

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.6.03

振动轨迹参数对非球面光学元件表面质量影响

李迎春¹, 张尧尧¹, 孙江波²

(1.长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012;

2.吉林交通职业技术学院 机械工程分院, 吉林 长春 130012)

摘要: 定量分析了三维椭圆振动轨迹参数(形状、空间位置和振动频率)对切削加工非球面光学元件表面粗糙度的影响规律,给出了切削过程中选取椭圆形状参数和空间位置参数的方法。

关键词: 三维椭圆振动切削; 非球面光学; 轨迹参数

中图分类号: TH 162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)06-0534-06

Influence of vibration trajectory parameters on surface quality of Aspherical Optics

LI Yingchun¹, ZHANG Yaoyao¹, SUN Jiangbo²

(1.School of Mechanical & Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2.School of Mechanical Engineering Branch, Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130012, China)

Abstract: The influence of 3D elliptical vibration trajectory parameters (shape, spatial position and vibration frequency) on the surface roughness of aspherical optics is studied. The method to get the optimal elliptical shape and spatial position parameters is discussed here.

Key words: 3D Ellipse Vibration Cutting (3D-EVC); Aspherical Optics (AO); trajectory parameters.

0 引言

非球面表面常用来指旋转对称、轴对称或者完全不对称的自由曲面。光学系统中使用非球面元件(Aspherical Optics, AO)可以提高成像质量,减少装配尺寸或光学元件的数目,减轻仪器重量,简化装配过程,降低整个仪器的生产成本^[1],所以 AO 在现代精密光学仪器、光电通信、航空航

天、国防以及民用等领域都有着极其迫切的应用需求^[2]。但是制造这些 AO 的材料通常都是切削性能差、脆性高、韧性差的难加工材料或者黑色金属,在加工的过程中,刀具都会产生较为严重的机械与化学磨损,进而加大刀具定位难度与加工表面的粗糙度,最终对加工表面的光学性能产生巨大的影响^[3-5]。

金刚石车削一直以来都被认为是一种可以快

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201052GX); 吉林省科技厅“十三五”科学技术研究项目(2016334)

作者简介: 李迎春(1984—),女,汉族,吉林长春人,长春工业大学讲师,博士,主要从事复杂曲面先进光学制造技术的研究, E-mail: 279453588@qq.com.

速获得光学质量表面的加工方法,但是由于金刚石中的碳原子和被加工材料中的铁原子存在很好的化学亲和力,切削钢铁类的材料时会很快发生石墨化,使刀具钝化,严重影响加工表面质量^[6]。所以,研究一种高精密的难加工材料 AO 的加工方法尤为必要。文中研究应用 3D-EVC 加工 AO^[7-9],改进现行的三维椭圆驱动方程(Three-Dimensional Ellipse Driven Equation, 3D-EDE),定义了一种含有表征三维椭圆形状和空间位置参数的 3D-EDE,通过对加工复曲面的三维表面微观形貌(Three-Dimensional Surface Micro-To-

pography, 3D-SMT)的仿真,论述了 3D-EVC 中椭圆振动轨迹参数(Elliptical Vibration Trajectory Parameters, EVTP)对加工表面粗糙度 S_q 的影响规律。

1 表征形状和空间位置的 3D-EDE 定义

为了能够通过椭圆参数表达三维椭圆的形状与它在空间中的相对位置,在现行的 3D-EDE 基础上发展了一种新的空间 3D-EDE^[9],通过将二维平面椭圆绕三个坐标轴 y 、 z 、 x 旋转的方式得到空间 3D-EDE,具体见下式:

$$\begin{cases} x_2(t) = -y(t)\cos\theta_2 - z(t)\cos\theta_2\sin\theta_1 \\ y_2(t) = y(t)\cos\theta_3\cos\theta_2 + z(t)(-\cos\theta_3\sin\theta_2\sin\theta_1 + \sin\theta_3\cos\theta_1) \\ z_2(t) = -y(t)\sin\theta_3\cos\theta_2 + z(t)(\sin\theta_3\sin\theta_2\sin\theta_1 + \cos\theta_3\cos\theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

该方程由 7 个变量组成,其中 4 个变量用来体现三维椭圆的形状,另外 3 个变量用来描述它在空间中的位置。

式(1)表明,给定变量 m_1 、 m_2 、 δ_1 、 δ_2 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 后,便可计算三维椭圆的形状及其在空间中的

