

文章编号 1004-924X(2017)10-2706-08

## 行星运动方式下不同形状磨头的去除函数

姚永胜<sup>1\*</sup>, 马臻<sup>1</sup>, 许亮<sup>1</sup>, 丁蛟腾<sup>1</sup>, 王永杰<sup>1</sup>, 沈乐<sup>1</sup>, 蒋波<sup>1,2</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:** 为了在光学元件的加工中获取更加接近高斯型的去除函数, 本文基于传统行星运动抛光理论, 提出了用自转去除函数公转轨迹积分较方便地求取各种复杂形状磨头去除函数的方法。当转速比大于 10 时, 新方法与传统方法得到的实心圆盘去除函数曲线非常接近, 从而验证了提出方法的正确性。采用新方法推导了不同形状磨头的去除函数, 并通过计算机进行了仿真实验。实验显示: 磨头形状为 II 型花瓣, 偏心率为 0.4 时, 可以获得非常接近高斯型的去除函数。针对 II 型花瓣磨头进行了抛光试验, 结果表明, 当偏心率为 0.4、转速比为 10 时, 试验结果与仿真结果非常吻合, 且都非常接近高斯型去除函数。实验结果再次验证了新方法的正确性。

**关键词:** 行星抛光; 磨头; 高斯型去除函数; 自转去除函数

**中图分类号:** TN305.2; TG747 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2706

## Removal functions of different polishing heads worked in planet motion model

YAO Yong-sheng<sup>1\*</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, XU Liang<sup>1</sup>, DING Jiao-teng<sup>1</sup>,

WANG Yong-jie<sup>1</sup>, SHEN Le<sup>1</sup>, JIANG Bo<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: ganglangyao@126.com

**Abstract:** To obtain Gaussian-like removal function in optical manufacturing process, a convenient method to derive the removal functions of various complicated polishing heads by integrating the rotation removal function along the revolution trajectory was proposed based on the traditional planet polishing theory. When the speed ratio was greater than 10, the removal function curve of a solid disk by the proposed method was very close to the result by the traditional method, which verifies the correctness of the proposed method. The proposed method was used to derive polishing removal functions of different polishing heads. By computer simulation, it shows that type II petal polishing head gets a better removal function curve when the eccentricity ratio is 0.4. Finally, the type II petal polishing head was polished, and the results indicate that when the eccentricity ratio was 0.4 and the speed ratio is 10, the test and simulation results are consistent with each other and they are all close to the Gaussi-

收稿日期: 2017-02-20; 修订日期: 2017-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 51402351)

an curve. These test result verifies the correctness of the proposed method again.

**Key words:** planet polishing; polishing head; Gaussian-like removal function; rotation removal function

### 1 引言

计算机控制光学表面成形技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一项新型光学加工技术<sup>[1-7]</sup>。行星运动抛光是其中的一种。行星运动抛光结构简单、成本较低且能实现定量去除,所以在大口径、高精度、非球面(特别是离轴非球面)的加工中有着重要应用<sup>[8-9]</sup>。

在光学元件的加工中,高斯型去除函数是理想的去除函数,磁流变抛光、离子束抛光和气囊抛光等国内外先进的抛光技术所使用的去除函数均为高斯型或者类高斯型。目前,公转半径小于实心圆磨头半径的行星运动抛光去除函数与理想的高斯型去除函数相比,还存在一些缺陷:如去除函数不是单一峰值、中心有凹陷、边缘陡峭等,这些缺陷会导致光学元件表面会产生中高频误差<sup>[9-11]</sup>。调整磨头形状是使这些加工技术的去除函数逐渐接近高斯型去除函数的有效方法<sup>[11]</sup>,然而这种传统方法仅适用于实心圆盘这样形状简单的磨头,对于形状复杂的磨头并不适用。

本文结合行星运动抛光的传统理论,提出用自转去除函数公转轨迹积分法求取去除函数。所提方法可以比较容易地求出复杂形状磨头的去除函数。通过与传统方法比较验证了所提方法的正确性,并采用新方法推导了不同形状磨头的去除函数。利用计算机仿真针对 II 型花瓣磨头获得了非常接近高斯型的去除函数,最后通过抛光试验再一次验证了新方法的正确性。

