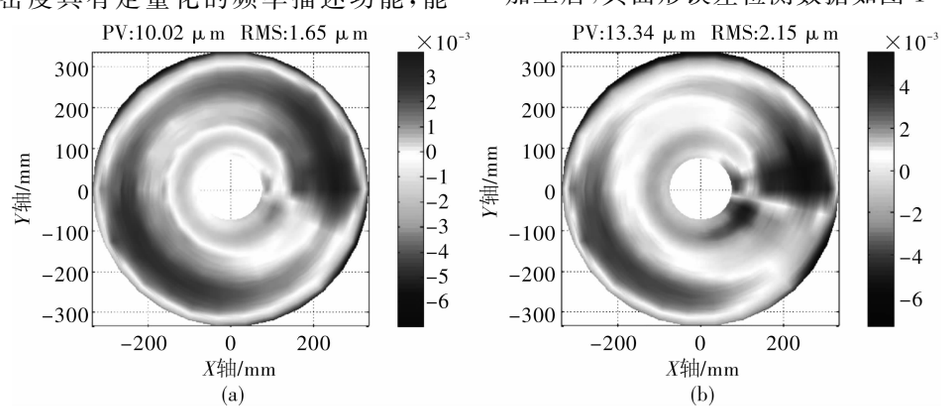
$$R_n = \frac{P_n}{P_1} \tag{1}$$

式中 $n=2,3,\cdots,N$。将每一次测得的数据的功率谱密度与第 1 次的数据相比,通过对相应的各频率点的频率信息强弱变化的分析,寻找它们同加工工具性能、形状及其运动方式的联系。

3　实验与分析

实验中利用 Leitz 三坐标仪对口径为 670 mm、材料为微晶光学玻璃的一块圆形光学元件的表面面形进行了测试,此时元件处于细磨加工阶段。对该光学元件采取的加工方式为:小磨具口径为 50 mm,材料为 H62,运动步进为 7 mm,偏摆为 6 mm,对于该光学元件,利用三坐标仪检测时,沿径向的采样长度为 250 mm,采样点数为 51 点。

图 1 所示为按时间顺序采用三次样条插值处理后得到的先后 6 次测量的光学元件的面形误差分布图,其中,第 1 次对光学元件检测的面形误差数据作为比较基准,采用相同的加工磨具及运动方式,磨具从工件中心向工件外缘匀速运动,做全口径平滑加工,对元件做了 4 次加工,其面形检测数据如图 1 中(b)～(e)所示,随后改变了运动方式,增加了磨具沿工件径向的短周期运动,对元件加工后,其面形误差检测数据如图 1 中(f)所示。



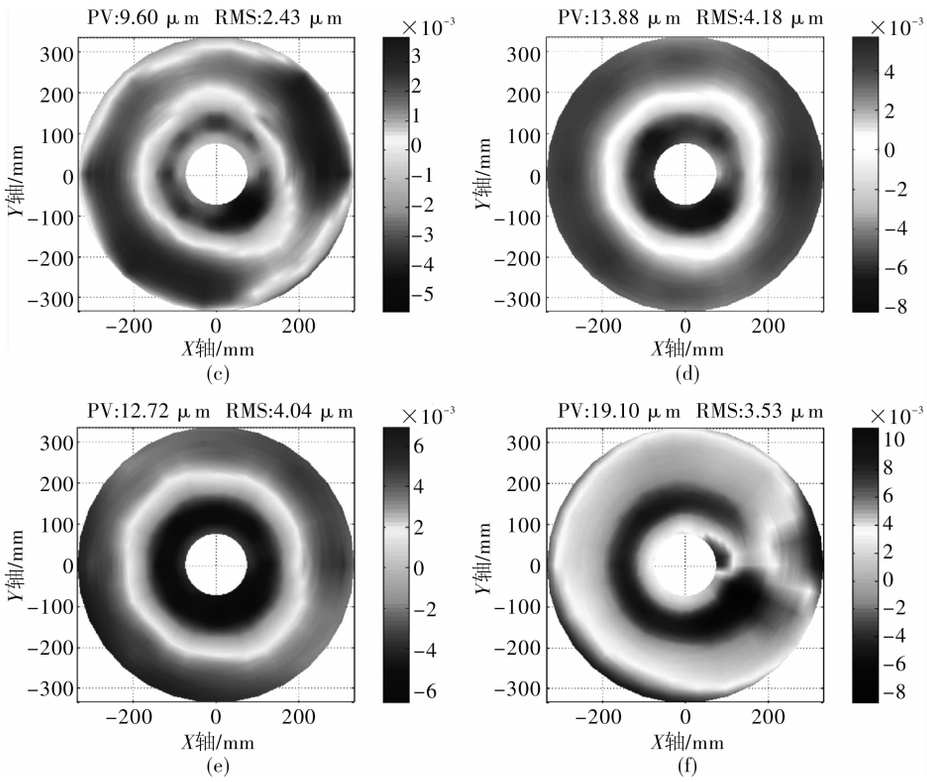


图 1　按时间顺序先后 6 次测量所得的光学元件的面形误差分布图

Fig. 1　Six error figures of the optical surfaces measured in time sequence

由于圆形光学元件具有旋转对称的特性,可以使用径向面形误差数据的平均值来代替整个元件的面形误差特征,依次计算各次检测所得面形数据一维平均功率谱密度,并按(1)式计算其功率谱密度的比值,所得数据如图 2 所示。

