

# 基于高精度非球面测量的数据采集与处理系统研究

谢仁宁, 郭隐彪, 黄浩

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 根据高精度非球面补偿加工的要求, 提出一种高精度非球面测量及数据处理系统. 系统基于工控 PC 机和 Windows98 操作系统, 用 Visual C++ 作为开发工具, 完成了硬件设计、数据采集、数据处理和非球面测量误差的评价. 通过实验得到测量系统的随机误差, 验证了系统的可靠性.

**关键词:** 非球面; 加工精度; 测量; 数据处理; 补偿加工

**中图分类号:** TG76

**文献标识码:** A

随着非球面镜的使用日益广泛, 其加工技术和检测技术成了亟待解决的问题. 根据加工精度的不同, 传统的测量方法有: 接触式三坐标测量法和非接触式光学干涉法等. 接触式测量, 触点可能破坏已加工工件的表面质量; 光学干涉法测量要求光源要有很好的时间空间相干性和较高的测量环境, 量程相对较小, 不宜用于现场的在线检测<sup>[1]</sup>.

现有的非球面工件加工一般有以下几种方法: 单晶金刚石切削法, 砂轮横向磨削法, 平行磨削法, 斜轴磨削法和自由曲面加工法. 由于加工设备和工具的刚度精度问题及加工方法的不同, 选择任何一种加工方式, 实际加工的表面形状与理论计算的轨迹之间都存在加工误差. 因此, 要想提高非球面工件的加工精度, 除了选择高精度、高刚度的加工设备外, 还须根据加工原理对其实行软件误差补偿. 利用误差补偿程序进行数次反复的补偿加工, 接近目标要求精度是高精度非球面加工系统所追求的目标<sup>[2]</sup>.

本文将根据非球面补偿加工的要求, 提出一种基于高精度非接触式激光传感器的测量方案, 实现了简便、快速的在线检测功能.

## 1 测量系统概述

### 1.1 测量系统原理

在非球面加工中, 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理想曲线加工, 必须进行补偿加工. 图 1 所示为非球面工件表面误差曲线. 传感器测出初始加工后工件曲面与理想曲面的误差, 并根据实测数据拟合出补偿误差曲线, 而后生成补偿加工所需的误差数据, 送入补偿加工系统生成 NC 程序, 进行数次反复的补偿加工, 达到目标精度.

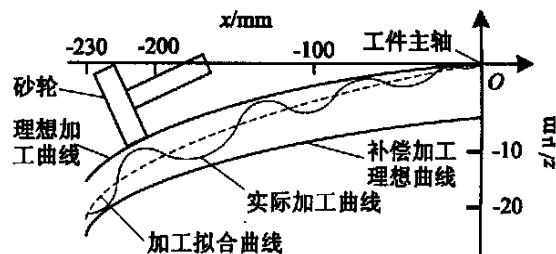


图 1 非球面工件表面误差

Fig. 1 Surface error of aspheric workpiece

### 1.2 测量系统硬件

测量系统硬件配置如图 2 所示. 系统采用高精度激光位移传感器来测量非球面工件的  $z$  轴误差, 其测量范围为  $(30 \pm 2)$  mm; 采用 16 位数据采集模块, 是集采样、保持、A/D 转换于一体的采集卡, 采

收稿日期: 2003-05-30

基金项目: 国家“8638042416”基金资助

作者简介: 谢仁宁(1973-), 男, 硕士研究生.

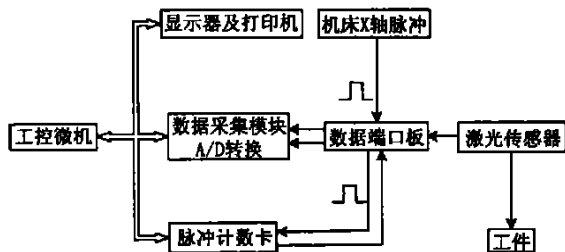


图2 测量系统硬件结构

Fig. 2 The hardware structure of the measuring system

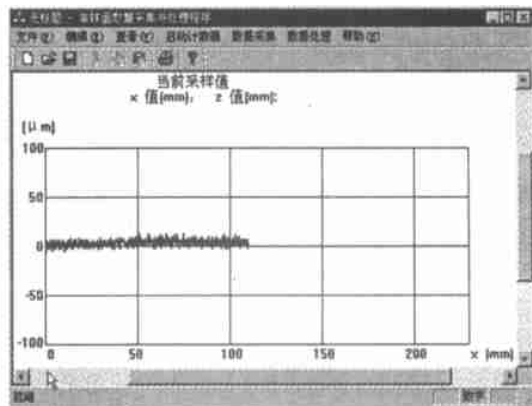


图3 程序界面

Fig. 3 Program interface

样数据的 A/D 转换时间为 8.5 μs;采用基于 8254 芯片的脉冲计数板接受来自加工机床的脉冲信号,以确定工件的 x 轴位置.