### 2 传统方法原理

行星运动机构如图 1 所示,抛光磨头在绕自转轴自转的同时绕公转轴公转;磨头半径为  $r_1$ ,公转半径为  $r_2$ 。通过自转电机和公转电机可以实现转速比(自转电机与公转电机转速之比)的调节,通过偏心机构可以实现偏心率(公转半径与磨头半径之比)的调节<sup>[8]</sup>。

实心圆盘在行星运动时对光学元件的抛光效果是圆盘自转运动和公转运动双作用的结果。实

心圆盘行星运动如图 2 所示,圆盘自转速度为  $\omega_1$ ,公转速度为  $\omega_2$ ,距公转中心  $r$  的点  $M$  在圆盘上的对应半径为  $\rho$ 。

点  $M$  的速度为<sup>[12-14]</sup>:

$$v(\theta, r) = [(\omega_1^2 + \omega_2^2)r^2 + r_2^2\omega_1^2 + 2r^2\omega_1\omega_2 - 2rr_2(\omega_1\omega_2 + \omega_1^2)\cos\theta]^{1/2}. \quad (1)$$

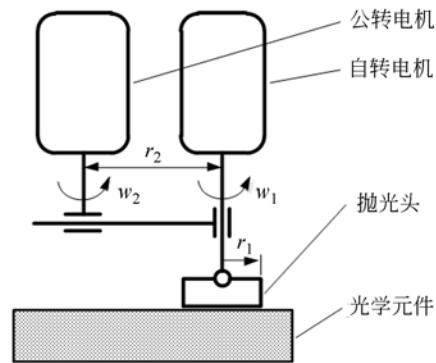


图 1 行星运动机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of planet motion mechanism

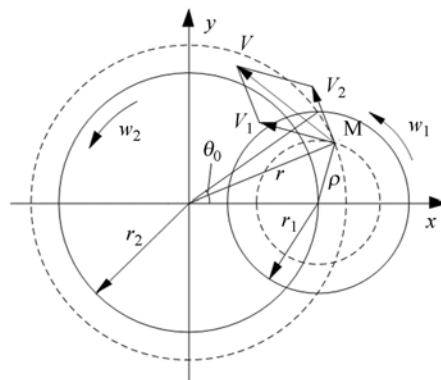


图 2 实心圆盘行星运动分析

Fig. 2 Kinematic analysis of solid disk

根据 Preston 假设,可以从式(1)得到行星运动实心圆盘的去除函数方程<sup>[12-14]</sup>:

$$R(r) = \frac{Kp}{\pi\omega_2} \int_0^{\theta_0} v(\theta, r) d\theta, \quad (2)$$

文献[15]经过计算机仿真,得到了不同转速比和偏心率时实心圆盘行星运动的去除函数曲线,并得出结论:当转速比在 0~10 时,去除函数曲线变化明显;当转速比大于 10 时,去除函数曲线变化不明显,并逐渐趋近于某个极限图形,说明

当转速比大于 10 时,公转速度对去除函数的影响很小。

### 3 自转去除函数公转轨迹积分法原理

传统方法对于实心圆盘这样形状简单的磨头比较容易求得去除函数,但对于形状复杂的磨头则很难求得去除函数。针对此问题,本文提出了自转去除函数公转轨迹积分法。

由文献[15]可知,当转速比大于 10 时,公转速度对去除函数的影响很小,并且在实际应用中往往自转速度远大于公转速度,所以在计算去除函数时可以忽略公转速度的影响,即抛光去除效果全部由自转速度产生,而磨头自转去除函数就很容易求得。做了这样的简化后,就会比较容易的得到各种复杂形状磨头的去除函数。

自转去除函数公转轨迹积分法求去除函数步骤如下:

- (1) 计算磨头自转去除函数;
- (2) 将磨头自转去除函数在公转轨迹上进行积分。

根据 Preston 假设,当得知某点速度和压强后,就可以计算出表面材料的去除量<sup>[16]</sup>:

$$h(x, y) = K \int_0^T V(x, y, t) p(x, y, t) dt. \quad (3)$$

当转速比很大,只需考虑磨头的自转速度时,  $V = \omega_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$ ;磨头与光学元件之间的压强  $p$  可以认为是恒定不变的<sup>[17]</sup>;某一点的抛光时间  $T = \frac{2\pi}{\omega_1}$ 。于是实心圆盘的自转去除函数为:

$$h(x_1, y_1) = 2\pi K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \quad (4)$$

