

数控机床误差补偿技术现状与展望*

Present Situation and Prospect of Error Compensation Technology for NC Machine Tool

上海交通大学机械与动力工程学院 杨建国



杨建国

上海交通大学机械与动力工程学院教授、博士生导师,全国优秀博士学位论文“数控机床误差综合补偿技术及其应用”作者。从1995~1997年在美国密西根大学吴贤明制造中心进行有关数控机床误差补偿的博士学位论文研究工作以来,一直从事数控机床误差检测、建模和补偿技术研究,在国内外杂志上发表有关学术论文180余篇,其中被SCI和EI收录100多篇,指导并已完成有关数控机床误差补偿的学位论文40余篇,其中博士学位论文10余篇。主持和完成国家、省部级和企业科研项目约20项。

本文综合国内外数控机床误差补偿技术现状,指出其主要不足和难点,并介绍针对这些不足和难点而进行的研究课题,其中包括:基于机床外部坐标系原点偏移的实时补偿器研制、复合误差建模和补偿、考虑温度变化的机床误差高效测量、五轴数控机床误差解耦实时补偿、机床上关键温度点的优化选择、切削力误差实时补偿。

机床的几何误差(由机床本身制造、装配缺陷造成的误差)、热误差(由机床温度变化而引起热变形造成的误差)及切削力误差(由机床切削力引起力变形造成的误差)是影响加工精度的关键因素,这3项误差可占总加工误差的80%左右。

提高机床加工精度有两种基本方法:误差预防法和误差补偿法。误差预防法是一种“硬技术”,通过设计和制造途径消除或减少可能的误差源,靠提高机床制作精度来满足加工精度要求。误差预防法有很大的局限性,即使能够实现,在经济上的代价往往是很高的。误差补偿法是使用软件技术,人为产生出一种新的误差去抵消当前成为问题的原始误差,是一种既有效又经济的提高机床加

工精度的手段。通过误差补偿可在机床上加工出超过机床本身精度的工件,这是一种“精度进化”的概念。近年来,误差补偿技术以其强大的技术生命力迅速被各国学者、专家所认识,并使之得以迅速发展和推广,已成为现代精密工程的重要技术支柱之一。数控机床误差动态综合补偿已列入国家科技重大专项“高档数控机床与基础制造装备”表明我国政府对数控机床误差动态综合补偿技术的高度重视。

本文综合国内外数控机床误差补偿技术现状,指出其主要不足和难点,并介绍针对这些不足和难点而进行的研究课题,其中包括:基于机床外部坐标系原点偏移的实时补偿器研制、复合误差建模和补偿、考虑温

* “高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项项目(2011ZX04015-031)资助。

度变化的机床误差高效测量、五轴数控机床误差解耦实时补偿、机床上关键温度点的优化选择、切削力误差实时补偿。

国内外研究历史与现状

最早发现机床热变形现象并进行研究的国家之一是瑞士。1933年,瑞士通过对坐标镗床进行测量分析后发现机床热变形是影响定位精度的主要因素。由此开始了机床误差的检测、建模和补偿技术研究。从目前来看,在机床误差检测、建模和补偿技术研究和应用中比较有影响的有美国密西根大学、日本东京大学、日立精机、德国柏林工业大学等。其中,美国密西根大学在1996年成功地将热误差补偿技术实施于美国通用(GM)公司下属一家离合器制造厂的150多台车削中心上,使加工精度提高1倍以上^[1-2],作者作为主要人员参与了这个项目。

我国对机床热变形及误差补偿技术的研究始于20世纪50年代,到70年代末,有关机床热变形及误差补偿技术研究工作在不少高校和研究单位先后展开。近年来,天津大学、西安交通大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、北京机床研究所、北京理工大学、清华大学、南京航空航天大学、国防科学技术大学、台湾国立台湾大学、台湾清华大学、上海交通大学等对机床误差补偿技术进行着研究。

