DOI: 10.3901/JME.2021.03.156

数控机床进给轴热误差补偿技术研究综述*

刘 阔^{1,2} 韩 伟¹ 王永青¹ 刘海波¹ 宋 磊¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024;

2. 华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

摘要: 机床在内外热源共同作用下产生热变形,严重影响机床的精度稳定性与零件加工精度,如何抑制机床热误差是一个重要的研究领域。介绍了机床热误差避免方法和热误差补偿方法的研究进展。分析了直线进给轴误差的成因,并阐述了有/无预紧条件下丝杠热变形过程及机理。介绍了温度测点位置优化方法,以及数据驱动与机理驱动的热误差建模理念、方法及特点。介绍了旋转进给轴热误差测试方法,并给出了其建模及补偿效果。最后,对进给轴热误差补偿技术研究进行了展望。

关键词: 数控机床; 进给轴; 热误差; 热补偿; 精度稳定性; 热和谐设计

中图分类号: TG156

Review on Thermal Error Compensation for Feed Axes of CNC Machine Tools

LIU Kuo^{1,2} HAN Wei¹ WANG Yongqing¹ LIU Haibo¹ SONG Lei¹

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: The thermal deformation of the machine tool under the combined action of internal and external heat sources seriously affects the accuracy stability of the machine tool and the machining accuracy of components. How to suppress the thermal error of the machine tool is an important research field. The research progress of machine tool thermal error avoidance method and thermal error compensation method are introduced. The cause of the error of the linear feed axis is analyzed, and the thermal deformation process and mechanism of the ball screw with or without preload are explained. The optimization method of temperature measurement point location is introduced, as well as data-driven and physics-based thermal error modeling concepts, methods and characteristics. This paper introduces the thermal error test method of the rotary feed axis, and gives its modeling and compensation effects. Finally, the prospect of the research on the thermal error compensation technology of the feed axis is presented.

Key words: CNC machine tool; feed axis; thermal error; thermal compensation; accuracy stability; thermal harmony design

0 前言

高端数控机床作为机械加工领域的工作母机,是国之重器。《中国制造 2025》将高档数控机床列入十大重点支持领域。目前,国产机床的定位精度已经达到微米级甚至亚微米级,然而其精度稳定性

只能达到“道”级或亚毫米级。其中,热误差是影响国产机床精度稳定性的主要因素之一。

诸多文献显示,热误差约占机床总误差的 40%~70%^[1-3]。实际上,当机床类型、精度等级、加工要求等不同时,热误差占机床总误差的比例会有较大差别。尽管如此,热误差仍然是影响机床精度稳定性的主要因素。即使机床的静态精度很高,但在使用中由于环境温度变化和运动部件发热等原因,也会导致机床的精度降低。由于机床热误差的存在,在实际生产中存在的问题包括:① 批量零件的废品率高;② 机床开机后需要热机;③ 如果对

* 国家自然科学基金(51775085、U1608251)、辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC1807081)和长江学者特聘教授奖励计划(T2017030)资助项目。
20200510 收到初稿,20201114 收到修改稿

工件精度要求高,还需要建设高成本恒温车间。这些问题表明热误差对机床造成了众多不良影响。

影响机床的热源很多,总体上可分为外部因素和内部因素两大类^[4]。外部因素包括光照、车间空调送风、工作人员体温等,主要以热对流方式影响机床精度。内部因素包括电机励磁热、轴承和丝杠螺母副摩擦热、切削热等,主要以热传导和热对流方式影响机床精度。实际上,内部热源对机床精度的影响更大。影响机床的各种热源如图 1 所示。

图 1 影响机床的内外部热源

内部和外部热源引起机床温度升高,导致工件与刀具的相对位置发生变化,出现加工误差^[5-6]。工件和刀具的相对位置是由进给运动和主运动的准确性决定的。因此,热源对机床精度的影响主要着落在进给轴和主轴上。相应地,机床的热误差主要分为进给轴热误差和主轴热误差。尽管一些学者对机床结构件的热变形开展研究,如刘明尧等^[7]分析龙门结构机床的龙门架和梁的热变形,TANABE 等^[8]使用简单模型研究了钢与树脂混凝土结构的热变形。但是实际上,这些结构件的热变形都可以归结到进给轴和主轴上,结构件热变形对主轴的影响如图 2 所示。即机床的热变形最终导致进给轴几何误差和主轴误差的变化,机床的总体热误差也可以视为主轴热误差和进给轴热误差的叠加^[9]。本文主要聚焦于对进给轴热误差进行系统性阐述。

图 2 结构件热变形对主轴的影响

通过对近年来数控机床热误差相关研究的梳理,结合作者课题组的研究进展,在数控机床热误差抑制方法、热误差测试、建模与补偿方法等方面展开论述,为相关研究人员提供借鉴和参考。

1 机床热误差的抑制方法

对机床热误差的抑制方法主要包括误差避免法和误差补偿法^[10]。这两种方法可以共同应用,也可以以一种方法为主。

1.1 误差避免法

误差避免法是通过设计、制造等方面的措施来消除或减少机床热误差,如热和谐设计、热对称结构、隔热材料、全闭环控制、强制冷却、环境温度控制等。

热和谐设计指的是在机床坐标系的某一方向,使主轴和进给轴的热误差变化规律相同以减小机床的总体热误差。图 3 给出了卧式数控车床的热和谐设计示意图。机床在工作过程中,主轴受热产生 X 方向的热误差分量 E_{sx} ,根据热和谐设计理念,X 轴也应被设计成受热后产生与之方向相同的热误差 E_x 。这样,主轴和进给轴热误差可以部分或完全抵消。哈尔滨工业大学 LIANG 等^[11]分解了机床各个零部件的热位移,通过使零部件的热位移相互抵消达到减小热误差的目的。高建民等^[12]详细介绍了机床结构热平衡与优化设计、冷却设计方法,探究了机床系统的热设计与冷却的问题。

图 3 数控车床的热和谐设计

热对称设计是对机床整体结构进行设计时,尽量使零部件的热源、散热面积、导热途径和零件的质量等对称分布,以减少机床的热变形。卧式镗床立柱结构的热对称设计如图 4 所示。清华大学 ZHANG 等^[13]对机床主轴箱结构进行对称设计,优化冷却槽布局参数,进而减小了机床的热变形。

采用光栅尺等闭环反馈控制方法可以在一定程度上减小热误差。然而,采用光栅尺不仅成本较高,更重要的是,光栅尺也会受热的影响发生热膨胀。

常用的玻璃光栅带热膨胀系数为 $8 \mu\text{m}/(\text{m}\times^{\circ}\text{C})$ 。当机床加工热膨胀系数较大的材料时,如铝、铜等,机床的热膨胀率与零件差别较大,零件加工误差仍然会比较明显。

图4 卧式镗床的热对称设计

在其它热误差避免法研究方面, TAMAI 等^[14]在机床的滑动部分安装玻璃棉、矿物棉、可发泡聚氨酯或聚苯乙烯构成的隔热罩,部件本身安装在导轨表面上,这些材料可以平衡滑动部分上的热变形。AGGOGERI 等^[15]将铝泡沫和波纹芯夹心板分别与相变材料混合,得到了两种机床结构件新材料。新材料可以减轻结构重量并提高阻尼性能和刚度,从而保证机床的热稳定性和动态稳定性。XU 等^[16]采用强制冷却的方法,在滚珠丝杠轴中设置空气冷却系统,以克服热误差,更快地实现温度平衡。KORETA 等^[17]提出机床主轴的热电冷却方法,对降低主轴许多不同部位的温度,以及降低主轴的热位移均有显著作用。BARTA 等^[18]介绍基于热传递函数的主动冷却控制系统,并在机床电主轴内置冷却套上进行试验验证,把机床残余热误差控制在 $[-3, 3] \mu\text{m}$ 范围内。SUN 等^[19]通过增加两个相邻零件接触区域间隙的方法降低传热效率,并优化电机连杆、主轴和主轴箱结构,减小了机床的热误差。傅建中等^[20]研究主动热矫正机理,提出主动热控制精度指标。通过在机床上安装主动热源,并采用遗传算法优化热控制源幅值,使机床达到热平衡状态。