式中  $x_1, y_1$  为点 M 相对于自转中心的坐标值。

沿着公转轨迹对自转去除函数积分就得到去除函数:

$$R(x, y) = \int_{-\theta_0}^{\theta_0} h(x - r_2 \cos \theta, y - r_2 \sin \theta) d\theta, \quad (5)$$

式中:  $x, y$  为点 M 相对于公转中心的坐标值,  $\theta$  为自转中心相对公转中心的角度,  $2\theta_0$  为公转一周时对 M 点的抛光角度,  $\theta_0$  的取值如下:

当  $r_1 \geq r_2$  且  $r < r_1 - r_2$  时,  $\theta_0 = \pi$ ;

当  $r_1 < r_2$  且  $r < r_2 - r_1$  时,  $\theta_0 = 0$ ;

其它情况时,  $\theta_0 = \arccos(\frac{r_2^2 + r^2 - r_1^2}{2r_2 r})$ 。

经过计算机仿真,得到了实心圆盘自转和行星运动的抛光去除函数曲线,如图 3 所示(彩图见期刊电子版)。

从仿真图像,可以得到以下结论:

(1) 自转去除函数公转轨迹积分法得到的去除函数相当于传统方法转速比无穷大时的去除函数。当转速比大于 10 时,两种方法得到的去除函数曲线非常接近,从而证明了该方法的正确性。

(2) 实心圆盘去除函数曲线中心附近有尖锐的峰值,边缘去除量迅速下降,这是由于实心圆盘自转去除函数曲线在边缘突变为 0。

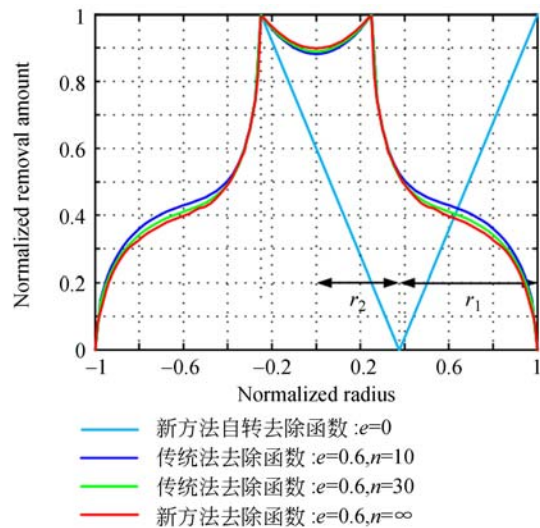


图 3 实心圆盘磨头自转和行星运动去除函数曲线  
Fig. 3 Removal function curves of solid disk polishing head

### 4 不同形状磨头的抛光去除函数

从上述分析可知,由于实心圆盘自转去除函数曲线在边缘突变为 0,导致行星去除函数曲线在中心附近有尖锐的峰值,边缘去除量迅速下降,这对抛光过程是不利的。在光学加工行业中较常使用五角星磨头,这是因为五角星磨头的角数为质数,在抛光过程中不容易形成周期性纹路;而三角星磨头的角间隙大、支撑不稳定;七角星磨头的每个角细小、形状难保持。因此本文以五角星磨头为着手点对不同形状磨头的抛光去除函数进行研究。

4.1 五角星磨头的抛光去除函数

如图 4 所示,五角星磨头自转一周时对某一点的抛光时间等于磨头可以抛光这一点的角度除以磨头的角速度。当某一点与磨头中心距离小于  $r_0$  时,抛光角度为  $2\pi$ ;当距离在  $r_0$  和  $r_1$  之间时,抛光角度为  $10\theta$ 。

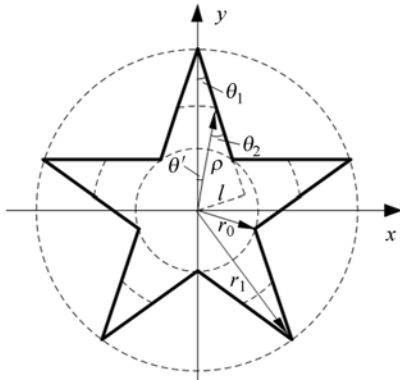


图 4 五角星磨头抛光角度分析

Fig. 4 Polishing angle analysis of five-pointed star polishing head

于是五角星磨头自转时对某一点抛光时间  $T$  的取值如下:

$$\text{当 } \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_0 \text{ 时, } T = \frac{2\pi}{\omega_1};$$

$$\text{当 } r_0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1 \text{ 时, } T = \frac{10\theta'}{\omega_1}.$$