相对位置。当给定二维平面椭圆变量 $m_1 = 0.010 \text{ mm}$ 、 $m_2 = 0.005 \text{ mm}$ 、 $\delta_1 = 0^\circ$ 、 $\delta_2 = 45^\circ$,旋转角度 $\theta_1 = 45^\circ$ 、 $\theta_2 = 45^\circ$ 、 $\theta_3 = 45^\circ$ 后,得到 3D-EDE 的振动轨迹(Vibration Trajectory, VT)如图 1 所示。

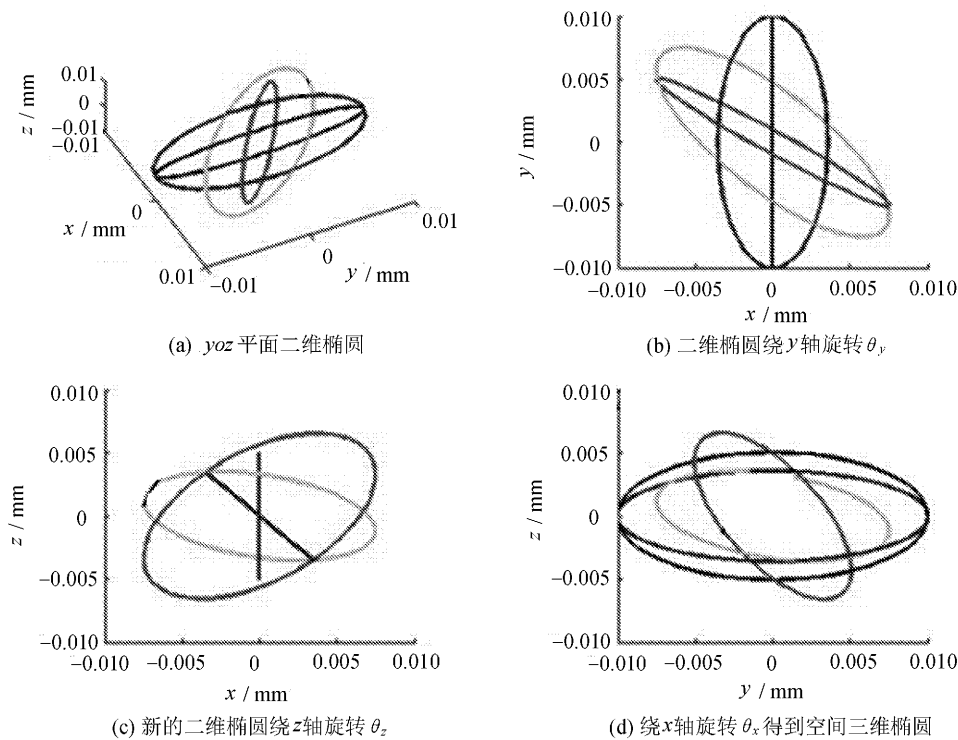


图 1 3D-EDE 的 VT 及其投影

2 三维表面的表面粗糙度 S_q 的定义

上世纪 90 年代,在欧共体资助的大型表面计

量研究项目中,开发了一套较为全面的三维表面粗糙度评价体系^[10]。参照其中表面形貌均方根偏差 S_q 的含义,文中定义 S_q 为 3D-SMT 的均方

根偏差,以此来对表面质量进行评估。 S_q 是一个统计幅度参数,定义为样本范围内,表面粗糙度偏离参考基准的均方根值。 S_q 的离散定义:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N_x N_y} \sum_{u=0}^{N_x-1} \sum_{v=0}^{N_y-1} g_h(x_u, y_v)^2} \quad (2)$$

式中: N_x, N_y ——分别为 x, y 方向点的个数;

u, v —— 3D-SMT 仿真区域变量,其中 $u = 0, 1, 2, \dots, N_x - 1, v = 0, 1, 2, \dots, N_y - 1$;

(x_u, y_v) ——仿真区域内第 (u, v) 个点的坐标;

$g_h(\cdot, \cdot)$ —— 3D-SMT 函数。

基于快速刀具伺服金刚石切削过程中的表面形貌模型算法^[11],可得到 3D-EVC 方法加工 AO 的 3D-SMT 模型,然后再由式(2)计算加工表面粗糙度值。以复曲面为例,给定仿真参数见表 1。

