

小工具修正下抛光盘材料的去除特性

孙荣康¹, 王金栋^{1*}, 成聪¹, 廖德锋²

¹西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031;

²中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 环形抛光是大口径平面光学材料加工的首选方式,特别是在大口径平面光学元件的超精密加工中占有重要地位。抛光盘表面形状是影响元件面形精度的直接因素。为了研究小工具对抛光盘表面材料的去除特性,首先需要准确测得抛光盘的表面形状。采用激光位移传感器采集抛光盘表面螺旋样点的高度,针对实验检测误差进行分析并标定,最终计算得到抛光盘表面的实际形状。借鉴数控小工具抛光方法,建立小工具修正下抛光盘的材料去除模型,通过仿真计算得到了在小工具修正范围内抛光盘的材料去除函数,分析了抛光盘的材料去除特性。最后通过小工具修正实验验证了仿真结果的正确性,为抛光盘的形状修正提供理论依据。

关键词 光学制造; 环形抛光; 抛光盘形状检测; 小工具修正; 去除函数

中图分类号 TG580.692

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0403001

Material Removal Characteristics of Polishing Pad with Small-Tool Correction

Sun Rongkang¹, Wang Jindong^{1*}, Cheng Cong¹, Liao Defeng²

¹School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

²Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Continuous polishing is the preferred method for processing large-aperture planar optical materials, especially playing an important role in ultra-precision processing of optics. The surface accuracy of components is directly affected by the surface shape of the polishing pad. To study the removal characteristics of polishing-pad surface materials with small-tools, accurately measuring the surface shape of the polishing pad is necessary. In this paper, the height of spiral sample points on the surface of a polishing pad is collected by laser displacement sensor, and the experimental detection errors are analyzed and calibrated. Subsequently, the actual shape of the polishing pad surface is calculated. Using a computer controlled polishing method for reference, the material-removal model of the polishing pad with tool correction is established, the material removal function of the pad in the correction range of the small-tool is simulated and calculated, and the material-removal characteristics of the polishing pad are analyzed. Finally, the correctness of the simulation results is verified with a small-tool correction experiment, which provides a theoretical basis for shape modification of the polishing pad.

Key words optical fabrication; continuous polishing; detection of pad shape; correction with a small-tool; removal function

OCIS codes 220.5450; 220.4610; 240.5450

1 引言

具有低表面粗糙度以及高完整性和平面精度的光学元件,如磷酸盐激光钎玻璃、KDP 晶体和 BK7 玻璃,已成为能源和天文行业赖以发展的关键部

件^[1]。环形抛光可以将光学元件加工至较高的面形精度,有效抑制元件在加工过程中的中低频误差,是大口径超精密平面光学元件加工的首选方式^[2-3]。

目前,国内外针对环形抛光开展了广泛而深入的研究:Hoon^[4]采用接触式传感器实时检测了抛光

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-10-22; 录用日期: 2019-11-14

基金项目: 科学挑战专题-光学材料元件极端制造基础研究项目(JCKY2016212A506-0501)、精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1904)

* E-mail: wangjindong@swjtu.edu.cn

盘的表面形状,这种传感器具有测量方便快捷的特点,但这种接触式检测方法并不适合沥青盘的检测,因为沥青属偏软材料,接触作用会使沥青盘面发生较大形变,进而产生较大的测量误差;王哲等^[5]设计研制了蜡盘平面度测量专用装置,该装置具有快速准确的特点,测量精度可达 $2\ \mu\text{m}$,但其测量范围有限,难以完整地表征抛光盘的表面形状;Vasilev等^[6]采用专用检测设备对抛光盘的表面形状进行了检测,该设备具有测量便捷、准确的特点,但其成本较高,且检测范围较小。在抛光盘表面形状的修正方面,Nguyen等^[7]研究了修整器相关参数对抛光盘轮廓磨损的影响,并设计出了新的修整器,新修整器修正下的抛光盘具有更高的平面度;Chang等^[8]研究了修整过程中抛光盘磨损的数学模型,分析了各修整参数对抛光盘表面形状的影响;Shan等^[9]采用模拟的方法分析了修正盘相关参数对抛光盘形状的影响;尹进等^[10]则证明了抛光盘在某一平衡状态下,无需校正便能获得高精度平面工件;曹冲等^[11]计算模拟了工件-抛光盘的转速比、偏心距等对元件磨削量的影响。在计算机数控抛光(CCP)方面,张健等^[12]使用自主研发的双柔性自适应抛光磨头,实现了非球面中频误差的有效抑制;戴一帆等^[13]研究了计算机数控抛光中磨盘材料对材料去除函数的影响,从而对材料的去除模型进行了完善。此外,还有一些研究涉及了新的抛光盘修正工具,如:Lee等^[14]研究了悬臂型修整器对抛光盘表面材料的磨损情况,廖德锋等^[15-16]借鉴数控小工具抛光方法提出了小工具修正方法。通过上述分析可以看出:国内外学者在抛光盘形状检测及修正方面开展了较为广泛的研究,为进一步提升光学元件的加工精度奠定了基础,但仍存在一些问题,如,对于大型抛光盘形状的检测,缺乏一种快速、准确的通用检测方法;国内外学者对修正工具及抛光盘去除函数等均有研究,但缺乏对小工具修正方法的研究。

