

数控机床热误差补偿技术的发展状况

Development of Thermal Error Compensation Technology for NC Machine Tool

浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 傅建中 姚鑫骅 贺永 沈洪垚



傅建中

浙江大学机械工程学系教授、博士生导师,浙江大学现代制造工程研究所副所长,浙江省重大机电装备专项专家组成员。多年来一直从事机械装备设计及制造自动化方面的教学与科研工作。主持和完成国家、省部级和企业科研项目 20 余项,发表学术论文 80 余篇,获国家发明专利 5 项。主要研究方向:数控机床及数控技术、热误差补偿与控制。

精密数控机床的热变形误差、结构几何误差、承载变形误差及伺服跟踪误差已成为影响系统加工精度稳定性的关键因素。特别是近年来随着高速加工技术的推广和应用,高速数控机床的主轴速度和进给速度

热变形误差补偿是提高精密数控机床加工精度的关键技术之一,热误差补偿控制设备已成为现代高档数控机床必备的智能模块。

成倍提高,使机床结构的热变形和位置控制的跟踪误差随之增大。大量研究表明,热误差是数控机床等精密加工机械的最大误差源,占总误差的 40%~70% 左右^[1]。由于数控机床在工作中不可避免地要发热,特别是由于其内部热源多,在传热和散热时温度梯度变化,切削液、环境温度影响,由间隙、摩擦等引起的热滞现象,以及接触面复杂热应力引起的变形等,以上因素导致热误差表现为时滞、时变、多方向耦合及综合非线性特征,增加了用数学模型描述热误差的复杂性及误差补偿的不确定性。因此,国内外在数控机床热误差补偿与控制方面进行了大量研究,近年来国外取得了较大进展,有些技术已应用于高速高精度数控机床。

国内外研究概况

目前,数控机床热变形控制一般从热误差的在线间接补偿和优化机

床结构入手,并已成为国内外学者的研究热点^[2-3]。在热误差补偿方面,美国密歇根大学取得了令人瞩目的成果^[4-5]。他们应用热误差补偿技术,使美国通用(GM)公司下属一家离合器制造厂的 100 多台车削加工中心的加工精度提高了一倍以上,并使加工波音飞机机翼的巨型龙门加工中心的加工精度提高了 10 倍。加拿大 McGill University 发表了系列论文,提出了一种优化机床热变形实时补偿的新方法——通用模型法和 S 域 IHCP 法来求解机床热变形,解决了经验模型中补偿函数相对于位移函数、位移函数相对于温度分布函数均需要离线调整的缺点,而且求解效率高^[6]。日本东京大学根据智能制造新概念已开发了由热致位移主动补偿热误差的新结构,并在智能高速加工中心上予以实现^[7]。韩国学者研究了综合主轴热误差和进给系统热误差的数控机床实时补偿系统^[8]。

德国 Aachen 大学在热结构优化设计和热误差补偿方面也做了大量的研究工作^[9]。

日本 MAKINO 公司使用中空滚珠丝杠新结构,以温度补偿系统,使冷却油通过滚珠丝杠中孔,实现滚珠丝杠工作过程热变形控制。2003 年瑞士 Mikron 公司开发出智能热补偿系统 (ITC) 模块,配置了 ITC 的机床能自动处理温度变化造成的误差。智能热补偿系统的优点是能够提高加工精度,缩短加工时间。与其他同类机床相比,可节省 15 ~ 25min 的机床预热时间,而且进行超精密加工所需要的热稳定时间也明显缩短。近年来,日本 OKUMA 公司独创了“热亲和概念”,这是一种新的构思。

国内多家机构也展开了热变形控制技术研究。上海交通大学在热误差鲁棒建模技术、热误差补偿模型在线修正方面取得多项成果^[10-11]。北京机床研究所研制了智能补偿功能板,实现机床热误差、运动误差和承载变形误差的自动补偿并对数控机床误差的综合动态补偿技术进行深入的研究^[12]。浙江大学在离散化固体热系统基础上,提出了热模态分析理论和热敏感点理论^[13-15],为机床温度测点的选取和热误差建模提供了依据;近年来又开展了奇异值分解识别机床热态特性^[16]、机床热误差主动热校正及参数遗传优化^[17]、热误差模糊神经网络建模的研究^[18],开始把人工智能技术应用于机床加工误差补偿中。同时,提出了相变材料复合恒温构件的新结构,将相变材料注入到机床基础件中,根据相变材料在发生相变时吸收或放出能量而温度保持不变的特性,可在一定范围内消除基础件热变形^[19]。天津大学在基于多体理论模型的加工中心热误差补偿技术^[20]、基于主轴转速的机床热误差状态方程模型^[21]、数控机床的位置误差补偿模型建立^[22]等方面开展了深入研究。华中科技大学