热和谐设计可以在设计阶段,通过机床结构优化直接减少机床原始误差的产生。但是由于实际加工中主轴转速和进给速度复杂多变,两者的热误差一般无法完全抵消。热对称结构是一种比较好的热误差抑制方法,但其局限性是只有很少的进给轴可以设计成热对称结构,如卧式镗床、龙门机床等的特定方向。由于机床功能实现的原因,大部分机床的进给轴都不能设计成热对称结构,这也就限制了热对称结构的应用。采用隔热材料等方法利用这些新型材料优异的热力学性能可以在一定程度上阻断或减少热量的传递,比如大理石材料应用于机床床身就有不错的效果。强制冷却方式是一项效果显著

“硬技术”,但是存在成本高的问题。丝杠冷却、螺母冷却和双重冷却丝杠的价格约为普通型丝杠的2倍。冷却机的价格可占到一台立式加工中心总价格的5%~10%。而且,冷却系统的启动是间歇的,这将导致机床精度的波动。另外,冷却系统的运行也增加了能源消耗。

综合来看,误差避免法是一种利弊共存的误差抑制方法。而且,误差避免法有一个重要缺点,即应用误差避免法所需的成本会随机床精度水平的提高呈指数形增长^[21]。密歇根大学教授吴贤铭曾说过:“误差补偿技术的奥妙在于可以在精度不高的机床上加工出精度很高的零件”。这是一种“进化加工”的理念。得益于此,误差补偿技术被广泛应用于提升机床的精度。

1.2 误差实时补偿法

误差补偿法是通过人为地创造出一种误差去抵消机床的原始热误差。它可以明显降低机床的热误差,所需成本低,应用灵活,且可在已服役的机床上实施。

误差补偿的实施方式与数控系统有关。对于开放式数控系统,可以将误差补偿算法编写到数控系统主程序中;对于半封闭的商用数控系统,可以采用外置补偿器。对于大多数研究人员来说,外置补偿器是主要的误差补偿实施方式。外置补偿器通过数控系统的通讯协议(如西门子数控系统的 OPC UA、发那科数控系统的 FOCAS2 等)读取实时补偿需要的位置、转速等信息,经过补偿器实时计算出补偿量,再将补偿量写入数控系统中。

从补偿原理看,常用的有反馈中断法和坐标原点偏移法。反馈中断法将补偿量插入机床伺服系统的反馈回路中,经过 CNC 控制器实现补偿。反馈中断法将补偿量插入伺服反馈回路的过程相对复杂,但适用于大多数数控系统。坐标原点偏移法通过 I/O 接口将补偿量输入到 CNC 控制器中,利用数控系统的外置机械坐标系原点平移功能实现补偿,这种方法不会对加工编程及操作造成任何影响,具有更好的实时性,对误差模型的优化也更加灵活。两种方式的补偿原理如图5所示。

机床上的进给轴包括两类:直线轴和旋转轴。直线轴一般由丝杠螺母副或直线电机传动,热误差对直线轴的精度影响较大,尤其是丝杠螺母副传动的直线轴。旋转轴一般由力矩电机或蜗轮蜗杆传动,受热因素影响的程度与其结构有关。直线轴热误差主要主要研究直线轴丝杠螺母副等主要热源对丝杠的热影响,已经有大量学者对这一课题进行了深入

研究,取得了许多成绩。学者们对旋转轴热误差的研究相对较少,在测试、机理分析、建模与补偿方面均存在一定困难,需要对其进行深入探索与研究。

图5 补偿原理

虽然机床热误差补偿研究已经有多年历史,但是随着《中国制造 2025》、德国工业 4.0 等计划的实施,机床向智能化方向发展,误差补偿技术又迎来了重大发展机遇。

2 直线进给轴的热误差

直线进给轴主要受热源丝杠螺母副和轴承的影响,产生了沿丝杠轴向的热致误差。学者们通过合理地测量直线轴的温度场与对应热误差,建立了热误差预测模型,并将误差估计值补偿进数控系统,抑制直线轴的热致误差。

2.1 直线轴热误差的成因

对于进给轴 X 来说,静态的几何误差包括定位误差 $P_x(x)$ 、直线度误差 $S_y(x)$ 和 $S_z(x)$ 和转角误差 $R_a(x)$ 、 $R_\beta(x)$ 、 $R_\gamma(x)$ 。另外,进给轴 X 和 Y 之间还有垂直度误差 $V_{xy}(x,y)$ 。当受热的影响后,这些误差将是某些位置点和温度 T 的函数,因此进给轴的热误差包括: $P_x(x,T)$ 、 $S_y(x,T)$ 、 $S_z(x,T)$ 、 $R_a(x,T)$ 、 $R_\beta(x,T)$ 、 $R_\gamma(x,T)$ 、 $V_{xy}(x,y,T)$ 。

一些学者对直线度误差、转角误差和垂直度误差的热致误差进行了研究。SVOBODA 等^[22]分析了热效应导致的直线度和垂直度误差,ZHANG 等^[23]建立了空间误差与热因素的关系模型。OKAFOR 等^[24]研究了立式加工中心的角度误差随时间的变化量,但是未建立角度热误差的模型。

相对而言,定位误差受热的影响更大,是热误差研究的重点。一般来说,进给轴热误差指的就是

热导致的定位误差。进给轴热误差研究主要聚焦于行程范围内的热膨胀误差(Thermal expansion error, TEE),它主要是由于环境温度变化和机床运动生热而产生的。实际上,除了 TEE,进给轴的热误差还包括原点的热漂移误差(Thermal drift error, TDE)。一般认为,进给轴的原点是固定不变的。而实际上,进给轴的原点相对主轴的位置是会变化的。由于受到轴承座发热、行程范围内丝杠热传导、环境温度变化的共同影响,原点相对于主轴的位置也会产生热漂移。因此,进给轴的综合热误差(Comprehensive thermal error, CTE)是 TEE 和 TDE 的叠加。TEE 是与位置坐标和温度相关的,TDE 却与位置坐标无关。进给轴的主要热源及热误差如图 6 所示。从图 6 可以看出,进给轴主要热源为螺母和轴承座,电机距离丝杠较远,影响较小。

图6 进给轴主要热源及热误差

进给轴的 CTE 测试方法以及升降温过程中的误差变化规律如图 7 所示。需要说明的是,在 CTE 测试中,如图 7a 所示,只有第一次初始热稳态的误差测试需要执行“清零”操作,其后的误差测试均不能执行“清零”操作。只有这样,才能得到各个时刻的 TDE。图 7b 中,圆点折线 1-4 表示机床运动升温的过程,方块折线 5 和 6 表示机床停止后的降温过程。CTE 分离的具体方法为:将各次测试的热误差数据平移,使其起点误差为 0,可以得到 TEE;将各次测试起点误差值提取出来可得到 TDE。LIU 等^[25]阐明 TEE 和 TDE 的成因,给出 CTE 热误差的测试和分离方法,对 TEE 和 TDE 进行建模和误差补偿。

对预拉伸丝杠的热行为机理和热误差变化规律的研究较少。OYANGUREN 等^[26]建立预拉伸的高速滚珠丝杠螺母的传热有限元模型,并基于解析模型预测丝杠螺母摩擦产生的热量,以估计螺母中的温度分布,并通过试验加热测试验证有限元数值模型。ZHANG 等^[27]分析两端固定的丝杠系统的应力和形

变,并引入新的技术参数-临界预紧力。推导关于综合临界预紧力的方程式和求解方法,并给出关于最终预紧力的表达式。最后,通过试验验证这种预紧力计算方法的合理性。

图 7 CTE 的测试流程和分解

LIU 等^[28]对预拉伸丝杠的热变形规律进行详细研究。采用热成像仪获得了轴承座在承受轴向预紧力时的温度场,如图 8 所示。对比有/无预拉伸和不同预拉伸量的数据,如图 9 所示。当无预拉伸时,丝杠在往复运动后产生 TDE 并且在升温时正向增加。在降温后的一段时间内,由于轴承座的温度仍然高于丝杠,因此继续向轴承座和原点之间的丝杠传热,导致 TDE 继续增加。随着轴承座温度的快速降低和轴承座和原点之间丝杠的散热, TDE 将逐渐降低。当有预拉伸时,预拉伸丝杠在往复运动时, TDE 呈现出先下降后上升的趋势。这是由于轴承座的刚度与丝杠的刚度接近,预拉伸不仅拉长丝杠,也导致轴承座变形,使得两端轴承座之间的距离变小。因此,在往复运动后,一方面,轴承座的热量向轴承座和原点之间的丝杠传递,使得丝杠向正向移动;另一方面,轴承座向原状态恢复。两者的共同作用导致原点先向负向移动,等轴承座恢复原状

