

■ 深圳市捷甬达实业有限公司 (广东 518111) 石 云 郑新胜

随着数控系统、伺服电动机、导轨及机床联接附件设计制造技术的不断进步,高速精密机床的出现,以及精密和超精密加工技术的快速发展,使人们对金属切削机床的加工精度提出了更高的要求。根据国外学者的统计,在精密加工中,由机床热变形引起的制造误差占总制造误差的40%~70%,所以补偿机床的热变形是保持零件整体精度的关键因素之一,能极大地提高机床的加工精度。

由于数控机床各组成部件的材料不同,热膨胀系数不同,因此各部位的温升不同,产生的热膨胀量也就不同,机床床身、主轴、丝杠及电动机运转过程中产生热量导致的构件的变形,称之为机床热变形。

联接, 丝杠螺母与工作台上的丝杠螺母座固定, 伺服电动机转动带动丝杠副传动, 驱动工作台移动。运行过程中的热变形源主要有: 轴承高速运转产生的热量传递到丝杠副、电动机高速运转产生的热量传递到丝杠副、丝杠与滚珠直接摩擦生热, 这些因素导致丝杠副受热变形, 影响滚珠丝杠副的传动精度, 从而导致机床的加工精度偏差大。

有经验的模具制造者都会充分考虑机床的热变形,以进行加工工艺改进,例如使用不同的进给量和加工速度匹配,来克服并处理机床的热变形导致的加工误差。有经验的模具制造者非常了解高速、长时间运行机床的热动态,会先进行机床预热,机床材质热膨胀到一定程度会稳定而不再变形或者变形很小。但是这样的方式对操作者的技能要求很高,而且影响生产效率。机床制造商会从机床的结构设计、各组成构件的材质选择及各构件的冷却设计考虑,机床结构设计采用热对称抵消热量结构,合适设计支撑位置,主轴使用主轴冷却机进行循环冷却、选用中空冷却丝杠副带走加工热量,配置光栅尺提高机

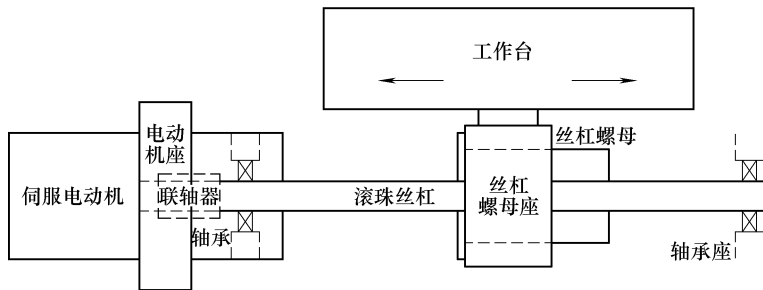


图1 丝杠传动示意图

床的定位精度，尽可能地减少机床整体热变形造成的加工精度误差。本文着重介绍随着温度上升产生的热变形量在数控系统中进行误差补偿，以保证机床精度。

2. 机床在运行过程中产生的热变形位移数据采集

由机床热变形引起的加工误差不能直接测量到，通常通过测量机床上各构件随温度变化的敏感处得到。以我公司立式加工中心Z轴运动为例，温升较快的位置主要有伺服电动机、主端轴承座、丝杆螺母座及副端轴承座。在各敏感点放置PT温度传感器、连接温控仪及自动运行程序轴运动，用激光干涉仪进行轴运行热变形误差测量。图2所示为PT温度传感器安装于主端轴承座，图3所示为温度传感器，安装于丝杆螺母座，图4所示为激光测量热变形误差。

按照以上测量方式，温度每升高0.1℃采集数据。表1所示数据为温度传感器安装于丝杠螺母处，选取12组采集的数据，对应的温度与丝杠螺母处的热变形位移量关系如图5所示。表2所示数据为温度传感器安装于主端轴承座处，主端轴承座温升较慢，选取12组采集的数据，对应的温度与主端轴承座处的热变形位移量关系如图6所示。

从图6中可以看出，随着机床的运行，温度不断上升，轴移动的位置发生偏移，即产生的运动误差，反映到工件上就是加工精度出现偏差。温度变化和热变形量呈线性关系或近似线性关系，同样方法测试多台机床，测试结果都类似，建立数据库用于系统