针对上述问题,本文针对抛光盘表面形状的检测及其材料去除特性进行了研究。根据抛光盘的材料特性,本文提出了一种基于激光位移传感器采集螺旋样点生成抛光盘表面形状的检测方法,并对该方法的测量误差进行分析与标定,以进一步提升该方法的检测精度。根据基于小工具的抛光盘表面形状修正方法,建立了小工具修正下抛光盘材料的去除函数模型,对小工具修正区域内抛光盘材料去除速率的分布进行仿真,最后通过小工具修正实验验证了仿真结果的正确性。

2 抛光盘表面形状检测

在环形抛光中,整个抛光系统主要由修正盘、元件盘、抛光盘、支架及其他辅件构成,如图1所示。抛光盘由表面覆盖一层沥青的金属板或大理石板制成,其环带宽度大于元件的尺寸。修正盘材料通常为优质花岗岩,其直径略宽于抛光盘的沥青环带宽度;元件置于元件盘的工位上,由元件盘带动其移动和转动。进行抛光加工时,三盘分别自转,同时要向抛光盘表面供给抛光液。抛光盘能够去除元件材料,塑造元件面形,而修正盘则修整抛光盘,使抛光盘表面趋于平整。其中,抛光盘的转速略大于元件盘和修正盘的转速。

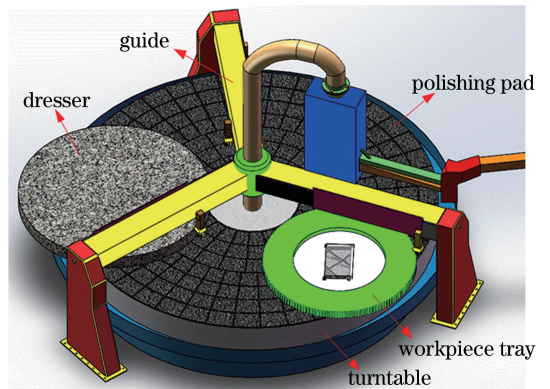


图1 环形抛光示意图

Fig. 1 Schematic of continuous polishing

沥青抛光盘通常由一定比例的沥青和松香混合制成,其表面通常开有一定形状的沟槽,沟槽一般由内侧贯穿至外侧,其宽度、深度依据实际盘面大小而定。抛光盘自身的材料特性及物理形貌等因素,给抛光盘表面的高精度检测带来了一定困难。

综合考虑抛光机的实际工况条件,以激光位移传感器为主要检测工具对抛光盘的表面形状进行检测。抛光盘表面由无数个点组成,考虑到测量效率,实际上仅能对有限采样点进行检测,因此如何规划合理的抛光盘面采样点尤为重要。考虑到抛光机的运动方式,抛光盘面采样点的分布方式可为螺旋分布、圈层分布和径向线性分布,如图2所示。螺旋分布的采样方式操作简单,采样点全面,能够完整地表征抛光盘的表面形状。圈层分布的采样方式操作繁琐,测量效率较低。径向线性分布的采样方式操作简便,但仅通过几条径向线难以全面表征抛光盘的全部表面形状。综合考虑抛光盘表面形状检测的完整性及测量效率,本文采用螺旋分布的采样方式对抛光盘面进行采样,采样时间间隔为 $0.1\ \text{s}$,实验检