纵观国内外,在有关人员的不懈努力下,数控机床误差补偿技术有了较快的发展,但从目前来看,在国外,数控机床误差实时补偿技术大批量在工业中应用的例子并不多,还没成熟到商业化程度。在国内,误差实时补偿技术大部分还停留在实验室范围内,还未见在生产厂家批量数控机床上应用误差实时补偿技术的报道。这说明误差补偿理论和技术还有很大余地可开发。目前,数控机床误差

补偿技术的主要不足和难点如下:

(1) 误差补偿运动控制的实现。误差补偿是通过移动(对于四轴以上还需转动)机床的运动副以使刀具和工件在机床空间误差的逆方向上产生相对运动而实现。误差补偿运动控制的实现除了要满足补偿精度外,还要满足实际应用的方便性和市场经济的经济性。再则,考虑到机床的动态误差,还需补偿的实时性,所以,对误差补偿运动控制实现的要求是精确性、实时性、经济性和方便性。从目前来看,补偿运动控制的实现可通过:a. 修改G代码补偿法^[3-5],但实时性差;b. 压电陶瓷制动补偿法^[6],但反应慢、刚度低;c. 开放式数控系统补偿法,但绝大多数数控系统还未到开放程度;d. 数控系统内部参数调整补偿法,如螺距补偿、齿隙补偿、刀补等,但仅静态补偿;e. 原点偏移补偿法^[7-9],但受限于数控系统。

(2) 数控机床误差的综合建模和补偿问题。目前,绝大多数的补偿将几何误差和热误差分开补偿,由于机床误差的复杂性,如定位误差等实质上既是几何误差(与机床坐标位置有关)又是热误差(与机床温度有关),一般将这些误差作为几何误差进行补偿,但实际上,这些误差在不同的温度下是变化的,故对这种既是几何误差又是热误差的复合误差(严格说机床上的误差都和温度有关)要进行几何误差和热误差的综合建模和补偿。

(3) 机床误差检测和辨识时间过长问题。由于机床误差特别是热误差取决于诸如室温、机床工况(主轴转速和进给速度等)、切削参数、冷却液、加工周期等多种因素,而且机床热误差呈现非线性及交互作用,因此,这种检测和辨识通常需要很长时间。另外,由于机床上的误差元素众多,一般的激光测量仪测量,一次调整仅测得一项误差元素,如何高效快速地测量,也是个必须解决的问题。

(4) 五轴数控机床多误差实时补偿问题。目前国内外五轴数控机床补偿主要局限于几何误差建模及补偿^[10-12],而且在理论上讨论的比较多,真正实际的动态实时补偿的实施和应用的实例还是不多。而随着五轴数控机床的普遍使用,为获得更好的加工精度或补偿效果,五轴机床的多误差动态实时补偿及其应用必不可少。

补偿技术主要不足和难点的解决策略及其研究课题

1 基于机床外部坐标系原点偏移的实时补偿器研制

利用机床数控系统具有的机床外部坐标系原点偏移功能,根据机床温度、位置坐标甚至切削力数值信号的反馈对数控机床误差进行实时补偿。机床外部坐标系原点偏移的方法不需要对NC指令作修改,也不影响各个加工坐标的功能,对原有数控系统工作不产生影响。补偿具有很好的实时性,通过对误差模型的优化和修改也使得补偿更加灵活、简便和有效。由于现在的发那科、海德汉、西门子等数控系统都有这种原点偏移功能,而且国内的数控系统中也正在嵌入这种功能,所以,这种补偿是今后发展和应用的方向。图1是这种补偿器的结构示意图,图2是具体实时补偿原理图。实时补偿原理或过程如下:首先通过布置在机床上的温度传感器实时采集机床的温度信号(与热误差有关),同时,实时采集机床工作台的运动坐标位置信号(与几何误差有关)并通过A/D板和输入输出接口把这两种信号送入实时补偿器,根据预先建模并放置在补偿器里的综合误差数学模型,算出瞬时综合误差补偿值。然后,把误差补偿值送入机床数控系统,数控系统根据补偿值对刀架或工作台进行附加运动来修正误差以完成实时补偿。此系统还可结合激光测量仪和位移