## 2 数据采集方案

### 2.1 数据采集

激光传感器固定在非球面加工中心砂轮的外周上(称之为检测臂),工件固定在机床主轴上.将工件分成几个测量截面,调整主轴到测量的截面,测得非球面不同截面上的数据,并根据测量数据拟合出整个非球面的表面.检测时,为保证数据采集不发生漏采、误采、重复采,x轴驱动脉冲同时输送到脉冲计数卡.

数据采集程序流程如下:

- 1) 启动计数器;
- 2) 判断采样触发信号是否有效,若有效则读取传感器数值;
- 3) 显示当前采样值并画出波形图;
- 4) 采样值写入数据文件;
- 5) 重复 2) 至 4) 直到采样结束.

### 2.2 程序界面

程序运行界面采用 Visual C++ 编制,如图 3 所示.界面实时显示采样波形图,并显示当前采样值.

### 2.3 测量方案分析

根据加工需要,检测臂所走的轨迹(虚线所示)可以有如下 3 种形式,如图 4 所示.其中,  $h_1, h_2, h_3$ : 传感器测量零位,  $z_1, z_2, z_3$ : 传感器测量值.

图中设顶点在坐标原点的非球面母线理论方程为:

$$z = f(x) \tag{1}$$

测量范围小于传感器范围时,采用测量方式(a).传感器走平行于 x 轴的轨迹,检测臂每走一个

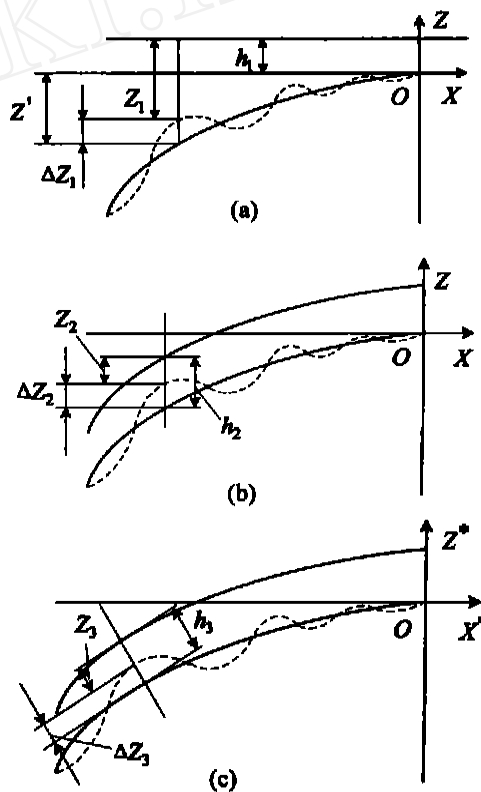


图4 三种测量方式比较

Fig. 4 Comparison of three measuring models

脉冲当量  $x$ , 便测得一个  $z_1$ , 则所要的表面形状误差可由下式表示:

$$z_1 = z_1 - z - h_1 \tag{2}$$

式中  $z$ : 根据理论方程计算出来的采样点  $z$  值

当所加工非球面的高度差超过传感器的测量范围时,采用测量方式(b),此时传感器走非球面轨迹,所需的表面形状误差由下式表示:

$$z_2 = z_2 - h_2 \quad (3)$$

考虑到非球面表面评价的需要,采用测量方式(c).此时,传感器不但走非球面轨迹,而且其测量光线与非球面表面保持垂直,所测得的数据为非球面法向数据,所需的表面形状误差可由式(4)表示.

$$z_3 = z_3 - h_3 \quad (4)$$

### 3 测量误差分析

#### 3.1 系统误差

按误差来源来分,有测量系统误差、安装误差和测量方式误差.测量系统误差主要是指传感器等测量仪器误差,包括非线性误差、温漂等;安装误差包括传感器安装误差和工件安装误差(如定位面不平)等;测量方式误差:测量方式(a),传感器运动自由度为1,将引入一个方向的轨迹误差.测量方式(b),传感器运动自由度为2,将引入一个径向误差和一个转角误差.测量方式(c),传感器运动自由度为3,将引入一个径向误差和两个转角误差<sup>[3]</sup>.