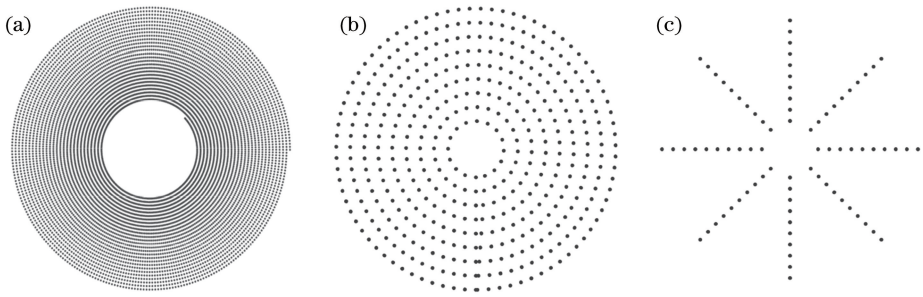


图 2 抛光盘表面采样点的分布方式。(a)螺旋分布;(b)圈层分布;(c)径向线性分布

Fig. 2 Distribution of sampling points on polishing pad surface.

(a) Spiral distribution; (b) circle distribution; (c) radial linear distribution

测时间约为 1 h,总采样点为 32500 个,样点间的最大间距为 10 mm。

本文对激光位移传感器采集的抛光盘表面螺旋分布样点进行高度插值生成抛光盘表面形状。分析后可知,抛光盘导轨直线度误差、旋转轴倾斜度误差等对抛光盘表面形状检测结果的影响较大^[17]。为进一步提高该方法的测量精度,本文对此类误差进行检测。

2.1 抛光盘导轨直线度误差的检测

导轨直线度标定以水平面为基准,如图 3 所示。经过多次重复实验,得到了抛光盘导轨的直线度检测结果,如图 4 所示,可以看出,多次测量得到的曲线基本一致,偏差较小。

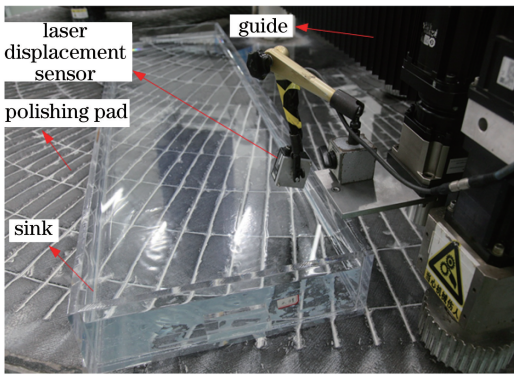


图 3 导轨直线度检测

Fig. 3 Straightness detection of guide

2.2 抛光机旋转轴倾斜度误差的检测

旋转轴倾斜度采用电子水平仪检测,如图 5 所示。数显式电子水平仪能精确测量所在位置的绝对倾斜度,其测量精度为 0.001 mm/m。将电子水平仪置于抛光盘上靠近外端的位置,分别记录电子水平仪旋转至导轨正下方时的读数 S_2 ,及旋转至导轨正对侧时的读数 S_1 ,则抛光盘旋转轴相对于导轨平面的倾斜度为

