

# 基于工业机器人的高效高精度轮式抛光技术研究

姚永胜<sup>1,2</sup>, 李奇焯<sup>1</sup>, 丁蛟腾<sup>1</sup>, 姜向敏<sup>1</sup>, 马臻<sup>1</sup>

(1.中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 随着现代光学技术的发展, 对光学元件的制造精度和制造周期提出了越来越严苛的要求, 如何快速制造出超精密光学元件是相关领域技术人员孜孜不倦的追求。中科院西安光机所经过多年攻关, 研发出基于工业机器人的高效高精度轮式抛光技术。目前该技术已经成熟, 并在原理样机的基础上继续研发了 6 套第二代机器人轮式抛光设备, 成功应用于多个航天型号任务的研制, 其中 $\Phi 500\text{mm}$  离轴非球面的加工精度达到 RMS 3.5nm, 面形误差单次收敛率达到 90%, 去除函数峰值去除率达到 150nm/s。该技术具有高效率、高精度、低成本的优点, 有望在光学制造领域得到广泛应用, 推动光学制造技术的高速发展。

**关键词:** 轮式抛光; 光学元件; 高效率; 高精度; 工业机器人

## 1 引言

在现代光学系统中, 由于非球面光学元件具有缩小光学系统外形尺寸、减轻系统质量、提高光学性能、改善成像质量等优点, 被广泛应用于航空航天、深空探测、对地观测、激光通讯等领域。由于非球面光学元件的曲率非一致性、几何结构复杂、精度要求极高, 这些给非球面光学元件的设计、加工和检测带来了极大的挑战<sup>[1-2]</sup>。如何快速制造高精度非球面成为相关领域技术人员面临的挑战。

随着计算机控制技术的成熟, 发展出了一些计算机控制光学表面成型技术 (CCOS), 例如: 小磨头抛光技术、应力盘抛光技术、气囊抛光技术、磁流变抛光技术、离子束抛光技术、水射流抛光技术等<sup>[3-8]</sup>。这些抛光技术通常只适用于光学制造过程中的某一阶段, 要完成光学元件从磨削后到高精度, 往往需要多种抛光技术的组合加工, 这就导致光学元件制造成本高、制造周期长, 严重制约着光学应用领域的快速发展。

2008 年德国 OptoTech 公司受金刚石砂轮磨床的启发, 提出了轮式抛光的思想。抛光轮为三层结构: 内部刚性轮毂, 中间柔性橡胶, 外部粘一层聚氨酯抛光垫, 并通过加工实验发现轮式抛光具有非常高的加工效率<sup>[9]</sup>。2015 年中科院长春光机所张毅等人设计了公自转轮式抛光结构, 并验证了轮式抛光具有去除效率快、去除函数稳定的优点<sup>[10]</sup>。2016 年韩国延世

大学 H Seo 等人提出了一种正交速度场轮式抛光工具,通过旋转积分的方式对轮式抛光技术的去除函数进行了理论分析与仿真,并验证去除函数接近高斯型且非常稳定<sup>[11]</sup>。2017 年苏州大学宗亮基于工业机器人研究了轮式抛光技术,并初步验证了加工效果<sup>[12]</sup>。上述轮式抛光技术的研究主要聚焦于工作原理及去除特性方面的研究,尚未应用于光学元件的超精密加工。中科院西安光机所经过多年攻关,研发出基于机器人的高效高精度轮式抛光技术<sup>[13-17]</sup>,目前该技术已经成熟,有望在光学制造领域得到广泛应用,推动光学制造技术的高速发展。

## 2 轮式抛光结构与原理

机器人轮式抛光技术主要由工业机器人、抛光工具和工件台组成。其中工业机器人为运动执行机构,带动抛光工具按照加工路径进行抛光。工业机器人为 6 轴机械臂,优点是工作空间大、运动灵活、可靠性高,缺点是运动精度低,通常轨迹精度为亚毫米级,因此需要研究抛光工具结构形式,以消除运动精度对抛光精度的影响。抛光工具为公自转轮式结构,抛光轮可以绕水平轴和垂直轴进行旋转,以实现光学镜面的高效率加工。工件台用于承载并固定光学元件。