表 1 复曲面的 3D-SMT 仿真参数

参数	数值
$a_f / (\text{mm}/\text{r})$	0.1
$N / (\text{r}/\text{min})$	50
r / mm	0.5
a / mm	0.003
b / mm	0.010 5
c / mm	0.003 5
$\phi_x / (^\circ)$	0
$\phi_y / (^\circ)$	-160.55
$\phi_z / (^\circ)$	0
f / Hz	1 000

进行 3D-SMT 仿真,得到复曲面的 3D-SMT 如图 2 所示,其局部放大图如图 3 所示。

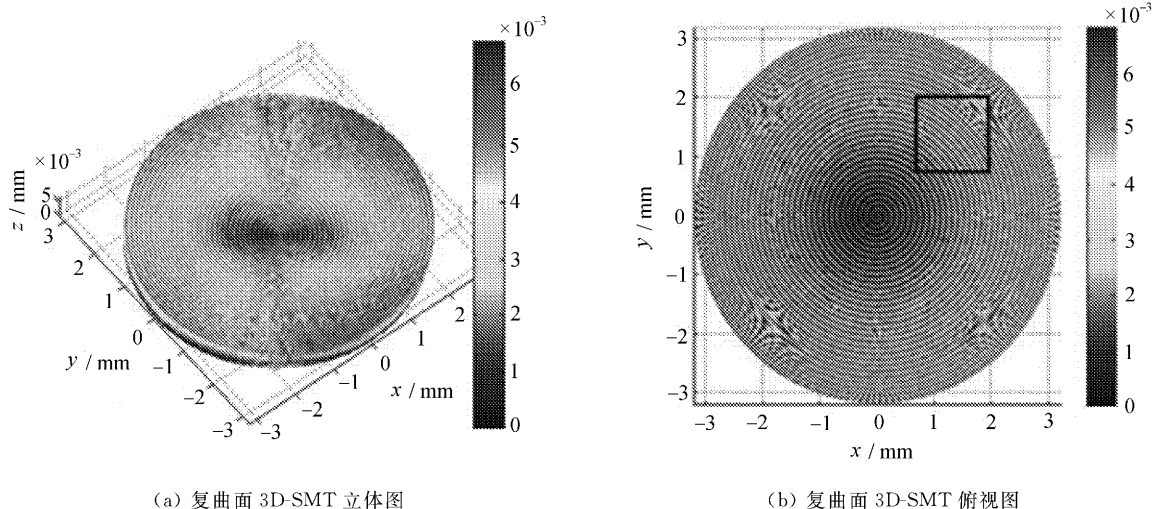


图 2 复曲面 3D-SMT 及其俯视图

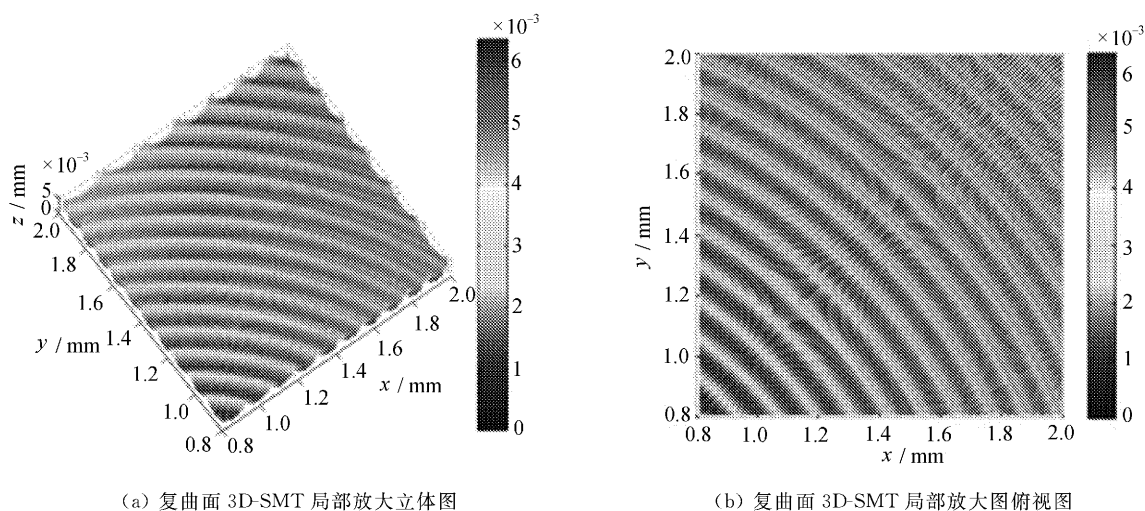


图 3 复曲面 3D-SMT 局部放大图及其俯视图

从图 2 可以看到金刚石车削过程中生成的螺旋线结构, 从图 3 可以清晰地观察到应用 3D-EVC 方法加工 AO 特有的形貌特征。

3 椭圆振动参数对 S_q 的影响

以复曲面为例, 使用文中新定义的 3D-EDE, 通过调整参数, 分析三维椭圆的形状特征及空间相对位置对 S_q 的影响, 设置切削参数见表 2。

表 2 椭圆参数对 S_q 的影响时设置的切削参数

参数	数值
$a_f / (\text{mm}/r)$	0.005
$N / (\text{r}/\text{min})$	240
r / mm	0.5

3.1 三维椭圆形状参数对 S_q 的影响

3.1.1 平面椭圆的振幅比对 S_q 的影响

给定平面椭圆的相位角 $\delta_1 = 0^\circ, \delta_2 = 90^\circ$ 以及绕 y, z, x 轴旋转角度 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 45^\circ$, 椭圆振动频率 $f = 800 \text{ Hz}$, 分析平面椭圆 y, z 轴振幅之比对 S_q 的影响。应用 Matlab 软件, 以

$$\left(\frac{y}{m_1 \sin(\delta_2 - \delta_1)}\right)^2 + \left(\frac{z}{m_2 \sin(\delta_2 - \delta_1)}\right)^2 - \frac{2yz \cos(\delta_2 - \delta_1)}{m_1 m_2 \sin^2(\delta_2 - \delta_1)} = 1 \quad (4)$$