态后,原点才向正向移动。降温过程中 TDE 先升后降的现象与无预拉伸时的原因相同。另外,预拉伸后的丝杠最大热伸长量远小于无预拉伸时的热伸长量,这是由于丝杠热膨胀误差需要抵消丝杠的预拉伸量造成的。

图 8 预拉伸丝杠的温度场

图 9 有/无预紧时进给轴的 TDE

对上述分析进行总结,可以得到预拉伸丝杠完整的热变形过程,如图 10 所示。

(1) 在抵消丝杠的轴向拉应力之前,丝杠应力会因摩擦热而逐渐释放,两个轴承座之间的距离将增加。

(2) 当丝杠的应力释放为 0 时,两个轴承座将恢复正常状态。

(3) 由于摩擦热影响,丝杠继续向右自由伸长。

(4) 丝杠达到动态热平衡。

(5) 如果丝杠在达到动态热平衡之前开始冷却,则热误差会变小。

从图 10b 可以看出,由于预紧力的存在,丝杠的热误差呈现出非线性的特性。这种现象使得有/无预拉伸丝杠的热误差建模更加不同。

2.2 直线轴温度测点的优化

温度测点优化研究一直是机床热误差补偿研究领域的一项重点工作。在进给轴的温度测点优化方面,国内外学者做了大量的研究,采用的方法有逐步回归法、高斯积分法、模糊聚类法、热模态分析法、灰色系统理论等。

(1) 逐步回归法。

逐步回归法是研究多个自变量建模较为理想的方法,但是当变量较多时,所需的计算时间长。而且,逐步回归法只考虑热误差与各温度之间的相关性,会导致热误差建模中出现温度变量耦合现象,降低模型的精度^[29-31]。因此,逐步回归法适合于自变量个数较少的热误差模型。LI 等^[29]提出一种重构变量回归(Reconstructed Variable Regression, RVR)算法,使进给轴温度测量点的数量可从 9 个减少到 2 个,并使预测精度达 90%左右。

(2) 高斯积分法。

利用高斯积分法分析机床的温度场,将温度传感器作为高斯积分点,分布在预先确定的温度场中。由于可以预先确定温度测点的数量和分布位置,所以可避免获得机床温度场所需的大量时间^[32]。

(3) 模糊聚类法。

模糊聚类法将温度测点聚集为若干类,从每一类中选出一个代表来计算热误差。在变量分类后还要再进行关联分组,并选取相关性最大的变量作为该类的典型变量,从典型变量中再选取更具代表性的温度变量,从而最终应用于建模当中^[33-35]。此方法能够避免变量耦合,提高寻找最优温度测点的效率。HAN 等^[35]利用模糊聚类分析识别温度变量,将 32 个变量分为 4 个聚类,提出了基于 4 个温度变量的热误差模型。

(4) 热模态分析法。

该方法将机床热误差看作是热模态的叠加^[36,37]。热误差模态更多地依赖于热源分析、工程判断和实验数据。要找到具体某台机床影响热误差的主要热误差模态难度较大,所以该方法在实际应用中会遇到困难。

(5) 灰色系统理论。

灰色系统理论适用于样本数量较小的情况,因此当获得数据较少时,可以用此方法确定关键温度点。LI 和 YAN 等^[38-39]基于灰色系统理论,将热误差模型中的温度变量从 16 个优化到 4 个,提高模型的鲁棒性和预测精度。马驰等^[40-41]使用灰色聚类分组优化温度测点位置,利用五点测量法测试机床热特性,建立反向传播 GA-BP(Genetic algorithm-back propagation)热误差模型,在收敛性、收敛速度、预测精度、泛化能力和通用性上都强于 MIMO-BP(Multiple input multiple output-back propagation)模型。CHENG 等^[42]采用灰色粗糙集理论优化模型温度测点,并通过 RBF 神经网络预测热误差。

还有一些学者通过统计学方法判别并优化温度测点布置。弗劳恩霍夫机床与成形技术研究所 NAUMANN 等^[43]通过判断最小二乘估计器协方差特征值,优化温度传感器的位置,将刀具中心点的最大近似误差减小为原来的 25%,传感器布置如图 11 所示。捷克技术大学 VYROUBAL^[44]根据样本相关系数统计评估选择传感器测点布置,在两台机床上的补偿实验中,对刀具中心点误差的补偿精度分别达到 66.5%和 71%。赵万华和李旻等^[45]通过 SPSS 软件计算变量的标准回归系数并进行重要性排序,优化了温度测点位置布置。

图 11 温度传感器布置优化^[43]

除了上述方法外, LI 等^[46]引入平均冲击值 (Mean impact value, MIV) 选择温度关键点, 将 13 个测点优化为 4 个并用于热误差建模。DU 等^[47]通过主轴一维结构理论模型热过程微分方程确定存在一个最佳传感器位置, 加热冷却试验表明 0.37 倍主轴长度的位置最佳, 结合线性热误差模型用于补偿卧式加工中心热误差, 补偿效果良好。姚鑫骅和傅建中等^[48]引入互信息量计算测点温度与主轴热变形的相关性, 采用人工鱼群算法求解可选测点组合的优化解。LI 等^[49]提出一种五点测量法用于机床主轴温度测量, 利用偏相关分析法将 12 个原始温度变量降低为 2~3 个敏感变量。

在进行实际热误差补偿时, 为节省测试时间, 也可采用经验法确定温度测点。另外, 对于数据驱动模型 (Data-driven model, DDM), 采用合适的温度测点优化方法将十分重要。但是, 对于机理驱动模型 (Physics-based model, PBM), 就不需要优化测点位置, 因为 PBM 模型中的温度是有明确物理意义的。例如, 在文献[9, 50]的 PBM 模型中, 需要丝杠的初始温度及其周围环境实时温度数据, 那么将传感器放置在丝杠附近的床身上即可。

2.3 直线轴热误差建模

在很多进给轴热误差建模的研究中, 多元回归法^[51-60]、神经网络法^[61-68]、灰色理论^[69-71]、支持向量机^[72-76]等得到广泛应用。

多元回归分析 (Multiple regression analysis, MRA) 常用于热误差建模, 其模型表达式为

$$E = pX + q \quad (1)$$

式中, E 表示进给轴误差; X 表示自变量, 如温度、转速等; p 表示回归系数; q 为回归常数项。

YUAN 等^[51]构造滑台系统的有限元模型, 通过热传导原理获得边界条件, 对线性轴建立多元线性回归的与位置无关的热误差模型, 机床 Y 轴三项误

差 $S_y(y)$ 、 $S_z(y)$ 和 $R_a(y)$ 的最大拟合残差分别为 $9.6 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 和 $7.1 \mu\text{rad}$ 。杨军等^[52]研究双驱伺服进给系统热误差, 利用红外热成像仪、温度传感器等测试整机温度场和热变形, 建立关于位置的热误差回归模型, 预测精度约为 85%。马军旭等^[53]建立半闭环直线轴热误差回归模型, 半闭环机床的最大热误差由补偿前的 $76 \mu\text{m}$ 降低为补偿后的 $9.9 \mu\text{m}$ 。LIU 和 MA 等^[54]提出基于均匀变换法的五轴机床数据驱动热致误差补偿方法。通过分析五轴机床的误差传递链来获得补偿分量, 直线轴的热误差表示为时间多项式函数与位置多项式函数的乘积, 并分离了热误差和几何误差。主轴热误差表示为临界温度的多元线性回归模型。加工补偿实验表明, 与无补偿和传统误差补偿情况对比, 加工误差分别减少了 85% 和 37%。类似的, ZHANG 等^[55]和 SHI 等^[56]也建立了基于回归分析法的直线轴热误差模型。波兰西波美拉尼亚技术大学 PAJOR 教授^[57]建立了进给轴热误差解析模型, 进给轴热误差从 $73 \mu\text{m}$ 降低为 $13 \mu\text{m}$, 降幅超过 80%。