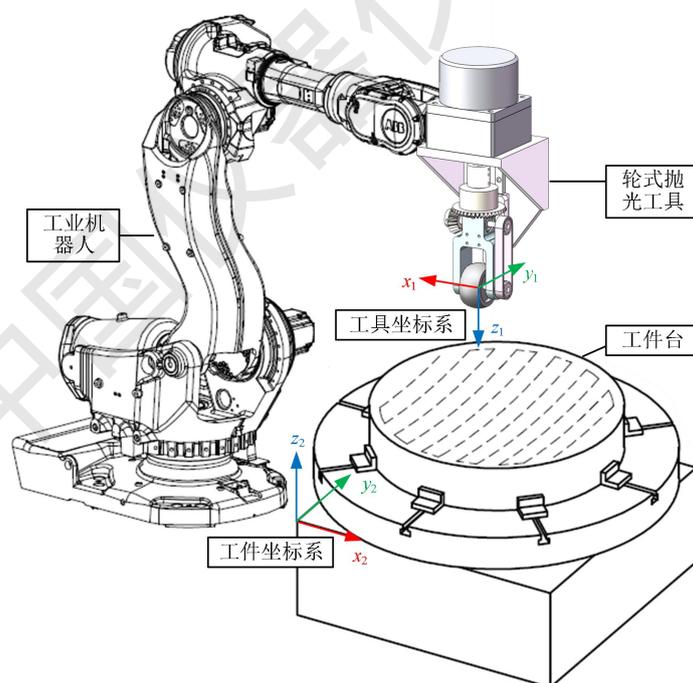


图 1 机器人轮式抛光技术总体结构

### 2.1 机器人运动学

为了准确控制机器人加工轨迹和加工姿态,需要对机器人运动学进行分析,计算工具坐标相对于工件坐标的位置与姿态。

非球面光学曲面的方程为:

$$f(x, y, z) = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2R^2}} - z = 0 \quad (1)$$

其中:  $c=1/R_0$ ,  $R_0$  为非球面顶点曲率半径,  $k$  为非球面系数,  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

路径点坐标与工件坐标之间的坐标变换矩阵为<sup>[18-20]</sup>:

$$\mathbf{R} = [\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{其中, } \mathbf{n}_z = \left\{ \frac{f'_x}{a}, \frac{f'_y}{a}, \frac{f'_z}{a} \right\}, \mathbf{n}_y = \left\{ 0, \frac{-f'_z}{b}, \frac{f'_y}{b} \right\}, \mathbf{n}_x = \left\{ \frac{-f'_y - f'_z}{ab}, \frac{f'_x \cdot f'_y}{ab}, \frac{f'_x \cdot f'_z}{ab} \right\},$$

$$a = \sqrt{f_x'^2 + f_y'^2 + f_z'^2}, \quad b = \sqrt{f_y'^2 + f_z'^2}。$$

欧拉角是常用的一种描述旋转的方法。它使用3个角参量描述坐标系按照某一次序绕坐标轴旋转的角度, 不同的旋转次序会得到不同的变换矩阵。这里规定, 先绕z轴旋转  $\phi$  角, 再绕y轴旋转  $\theta$  角, 最后绕x轴旋转  $\psi$  角。于是可得变换矩阵<sup>[18]</sup>:

$$\mathbf{R} = R_z(\phi)R_y(\theta)R_x(\psi) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta c\psi - s\phi s\psi & -c\phi c\theta s\psi - s\phi c\psi & c\phi s\theta \\ s\phi c\theta c\psi + c\phi s\psi & -s\phi c\theta s\psi + c\phi c\psi & s\phi s\theta \\ -s\theta c\psi & s\theta s\psi & c\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了计算得到有用解, 采用双变量反正切函数  $\text{atan2}$  来确定角度。 $\text{atan2}$  提供两个自变量, 即纵坐标  $y$  和横坐标  $x$ 。由  $\text{atan2}$  反求角度时, 同时检查  $y$  和  $x$  的符号来确定其所在的象限。

由式 (3) 可知:

$$\tan \phi = \frac{s\phi}{c\phi} = \frac{r_{23}}{r_{13}} \quad (4)$$

$$\tan \theta = \frac{s\theta}{c\theta} = \frac{c\phi r_{13} + s\phi r_{23}}{r_{33}} \quad (5)$$

$$\tan \psi = \frac{s\psi}{c\psi} = \frac{-s\phi r_{11} + c\phi r_{21}}{-s\phi r_{12} + c\phi r_{22}} \quad (6)$$