图2 PT温度传感器安装于主端轴承座

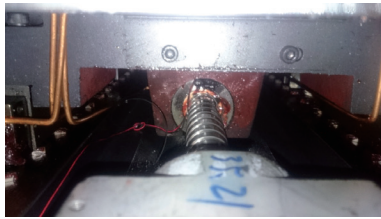


图3 PT温度传感器安装于丝杠螺母

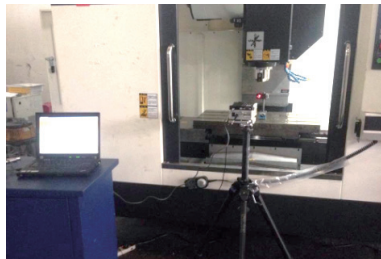


图4 激光测量热变形误差

表1 温度传感器安装于丝杠螺母处测得的热变形位移量

序号	温度/℃	位移量/ μm
1	21.7	0
2	22.7	13
3	24.7	28
4	26.7	46
5	28.7	67
6	29.7	78
7	30.7	89
8	32.7	109
9	34.7	129
10	35.7	137
11	36.7	146
12	37.7	152

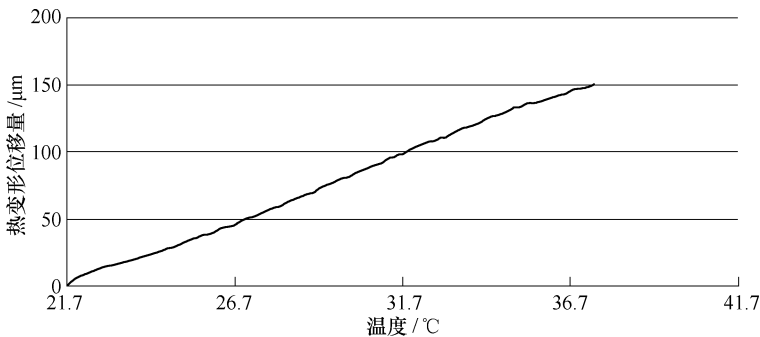


图5 温度与丝杠螺母处的热变形位移量关系

表2 温度传感器安装于主端轴承座处测得的热变形位移量

序号	温度/℃	位移量/ μm
1	24.8	0
2	25.6	17.1
3	25.8	22.9
4	26.2	34.4
5	26.6	53.1
6	27.1	76.3
7	27.6	93.9
8	27.9	102.6
9	28.4	115.1
10	29.4	127.3
11	29.8	130.3
12	30.2	131.8

数据补偿。

3. 数控机床随温度变化产生热变形量的补偿

(1) 原理：要完全消除机床内部热源的发热和在短时间内均衡机床内部温度是不可能的，采用将热变形误差补偿到系统中，通过系统处理使机床运行坐标定位精准，使加工精度得以保证。解决原理如图7所示。图7所示为整体温度补偿方案原理（即“温度—形变”模型），其中CH1和CH2连接温度传感器，分别为检测机床所处的室温和机床运行当前温度的两个测头。CH_x可以根据实际要测量的机床轴数增加。

