

数控机床热变形实时补偿

Real-Time Compensation for Thermal Deformation of NC Machine Tool

四川长征机床集团有限公司机床设计研究院 陈彬 钟佳庆



陈彬

工程师,从事电气自动化研究,曾参与“数控机床高效高精五轴龙门加工中心的设计”等课题研究。

制造技术的发展对数控机床的精度和可靠性提出了越来越高的要求。大量研究表明:在精密加工中,由机床热变形所引起的制造误差占总误差的40%~70%^[1]。减少机床热误差通常有以下3种方法:改进机床的结构设计;控制机床重要部件的温升,如进行有效的冷却和散热;建立温度变量与热变形之间的数学模型,用软件预报误差,用NC进行补偿,以减少或消除由热变形引起的机床刀具位移^[2]。

热误差是影响机床精度最主要的因素之一,机床热误差是由机床工作时复杂的温度场造成机床各部件变形引起的,它是随时间变化的非恒定误差。热误差补偿的研究始于20世纪50年代,但其总体发展是不能令人满意的,究其原因,在于误差辨识即热误差建模。

热变形误差补偿技术一般采用事后补偿,通过各种检测手段对数控加工时产生的误差进行直接或间接的测量,然后根据已经建立的误差补偿模型进行误差补偿计算^[3],将计算结果反馈给数控系统,使控制器发出相应的控制误差补偿指令以补偿相应的热误差。本课题以GMC4000H/2加工中心y轴为研究对象,首先通过实验建立热误差与机体上若干点的温升之间的数学模型,在加工过程中借助外部设备监控温度,根据所建数学模型计算热误差,利用PLC补偿模块功能以及机床运动的可控性,修改机床运动进给量,从而实现实时补偿。

测量试验

1 热误差的测量

热误差是影响机床精度最主要的因素之一,机床热误差是由机床工作时复杂的温度场造成机床各部件

变形引起的,它是随时间变化的非恒定误差。热误差补偿的研究始于20世纪50年代,但其总体发展是不能令人满意的,究其原因,在于误差辨识即热误差建模。要提高精度,必须解决“如何选择最佳的温度测点和如何建立鲁棒性强的热误差模型”的问题,两者相辅相成,缺一不可^[4]。

1.1 试验设备及仪器

试验样机为GMC4000H/2;8个温度传感器、1台激光双频干涉仪、若干电缆线等。

1.2 温度测点的选择

数控机床的热误差大小取决于温度的变化、各零部件的热膨胀系数和机床的总体结构,从根本上说取决于温度变化。温度变化越大,热变形越剧烈,从而也可能产生大的热误差。

欲研究热误差的产生和变化规律,进而减小、消除和控制热误差,必须从温度变化入手。在机床运行时,

由于各种材料的膨胀系数不同,各部分在径向和轴向产生的热变形也不尽相同^[5],最容易受到热变形影响的机床部件是主轴和滚珠丝杠等,因此在本试验中将表1中8处最容易受到热变形影响的关键部件作为温度测量点。

表1 y轴热误差补偿温度测点布置

编号	检测位置
x_1	光栅尺右端
x_2	右侧滑块
x_3	十字滑座左侧
x_4	横梁
x_5	十字滑座右侧
x_6	电机
x_7	螺母座
x_8	环境温度

1.3 试验方案

机床运行程序包含2个部分:

(1)空运行程序。

- 单一速度: 20m/min;
- 混合速度如表2所示。

(2)检测程序。

检测程序参数如下:

- 检测时,y向运行速度为10m/min;
- 检测过程中,除第一次操作清零外,其余时间不进行清零操作。

表2 机床运行速度及比例

速度 / (m·min ⁻¹)	2	8	16	22	27
比例 / %	15	10	40	20	15

1.4 测量

(1)机床冷机状态时,运行一次检测程序,记录机床冷机状态下的各测点温度值和热误差量;

(2)机床预热30min,预热速度为10m/min。预热后,运行一次检测程序,记录各测点温度值和热误差量;

(3)按单一速度或混合速度运行机床,每20min运行一次检测程序,记

录各测点温度值和热误差量;

(4)除去预热时间,机床共运行4h后停机,进行下一步降温试验;

(5)降温试验共2h,其中机床每停止20min,运行一次检测程序,记录各测点温度值和热误差量;

(6)试验结束。

建立热误差补偿模型

1 回归方程

1.1 回归方程的建立

在回归分析中,如果有2个或2个以上的自变量,就称为多元回归。事实上,一种现象常常是与多个因素相联系的,由多个自变量的最优组合共同来预测或估计因变量,比只用1个自变量进行预测或估计更有效,更符合实际。

