

# 超精密车床主轴偏角检测、分离与补偿技术研究

朱建忠 李圣怡

(国防科技大学机电工程与仪器系, 长沙 410073)

**摘要** 几何误差对超精密车床加工精度具有较大的影响, 主轴偏角误差就是其中较为主要的一种。超精密车床安装、调试及定期检修都需要进行主轴偏角的检测与调整, 以提高车床加工精度。本文提出了一种基于计算机控制的主轴偏角误差自动检测、分离与补偿技术。详细阐述了其系统组成和工作原理, 最后进行实验研究。应用该技术可将主轴偏角误差控制在0.5角秒内。

**关键词:** 超精密加工; 主轴偏角; 误差分离; 补偿

## 1 问题的提出

超精密加工技术是国民经济发展和提高综合国力的重要基础, 电子计算机、航空航天及原子能等高新技术与产业均和超精密加工技术密切相关。因而, 以六十年代初美国用单点金刚石车刀对铝合金和无氧铜进行镜面切削为开端, 三十多年来超精密加工技术已引起各国高技术领域的极大关注和重视, 并取得了蓬勃的发展。美国、日本、欧洲等国家和地区都把纳米超精密加工作为本世纪机械加工技术的极限, 投入了大量人力、物力和财力进行这一技术的最后攻关。

作为超精密加工最主要的研究内容之一的超精密机床研制与开发, 由于新材料、新概念与新设计哲理的运用, 目前其设计加工精度已达到亚微米级, 正向着纳米级精度迈进。与传统机床相比, 超精密机床因为零件结构和加工精度不同, 机床设计时考虑的侧重点就存在差别, 例如更注重环境、温度、湿度和隔振条件等, 同时其结构形式也有了很大的变化。如超精密机床普遍采用大理石材料作为机床床身、使用气体静压轴承主轴和气体静压导轨、双频激光干涉仪位置检测装置等, 实现了机床部件的模块化和标准化, 其模块和部件均可购得。

模块化和标准化使得超精密机床的设计与制造更为简便和高效,但对机床位置的安装和调整带来了诸多不便。如果安装、调试不当,如主轴运动轴心线和导轨运动中心线不垂直(本文定义为主轴偏角),端面切削就会产生图1所示的形状误差(内锥或外锥形状),严重影响了机床的加工精度与性能。因此,为保证超精密机床的加工精度,必须对车床主轴偏角进行检测与补偿。

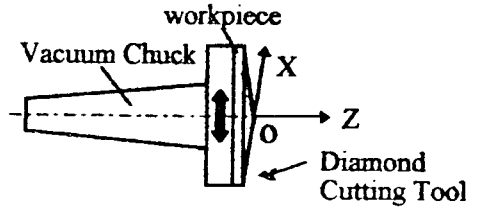


Fig. 1 Errors caused by deviation of spindle

## 2 主轴偏角检测、分离及补偿原理

图2为我们自研超精密金刚石车床,本文所做工作在此基础上进行。主轴偏角检测最为普遍的方法是:可以对零件端面试切一刀,然后打表算出零件上两点之间 $X$ 、 $Z$ 坐标差,由此可估算主轴偏角。但这种方法需要对零件进行加工,另外对零件上两点进行测量随机干扰大,不适合超精密车床主轴偏角检测要求。本文提出了一种非接触测量及误差分离的方法,能对超精密车床主轴偏角进行自动检测,并且经过数控系统学习补偿,消除主轴偏角对加工精度的影响。

### 2.1 测量原理

如图2所示,将一加工好的检测盘安装在车床主轴上,主轴旋转角位置信号由光电编码器提供,电容测头检测零件表面点与 $Z$ 轴之间位移,测量时 $X$ 轴运动, $Z$ 轴固定。检测盘直径为 $\Phi 110$ ,光电编码器为128线,电容传感器为非接触式测量(分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ ,线性测量范围为 $\pm 10 \mu\text{m}$ )。电容测头从零件的一端到另一端相对运动,每1 mm进行一组测量(一组采128点),这样采集到了原始数据。原始数据中含有各种确定性分量和随机分量。因此,在数据处理前对这些分量进行分析是必要的。

#### ① 主轴偏角影响

如图3所示,主轴轴心与 $X$ 轴不垂直,其夹角为 $(90^\circ - \theta)$ 。在图3的坐标系中,测量值为:

$$d_1(x) = -x \sin \theta \quad (1)$$

其中 $x \sim (-\frac{D}{2}, \frac{D}{2})$ , $D$ 为检测盘的直径。

#### ② 检测盘不垂直度影响

图4为一检测盘,其端面与轴心不垂直,夹角为 $(90^\circ - \alpha)$ 。则测量值为:

$$d_2(\varphi, x) = -x \sin \alpha \cos(\varphi + \varphi_0) \quad (2)$$

其中 $x \sim (-\frac{D}{2}, \frac{D}{2})$ , $\varphi$ 为主轴转角, $\varphi_0$ 为初始相位角。

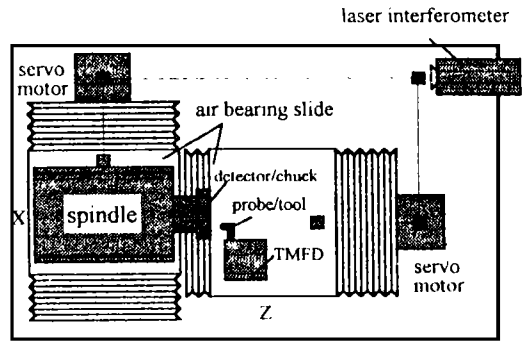


Fig. 2 Ultra-precision CNC lathe by "T" Configuration

### ③检测盘锥度影响

图5所示的检测盘有一锥度, 锥顶角为  $\omega$ 。则测量值为:

$$d_2 = - |x| \sin[(\pi - \omega)/2] \quad (3)$$

其中  $x \sim (-\frac{D}{2}, \frac{D}{2})$ ,  $\omega$  为锥顶角。

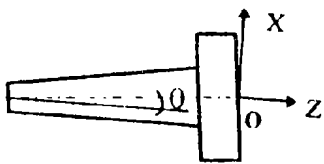


Fig. 3 Measurement variance caused by deviation of spindle

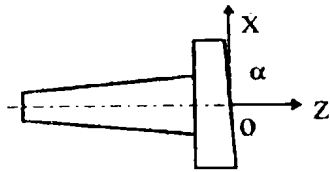


Fig. 4 Measurement variance caused by perpendicular of the detector

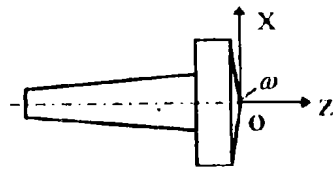


Fig. 5 Measurement variance caused by taper of the detector

### ④随机干扰的影响

本测量系统可能的干扰为:

- 传感器噪声, 大约为  $0.05 \mu\text{m}$ ;
- 环境对车床的振动, P-V 值小于  $0.05 \mu\text{m}$ ;
- 车床主轴回转误差, 其值小于  $0.02 \mu\text{m}$ 。

综上所述, 可得

$$d_z(x, \varphi) = d_1 + d_2 + d_3 + e = -x \sin\theta - x \sin\alpha \cos(\varphi + \varphi) - |x| \sin[(\pi - \omega)/2] + \epsilon \quad (4)$$

其中,  $d_1, d_2, d_3$  由(1)、(2)、(3) 计算可得,  $\epsilon$  为测量噪声。

## 2.2 误差分离方法

从上述(4)式可以得出如下结论:

- 测量值  $d_z$  是位移  $x$  和主轴转角  $\varphi$  函数;
- 主轴偏角对测量值  $d_z$  的影响以(测量坐标) 原点对称, 与主轴转角  $\varphi$  无关;
- 检测盘不垂直度  $\alpha$  对测量值  $d_z$  的影响以原点对称, 又与主轴转角  $\varphi$  的余弦成正比;
- 检测盘锥度对对测量值  $d_z$  的影响以 Z 轴对称。

将(4)式重新整理如下:

$$A \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = B \quad (5)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 1 & \cos\varphi & 1 \\ 1 & \cos\varphi & -1 \end{bmatrix}, \quad B = - \begin{bmatrix} \frac{1}{50} & \frac{d_{zi+}(\varphi)}{x_i} \\ \frac{1}{50} & \frac{d_{zi-}(\varphi)}{x_i} \end{bmatrix} \quad j = 1, 2, \dots, 128;$$

$d_{zi+}$  为  $x > 0$  的测量值,  $d_{zi-}$  为  $x < 0$  时的测量值;

$a = \sin\theta$ ,  $b = \sin\alpha$ ,  $c = \sin[(\pi - \omega)/2]$ ; 设  $\varphi_0 = 0$ 。

由最小二乘参数估计理论<sup>[2]</sup>可得:

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6)$$

由(6)式可分离出主轴偏角误差及其它各项误差。

### 2.3 主轴偏角误差补偿方法

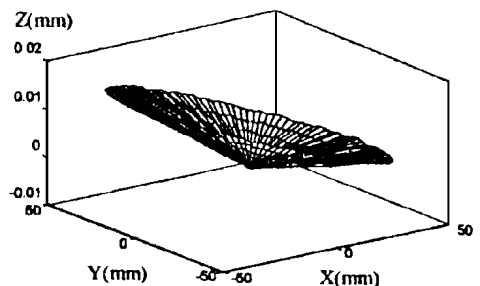
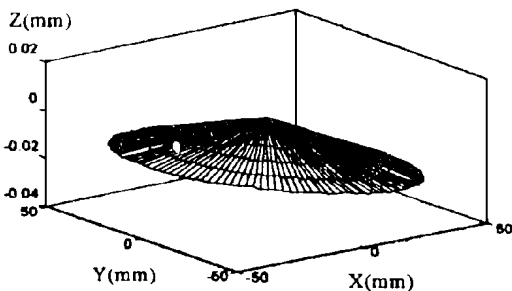
由于超精密加工往往是零件最后的加工工序,在其数控程序中我们直接采用了形面数据离散化的方法,数控程序为轴向和径向两组坐标向量,不需任何插补算法。鉴于本文篇幅,对此不作详细论述。利用人工打表的方法,主轴偏角一般可调整到几角分的范围,在此范围内的误差需要由数控补偿。由于主轴偏角误差在加工时是不变的,可以修正数控加工坐标向量,从而消除几何误差(包括主轴偏角误差)。