其中:  $\theta' = \arcsin\left(\frac{r_1 \sin \theta_1}{\rho}\right) - \theta_1$ 。

将  $T$  代入式(3)得到五角星磨头的自转去除函数:

$$h(x_1, y_1) = \begin{cases} 2\pi K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2} & \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_0 \\ 10\theta' K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2} & r_0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)即得到行星运动抛光去除函数。

经过计算机仿真,得到了五角星磨头自转和行星运动的抛光去除函数曲线,如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。

从仿真图像可以看出:五角星磨头比实心圆盘的抛光去除函数有所改善,但曲线不够平滑,这是由于五角星磨头在  $r_0$  处的抛光角度有突变,导致磨头的自转去除函数有尖峰。

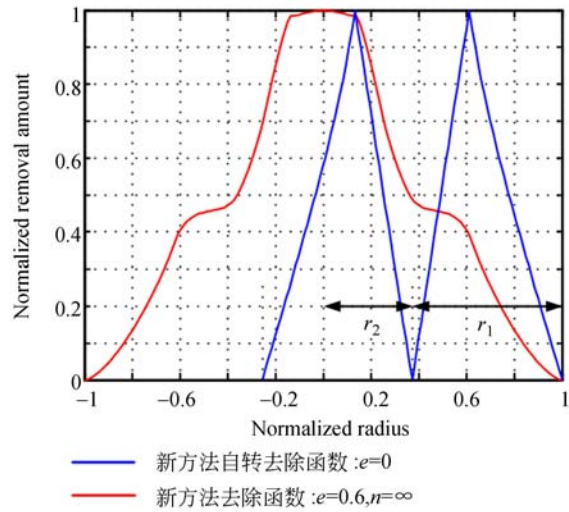


图 5 五角星磨头自转和行星运动去除函数曲线

Fig. 5 Removal function curves of five-pointed star polishing head

4.2 I 型花瓣磨头的抛光去除函数

I 型花瓣磨头抛光角度分析如图 6 所示。当某一点与磨头中心距离小于  $r_0$  时,抛光角度为  $2\pi$ ;当距离在  $r_0$  和  $r_1$  之间时,抛光角度为  $10\theta$ 。

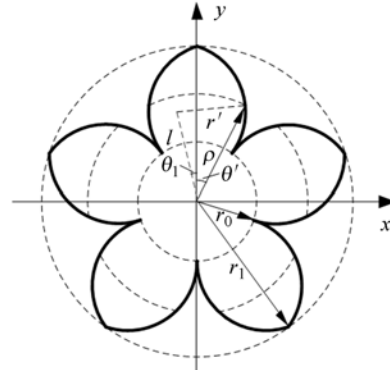


图 6 I 型花瓣磨头抛光角度分析

Fig. 6 Polishing angle analysis of type I petal polishing head

于是 I 型花瓣磨头自转时对某一点抛光时间  $T$  的取值如下:

$$\text{当 } \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_0 \text{ 时, } T = \frac{2\pi}{\omega_1},$$

$$\text{当 } r_0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1 \text{ 时, } T = \frac{10\theta'}{\omega_1},$$

其中:  $\theta' = \arccos\left(\frac{\rho^2 + l^2 - (r')^2}{2\rho l}\right) - \theta_1$ ,  $r'$  为花瓣圆弧半径,  $l$  为花瓣圆弧中心到花瓣磨头中心的距离。

将  $T$  代入式(3)得到 I 型花瓣磨头的自转去

除函数:

$$h(x_1, y_1) = \begin{cases} 2\pi K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, & \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_0 \\ 10\theta' K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, & r_0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1 \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)即可得到行星运动抛光去除函数。

