

非球面镜超光滑加工控制软件的研究

刘健, 马占龙, 王君林

(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, 长春 130033)

摘要: 根据非球面光学元件超光滑加工工艺的要求, 研究并实现了非球面镜超光滑数控加工的磨头控制算法。首先, 从加工的角度分析了软件的功能要求, 提出了软件的整体结构以及路径规划及后置处理模块的处理流程; 然后, 研究了回转对称非球面的母线离散算法, 并在此基础上研究了非球面母线的双圆弧拟合算法。针对超光滑机床的机械结构, 给出了其后置处理算法; 最后, 利用所述的控制算法在 VC++ 环境下开发了超光滑加工控制软件, 并成功应用于超光滑数控加工。

关键词: 非球面; 超光滑加工; 非圆曲线拟合; 后置处理

中图分类号: TG76

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870 (2011) 02-0062-05

Study on Control Software of Supper Smooth Polishing for Aspheric Lens

LIU Jian ,MA Zhanlong ,WANG Junlin

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

Abstract : According to the requirement of supper smooth polishing of aspheric optical elements , the polishing head controlling algorithm was researched and realized which is used in supper smooth polishing of aspheric lens. First , function requirement of the software was analyzed from craft view. Overall structure of the software and the processing flow of tool path programming and post processing are extraction. Then , bi-arc fitting algorithm of the generating line of axis-symmetrical aspheric elements is researched. Algorithm of post processing is given against to supper smooth polishing machine structure. At last , supper smooth controlling software is developed based on these algorithms at VC++ platform. The NC program generated by this software can be well used in the polishing process.

Key words : aspheric surface ; supper smooth polishing ; noncircular curve fitting ; post processing

非球面光学元件具有降低系统光学元件数量、缩小光学系统尺寸、改善光学系统成像质量等诸多优点, 其应用范围越来越广泛^[1]。另一方面, 随着现代光学技术的发展, 对光学元件的加工精度、表面质量要求越来越高^[2]: 不仅要求达到较高的面形精度和表面粗糙度, 同时还要求光学元件无亚表面损伤, 即要求光学元件达到超光滑表面^[3] (表面粗糙度 $R_q < 1\text{nm}$)。为了使非球面镜表面达到超光滑, 除了加工设备达到很高的机械精度及合理的加工工艺外, 还需要保证磨头的高精度控制。磨头的运动控制与加工设备的具体结构有关, 但更依赖于

优越的控制算法^[4-7]。控制算法的实现最终要靠数控设备来实现, 因此需要将控制算法转换成具体的加工程序。而机械加工中普遍采用的 CAM 软件并不适用于光学加工这一特殊领域, 需要开发专用的超光滑加工控制软件。

本文根据计算机控制光学表面成形技术 (Computer control optical surfacing, CCOS) 的思想, 将磨头的路径规划思想以及后置处理技术等引入到超光滑表面加工技术中, 研究了超光滑加工中磨头运动控制的关键算法, 以控制磨头按照精确的位置、方向、路径及驻留时间运动。最后在 VC++ 软件平

收稿日期: 2011-03-30

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, 研究实习员, 主要从事超光滑表面加工技术研究, Email: emailtolijuan@126.com。

台上将超光滑加工的关键算法得以实现并开发了加工控制软件。

1 控制软件体系结构设计

超光滑加工的主要目标是降低光学元件的表面粗糙度,去除亚表面损伤。需要对整个加工过程严格控制,要求磨头运动轨迹精确、磨头与工件距离保持恒定以及各点驻留时间均匀。从而使得工件表面材料均匀去除,最终使得整个表面粗糙度具有均匀一致性。另外,要求加工过程中磨头轴线方向与工件任意一点法线方向一致,以使磨头底面各点与工件间距离保持一致。

1.1 软件功能分析

基于以上分析,加工控制软件主要包括如下几个模块: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,包括线性轴的行程及速度限制、摆轴摆动范围及速度限制;速度参数输入模块,包括初始的进给速度设置、电主轴转速设置及工件轴转速设置;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;路径规划及后置处理模块,包括路径选择、非圆曲线拟合、工件坐标系设置、安全高度设置以及磨头变换功能的实现;数控文件预览及输出模块,对于生成的数控文件进行预览及输出。软件的整体结构如图1所示。