神经网络被广泛应用于热误差建模中。YANG 和 NI 等^[61]提出一种新的非平稳机床热误差建模方法。该方法利用动态神经网络模型跟踪各种热条件下机床的非线性时变误差。为了适应热弹性过程的非平稳特性, 引入 IRNN 来识别具有确定性线性趋势的热弹性过程的非平稳性。机床热误差在补偿前为 $[0, 50] \mu\text{m}$, 经过补偿后可降低为 $[-7, 6] \mu\text{m}$ 。JIN 等^[62]采用基于小波神经网络 (Wavelet neural network, WNN) 和非线性自回归移动平均 (Nonlinear autoregressive moving average, NARMA-L2) 的新型 WNN-NARMA-L2 模型, 预测伺服系统的热特性, 敏感点的温度升高和热定位误差, 采用了粒子群优化算法作为网络的训练方法。最终热误差预测残差在 $[-10, 10] \mu\text{m}$ 范围内。YAO 等^[63]评估了人工神经网络、支持向量机、贝叶斯网络的优缺点, 结果表明, 最小二乘支持向量机 (The least squares support vector machine, LS-SVM) 模型建模精度高、计算时间短, 贝叶斯网络 (Bayesian networks, BN) 模型更易懂, 使用混合模型是综合误差建模的理想解决方案。ZHANG 等^[64]基于机床发热/散热-结构温度-热变形机理, 结合极限学习机和遗传算法, 建立主动控制算法, 实现对电主轴的热误差控制。与传统冷却方式对比, 主轴误差最多降低 88.4%, 最少降低 27.6%。

灰色理论也被用于热误差建模方面。李永祥等^[69]采用经过改进的新陈代谢灰色系统模型对热误差进行建模。灰色模型理论常用于与其他方法相

结合使用。ZHANG 等^[70]为了消除热误差对加工精度的影响,将灰色模型(Grey model, GM)和 ANN 的数据处理优点相结合,提出一种机床热误差建模的方法。JAING 等^[71]通过遗传算法寻找最优维数 n 和权重值 λ ,提出一种基于标准灰色系统模型 GM(1,1) 的优化热误差建模策略,该预测模型可降低 80% 原始误差。

支持向量机(Support vector machine, SVM)是一种按监督学习方式的数据线性分类器,在模式识别,分类领域得到广泛应用。LEI 等^[72]引入机床运行过程中的未标记数据,与温度数据共同训练半监督回归支持向量机,建立进给轴热误差模型。精密镗床的热误差范围由 $[-16.589, 0.794] \mu\text{m}$ 降低为 $[-1.222, 0.877] \mu\text{m}$ 。LIN 等^[73]采用多类 LS-SVM,以轴承和螺母温度的方差和均方值为特征向量,对进给系统的热定位误差进行了辨识。结果表明,该模型预测性能优于常规反向传播(Back propagation, BP)网络和径向基(Radial basis function, RBF)网络。林伟青和傅建中等^[74-75]提出基于动态自适应加权 LS-SVM 的热误差建模方法,通过动态自适应算法优化建模参数。该建模方法精度高、泛化能力强。

此外,仍有多种其他方法被应用于热误差建模中。BAUM 等^[77]通过直接测量体积变形,计算得到热致体积误差,补偿后机床精度提升明显。DU 等^[78]提出任意速度下高速电主轴热误差的自然指数模型,计算任何速度下的热平衡时间常数和稳态热误差。此模型不需要温度传感器,在 HDBS-63 卧式加工中心上进行了补偿试验,最大轴向误差从 $55 \mu\text{m}$ 减小到 $16 \mu\text{m}$,而径向误差从 $15 \mu\text{m}$ 减小到 $6 \mu\text{m}$ 。颜宗卓等^[79]通过热源温度与响应函数卷积建立热误差模型,采用粒子群算法优化卷积模型系数,实现了对温度场和热误差的预测。马驰等^[80]通过遗传算法和粒子群优化改善了热误差模型的精度与鲁棒性。LI 等^[81]研究了环境温度对光栅尺的热影响,建立了带有刻度的进给系统误差模型并进行了补偿。姚鑫骅等^[82]提出了一种基于偏最小二乘改进核心向量回归机的机床热误差建模方法,模型通过改进的粒子群优化算法(Improved particle swarm optimization, ISPO)对核心向量回归(Core vector regression, CVR)模型参数寻优,提高预测精度和鲁棒性。仿真结果显示,最大预测残差为 $1.86 \mu\text{m}$ 。傅建中和姚鑫骅等^[83]提出了一种新型能量管理系统电路拓扑结构及优化电量控制策略,使用无线传感器检测温度,所建热变形预测模型的误差减少了 40% 以上。

除了通过误差补偿器实施补偿外, MITSUSHI

等^[84]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。YIN 等^[85]提出了一种嵌入式热误差补偿模块,通过积分设计引入集中方法,在 THK6370 卧式加工中心对 X 轴丝杠的热变形误差进行了建模和补偿。UHLMANN^[86]开发了一种热激活执行器,补偿机床结构的准静态热变形。

上述方法有一个共同的特点,即都属于数据驱动模型。数据驱动模型只有在获取足够多的输入输出数据后,才能建立一个预测性能足够好的模型。若获取的数据不够全面,所建立的模型就难以适应各种情况,即鲁棒性会比较差,这正是数据驱动建模法的固有缺陷。获取足够多的输入输出数据会给机床的热特性参数辨识试验带来很大的挑战。数据驱动建模方法像是中医诊疗方式,只要数据足够多,就能训练得到一个预测效果比较好的模型。但是,即使建立了数据驱动模型,也无法得知输入输出变量间的确切关系。因此,数据驱动模型是一种“黑箱”模型。另外一种类似于西医诊疗的建模方法为机理驱动建模方法。这种方法在深入剖析系统物理机理的基础上建立模型。就像采用西医疗法治疗某种疾病时,要先清楚疾病的机理以及药物在体内的作用机制。机理驱动建模是一种“白箱”模型,其输入输出之间存在清晰的因果关系,模型中的变量有明确的物理意义,使得研究人员在“知其然”的同时又能“知其所以然”。数据驱动建模和机理驱动建模的原理对比如图 12 所示^[50]。

图 12 DDM 和 PBM 原理图

对于进给轴的热误差建模来说,机理驱动建模方法可能是一个更好的选择。先弄清楚丝杠的生热

和散热机理,再采用传热学理论建立热误差与温度、位置的物理关系。这样,不需要较多的输入输出数据也可以得到热误差模型的热特性参数,对机床的热特性参数辨识试验的压力大大减小。

LIU 等^[9,50]提出 PBM 的丝杠温度场和热误差预测方法,分别计算了螺母和轴承座热源下的温度场,再通过对温度场的积分得到进给轴的热误差。螺母热源作用下的温度场通过式(2)迭代得到

$$\begin{cases} \Delta Q(t) = Q_n(t) - Q_c(t) - Q_t(t) \\ \Delta Q(t) = c\rho L_i S \Delta T_{L_i}(t) \\ Q_n = 0.12\pi f_w v_0 n M_w \\ Q_c(t) = h \times S' \times (T_{L_i}(t) - T_f(t)) \times \Delta t \\ Q_t(t) = \lambda \times S \times \frac{(T_{L_i}(t) - T_{L_{i+1}}(t)) + (T_{L_i}(t) - T_{L_{i-1}}(t))}{L} \times \Delta t \end{cases} \quad (2)$$

