

# 非球面镜超精密加工系统控制软件的研究<sup>\*</sup>

魏丽珍 郭隐彪 苏秋丽 龚子伟  
(厦门大学, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对非球面镜超精密加工的需要, 设计了基于工控 PC 机和 Windows2000 操作系统、选用 VB 作为开发工具及远程传输技术, 实现非球面镜超精密加工、加工误差补偿及远程数据传输等多项功能的软件控制系统。系统采用模块化设计技术, 可实现初加工, 补偿加工和精密测量之间数据的自动转化, 满足了超精密非球面镜加工精度的要求。

**关键词:** 非球面 制造 误差补偿 远程传输 Visual Basic

## Study on Control Software of Ultra-precision Manufacturing System for Aspheric Mirror

WEI Lizhen, GUO Yinbiao, SU Qiuli, GONG Ziwei  
(Xiamen University, Xiamen 361005, CHN)

**Abstract:** According to the requirement of aspheric mirror ultra-precision manufacturing, the control software of the manufacturing system is designed, with the multifunction of ultra-precision manufacturing, error compensation and remote transmission. It is based on industrial PC and Windows2000 operating system, uses Visual Basic 6.0 as development tool. Using the technology of modularization design, the system can realize automatic data transform among first machining, compensation machining and precision measuring so that it has met the demand of machining precision.

**Keywords:** Aspheric Surface; Manufacturing; Error Compensation; Remote Transmission; Visual Basic

非球面镜具有优良的光学性能, 因而在现代光学系统中起着重要作用。一些高精度非球面镜已成功应用于先进的光学望远系统、高分辨率的电视摄像系统、高灵敏度的红外传感系统、激光制导、红外探测等领域<sup>[1]</sup>。但高性能空间光学系统设计和非球面制造技术仍是现代空间光学发展的主要瓶颈, 特别是超精密非球面的制造难度更大。随着超精密机床数控技术的发展, 超精密非球面镜的加工可采用超精密磨削、研磨及抛光方式<sup>[2]</sup>。超精密磨削能保证较高的加工精度( $< 0.1 \mu\text{m}$ ) 和良好的表面粗糙度( $R_a \leq 0.025 \mu\text{m}$ ), 且有加工效率高等优点<sup>[3]</sup>。研究表明, 影响超精密加工的因素除了加工机理、被加工材料和加工设备外, 还有检测与误差补偿等<sup>[4]</sup>。因此, 完善的超精密非球面制造控制软件应具备多方面的功能, 以提高工件表面精度<sup>[5]</sup>。

本文针对以上问题, 设计了提高非球面加工精度的控制方案: (1) 根据工件的非球面公式及砂轮加工参数, 生成初始加工 NC 代码文件; (2) 初始加工后, 将测

量出的工件实际加工尺寸与理论加工尺寸比较, 通过误差补偿技术, 生成补偿加工的 NC 代码文件进行补偿加工。另外, 为便于工控 PC 机对远程数控机床的加工控制, 设计了远程传输控制。

## 1 体系结构设计

体系结构设计是软件系统中最本质的东西。良好的体系结构意味着普遍适用、高效、稳定。

该系统软件采用层次结构的设计方案, 条理清晰, 可读性强。下面进行系统功能及数据流分析。

### 1.1 系统功能分析

根据小型非球面制造控制系统功能的需要, 采用自顶向下、逐层细分的方法对系统进行分析。将控制系统划分为 3 个子系统: 加工轨迹生成子系统、误差补偿子系统和远程传输子系统, 如图 1 所示。3 个子系统再逐层细分, 达到一定的控制功能。

\* 国家“8638042416”基金资助项目

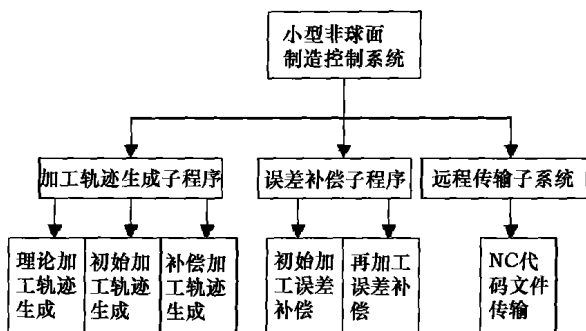


图1 系统结构图

加工轨迹子系统是非球面制造系统最基本的组成部分。它具有的功能有如下。

(1) 理论加工轨迹的生成。通过设置非球面表面参数,生成理论加工的XZ坐标,即理论轮廓线。它可作为对实际加工轨迹误差补偿的依据。

(2) 初始加工轨迹的生成,即实际加工轨迹的生成。首先根据设置的加工参数和理论加工的XZ坐标,转换为实际加工的XZ坐标;其次生成实际加工的XZ坐标文件;最后生成数控机床加工所需的NC代码文件。