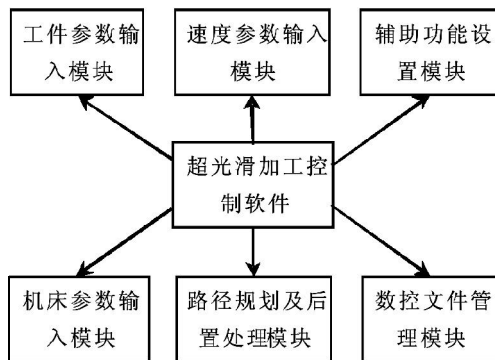


图1 软件结构图

Fig.1 Structure of the software

1.2 路径规划及后置处理模块设计

该模块主要实现路径规划及后置处理两个功能,是整个软件的核心。受机床结构限制,超光滑加工控制软件主要采用同心圆及螺旋线两种路径。对于同心圆路径其实现方式是:磨头在进给轴的控制下沿工件母线离散的方式进给,工件轴按照设定速度旋转;对于螺旋线路径其实现方式是:磨头在

母线方向上连续进给,工件轴按照恒定速度旋转。以上两种控制方式的关键是保证磨头精确的沿母线方向进给并保证在工件的任意点驻留时间一致。

后置处理部分主要用于:针对具体机床结构,将按非球面母线计算得到的磨头位置矢量及方向矢量由工件坐标系变换到机床坐标系中;磨头变换功能的实现;安全高度以及参考坐标系的设置等。模块的主要处理流程如图2所示。

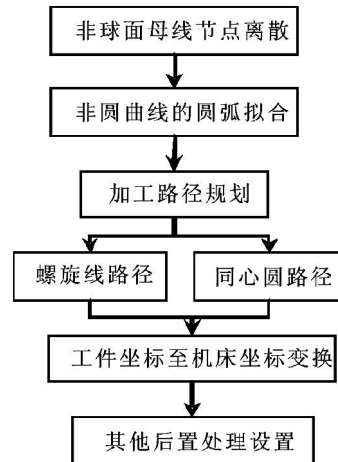


图2 路径规划及后置处理流程

Fig.2 Flow chart of tool path programming and post processing

2 控制软件的主要算法

回转对称非球面的母线可以表达为:

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

式中各项定义:

c : 顶点曲率, $c=1/R_0$, R_0 为顶点曲率半径。

k : 圆锥系数, 当 $k < -1$ 时, 为双曲面; $k = -1$ 时为抛物面; $-1 < k < 0$ 时为椭球面; $k = 0$ 时为球面; $k > 0$ 时为扁椭球面。对于某一特定非球面, c , k , N , $\alpha_i (i=1 \dots N)$ 以及口径 D 可以通过软件界面设定。因此, 非球面母线方程可记为 $z = f(x)$, $x \in (0, D/2)$ 。

2.1 节点离散算法

非球面母线 $z = f(x)$ 为非圆曲线, 需要对其进行离散化处理进而得到曲线的一系列节点 $P_i (i=1 \dots m)$, 节点数为 m 。本文采用等间距的方法进行曲线节点的计算。节点的计算过程为: 将曲线沿 X 坐标轴方向等分成间距为 D_{step} 的若干曲线段; 计算曲线上相应点 P_i 的坐标值; 计算曲线 $z = f(x)$ 与相邻两节点连线 $P_i P_{i+1}$ 间的法向距离 d_{i0} 。 D_{step} 的数值应保证曲线 $z = f(x)$

与相邻两节点连线 $P_i P_{i+1}$ 间的法向距离的最大值小于设定误差,即 $d_{\max} < \delta_{\text{set}}$ 。若 $d_{\max} > \delta_{\text{set}}$,则将步长修改为 $D_{\text{step}} = K \cdot D_{\text{step}}$, K 为步长缩短系数。重复上述计算过程直至满足要求。该算法的流程如图3所示。