式中, ΔQ 为 L_i 的生成热量与散热量之差; Q_n 为在 t 时刻 L_i 的摩擦生热量; Q_c 为在 t 时刻 L_i 与周围空气的换热量; Q_t 为在 t 时刻 L_i 与两边微元的热传导量; c 为丝杠的比热容; ρ 为丝杠的密度; S 为丝杠等效截面积; $T_{L_i}(t)$ 为 L_i 在 t 时刻的温升; f_w 是与螺母类型和润滑方式有关的系数; v_0 是润滑剂的运动粘度; n 是丝杠的转速; h 是对流换热系数; S' 是 L_i 的对流换热面积; $T_f(t)$ 是与丝杠表面接触的空气温度,近似用床身的温度 T_b 代替; λ 是丝杠的导热系数。

轴承座热源作用下的温度场

$$\Gamma_{br}(P_y, t) = \left(\chi e^{-\sqrt{\frac{2h}{kR}} P_y} + \zeta e^{\sqrt{\frac{2h}{kR}} P_y} \right) \times \left(1 - e_f \left(\frac{P_y}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right) \quad (3)$$

式中, T_{br} 为电机侧轴承座的温度; P_y 是丝杠上距离热源的距离; χ 和 ζ 为待辨识系数; k 为热导率; h 为丝杠与空气的换热系数; R 为丝杠半径; α 为丝杠导热系数; $e_f(P_y)$ 在数学中的定义为

$$e_f(P_y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{P_y} e^{-\lambda^2} d\lambda \quad (4)$$

对丝杠的温度场进行积分,可以得到丝杠的热误差。在丝杠螺母和轴承座热源的共同作用下,在任意时刻 t 的热误差为

$$E(t) = \sum_{i=1}^M \lambda_s \times (\Delta T_{L_i}(t) + \Delta \Gamma_{br}(t)) \times L_i \quad (5)$$

式中, λ_s 为丝杠的热膨胀系数, M 为丝杠的离散化段数。

文献[87]给出螺母和轴承热源共同作用下的丝杠温度场,如图 13 所示。

图 13 螺母和热源共同作用下的丝杠温度场

采用该建模理念,需要的温度测点数量少,不需要温度测点的优化布置分析,因为在 PBM 中温度传感器是有明确用途的。而且,模型的鲁棒性很强,即使机床在实际加工时的运动速度和运动位置与建模时的相差较大,热误差预测效果依然很好。

采用上述机理驱动建模方法,大连理工大学^[50]开发的热误差实时补偿系统如图 14 所示。该软件可以实现主轴和进给轴的热误差建模及综合补偿,支持 6 种数控系统,兼容主流测试仪器数据,兼容中、德、日标准。软件具有诸多功能,包括:随机自启动、断电后开机智能处理、异常报警、数据自动保存与报告自动生成等。

图 14 热误差实时补偿系统框架图

LIU 等^[88]采用基于 PBM 的建模方法对 Y 轴综合热误差进行了补偿, 补偿前 CTE 最大值为 $94.6 \mu\text{m}$, 其中 TED 为 $40.9 \mu\text{m}$, 补偿后 CTE 降低到 $[-1, 4.1] \mu\text{m}$ 范围内。文献^[89]给出基于 PBM 的进给轴热误差补偿与光栅尺的精度对比, 如图 15 所示。将 X 轴的热误差从半闭环的 $[0, 78] \mu\text{m}$ 降低为 $[-4, 4] \mu\text{m}$, 远小于光栅尺开启时的误差范围 $[0, 22] \mu\text{m}$ 。

图 15 基于 PBM 的进给轴热误差补偿与光栅尺精度对比

试验结果表明, 螺母对丝杠温度变化的影响比轴承座要大。因此, 若只考虑螺母热源的影响, 也可以达到很好的热误差补偿效果。另外, 从式(2)可以看出, 对于 PBM 建模方法, 当环境温度恒定时可省去温度传感器。基于这两方面的考虑, 文献^[90]给出恒温环境下进给轴热误差补偿前后的测试与加工结果的对比, 如图 16 所示。其中, 图 16b 展示了热误差补偿的实际加工效果。机床在每次运动后分别在补偿和非补偿模式下向下钻孔(深度 $5 \mu\text{m}$), 由于立铣刀的端部形状为圆周部位凸出, 因此钻孔得到的是环状钻痕。从图 16b 可以明显看出无温度传感器时的热误差补偿效果。

梅雪松和杨军等^[91-92]采用热结构有限元方法建立双驱动伺服系统热误差模型, 预测热误差和温度分布。MA 等^[93]也采用了类似的方法, 根据传热学

原理, 通过有限元方法进行热行为闭环迭代, 获得丝杠实时温度场。然后将两端固定丝杠的热误差表示为以丝杠温度为自变量的幅度函数和以轴向位置为自变量的余弦函数的乘积, 建立了热误差预测模型。

(a) Z轴热误差测试对比

(b) Z轴热误差加工对比

图 16 恒温环境下的进给轴热误差测试与加工对比

3 旋转进给轴的热误差

对于旋转进给轴来说, 几何误差测量和补偿方面的研究较多^[94-97], 热误差测试与补偿相关研究则较少。旋转进给轴有蜗轮蜗杆传动、力矩电机直接驱动等传动方式。对于力矩电机直接驱动的旋转进给轴, 它的热源在中心位置, 无论旋转轴在整个圆周还是局部范围内运动, 旋转轴都会由中心向外均匀膨胀。对于蜗轮蜗杆传动的旋转进给轴, 由于热源不在中心位置, 旋转轴转动会导致一定的热误差。

3.1 旋转轴热误差测试

旋转轴热误差测试一般采用球杆仪、R-Test 等仪器。但球杆仪、激光跟踪仪等测试方法存在测试周期长的问题, 影响旋转轴热误差测试的准确性和

实时性^[98]。因此, R-Test 成为了旋转轴热误差的主流测试仪器。R-Test 是瑞士苏黎世联邦理工学院学者 WEIKERT 等^[99]提出的一种测试装置, 已经被广泛应用于五轴机床旋转轴的精度测试中。

GEBHARDT 等^[100]以 3 种方式测量机床旋转轴的热致误差, 包括离散 R-Test、连续 R-Test 和改进的 ISO 230-3 测试方法, 如图 17 所示。测试对比发现, 旋转轴热误差与直线轴热误差、主轴热误差热致误差的大小相似。

图 17 R-Test 和改进的 ISO230-3 测试方法^[100]

IBARAKI 等^[101-102]通过一种静态 R-Test 的方法, 发现机床 B 轴的运动生热将会导致 C 轴出现几何误差。BITAR-NEHME 等^[103]通过 R-Test 设备测试 5 轴机床 B、C 轴在 X、Y、Z 方向的热致体积误差。发现旋转轴 B、C 轴是导致热体积误差的主要因素, 其次是主轴, 而且 X 轴误差受到 B 轴影响。但是此研究无法推广其他机床上, 具有一定局限性。

除 R-Test 外, 还有学者采用其他方法测试旋转轴的热误差。MAYR 等^[104]按照离散 R-Test 的方式, 使用 2.5D 测头系统测量 5 轴机床的热误差。在其所建立的热误差模型中, 自变量是主轴箱和 B 轴箱上的温度测点数据, 常数通过最小二乘法辨识得到。引入蒙特卡洛模拟评估测量的不确定度, 以降低环境温度对模型的影响。补偿后 B 轴 Z 向伸长误差降低了 22%, 工作台径向伸长误差降低了 97%, 工作台 Y 向伸长误差降低了 49%。LEI 等^[105]使用双球杆仪同时测试五轴机床的两个旋转轴的轨迹图, 通过与各种误差源理论轨迹对比, 发现两旋转轴的伺服不匹配是导致热误差的重要原因。BRECHER 等^[106]考虑在激光加工

中热冲击对旋转轴(C 轴)的影响, 提出一种由 5 个位移传感器组成的测量旋转轴热致误差的装置。

3.2 旋转轴热误差建模

对旋转轴热误差建模的研究与直线轴不尽相同, 研究人员一般采用相对简单的建模方法, 如最小二乘法、微分方程、一阶传递函数等。

苏黎世联邦理工学院机床与制造研究所的多位学者针对 5 轴机床旋转轴热误差做了深入研究。GEBHARDT 等^[107]将机床分为 5 个部分, 如图 18 所示, 利用传热学理论建立传热模型, 预测并补偿旋转轴 C 轴的热误差。补偿后, C 轴在 X、Y、Z 方向上的移动热误差降低了 70% 以上, 沿 A 轴方向的转动热误差降低了 33%。SCHNEEBERGER 等^[108]以一阶滞后元素形式返回在不同机床功率下 C 轴的位置和误差值, 将比例常数与时间常数作为模型参数, 辨识后获得热误差预测模型。补偿实验结果显示, 机床 C 轴热误差降低了 75% 以上。最后对比了上述两种模型的优缺点。GEBHARDT 等^[109-110]通过红外热成像仪测试机床 A、C 轴的温度场, 如图 19 所示。并使用 R-Test 测量旋转轴的误差以辨识误差模型微分方程的几个参数, 从而预测热误差。

