

# 主轴伸长量补偿在高速数控机床上的应用

## Application of Compensation for Spindle Elongation in High-Speed NC Machine Tool

北京航空制造工程研究所 石敏 高诚  
成都飞机工业(集团)有限责任公司 毛显军

**[摘要]** 文章设计并实现了高速数控机床主轴伸长量的实时补偿;分析了补偿的原理,提出了补偿的具体措施和实现方法,给出了补偿的PLC控制程序,并用一系列的试验数据证明了补偿的有效性。这种方法在实际机床应用中提高了机床的加工精度,具有广泛的推广价值。

**关键词:** 主轴伸长 实时补偿 数控机床 高速加工精度

**[ABSTRACT]** The compensation system for the spindle elongation of high-speed NC machine tool is designed and implemented in this paper. The analysis of high-speed spindle elongation principle is presented. And the specific measures and implementing methods of axis compensation are put forward, and PLC controlling program is made. Test data shows the feasibility of this compensation method. Application of this method improves the machining precision, and this method can be promoted widely.

**Keywords:** Spindle elongation Real-time compensation NC machine tool High-speed machining precision

工艺过程的自动化和精密加工的发展对机床的加工精度及其稳定性提出了越来越高的要求。传统的滚动轴承主轴结构难以满足数控机床的高转速、高精度要求,而电主轴把机床主轴传动链的长度缩短为零,使机床具有结构紧凑、重量轻、惯性小、响应快、机械效率高、回转精度高等特点。已成为高速加工机床最重要的功能部件之一,在现代数控机床中获得了愈来愈广泛的应用。然而,随着主轴转速和进给速度的提高也会引发一些负面影响,如电主轴的振动、变形等因素成为影响加工精度的重要原因。这些问题的解决成为实现高速、高精加工的关键<sup>[1]</sup>。针对主轴变形的问题本文分析了它的原因并对补偿措施进行了详细的论述。

### 1 主轴轴向变形的原因及抑制方法

数控机床使用主轴作切削动作时,主轴运转时的膨

胀伸长会造成表面切削精度的变化,其主要原因有二:一是运转时受转速升高而引起的离心力影响,会使刀柄向下伸长;二是运转时温度上升引起的热膨胀导致主轴轴向的热变形。

通常情况下,为了使机床的热变形达到稳定数值,需要花费很多时间来预热机床,这直接影响了机床的生产率。对于数控机床来说,因为全部加工尺寸是由预先编制的指令控制的,主轴轴向变形的影响就更为严重。减小主轴变形有两种方法:一是减小热变形,二是对变形进行补偿。

#### 1.1 减小热变形

主轴部件是直接影响加工精度的关键部件,主轴上的轴承又是一个很大的内部热源。在数控机床的设计中除了采用精密滚动轴承并对轴承进行油雾润滑外,还可采用静压轴承,这些措施都有利于降低主轴的温升。另外对主轴(特别是电主轴)进行中心冷却是重要措施之一。通常采用油冷机或水冷机进行中心冷却,冷却过程中根据主轴需求设置为恒温模式。但是在对主轴轴承进行油气润滑及中心冷却的同时,主轴仍有一定的热变形,主要表现为轴向伸长。

#### 1.2 对伸长量进行补偿

主轴在旋转加工过程中,在冷却及润滑状态良好的情况下,仍具有一定的会影响精度的伸长量,因此考虑通过添加传感器进行变形补偿。

设计初期由于主轴变形与温度有关,所以考虑用温度传感器进行测量,但在实际切削加工时,不同的刀具在不同转速下所引起的离心力不同,伸长量也因此而不同。同时当刀具接触到工件时,不同的切削力会相对抵消离心力的影响,因此主轴的伸长量不是一个常数,含有“相对”因素在内。如果使用温度传感器对主轴伸长量进行补偿就无法切实解决主轴伸长量问题。针对这种变形,本文采用位移传感器对主轴伸长量进行检测并实时补偿。

### 2 实时补偿的实现

#### 2.1 原理

在补偿过程中,补偿系统根据误差运动综合数学模型、误差分量模型以及实时反馈位置等方法得出机床各坐标最终误差并实现实时补偿。补偿的具体实现是通过移动机床相关坐标以使刀具和工件在机床空间误差的逆方向上有一相对运动而实现的<sup>[2]</sup>。

本文以某桥式三坐标高速数控铣床上电主轴的伸长补偿的应用为例。如图 1 所示,在电主轴出厂配置中安装了测量主轴伸长量的位移传感器,在机床运转时将传感器的信号进行采样分析,得到一个 0~10V 的模拟量信号,并传给 PLC 的模拟输入模块,建立伸长量与 PLC 输入数值之间的数学模型,从而根据 PLC 的数值计算出实时伸长量进行刀具方向的实时坐标补偿。以三坐标为例,刀具方向表现为 Z 坐标方向,从而进行 Z 方向的实时补偿。