因此多元线性回归比一元线性回归的实用意义更大。所以,本课题从采集多点影响机床热变形位移精度的温度变化来建模。

多元线性回归是利用统计方法寻求多输入和单输出关系的模型。在热变形情况下,可以得到一组表达多点测量温度输入和一个方向位移输出关系的线性关系,因为热变形是多方面的,所以每个方向可以分别独立求得一组系数,将各个方向合在一起,即可得到多输入多输出模型。线性回归分析法是以相关性原理为基础的,相关性原理是预测学中的基本原理之一。

由于y轴热变形位移精度受电机温升、螺母座温升、十字滑座温升等有关因素的综合影响。因此,多元线性回归预测首先是建立y轴热变形位移精度补偿量与其有关影响因素之间线性关系的数学模型,然后通过对各影响因素未来值的预测推算出y轴热变形位移精度补偿量的预测值。

多元线性回归的数学模型为:

因变量y和自变量为 x_1, x_2, \dots, x_p 满足线性关系:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + e. \quad (1)$$

对 x_1, x_2, \dots, x_p, y 进行n次观测,所得的n组数据为 $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ip}, (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 它们均满足式(1),用数列表示为:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_p \end{pmatrix},$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix},$$

$$e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_p \end{pmatrix}. \quad (2)$$

因此式(1)可写成如下矩阵形式:

$$y = X\beta + e, \quad E(e) = 0, \quad (3)$$

$$\text{Cov}(e) = \sigma^2 I_n.$$

此为多元线性回归方程。

采用最小二乘法估计参数 β_0 。设 b_0, b_1, \dots, b_m 分别是参数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ 的最小二乘估计,则回归方程为:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m. \quad (4)$$

由最小二乘法知道 b_0, b_1, \dots, b_m 应使得全部观测值 y_i 的残差平方和达到最小,即

$$Q = t - \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i) = \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - \dots - b_m x_{im}) = \text{最小}. \quad (5)$$

对于给定的数据式(5),Q是 b_0, b_1, \dots, b_m 的非负二次式,所以最小值一定存在。根据微分学的极值定理,设 b_0, b_1, \dots, b_m 应是下列方程的解:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - \dots - b_m x_{im}) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b_j} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - \dots - b_m x_{im}) x_{ij} = 0, \end{cases}$$

$$j=(1,2, \dots, m). \quad (6)$$

上面的回归方程经变形可以转

化为另一种数据结构式：

$$y_t = \mu + \beta_1(x_{t1} - \bar{x}_1) + \beta_2(x_{t2} - \bar{x}_2) + \dots + \beta_m(x_{tm} - \bar{x}_m) + \varepsilon_t, \quad (7)$$

$t = (1, 2, \dots, n)$ 。

相应的回归方程为：

$$\hat{y} = \mu_0 + \beta_1(x_{t1} - \bar{x}_1) + \beta_2(x_{t2} - \bar{x}_2) + \dots + \beta_m(x_{tm} - \bar{x}_m)。 \quad (8)$$

1.2 回归方程的假设检验

回归方程显著性检验是从总体上对自变量与因变量之间是否存在线性关系进行考察,若检验的结果是拒绝原假设,则接受其对立假设,也就是说至少存在某个变量的回归系数不为零,因此还需对每个变量的回归系数进行逐个检验,即对某个固定的检验:考虑统计量 $t = \frac{\hat{\beta}_i}{\hat{\sigma}\sqrt{c_{ii}}}$, 则 t 服从自由度为 $n - (p + 1)$ 的 T -分布。其中 $\hat{\sigma}^2 = \text{SSE}_{\text{剩余}} / (n - p - 1)$, $\hat{\beta}_i$ 的标准误差为 $\sqrt{\text{Var}(\hat{\beta}_i)} = \sigma\sqrt{c_{ii}}$, 其估计为 $\hat{\sigma}\sqrt{c_{ii}}$ 。通过计算 $p_1 = P\{t_{n-p-1} > |t|\}$ 和 $p_2 = P\{t_{n-p-1} < -|t|\}$, 若 p_1 或 p_2 中任一个不比 $\alpha/2$ 大, 则拒绝 H_{0i} , 认为该变量的回归系数显著地不为零。反之则认为该变量与因变量之间没有显著的线性关系。将变量 x_1, x_2, \dots, x_p 的一组观测值代入回归方程, 即得到变量 y 的预测值。因此预测是一件很简单的事, 只要确定了一个非常有效的回归方程即可。有时还需要对预测值进行区间估计, 下面给出因变量的期望值和预测值 $E(y_i)$ 的区间估计。