(3) 补偿加工轨迹的生成。将实际加工轮廓线与理论加工轮廓线比较,进行误差补偿,生成补偿加工的XZ坐标文件,再生成补偿加工的NC代码文件。

误差补偿子系统是提高非球面制造精度的关键的系统。由于机床误差和测量误差的影响,理论加工和实际加工难免存在一定的误差。为了提高工件表面的加工质量,必须采取误差补偿措施。图2所示为非球面工件表面误差曲线。分析步骤如下:

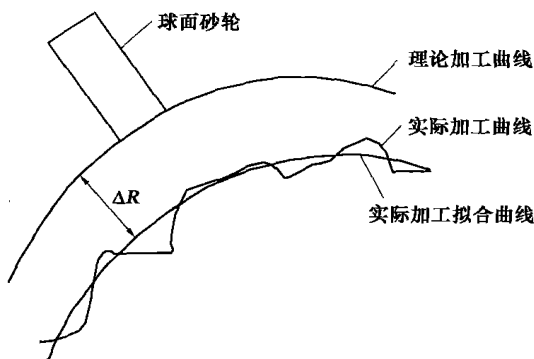


图2 非球面工件表面误差

- (1) 根据实测误差拟合出补偿误差曲线;
  - (2) 求出球面砂轮半径误差  $\Delta R$ ;
  - (3) 分离误差  $\Delta R$ , 得到补偿加工的误差数据;
  - (4) 叠加补偿误差数据得到实际补偿加工轨迹。
- 该子系统包括初始加工误差补偿和再加工误差补

偿。初始加工后,将测量得到的表面轮廓数据与理论加工的数据相比较,采用误差分离方法进行误差补偿。为了尽量减小误差,使工件表面精度和表面粗糙度更接近理论值,可对加工轨迹进行反复误差补偿。

远程传输子系统是非球面制造控制的附加系统,但起着非常重要的作用。它负责将生成的NC代码文件传输到远程数控机床,便于加工控制。

### 1.2 系统数据流分析

为了进一步了解系统整体工作原理,系统采用数据流分析模式,通俗易懂,一目了然。图3所示为系统数据流图。箭头源点表示输入的数据,箭头表示数据流,箭头终点表示输出的数据,圆圈表示对数据的加工处理过程。在数据流图中,如果有两个以上数据流指向一个加工或从一个加工中引出,则这些数据流之间往往存在一定的关系,或缺一不可,或不可同时成立。数据流之间的星号则代表前者,例如要生成补偿加工XZ坐标文件,就必须有三个数据源同时输入:理论加工XZ坐标、实际加工XZ坐标文件及测量仪数据。三者共同经过误差补偿加工,才能得到目标数据。数据流之间无星号时,可理解为多取一时目标数据才生成,例如在砂轮控制参数输入前提下,数据源实际加工XZ坐标文件和补偿加工XZ坐标文件两者有且只有一个输入时,NC代码文件转换加工才有效,才能生成NC代码文件。最后NC代码文件经远程通讯传输到数控机床,数据流才得以结束。

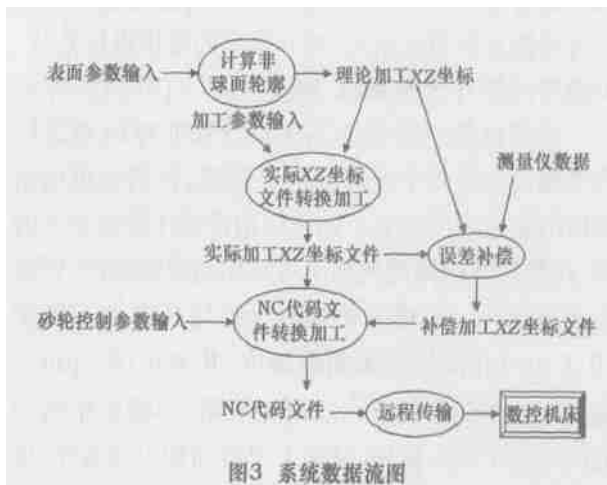


图3 系统数据流图

## 2 模块设计

软件采用模块化设计,要求保持“功能独立”,条理清晰,有利于开发、调试及维护工作。“功能独立”并非绝对的独立,各模块之间可进行信息交流,互相配合,以实现系统的某些功能。根据对控制软件功能的分