于是由式(4)-(6)可得:

$$\phi = a \tan 2(r_{23}, r_{13}) \quad (7)$$

$$\theta = a \tan 2(c\phi r_{13} + s\phi r_{23}, r_{33}) \quad (8)$$

$$\psi = a \tan 2(-s\phi r_{11} + c\phi r_{21}, -s\phi r_{12} + c\phi r_{22}) \quad (9)$$

## 2.2 轮式抛光工具

由于工业机器人的运动精度较低，重复路径精度为亚毫米级，无法通过控制柔性抛光轮的压入深度去精确控制抛光压力。因此设计了如图 2 所示的气压浮动式轮式抛光工具。轮式抛光工具主要由力控模块、中空电机、支架、锥齿轮、传动带、抛光轮组成。其中支架固定在工业机器人末端，作为抛光工具的承载结构。力控模块和中空电机依次固定连接在支架上。力控模块的主体结构为闭环控制的低摩擦气缸，通过采用气压浮动式结构，降低对机器人运动精度的要求，提高抛光压力控制的精度。力控模块下方安装有中空电机，电机的转轴是空心的，转轴通过滚珠花键驱动传动轴旋转，力控模块的活塞杆驱动传动轴上下移动。这样设计的优点是：电机不上下移动，降低了运动惯量，提高了响应频率，实现抛光压力的准确控制。一对行星锥齿结构实现抛光轮的公转和自转，使抛光工具结构紧凑、转动惯量小。

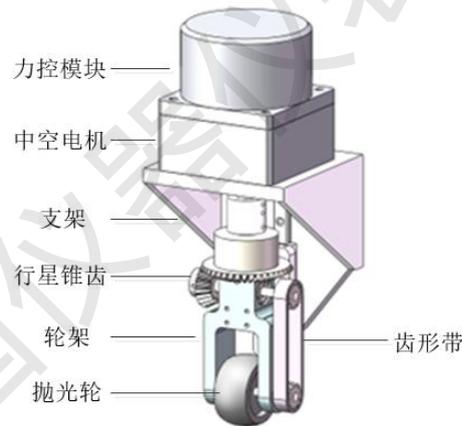


图 2 轮式抛光工具结构

抛光轮结构如图 3 所示，主要由内部轮毂、中间柔性橡胶和外部抛光垫组成。抛光轮在绕水平轴自转的同时绕垂直轴公转。抛光轮自转速度很快，可以实现光学元件表面材料的快速去除；抛光轮的公转可以匀滑抛光纹路，获得良好的表面粗糙度。