经过计算机仿真,得到了 I 型花瓣磨头自转和行星运动的抛光去除函数曲线,如图 7 所示(彩图见期刊电子版)。

从仿真图像可以看出: I 型花瓣磨头比五角星磨头的抛光去除函数曲线更加平滑,但曲线形状比较臃肿,这是由于 I 型花瓣磨头的每一叶花瓣比较宽大的缘故。

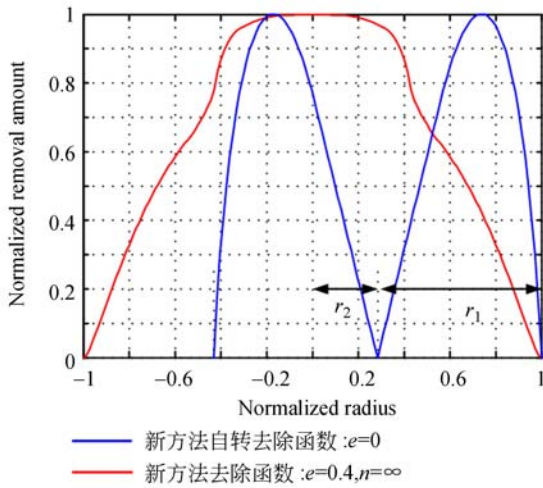


图 7 I 型花瓣磨头自转和行星运动去除函数曲线  
Fig. 7 Removal function curves of type I petal polishing head

### 4.3 II 型花瓣磨头的抛光去除函数

II 型花瓣磨头抛光角度分析如图 8 所示。当某一点离磨头中心距离在 0 和  $r_1$  之间时,抛光角度为  $10\theta$ 。

于是 II 型花瓣磨头自转时对某一点抛光时间 T 的取值为:当  $0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1$  时,  $T = \frac{10\theta'}{\omega_1}$ , 其中:  $\theta' = \arccos\left(\frac{\rho^2 + l^2 - (r')^2}{2\rho l}\right) - \theta_1$ ,  $r'$  为花瓣圆弧半径,  $l$  为花瓣圆弧中心到花瓣磨头中心的距离。

将 T 代入式(3)得到 II 型花瓣磨头的自转去除函数:

$$h(x_1, y_1) = 10\theta' K p \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, 0 < \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \leq r_1. \quad (8)$$

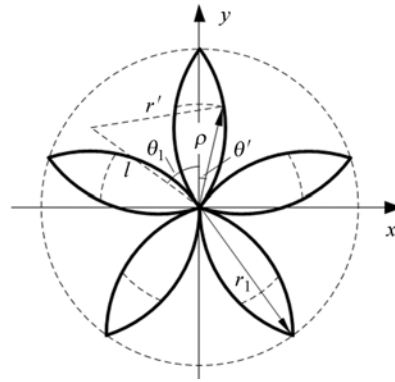


图 8 II 型花瓣磨头抛光角度分析  
Fig. 8 Polishing angle analysis of type II petal polishing head

将式(8)代入式(5)就得到行星运动抛光去除函数。

经过计算机仿真,得到了 II 型花瓣磨头自转和行星运动的抛光去除函数曲线,如图 9 所示(彩图见期刊电子版)。

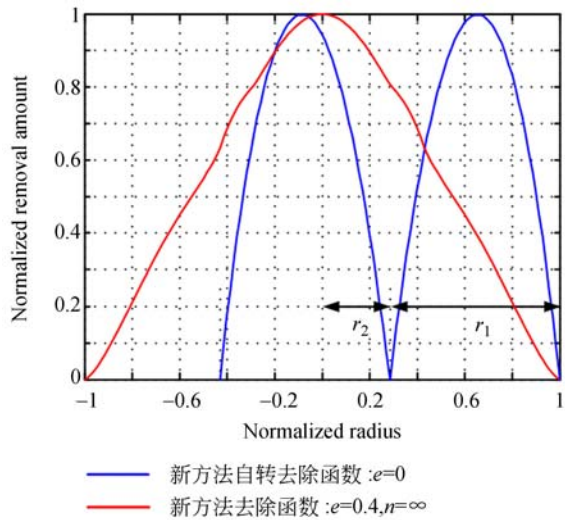


图 9 II 型花瓣磨头自转和行星运动去除函数曲线  
Fig. 9 Removal function curves of type II petal polishing head