传感器的非线性误差,通过标定试验,用最小二乘法拟合曲线,求出误差数据去修正测量值;设备安装误差则通过数据采集程序的设定来修正;传感器温漂作为随机误差处理.测量方式误差通过标定实验,分离出对应自由度的系统误差,求出误差数据去修正测量值.

由于不可能将全部的系统误差修正掉,所以仍然存在少量的系统误差,对这种残留的系统误差在实际中按随机误差处理.

#### 3.2 粗大误差

在测量过程中必须保证测量条件的稳定.在单次测量中,对粗大误差用一阶差分方程进行判断、剔除、替代.

给定一个误差限  $W$ ,若  $t$  时刻的采样值为  $z_t$ ,预测值为  $\hat{z}_t$ ,当  $z_t - \hat{z}_t > W$ ,则认为此采样值是奇异项,应剔除;而以预测值  $\hat{z}_t$  取代采样值  $z_t$ ,预测值采用一阶差分方程推算:

$$\hat{z}_t = \hat{z}_{t-1} + (\hat{z}_{t-1} - \hat{z}_{t-2}) \quad (5)$$

式中  $\hat{z}_t$ :  $t$  时刻的预测值

$\hat{z}_{t-1}$ :  $t$  时刻前一个采样点的值

$\hat{z}_{t-2}$ :  $t$  时刻前两个采样点的值

当采样频率大于被测量变化的最高频率时,这种预测方法有足够的精度,式中误差限  $W$  的大小根据理论曲线方程、数据采集系统的采样速率及测

试系统的随机误差大小来确定<sup>[4]</sup>.

## 4 误差数据处理

数据采集过程中既可以对单个截面进行数据采集,也可以进行多个截面的数据采集,同样数据处理也分2个层面进行.

#### 4.1 截面数据最小二乘法

$$z = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n \quad (6)$$

式中  $a_0, a_2, \dots, a_n$  为多项式拟合系数.

拟合多项式的次数由加工精度及机床精度确定,拟合次数越高,拟合误差越小.由离散数据确定以下方程组.

$$\begin{cases} z_0 = a_0 + a_1 x_0^1 + a_2 x_0^2 + \dots + a_n x_0^n \\ z_1 = a_0 + a_1 x_1^1 + a_2 x_1^2 + \dots + a_n x_1^n \\ \dots\dots \\ z_m = a_0 + a_1 x_m^1 + a_2 x_m^2 + \dots + a_n x_m^n \end{cases} \quad (7)$$

式中  $z_i$ : 数据预处理及误差修正后的采样值

$x_i$ : 采样点  $x$  轴坐标

根据最小二乘法原理把式(7)整理成以系数为未知数的线性方程组:

$$\begin{cases} z_i = a_0 + a_1 x_i + \dots + a_n x_i^n \\ x_i z_i = a_0 x_i + a_1 x_i^2 + \dots + a_n x_i^{n+1} \\ \dots\dots \\ x_i^n z_i = a_0 x_i^{n+1} + a_1 x_i^{n+2} + \dots + a_n x_i^{n+n} \end{cases} \quad (8)$$

由于  $z_i$  绝对数值较小,为避免方程组病态,求解矩阵方程按高斯全主元法进行求解.

#### 4.2 非球面曲面最小二乘法

评价所加工非球面工件的表面质量,需对所测量的离散数据进行曲面拟合,并与理想非球面方程相比较,求出工件面形误差.

采用2种拟合公式进行最小二乘拟合:1)用一般正交多项式作为基底函数进行曲面拟合,2)用zernike多项式作为基底函数进行曲面拟合<sup>[5]</sup>.综合比较2种处理方法的优缺点并选定其一,是本文研究的重点内容.

#### 4.3 数据处理流程图

数据处理程序是在 Visual C++ 工作平台上开发的,程序框图如图5所示.图中的标度变化是指把激光传感器测得的电压量转换为位移量,生成表面形状误差数据即是求出  $z_i$ .

