

文章编号: 1002-1582(2011)04-0502-05

## 非球面超光滑加工磨头控制技术研究\*

刘健

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了避免在超光滑加工过程中破坏光学元件的原有面形,同时保证整个表面粗糙度的均匀一致,研究了超光滑加工过程中的磨头控制技术。首先分析了超光滑加工机床的结构形式及超光滑加工工艺特点;然后研究了非球面母线的双圆弧拟合算法以及磨头进给速度的控制方法;最后将所研究的磨头运动控制算法应用于超光滑加工控制软件。以顶点曲率半径为300mm和口径为200mm的抛物面为例,拟合了非球面母线,分析了误差分布曲线以及磨头速度变化曲线,验证了算法的正确性。

**关键词:** 非球面; 超光滑加工; 磨头控制; 非圆曲线

中图分类号: TH706; TP205 文献标识码: A

## Study on polishing head control technology in aspheric supper smooth surface polishing

LIU Jian

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, Jilin, China)

**Abstract:** Polishing head control technique of supper smooth polishing process is researched. In this method, optical element surface shape precision can be held invariant and surface roughness also can be held uniform. Firstly, supper smooth polishing machine structure and polishing technology character are analyzed. Then, double arc fitting algorithm of aspheric surface and polishing head control method are researched. Finally, polishing head motion control algorithm is applied supper smooth polishing technique software. The parabolic lens whose radius of curvature is 300mm and aperture is 200mm is taken as a special case, the generating line of parabolic lens is fitted, and error distribution and feed rate distribution are given. Corrective of algorithm is verified.

**Key words:** aspheric; supper smooth polishing; polishing head control; non-arc curve

### 0 引言

在光学系统中采用非球面可以提高系统的成像质量,矫正多种像差,提高系统的鉴别能力和光学性能,因而得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。同时,现代短波光学、强光光学和薄膜科学的发展对光学元件的表面要求更为苛刻,不仅要求达到很高的面形精

度,而且还要具有很低的表面粗糙度,且无亚表面损伤等,即要求达到超光滑表面<sup>[4]</sup>。总而言之,非球面光学元件的超光滑加工,其难点在于要同时达到极高的面形精度和表面质量。超光滑加工的主要目的在于去除传统抛光过程中产生的亚表面损伤,降低光学表面粗糙度,且在加工过程中尽量不破坏原

\* 收稿日期: 2011-04-25 E-mail: emailtolujian@126.com

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205)

作者简介: 刘健(1983-),男,硕士,主要从事超光滑表面加工技术的研究。

有的面形<sup>[3]</sup>。因此,超光滑加工过程中的一个关键问题是控制磨头按精确的路径及进给速度运动,从而保证元件表面材料的均匀去除<sup>[5-7]</sup>。本文在分析非球面光学元件超光滑加工特点和加工机床结构的基础上,研究了非球面光学元件超光滑加工的磨头运动路径和运动速度控制技术。

## 1 非球面的超光滑加工方法

### 1.1 轴对称非球面

对于轴对称非球面,其母线公式为

$$z = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_i x^i \quad (1)$$

式中  $c = 1/R_0$ , 其中  $R_0$  为顶点曲率半径;  $k$  为圆锥系数, 当  $k < -1$  时为双曲面, 当  $k = -1$  时为抛物面, 当  $-1 < k < 0$  时为椭球面, 当  $k = 0$  时为球面, 当  $k > 0$  时为扁椭球面。

对于某一特定的非球面,  $c, k, N$  及  $\alpha_i (i = 1, \dots, N)$  均为常数, 则非球面母线方程可记为  $z = f(x)$ ,  $x \in (0, D/2)$ , 其中  $D$  为非球面口径。

