材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021091704

高陡度深型光学元件主动平滑技术研究

张 穗[1,2]，王 佳[1*]，王朝阳[1]，邓永红[1]，侯 溪[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： 提出一种针对高陡度非球面元件表面中频误差的主动平滑技术。通过构建离轴高陡度非球面平滑加工接触模型，获得加工过程中的不吻合度分布，设计主动平滑工具。采用有限元分析方法模拟主动平滑过程中磨盘材料、厚度及结构之间的关系，获得优选的主动平滑参数。实验结果验证了计算模型的准确性及主动平滑技术对于高陡度非球面元件的中频误差具有更好的平滑效果。

关键词： 非球面元件；主动平滑；中频误差；光学加工

中图分类号： TH161 **文章编号：** 1001－5868(2022)02－0358－05

Research on Active Smoothing Technology of High Gradient and Deep Optical Elements

ZHANG Sui[1,2], WANG Jia[1], WANG Zhaoyang[1], DENG Yonghong[1], HOU Xi[1]

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN)

Abstract: An active smoothing technology for the surface MSF error of high steepness aspheric elements was proposed. By constructing the off-axis machining contact model of aspheric element, the distribution of misalignment in the machining process was obtained, and the active deformation grinding disc was designed. The finite element analysis method was used to simulate the relationship between the material, thickness and structure of the grinding plate in the process of active smoothing, and the optimal active smoothing parameters were obtained. The experimental results verify that the accuracy of the calculation model and the active smoothing technology play a better smoothing effect on the MSF error of high steepness aspheric components.

Key words: aspheric element; active smoothing; mid-spatial frequency error; optical processing

0 引言

航天航空、天文观测、同步辐射、光通信、芯片制造等尖端领域对光学系统性能的要求逐渐提高，现代光学制造技术面临严峻挑战。现代光学系统对光学元件表面全频段误差分布提出了严格的要求。光学系统中广泛应用的高陡度非球面元件，经过计算机数控加工成形后表面残留的中频误差制约了光学系统性能的提升[1]，使系统中的光线发生小角度散射，成像产生耀斑，成像对比度降低，严重影响精密光学系统的光学性能[2-3]。

光学加工中通常采用平滑技术来去除元件表面的中频误差，传统被动平滑技术通过采用柔性层和刚性支撑层相结合的磨盘被动适应元件面形以平滑其表面的中频误差。然而在高陡度非球面元件的平滑加工技术中，平滑磨盘的刚性和柔性的平衡问题是一个难点。磨盘刚性过高会破坏元件面形，柔性过高则会使平滑能力下降[4-5]。传统被动平滑磨盘的结构如图1所示，该结构中的柔性层用于匹配适应光学元件的面形，刚性层用于提供平滑能力。高陡度非球面元件难以平滑的主要原因是传统磨盘与元件面形难以匹配，磨盘与元件之间的不吻合度过

收稿日期：2021－09－17.

*通信作者：王 佳 E-mail：wangj0622778@qq.com

大导致工件曲面一些地方无法充分加工[6]。

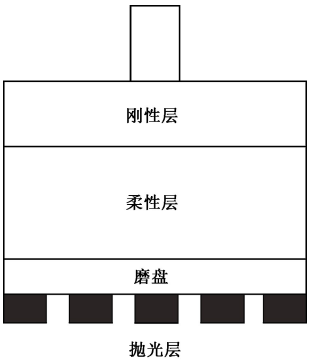


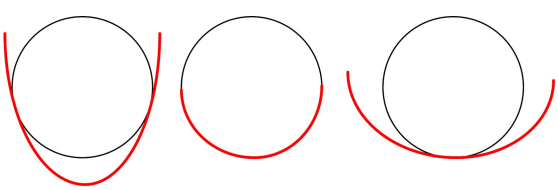
图 1　被动平滑磨盘结构

本文提出了一种主动平滑技术，通过主动改变磨盘的面形来适应元件的面形，补偿不吻合度，以平滑高陡度非球面元件表面的中频误差。依据磨盘在加工过程中与元件表面的接触情况，建立了磨盘与元件接触的不吻合度模型，设计主动平滑磨盘，并对磨盘结构进行有限元分析，最后进行了相应的平滑实验，验证了主动平滑技术具有更好的平滑效果，能够有效抑制非球面元件的中频误差。