$$\alpha = \frac{S_1 - S_2}{2} \quad (1)$$

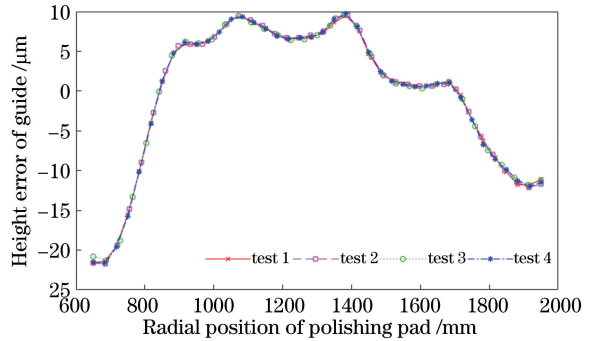


图 4 导轨直线度检测结果

Fig. 4 Test results of straightness of guide

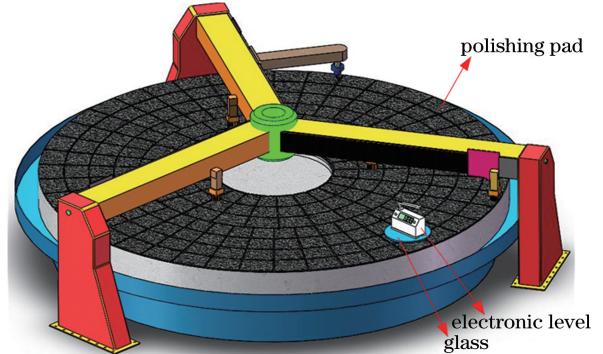


图 5 抛光盘旋转轴倾斜度检测示意图

Fig. 5 Schematic for tilt detection of rotating axis of polishing pad

根据多次实验测量数据,可求出抛光盘旋转轴相对于导轨垂面的倾斜度,如表 1 所示,进而可以计算出抛光盘旋转轴相对于实验导轨截面的倾斜度 α 为 98.75×10^{-3} mm/m。

2.3 抛光盘表面形状检测实验

采用基恩士 LK-H020 型激光位移传感器对抛光盘的表面形状进行检测,如图 6 所示。使用 MATLAB 软件对实验测量结果进行处理,得到抛光盘表面的三维色谱图,从而得到抛光盘表面形状的实际检测结果。图 7(a)~(c)给出了相同工况下的三次重复检测结果。

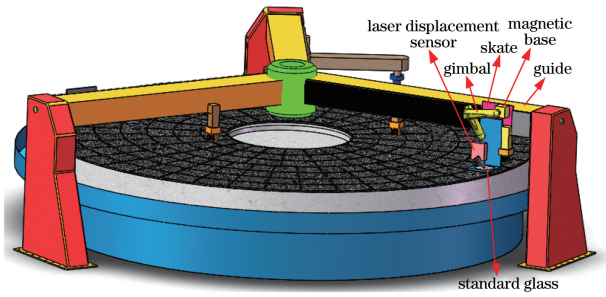


图 6 抛光盘表面形状检测示意图

Fig. 6 Schematic of polishing pad surface shape detection

表 1 抛光盘旋转轴倾斜度的检测结果

Table 1 Detection results of inclination of pad rotation axis

$10^{-3} \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1}$		
No.	S_1	S_2
1	706	506
2	704	503
3	699	504
4	694	500
Average value	700.8	503.3
α	98.75	

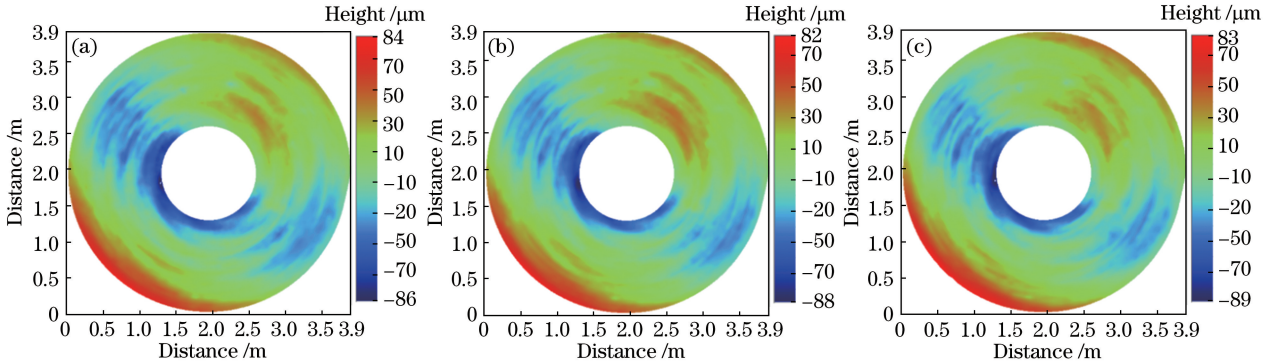


图 7 同条件下抛光盘实际表面形状的三次检测结果

Fig. 7 Three detected actual surface shapes of polishing pad under the same conditions

实验结果显示,抛光盘表面呈现外高内低的凹面形,其表面峰谷值(PV 值)约为 $170 \mu\text{m}$ 。相同工况下的重复实验结果表明,测得的 PV 偏差较小,且具有良好的 consistency。