#### 4.4 数据处理实例

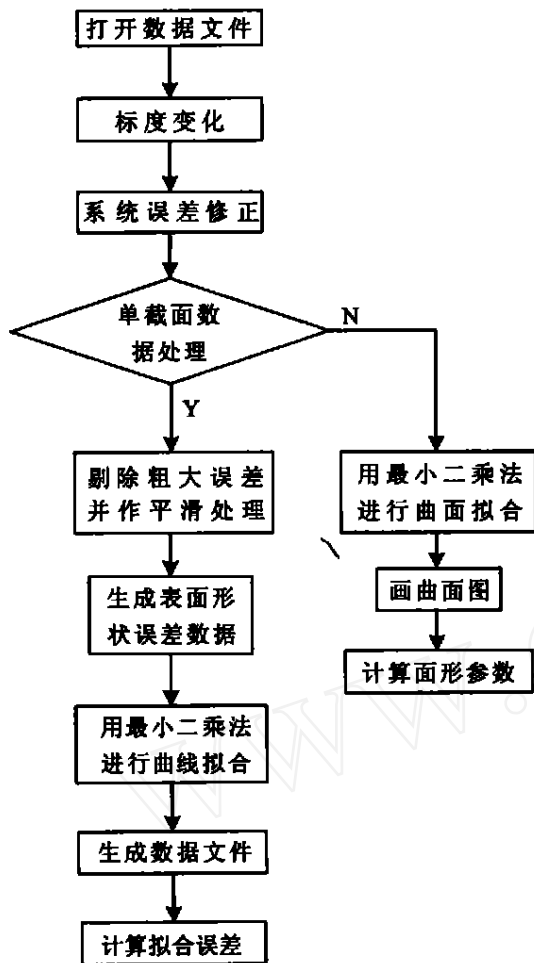


图 5 数据处理程序框图

Fig. 5 Flow diagram of data processing

为评价本数据采集程序,并模拟实际处理过程,本数据采集程序对两组在泰勒-霍普森测量仪上得到的非球面工件单截面实测数据进行处理,结果如图 6 所示.图中曲线 1 为泰勒-霍普森现场测量数

表 1 数据处理参数

Tab. 1 Data processing parameters

No.	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
1	$5.39e^{-5}$	$-5.66e^{-6}$	$8.00e^{-8}$	$2.71e^{-9}$
2	$1.92e^{-3}$	$-5.44e^{-5}$	$-8.74e^{-7}$	$-1.33e^{-8}$
No.	$a_4$	$a_5$	$a_6$	/ mm
1	$3.94e^{-11}$	$1.60e^{-13}$	$1.96e^{-16}$	$7.19e^{-5}$
2	$-1.53e^{-10}$	$-7.4e^{-13}$	$-1.27e^{-15}$	$2.03e^{-4}$
No.	仪器分辨率 / nm	测量距离 / mm	测量点数	测量点距 / mm
1	10	230	2 300	0.1
2	10	230	2 300	0.1

据,曲线 2 为数据处理后误差曲线.采用 6 次多项式拟合,多项式系数、拟合标准方差及其它参数如表 1 所示.从实验结果可知,当多项式拟合次数达到 6 次或 6 次以上时,拟合标准差可控制在  $0.2 \mu\text{m}$  以内.

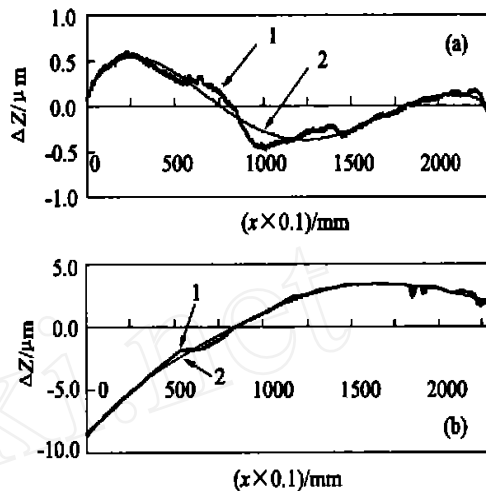


图 6 实测数据和拟合数据曲线

Fig. 6 Data on line and the fitted curve

### 5 系统可靠性评价

为了评价本测量系统的稳定性,进行随机误差测量实验.模拟现场测量过程,实验分四组进行,每组测量 10 次,每次采集 2 300 个数据点,每点模拟测量间隔为  $0.1 \text{ mm}$ .