### 1.2 加工机床的结构

如图1所示,超光滑加工机床为三轴联动数控机床,可用于平面、球面和非球面光学元件的加工。机床的基本结构为龙门式结构,可控轴主要有  $X$  轴、 $Z$  轴、 $B$  轴、 $C$  轴和电主轴。工件装卡在工作台上,在  $C$  轴带动下以设定速度匀速旋转;磨头安装在电主轴轴端,加工过程中以设定速度匀速旋转;线性轴  $X$ 、 $Z$  及摆动轴  $B$  为联动轴,均由交流伺服电机驱动。通过  $X$  轴和  $Z$  轴在水平和垂直方向的运动带动磨头按被加工件的母线形状运动,同时  $B$  轴摆动以保证磨头轴线始终与被加工工件任意一点的法线保持一致。



图1 超光滑加工机床的结构

## 2 磨头轨迹的控制

### 2.1 非球面母线的处理

非球面的母线为非圆曲线,而数控系统只具有直线和圆弧插补功能。相比较而言,圆弧拟合能够更好地逼近目标曲线,且具有更好的光顺性。因此,本文利用双圆弧拟合的方法处理非球面母线  $z = f(x)$ 。具体做法是,对于母线上相邻两个节点  $P_i, P_{i+1}$ ,用彼此相切的两段圆弧拟合目标曲线段,同时两圆弧分别与曲线在节点处的切线相切,且在每个节点处前后两段圆弧相切,从而利用  $2(m-1)$  段圆弧拟合非圆曲线  $f(x)$ 。双圆弧拟合算法的关键是求得两段圆弧的圆心位置  $O_{n1}, O_{n2}$  和半径  $R_{n1}, R_{n2}$ ,这几个参数是圆弧插补指令所需的全部参数。

如图2所示,建立全局坐标系  $OXYZ$  和局部坐标系  $O'X'Z'$ 。全局坐标系与工件坐标系一致,曲线  $z = f(x)$  的节点坐标在该坐标系中给出。局部坐标系的原点位于节点  $P_i$  处,横轴方向为线段  $P_iP_{i+1}$  所在的直线方向,纵轴过点  $P_i$ ,且方向与  $P_iP_{i+1}$  垂直。

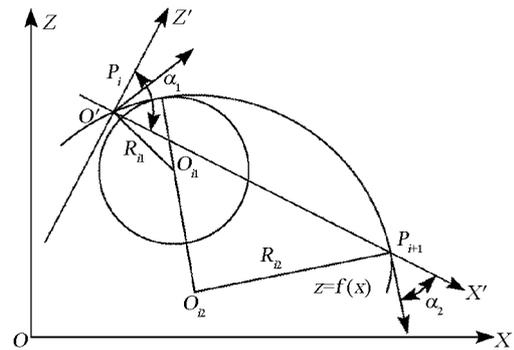


图2 双圆弧拟合原理

对于全局坐标系中任意一点  $(x_i, z_i)$ ,其局部坐标系下的坐标为  $(x'_i, z'_i)$ ,两坐标系存在如下关系:

$$(x'_i, y'_i, z'_i, 1)^T = R(\varphi) T(-P_i) (x, y, z, 1)^T \quad (2)$$

式中平移矩阵  $T(-P_i)$  和旋转矩阵  $R(\varphi)$  分别为

$$T(-P_i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & x_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中  $\varphi$  为  $X'$  轴与  $X$  轴的夹角,可由下式得出:

$$\varphi = \begin{cases} \pi - \arctan\left\{ \frac{[f(x_{i+1}) - f(x_i)]}{(x_{i+1} - x_i)} \right\} & f(x_{i+1}) < f(x_i) \\ \arctan\left\{ \frac{[f(x_{i+1}) - f(x_i)]}{(x_{i+1} - x_i)} \right\} & f(x_{i+1}) > f(x_i) \end{cases}$$

得到的局部坐标系到全局坐标系的变换关系为

$$\begin{cases} x = x_i' \cos \varphi - z_i' \sin \varphi + x_i \\ z = x_i' \sin \varphi + z_i' \cos \varphi + z_i \end{cases} \quad (3)$$