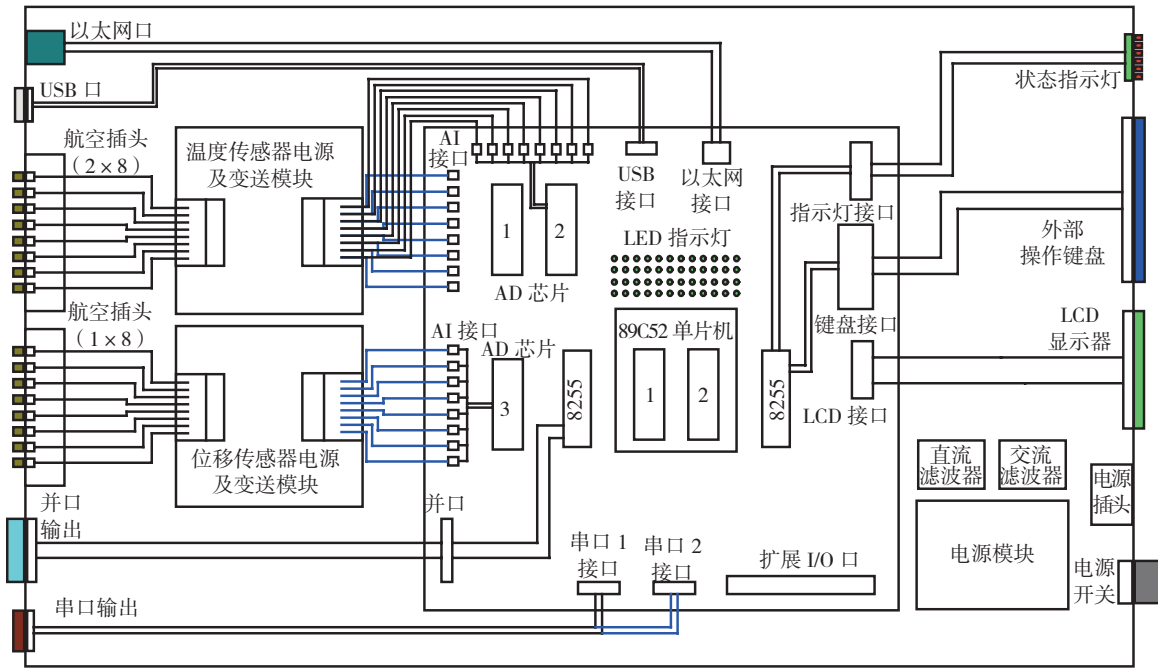


图1 实时补偿控制器结构示意图

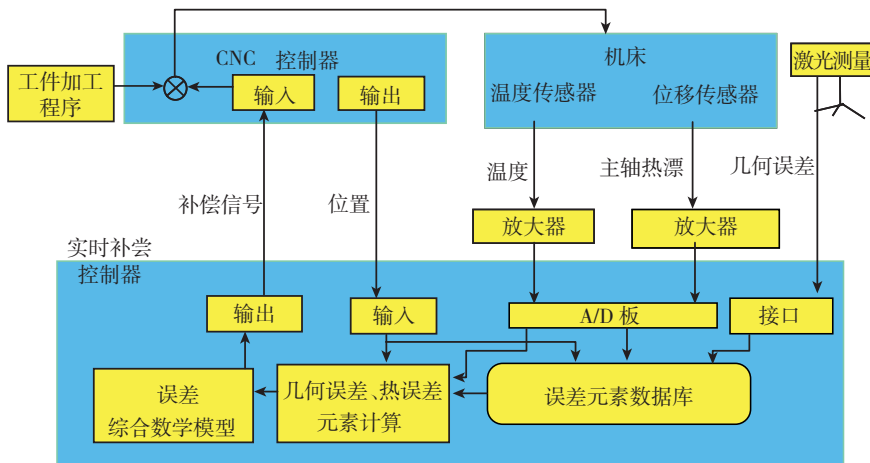


图2 实时补偿原理图

传感器及一些接口电路进行机床几何误差、热误差的测量。

2 复合误差建模和补偿

图3为不同温度下的X轴定位误差测量结果图(建模试验共进行了18次测量,为显示清楚,图中仅给出第1、5、12、18次测量结果),从图中可见,随着机床受热后的温度变化,机床定位误差也在变化。这就说明了为何在一般激光测量仪测得机床定位误差后进行补偿,但在实际的切削过程中这种补偿的效果并不令人十分满意,其实补偿的是机床冷态的定位误差,而实际上在加工过程中的