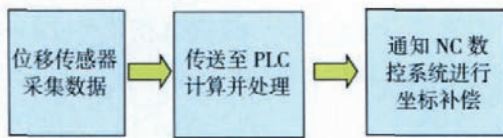


图1 伸长量补偿过程  
Fig.1 Compensation process for the spindle elongation

## 2.2 详细设计

### 2.2.1 位移传感器信号处理

位移传感器又称线性传感器,本例用德国 MICRO-EPSILON 非接触式位移传感器中 eddyNCDT 系列传感器。该系列传感器具有线性范围宽、动态响应好、抗干扰能力强等优点,是以高频电涡流效应为原理的非接触式位移传感器。其原理是前置器内产生的高频电流从振荡器流入探头线圈中,线圈就产生了一个高频电磁场,当被测金属的表面靠近该线圈时,由于高频电磁场的作用在金属表面产生感应电流,即电涡流。该电流产生一个交变磁场,方向与线圈磁场相反,这两个磁场相互迭加就改变了原线圈的阻抗<sup>[3]</sup>。所以探头与被测金属表面距离的变化可通过探头线圈阻抗的变化来测量,前置器根据探头线圈阻抗的变化输出一个与距离成正比的 0~10V 直流电压。

### 2.2.2 误差值计算

主轴轴向伸长误差曲线如图 2 所示,误差曲线接近于线性,故而将其按线性处理(非线性的误差对精度的影响可忽略)。

因此误差值计算公式为:  $\Delta K = K_0 + (V_i - V_0) \tan \beta$ 。

其中  $\Delta K$  为某时间点的误差值,  $K_0$  为初始值,  $\tan \beta$  为近似曲线的斜率,  $V_i$  为某时间点 PLC 读取的数值,  $V_0$  为初始时读取的数值。位移传感器输出 0~10V 对应的位移为 0~500  $\mu\text{m}$ , 如图 3 所示。PLC 模拟模块

的输入 0~10V 对应的 PLC 数据为 0~32768, 由此得出,  $\tan \beta = 500/32768$ 。

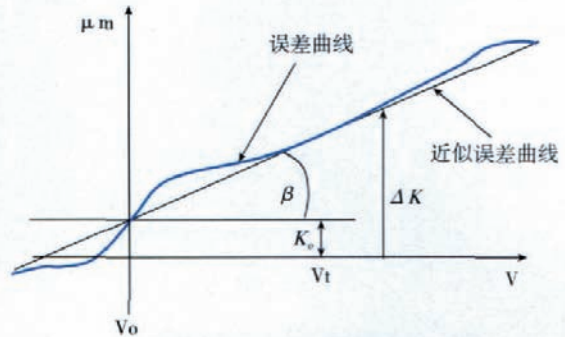


图2 误差曲线分析图  
Fig.2 Error curve analysis figure

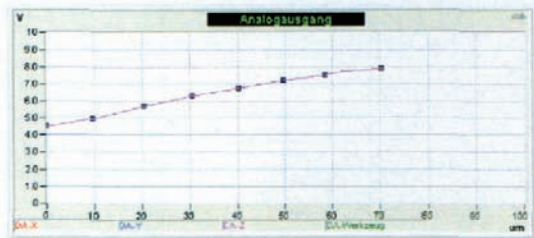


图3 电压-位移测量曲线  
Fig.3 Voltage-displacement measurement curve

机床 24 小时零转速时的 PLC 初始数值为 5048。因此,主轴伸长量  $\Delta K$  与 PLC 数值  $V_i$  之间的关系为  $\Delta K = (V_i - 5048) \times 500/32768$ 。所以根据 PLC 测量数值得出主轴相应的伸长量,从而将该伸长量放入刀具长度方向(本例中为 Z 方向),而补偿的方向为 Z 的负方向。进行数值补偿之前,主轴内装入一测量刀柄,并在主轴下方工作台上架上一个具有球形测量头的用来测量主轴轴向伸长的千分表。旋转主轴,记录千分表数据,将记录数据与 PLC 计算数据进行比较,如表 1 所示。

根据实际测试,可以看出 PLC 数据与实际伸长量相近,机床一般要求最大伸长量为 0.05mm,而补偿后的差值为 0.015mm,完全满足使用要求,之后就可以利用西门子 PLC 写参数功能(程序如下)将数值直接写入相应坐标的温度补偿参数中。

```

A M 450.6          A M450.2
A M 0.2            = L 0.0
= L 0.0            BLD 103
BLD 103           CALL "SIEM-NC utility
CALL "SIEM- NC drive launch",DB155
writing", DB153   Req :=L0.0
Req :=L0.0        PIService:=P#DB16.
NumVar :=1       DBX328.0 BYTE 16
Addr1:=P#DB152.DBX Unit:=1
10.0 BYTE 10     Addr1 :=
Unit1 :=         Addr2 :=
Column1:=        Addr3 :=
Line1 :=         Addr4 :=
    
```

```

.....
Error :=M450.0
Done :=M450.1
State :=MW452
SD1 :=P#DB154.DBX
0.0 DWORD 1
SD2 :=
.....
SD8 :=
NOP 0

WVar1 :=W#16#1
WVar2 :=
WVar3 :=
WVar4 :=
WVar5 :=
WVar6 :=
WVar7 :=
WVar8 :=
WVar9 :=
WVar10 :=
Error :=M450.3
Done :=M450.4
State :=MW454
NOP 0
    
```