提出了一种基于神经网络辨识影响机床热误差关键点的新方法^[23]。清华大学提出了一种基于自组织原理的主轴热误差补偿策略,它只需根据对主轴热倾斜状态的定性测量结果即可进行定量误差补偿^[24]。北京机械工业学院提出了神经网络补偿机床热变形误差的机器学习技术^[25]。台湾的国立台湾大学和台中精机公司合作进行了“高精度工具机热变形补偿控制技术”的研发,对误差补偿单板电脑系统模组化、温度传感器最佳放置点研究、误差补偿单板电脑系统验证、现场快速误差检测系统等进行研究,使其研制的立式机床的加工精度从 50 μm 以上降低到 10 μm 以下^[26]。

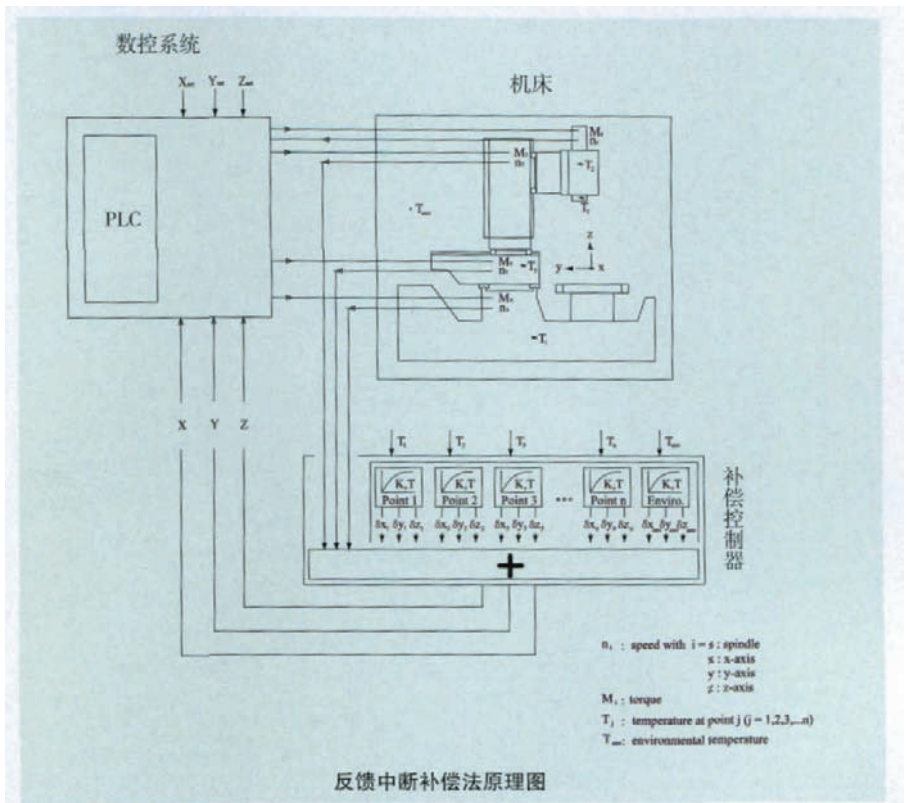
热误差补偿的技术路线

至今约有 10 多家技术领先的公司拥有数控机床热变形误差的自动补偿技术。

近年来,曾开发了两种不同的技术来实现误差补偿:反馈中断补偿法和原点平移补偿法。反馈中断补

偿法是通过将热误差模型的计算数值直接插入到伺服系统的位置反馈环中而实现的。热误差补偿控制器获取进给驱动伺服电机的编码器反馈信号,同时,该补偿控制器还计算机床的热误差,且将等同于热误差的数字信号与编码器信号相加减,伺服系统据此实时调节机床的进给位置。该技术的优点是无需改变 CNC 控制软件,可用于任何 CNC 机床,包括一些具有机床运动副位置反馈装置的老型号 CNC 机床。然而,该技术需要特殊的电子装置将热误差信号插入伺服环中,这种插入有时是很复杂的,一般需要局部改动 CNC 控制系统的硬件。