定位误差是随着机床温度变化而有变化的,故这种既是与机床运动坐标有关的几何误差又与机床温度有关的热误差可称为复合误差。复合误差的建模和补偿应该在不同的温度下,进行不同的补偿,这里的关键是如何建立复合误差的数学模型。

从图3中的误差变化的规律来看,各种温度下的轴定位误差曲线形状变化不大而整个曲线斜率有变化(这不是个例,大多数误差都有这种规律)。因此,这种误差元素可分离成如下两部分:

$$\delta_{pp}(p, T) = \delta_{pp}G(p) + \delta_{pp}T(T)$$

$\times p$, (1)
式中: p 为坐标轴 x 或 y 或 z ; $\delta_{pp}G(p)$ 为 p 轴误差元素的几何部分,它只与位置 p 有关; $\delta_{pp}T(T)$ 为 p 轴误差元素的热部分,它只与机床的温度 T 有关。

几何部分和热部分的分离见图4,几何部分在机床冷态(或第1次)时测得,用位置 p 的多项式拟合。热部分与机床上某些点温度有关,各数值为各误差曲线直线拟合线的斜率,每一次测得的一组误差数据可进行直线拟合得一斜率。式(2)是图3(X轴)定位误差的建模结果(其中 $\Delta T7$ 、 $\Delta T8$ 为X轴丝杆、螺母温度),拟合情况或建模精度可见图3。

$$\delta_{xx} = 1.1192 \times 10^{-6}x^4 + 8.9455 \times 10^{-5}x^3 + 9.0575 \times 10^{-4}x^2 - 6.2218 \times 10^{-3}x + 2.9717 \times 10^{-1} + (-2.7523 \times 10^{-2} - 4.9600 \times 10^{-3}\Delta T7 + 3.3601 \times 10^{-2}\Delta T8)x$$
 (2)