1　不吻合度动态加工模型

非球面元件能提升光学系统的设计自由度、提高光学系统性能，因此在现代光学系统中地位重要[6]。高陡度非球面元件是一类非球面度大、相对口径大，且曲率变化剧烈的光学元件，许多重要的光学系统在设计中提出了对这类光学元件的需求。

图 2 所示为加工过程中磨盘与光学元件表面的接触情况。将磨盘加工元件的过程抽象为球体在曲线上运动模型。R 为磨盘曲率半径，r 为元件曲率半径。当磨盘在高陡度非球面元件表面加工时，共有三种接触状态：(1)当 $R<r$ 时，磨盘的边缘与元件表面相切，不吻合区域为磨盘底部到元件表面之间的间隙；(2)当 $R=r$ 时，磨盘能够完全适应元件面形，此时磨盘与元件的不吻合度为 0；(3)当 $R>r$ 时，磨盘底部与元件接触，不吻合区域为磨盘边缘到元件表面之间的间隙。



(a)　$R<r$　　(b)　$R=r$　　(c)　$R>r$

图 2　磨盘加工过程中与非球面元件接触情况

磨盘在动态加工过程中所覆盖的局部工作区域是偏心距为 e'，面积为 πR^2 的一块离轴子区域，磨盘在该环带上绕圆心旋转加工[7]，如图 3 所示。在加工过程中，加工接触状态动态变化。对于磨盘加工非球面元件时的不吻合度计算，需要将坐标系由初始坐标系 O-XYZ 变换到局部离轴位置处的坐标系 B-$X'Y'Z'$ 下进行[8]，如图 4 所示，则需要将非球面曲面的表达式从原坐标系下变换到新坐标系下再进行计算。

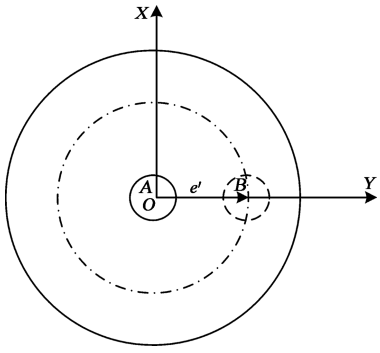


图 3　磨盘在元件上覆盖位置图

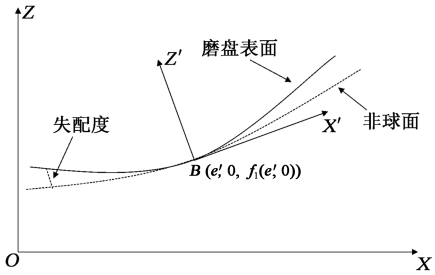


图 4　磨盘与元件不吻合度示意图

在 O-XYZ 坐标系下，非球面曲面的表达式为

$$F(x,y)=\frac{c(x^2+y^2)}{1+\sqrt{1-(1+K)c^2(x^2+y^2)}} \tag{1}$$

式中，$c=\frac{1}{R_0}$，为顶点曲率，R_0 为顶点曲率半径，K 为曲面圆锥系数。

将式(1)从 O-XYZ 坐标系变换到 B-$X'Y'Z'$ 坐标系下，该过程由一个坐标旋转、一个坐标平移变换得到。磨盘在局部区域加工时，其中心点坐标位置为 $(e',0,f_1(e',0))$，B-$X'Y'Z'$ 坐标系基于此坐标建立，其中 X' 轴与 X 轴的夹角 θ 为

$$\theta=\arctan\left.\frac{\partial f_1(x,y)}{\partial x}\right|_{(e',0)} \tag{2}$$

则其变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & e' \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & f_1(e',0) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

将矩阵结果代入，可得出新坐标系下的方程式为

$$Z = f_e(x,y) = \frac{[\alpha - \beta x - \sqrt{(\beta x - \alpha)^2 - \gamma(\delta + cy^2 + \varepsilon x + \epsilon x^2)}]}{\zeta} \tag{4}$$

式(4)表示非球面元件在加工位置处坐标系下的曲面表达式，其函数中各参数如下：

$$\begin{cases} \alpha = 2\cos\theta[1 - cf_1(e',0)(1+k)] + 2ce'\sin\theta \\ \beta = ck\sin 2\theta \\ \gamma = 4c(1 + k\cos^2\theta) \\ \delta = ce'^2 - 2f_1(e',0) + cf_1(e',0)^2(1+k) \\ \varepsilon = 2ce'\cos\theta - 2\sin\theta[1 - cf_1(e',0)(1+k)] \\ \epsilon = c(1 + k\sin^2\theta) \\ \zeta = 2c(1 + k\cos^2\theta) \end{cases} \tag{5}$$