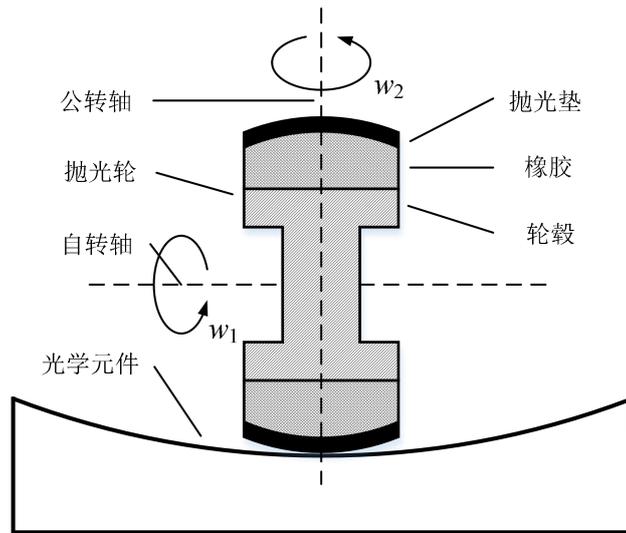


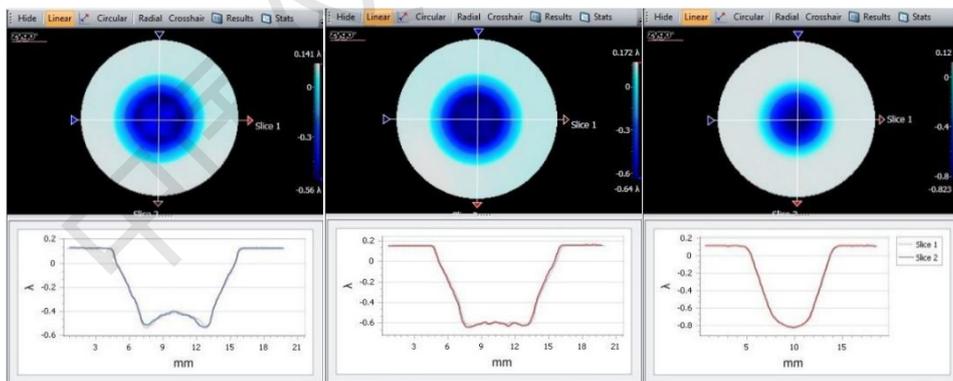
图3 抛光轮结构与运动形式

### 3 去除函数研究

通过实验发现，橡胶的硬度对去除函数的影响比较大。于是分别选用硬度为 45d, 60d, 75d 的橡胶作为柔性层，研究柔性层硬度对去除函数的影响，寻找最优参数，获得类高斯型去除函数。实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

抛光压力	自转速度	转速比	加工时间	抛光粉	抛光材料
5N	2rps	4	10s	氧化铈	石英



(a) 45D

(b) 60D

(c) 75D

图 4 不同硬度抛光轮的去除函数

不同硬度抛光轮的去除函数如图 4 所示。当柔性橡胶的硬度为 45D 时，去除函数中心凹陷，中心附近凸起，在光学加工中易产生中高频误差。当柔性橡胶的硬度为 60D 时，去除函数为梯形。当柔性橡胶的硬度为 75D 时，去除函数有中心峰值，形状最接近高斯型。因此 75D 橡胶为理想的柔性层材料，可以获得高斯型去除函数，有利于面形误差的快速收

敛。

为了研究抛光轮转速、抛光压力和抛光时间对去除函数的影响,以及去除函数的稳定性。本文分别以抛光轮转速、抛光压力和抛光时间为变量,做了三组对比实验,以及以固定参数做了一组重复实验。共做了四组实验,每组实验六次,共获得 24 个打点数据(图 5)。

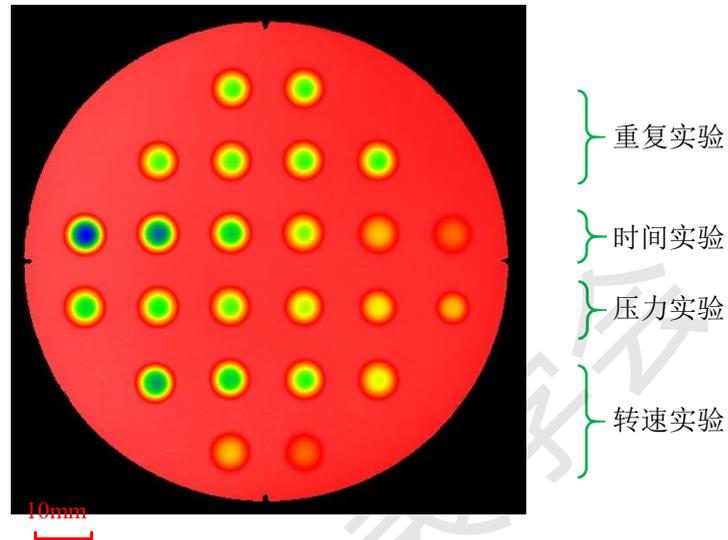


图 5 采斑数据

### 3.1 抛光轮转速对去除函数影响

该组实验以抛光轮转速为变量,研究速度对去除函数的影响。该组实验的固定参数为:打点时间: 10s, 抛光压力: 20N, 公自转速比: 0.2, 抛光粉: 氧化铈, 光学元件: 石英玻璃。该组实验的变量为抛光轮自转速度, 转速分别为 0.5rps、1rps、1.5rps、2rps、2.5rps、3rps。实验结果如图 5 中转速组所示。将转速组的六个点提取并进行数据分析, 得到表 2 和图 6。