原点平移补偿法原理是热误差补偿控制器计算机床的热误差,这些误差量作为补偿信号被送至 CNC 控制器,而后通过 CNC 控制系统中 PLC 的 I/O 口平移参考原点,以此实现热误差量的补偿。这种补偿既不影响坐标值,也不影响 CNC 控制器上执行的代码程序,因此对操作者而言,该方法是不可见的。原点平移法



不用改变任何 CNC 机床的硬件,但它需要改变 CNC 控制器中的可编程控制器单元的程序,以便在 CNC 控制器可以接收补偿值。原点平移热误差补偿法是目前常用的实现方法。

热误差补偿的最新发展

热误差补偿的最新技术是日本 OKUMA 机床公司独创的“热亲和概念”,“即使在温度变化环境下也能实现自动、高精度加工的人工智能化机床和技术”是称为热亲和概念的基础技术,利用这种新的精度补偿技术能够排除因加工中发热和设备环境温度变化对加工精度的影响,使加工过程中的尺寸精度变化非常小。

热亲和是一种新的构思,它是在尽可能抑制热量发生的同时,对不可避免产生的热量采取接受的考虑方法。要预测所产生的所有复杂热变形是相当困难的,但如果仅产生可以预测的热变形,就可以采用补偿的方法来消除热量产生的影响。这样,即使不用大型空调装置来控制整个设备或车间内的温度,也能在通常的大气温度范围内保持高的加工精度。

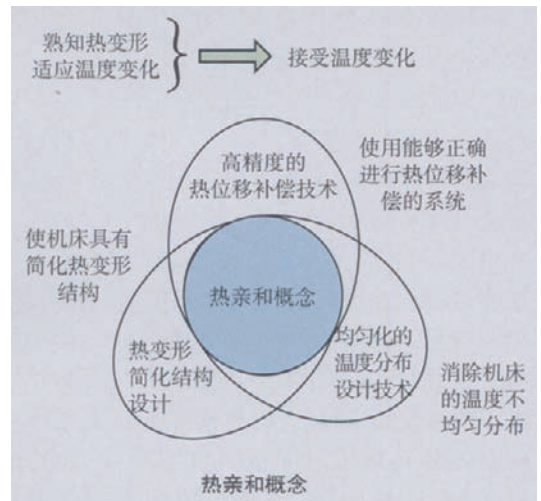
现在,OKUMA 公司已开发了一

种称为箱形组合的简单的新型积木式结构立柱,这种左右两侧大致均衡的构造确保了热量对称分布。由于采用了单纯的箱式组合,所以即使环境温度发生变化,机床也是按预定的方向进行伸缩。此情况下的膨胀和收缩量在以热量分析为基础的设计阶段可以预测,并与实际机床的测量数据进行比较,其预测结果和测量数据几乎相同。此外,如果立柱具有露出部分和罩盖部分,则外界空气不同的流动方向就能防止发生不均匀的温度变化。为此,所采取的措施

是采用热量均匀分布的结构,前侧用罩子覆盖,而将数控箱安装在后侧,以此确保前、后侧的条件相同。这些措施可以做到预测热量变化的大小。

机床运转时最大的发热源是主轴电机。为了减少这部分产生的热量并有效地进行冷却,对主轴轴承的四周采用双重结构的油套。这些轴承利用油气进行润滑,位于两侧的喷嘴确保了热量均匀分布。尽管如此,随着主轴转速的升高将会产生更多

的热量,上述结构不能消除更高的主轴转速所增加的热量,为此,OKUMA 公司开发了新的主轴热位移控制功



能 TAS-S,利用这个功能可以预测并补偿主轴所产生的热量变化。安装在机床上的温度传感器对不同的条件(起动时、运转中、加工结束时及主轴转速等)变化进行微调,并与温度跟踪延迟、温度变化梯度等条件因素一起进行补偿。

结束语

热变形误差补偿是提高精密数控机床加工精度的关键技术之一,热误差补偿控制设备已成为现代高档数控机床必备的智能模块。

我国在重大专项“高档数控机床与基础制造装备”中已把动态综合补偿列入需要攻关的关键共性技术,可见误差补偿技术已引起国家层面的高度重视。可以预计,在不久的将来我国将开发成功具有自主知识产权的高精度、低成本热误差补偿器,可对主轴和刀具间的热变形误差进行实时修正,并嵌入到国产的数控系统中,为大批数控机床误差实时补偿的实施创造有利条件。

本文有参考文献 26 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请与本刊编辑部联系。

(责编 侧卫 岩石)

