

文章编号 1004-924X(2013)03-0554-07

# 大曲率半径球面反射镜球面误差的改善

白满社, 李攀\*, 张晋宽, 滕霖

(西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**结合环形抛光工艺,提出了新的球面抛光方法,以满足环形激光器、同步辐射加速器、光学振荡器等对大曲率半径球面反射镜球面误差的特殊要求。基于 Preston 抛光方程,分析了传统工艺在抛光过程中球面区域沿径向不同点的相对运动轨迹,建立了抛光过程材料去除模型。运用所建立的数学模型对大曲率半径球面反射镜传统抛光过程进行计算机仿真,揭示了传统抛光方法产生球面误差的两个原因,即工件无法始终处于抛光盘工作区域内以及工件自转与抛光盘转速不一致。由此提出增大抛光盘面积和驱动工件同步转动两条措施来降低球面误差。应用提出的新工艺加工了半径为 6 000 mm 的大曲率半径球面反射镜,测试显示其球面误差  $\Delta R/R < 0.02$ , 粗糙度小于 0.25 nm, 表面疵病达到 0 级, 满足设计要求。

**关键词:**球面反射镜; 曲率半径; 球面误差; 功率谱密度; 运动分析

**中图分类号:** TN305.2; TQ171.68 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132103.0554

## Improvement on nonuniformity for sphere mirrors with large radius of curvature

BAI Man-she, LI Pan\*, ZHANG Jin-kuan, TENG Lin

(Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

\* Corresponding author, E-mail: lp\_forever5281@sina.com

**Abstract:** On the basis of continuous polishing, a new polishing process was developed to meet the special requirements of ring lasers, synchrotron radiation accelerators and optical oscillators for the sphere mirrors with a large radius of curvature. Based on the Preston hypothesis, a mathematical model of material removal was established by analysis on the relative velocity at the radial point of an optical sphere surface in the classic polishing process. Via computer simulation, it explored that the reasons of the nonuniformity in sphere mirrors were that the mirrors cannot stay in the polishing pan during the polishing process and the rotation rate of the polishing pan is asynchronous with the mirrors. Two improvements were enlarging the size of the polishing pan and synchronizing the mirror rotation with the polishing pan. With the proposed process, a spherical mirror with the radius of 6 000 mm was polished. Obtained results show that the nonuniformity  $\Delta R/R$  in a sphere is less than 0.02, the roughness is less than 0.25 nm and the surface defect reaches a zero grade.

**Key words:** spherical mirror; radius of curvature; sphere nonuniformity; power spectral density; motion analysis

## 1 引言

与一般的球面反射镜不同,大曲率半径球面反射镜(一般指曲率半径  $R > 1\ 000\ \text{mm}$ )除了汇聚光束、调节光路外,往往还在光路系统中承担着稳定光路、改善光束输出质量的作用,因此它在环形激光器、同步辐射加速器、光学振荡器等领域中有着广泛应用<sup>[1-3]</sup>。这些应用对大曲率半径球面反射镜表面质量的要求越来越高,如在环形激光器中,除要求传统超光滑表面的粗糙度小于  $1\ \text{nm}$ ,具有高反射率( $> 99.99\%$ )、高面形准确度( $< \lambda/5$ )的特性外<sup>[4]</sup>,还从波前功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)角度对大曲率半径球面反射镜的中频误差给出了控制指标,即球面误差  $\Delta R/R < 0.02$ 。

中频误差是指空间频率处于高频(粗糙度)与低频(面形)之间的制造误差,空间波长一般在  $0.12\ \text{mm}$ 到反射镜  $1/3$  口径之间<sup>[5-7]</sup>。该误差在大曲率半径球面反射镜上主要表现为球面区域内任意两点之间的曲率半径不一致,即球面误差。由于光斑在反射镜上的位置会随外界环境温度变化、加工应力释放等发生改变,如果反射镜存在球面误差,就会在一定程度上引起光路偏转,从而影响光强分布。光斑越小,球面误差越大,影响越严重。