表 2 转速实验参数

Speed (rps)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Rate (nm/s)	41.2	70.5	92.8	119.2	140.5	158.2
V-rate (mm <sup>3</sup> /min)	0.072	0.129	0.173	0.225	0.268	0.305
PV (nm)	408.8	682.6	882.9	1111.6	1330.5	1511.2

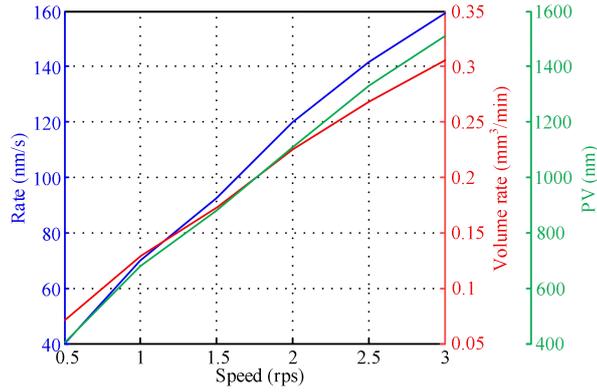


图 6 转速实验曲线

实验结论：材料去除率随着抛光轮转速的增加而增加，但它们之间并非线性关系。而是随着抛光轮转速的增加，材料去除率的增加放缓。

### 3.2 抛光压力对去除函数影响

该组实验以抛光压力为变量，研究压力对去除函数的影响。该组实验的固定参数为：打点时间：10s，抛光轮转速：2rps，公自转速比：0.2，抛光粉：氧化铈，光学元件：石英玻璃。该组实验的变量为抛光压力，分别为 5N、10N、15N、20N、25N、30N。实验结果如图 5 中压力组所示。将压力组的六个点提取并进行数据分析，得到表 3 和图 7。

表 3 压力实验参数

Pressure (N)	5	10	15	20	25	30
Rate (nm/s)	65.9	82.1	98.9	114.3	127.2	136
V-rate (mm <sup>3</sup> /min)	0.084	0.131	0.176	0.221	0.258	0.282
PV (nm)	631.7	783	938.9	1084.1	1194	1299.7

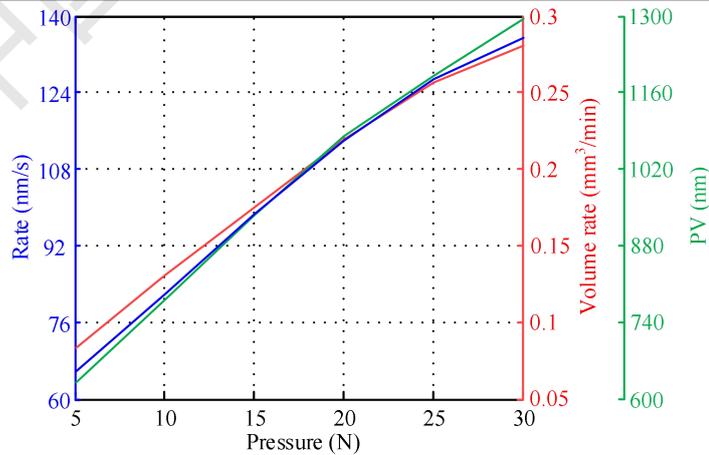


图 7 压力实验曲线

实验结论：材料去除率随着抛光压力的增加而增加。当抛光压力小于 20N 时，材料去

除率和抛光压力之间呈现出良好的线性关系。而当抛光压力大于 20N 时，随着抛光压力的增加，材料去除率的增加放缓。

### 3.3 抛光时间对去除函数影响

该组实验以抛光时间为变量，研究时间对去除函数的影响。该组实验的固定参数为：抛光压力：20N，抛光轮转速：1rps，公自转速比：0.2，抛光粉：氧化铈，光学元件：石英玻璃。该组实验的变量为抛光时间，分别为 5 s、10 s、15 s、20 s、25 s、30 s。实验结果如图 5 中时间组所示。将时间组的六个点提取并进行数据分析，得到表 4 和图 8。