根据三角函数关系, 在研究平面椭圆的相位差对 S_q 的影响时, 只需探讨相位差在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间便可。

$$\begin{cases} \sin(\delta_2 - \delta_1) = -\sin(2\pi - (\delta_2 - \delta_1)) \\ \cos(\delta_2 - \delta_1) = \cos(2\pi - (\delta_2 - \delta_1)) \end{cases} \quad (5)$$

给定平面椭圆的 y, z 轴振幅 $m_1 = 0.003, m_2 = 0.006$, 绕 y, z, x 轴旋转角度 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 45^\circ$, 椭圆振动频率 $f = 800 \text{ Hz}$ 。应用 Matlab 软件, 以 3D-EVC 方法加工复曲面为例, 计算不同相位差的 EVT 的 3D-SMT, 得椭圆相位差与 S_q 的关系曲线如图 5 所示。

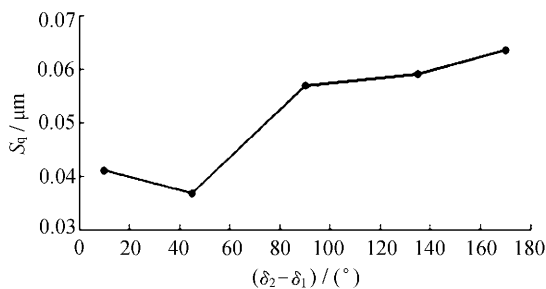


图 5 相位差对 S_q 的影响规律曲线

3D-EVC 加工复曲面, 计算不同振幅比椭圆振动轨迹(Elliptical Vibration Trajectory, EVT)对应的 3D-SMT, 得到椭圆振幅比与 S_q 的关系曲线如图 4 所示。

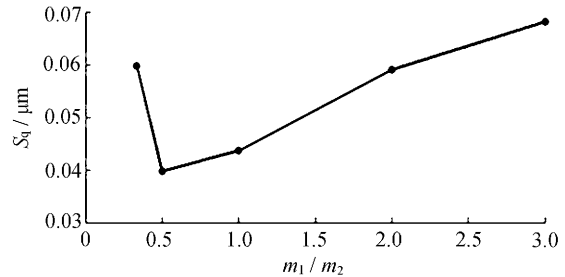


图 4 椭圆振幅比对 S_q 的影响规律曲线

观察发现, 平面椭圆振幅比的改变将影响 S_q , 当振幅比为 1/2 时, S_q 最小。

3.1.2 平面椭圆的相位差对 S_q 的影响

$yo z$ 平面内椭圆的表达式为:

$$\begin{cases} y(t) = m_1 \cos(\omega t + \delta_1) \\ z(t) = m_2 \cos(\omega t + \delta_2) \end{cases} \quad (3)$$

整理有:

观察发现, 平面椭圆相位差的改变将改变 S_q ; 当相位差由 10° 增加至 45° 时, S_q 减小; 当相位差由 45° 增加至 170° 时, S_q 增大。显然, 取相位差为 45° 时, S_q 最小。