如果球面反射镜口径保持不变,当曲率半径增大时,球面矢高会随之减小,同样制造误差引起的球面误差就会被放大,与曲率半径之间表现出一种近似线性的关系。这就造成球面反射镜的曲率半径越大,球面误差越难以控制,加工难度也随之增加。针对大曲率半径球面反射镜的加工难题,国内通常采用单件球面古典抛光的方法。该方法采用古典抛光机配合略大于反射镜的球面沥青抛光模一件一件加工大曲率半径球面反射镜,球面区域的加工精度虽然很高,但球面误差较大, $\Delta R/R$  最多只能达到  $0.06 \sim 0.07$ ,难以满足设计要求。本文对古典抛光法产生球面误差的原因进行了分析,提出了增大抛光盘面积和驱动工件同步转动的改进措施;并在此基础上,结合环形抛光法提出了一种新的大曲率半径球面反射镜的抛光方法。

## 2 古典抛光方法球面误差描述

单件球面古典抛光方法如图 1 所示。抛光机

通常采用古典双摆抛光机,其工作运动比单摆抛光机更加平稳。球面沥青抛光盘位于工件下方,主动转动;工件随抛光盘的转动而自转,并在左摆臂和右摆臂的驱动下在抛光盘上摆动。为满足表面粗糙度和疵病的要求,抛光盘转速一般不超过  $15\ \text{r/min}$ ,摆速一般不超过  $20\ \text{r/min}$ 。

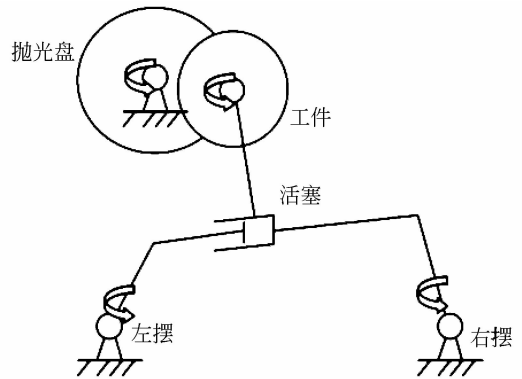
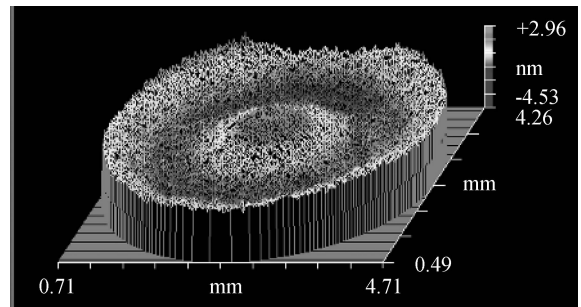


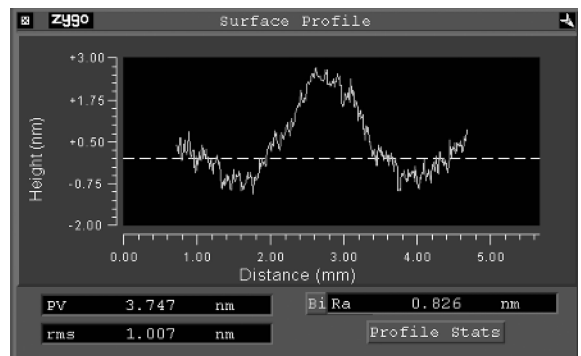
图 1 古典抛光方法

Fig. 1 Classic polishing method



(a) 大曲率半径球面反射镜球面误差

(a) Nonuniformity of mirror with large radius of curvature



(b) 球面误差沿径向的剖面图

(b) Vertical section through nonuniformity in sphere

图 2 球面误差测试

Fig. 2 Nonuniformity measurement

使用 Zygo 白光干涉仪对单件球面古典抛光

方法加工的大曲率半径球面反射镜进行检测, 曲率半径  $R=6\ 000\ \text{mm}$ 。滤除球面后, 球面误差如图 2(a)所示。对该误差沿径向进行测量, 如图 2(b)所示。

从图 2(b)中可以看出, 球面误差类似“W”, PV 值不到 4 nm。在球面区域内任取 5 点进行曲率半径测试, 曲率半径最大相差 500 mm ( $\Delta R/R \approx 0.08$ ), 也就是说不到 4 nm 的加工误差会引起几百毫米的曲率半径变化。