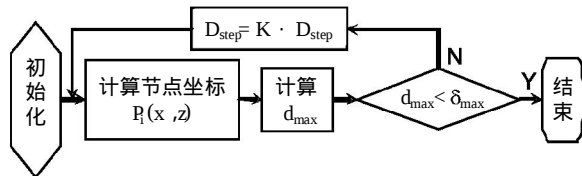


图3 节点计算流程

Fig.3 Processing of Node Calculation

2.2 非圆曲线拟合算法

非球面的母线为非圆曲线,而数控系统只具有直线插补和圆弧插补功能。相比而言,圆弧插补具有较高的逼近精度和更好的曲线光顺性,并且生成的程序段较少。因此本文采用双圆弧拟合算法拟合非圆曲线。如图4所示是双圆弧拟合的原理图。

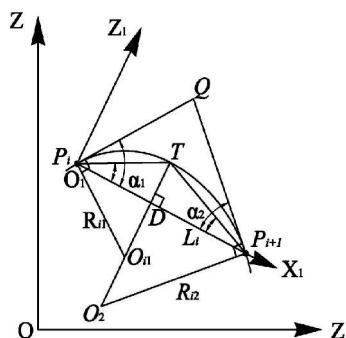


图4 双圆弧拟合原理

Fig.4 Schematic of double arc fitting

所谓双圆弧拟合是指:对于上文得到的节点序列 $P_i (i=1 \dots m)$,要求每相邻两个节点 P_i 、 P_{i+1} 间都用相切的两段圆弧拟合且在每个节点处的前后两段圆弧相切,从而利用 $2(m-1)$ 段圆弧拟合非圆曲线 $f(x)$ 。其中两圆弧公切点的轨迹是过 P_i 、 P_{i+1} 及内心 T 的一段圆弧。双圆弧拟合算法得到的是一系列圆弧的圆心位置 O_{i1} 、 O_{i2} 及半径 R_{i1} 、 R_{i2} ,这些参数也是圆弧插补指令所需的全部参数。双圆弧拟合算法的流程如图5所示。

2.3 后置处理算法

非圆曲线拟合得到的圆心坐标在工件坐标系中描述,需要将其变换到具体的机床坐标中。为了便于描述,建立如图6所示的坐标系。其中坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 是与工件固连的坐标系,计算得到的磨头位置数据在该坐标系中给出。一般将其原点建立在工件的中心顶点上,其坐标轴方向与机床坐标系一

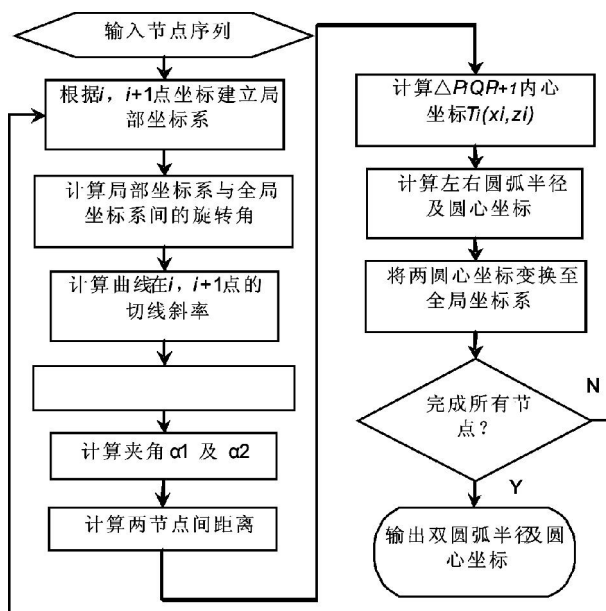


图5 双圆弧拟合算法流程

Fig.5 Flow chart of double arc fitting algorithm

致; $O_p X_p Y_p Z_p$ 为与磨头固连的坐标系,称为磨头坐标系,其原点位于磨头底面中心处,其坐标轴方向与机床坐标系一致; $O_b X_b Y_b Z_b$ 为与回转轴B固连的坐标系,称为摆轴坐标系,其原点位于磨头轴线与B轴轴线的交点处,其坐标轴方向与机床坐标系一致。