图 18 基于物理的简单离散转台单元示意图^[107]

图 19 A、C 轴运动后机床的温度场

BITAR-NEHME^[11]对一台五轴卧式加工中心B、C轴功率和热致体积误差进行测试。将分别以B、C轴电机功率为输入、误差为输出的两个一阶传递函数叠加,得到B、C轴的热误差模型,并使用Matlab软件的系统识别工具箱辨识模型参数。通过对试件进行补偿加工,验证不同运动顺序下模型的有效性。BLASER等^[4]提出一种五轴机床长期热误差自适应补偿方法。利用过程间歇探测得到信息,采用自适应学习控制(Adaptive learning control, ALC)方法更新模型参数。当检测到旋转轴线性热误差超过阈值15 μm ,角度热误差超过25 $\mu\text{m}/\text{m}$ 时,模型会在2小时内更新数据,从而保持旋转轴热误差在阈值范围内波动。

综上所述,旋转轴热误差也是影响五轴机床加工精度和热稳定性的重要因素。目前,学者们常采用R-Test等仪器测试旋转轴的热误差。旋转轴热误差建模通常采用相对简单的方法,但缺少旋转轴生热与热误差成因分析,需要学者们对旋转轴热误差发热机理、误差模型等方面进行深入研究。

4 结论与展望

本文从机床热误差避免和补偿方法介绍入手,对直线轴和旋转轴热误差的成因、测试、建模和补偿等方面进行了综述。

随着《中国制造2025》等国家制造战略的不断推进,高端制造产业迅速发展,加工装备智能化趋势逐渐凸显。面对这样的挑战与发展机遇,热误差补偿技术研究人员需要在以下方面进行更深入的研究。

(1) 热误差自适应补偿能力。进给轴热误差模型在实验条件下一般可获得良好的补偿效果,但是当环境温度、主轴转速、进给速度、负载等条件改变时,特别是在运动信息复杂多变的实际切削过程中,模型的预测精度会有所降低。如何提高热误差模型对复杂运动状态的适应能力仍需进一步研究。

(2) 长时补偿精度保持能力。随着机床的长时间运行,热误差模型的预测效果会受机床零部件磨损、应力变形等影响逐渐变差,这就需要热误差模型能够监测关键运动部件的磨损情况并进行特定调整,使热误差模型的补偿精度得到长时间保持。

(3) 基于加工过程大数据的热误差进化补偿能力。在机床服役过程中,基于对机床加工过程大数据的采集与分析,对热误差预测模型进行持续改进优化,使之预测精度愈加准确。

(4) 在机床上的迁移补偿能力。目前的机床热误差模型一般只能对单台机床达到良好的效果,原因在于不同机床的热特性状态不同。提高热误差模型在机床上的迁移能力可以显著减少补偿实施时间并降低成本。

参 考 文 献

- [1] MAYR J, JEDRZEJEWSKI J, UHLMANN E, et al. Thermal issues in machine tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2012, 61(2): 771-791.
- [2] RAMESH R, MANNAN M, POO A. Error compensation in machine tools - a review Part II: Thermal errors[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(9): 1257-1284.
- [3] YANG J, SHI H, FENG B, et al. Thermal error modeling and compensation for a high-speed motorized spindle[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(5-8): 1005-1017.
- [4] BLASER P, PAVLIEK F, MORI K, et al. Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 44: 302-309.
- [5] FUJISHIMA M, NARIMATSU K, IRINO N, et al. Thermal displacement reduction and compensation of a turning center[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2018, 22: 111-115.
- [6] PUTZ M, REGEL J, WENZEL A, et al. Thermal errors in milling: Comparison of displacements of the machine tool, tool and workpiece[C]//Procedia CIRP. Sheffield, United kingdom: 2019, 82: 389-394.
- [7] LIU M, ZHANG X, SONG H, et al. Inverse finite element method for reconstruction of deformation in the gantry structure of heavy-duty machine tool using FBG sensors[J]. Sensors (Switzerland), 2018, 18(7): 2173.
- [8] TANABE I, TAKADA K. Thermal deformation of machine tool structures using resin concrete (thermal behaviour of concrete bed of machine tool in fluctuating ambient temperature)[J]. JSME International Journal, Series C: Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing, 1994, 37(2): 384-389.
- [9] LIU K, LIU Y, SUN M, et al. Comprehensive thermal growth compensation method of spindle and servo axis error on a vertical drilling center[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9-12): 2507-2516.

- [10] LI Y, ZHAO W, LAN S, et al. A review on spindle thermal error compensation in machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 95: 20-38.
- [11] LIANG Y, SU H, LU L, et al. Thermal optimization of an ultra-precision machine tool by the thermal displacement decomposition and counteraction method[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 76(1-4): 635-645.
- [12] 高建民, 史晓军, 许艾明, 等. 高速高精度机床热分析与热设计技术[J]. *中国工程科学*, 2013, 15(1): 28-33. GAO Jianmin, SHI Xiaojun, XU Aiming, et al. Thermal analysis and design technology of high-speed and high-precision machine tools[J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, 15(1): 28-33.
- [13] ZHANG J F, FENG P F, WU Z J, et al. Thermal structure design and analysis of A machine tool headstock[J]. *Mechanika*, 2013, 19(4): 478-485.
- [14] TAMAI A, KURITA T, MATSUE T, et al. Machine tool slide protection - uses thermal insulation or shrouding to equalise thermal distortion through ambient or operating conditions. : China , DE3527491-A; JP61038832-A; JP61038833-A[P]. JP160930 31 Jul 1984 JP160931 31 Jul 1984; 1986-02-13.
- [15] AGGOGGERI F, MERLO A, PELLEGRINI N. A novel concept to design machine tool structures using multifunctional materials[C]//HINDUJA S , LI L. *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*. London: Springer, 2010: 165-168.
- [16] XU Z Z, LIU X J, KIM H K, et al. Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2011, 51(7-8): 605-611.
- [17] KORETA N, JINNO K, ROKKAKU T, et al. Thermoelectric cooling of machine tool spindle[J]. *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1994, 60(5): 652-656.
- [18] BARTA P, HORNYCH J, HOREJ O. Active control of a machine tool cooling system[C]//*Proceedings of the 10th Anniversary International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, EUSPEN 2008*. Zurich, Switzerland: 2008, 1: 384-388.
- [19] SUN L, REN M, HONG H, et al. Thermal error reduction based on thermodynamics structure optimization method for an ultra-precision machine tool[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(5-8): 1267-1277.
- [20] 傅建中, 陈子辰. 精密机械热误差校正机理及参数遗传优化[J]. *浙江大学学报*, 2003(6): 91-95. FU Jianzhong, CHEN Zichen. Thermal error calibration principle of precision machine and parameter genetic optimization algorithms[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2003(6): 91-95.
- [21] MEKID S, OGEDENGBE T. A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines[J]. *International Journal of Precision Technology*, 2010, 1(3/4): 251-286.
- [22] SVOBODA N, WANG N. Straightness and squareness errors' development due to thermal effects[C]//*Laser Metrology and Machine Performance VIII-8th International Conference and Exhibition on Laser Metrology , Machine Tool , CMM and Robotic Performance, LAMDAMAP 2007*. Cranfield, United kingdom; 2007: 186-195.
- [23] ZHANG Y, YANG J, XIANG S, et al. Volumetric error modeling and compensation considering thermal effect on five-axis machine tools[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(5): 1102-1115.
- [24] OKAFOR A C, ERTEKIN Y M. Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 2. Angular errors[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 105(3): 407-420.
- [25] LIU K, LIU Y, SUN M, et al. Comprehensive thermal compensation of the servo axes of CNC machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 85(9-12): 2715-2728.
- [26] OYANGUREN A, ULACIA I, LARRANAGA J, et al. Prediction of heat generation and temperature distribution in high speed preloaded ball screws[J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 572(1): 363-366.
- [27] ZHANG Z, HU Y, WANG X. Comprehensive analysis and calculation discuss about preload stretching force of screw system[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(23): 175-181.
- [28] LIU K, WANG Y, LIU Y, et al. Research on thermo-mechanical coupled experiments and thermal deformation evolution of preloaded screw[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(9-12): 2441-2450.