### 3 运动分析

功率谱密度与工艺相关性的研究表明, 中频误差主要由运动学参数变化引起<sup>[8]</sup>, 或者说由沿工件上各点材料的去除效率不一致引起。由于球面误差沿径向表现出明显的轴对称特性, 因此本文沿径向研究工件上各点的材料去除曲率变化。

对双摆古典抛光机进行数学建模, 并进行矢量分析, 如图 3 所示。

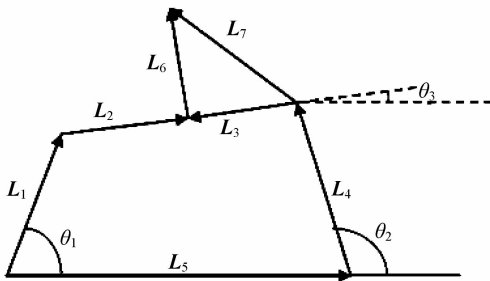


图 3 双摆抛光机矢量分析

Fig. 3 Vector analysis of classic polisher

令  $L_1 = r_1 e^{i\theta_1} = r_1 \cos \theta_1 + i r_1 \sin \theta_1$ ;  $L_2$  随活塞变化, 设  $L_2 = a + ib$ ;  $L_3 = -l_1 e^{i\theta_3} = -l_1 \cos \theta_3 - i l_1 \sin \theta_3$ ;  $L_4 = r_2 e^{i\theta_2} = r_2 \cos \theta_2 + i r_2 \sin \theta_2$ ;  $L_5 = L$ 。

根据矢量关系, 有:

$$\begin{cases} L_1 + L_2 = L_5 + L_4 + L_3 \\ L_2 \times L_3 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

从而有:

$$\begin{cases} r_1 \cos \theta_1 + a = L + r_2 \cos \theta_2 - l_1 \cos \theta_3 \\ r_1 \sin \theta_1 + b = r_2 \sin \theta_2 - l_1 \sin \theta_3 \\ -a l_1 \cos \theta_3 + b l_1 \sin \theta_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

消去  $a, b$ , 可以得到:

$$\tan \theta_3 = \frac{r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1}{r_2 \cos \theta_2 + L - r_1 \cos \theta_1} \quad (3)$$

于是有:

$$\theta_3 = \arctan \left( \frac{r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1}{r_2 \cos \theta_2 + L - r_1 \cos \theta_1} \right) \quad (4)$$

定义  $L_6 = L_2 e^{i(\theta_3 + \pi/2)} = -l_2 \sin \theta_3 + i l_2 \cos \theta_3$ ,

由  $L_7 = L_6 + L_3$ , 可得:

$$L_7 = -(l_1 \cos \theta_3 + l_2 \sin \theta_3) - i(l_1 \sin \theta_3 - l_2 \cos \theta_3) \quad (5)$$

以计算镜盘上距工件中心距离为  $r$  的一点的材料去除率为例。

玻璃抛光材料去除率 (MRR) 主要遵循 Preston 方程<sup>[9]</sup>:

$$MRR = k \times p v \quad (6)$$

式中:  $k$  是一个取决于抛光过程各个环节的常量,  $p$  是作用在工件和抛光盘之间的抛光压力,  $v$  是工件相对于抛光盘的运行速度。假设抛光压力  $p$  在抛光过程中保持不变, 对上式进行积分得到:

$$R_t = k \int_0^T p v dt = k p J \quad (7)$$

其中:  $J$  是在整个抛光过程中工件上一点相对于抛光盘运动的总路程。由此可知, 工件上任一点的材料去除量  $R_t$  的变化取决于该点相对于抛光盘的运动总路程  $J$ <sup>[10-12]</sup>。

以古典抛光机左摆点作为坐标原点建立坐标系, 如图 4 所示。

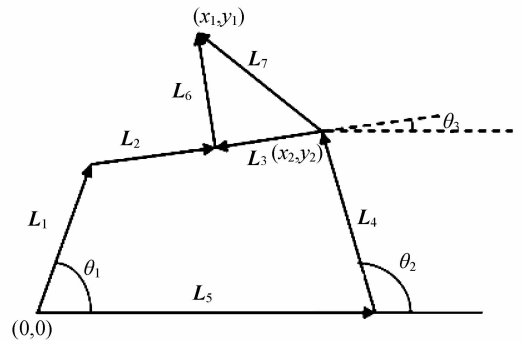


图 4 建立坐标系

Fig. 4 Reference coordinates

假设工件中心坐标为  $(x_1, y_1)$ , 右摆臂的端点为  $(x_2, y_2)$ , 有:

$$\begin{cases} x_2 = L + r_2 \cos \theta_2 \\ y_2 = r_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (8)$$