对于相邻两节点  $P_i, P_{i+1}$  其切线与  $X'$  轴的夹角分别为  $\alpha_1, \alpha_2$ , 可由下式计算:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arctan\left(\frac{k_1 - k_3}{1 + k_1 k_3}\right) \\ \alpha_2 = \arctan\left(\frac{k_3 - k_2}{1 + k_2 k_3}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $k_1 = f'(x_i)$  为曲线在  $P_i$  点处的切线斜率;  $k_2 = f'(x_{i+1})$  为曲线在  $P_{i+1}$  点处的切线斜率;  $k_3 = [f(x_{i+1}) - f(x_i)] / (x_{i+1} - x_i)$  为直线段  $P_i P_{i+1}$  的斜率。

左圆弧半径及圆心坐标的计算公式为

$$R_{i1} = \begin{cases} \frac{L_i \left( \sin |\alpha_2| - \sin \frac{|\alpha_1| - |\alpha_2|}{2} \right)}{2 \sin^2 \left( \frac{|\alpha_1| + |\alpha_2|}{2} \right)} & (|\alpha_1| > |\alpha_2|) \\ \frac{L_i \left( \sin |\alpha_2| + \sin \frac{|\alpha_2| - |\alpha_1|}{2} \right)}{2 \sin^2 \left( \frac{|\alpha_1| + |\alpha_2|}{2} \right)} & (|\alpha_1| < |\alpha_2|) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{i1}' = R_{i1} \cdot |\sin \alpha_1| \\ z_{i1}' = \frac{-R_{i1} \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{|\sin \alpha_1|} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $L_i$  为直线段  $P_i P_{i+1}$  的长度。

右圆弧半径及圆心坐标的计算公式为

$$R_{i2} = \begin{cases} \frac{L_i - 2R_{i1} \sin |\alpha_1|}{2 \sin \left( \frac{|\alpha_1| - |\alpha_2|}{2} \right)}, & (|\alpha_1| > |\alpha_2|) \\ -\frac{L_i - 2R_{i1} \sin |\alpha_1|}{2 \sin \left( \frac{|\alpha_1| - |\alpha_2|}{2} \right)}, & (|\alpha_1| < |\alpha_2|) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{i2}' = L_i - R_{i2} \cdot |\sin \alpha_2| \\ z_{i2}' = \frac{R_{i2} \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{|\sin \alpha_2|} \end{cases} \quad (8)$$

局部坐标系下两个圆弧的圆心需要通过关系式式(3)将其变换到全局坐标系中,从而得到用于控制实际加工的各轴进给量。

### 2.2 磨头进给速度的控制

以上算法实现了磨头沿非球面母线的进给,为了实现光学元件表面材料的均匀去除,还需要控制磨头的进给速度。当进给轴匀速进给、 $C$  轴以恒定速度旋转时,磨头的合成运动轨迹为阿基米德螺线,如图 3 所示。对于工件上任意一点,其合成速度  $V = \sqrt{v_n^2 + v_t^2}$ 。其中  $v_n$  为法向速度,此处为线性轴进给速度,为定值;  $v_t$  为切向速度  $v_t = \omega \cdot r$ ,为变值。因此,工件上任意一点的合成速度  $V = \sqrt{v_n^2 + v_t^2} = \sqrt{v^2 + \omega^2 r^2}$ ,即随着磨头向工件边缘抛光,工件的进给速度逐渐加快,等效于磨头在工件上的驻留时间缩短。驻留时间的缩短意味着材料去除量的减少,从而造成抛光不均匀。

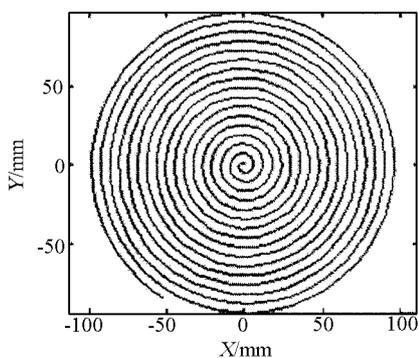


图 3 恒定进给时的磨头路径

为了实现去除量的均匀一致,设置线性轴进给速度与抛光半径成反比例,其表达式为

$$V(r) = \begin{cases} v & r \geq \text{step} \\ \frac{k\delta(r)}{r} & \text{step} < r \leq D \end{cases} \quad (9)$$