$E(y_i)$ 的 $(1-\alpha)$ 置信区间为:

$$[x_i\hat{\beta} - t_{n-p-1}(\alpha/2)\sqrt{h_{ii}\hat{\sigma}^2}, x_i\hat{\beta} + t_{n-p-1}(\alpha/2)\sqrt{h_{ii}\hat{\sigma}^2}]。$$

预测值 y_i 的 $(1-\alpha)$ 置信区间为:

$$[x_i\hat{\beta} - t_{n-p-1}(\alpha/2)\sqrt{(1+h_{ii})\hat{\sigma}^2}, x_i\hat{\beta} + t_{n-p-1}(\alpha/2)\sqrt{(1+h_{ii})\hat{\sigma}^2}]。$$

2 热误差补偿模型的建立

机床的温度场是连续且随时间

变化的, 必须通过测量温度场中有限个点的温度, 将温度场离散化, 并且利用温度传感器测量得到 T_1, T_2, \dots, T_n , 可利用多元线性回归, 通过多个温度测点的线性组合来表示热变形与温度之间的关系。

补偿模型如下:

(1) 当 $-1 < x_i - x_8 < 1$ ($i = 1, 2, \dots, 7$) 时, 不进行补偿, 或设补偿量为 0。

(2) 当 $x_i - x_8 < -1$ 或 $x_i - x_8 > 1$ 时, 按照下述公式进行补偿:

$$y = -1 \cdot (y_1 - y_2 \cdot \frac{l}{4000}), \quad (9)$$

式中, $y_1 = -23.51(x_1 - \hat{x}_1) - 36.01(x_2 - \hat{x}_2) + 43.13(x_3 - \hat{x}_3) + 15.32(x_4 - \hat{x}_4) - 2.30(x_5 - \hat{x}_5) - 0.83(x_6 - \hat{x}_6) - 3.76(x_7 - \hat{x}_7) + 1.22(x_8 - \hat{x}_8)$; $y_2 = -50.47(x_1 - \hat{x}_1) - 2.53(x_2 - \hat{x}_2) + 73.64(x_3 - \hat{x}_3) - 17.42(x_4 - \hat{x}_4) + 1.20(x_5 - \hat{x}_5) - 6.05(x_6 - \hat{x}_6) + 2.18(x_7 - \hat{x}_7) + 0.54(x_8 - \hat{x}_8)$; l 为距离 mm。