表 4 时间实验参数

Time (s)	5	10	15	20	25	30
Rate (nm/s)	68	67.3	68.8	69.5	69.1	68.64
V-rate (mm <sup>3</sup> /min)	0.134	0.132	0.137	0.139	0.141	0.141
PV (nm)	386	662	1000.2	1331.6	1671	1987.7

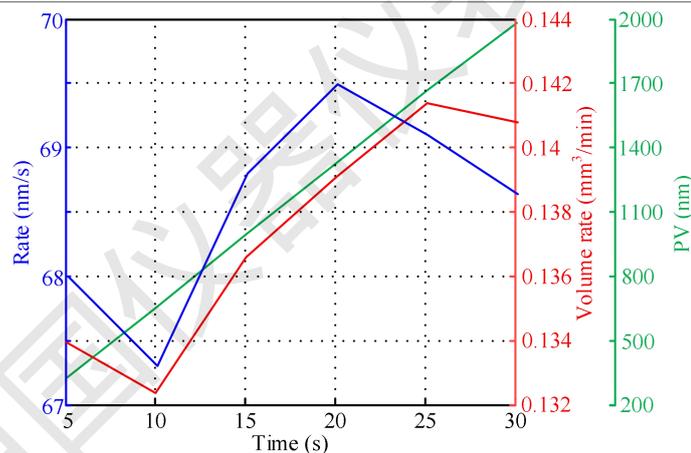


图 8 时间实验曲线

实验结论：材料去除量随着抛光时间的增加而增加，两者之间呈现出良好的线性关系。材料去除率随时间的变化很小，去除率变化小于 6.4%。

### 3.4 去除函数稳定性

该组为重复实验，研究去除函数的稳定性。该组实验的参数为：抛光压力：20N，抛光时间：10s，抛光轮转速：2rps，公自转速比：0.2，抛光粉：氧化铈，光学元件：石英玻璃。实验结果如图 5 中重复组所示。将重复组的六个点提取并进行数据分析，得到表 5 和图 9。

表 5 重复实验参数

Times	1	2	3	4	5	6

Rate (nm/s)	115.3	116	116	117.1	115.8	115.9
V-rate (mm <sup>3</sup> /min)	0.223	0.225	0.225	0.228	0.223	0.225
PV (nm)	1081.6	1100.7	1083.1	1098.8	1081.1	1085.8

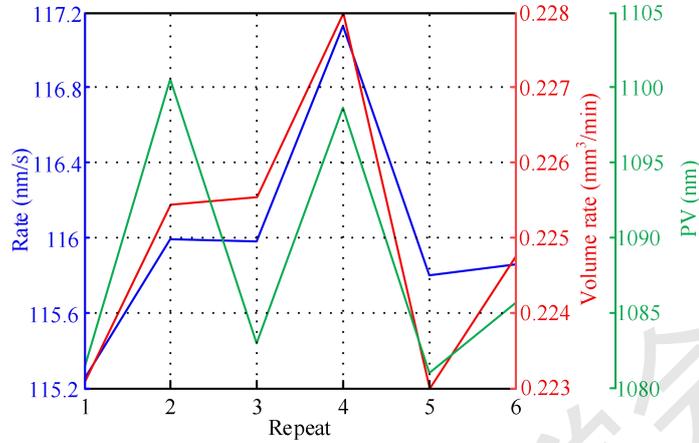


图9 重复实验曲线

实验结论：去除函数非常稳定，六次实验的去除函数稳定性达到 98%。

#### 4 非球面加工验证

加工步骤：在干涉仪上标出离轴非球面方位，检测初始面形。根据初始面形误差和去除函数，采用迭代反卷积方法计算驻留时间，根据加工路径和驻留时间计算机器人运行速度。最后进行加工检验。如果面形精度符合要求，则完成加工，如果不符合要求，则进入下一轮加工。

加工参数：抛光轮转速为 2rps；抛光压力为 20N；抛光轨迹为栅格形状，线距为 1mm；抛光液为氧化铈微粉水溶液，微粉粒径为 1~2 $\mu$ m，固液比为 1: 10；光学元件为 $\Phi$ 500mm 口径石英玻璃，初始面形为 PV 1277.9nm，RMS 138.8nm，非球面方程为式（10）。

$$z = \frac{cR^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2R^2}} \quad (10)$$