3 考虑温度变化的机床误差高效测量

为了能够在进行体积测量的过程中获得更多的信息,在机床运动工作空间进行测量时,对角线上的斜直线运动转换分别为沿X、Y、Z轴的

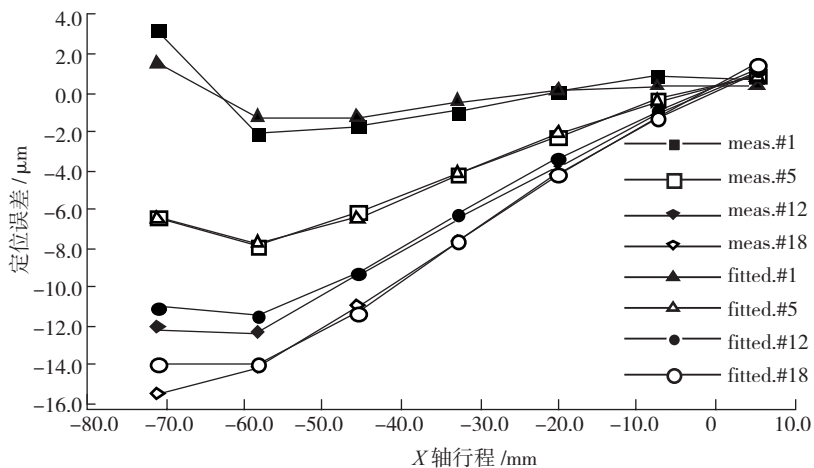


图3 不同温度下的(X轴)定位误差测量结果

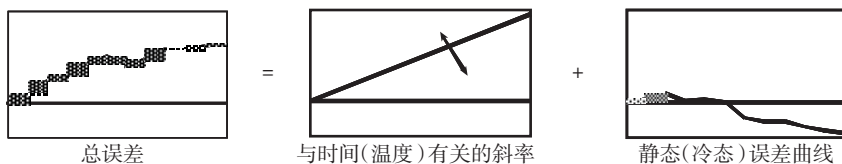


图4 几何误差和热误差的分离示意图

分步运动,也就是将常规的体对角线测量改进成如图5所示的每小步分步(3步)体对角线测量,这样可获得常规体对角线测量3倍的数据,通过一定的算法,可分离误差元素,即通过如图6所示机床工作空间4次体对角线测量,可获得3项定位误差、6项直线度误差、3项垂直度误差共计12项移动误差元素。

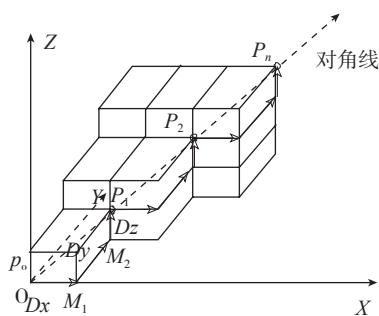


图5 分步(3步)测量

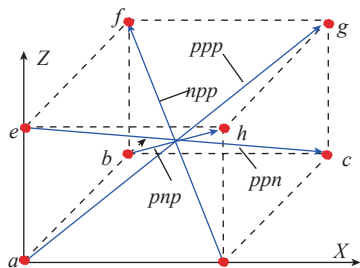


图6 体对角线测量路线

目前正在研究的问题是如何考虑机床温度变化对体积测量的影响。主要采取的方法是在机床的各种不同工作温度下进行体积测量,然后建立机床温度数据与体积测量结果数据的关系。数据采集的具体做法为:(1)机床升温,即先在机床冷态下测量,然后运转机床包括主轴回转和工作台或刀具的进给运动等使机床温度升高后机床运转停下再测,重复多次直至机床基本达到热平衡状态。(2)环境升温,即控制机床环境温度,分别在不同的环境温度下进行体积误差的测量。

4 五轴数控机床误差解耦实时补偿

五轴机床补偿与三轴机床补偿不一样。三轴补偿依据误差综合数学模型算得3个方向的误差补偿值直接补偿即可,但五轴运动中转动会引起移动即有运动耦合,故在补偿过程中要解耦。为此要采用使各运动副分别进行顺序运动的方式对机床空间综合误差进行补偿。具体补偿控制过程为:(1)通过机床二转动轴的附加旋转运动修正刀具和工件之间的空间姿态误差。(2)通过机床

三移动轴,对刀具和工件之间的原始相对位置误差以及之前空间姿态误差修正过程中产生的附加误差进行补偿。

五轴补偿的具体过程如图7所示。假设理论条件下刀具切削点以及空间姿态为位置1,实际加工条件下切削刀具的位置及空间姿态为位置2。首先机床两个转动轴产生附加转动,将刀具空间姿态调整到理论条件下的空间姿态。在对刀具进行空间姿态调整过程中,刀具在3个移动自由度方向上会产生耦合。调整刀具空间姿态后刀具的实际位置及姿态为位置3。至此,刀具的空间姿态误差得以补偿。为了补偿刀具在实际加工条件下产生的位置误差,以及刀具空间姿态调整过程中产生的耦合误差,还需要进一步调整机床3个方向的位置。在图中表现为将刀具从位置3处最终调整到位置1处。

5 机床上关键温度点优化选择

关键温度点选择有关误差模型的建模精度和模型中所需温度元素的数量,所以非常重要。温度关键点选择主要还是作相关分析,有多种相关分析方法^[13-15]。这里介绍有一种灰色理论筛选分析法。灰色理论分析法在考虑各温度测点的温度数据序列同数控机床热误差序列的综合关联度之外,还考虑了各温度数据序列之间的综合关联度。这就使得该方法除了具备定性分析法的各项优点之外,还可以避免筛选得到的温度关键测点之间的相互耦合现象,提高了数控机床热误差模型的准确度。如图8所示在机床上布置18个温度测点进行关键温度点的选择试验,试验中,工作环境温度为25°C,整个采集过程机床处于空切削加工状态,机床主要运动部件做往复运动;主轴转速设定为12000r/min,测量过程为:从数控机床冷态开机,运转3h后停机1h,然后重新开机,运转3h后再停机1h。其温度关键点选择过程如下:

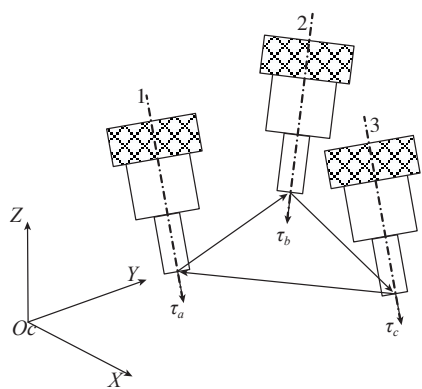


图7 五轴补偿过程示意图

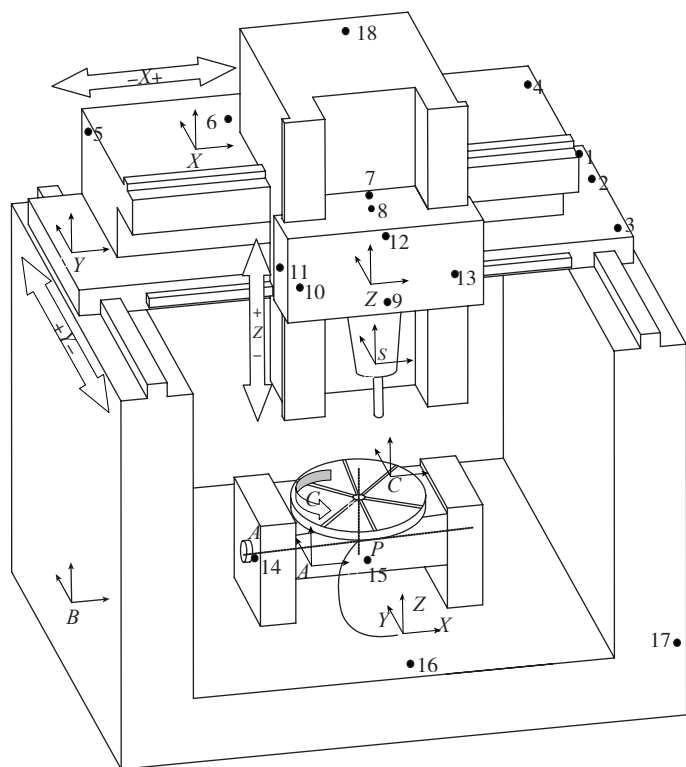


图8 温度测点在机床上的布置

最终通过对 18 组综合关联度数据进行定性研究和分析、推导和计算,选择:2 号(Y 轴滚珠丝杠螺母温度)、5 号(X 轴滚珠丝杠螺母温度)、8 号(Z 轴滚珠丝杠螺母温度)、12 号(主轴箱右前侧温度),这 4 个关键温度测点为机床温度场的关键温度测点而用于热误差建模。

6 数控机床的切削力误差补偿

切削力误差是指加工过程中切削力导致机床、刀具和工件等发生

变形,导致刀具和被切削工件之间的相对位置误差,从而产生加工误差即切削力误差。从目前来看,在国内外有关切削力误差补偿研究的报道比较少。因为一般都假定,在传统的精密加工中,由于切削力很小,所导致的变形可以忽略,故切削力变化对加工精

度影响很小。然而,强力或高效切削以及一些难加工材料切削加工应用日益广泛,在这些加工中产生的切削力比较大,所以切削力引起的加工误差变得重要起来。

数控机床主轴电机是切削加工动力源,当机床上切削力大小变化时,主轴电机电枢电流也随着变化,故可通过检测主轴电机电流变化来辨识切削力大小,再根据切削力大小来估计切削力误差进而补偿^[16-17]。