3 小工具去除特性

抛光盘是全口径抛光加工中极为重要的部件。借鉴数控小工具抛光的方法,本文采用小工具对抛光盘进行修正。其中,小工具结构如图 8 所示。小工具是一种偏心转动机构,包括小磨头和传动轴。修正时,主轴旋转带动磨头公转并对抛光盘材料产生去除作用。

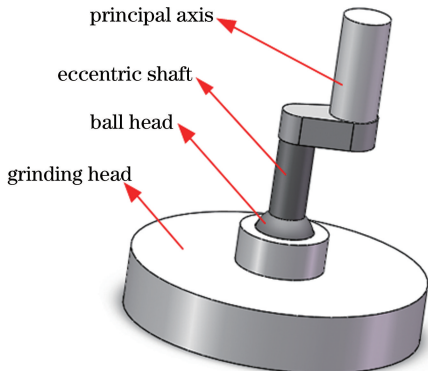


图 8 小工具结构示意图

Fig. 8 Structure sketch of small-tool

在宏观层面上,材料的去除量一直用广泛使用的普雷斯顿方程描述^[18],即

$$\frac{dh}{dt} = k\sigma_0\nu_r, \quad (2)$$

式中: $\frac{dh}{dt}$ 为材料的平均去除厚度; σ_0 为材料中的应力; ν_r 为抛光盘与修正盘的平均相对速度; k 为普雷斯顿常数,用于宏观地描述分子级的作用。去除速率随着压力和速度线性增加。

根据普雷斯顿材料去除理论,将抛光盘对光学元件的去除应用到小工具对抛光盘的材料去除中。在小工具修正中,抛光盘材料的去除速率取决于抛光盘相对于小工具的速度。由于抛光过程中小工具的去除范围有限,故抛光盘表面材料的去除量由抛光盘相对于小工具的速度和修正时间决定。因此,需要对抛光盘相对于小工具的速度和修正时间进行分析。

抛光盘在小工具修正过程中自转,同时,小工具在伺服电机的带动下作公转运动。小工具与抛光盘的相互运动关系如图 9 所示,其中, O_1 为抛光盘表面的中心, O_2 为小工具公转中心,抛光盘的旋转速率为 ω_1 ,工具的公转速率为 ω_3 ,小工具公转中心与抛光盘中心的距离为 l ,小工具半径为 r_3 ,偏心距为 d ,因此小工具修正区域即小工具去除函数覆盖范

围为 $(l-d-r_3, l+d+r_3)$ 。

设去除函数覆盖范围内任意一点 $Q(x, y)$ 与抛光盘中心、小工具公转中心的距离分别为 a_1, a_2 ，与水平轴的夹角为 φ (夹角的最大值为 φ_0)。与 Q 点对应的抛光盘上点的速率为 v_3 ，小工具上对应点的速率为 v_4 ，且速度矢量 v_3 与 v_4 之间的夹角为 β ，其余参量如图9所示。

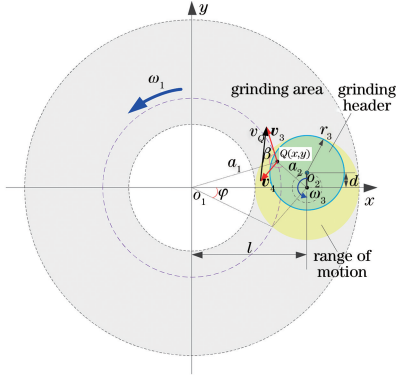


图9 小工具相对运动分析

Fig. 9 Relative motion analysis of small-tool

其中，

$$a_1 = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

$$a_2 = \sqrt{(l-x)^2 + y^2}, \quad (4)$$

$$v_3 = \omega_1 a_1, \quad (5)$$

$$v_4 = \omega_3 a_2. \quad (6)$$

由图9中的角度关系可知

$$\beta = \angle O_1 Q O_2, \quad (7)$$

故由余弦定理可知

$$\cos \beta = \frac{a_1^2 + a_2^2 - l^2}{2a_1 a_2}. \quad (8)$$

在速度的矢量三角形中， Q 点小工具相对于修正盘的速率为 v_Q ，则

$$\cos \beta = \frac{v_3^2 + v_4^2 - v_Q^2}{2v_3 v_4}, \quad (9)$$

故可计算出

$$v_Q = \sqrt{(\omega_1 - \omega_3)(\omega_1 a_1^2 - \omega_3 a_2^2) + \omega_1 \omega_3 l^2}. \quad (10)$$