## 3 实验研究

实验装置如图2所示,测量原始数据如图6所示。用上述误差分离的方法将主轴偏角、检测盘不垂直度以及锥度分离出来。实验结果见表1。

Table 1 Measurement results of spindle deviation(Unit: Degree)

Times of study	0	1	2	3	4	5
Spindle deviation	0.0395	0.0153	0.079	0.022	0.012	0.003
Perpendicular	0.0103	0.0108	0.0105	0.0102	0.0103	0.0106
Taper	179.9074	179.9074	179.9075	179.9076	179.9073	179.9077



(a) is the result of range  $x \sim (-50, 0)$ ;

(b) is the result of range  $x \sim (0, 50)$

Fig. 6 Synthetical errors of detector by measuring

从测量数据可以看出,其值已经超出电容位移传感器的线性范围( $\pm 10 \mu\text{m}$ ),但是,位移是相对的,我们可以通过学习的方法加以消除,即利用分离所得的主轴偏角误差进行前馈补偿控制,减小主轴偏角误差。该过程如图7。经过5~6次学习,就能将主轴偏角误差减小到达到机床精度要求的阈值。图8是实验结果,从中可以看到学习效果是很明显的。

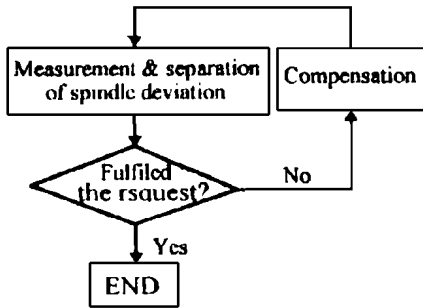


Fig. 7 Block diagram of error measurement and study compensation

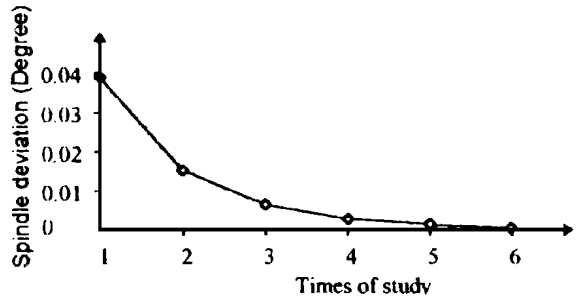


Fig. 8 Result of study compensation

## 4 结 论

主轴偏角误差是对超精密机床加工精度影响较大的几何误差之一,机床安装和调整可将这一误差减小到一定范围,但是对于亚微米级加工精度来说,调整后精度还远远达不到要求。本文提出了主轴偏角检测、误差分离与补偿技术,其原理简单、方法实用可靠。具有以下特点:

- 1) 实验装置简单,检测精度高,且不需昂贵的设备;
- 2) 不需要进行任何机械加工,能实行误差自动检测、分离和补偿;
- 3) 能有效抑制噪声;
- 4) 有自学习功能,逐步减小主轴偏角误差。

实验结果表明,利用这一技术可将主轴偏角误差减小到0.5角秒以下,即该车床加工端面时,零件平面度能达到 $0.1 \mu\text{m}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] 小野靖修. 机床精度与测试. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1987
- [2] 方崇智, 萧德云. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1988

## Research on Detection Separation and Compensation Technique of Spindle Deviation of Ultra-precision Machine Tool

Zhu Jianzhong, Li Shengyi

(*Dept. of Mechatronics Engineering and Instrument,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073*)

### Abstract

Geometric errors are the most significant sources which affect the accuracy of ultra-precision manufacturing tremendously. The spindle deviation is one of the main kind of them. With the destination to increase the accuracy of ultra-precision lathe, it is necessary to measure and regulate this parameter while installing, adjusting and periodical inspection it. In this paper, a technique based on computer control for automatic detecting, separating and compensating spindle deviation is proposed. System constitutes and work principle are discussed in detail. A conclusion is conducted from the final experiments that the errors of spindle deviation within 0.5 arcsec could be maintained using this technique.

**Key words:** Ultra-precision manufacturing, Spindle deviation, Errors separation, Compensation

朱建忠 男, 1968年7月生。1994年4月毕业于国防科技大学机电工程与仪器系, 现为该系博士研究生。所学专业是机电控制及自动化, 研究方向是计算机在超精密加工中的应用, 现从事超精密加工精度分析及误差补偿技术研究。主要成果有两坐标微动伺服装置、超精密机床变分法精度分析等。发表《超精密车床两坐标双重定位技术》、《超精密机床变分法精度分析研究》等十多篇论文。