其中： $c=1/R_0$ ， $R_0=10000\text{mm}$ ， $k=-1$ ，离轴量  $d=500\text{mm}$ 。

加工结果：面形误差加工结果如图 10 所示。第一次加工 7 小时，面形误差从 PV 1277.9nm，RMS 138.8nm 收敛到 PV101.05nm、RMS 16.3nm，PV 和 RMS 分别收敛了 92.1%和 88.3%。第二次加工 2 小时，面形误差收敛到 PV 45.7nm、RMS 5.68nm，PV 和 RMS 分别收敛 54.8%和 65.1%。第三次加工 1 小时，面形误差收敛到 PV 29.5nm、RMS 3.5nm，PV 和 RMS 分别收敛 35.3%和 38.3%。经过 3 次共 10 小时的加工，PV 和 RMS 分别收敛 97.7%和 97.5%，面形精度达到非常高的精度，证明轮式抛光技术对非球面光学元件具有很快的加工效率和很高的加工精度。

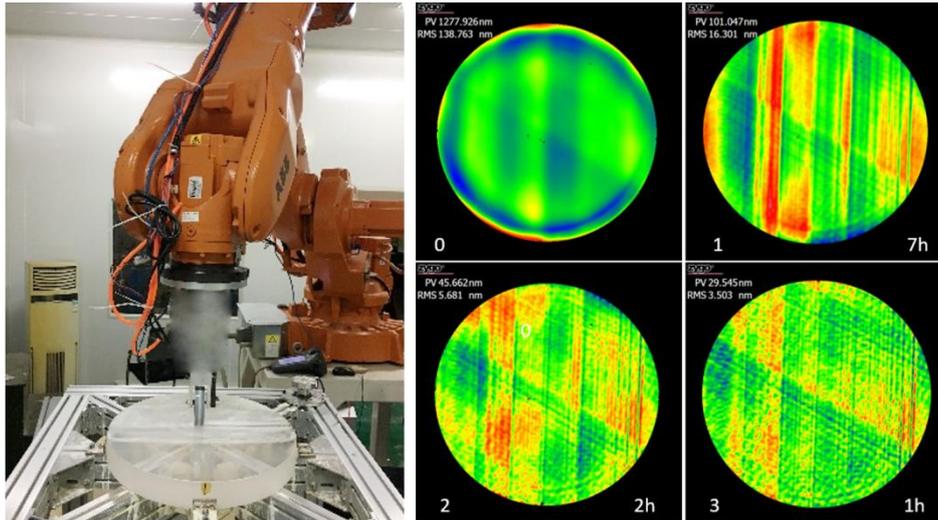


图 10 非球面加工结果

## 5 推广应用

中科院西安光机所在第一代原理样机的基础上继续研发了 6 套第二代轮式抛光设备(图 11)，设备成本约为气囊或磁流变抛光机的 1/5，并且设备运行与维护成本极低，满负荷加工状态下，年产值可达到 3000 万元。该设备可以实现大口径非球面光学元件的高效率、高精度、低成本制造，有望在超精密光学加工领域得到广泛应用，推动光学制造技术的高速发展。



图 11 第二代机器人轮式抛光设备

## 6 结论

针对现代光学系统对大口径高精度光学元件的应用需求，开展了基于工业机器人的高效高精度轮式抛光技术研究。

首先对抛光轮的结构进行研究。抛光轮柔性层的硬度对去除函数的影响比较大。该研究分别选用硬度为 45D，60D，75D 的橡胶作为柔性层，研究了柔性层硬度对去除函数的影响。当橡胶的硬度为 45D 时，去除函数中心凹陷，中心附近凸起，在光学加工中易产生中高频误差。当橡胶的硬度为 60D 时，去除函数为梯形。当橡胶的硬度为 75D 时，去除函数有中

心峰值，形状最接近高斯型。因此 75D 橡胶为理想的柔性层材料，可以获得高斯型去除函数，有利于面形误差的快速收敛。

接着分别研究了抛光轮转速、抛光压力和抛光时间对去除函数的影响，以及去除函数的稳定性。实验表明：（1）抛光轮的去除效率和抛光轮转速，抛光压力之间并非呈线性关系，而是随着参数的增加，去除效率增加放缓；（2）抛光轮的去除量与时间之间呈现出良好的线性关系；（3）去除函数的稳定性非常好，六次重复实验的去除函数稳定性达到 98%。去除函数的研究表明该研究设计的轮式抛光工具性能良好，为实现高精度光学加工奠定了良好的基础。