又由  $L_7 = (x_1 - x_2) + i(y_1 - y_2)$ , 有:

$$\begin{cases} x_1 = L + r_2 \cos \theta_2 - l_1 \cos \theta_3 - l_2 \sin \theta_3 \\ y_1 = r_2 \sin \theta_2 - l_1 \sin \theta_3 + l_2 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (9)$$

则距工件中心  $r$  的一点的坐标  $(x_3, y_3)$  为:

$$\begin{cases} x_3 = x_1 + r\cos(\omega_3 t) \\ y_3 = y_1 + r\sin(\omega_3 t) \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $\omega_3$  为工件自转速度。假设  $t=0$  时刻的相位为零。

令抛光盘中心的坐标为  $(L/2, l_3)$ , 转速为  $\omega_4$ , 以抛光盘中心为新坐标系的原点进行坐标变换, 可以得到工件中心在新坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} x'_1 = (x - L/2)\cos(\omega_4 t) + (y - l_3)\sin(\omega_4 t) \\ y'_1 = (y - l_3)\cos(\omega_4 t) - (x - L/2)\sin(\omega_4 t) \end{cases} \quad (11)$$

距工件中心  $r$  的一点在新坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} x'_3 = x'_1 + r\cos(\omega_3 t - \omega_4 t) \\ y'_3 = y'_1 + r\sin(\omega_3 t - \omega_4 t) \end{cases} \quad (12)$$

此点在  $t$  时刻的速度为:

$$v_t = \sqrt{\left(\frac{dx'_3}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy'_3}{dt}\right)^2} \quad (13)$$

对上式在整个抛光时间内积分, 就可以得到工件上一点相对于抛光盘的运动总路程。

### 4 计算机仿真

使用 Matlab 对抛光过程进行计算机仿真。定义右摆摆速为  $\omega_1$ , 有  $\theta_1 = \omega_1 t$ ; 定义左摆摆速为  $\omega_2$ , 有  $\theta_2 = \omega_2 t$ 。双摆古典抛光机一般左摆摆速从属于右摆摆速, 有  $\omega_1 = \alpha\omega_2$ ,  $\alpha$  为常数。由于双摆抛光机无法主动驱动工件自转,  $\omega_3$  通过测量获得。抛光时间  $t$  设为 30 min。

在古典抛光中, 出于修改面形的需要, 抛光盘直径  $D$  只能略大于工件直径  $d$ , 此时工件的部分

区域会摆到抛光盘外, 在此时间内不会发生材料去除, 所以需要加上边界条件  $(x'_3)^2 + (y'_3)^2 \leq D^2/4$ 。为便于比较, 定义曲率半径不一致性指标 (NU) 为<sup>[12-13]</sup>:

$$NU = \text{std}(J) / \text{mean}(J), \quad (14)$$

NU 越小越好。

对于典型抛光参数 ( $L_1 = 10 \text{ mm}, L_4 = 10 \text{ mm}, \omega_2 = 20 \text{ r/min}, \omega_4 = 10 \text{ r/min}, \omega_3 = 13.5 \text{ r/min}$ ), NU = 0.071 3, 材料去除曲线如图 5 所示。