3.2 空间三维椭圆位置对 S_q 的影响

3.2.1 y 轴为中心线的平面椭圆旋转角度对 S_q 的影响

给定平面椭圆的振幅 $m_1 = 0.003, m_2 = 0.006$, 相位差 $\delta_2 - \delta_1 = 45^\circ$, 绕 z, x 轴旋转角度 $\theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 45^\circ$, 椭圆振动频率 $f = 800 \text{ Hz}$ 。应用 Matlab 软件, 以加工复曲面为例, 对以 y 轴为旋转中心线, 不同平面椭圆旋转角度的 EVT 进行 3D-SMT 计算, 得到旋转角度与 S_q 的关系曲线如图 6 所示。

观察发现, 用 3D-EVC 方法加工复曲面时:

- 1) 旋转角度由 10° 增加至 135° 过程中, S_q 增大;
- 2) 旋转角度由 135° 增加至 180° 过程中, S_q 减小;
- 3) 旋转角由 180° 增加至 270° 过程中, S_q 增

大;

4) 旋转角由 270° 增加至 315° 过程中, S_q 减小。

显然, 旋转角度为 10° 时, S_q 最小。

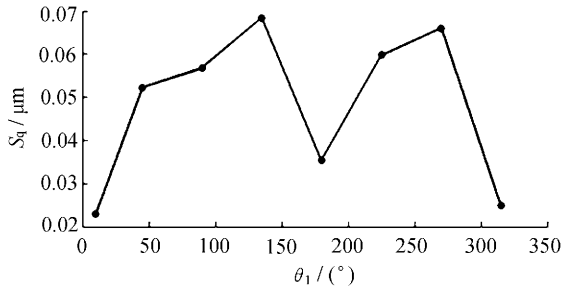


图 6 y 轴为中心线的旋转角度对 S_q 的影响规律曲线

3.2.2 z 轴为中心线的平面椭圆旋转角度对 S_q 的影响

给定平面椭圆的 y, z 轴振幅 $m_1 = 0.003, m_2 = 0.006$, 相位差 $\delta_2 - \delta_1 = 45^\circ$, 绕 y, x 轴旋转角度 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_3 = 45^\circ$, 椭圆振动频率 $f = 800$ Hz。以 3D-EVC 加工复曲面为例, 对以 z 轴为中心线, 不同旋转角度的 EVT 进行 3D-SMT 计算, 得到旋转角度与 S_q 关系曲线如图 7 所示。

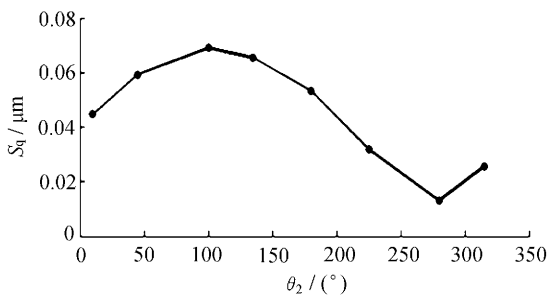


图 7 z 轴为中心线的旋转角度对 S_q 的影响规律曲线

观察发现:

- 1) 旋转角由 10° 增加至 100° 过程中, S_q 增大;
- 2) 旋转角由 100° 增加至 280° 过程中, S_q 减小;
- 3) 旋转角由 280° 增加至 315° 过程中, S_q 增大。

显然, 旋转角为 280° 时, S_q 最小。

3.2.3 x 轴为中心线的平面椭圆旋转角度对 S_q 的影响

给定平面椭圆的 y, z 轴振幅 $m_1 = 0.003, m_2 = 0.006$, 相位差 $\delta_2 - \delta_1 = 45^\circ$, 绕 y, z 轴旋转角度 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, 椭圆振动频率 $f = 800$ Hz。以 3D-EVC 加工复曲面为例, 对以 x 轴为中心线, 不同平面椭圆旋转角度的 EVT 进行 3D-SMT 计

算, 得到旋转角度与 S_q 的关系曲线如图 8 所示。

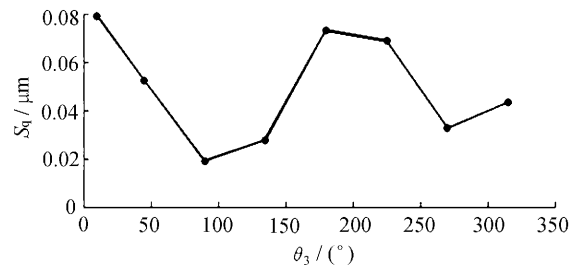


图 8 x 轴为中心线的旋转角度对 S_q 的影响规律曲线

观察发现:

- 1) 旋转角由 10° 增加至 90° 过程中, S_q 减小;
- 2) 旋转角由 90° 增加至 180° 过程中, S_q 增大;
- 3) 旋转角由 180° 增加至 270° 过程中, S_q 减小;
- 4) 旋转角由 270° 增加至 315° 过程中, S_q 增大。

显然, 旋转角为 90° 时, S_q 最小。

3.3 椭圆振动频率对 S_q 的影响

给定平面椭圆的 y, z 轴振幅 $m_1 = 0.003, m_2 = 0.006$, 相位差 $\delta_2 - \delta_1 = 45^\circ$, 绕 y, z, x 轴旋转角度 $\theta_1 = 135^\circ, \theta_2 = 45^\circ, \theta_3 = 45^\circ$ 。以 3D-EVC 加工复曲面为例, 对不同椭圆振动频率的 EVT 进行 3D-SMT 计算, 得到振动频率与 S_q 之间的关系曲线如图 9 所示。

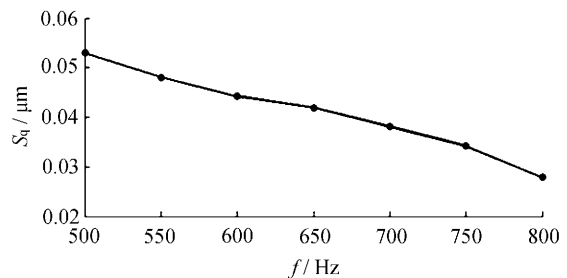


图 9 椭圆振动频率对 S_q 的影响规律曲线

观察发现: 随椭圆振动频率的增加, S_q 逐渐减小, 即加工表面质量得到了提高, 当振动频率 $f = 800$ Hz 时, S_q 最小。

4 结 语

定义了可以表征三维椭圆形状和空间位置的 3D-EDE, 同时对三维表面的 S_q 进行了定义, 揭示了三维 EVTP(形状参数、空间位置参数和振动频率)对 S_q 的影响规律, 在研究某一参数对三维表面的 S_q 的影响规律时, 三维 EVTP 的其他参

数是给定的,其他参数的变化可能会影响这一参数的选择。在下一步的工作中,将以 3D-EDE 的形状参数、空间位置参数以及振动频率作为优化变量,以 S_q 最小作为目标函数,建立三维 EVTP 优化的数学模型,应用优化算法对三维 EVTP 进行优化,为选择最优的三维椭圆的振动参数进行切削实验提供理论基础,从而获得最优的表面质量和最佳的切削性能。

参考文献:

- [1] 本哈德·布朗尼克.非球面光学元件的先进制造和应用技术[M].杭州:浙江大学出版社,2011.
- [2] 张以谟.应用光学[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [3] 赵奕,周明,董申,等.脆性材料塑性域超精密加工的研究现状[J].高技术通讯,1999(4):59-62.
- [4] 张元良,刘欣.黑色金属的金刚石超声振动切削[J].工具技术,1998,32(1):18-19.
- [5] Brinksmeier E, Grimme D, Preuss W. Generation of freeform surfaces by diamond machining[C]// Proc. of the 17th Annual ASPE Meeting.2002.
- [6] Casey M, Wilks J. Some experiments to study turning tools using the scanning electron microscope[J]. International Journal of Machine Tool Design and Research,1976,16(1):13-22.
- [7] 林洁琼,高晓萍.椭圆振动切削研究进展[J].长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(5):499-501.
- [8] Lin Jieqiong, Li Yingchun, Zhou Xiaoqin. Tool path generation for fabricating optical freeform surfaces by non-resonant three-dimensional elliptical vibration cutting[J]. Proceedings of the ImechE Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 228(7):1208-1222.
- [9] 李迎春.光学自由曲面三维椭圆振动切削:刀具路径生成及对加工表面质量影响[D].长春:吉林大学,2014.
- [10] 蒋向前,Blunt L.三维表面测量的发展[J].工程设计,2000(4):98-100.
- [11] 罗丹.自由光学曲面等切屑载荷 A 车削方法的研究[D].长春:吉林大学,2012.