- [29] LI Y, ZHAO J, JI S. A reconstructed variable regression method for thermal error modeling of machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(9-12): 3673-3684.
- [30] 郭前建, 徐汝锋, 贺磊, 等. 基于逐步回归的机床温度测点优化及热误差建模技术[J]. *制造技术与机床*, 2015(12): 89-92.
- GUO Qianjian, XU Rufeng, HE Lei, et al. Temperature measurement point optimization and thermal error modeling of CNC machine tools based on stepwise regression[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2015(12): 89-92.
- [31] CHEN S H, TSAI Y L. The machine-tool temperature variation measurement and compensation using regression analysis method[C]//2016 International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering (ICAMSE). Tainan, Taiwan: IEEE, 2016: 673-676.
- [32] KRULEWICH D A. Temperature integration model and measurement point selection for thermally induced machine tool errors[J]. *Mechatronics*, 1998, 8(4): 395-412.
- [33] 杨军, 梅雪松, 赵亮, 等. 基于模糊聚类测点优化与向量机的坐标镗床热误差建模[J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48(8): 1175-1182, 1188.
- YNAG Jun, MEI Xuesong, ZHAO Liang, et al. Thermal Error modeling of a coordinate boring machine based on fuzzy clustering and SVM[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014, 48(8): 1175-1182, 1188.
- [34] 孙志超, 陶涛, 黄晓勇, 等. 车床主轴与进给轴耦合热误差建模及补偿研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 105-112.
- SUN Zhichao, TAO Tao, HUANG Xiaoyong, et al. Modeling and compensation of coupled thermal error off spindle and feed shaft[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 105-112.
- [35] HAN J, WANG L, WANG H, et al. A new thermal error modeling method for CNC machine tools[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(1-4): 205-212.
- [36] HAO W, HONGTAO Z, QIANJIAN G, et al. Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 207(1-3): 172-179.
- [37] 张琨, 张毅, 侯广锋, 等. 基于热模态分析的热误差温度测点优化选择[J]. *机床与液压*, 2012, 40(7): 1-3.
- ZHANG Kun, ZHANG Yi, HOU Guangfeng, et al. Selection of sensor placement for thermal error compensation based on thermal mode analysis[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2012, 40(7): 1-3.
- [38] LI Y X, YANG J G, GELVIS T, et al. Optimization of measuring points for machine tool thermal error based on grey system theory[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 35(7-8): 745-750.
- [39] YAN J Y, YANG J G. Application of synthetic grey correlation theory on thermal point optimization for machine tool thermal error compensation[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, 43(11-12): 1124-1132.
- [40] 马驰, 杨军, 梅雪松, 等. 基于遗传算法及 BP 网络的主轴热误差建模[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(10): 2627-2636.
- MA Chi, YANG Jun, MEI Xuesong, et al. High-speed spindle thermal error modelling based on genetic algorithm and BP neural network[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2015, 21(10): 2627-2636.
- [41] 马驰, 赵亮, 梅雪松, 等. 基于粒子群算法与 BP 网络的机床主轴热误差建模[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(5): 686-695.
- MA Chi, ZHAO Liang, MEI Xuesong, et al. Thermal error modeling of machine tool spindle based on particle swarm optimization and Neural Network[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(5): 686-695.
- [42] CHENG Q, QI Z, ZHANG G, et al. Robust modelling and prediction of thermally induced positional error based on grey rough set theory and neural networks[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5-8): 753-764.
- [43] NAUMANN C, RIEDEL I, IHLENFELDT S, et al. Characteristic diagram based correction algorithms for the thermo-elastic deformation of machine tools[C]//*Procedia CIRP*. Ischia, Italy: 2016, 41: 801-805.
- [44] VYROUBAL J. Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(1): 121-127.
- [45] LI Y, ZHAO W, WU W, et al. Thermal error modeling of the spindle based on multiple variables for the precision machine tool[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(9-12): 1415-1427.

- [46] LI Y, ZHAO W, WU W, et al. Boundary conditions optimization of spindle thermal error analysis and thermal key points selection based on inverse heat conduction[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(9-12): 2803-2812.
- [47] DU Z, YAO X, HOU H, et al. A fast way to determine temperature sensor locations in thermal error compensation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 455-465.
- [48] 李晟, 姚鑫骅, 傅建中. 基于通信质量约束的主轴热监测无线传感器布点优化[J]. 浙江大学学报, 2013, 47(7): 1281-1286.
- LI Sheng, YAO Xinhua, FU Jianzhong. Communicating quality constraint-based location optimization of wireless sensor in thermal monitoring of spindle[J]. Journal of Zhejiang University, 2013, 47(7): 1281-1286.
- [49] LI Q, LI H. A general method for thermal error measurement and modeling in CNC machine tools spindle[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(5-8): 2739-2749.
- [50] LIU K, LI T, WANG Y, et al. Physically based modeling method for comprehensive thermally induced errors of CNC machining centers[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1-4): 463-474.
- [51] YUAN S, PENG F, ZHOU L, et al. Analysis and modeling of the thermal errors of carriage system of a precision machine tool driven by linear motor[J]. Key Engineering Materials, 2014, 579-580: 645-653.
- [52] 杨军, 施虎, 梅雪松, 等. 双驱伺服进给系统热误差的试验测量与预测模型构建[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 53-59.
- YANG Jun, SHI Hu, MEI Xuesong, et al. Measurement and modeling of thermal errors in dual-driver servo feed system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 53-59.
- [53] 马军旭, 周长兴, 张俊, 等. 环境温度对数控机床直线运动轴位置偏差的影响[J]. 天津大学学报, 2017, 50(6): 579-585.
- MA J X, ZHOU C X, ZHANG J, et al. Influence of ambient temperature on positional deviation of linear axis of cnc machine tool[J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50(6): 579-585.
- [54] LIU J, MA C, WANG S. Data-driven thermally-induced error compensation method of high-speed and precision five-axis machine tools[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106538.
- [55] ZHANG J, LI B, ZHOU C, et al. Positioning error prediction and compensation of ball screw feed drive system with different mounting conditions[J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2016, 230(12): 2307-2311.
- [56] SHI H, MA C, YANG J, et al. Investigation into effect of thermal expansion on thermally induced error of ball screw feed drive system of precision machine tools[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 97: 60-71.
- [57] PAJOR, MIROSLAW, ZAPLATA, JACEK. Compensation of thermal deformations of the feed screw in a CNC machine tool[J]. Advances in Manufacturing Science and Technology, 2011, 4(35): 9-17.
- [58] 孙志超, 侯瑞生, 陶涛, 等. 数控车床综合热误差建模及工程应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(1): 107-113.
- SUN Zhichao, HOU Ruisheng, TAO Tao, et al. Comprehensive thermal error modeling for NC lathe in engineering application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(1): 107-113.
- [59] CUI L, GAO W, ZHANG D, et al. Thermal error compensation for telescopic spindle of CNC machine tool based on SIEMENS 840D system[J]. Transactions of Tianjin University, 2011, 17(5): 340-343.
- [60] ZHU J, NI J, SHIH A J. Robust machine tool thermal error modeling through thermal mode concept[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2008, 130(6): 0610061-0610069.
- [61] YANG H, NI J. Dynamic neural network modeling for nonlinear, nonstationary machine tool thermally induced error[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(4-5): 455-465.
- [62] JIN C, WU B, HU Y. Wavelet neural network based on NARMA-L2 model for prediction of thermal characteristics in a feed system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(1): 33-41.
- [63] YAO X, FU J, XU Y, et al. Synthetic error modeling for NC machine tools based on intelligent technology[C]//Procedia CIRP. Huddersfield, United kingdom: 2013, 10: 91-97.
- [64] ZHANG Y, WANG P, LIU T, et al. Active and intelligent