测量样件:2 为表面粗糙度为  $50 \text{ nm}$  的半透明

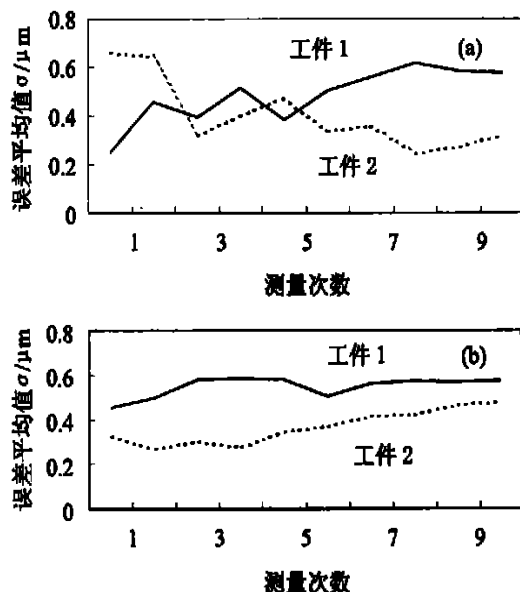


图 7 系统随机误差曲线

Fig. 7 Random error curve of measuring system

非球面工件;1为表面粗糙度为5 nm的镜面非球面工件.图7(a)为传感器测量方向与加工轨迹平行的测量结果.图7(b)为传感器测量方向与加工轨迹垂直的测量结果.

由实验数据可知:工件表面粗糙度对测量精度有一定影响.对于传感器测量方向与加工轨迹平行的测量方式,随时间增加,表面粗糙度为5 nm的工件,随机误差达到 $0.7\ \mu\text{m}$ ;表面粗糙度为50 nm的工件,误差小于 $0.32\ \mu\text{m}$ .对于传感器测量方向与加工轨迹垂直的测量方式,随时间增加,表面粗糙度为5 nm的工件,随机误差为 $0.6\ \mu\text{m}$ ;表面粗糙度为50 nm的工件,误差达到 $0.48\ \mu\text{m}$ .本测量系统实际所测工件为表面粗糙度50 nm的非球面工件,实验结果表明,平行测量是较好的测量方式,测量系统的随机误差可以稳定在 $0.4\ \mu\text{m}$ 以内,能够满足加工要求.

## 6 结 论

本非球面测量系统用激光传感器实现非接触式测量,硬件实现简单,经济性好,且可对任意面形的非

球面工件进行测量,通用性好,尤其适用于大口径非球面工件在半精加工阶段的检测.

通过实验表明,本测量系统随机误差在 $0.4\ \mu\text{m}$ 以内,数据处理误差在 $0.2\ \mu\text{m}$ 以内,这在半精加工阶段的检测是可以接受的,测量精度取决于传感器精度和数据处理方法,今后进一步完善数据处理方法还可提高测量精度.

## 参考文献:

- [1] [苏]普里亚耶夫.光学非球面检验[M].北京:科学出版社,1982.
- [2] 郭隐彪,杨继东,庄司克雄.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] Gao W, Kiyono S, Satoh E. Precision measurement of multi-degree-of-freedom spindle errors using two-dimensional angle sensors[J]. Annals of the CIRP, 2002, 51(1): 447-450.
- [4] 马明建,周长城.数据采集与处理技术[M].西安:西安交通大学出版社,1998.
- [5] 唐健冠,伍凡,吴时彬.大口径非球面精磨表面形状检测技术研究[J].光学技术,2001,11:509-511.

# Study on Data Collection and Processing System of High-precision Aspheric Surface Measured

XIE Ren-ning, GUO Yin-biao, HUANG Hao

(Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

**Abstract:** According to the requirement of the high precision aspheric surface compensation manufacturing, a high precision measurement and data processing system was designed and regulated. It is based on industrial PC and Windows98 operating system. Using the development tool of Visual C++, system hardware design, data collection and processing, and measurement error evaluation of aspheric surface have been finished. In order to testify the reliability of measurement system, the random error of system is obtained by experiment.

**Key words:** aspheric surface; manufacturing accuracy; measurement; data processing; error compensation