从仿真图像可以看出: II 型花瓣磨头的抛光去除函数曲线非常接近高斯型去除函数曲线,这对磨头的选择具有指导意义。

## 5 抛光试验与结果分析

### 5.1 抛光试验

进行了抛光试验。被抛光材料为  $\Phi 105 \text{ mm}$ ,

厚度为 10 mm 的 K9 平面玻璃,经过离子束加工,PV 达到  $0.2\lambda$ ;抛光磨头为  $r_1=50$  mm 的 II 型花瓣,其上涂一层约 4 mm 厚的沥青<sup>[18]</sup>,II 型花瓣磨头如图 10 所示;抛光液为氧化铈配制的水溶液<sup>[19]</sup>;保持抛光压力恒定。抛光参数如下:偏心率为 0.4,转速比为 10,抛光压力为 34 N,抛光时间为 10 min。



图 10 II 型花瓣磨头  
Fig. 10 Type II petal polishing head

### 5.2 结果分析

通过 zygo 干涉仪检测抛光后的 K9 玻璃,面型如图 11 所示。从图 11 中可以看出,通过抛光中心的面型曲线比较光滑且非常类似高斯曲线。

将抛光试验得到的去除函数、仿真得到的去除函数与理想高斯去除函数进行归一化比较,如图 12 所示(彩图见期刊电子版)。从图中可以看

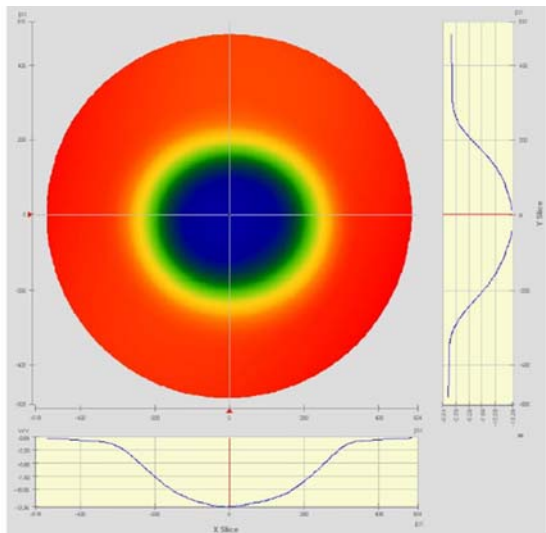


图 11 干涉仪测得抛光后面形数据  
Fig. 11 Surface figure after polishing

### 参考文献:

[1] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

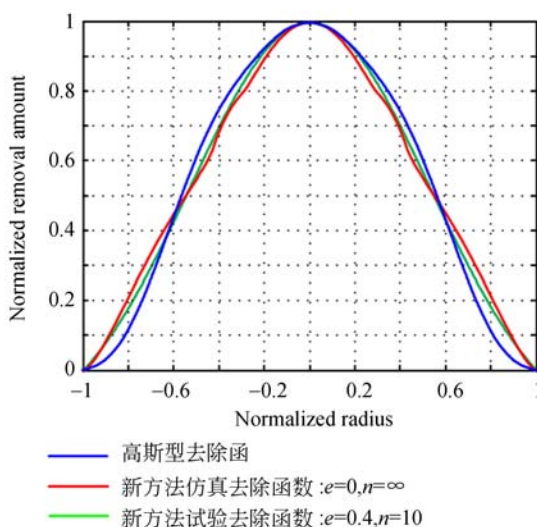


图 12 抛光去除函数曲线比较  
Fig. 12 Comparison of removal function curves

出,试验结果与仿真结果具有很好的吻合性,且都非常接近高斯型去除函数,该试验再次验证了新方法的正确性。

## 6 结 论

本文结合行星运动抛光的传统理论,提出了用自转去除函数公转轨迹积分法来求抛光去除函数。所提的方法可以比较容易地求出各种复杂形状磨头的抛光去除函数。当转速比大于 10 时,该方法与传统方法得到的实心圆盘抛光去除函数曲线非常接近,从而验证了该方法的正确性。采用该方法推导了不同形状磨头的抛光去除函数。通过计算机仿真发现当磨头形状为 II 型花瓣,偏心率为 0.4 时,可以获得非常接近高斯型的抛光去除函数。最后针对 II 型花瓣磨头进行抛光试验,结果表明,当偏心率为 0.4、转速比为 10 时,试验结果与仿真结果具有很好的吻合性,且都非常接近高斯型去除函数,试验结果再次验证了所提方法的正确性。

YANG L. *Advanced Optical Manufacture Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[2] 薛栋林,张忠玉,张学军. 一种中小口径非球面元件数控抛光技术[J]. 光学精密工程, 2005, 13