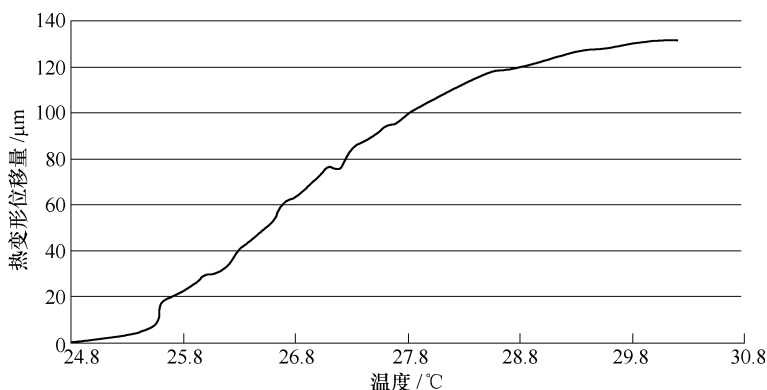


图6 温度与主端轴承座处的热变形位移量关系

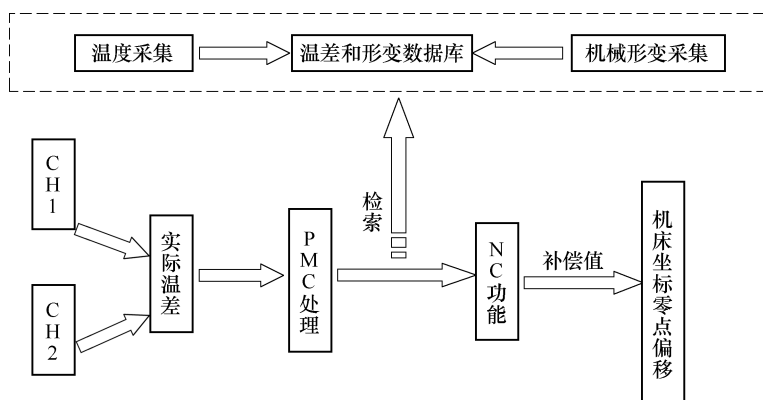


图7 补偿原理

完成测试补偿平台搭建后，需要根据机床的实际情况，反复试验测定多个温度差与机械的形变值关系，建立如图8所示的“温度—补偿”曲线，其横坐标为两个测头的温度差，纵坐标为机械坐标的补偿值，两点之间为线性关系。通过多个点模拟出近似的“温度—形变”曲线，采集点数越多则曲线越精确，补偿后精度值越好。测试结果一般是以机床运行稳定后，几乎不再产生热变形量为最终的数据。图8中可以很清晰地看出当实际温度差为图中 A_t 时，补偿值计算公式如下

$$A_d = \frac{(d_5 - d_4) \times (A_t - d_4)}{t_5 - t_4} + d_4$$

根据公式计算，得到机床运行过程中所需的补偿值，需通过“扩展的外部机械原点偏移”功

能实现补偿。参数设置为：①功能开启参数为No.1203#0=1，扩展的外部机械原点位移功能有效（在将扩展的机械原点位移功能设定为有效的情况下，以往的外部机械原点位移功能将无效）。②外部机械原点偏移量 R 地址控制参数号为No.1280=1240，在扩展外部机械原点位移功能中使用的信号组的开头地址。③温度补偿功能开启为K19.0=1。

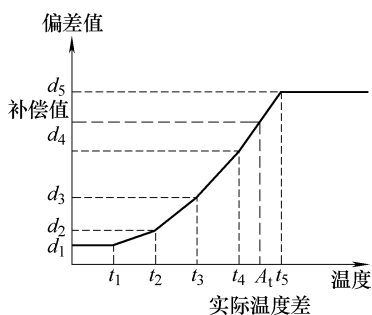


图8 温度-补偿曲线

(2) 硬件。配置情况：以上补偿方案可通过采用FANUC的温度采集模块实现温度采集，具体配件如表3所示。补偿模块接线如图9所示。

硬件连接实物图中，基板插接方式是基板ABU05A的0号位插AIF01A，1号位插AT104A。电源线接线方式是1脚24V，2脚0V。现场温度模块实际接线图如图10～图13所示。在图11中，CH1为机床Z轴测温传感器；CH2为机床所处室温测量传感器；CH3为机床Y轴测温传感器；CH4为机床X轴测温传感器。可以单独接CH1测试一轴补偿，也可以同时连接CH3、CH4多轴测试补偿。TB01A的CN1接AT104A的CA48（采用34芯排线）。图12中，补偿模块与I/O连接，JD1B连接I/O上的JD1A。模块上的CP32连接I/O上的CP1。

(3) FANUC系统PMC程序处理。共编写7段PMC子程序，将温度与热变形量数据补偿值反馈到机床的定位精度补偿，提高机床轴运行的定位精度。通过PMC软件可以实时监控，随着温度的变化，系统根据补偿形变量位移区间的斜率计算出当前所处的温差值相对应的形变位移拟合线性补偿值。通过雷尼绍激光检测验证，补偿值有效。图14为PMC程序监控画面及开启补偿功能后激光仪检测的变形结果。