表1 伸长量数据获取与实际数据对比表 μm

PLC 测量	表测量	误差
5	3	-2
9	8	-1
20	22	2
22.8	24.5	2
24.6	29	4.5
25.5	29	3.5
36.2	42	5.8
42.5	50	7.5
44.5	53	8.5
46.5	56	9.5
48	60	12
62.4	76	13.6
62.7	78	15.3
62.8	78	15.2
62.8	78	15.2

程序输入并实时补偿后,查看 Z 坐标的相关伺服信息,可以发现补偿已经生效,如图 4。

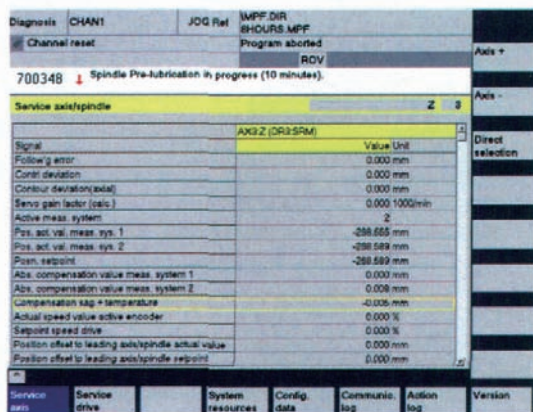


图4 Z坐标伺服数据  
Fig.4 Z-axis serve data

2.2.3 补偿效果测试

添加补偿后,主轴以最高转速 24000r/min 旋转两小时,两小时内每半小时通过前文介绍的使用千分表的方法测量主轴轴向伸长量,数值分别为: 0.5 小时 0.010mm,1 小时 0.012mm,1.5 小时 0.013mm,2 小时 0.014mm; 此时将补偿去除,测量主轴伸长量为 0.08mm。这些数据说明补偿有效地减小了刀具方向的伸长量,减小了主轴轴向变形的影响,提高了加工精度。

2.3 方案扩展

前面介绍的应用在三坐标数控机床的方法也可以应用在四、五坐标的主轴伸长量补偿中。补偿的方法同样是基于刀具长度方向进行补偿,根据摆角来进行坐标位置计算,并且分配到各坐标中进行单独补偿。这种补偿办法的关键在于需要在系统参数中激活补偿功能并且设定补偿的类别,如位置无关的温度补偿、位置相关的温度补偿。

以四坐标机床的补偿为例,当 A 摆角旋转 +30° 时,坐标系转换过程如图 5 所示。

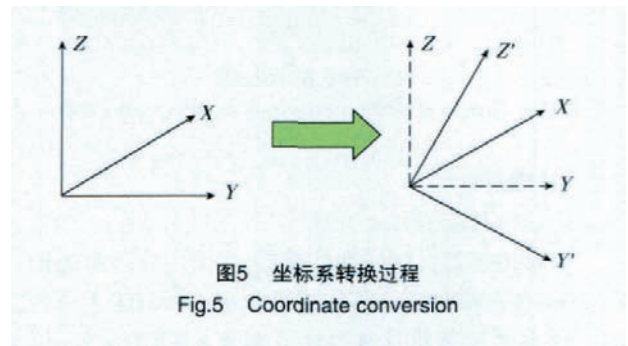


图5 坐标系转换过程  
Fig.5 Coordinate conversion

这样,当主轴轴向伸长量为 0.5mm 时,设置为刀具方向的补偿,则分配到 Y 方向的伸长量为  $0.5\sin 30^\circ = 0.250\text{mm}$ , Z 方向的伸长量为  $0.5\cos 30^\circ = 0.433\text{mm}$ 。

3 结束语

本文采用位移传感器实时测量主轴伸长量并传送至 PLC,利用西门子 840D 系统功能对刀具方向进行坐标补偿,这种方法有效地减小了主轴变形对加工的影响,较大程度地提高了加工精度。总之,此方法简单有效,对现有机床主轴轴向变形带来的缺陷有较大的抑制作用,在后续的机床制造中有较广泛的应用前景。

参考文献

[1] 杨建国. 数控机床误差补偿技术及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 1998.  
 [2] 于印民, 刘文波. 基于 USB 数据采集卡的高速电主轴轴向热伸长及径向振动数据采集系统的设计. 组合机床与自动化加工技术, 2009.  
 [3] 朱卫斌. 数控机床误差补偿系统的研制与应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2004. (责编 飞翔)