- (2): 198-204.
- XUE D L, ZHANG ZH Y, ZHANG X J. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 198-204. (in Chinese)
- [3] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with computer controlled optical surfacing[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(12): 19.
- [4] JONES R A. Fabrication of a large, thin, off-axis aspheric mirror[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(12): 4067-4075.
- [5] JONES R A. Computer simulation of smoothing during computer-controlled optical polishing [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(7): 1162-1169.
- [6] RUPP W, PLOTSKER V. Vacuum activated polishing laps produce smooth aspheric surfaces[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(7): 1048-1050.
- [7] 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)
- [8] 李爱民, 戴一帆, 郑子文, 等. 双转子研抛模去除函数的研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(23): 2077-2081.
- LI A M, DAI Y F, ZHENG Z W, *et al.*. Study on removing function of the polishing pad of dual-rotator mechanism[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(23): 2077-2081. (in Chinese)
- [9] JONES R A. Computer-controlled optical surfacing with orbital tool motion[J]. *Optical Engineering*, 1986, 25(6): 785.
- [10] GRANADE S R, DRUEDING T W. Variation in material removal in Gaussian removal processes [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(11): 3267-3269.
- [11] 陈华男, 王君林, 李显凌, 等. 光学元件双转子抛光技术中类高斯型去除函数建模与逼近[J]. *光子学报*, 2013, 42(3): 282-287.
- CHEN H N, WANG J L, LI X L, *et al.*. Modeling and approximation of gaussian-like removal function in dual-rotor polishing technology of optics elements[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 282-287. (in Chinese)
- [12] 樊成, 赵继, 张雷, 等. 移动抛光自由曲面材料去除的理论建模与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(5): 173-181.
- FAN CH, ZHAO J, ZHANG L, *et al.*. Modeling and experimental study on the material removal in the velocity-dwell-mode polishing process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5): 173-181. (in Chinese)
- [13] XU L, DING J T, MA Z, *et al.*. Kinematical analysis of one-axis polisher acting on spherical mirror [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8416: 84162H.
- [14] 吴宏基, 曹利新, 刘健. 基于行星式平面研磨机研抛过程的运动几何学分析[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(6): 144-147.
- WU H J, CAO L X, LIU J. Analysis of kinematic geometry on face grinding process on lapping machines[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(6): 144-147. (in Chinese)
- [15] 尚文锦. 计算机控制确定性研抛的建模与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- SHANG W J. *Model building and simulation of computer control deterministic grinding and polishing*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [16] 王权陡, 刘民才, 张洪霞. 数控抛光技术中抛光盘的去函数[J]. *光学技术*, 2000, 26(1): 32-34.
- WANG Q D, LIU M C, ZHANG H X. Removing function of polishing pad in computer controlled optical polishing[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(1): 32-34. (in Chinese)
- [17] 李徐钰, 魏朝阳, 徐文东, 等. 随动压力分布下的非球面抛光去除函数[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 3061-3067.
- LI X Y, WEI CH Y, XU W D, *et al.*. Tool influence function in aspheric polishing under dynamic pressure distribution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12): 3061-3067. (in Chinese)
- [18] 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.
- DAI Y F, SHANG W J, ZHOU X S. Effect of

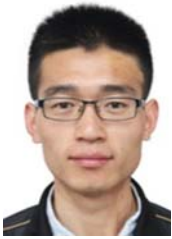
the material of a small tool to the removal function in computer control optical polishing[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 28(2): 97-101. (in Chinese)

- [19] 刘德福, 陈涛, 陈广林, 等. 软性粒子抛光石英玻璃的材料去除机理[J]. *光学精密工程*, 2016, 24

(7): 1623-1631.

LIU D F, CHEN T, CHEN G L, *et al.*. Material removal mechanism for fused glass by using soft particles[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1623-1631. (in Chinese)

#### 作者简介:



姚永胜(1991—),男,甘肃天水人,硕士,助理工程师,2013年、2016年分别于天津大学获得学士和硕士学位,主要从事机器人光学加工技术。E-mail: ganglangyao@126.com



马 臻(1976—),男,山西祁县人,博士,研究员,1998年于武汉测绘科技大学获学士学位,2012年于西安光学精密机械研究所获博士学位,主要从事光学设计、加工与检测方面研究。E-mail: mazn@opt.ac.cn