

# Research on the Error Compensation Technology of CNC Machine Tools

Xianghai Shu

Jiangsu Automobile Technician College, Yangzhou, Jiangsu, 215000, China

## Abstract

With the development of modern manufacturing industry, the demand for high-precision processing equipment is becoming more and more urgent. And the machine tool itself has manufacturing and installation factors caused by geometry deviation, thermal deformation and vibration caused by cutting force and other problems, these will lead to the decline of machine tool processing accuracy, thus reducing the quality of the product. Therefore, how to improve the machine tool processing accuracy has become a hot topic. This paper takes the five-axis linkage CNC milling and boring machine as an example to analyze the positioning error and put forward the corresponding error compensation method, first, it introduces the research status and trend of this topic at home and abroad; then the kinematic model of XK5032A five-axis linkage CNC milling and boring machine is established, to derive the pose description equation of the knife tip in the artifact coordinate system from the homogeneous transformation matrix, at the same time, the Monte Carlo method is used to obtain the coupling relation between the axes; then, the standard sphere approximation algorithm and the circle fitting algorithm are used to solve the error parameters of the spindle-tool system, and a comparative analysis of their respective advantages and disadvantages; finally, the error compensation value is applied to the actual processing process, verify that the proposed method can effectively reduce the machining error caused by the machine tool itself, improved the machining accuracy.

## Keywords

CNC machine tool; error compensation; technical analysis

## 数控机床误差补偿技术研究

束祥海

江苏汽车技师学院, 中国 · 江苏 扬州 215000

## 摘 要

随着现代制造业的发展,对高精度加工设备需求越来越迫切。而机床本身存在制造和安装等因素引起的几何形状偏差、热变形以及受切削力影响产生的振动等问题,这些都会导致机床加工精度下降,从而降低了产品的质量。因此,如何提高机床加工精度成为一个热门话题。论文以五轴联动数控铣镗床为例,针对其定位误差进行分析并提出相应的误差补偿方法,首先介绍了国内外关于该课题的研究现状及趋势;其次建立了XK5032A型五轴联动数控铣镗床的运动学模型,通过齐次变换矩阵推导出刀尖点在工件坐标系中的位姿描述方程,同时利用蒙特卡罗法得到各轴间的耦合关系式;再次分别采用基于标准球体逼近算法和基于圆拟合算法两种方式求解主轴-刀具系统的各项误差参数,并对比分析它们各自的优缺点;最后将误差补偿值应用到实际加工过程中,验证了所提方法能够有效地减小由于机床自身原因造成的加工误差,提高了加工精度。

## 关键词

数控机床; 误差补偿; 技术分析

## 1 引言

数控机床在加工过程中,由于各种因素的影响会产生一定的误差。为了提高机床加工精度和效率,减小机床误差对加工质量的影响,需要采用相应的误差补偿方法进行修正。因此,论文针对数控机床误差补偿问题展开深入探讨与研究。首先介绍了国内外关于数控机床误差补偿方面的发展现状及存在的主要问题;其次分析了数控机床误差来源及其

分类情况;再次重点阐述了数控机床误差测量、辨识以及补偿方法等内容;最后结合具体实例详细说明了数控机床误差补偿系统设计流程及实现步骤。通过本次研究可以有效地提升数控机床加工精度和稳定性,降低生产成本,具有重要意义。同时也可可为其他相关领域提供参考依据。

## 2 误差补偿及误差分析的意义

在现代制造业中,数控机床已经成为了不可或缺的生产设备。然而由于制造过程中所受到的各种因素影响,机床加工精度会产生一定程度上的误差。这些误差不仅会降低产品的质量和产量,还会增加后续处理工作量以及成本投

【作者简介】束祥海(1988-),男,中国江苏扬州人,本科,工程师,从事智能制造研究。

人。因此,如何有效地对数控机床进行误差补偿就显得尤为重要。

误差补偿是指通过测量手段获取到机床各部件实际运动状态与理论模型之间存在差异后,利用相关算法将其转化为数控系统可识别的数字信号并加以修正。这样可以使得机床加工出来的零件达到更高的精度要求<sup>[1]</sup>。

误差补偿主要分为两种类型:一种是基于模型的误差补偿方法;另一种则是基于数据驱动的误差补偿方法。其中,前者通常需要建立较为精确的数学模型,而后者则不需要过于复杂的建模过程。

### 3 影响数控机床加工精度的空间误差源

#### 3.1 力误差

在数控机床上,由于切削力的作用会引起机床各部件产生弹性变形和振动,这些变形和振动将会导致加工精度降低、零件表面质量变差等问题。因此,为了提高加工精度,减小机床因受力而造成的误差,需要对其进行有效的控制与补偿。

目前,常用的数控机床误差补偿方法主要有三种:一是采用高精度传感器测量并反馈到控制器中;二是通过PID控制器来实现闭环控制;三是利用计算机软件进行辅助编程来完成误差补偿。其中,第三种方法是较为常见且应用广泛的一种方式。