式中  $r$  为被加工处的半径;  $\text{step}$  为初始步长;  $k$  为常数,取决于工件角速度  $\omega$  和磨头转速  $\omega_h$  等加工参

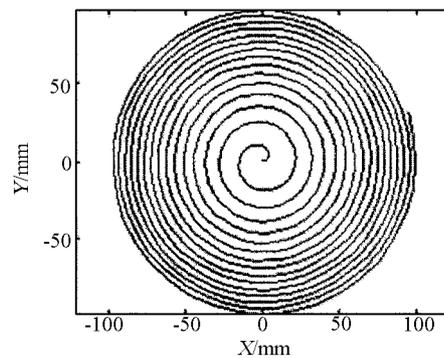


图 4 变速进给时的磨头路径

数;  $\delta(r)$  为各点材料的去除量系数,这里为均匀去除,故为定值。工件轴以恒定速度旋转,进给轴按照式(9)的速度进给。磨头的合成运动路径如图 4 所示,随着磨头向边缘趋近,磨头的螺旋线的间距逐渐减小。

### 3 系统的实现与应用

#### 3.1 系统的实现

根据非球面光学元件超光滑加工的工艺要求,利用本文所述的双圆弧拟合算法和进给速度控制算法,设计了超光滑加工控制软件。该系统选用 VC++ 作为开发工具,采用面向对象的编程思想,具有易于维护、代码重用性和扩展性好等诸多优点。整个软件包括 6 个模块,分别是:光学元件参数输入模块,包括光学元件的口径、非球面光学元件的基本参数以及高次非球面的系数;机床参数输入模块,包括线性轴的行程和速度限制、摆轴摆动范围和速度限制;速度参数输入模块,包括初始的进给速度设置、电主轴转速设置和工件轴转速设置;路径规划和后置处理模块,包括非圆曲线拟合、磨头进给速度控制、磨头变换功能的实现以及工件坐标系设置等;辅助功能设置模块,包括冷却功能、抛光液供给以及液压站等;数控文件预览和输出模块,对生成的数控文件进行预览及输出。软件的整体结构如图 5 所示。

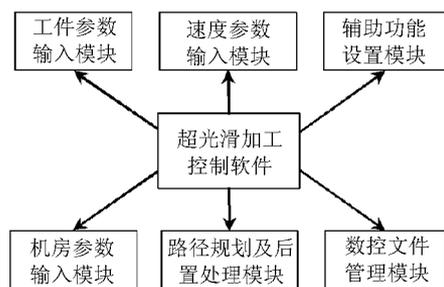


图 5 系统模块图

软件利用 MFC 实现。为了便于参数的输入,将各个模块设计成单独的标签页的形式。根据具体情况,输入光学元件的参数以及其他的加工参数,系统就可以自动生成相应的数控加工 NC 程序,用于控制磨头的运动。软件的部分界面如图 6 所示。

#### 4 结论

本文结合光学非球面光学元件超光滑加工的工艺要求,研究了加工中磨头的控制技术,并在 VC++ 平台下将研究的控制算法应用于自行开发的超光滑加工控制软件。抛光磨头的非球面母线路径拟合误差可以控制在  $0.01\mu\text{m}$ ,而且具有很好的光顺性。通过对磨头进给速度进行控制,实现了各加工点驻留时间的一致性,避免了材料去除的不均匀性,保证了粗糙度的均匀一致性。本文所述的磨头控制方法可以用于非球面超光滑数控加工。

参考文献:



图 6 软件界面

#### 3.2 系统的应用

现以口径  $D = 200\text{mm}$  和顶点曲率半径  $R_0 = 300\text{mm}$  的抛物面为例来验证算法的正确性。该抛物面以顶点为原点的母线方程如式(10)所示。

$$z = \frac{1}{600}x^2 \quad (10)$$

利用本文所述的非圆曲线拟合算法拟合非球面母线,设置的最大拟合误差为  $\delta \leq 0.01\mu\text{m}$ 。图 7 所示为拟合得到的磨头运动路径,图中菱形标记为母线节点位置,分布在两菱形节点间的黑色曲线段为左圆弧,绿色曲线段为右圆弧。图 8 所示为母线拟合误差分布曲线。从图中可以看出,母线拟合误差沿光学元件口径方向逐渐增大,但均控制在  $0.01\mu\text{m}$ ,满足工艺要求。任意两节点间误差分布呈现两个峰值和一个谷值,且节点处误差为零,这与双圆弧拟合的原理相符。