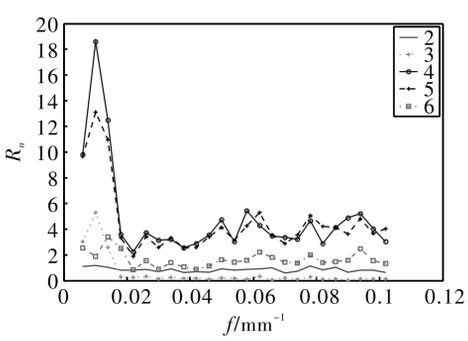


图 2　不同次检测数据的功率谱密度的比值

Fig. 2　PSD's ratio of detection data

由图 2 可知,由于第 2,3,4,5 次使用的是相同的加工磨具及运动方式沿径向全程运动加工元件,第 2 次各频率分量同第 1 次相比未出现明显特征,随着加工的进一步展开,0.01 mm^{-1} 处谱线明显增强,其他位置的谱线也基本呈上升的趋势,同时我们注意到第 4,5 次的数据与第 1 次的比值在各频率分量处均较为接近,表明此时继续采用同样的加工方式对光学元件表面频率分布的影响已经较为有限,如果需要对相应的频段做修改,则需要改变现有的加工模式。有效频率范围内 0.05 mm^{-1} 的位置频率成分的增加迅速,由此可见寻找加工工具和加工方法对镜面中高频误差的影响是有可能作出定量分析的。

第 6 次数据是为了修正光学元件面形,改变磨具运动方式,增加了磨具沿径向的短周期运动,短周期的运动应具有抑制低频、增加高频的作用,对元件加工后所得的功率谱密度比值,可以看到低频 0.01 mm^{-1} 处比值大幅降低,表明这种运动方式对低频分量起到了明显的抑制作用。

通过以上分析,可以从实验上定量地认为,加工中小磨具采用单一的加工模式加工光学元件时,数控机床会使小磨具相对被加工元件的运动轨迹基本不变,这样最终在元件表面形成一个较为固定的运动轨迹,在功率谱密度分析中表现为较为固定的频率误差信息,为了改变这种状况,在设计光学加工中的去除函数时,在保证垂直量的去除效果时,应适当考虑磨具水平方向的运动方

式的变更。

4 结论

本文在讨论小磨具加工与光学元件表面频率分布的关系的基础上,给出了利用 PSD 比值分析小磨具技术的加工工具性能、形状及其运动方式对光学元件表面的频率分布影响的研究方法,通过实验分析探讨了加工方式与频率分布的关系,为进一步完善大口径非球面镜面加工工艺提供理论基础。

参考文献:

[1] 杨力,姜文汉. 计算机控制抛光大口径高陡度非球面技术研究[J]. 光电工程,1999,26(1):9-15.
YANG Li, JIANG Wen-han. Technology research of polishing large aspheric controlled by computer[J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(1): 9-15. (in Chinese with an English abstract)

[2] 王权陡,余景池,张学军,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):73-79.
WANG Quan-dou, YU Jing-chi, ZHANG Xue-jun, et al. Polishing performance comparison of small polishing pad worked in different motion model in computer controlled optical polishing[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(5): 73-79. (in Chinese with an English abstract)

[3] 林娟. 大口径光学玻璃光学均匀性干涉绝对测量方法[J]. 应用光学,2008,29(1):120-123.
LIN Juan. Interference absolute measurement for homogeneity of large-aperture optical glass[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(1): 120-123. (in Chinese with an English abstract)

[4] 范斌,曾志革,李晓今,等. 大型非球面能动磨盘精磨技术[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):873-876.
FAN Bin, ZENG Zhi-ge, LI Xiao-jin, et al. Fine grinding technology of active lap for large aspherics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 873-876. (in Chinese with an English abstract)

[5] 王孝坤,郑立功,张斌智,等. 子孔径拼接检测大口径非球面技术的研究[J]. 应用光学,2009,30(2):273-278.
WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Bin-zhi, et al. Testing of large aspheric surfaces by sub-aperture sitching interferometry[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 273-278. (in Chinese with an English abstract)

[6] ELSON J M, BENNETT J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data[J]. Applied Optics, 1995, 34(1): 201-208.

[7] 周丽丹,粟敬钦,李平,等. 高功率固体激光装置光学元件"缺陷"分布的功率谱密度方法及等效求法[J]. 物理学报,2009,58(9):6279-6284.
ZHOU Li-dan, SU Jing-qin, LI Ping, et al. Power spectral density method of defects on optical elements of high-power laser facility and its equivalent algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 6279-6284. (in Chinese with an English abstract)

[8] ZHANG Rong-zhu, CAI Bang-wei, YANG Chun-lin, et al. Calculation of the power spectral density of the wavefront[J]. SPIE, 2000, 4231: 295-300.

[9] CHURCH E L. Fractal surface finish[J]. Applied Optics, 1988, 27(8): 1518-1526.

[10] 陈文略,王子羊. 三次样条插值在工程拟合中的应用[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2004,38(4):418-422.
CHEN Wen-lue, WANG Zi-yang. The application of cubic splines interpolation in the project fitting[J]. Journal of Central China Normal University: Natural Sciences, 2004, 38(4): 418-422. (in Chinese with an English abstract)