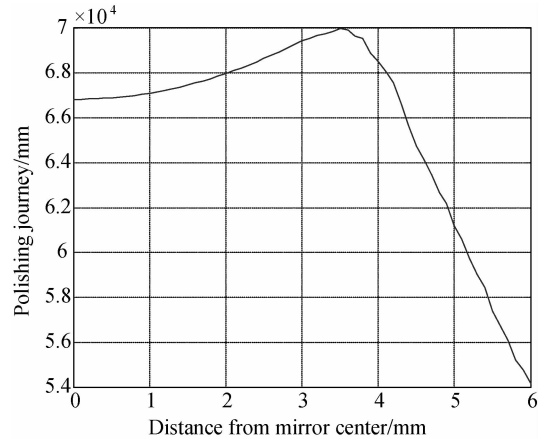
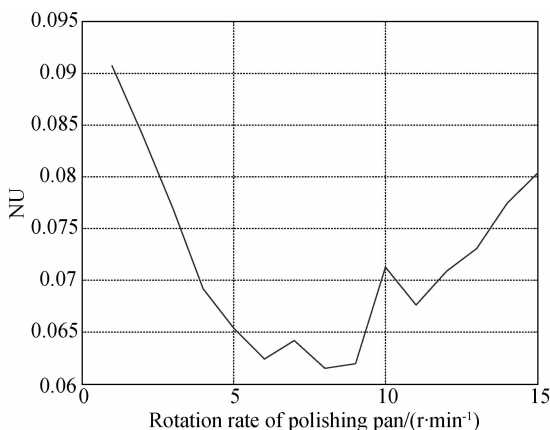


图 5 材料去除曲线 ( $D=1.2d$ )

Fig. 5 Material removal curve ( $D=1.2d$ )

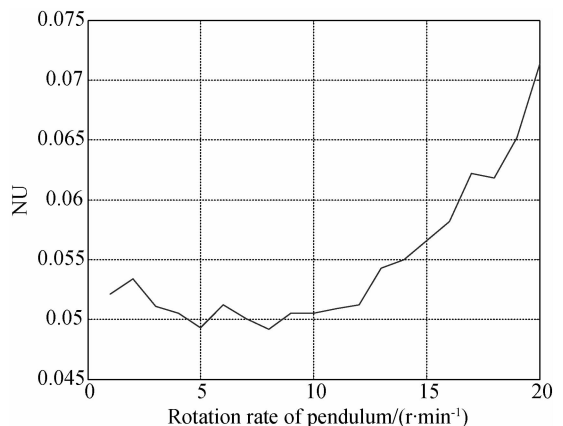
从图 5 中可以看出, 工件上各点相对于抛光模的运动总路程或材料去除量从中心出发沿径向先增加再减少, 在径向形成 M 型曲线, 与图 2(b) 相似。