可计算出加工时磨盘所需的变形量，即不吻合度为

$$\Delta = f_e(x,y) - f_{\text{lap}} \tag{6}$$

其中，f_{lap} 为磨盘初始面形函数表达式。

2 主动平滑磨盘设计与分析

2.1 平滑所需磨盘变形量的计算

选取一非球面元件实例，采用上述模型来计算相应的不吻合度分布及主动平滑加工所需参数。该元件的参数如表 1 所示。

表 1 元件参数

参数	值
R_0/mm	629.33
K	−33.1
D/mm	120

为了减少主动平滑加工所需变形量以提升变形响应速度，加工前首先需将磨盘初始面形设置为元件最接近球面形[9-10]，采用一维搜索法[11]搜索得出该非球面元件的最接近球半径 $R = 673.64$，以此作为磨盘的初始面形半径参数。根据元件参数，选取有效口径 $\varphi = 50$ mm 的磨盘在离轴位置 $e = 30$ mm 处计算其与非球面元件的加工不吻合度，从上述分析结果可知磨盘与元件在此处不吻合度即为所需变形量[12]，如图 5 所示。

根据分析结果可知磨盘所需面形应为离轴非球面，并且在该元件的加工中仅需产生单一方向形变[13-14]。根据该不吻合度设计主动平滑工具结构。针对该非球面元件，主动平滑加工时要求磨盘的最大变形量达到 0.302 85 mm。基于此变形量参数，对主动平滑磨盘进行设计及分析。

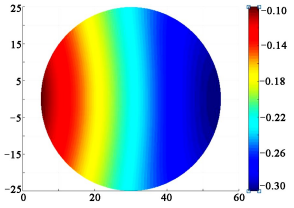


图 5 $e = 30$ mm 时磨盘所需变形量

2.2 基底材料对磨盘变形的影响

主动变形磨盘基底材料需具有一定的弹性，能够在外力的作用下产生形变。黄铜(H62)具有良好的力学性能，常温下塑性好，工程中常用于做受力零件。对磨盘基底采用 H62 材料进行力学有限元分析。当预设基底厚度为 1 mm 时，其变形量与施加力之间的关系如图 6 所示。

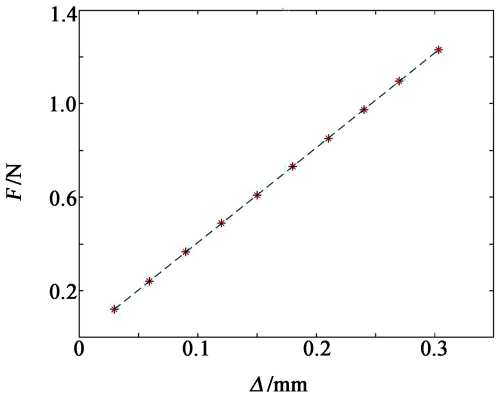


图 6 磨盘变形量-力关系图

由对磨盘的变形量和力的分析可得出，磨盘的变形量和施加在其表面上的力呈线性正相关。采用 H62 作为基底材料进行变形所需要的力较小，并且具有一定的塑性。因此，采用 H62 材料作为磨盘的底面。

2.3 厚度对磨盘变形的影响

磨盘的厚度会影响其变形能力、坚硬程度、尺寸和加工难度[15]。以 H62 作为磨盘材料，改变磨盘厚度，分析其变形所需力。根据磨盘厚度与力参数拟合出的曲线函数表达式为

$$p(x) = p_1x^5 + p_2x^4 + p_3x^3 + p_4x^2 + p_5x + p_6 \tag{9}$$

式中，p_1，p_2，…，p_6 为多项式系数。

根据式(6)，拟合出的材料厚度-力曲线函数为高次项函数，如图 7 所示，则在保证磨盘具有基本变形能力的前提下，减小磨盘厚度可以提升整体变形响应速度和精度。

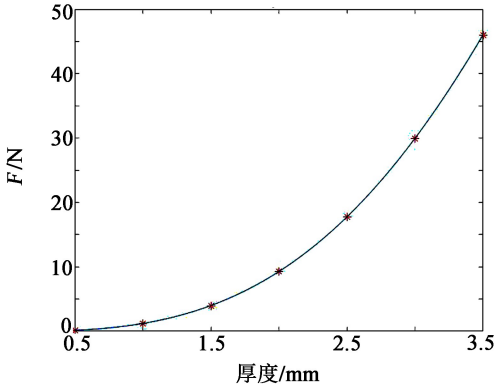


图 7　磨盘厚度-力曲线图

2.4　磨盘结构对底面面形的影响

如图 8 所示，主动平滑磨盘通过固定磨盘的中心位置，在磨盘的边缘等间距的位置处施加力以实现变形。受力点设置在边缘能够增大力矩，等间距施加力能够使磨盘均匀变形，基于以上思想以应力变形理论来控制磨盘面形变化。