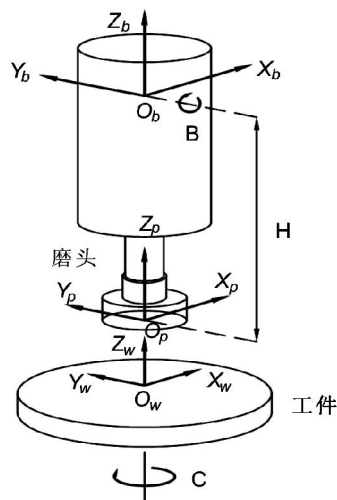


图6 机床坐标系

Fig.6 Coordinate system of machine

通过 $O_p X_p Y_p Z_p$ 相对于 $O_b X_b Y_b Z_b$ 旋转及 $O_b X_b Y_b Z_b$ 相对于 $O_w X_w Y_w Z_w$ 平移坐标变换,最后可以得到如下两个关系式:

$$\begin{aligned} (i, j, k, 0)^T &= R(\theta_b) T(r_s + P_b) T(-P_b) \\ (0, 0, 1, 0)^T & \\ (x, y, z, 1)^T &= R(\theta_b) T(r_s + P_b) T(-P_b) \end{aligned} \quad (2)$$

$$(0, 0, 1, 0)^T \quad (3)$$

上式中, T 和 R 分别为平移和回转运动的齐次坐标变换矩阵。由计算机图形学知识可以得到:

$$T-P_b = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -P_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T(r_s+P_b) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & s_x \\ 0 & 1 & 0 & s_y \\ 0 & 0 & 1 & s_z+P_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R(\theta_b) = \begin{pmatrix} \cos\theta_b & 0 & \sin\theta_b & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_b & 0 & \cos\theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

由式(2)、(3)得到超光滑加工机床的运动变换为:

$$\begin{pmatrix} i \\ j \\ k \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta_b \\ 0 \\ \cos\theta_b \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x - H\sin\theta_b \\ 0 \\ s_x - H\cos\theta_b \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式(7)、(8)为超光滑加工机床的运动学解析关系式。描述了磨头位置矢量及方向矢量与机床进给量的关系。通过进一步计算,可得:

$$\begin{cases} \theta_b = \arcsin i \\ s_x = x + H\sin\theta_b \\ s_z = z + H\cos\theta_b \end{cases} \quad (9)$$

式中 x, z, i 是磨头位置坐标的相关量,可通过非球面母线的节点离散得到; H 可以通过建立工件坐标系得到;计算得到的 θ_b, s_x, s_z 为各个进给轴的实际进给量,可用于控制 X, Z 及 B 轴的运动。

3 软件的实现

3.1 数据结构

光学元件的各个参数可以定义为结构体的成员变量,其数据结构如下:

```
typedef struct
{
    double m_lensapt; //镜片口径
    double m_radius; //顶点曲率半径
```

```
double m_k; //二次系数
double m_N; //非球面次数
double m_a[M]; //高次系数, M ≥ N
} lenspar;
```

对于软件中的速度参数设置以及其他模块也用类似的结构体存储其参数,以便于模块间数据调用。

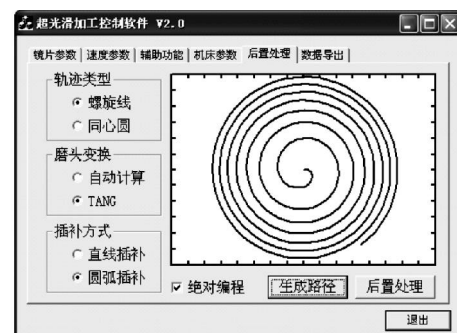
非球面母线离散后的节点数量 m 为变量。由于节点的数量不确定,无法利用普通数组实现数据的存储。考虑到线性链表操作的复杂性,程序中采用 MFC 的动态数组类 $CArray$ 。其定义如下:

```
CArray<double, double> m_Xknot;
CArray<double, double> m_Zknot;
CArray<double, double> m_Bknot;
m_Xknot.SetSize(m);
m_Zknot.SetSize(m);
m_Bknot.SetSize(m);
```

对于一个完整的数控文件包括:程序开始符、程序辅助信息、程序主体部分以及程序结束符。程序的主体部分是由若干程序段组成的,程序段的格式为:

```
NXXX GXX X±XX Y±XX Z±XX I±XX J±XX
MXX SXX FXX <CR>
```