v_Q 的大小与抛光盘和小工具的公转速率及小工具公转中心位置有关。

在小工具修正过程中，若 $\omega_3 = p\omega_1$ ($p=1, 2, 3, \dots$)，抛光盘上的点与小工具的固定位置重合，则抛光盘上部分区域易发生“零去除”现象。当 p 值较小时，修正效率低下。故一般修正时，小工具转速设为抛光盘转速的5倍以上。抛光盘上的任意一点 Q 处于抛光盘的某一圆弧上，此圆弧上各点的去除速

率不同，当小工具转速与抛光盘转速不成比例时， Q 点每次经过修正区域时的去除速率都不同，在足够长的时间下， Q 点必定会受到修正区域内该圆弧上每一点的材料去除作用。因此，对于抛光盘上任意半径 r 处的点，其材料去除量为修正区域内 $[-\varphi_0, \varphi_0]$ 所有圆弧上点的去除速率的积分。

在修正区域内，设沿抛光盘径向的材料去除量为 g_r ，则任意半径 r 上的材料去除量都可表示为

$$g_r = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} k\sigma v_\varphi d\varphi \quad (11)$$

式中： φ_0 为图9中 φ 可取的最大值，且

$$\varphi_0 = \arccos \frac{r^2 + l^2 - (r_3 + d)^2}{2rl}. \quad (12)$$

由图9可知

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{cases}, \quad (13)$$

将(3)、(4)、(13)式代入(10)式，可得

$$v_\varphi = \{(\omega_1 - \omega_3) \times [\omega_1 r^2 - \omega_3(r^2 + l^2 - 2rl \cos \varphi)] + \omega_1 \omega_3 l^2\}^{1/2}, \quad (14)$$

式中： σ 为修正区域内抛光盘上各点的应力，这些点的应力处处相等。将(14)代入(11)式可得小工具修正下的材料去除模型为

$$g(r) = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} k\sigma \{(\omega_1 - \omega_3) \times [\omega_1 r^2 - \omega_3(r^2 + l^2 - 2rl \cos \varphi)] + \omega_1 \omega_3 l^2\}^{1/2} d\varphi, \quad (15)$$

其中， $l-r_3-d < r < l+r_3+d$ 。

函数 $g(r)$ 即为沿抛光径向各位置的材料理论去除量，其大小与抛光盘转速、修正盘转速等相关，且修正小工具处于不同径向位置时，去除量的分布规律不同。

根据小工具去除函数进行计算，设定小工具公转轴与抛光盘面中心的距离 $l=1300$ mm，小工具半径 $r_3=100$ mm，偏心距 $d=20$ mm，抛光盘旋转速率 $\omega_1=0.3$ r/min，小工具公转速率 $\omega_3=2$ r/min。采用MATLAB计算小工具的去除函数。由于普雷斯顿常数未确定，无法得到准确的材料去除量，因此，对去除函数中的已知参量运算结果进行归一化处理，计算结果如图10所示。

图10表示沿抛光盘径向的材料相对去除量分布，可知，在小工具修正区域内的抛光盘材料去除分布得并不均匀，呈先增大后减小的趋势，且靠近抛光盘内侧的材料去除量急剧增大，而靠外侧的材料去

除量减小得相对缓慢。沿径向的材料去除量最大的点位于修正区域中心附近且略靠近内侧,在一定区域内,材料相对去除量的大小由该点的相对速度和去除时间决定,这与设想结果一致。