表3 温度模块配置

序号	名称	数量
1	基本模块ABU05	1
2	AIF01A接口单元	1
3	温度输入模块AT104A	1
4	端子单元ATB01A	1

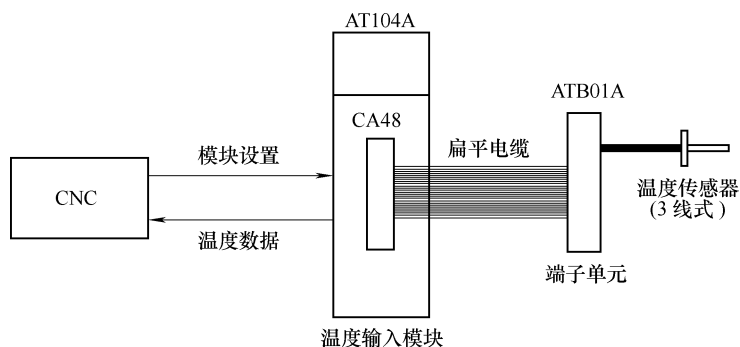
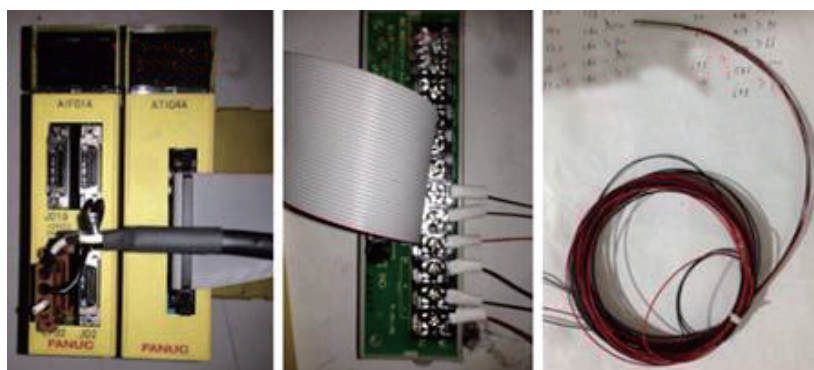


图9 温度模块接线图



(a) AIF01A (左) 和AT104A (b) ATB01A (c) 三线PT传感器

图10 温度模块实际整体接线图

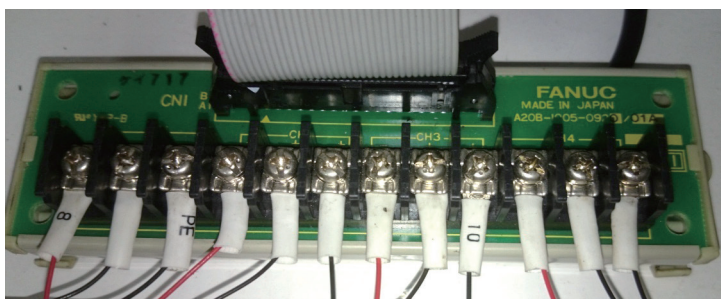


图11 ATB01A连接



图12 AT104A连接



图13 补偿模块与I/O单元的连接

PMC监控画面中R1212为CH1，代表丝杆温度；R1214为CH2，代表室内温度；R1210为CH1和CH2的温度差值，R1244为补偿值。数字“0.0006”界面表示激光检测的当前变形量，单位为毫米。

(4) 测试和补偿。测试整理数据：编写机床试运行程序，机床轴不断运动，使丝杆升温，监测并记录机床运行位移随温度的变化，测试设备如图4所示，记录机床发生的热变形位移量（见表1）。