析,划分以下5个模块:

### 2.1 参数设置模块

参数设置模块分为3种参数设置,分别起到不同的控制作用。

首先设置表面参数及选择表面类型(包括球面和非球面),为计算理论加工轨迹作好准备。

其次设置加工参数,包括工件和砂轮参数、工件类型(水平轴和垂直轴)和砂轮类型(球面砂轮和圆弧砂轮)的选择及凹凸面的选择等。这部分参数设置可用于理论加工轨迹到实际加工轨迹的转换。

最后设置砂轮控制参数(包括初始加工点坐标和砂轮进给速度等),为生成数控机床所需的NC代码文件提供了依据。

### 2.2 加工轨迹生成模块

#### (1) 理论加工轨迹的生成

根据设置的非球面表面参数和选择的表面类型,生成理论加工轨迹。其中轴对称非球面公式可表示为

$$z = - \frac{CX^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2X^2}} - \sum_{i=1}^n a_i X^i \quad (1)$$

式中

$C = \frac{1}{R}$ ,  $R$  是非球面基础曲率半径

$K = 1 - e$ ,  $e$  是非球面偏心率

$a_i$  是非球面系数

由式(1)可以得到球面公式为

$$z = - \frac{X^2}{R + \sqrt{R^2 - (2 - e)X^2}} \quad (2)$$

将工件的  $X$  轴均匀分为  $N$  段加工区,砂轮也均匀分为相对应的  $N$  段工作区。将输入的非球面表面参数代入非球面计算公式,计算出每一均分  $X$  对应的理论  $Z$  坐标值,即生成理论加工  $XZ$  坐标。

#### (2) 理论加工轨迹到实际加工轨迹的转换

由于各种加工因素的影响,理论加工轨迹不能直接用来加工,必须结合实际情况,进行一系列转换,生成实际加工轨迹。该模块结合加工参数,采用迭代法进行转换,达到实际加工的要求。

### 2.3 远程传输模块

采用串口传输,约定统一的通讯协议将工控PC的串口与远程机床PC的串口连接。根据数控机床的不同类型,设置不同的头文件格式及数据位、奇偶校验、停止位、波特率等串口通讯参数,以保证准确传输。

### 2.4 误差补偿模块

打开测量仪数据文件,和理论加工轨迹进行比较。

对存在的误差,结合初始加工  $XZ$  坐标文件进行误差补偿,从而提高了超精密非球面的加工精度。误差补偿后,生成补偿加工  $XZ$  坐标文件及NC代码文件。

### 2.5 图形显示模块

由于砂轮的形状精度、尺寸精度及机床误差的影响,实际加工无法完全按照理论加工曲线加工。为了提高精度,必须进行误差补偿加工。该模块便于用户实时观察理论轮廓线和实际轮廓线之间的误差动态。

## 3 程序设计

采用结构化程序过程设计,清晰明了,有利于软件的设计、开发、调试及维护。

### 3.1 数据结构与算法

程序设计过程中,应尽量避免编写繁琐混杂的程序。图4所示为非球面控制系统软件程序框图。采用合理的数据结构与算法,有利于编程条理清晰、复用方便以及功能易于实现。例如误差补偿过程中采用最小二乘法,理论加工轨迹到实际加工轨迹的转换采用迭代法等。

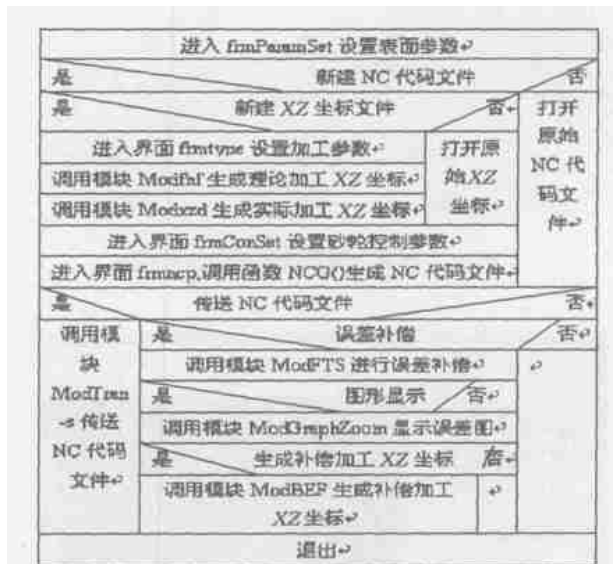


图4 非表面制造系统软件程序框图

### 3.2 代码实现

软件采用基于Windows平台的可视化语言VB为开发工具。VB采用了面向对象的编程思想,具有功能强大、易于维护、可扩展性和代码重用等诸多优点。

### 3.3 软件功能测试

组装测试:测试系统整体控制功能。将各模块组装起来,采用自顶向下的方法运行各模块,从参数设置、加工轨迹生成、远程传输、误差补偿到图形显示,如此反复调试,并未发现程序错误。