在实际设计中，调整受力点数量及位置进行应力变形分析。对磨盘进行应变力有限元分析，探究其不同受力点情况下磨盘底面受力变形的分布以选取合适的结构。

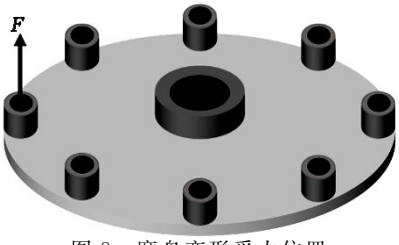


图 8　磨盘变形受力位置

如图 9 所示，当磨盘采用 8 个受力点驱动时，底面的形变接近圆形，即该结构产生的形变相对均匀，与元件面形贴合效果较好。

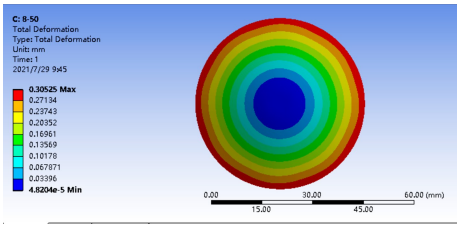
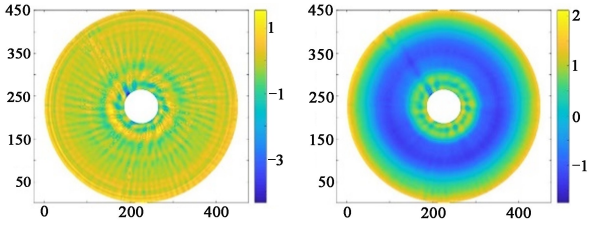


图 9　磨盘受力变形面形

3　实验验证

为了验证主动平滑技术对高陡度元件中频误差抑制的有效性，采用上述平滑技术参数设计了磨盘并进行了加工实验验证。选取了锥度 $\phi=25°$ 的高陡度非球面元件作为加工实例。该元件的中心曲率半径很小，边缘曲率半径很大。曲率变化十分剧烈，符合高陡度深型光学元件的特征，经过小磨头数控加工后表面残留大量中频误差，常规平滑方式难以适用于此类元件加工。

在对该元件采取主动平滑技术前后测得其面形数据如图 10 所示。



(a)　平滑前　　(b)　平滑后

图 10　平滑前后元件面形对比

从图 10 所示面形对比图可看出，计算机数控光学表面成型技术加工后的元件表面带有明显的中频误差，有较多的碎带刀痕。采用主动平滑技术加工后的面形上因为小磨头加工而产生的碎带刀痕被有效去除掉，面形更加平滑。并且根据面形数据所计算出的图 11 所示 PSD 曲线可以观察到空间频率介于 10^{-2}～10^{-1} mm^{-1} 之间的面形误差得到有效抑制，平滑后的 PSD 曲线更加平顺，无明显尖峰状频带误差。主动平滑技术对于高陡度非球面元件具有较好的平滑效果。

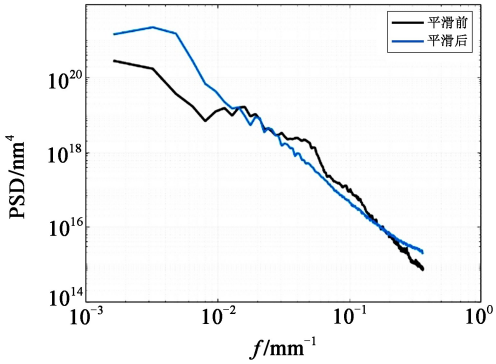


图 11　平滑前后元件 PSD 曲线对比

4　结论

本文提出主动平滑技术，并且根据主动平滑技

术加工非球面元件过程中所涉及的关键环节，建立了相关的接触模型。通过该模型可以计算出在非球面元件任意离轴位置处的不吻合度分布。并通过实际例子计算出加工中主动变形磨盘所需的变形量，设计了磨盘结构，对主动平滑进行有限元仿真，获取了主动平滑所需参数。通过对一非球面元件实例进行加工实验，验证了主动平滑盘的有效性，实现了高陡度非球面元件表面中频误差的有效抑制。

参考文献：

[1] Wan Y J, Shi C Y. Research on middle and high spatial-frequency errors by discrete particles abrasion[J]. Proc. SPIE, 2010, 7655: 163-170.