得到的速度分布曲线如图 9 所示,在第一个步长范围内进给速度为恒定值。随着抛光半径的增大,进给速度与抛光半径呈反比规律逐渐减小。

- [1] 倪颖,李建强,王毅,等.一种高效率小口径非球面数控抛光方法[J].光学技术,2008,34(1):33—35.  
NI Ying, LI Jianqiang, WANG Yi, et al. An efficient method of computer controlled polishing for small aspheric lens [J]. Optical Technique, 2008, 34(1): 33—35.
- [2] 张巨帆,王波,董申.超光滑表面加工方法的新进展[J].光学技术,2007,33(增刊):150—154.  
ZHANG Jufan, WANG Bo, DONG Shen. A new development of ultra-smooth surface machining technology [J]. Optical Technique, 2007, 33(Suppl.): 150—154.
- [3] 许金凯,张学军,于化东.非球面元件精密铣磨加工技术研究[J].光学技术,2009,35(5):761—765.  
XU Jinkai, ZHANG Xuejun, YU Huadong. Study of precision milling and grinding process technology for aspheric components [J]. Optical Technique, 2009, 35(5): 761—765.
- [4] Zhenxiang Shen, Bin Ma, Zhanshan Wang, et al. Fabrication of flat and supersmooth surfaces with bowl-feed polishing process [C]. Proceedings of SPIE, 6722: 1—7.

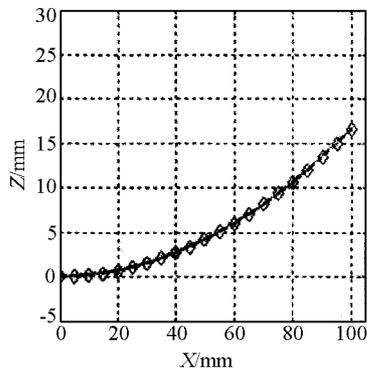


图7 磨头拟合路径

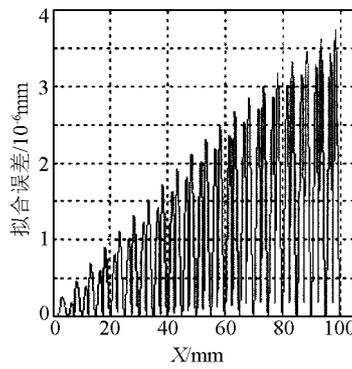


图8 母线拟合误差

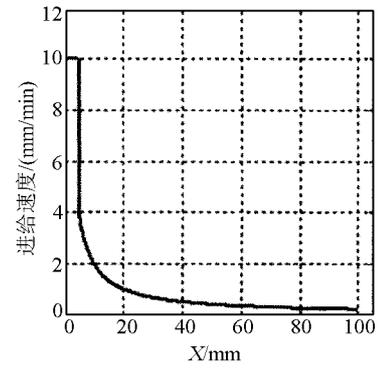


图9 速度分布曲线

[5] Manabu Ando, Mahito Negishi, Masahumi Takimoto, et al. Super-smooth polishing on aspherical surfaces( II) -Achievement of a super-smooth polishing[C]. Proceedings of SPIE, 2576: 348—356.

[6] 陈明君, 赵清亮, 董申, 等. 基于双圆弧步长伸缩数控插补非圆曲线算法的研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 111—116.

Chen Mingjun, Zhao Qingliang, Dongshen, et al. Study on the aspheric curve algorithm based on the bi-arc step length flex numerical

control interpolation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 111—116.

[7] 孙希威, 张飞虎, 董申, 等. 磁流变抛光光学曲面的两级插补算法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 61—64.

SUN Xiwei, ZHANG Feihu, DONG Shen, et al. Two-stage interpolated algorithm for Magnetorheological finishing optical curved face [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 61—64.