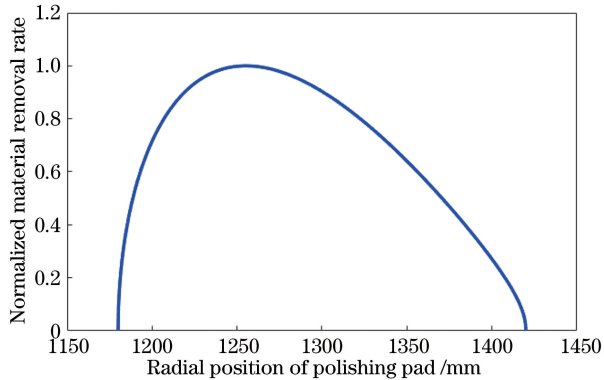


图 10 小工具修正的仿真结果

Fig. 10 Simulation result of small-tool correction

4 实验结果及分析

为了验证上述小工具修正的材料去除函数及仿真分析结果的正确性,设计相应的小工具修正实验。采用本文前面所提方法对抛光盘修正前后的表面形状进行检测,通过计算修正前后修正区域的形状误差来表征抛光盘的材料去除量。

图 11 给出了小工具修正前后抛光盘的盘面在 [1180 mm, 1420 mm] 范围内的轮廓变化。抛光前,该区域内的抛光盘表面有略微凸起,凸起呈先升高后缓慢降低至平衡的趋势;小工具修正后,抛光盘表面高度明显降低,呈现左侧平缓而右侧逐渐变高的趋势。相对而言,抛光盘表面材料的去除量先增大后减小,且去除量最大的位置更靠近环带内侧。

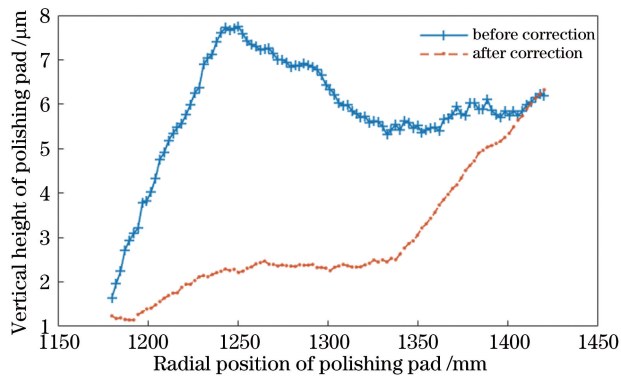


图 11 修正前后抛光盘径向轮廓的对比

Fig. 11 Radial profile comparison of polishing pad before and after correction

结合小工具修正前后抛光盘修正区域的轮廓计算其高度差值,该值即为抛光盘表面材料的相对去

除量。将相对去除量进行归一化,并与理论仿真结果进行对比,结果如图 12 所示。

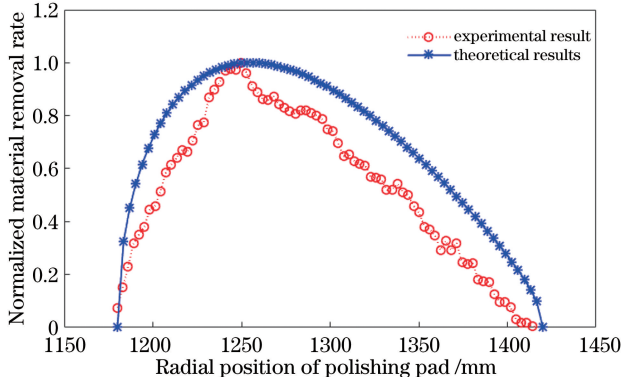


图 12 理论结果与实验结果的对比

Fig. 12 Comparison between theoretical and experimental results

由图 12 可以看出,在径向各位置上抛光盘去除量与最大去除量的比值小于理论比值,但变化趋势一致,最大去除量对应的径向位置也十分接近;实验结果与理论仿真结果之间的偏差较为稳定,如在抛光盘径向 1250 mm 外侧,相对去除量偏差约为 0.2。理论与实验的差异可能是由实验检测误差、普雷斯顿系数畸变、小工具因摩擦力而自转等因素引起的。从整体结果来看,实验结果与理论仿真结果较为吻合,说明小工具去除函数模型较为准确。

5 结 论

本文提出了基于激光位移传感器采集抛光盘表面螺旋样点高度并生成抛光盘表面形状的方法,并对该方法的误差进行了分析与标定,以进一步提升抛光盘表面形状的检测精度。

借鉴数控小工具抛光方法,建立了小工具修正下的抛光盘材料去除函数模型,通过仿真计算得到了小工具修正下抛光盘材料去除速率的分布,并通过实验对仿真结果的正确性进行了验证。