如图 9,建模时温度信号和电流信号通过 A/D 板和输入输出接口等进入补偿控制系统计算单元,同时,机床主轴转速、Z 轴进给电机转速信号后也进入补偿控制系统计算单元,在这里,将误差建立为温度、电流和转速的函数模型,然后将模型置入补偿控制系统,建模过程完成。

误差补偿控制系统结构示意图如图 10 所示,实时补偿时,根据实时采集的温度(用来计算和补偿热误差)、电流信号和转速值(用来计算和补偿切削力误差),模型计算出瞬时热误差和切削力误差值,然后,把补偿值(误差值的相反数)送入机床数控系统,机床数控系统据此实施对机床的补偿运动以完成热误差和切削力误差的实时补偿。如把数控系统中的坐标位置数据采集进补偿器还可补偿几何误差。图 10 中虚线部分仅在建模时用到,实线部分是完成实时补

(1) 计算每个温度序列相对其他所有温度序列的综合关联度值;

(2) 形成综合关联度矩阵,并对超过显著性阈值的综合关联度值进行标注;

(3) 通过行搜索的方式得到相关温度测点组;

(4) 归并对相关温度测点组;

(5) 在每个温度测点组当中选出相对机床热误差具有最大综合关联度的测点作为候选关键温度测点。

(6) 对候选温度测点进行进一步筛选,得到关键温度测点。

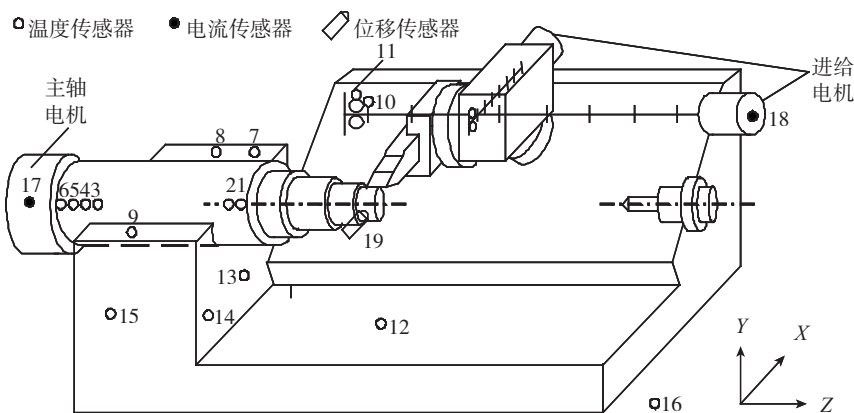


图9 误差建模试验示意图

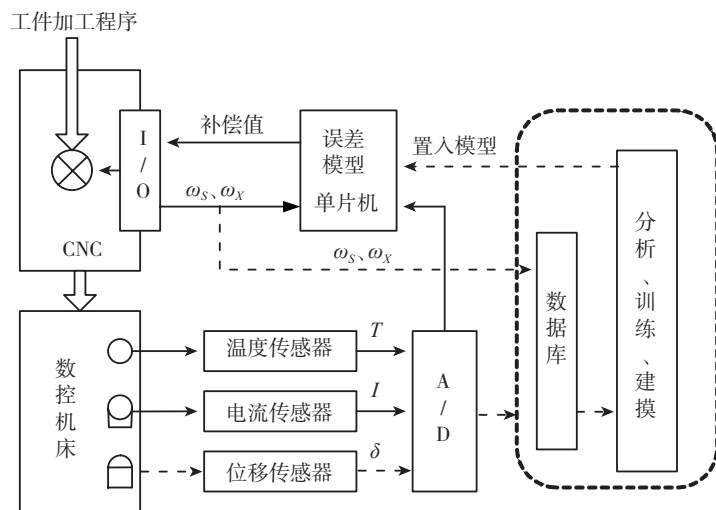


图10 补偿控制系统结构示意图

表1 切削力误差补偿前后零件加工误差对比

试验样件	未误差补偿时加工尺寸/mm	切削力误差补偿后加工尺寸/mm			切削用量
		No.1	No.2	No.3	
	R_1	12.4847	12.4936	12.4911	$n=2500r/min$ $f=100mm/min$
	R_2	12.4816	12.4913	12.4894	
	R_3	12.4782	12.4898	12.4927	
误差/mm	0.0065	0.0038	0.0033	0.0034	
	R_3	12.4887	12.4931	12.4895	$n=2500r/min$ $f=100mm/min$
	R_4	12.4853	12.4914	12.4921	
	R_5	12.4826	12.4893	12.4934	
误差/mm	0.0061	0.0038	0.0039	0.0035	

偿的过程示意。

补偿试验加工用如表1所示的阶梯轴和圆锥轴2种零件及其切削力误差补偿前后加工零件的尺寸值和误差值,材料为模具钢。加工时采用大切深进给,1刀切深加工至零件设计尺寸。由于毛坯是阶梯轴和圆锥轴,切削时切削厚度有变化,故切削力和切削力误差也随之发生变化。从表1可得,经切削力误差补偿后,两种毛坯件加工产生的切削力误差分别减少了42%和38%,机床的加工精度得到了明显提高。

结束语

误差补偿研究已经历了几十年的历史,已达到了一定的成熟阶段,但还且并还会产生问题,特别是在我国数控机床的大规模实际应用中,还

有待于我们有关人员的进一步研究,让我们共同努力,以既有效又经济的高技术手段,进一步提高数控机床加工精度,并向国内机床制造企业和机床使用单位推广和应用数控机床误差补偿技术,提高我国的机床及制造装备技术水平,增大国产机床在市场上的份额,并将我们的数控机床误差补偿技术发展国际先进乃至领先水平。

参考文献

[1] Yang J G, Yuan J X, Ni J. Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(9):1367-1381.
 [2] 杨建国. 数控机床误差综合补偿技术及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 1998.
 [3] 张虎, 周云飞. 数控加工中心误差 G