计算表1中数据得到温差量—热变形位移量关系，如表4所示，用于系统内部参数补偿。温度差值 0.1°C 为单位，热变形位移量 $1\mu\text{m}$ 为单位。

补偿数据设定及数据补偿：

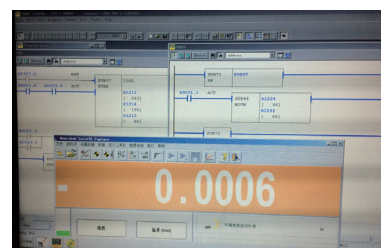


图14 温差值、补偿量及检测最后的偏差值监控图

表4 温度差—热变形位移

序号	温度差/ 0.1°C	位移量/ μm
1	0	0
2	10	13
3	30	28
4	50	46
5	70	67
6	80	78
7	90	89
8	110	109
9	130	129
10	140	137
11	150	146
12	160	152

①系统温度补偿数据界面设置中D区数据设定6个段,如图15所示。②以表4中的14组数据作为补偿数据。补偿数据表在D区的设置中,D500为所选取的“温度—补偿”曲线点的个数,现固定设置为12;D510~D538温差补偿区间,单位是 0.1°C 。表4中补偿数据存放在D510~D532中,D540~D568热变形补偿区间,单位为 $1\mu\text{m}$ 。表4中热变形位移量数据存放在D540~D562中。补偿的数据如图15~图19所示。

(5) 补偿结果。仍采用图4中的设备进行测试,测试数据画面如图14所示。根据补偿数据系统内部进行拟合处理,计算补偿当前丝杆温度与室内温度差数据。图14中,丝杆温度 28.3°C ,室内温度 19.5°C ,补偿值 $86\mu\text{m}$ 。补偿后机床位移偏差值为 $0.6\mu\text{m}$,精度达到要求。

选取和补偿前同样温度时位移量做对比。表5中,很明显,随着温度变化,热变形位移量很小,原来最大位移量达到 $152\mu\text{m}$,补偿后的最大位移量为 $3.4\mu\text{m}$,证实补偿数据有效。

4. 结语

通过雷尼绍激光检测仪器验证补偿数据有效,证实通过机床运行一段时间后,丝杆温度升高,产生热变形位移,采集“温度—形变”数据,建立数据库,增加配套硬件设施及系统的PMC程序处理,实现机床精度提升可行。当然,此方法还存在一定的缺陷,需要采集大量的数据才能批量应用于机床,而且不同的客户加工不一样的工件,即

号	地址	数据
0	D0500	12
1	D0502	0
2	D0504	0
3	D0506	0
4	D0508	0
5	D0510	0
6	D0512	10

图15 温度差补偿数据1

号	地址	数据
7	D0514	30
8	D0516	50
9	D0518	70
10	D0520	80
11	D0522	90
12	D0524	110
13	D0526	130

图16 温度差补偿数据2

号	地址	数据
14	D0528	140
15	D0530	150
16	D0532	160
17	D0534	0
18	D0536	0
19	D0538	0
20	D0540	0

图17 温度差补偿数据3

号	地址	数据
21	D0542	13
22	D0544	28
23	D0546	46
24	D0548	67
25	D0550	78
26	D0552	89
27	D0554	109

图18 热变形量补偿数据1

号	地址	数据
28	D0556	129
29	D0558	137
30	D0560	146
31	D0562	152
32	D0564	0
33	D0566	0
34	D0568	0

图19 热变形量补偿数据2

表5 补偿前后位移量对比表

序号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	补偿前位移量/ μm	补偿后位移量/ μm
1	21.7	0	0
2	22.7	13	1.2
3	24.7	28	0.9
4	26.7	46	0.9
5	28.7	67	2.5
6	29.7	78	3.2
7	30.7	89	3.4
8	32.7	109	1.4
9	34.7	129	1.6
10	35.7	137	1.0
11	36.7	146	0.8
12	37.7	152	0.9

使在同一温度,产生的形变也会不同。

如何解决这些问题都是后续再进行研究的内容。但是只要进行补偿,即使补得不是非常精确,精度也有很大程度的提升。目前我公司已经将此类补偿方案应用于精密型加工机床。

参考文献:

- [1] 姜辉,孙翰英,范嘉桢,等.基于FANUC 0i系统外部坐标原点偏移功能的数控机床误差补偿研究[J].机械制造,2009,47(7):73-76.
- [2] 符强,付毅,师堂存,等.FANUC系统数控精度补偿方法[J].机床与液压,2008,36(11):35-37.

MW (收稿日期:20160330)