各个程序段的功能字及长度依据其功能各不相



(a)路径规划及后置处理界面



(b)数控文件管理界面

图7 软件界面

Fig.7 Software interface

同,软件中利用 CString 类的对象来存储。该存储方式具有操作灵活且方便的特点。

3.2 软件的实现

依据文中所述算法及数据结构,在 VC++ 平台下开发了非球面超光滑加工磨头控制软件。图 7(a) 所示为路径规划及后置处理模块的界面。在该界面中可以选择加工轨迹的类型、磨头法线方向的实现方式等,并且可以预览加工轨迹。图 7(b) 所示为数控文件管理模块的界面。在该界面中可以预览加工程序并将数控程序保存。

4 结论

本文结合光学非球面镜超光滑加工的工艺要求,研究了超光滑加工中磨头控制的关键算法,并在 VC++ 平台下开发了控制软件。该软件可以生成标准的数控文件,并在超光滑加工机床上进行了测试实验。结果表明:该软件生成的数控文件可以控制磨头的运动,以此验证了文中算法的正确性和控制软件的可行性。

(上接第 53 页)

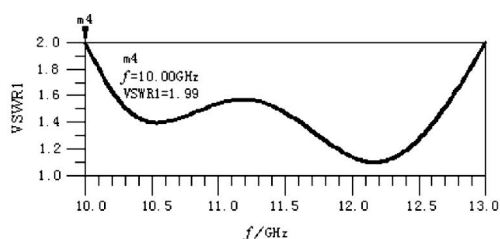


图 5 输入端口驻波比仿真结果

Fig.5 Simulation input VSWR

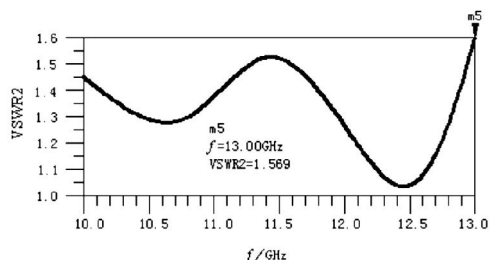


图 6 输出端口驻波比仿真结果

Fig.6 The simulation results output port VSWR

不同的前置放大器进行信号的放大和读取。在选择前置放大器前应该考虑以下几个主要问题:(1)为了保证探测器的性能完全由探测器材料性质决定,考虑如何获得最低的放大器噪声;(2)为了

参考文献

- [1] 许军凯,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.
- [2] 陈逢军,尹韶辉,范玉峰,等.一种非球面超精密单点磨削与形状误差补偿技术[J].机械工程学报,2010,46(23):186-191.
- [3] 高宏刚,曹健林,朱镛,等.超光滑表面及其制造技术的发展[J].物理学,2000,29(10):610-614.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 宋辞,戴一帆,彭小强,等.光学镜面磁流变抛光的后置处理[J].光学精密工程,2010,18(8):1715-1721.
- [7] 黄浩,郭隐彪,谢仁宁.高精度非球面制造系统控制软件的设计[J].厦门大学学报:自然科学版,2004,43(2):179-182.
- [8] 孔繁星,于正林,朴承镐,等.基于 UMAC 加工非球面光学零件 PVT 控制轨迹研究[J].长春理工大学学报:自然科学版,2009,32(2):204-206.

保证当热成像阵列器件单元面积减小时,仍然可以获得高性能和高集成度的信号读出电路,在集成制造时可以考虑设置最小的布线面积;(3)如何保证在信号读出速率高、阵列规模增大的情况下获得高信噪比。

参考文献

- [1] 王志,侯峙云,刘宝华,等.热释电红外探测器综合性能参数的测试[J].红外技术,2002,24(3):41-43.
- [2] 高昕,许峰.红外探测技术对多目标弹道参数的测量[J].光电工程,2004,33(10):5-8.
- [3] Scribner D A, Kruer M R, Killiany J M. Infrared focal plane array technology[J]. Proc IEEE, 1991, 79: 66.
- [4] Bertocco M, Flammini A, Marioli D, et al. Robust and Accurate Real-Time Estimation of Sensors Signal parameters by a DSP Approach[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2000, 49: 685-690.
- [5] Geiger R L, Allen P E, Strader N R. VLSI design techniques for analog and digital circuits[M]. New York: McGraw Hill, 1990.
- [6] Sansen W M C, Chang Z Y. Limits of low noise performance of detector readout front ends in CMOS technology[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1990, 37: 1375.