在典型抛光参数的基础上对各运动学参数进行分析。每次仅改变一个参数, 并分别测量对应的工件自转速度, 从而得到 NU 的变化, 如图 6 所示。



(a) 抛光盘转速  $\omega_4$  对 NU 的影响

(a)  $\omega_4$  vs. NU



(b) 右摆摆速  $\omega_2$  对 NU 的影响

(b)  $\omega_2$  vs. NU

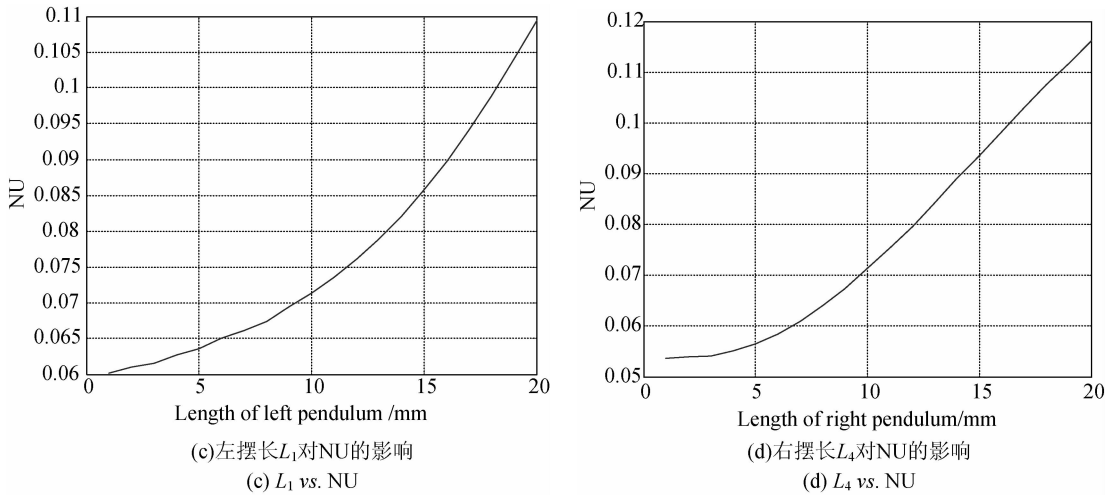


图 6 运动学参数对 NU 的影响

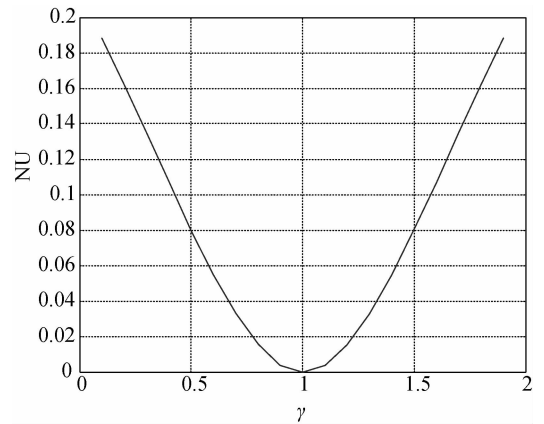
Fig. 6 Effect of kinematic parameters on NU

从图 6 中可以看出, NU 最小仅能达到 0.049 2, 较典型抛光参数降低了 30%。为达到反射镜粗糙度和疵病指标对运动学参数提出的要求, 进行了多次参数的改进和优化, 但 NU 最小仅能达到原 NU 的 40% 左右, 这意味着通过改变常规的古典抛光参数难以满足反射镜曲率一致性的要求。

因此, 本文考虑非常规运动学参数, 包括抛光盘与工件的直径之比  $\beta = D/d$  以及工件转速与抛光盘转速之比  $\gamma = \omega_3/\omega_4$ 。不同  $\beta$  值对应的材料去除曲线如图 7 所示。

件始终处于抛光盘内, 材料去除量从工件中心向外递增。这说明球面反射镜曲率半径的 W 型变化与工件部分区域未能始终处于抛光盘内有密切关系。

接下来考虑工件的自转速度。当  $\beta \gg 1$  时, 若主动驱动工件自转, NU 与  $\gamma$  的关系如图 8 所示。

图 8 工件转速与抛光盘转速之比  $\gamma$  对 NU 的影响Fig. 8 Effect of  $\gamma$  on NU

从图 8 中可以看出,  $\gamma$  越接近 1, NU 越小。当  $\gamma = 1$  时,  $NU = 0$ , 沿工件径向材料去除量完全相同。

## 5 工艺改善措施

基于上述分析可知, 古典抛光过程中大曲率半径球面反射镜球面误差形成的主要原因为:

(1) 工件无法始终处于抛光盘内;

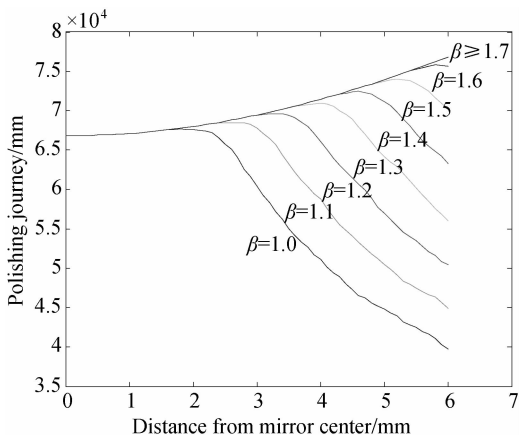


图 7 材料去除曲线

Fig. 7 Material removal curves

从图 7 中可以看出, 随着  $\beta$  逐渐增加, 材料去除曲线的拐点随之向外移动; 当  $\beta$  大于某一特定值时(该值与  $L_1$  和  $L_4$  的取值有关), 拐点消失, 此时工

(2)工件自转速度与抛光盘转速不一致。

因此,改进措施也很明确——增大抛光盘面积,使驱动工件转速接近抛光盘转速。

对于双摆抛光机,施行这两项改进措施有两个难点:一般双摆抛光机的工件不能主动驱动,需要进行设备改造;工件不摆出抛光盘会导致反射镜面形不断走高,整体曲率半径将难以控制。而环形抛光方案具有抛光过程中工件始终处于抛光盘内和主动驱动工件自转的特点,因此很适合实施这两条改进措施。