小工具修正下的抛光盘材料去除速率分布不均匀,会使抛光盘材料的去除量出现一定差异。通过控制小工具的驻留时间,可以控制抛光盘上不同径向位置处的去除量。因此,针对不同抛光盘的实际表面形状,计算小工具的驻留时间函数,从而提高抛光盘的形状精度是未来的工作重点。

参 考 文 献

[1] Cheng H B, Feng Z J, Cheng K, et al. Design of a six-axis high precision machine tool and its application in machining aspherical optical mirrors

- [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(9): 1085-1094.
- [2] Davis J A, Cottrell D M, Lilly R A, et al. Multiplexed phase-encoded lenses written on spatial light modulators[J]. Optics Letters, 1989, 14(9): 420-422.
- [3] Chen J. Research on real-time surface monitoring of polishing pad in continuous polishing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
陈军. 环抛中抛光胶盘面形在线监控技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [4] Hoon D M. Configuring of lapping and polishing machines: US8123593[P/OL]. 2012-02-28[2019-09-15]. <https://patents.glgoo.top/patent/US8123593B2/en>.
- [5] Wang Z, Xu X K, Shao J D, et al. Flatness measurement of pitch lap for large continuous polisher[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 3048-3053.
王哲, 徐学科, 邵建达, 等. 大型环抛机蜡盘平面度的测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3048-3053.
- [6] Vasilev B, Bott S, Rzehak R, et al. A method for characterizing the pad surface texture and modeling its impact on the planarization in CMP [J]. Microelectronic Engineering, 2013, 104: 48-57.
- [7] Nguyen N Y, Zhong Z W, Tian Y B. Analysis and improvement of the pad wear profile in fixed abrasive polishing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85: 1159-1165.
- [8] Chang O, Kim H, Park K, et al. Mathematical modeling of CMP conditioning process [J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84(4): 577-583.
- [9] Shan H Y, Xu X K, He H B, et al. The figure simulation of the polishing pad in the continuous polishing process [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9238: 92380G.
- [10] Yin J, Zhu J Q, Jiao X, et al. Method of steady-state deterministic polishing based on continuous polishing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1102001.
尹进, 朱健强, 焦翔, 等. 基于环形抛光的稳态确定性抛光方法[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1102001.
- [11] Cao C, Feng G Y, Yang L M, et al. Calculation and simulation for the factors affecting relative grinding removal in ultra-precision continuous polishing [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(4): 67-71.
曹冲, 冯国英, 杨李茗, 等. 影响超精密环抛相对磨削量因素的计算模拟[J]. 光电工程, 2004, 31(4): 67-71.
- [12] Zhang J, Dai L, Wang F, et al. Restraint of mid-spatial-frequency error aspheric surface by small-tool adaptive polishing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822002.
张健, 代雷, 王飞, 等. 小磨头自适应抛光抑制高精度非球面中频误差[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822002.
- [13] Dai Y F, Shang W J, Zhou X S. Effect of the material of a small tool to the removal function in computer control optical polishing [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2006, 28(2): 97-101.
戴一帆, 尚文锦, 周旭升. 计算机控制小工具抛光技术中磨盘材料对去除函数的影响[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(2): 97-101.
- [14] Lee H, Lee S. Investigation of pad wear in CMP with swing-arm conditioning and uniformity of material removal[J]. Precision Engineering, 2017, 49: 85-91.
- [15] Liao D, Zhang Q, Xie R, et al. Deterministic measurement and correction of the pad shape in full-aperture polishing processes [J]. Journal of the European Optical Society: Rapid Publications, 2015, 10: 15049.
- [16] Liao D F, Zhang Q H, Zhao S J, et al. Correction method and device of surface shape of polishing pad in full-aperture polishing: 201410456502.5 [P]. 2014-12-10.
廖德锋, 张清华, 赵世杰, 等. 全口径抛光中抛光盘表面形状的修正方法及装置: 201410456502.5 [P]. 2014-12-10.
- [17] Liao D F, Xie R Q, Sun R K, et al. Improvement of the surface shape error of the pitch lap to a deterministic continuous polishing process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 565-570.
- [18] Preston F W. The structure of abraded glass surfaces [J]. Transactions of the Optical Society, 1922, 23(3): 141-164.