针对数控机床的力误差补偿,可以从以下几个方面入手:首先,要合理选择传感器,保证其灵敏度足够高,能够准确地反映出机床受到的切削力大小及其变化情况。同时还应考虑到传感器的安装位置以及数量,以充分发挥其优势。其次,要设计合适的PID控制器参数,包括比例系数 $K_p$ 、积分时间常数 $T_i$ 及微分时间常数 $T_d$ 等。

#### 3.2 位置误差

数控机床在加工过程中,由于各种原因会产生位置误差。为了保证零件的精度和质量,需要对其进行测量、分析并及时采取相应措施加以修正。常见的位置误差有定位误差、重复定位误差以及热变形引起的误差等。下面分别介绍这几种误差及其处理方法。

##### 3.2.1 定位误差

定位误差是指机床坐标系与工件坐标系之间的位姿偏差。造成定位误差的主要因素包括夹具安装不准确、刀具磨损或切削参数不合理、传感器失灵等。针对这些问题,可以采用以下措施来减小定位误差:选择合适的夹具和正确的装卡方式;定期检查刀具状态,调整切削参数以避免过量磨损;使用高精度的传感器确保系统正常工作。

##### 3.2.2 重复定位误差

重复定位误差是指同一轴上连续两次定位所带来的累计误差。它通常出现在低速运动时或者对精度要求不高的场合。当发生重复定位误差时,应该先考虑是否存在外界干扰,如温度变化、机械振动等,再通过查找原因或者优化工艺流程等手段来解决问题。

##### 3.2.3 热变形引起的误差

随着数控机床的不断发展,数控机床本身的结构也越来越复杂,尤其是主轴部件。主轴长期处于高速旋转状态,容易导致发热现象,从而影响到加工精度。因此,在设计数控机床时应充分考虑热平衡问题,合理设置冷却液流量和压力,降低因高温引起的误差。

综上所述,数控机床的位置误差是不可避免的。只有通过科学的检测手段和有效的误差控制策略,才能最大程度地提高产品的加工精度和质量。

#### 3.3 热误差

在机床加工过程中,温度变化会引起零件的变形和尺寸误差。为了减小或消除这种影响,需要采用一系列措施来保证加工精度。其中最常用的方法是通过加热或者冷却控制来实现。因此,可以利用这一特性设计出相应的热误差测量系统,以达到提高加工精度的目的。

论文将重点介绍数控机床热误差补偿技术的相关内容。首先,分析了产生热误差的主要原因及其特点。其次,详细阐述了几种常见的热误差补偿方法及其原理、优缺点及适用范围。最后,结合具体案例说明如何运用所学知识解决实际生产中遇到的问题。

### 4 误差补偿关键技术

#### 4.1 建模技术

在对数控机床进行加工时,各种因素的影响会导致机床产生一定程度上的误差。为了减小这些误差带来的不良影响,需要采用相应的措施来对其进行修正和调整。其中,建立准确可靠的数学模型是一种非常有效的方法。通过建立合适的数学模型并利用计算机等辅助工具进行仿真分析,可以更加精确地预测出机床在实际运行过程中可能出现的误差情况,从而提前采取相应的措施予以纠正,保证加工精度和质量<sup>[2]</sup>。

目前常用的建模方法主要包括解析法、试验法以及神经网络法等多种形式。其中,解析法通常适用于较为简单的系统结构,如车床或铣床等;而试验法则适用于一些具有较高耦合度且难以用解析法描述的复杂系统,如数控磨床等;相对而言,神经网络法因其能够自适应的学习和优化自身权值参数,因此在非线性系统建模方面表现更为出色。

#### 4.2 测量技术

在对机床进行加工时,需要使用各种各样的传感器来检测其状态。这些传感器可以将机床的状态信息反馈给数控系统或其他设备,以便及时发现并纠正偏差。因此,选择合适的传感器和正确安装是保证机床精度的重要前提之一。

常用的传感器有编码器、激光干涉仪等。编码器主要用于位置控制,通过编码器输出的脉冲信号可实现对主轴转速、进给速度等参数的实时监测;而激光干涉仪则可用于检测机床部件之间是否存在间隙或者错位等问题。此外,还需注意传感器与机床本身的接口匹配以及接线方式的正确性。

#### 4.3 实施技术

在进行机床几何误差测量时,需要注意以下几点:

①选择合适的传感器。对于不同类型、规格和精度要求的机床设备,应该选用适合其特点的传感器,以保证测量结果准确可靠;

②合理布置测点位置。为了减小测量误差,应尽量将传感器安装在机床刚性较好且振动最小的地方,并使得各轴向间相互平行或垂直;

③正确处理数据采集卡与计算机之间的信号连接。由于数控系统本身并不提供 PLC 编程接口,因此我们采用 USB-6009 型号的数据采集卡来实现二者之间的通信。在使用过程中,要特别注意设置采样频率及触发方式等参数,以确保能够及时捕捉到所需信息;