使用 1.2 m Strasbaugh 环形抛光机进行新工艺开发,抛光机的原理如图 9 所示,其中修整盘可以前后移动以保证抛光盘的表面面形满足要求。使用  $\varphi 1.2$  m 球面压板将沥青抛光盘大致压制成 6 000 mm 球面,使用  $\varphi 300$  mm 球形修整盘进行精修。

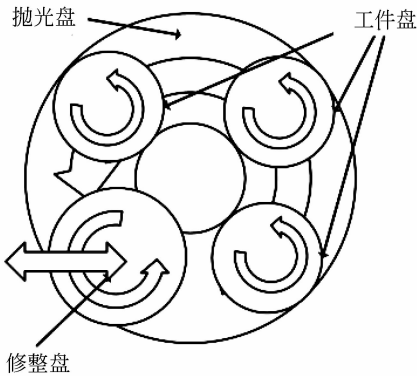


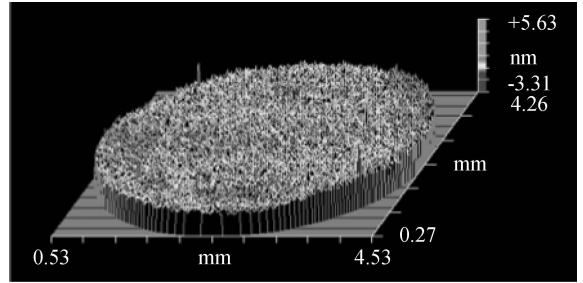
图 9 环形抛光机工作原理图

Fig. 9 Principle of continuous polisher

大曲率半径球面反射镜采用成盘方式,将 19 件大曲率半径球面反射镜假光胶到  $\varphi 150$  mm 高精度球面粘接板上。工件盘放入抛光机的工件环内,驱动工件盘转速等于抛光盘(10 r/min),配重 5 kg。采用 300 nm 氧化铈抛光粉抛光 2 h 后,从工件盘上取下反射镜进行测量。

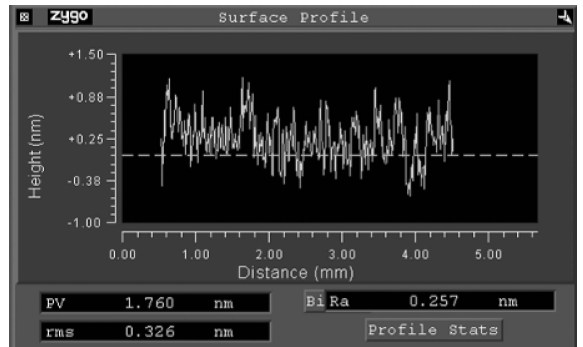
## 6 抛光结果分析

使用 Zygo 白光干涉仪检测抛光后的反射镜,滤除球面后,得到的球面如图 10 所示。检测结果显示,球面误差  $\Delta R/R < 0.02$  ( $\Delta R/R = 0.017$ ),对应的 PV 值小于 2 nm;使用 Zygo 白光干涉仪检测



(a) 大曲率半径球面反射镜球面误差

(a) Nonuniformity of mirror with large radius of curvature



(b) 球面误差沿径向的剖面图

(b) Vertical section through nonuniformity in sphere

图 10 球面误差改善

Fig. 10 Improvement of nonuniformity in sphere by proposed method

粗糙度,  $R_q < 0.25$  nm;使用 Zeiss 显微镜在  $100\times$  下观察,无可见疵病,满足 0 级光学疵病要求。

## 7 结论

本文研究了古典抛光过程中大曲率半径球面反射镜球面误差的成因和解决措施。从功率谱密度的角度评价,球面误差为中频误差,其大小主要受运动参数支配。在古典抛光过程中,球面误差产生的主要原因是工件无法始终处于抛光盘内,以及工件自转与抛光盘转速不一致造成的工件沿径向材料去除量不等。因此,增大抛光盘面积,驱动工件自转并保持与抛光盘同步转动,可以降低球面误差,本文结合环形抛光工艺,开发出新型抛光方法。用新方法加工了  $R = 6\,000$  mm 的大曲率半径球面反射镜,球面误差  $\Delta R/R < 0.02$ ,粗糙度小于 0.25 nm,表面光学疵病达到 0 级。抛光实验表明,该方法具有极大的应用价值。