代码补偿技术. 华中科技大学学报, 2002, 30(2):13-16.

[4] Rahman M, Heikkala J, Lappalainen K. Positioning accuracy improvement in five-axis milling by post processing. International Journal Machine Tools and Manufacturing, 1997, 37(2): 223-236.

[5] 吴宇刚, 王炯槐. HMC1000 卧式加工中心按 ISO230-6 标准检测和 G 代码补偿. 机械制造, 2010(5):82-86.

[6] 李国松. 精密圆柱体补偿磨削控制的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1991.

[7] 任永强, 杨建国, 罗磊, 等. 基于外部机床坐标系偏移的热误差实时补偿. 中国机械工程, 2003, 14(14):1243-1245.

[8] 杨建国, 张宏韬, 童恒超, 等. 数控机床热误差实时补偿应用. 上海交通大学学报, 2005, 39(9): 1389-1392

[9] Wang X H, Shen J H, Yang J G. Precision Enhancement of ucp710 5-axis machine tool by real-time thermal error Compensation. Key Engineering Materials, 2008, 375-376, 539-543.

[10] Bohez E L J. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines. Computer-Aided Design, 2007, 39: 229-244.

[11] Ozturk E, Tunc L T, Budak E. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49:1053-1062.

[12] Hsu Y Y, Wang S S. A new compensation method for geometry errors of five-axis machine tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 352-360

[13] Yang J G, Ren Y Q, Liu G L, et al. Testing, variable selecting and modeling of thermal errors on a INDEX-G200 turning center. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26:814-818.

[14] 沈金华, 赵海涛, 张宏韬, 等. 数控机床热补偿中温度变量的选择与建模. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 181-184

[15] 闫嘉钰, 张宏韬, 刘国良, 等. 基于灰色综合关联度的数控机床热误差测点分组优化. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):37-41.

[16] 基里维斯. 数控机床切削力引起误差的实时补偿[D]. 上海交通大学, 2007.

[17] 吴昊. 数控机床切削力和热误差建模与实时补偿技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

(责编 小城)