最后对 $\Phi 500\text{mm}$ 口径的离轴非球面进行加工验证。经过三次共 10 小时加工，面形精度达到 PV 29.5nm、RMS 3.5nm，PV 和 RMS 分别收敛 97.7%和 97.5%，面形精度达到非常高的精度，证明轮式抛光技术对非球面光学元件具有很快的加工效率和很高的加工精度。并在第一代原理样机的基础上继续研发了 6 套第二代机器人轮式抛光设备，有望在超精密光学加工领域得到广泛应用，推动光学制造技术的高速发展。

#### 研究资助

该技术研究得到陕西省重点研发计划(No. 2020GY-157)和中科院青年创新促进会资助。

#### 参考文献：

- [1] 穆全全, 彭增辉, 宣丽. 大口径望远镜的高分辨成像技术 [J]. 物理, 2020, 49(03), 164-173.
- [2] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海. 非球面超精密抛光技术研究现状 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(23), 167-177.
- [3] F. Preston. The theory and design of plate glass polishing machines [J]. J. Soc. Glass Technol, 1927, 11, 214-256.
- [4] D. Kim, W. Park, S. Kim, et al. Parametric modeling of edge effects for polishing tool influence functions [J]. Opt. Express, 2009, 17(7), 5656-5665.
- [5] S. C. West, H. M. Martin, R. H. Nagel, et al. Practical design and performance of the stressed-lap polishing tool [J]. Appl. Opt. 1994, 33(34), 8094-8100.
- [6] Z. Cao, C. Cheung, and M. Liu. Model-based self-optimization method for form correction in the computer controlled bonnet polishing of optical freeform surfaces [J]. Opt. Express, 2018, 26(2), 2065-2078.
- [7] D. Golini, W. Kordonski, P. Dumas, et al. Magnetorheological finishing (MRF) in commercial precision optics manufacturing [J]. Proc. SPIE, 1999, 3782, 80-91.

- [8] R. A. JONES. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J], *Optical Engineering*, 1991, 30(12), 1963-1966.
- [9] M. Pfaff. High speed fabrication of aspheres and optical freeform surfaces [N]. OSA/FiO/LS/META/OF&T, 2008, OThD6.
- [10] 张毅, 张学军, 李锐刚. 具有公自转运动模式的高效轮式抛光工具设计 [J]. *中国光学*, 2016, 9(1), 155-166.
- [11] H. Seo, J. Han, S. Kim, S. Seong, et al. Novel orthogonal velocity polishing tool and its material removal characteristics from CVD SiC mirror surfaces [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(11), 12349–12366.
- [12] 宗亮. 工业机器人轮式抛光技术的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- [13] 李奇妍. 新型轮式抛光装置设计与抛光工艺研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [14] Yao Yongsheng, Ma Zhen, Ding JiaoTeng, et al. Heavy-calibre off-axis aspheric surface polishing by industrial robot [J]. *Proc. of SPIE*, 2018, 1083803.
- [15] Yao Yongsheng, Ma Zhen, Ding JiaoTeng, et al. Optimization of polishing wheel and investigation of its tool influence function [J]. *Proc. of SPIE*, 2020, 1156819.
- [16] Yongsheng Yao, Qixin Li, Jiaoteng Ding, et al. Investigation of an Influence Function Model as a Self-Rotating Wheel Polishing Tool and Its Application in High-Precision Optical Fabrication [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12, 3296.
- [17] Yao Yongsheng, Li Qixin, Shen Le, et al. Investigation of wheel polishing technology based on industrial robot [J]. *Proc. of SPIE*, 2021, 120710L.
- [18] 蔡自兴, 谢斌. 机器人学[M]. 第三版. 北京: 北京大学出版社, 2009: 42-45.
- [19] 吉阳珍. 6R 工业机器人运动学及动力学关键问题研究 [D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [20] 王健, 郭隐彪, 朱睿. 光学非球面元件机器人柔性抛光技术 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2010, 49(5), 636-639.