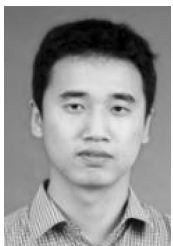
## 参考文献:

- [1] LEONEL N M, WILLIS E L. Theory of a ring laser [J]. *Physical Review A*, 1973, 8(4): 2103-2125.
- [2] 张国斌, 石军岩, 戚泽明, 等. 国家同步辐射实验室真空紫外光束线的改造[J]. *核技术*, 2004, 27(10): 729-732.  
ZHANG G B, SHI J Y, QI Z M, *et al.*. Reconstruction of vacuum ultraviolet beamline at NSRL [J]. *Nuclear Techniques*, 2004, 27(10): 729-732.
- [3] WEBSTER S, GILL P. Low-thermal-noise optical cavity [C]. *IEEE International Conference on Frequency Control Symposium*, 2010.
- [4] 高宏刚, 陈斌, 曹健林, 等. 超光滑光学表面加工技术[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(4): 7-14.  
GAO H G, CHEN B, CAO J L, *et al.*. Super-smooth optical surface processing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(4): 7-14. (in Chinese)
- [5] AIKENS D, WOLFE C, LAWSOM J. The use of power spectral density (PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility [J]. *SPIE*, 1995, 2576:281-292.
- [6] AIKENS D. Derivation of preliminary specifications for transmitted wavefront and surface roughness for large optics used in Inertial Confinement Fusion [J]. *SPIE*, 1995, 2633: 350-360.
- [7] LAWSON J, WOLFR C. Specification of optical component using power spectral density function [J]. *SPIE*, 1995, 2536: 33-55.
- [8] 李攀, 张晋宽, 白满社, 等. 基于超光滑表面工艺过程的 PSD 评价技术研究[J]. *航空精密制造技术*, 2011, 47(4): 8-11.  
LI P, ZHANG J K, BAI M SH, *et al.*. Power spectral density evaluation for ultra-smooth surface process [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2011, 47(4): 8-11. (in Chinese)
- [9] PRESTON F. The theory and design of plate glass polishing machines [J]. *J. Soc. Glass Technol.*, 1927, 11: 214-256.
- [10] 王朋, 陈亚, 宣斌, 等. 大口径光学元件的机械手抛光[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1077-1085.  
WANG P, CHEN Y, XUAN B, *et al.*. Polishing large aperture mirrors by manipulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(5): 1077-1085. (in Chinese)
- [11] 王毅, 倪颖, 余景池. 小型非球面数控抛光技术的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(10): 1527-1533.  
WANG Y, NI Y, YU J CH. Computer-controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1527-1533. (in Chinese)
- [12] 陈勇, 李攀. 高准确度玻璃光学元件的 CMP 技术研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(12): 2499-2503.  
CHEN Y, LI P. Chemical mechanical polishing for high precision glass optical components [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(12): 2499-2503. (in Chinese)
- [13] YI J G. On the wafer/pad friction of chemical-mechanical planarization (CMP) processes-part I: modeling and analysis [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2005, 18(3): 359-370.

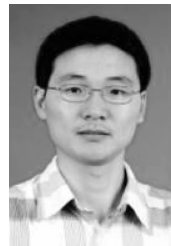
## 作者简介:



白满社(1971—),男,陕西咸阳人,研究员,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事光学超精密加工方面的研究。E-mail:bmaser@163.com



李攀(1983—),男,陕西西安人,工程师,2004年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事光学超光滑表面加工方面的研究。E-mail:lp\_forever5281@sina.com



张晋宽(1980—),男,山东济宁人,工程师,2006年于中航工业西安飞行自动控制研究所获得硕士学位,主要从事超精密清洗方面的研究。E-mail:18991845350@qq.com



滕霖(1960—),男,辽宁辽阳人,研究员,1995年于西北工业大学获得工学博士学位,现为中航工业西安飞行自动控制研究所总工艺师,主要从事航空宇航制造工程、超精密加工方面的研究。E-mail:TL2253@facri.com