模块测试: 单独测试各模块的功能。以模块为单位进行测试, 包括代码复审、动态调试等内容。发现有错误代码, 排除错误代码后再反复测试, 直至运行结果正确。

实验表明: 该软件程序设计合理, 系统功能较齐全, 达到了超精密非球面加工系统的控制要求。

#### 4 用户界面设计

用户界面设计最重要的是合适性, 即界面是否与软件功能相融洽。其次是风格和广义美。基于界面美的3个内涵, 设计了非球面控制软件的界面。它具有适合人机对话、运行方便和实用的特点。图5所示为远程传输系统界面。用户可方便选择传送的机床类型, 设置串口传输参数以及预览传送文件等。图6所



图5 非球面制造系统远程传输界面

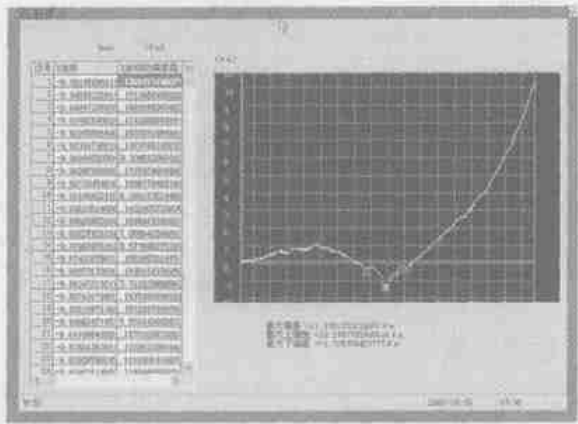


图6 加工表面轨迹误差界面

示为加工表面轨迹误差界面。左边的数据与右边的图形一一对应, 让用户一目了然, 可迅速掌握误差动态。界面实现模块化设计, 清晰直观。

#### 5 结语

根据超精密非球面镜加工的要求, 设计并完成了超精密非球面制造系统控制软件, 总结如下:

(1) 系统实现了对球面、轴对称非球面的超精密加工控制的要求;

(2) 系统采用了误差补偿加工技术, 大大提高了加工精度;

(3) 系统实现了远程传输功能, 便于加工控制;

(4) 该系统控制软件已投入使用, 误差补偿精度可达  $1.5 \mu\text{m}$ 。虽采用误差补偿加工技术, 但实际加工与理论加工仍有偏离;

(5) 与传统的控制软件相比, 具有加工精度高, 操作方便, 实时补偿加工控制等优点, 大大优化了加工表面的质量;

(6) 下一步目标是解决复杂非球面工件加工控制存在的问题, 扩充非球面制造系统的功能, 进一步完善非球面制造控制软件。

#### 参 考 文 献

- 1 庞滔. 超精密加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社. 2000.
- 2 郭隐彪, 杨继东, 梁锡昌等. 轴对称非球面模具加工中的补偿技术研究[J]. 中国机械工程, 2000, 10(4): 415~417.
- 3 Sinhoff V. Generative precision grinding of optical glass[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 253~258.
- 4 Kapuschewski B, Welmeier M, Inasaki I. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors[J]. Annals of the CIRP, 2000, 49(1): 235~240.
- 5 Mckeown P. A. The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future, Annals of the CIRP, Vol. 36/2, / 1987, PP. 495- 501.

第一作者: 魏丽珍, 福建厦门大学机电工程系, 邮编: 361005, 电话: (0592) 2187283, E-mail: weilizhen@126.com

(编辑 周富荣)

(收修改稿日期: 2004-04-30)

文章编号: 4834

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

• 书讯 •

《先进复合材料制造技术手册》张玉龙编/ 2003

定价: 78.00 元

本手册主要介绍了树脂基复合材料及其预浸料、碳/碳复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料的各种制造成型方法、工艺知件、工艺参数和注意事项等内容, 且列举了大量有实际应用价值的制造实例, 内容较为全面真实, 可供从事复合材料研究、生产的技术人员及教学人员参考。

来款请寄北京市朝阳区东直门外望京路4号 邮编: 100102, 机床杂志社收。