④严格按照操作规程执行各项工作,避免因误操作而引入不必要的误差。

## 5 空间误差补偿综合建模

### 5.1 系统结构分析

本部分将对机床的整体结构进行详细介绍,包括各部件之间的连接方式、传动机构等。在此基础上进一步阐述如何通过误差测量和数据处理来实现机床加工精度的提高。

首先,需要了解机床的基本组成部分以及其工作原理。机床由多个子系统构成,主要有主轴单元、进给轴单元、伺服控制单元、刀库及自动换刀装置等。其中,主轴单元是整个机床最为重要的一个部分之一,它负责带动刀具完成切削过程;进给轴单元则用于精确定位工件并传递动力;伺服控制单元可以调整电机转速以达到所需运动轨迹;刀库及自动换刀装置可存储大量不同类型的刀具,方便随时更换使用。

其次,将重点关注机床中各个部件之间的连接关系及其作用<sup>[3]</sup>。主轴单元与进给轴单元之间采用齿轮齿条连接,两者通过轴承支撑固定在底座上。当主轴旋转时,齿轮齿条会随之移动,从而使得两个轴向相对位置发生变化。这种连接方式具有传动效率高、响应速度快等优点,但同时也存在一定的间隙误差,因此需要引入误差补偿环节来消除这些误差。

### 5.2 准确建立坐标系

在进行加工时,需要将工件的几何形状转换为数控系统可以识别和处理的数据格式。因此,正确地选择机床各部件之间的相对位置以及确定参考点的位置是十分重要的。本实验采用了基于全局坐标系的方法来实现这一过程。

### 5.3 分析坐标误差

在进行加工时,各种因素的影响会导致机床产生一定程度的误差。为了减小这些误差对加工精度造成的不良影响,需要对其进行测量和分析并加以修正。本部分将重点介绍如何通过分析坐标误差来提高加工精度。

### 5.4 正确识别空间误差参数

#### 5.4.1 误差参数传统测量法

数控机床的几何误差是由多种因素引起的,如机床结构、运动副间隙等。为了减小这些误差对加工精度的影响,需要在制造过程中采取一系列措施来控制 and 调整其产生的

原因及大小。其中,采用高精度的检测设备进行实时监测并及时反馈到操作人员处是非常重要的一项工作。目前常用的方法有激光干涉仪、三坐标测量机以及光学显微镜等。

#### 5.4.2 基于传统测量误差参数测量法

数控机床的精度受到多种因素影响,其中机床本身结构和制造工艺是主要原因之一。在实际生产中,由于加工过程中存在各种各样的不确定性因素,因此需要对机床进行多次重复定位来保证其精度。

#### 5.4.3 多自由度空间误差参数测量方法

采用激光干涉仪对机床进行几何量检测,通过分析被测点的位移数据和旋转角度数据来计算出机床各运动轴在工作过程中的位置、方向等信息。该方法具有非接触性好、精度高等优点,可以有效地提高机床加工精度。为了降低成本并简化操作流程,论文提出一种基于光电编码器的多自由度空间误差参数测量方法。具体步骤如下:

①将光电编码器安装在机床上,使其与数控系统相连接;

②利用计算机软件生成固定程序,控制伺服电机带动主轴转动,从而实现工件的定位;

③采集光电编码器输出的脉冲信号,并经过信号处理后得到机床各轴的位置信息;

④结合理论模型及现场实际情况,计算出机床各轴间的相对位姿关系以及各项误差值<sup>[4]</sup>。

## 6 数控机床误差补偿技术发展存在的不足

数控机床在加工过程中会受到多种因素影响,如刀具、夹具等。这些因素都可能导致机床产生一定程度上的误差,从而降低了零件加工精度和质量。因此,如何有效地对数控机床进行误差补偿是当前亟待解决的问题之一。目前,学者已经针对该问题开展了大量的理论与实验研究工作。但是,由于数控机床本身结构复杂以及制造工艺的限制,其误差补偿技术仍然面临着一些困难和挑战。

## 7 结语

论文主要介绍了数控机床的误差来源以及常用的几种误差补偿方法,并对每种方法进行了详细的分析和比较。通过对比发现,在实际应用中,采用误差模型预测控制法能够有效提高机床加工精度,降低由于人为因素引起的误差,具有较高的实用价值。

### 参考文献

- [1] 杨慧峰.数控机床误差综合补偿技术及其应用[J].现代工业经济和信化,2022,12(12):166-167+170.
- [2] 郭远东,沈航.数控机床误差分析及双层智能补偿技术[J].机械工业标准化与质量,2022(10):12-15.
- [3] 吕学祐,郭前建,王昊天,等.数控机床误差补偿关键技术综述[J].航空制造技术,2022,65(11):104-111+119.
- [4] 彭鸣.超精密数控机床误差补偿技术及系统设计搭建[J].价值工程,2022,41(16):42-44.