3 温度补偿方案

3.1 补偿原理

补偿法是通过建立准确反映机床温度场同热误差之间关系的热误差预测模型, 人为地制造出一种新的误差去抵消当前成为问题的原始误差, 以实现热误差补偿的方法。

3.2 热误差补偿的执行

利用前面算出的热误差补偿模型, 结合西门子 840D 系统自带的误差补偿模块, 可以实现误差补偿功

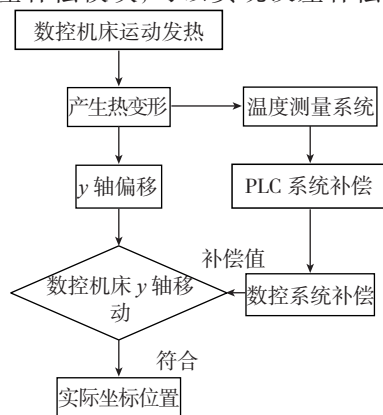


图1 y轴误差补偿流程图

能。其流程如图 1 所示。

3.3 SIEMENS 840D 系统补偿程序

以 1 个采集点为例做程序介绍。

```

AN DB200.DBX 550.0
AN DB200.DBX 550.1
S DB200.DBX 550.1
O DB200.DBX 550.2
O DB200.DBX 550.3
O "NC".E_EMSTOP
R DB200.DBX 550.1
S DB200.DBX 550.0 //热变
形实时温度补偿各项使能满足与否
CALL "GET", DB224
Req:=DB200.DBX550.1
NumVar :=2
Addr2:=P#DB221.DBX 10.0 BY
TE 10
Unit2:=
Column2:=
Line2:=
Error:=DB200.DBX550.2
NDR:=DB200.DBX550.3
State:=DB200.DBW552
RD2:=P#DB200.DBX564.0 D
WORD I// 读 NC Variable 值
L PIW 100
T DB200.DBW 0// 采集各
因素点温度
A(
A(
A M 10.0
JNB _001
L DB200.DBW 0
ITD
T DB200.DBW 2
SET
SAVE
CLR
_001: A BR
)
JNB _002
L DB200.DBW 2
DTR
T DB200.DBW 6
SET
    
```

```

SAVE
CLR // 将采集
的实时温度值做数型转换
_002: A BR
)
A(
O(
L DB200.DBD 6
L 6.000000e+002
>R
)
O(
L DB200.DBD 6
L 3.000000e+001
<R
)
)
= DB2.DBX 195.0 // 判
断采集的实时温度值的有效性,如不
满足则产生报警提示
AN DB2.DBX 195.0
AN DB2.DBX 195.1
AN DB2.DBX 195.2
AN DB2.DBX 195.3
AN DB2.DBX 195.4
AN DB2.DBX 195.5
AN DB2.DBX 195.6
AN DB2.DBX 195.7
= DB200.DBX 99.0 //
所有采集点采集的温度有效,然后做
回归方程中的数学运算(由于篇幅,
此处略去)。当时,不进行补偿,或设
补偿量为0。
AN DB200.DBX 555.1
A DB200.DBX 550.0
S DB200.DBX 555.1
O "NC".E_EMSTOP
O DB200.DBX 555.2
O DB200.DBX 555.3
R DB200.DBX 555.1
R DB200.DBX 550.0
CALL "PUT", DB241
Req :=DB200.DBX555.1
NumVar :=1
Addr2 :=P#DB240.DBX 10.0
    
```

表3 y轴热变形数据分析

基准热漂移	y 轴热变形	远端热漂移	基准热漂移	y 轴热变形	远端热漂移
0	0	0	-46	-59	13
4	-2	6	-49	-52	3
4	-7	11	-52	-49	-3
-2	-18	16	-55	-39	-16
-9	-25	16	-57	-31	-26
-17	-33	16	-56	-22	-34
-24	-42	18	-60	-16	-44
-30	-44	14	-67	-18	-49
-35	-51	16	-68	-16	-52
-43	-60	17	-67	-14	-53

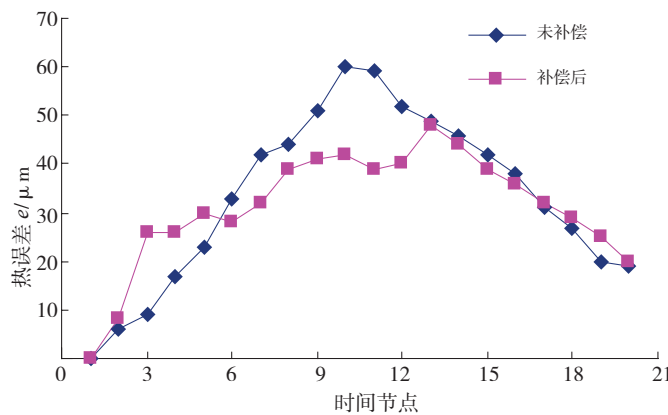


图2 机床热变形补偿前后数据对比

```

BYTE 10
Unit2 :=
Column2:=
Line2 :=
Error :=DB200.DBX555.2
Done :=DB200.DBX555.3
State :=DB200.DBW557
SD2 :=P#DB200.DBX584.0 D
WORD 1 // 所有使能满足情况下,将
补偿值写入 NC Variable。
4 补偿效果分析
4.1 y 轴热变形补偿效果分析
    本文仅以左右端点为例,如表 3
    所示。
4.2 试验验收分析
    进行补偿后机床试验结果显示,
    机床误差补偿效果很好,y 轴方向上
    的定位误差减少到 ±0.013mm 以内。
    机床热变形补偿前后数据对比见图 2。
    
```

结束语

本试验通过对数控机床运行过程时零部件发热产生的热误差,以及其温度场采集,建立模型,再将模型导入数控系统对机床进行热补偿,并经过

了试验验证了补偿效果。利用该实验有效地减少了由机床热变形所导致的误差,提高了机床精度和稳定性,同时也为传动部件的在热变形方面的进一步设计奠定了基础。

参考文献

- [1] 李清. 虚拟数控铣床加工过程仿真系统及相关技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [2] 刘荣忠, 顾益军. 基于 GAPT 的金属切削数据库的研究. 计算机工程, 2001, 27 (12): 151-152.
- [3] 高晓勇, 郑敏利, 孟安, 等. 通用切削数据库的设计与实现. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 6 (2): 50-531.
- [4] 倪军. 数控机床误差补偿研究的回顾及展望. 中国机械工程, 1997, 8(1): 29-33.
- [5] 鲁远栋, 徐中行, 刘立新, 等. 数控机床热变形误差补偿技术. 机床与液压, 2007(2): 43-45, 50.

(责编 夏宛)