[2] Tony Hull, Riso M 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[J]. Proc. SPIE, 2012, 8353: 835329.

[3] Nakajima K, Owari T, Yoshiyuki. Low Thermal Expansion Substrate Material for EUVL Components Application[J]. Proc. SPIE, 2005, 5751: 146-157.

[4] 宋 驰. 采用非牛顿流体磨盘技术加工超大口径非球面的研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2017.
Song C. Fabrication of large aspherics using non-Newtonian fluid polishing tool[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.

[5] Kim D W, Park W H, An H K, et al. Parametric smoothing model for visco-elastic polishing tools[J]. Opt. Express, 2010, 18(21): 22515-22526.

[6] Burge B A J H, Benjamin S, Cho M, et al. Development of optimal grinding and polishing tools for aspheric surfaces[J]. Proc. SPIE, 2001, 4451: 153-164.

[7] 刘海涛，曾志革，万勇建，等. 高精度高次非球面最接近球面计算方法[J]. 强激光与粒子束，2011，23(12)：3188-3192.
Liu H T, Zeng Z G, Wan Y J, et al. High accuracy alogrithm for calculating best fitting sphere of high-order aspheric surface [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3188-3192.

[8] 刘海涛，曾志革，张 伟. 大口径离轴非球面加工中能动磨盘面形分析[J]. 光电工程，2011，38(9)：77-83.
Liu H T, Zeng Z G, Zhang W. Analysis of active lap's surface shape in fabricating large off-axis aspheric mirror[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 77-83.

[9] 刘惠兰，沙定国，郝 群，等. 一种高次光学非球面度的计算方法[J]. 光电工程，2004，31(6)：44-47.
Liu H L, Sha D G, Hao Q, et al. A method for calculating asphericity of high-order optical apheric surface[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(6): 44-47.

[10] 王权陡，余景池，张学军，等. 离轴非球面最接近球面半径及非球面度的求解[J]. 光电工程，2000，27(3)：16-19.
Wang Q D, Yu J C, Zhang X J, et al. Solution for best fitting spherical curvature radius and asphericity of off-axis aspherics [J]. Opto-Electronic Engin., 2000, 27(3): 16-19.

[11] 杜玉军，任海霞，刘中本. 光学非球面元件非球面度计算方法[J]. 应用光学，2002，23(5)：42-45.
Du Y J, Ren H X, Liu Z B. The method of calculation to asphericity of optical aspheric surface component[J]. J. of Appl. Optics, 2002, 23(5): 42-45.

[12] 韦资华，沈卫星. 一种新的光学非球面度计算方法[J]. 光子学报，2007，36(4)：730-732.
Wei Z H, Shen W X. A new method for calculating aspericity of optical aspheric surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36 (4): 730-732.

[13] 李龙响. 大口径非球面磁流变加工的关键技术研究[D]. 长春：长春光学精密机械与物理研究所，2016.
Li L X. Study on the key techniques of magnetorheological finishing for large aspheric optics[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2016.

[14] 程灏波，王英伟，冯之敬. 大偏离量非球面最接近球面的确定方法[J]. 清华大学学报（自然科学版），2004，44(8)：1040-1042，1046.
Cheng H B, Wang Y W, Feng Z J. Methods to determine best fit sphere for large off-axis aspheric lenses[J]. J. of Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.), 2004, 44(8): 1040-1042, 1046.

[15] 王 波. 单晶硅超光滑光学元件加工工艺及检测技术的研究[D]. 长春：长春理工大学，2006.
Wang B. The research of fabrication and testing technology of the monocrystalline silicon optical elements with super-smooth surfaces[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006.

作者简介：

张 穗(1997—)，男，广东省广州市人，硕士研究生，主要研究方向为大偏离量非球面元件中频误差主动平滑装备及技术、超高精度精密光学元件制造装备设计；

王 佳(1987—)，男，四川省彭州市人，博士，副研究员，主要从事超高精度非球面确定性加工工艺、装备研发及全频段误差加工分配、表征研究。