- control onto thermal behaviors of a motorized spindle unit[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 98(9-12): 3133-3146.
- [65] 吴雄彪, 姚鑫骅, 傅建中. 基于贝叶斯网络的数控机床热误差建模[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(3): 293-296.
- WU Xiongbiao, YAO Xinhua, FU Jianzhong. Thermal error modeling of NC machine tools based on Bayesian networks[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(3): 293-296.
- [66] YANG Z, SUN M, LI W, et al. Modified Elman network for thermal deformation compensation modeling in machine tools[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(5-8): 669-676.
- [67] HUANG Y, ZHANG J, LI X, et al. Thermal error modeling by integrating GA and BP algorithms for the high-speed spindle[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(9-12): 1669-1675.
- [68] LI X, LEI Q, LI Z H. Application of a Bayesian network to thermal error modeling and analysis for machine tool[C]//Key Engineering Materials. 2011, 455: 616-620.
- [69] 李永祥, 杨建国. 灰色系统模型在机床热误差建模中的应用[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(23): 2439-2442.
- LI Yongxiang, YANG Jianguo. Application of grey system model to thermal error modeling on machine tools[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(23): 2439-2442.
- [70] ZHANG Y, YANG J. Modeling for machine tool thermal error based on grey model preprocessing neural network[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(7): 134-139.
- [71] JIANG H, YANG J-G. Application of an optimized grey system model on 5-Axis CNC machine tool thermal error modeling[C]//2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, ICEEE2010. 2010.
- [72] LEI M, YANG J, WANG S, et al. Semi-supervised modeling and compensation for the thermal error of precision feed axes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104(9-12): 4629-4640.
- [73] LIN W, FU J, CHEN Z, et al. Modeling of NC machine tool thermal error based on adaptive best-fitting WLS-SVM[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(3): 178-182.
- [74] 林伟青, 傅建中, 陈子辰, 等. 数控机床热误差的动态自适应加权最小二乘支持向量机建模方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(03): 178-182.
- LIN Weiqing, FU Jianzhong, CHEN Zichen, et al. Modeling of NC machine tool thermal error based on adaptive best-fitting WLS-SVM[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(03): 178-182.
- [75] 林伟青, 傅建中, 许亚洲, 等. 基于最小二乘支持向量机的数控机床热误差预测[J]. *浙江大学学报*, 2008(6): 905-908.
- LIN Weiqing, FU Jianzhong, XU Yazhou, et al. Thermal error prediction of numerical control machine tools based on least squares support vector machines[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2008(6): 905-908.
- [76] 余文利, 姚鑫骅, 傅建中, 等. 贝叶斯证据框架下的 LS-SVM 多工况数控机床热误差建模[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(17): 2361-2368.
- YU Wenli, YAO Xinhua, FU Jianzhong, et al. Modeling of CNC machine tool thermal errors based on LS-SVM within Bayesian evidence framework[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(17): 2361-2368.
- [77] BAUM C, BRECHER C, KLATTE M, et al. Thermally induced volumetric error compensation by means of integral deformation sensors[C]//Procedia CIRP. 2018, 72: 1148-1153.
- [78] DU Z, YAO S, YANG J. Thermal behavior analysis and thermal error compensation for motorized spindle of machine tools[J]. *International Journal of precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(7): 1571-1581.
- [79] 颜宗卓, 陶涛, 侯瑞生, 等. 机床电主轴热特性卷积建模研究[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(6): 1-8.
- YAN Zongzhuo, TAO Tao, HOU Ruisheng, et al. Convolution modeling for thermal properties of motorized spindle in machine tool[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(6): 1-8.
- [80] MA C, ZHAO L, MEI X, et al. Thermal error compensation of high-speed spindle system based on a modified BP neural network[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89(9-12): 3071-3085.
- [81] LI Y, ZHANG J, SU D, et al. Experiment-based thermal behavior research about the feed drive system with linear scale[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(11): 1-10.
- [82] 余文利, 姚鑫骅, 孙磊, 等. 基于 PLS 和改进 CVR 的数控机床热误差建模[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 357-364.

- YU Wenli, YAO Xinhua, SUN Lei, et al. Thermal error modeling of CNC machine tool based on partial least squares and improved core vector regression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery., 2015, 46(2): 357-364.
- [83] 李晟, 姚鑫骅, 傅建中, 等. 热电耦合无线传感能量管理系统及其在精密主轴热监测中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2389-2398.
- LI Sheng, YAO Xinhua, FU Jianzhong, et al. Power management system for thermoelectric coupling wireless sensing and its application to thermal monitoring of precision spindle[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2389-2398.
- [84] MITSUISHI M, WARISAWA S, HANAYAMA R. Development of an intelligent high-speed machining center[J]. CIRP Annals, 2001, 50(1): 275-280.
- [85] YIN L, CHEN J, LI H, et al. Research and development of thermal error compensation embedded in CNC system[C]//Proceedings - 2010 International Conference on Computational and Information Sciences, ICCIS 2010. 2010: 861-864.
- [86] UHLMANN E, SAOJI M, PEUKERT B. Utilization of Thermal energy to compensate quasi-static deformations in modular machine tool frames[J]. Procedia CIRP, 2016, 40: 1-6.
- [87] LIU K, LIU H, LI T, et al. Prediction of comprehensive thermal error of a preloaded ball screw on a gantry milling machine[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2018, 140(2): 1-9.
- [88] LIU K, LIU H, LI T, et al. Intelligentization of machine tools: Comprehensive thermal error compensation of machine-workpiece system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(9-12): 3865-3877.
- [89] LIU K, SUN M, WU Y, et al. Comparison of accuracy stability using a thermal compensator and grating ruler[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 38(8): 2403-2411.
- [90] 刘阔, 孙名佳, 吴玉亮, 等. 无温度传感器的数控机床进给轴热误差补偿[J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 162-169.
- LIU Kuo, SUN Mingjia, WU Yuliang, et al. Thermal error compensation without temperature sensors for CNC machine tools' feed drive system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 162-169.
- [91] YANG J, ZHANG D, MEI X, et al. Thermal error simulation and compensation in a jig-boring machine equipped with a dual-drive servo feed system[J]. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229(1): 43-63.
- [92] YANG J, MEI X, FENG B, et al. Experiments and simulation of thermal behaviors of the dual-drive servo feed system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(1): 76-87.
- [93] MA C, LIU J, WANG S. Thermal error compensation of linear axis with fixed-fixed installation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020: 175.
- [94] IBARAKI S, OTA Y. A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 86: 81-88.
- [95] JIANG X, CRIPPS R J. A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 151-158.
- [96] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12-13): 1333-1342.
- [97] MAYR J. Thermal error compensation of rotary axes and main spindles using cooling power as input parameter[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015: 8.
- [98] SITONG X, ZHENGCHUN D, JIANGUO Y. Recent Advances in measurement and modeling of geometric and thermal error of CNC machine tools[J]. Machine Design and Research, 2019, 35(6): 52-57.
- [99] WEIKERT S. R-test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 429-432.
- [100] GEBHARDT M. Measurement set-ups and -cycles for thermal characterization of axes of rotation of 5-axis machine tools[C]//EUSPEN, 2012, 1: 486-489.
- [101] HONG C, IBARAKI S. Observation of thermal influence on error motions of rotary axes on a five-axis

- machine tool by static R-test[J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(2): 196-204.
- [102] IBARAKI S, HONG C F. Thermal test for error maps of rotary axes by R-test[J]. Key Engineering Materials, 2012, 523-524: 809-814.
- [103] BITAR-NEHME E, MAYER J R R. Thermal volumetric effects under axes cycling using an invar R-test device and reference length[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 105: 14-22.
- [104] MAYR J, MÜLLER M, WEIKERT S. Automated thermal main spindle & B-axis error compensation of 5-axis machine tools[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 479-482.
- [105] LEI W T, SUNG M P, LIU W L, et al. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 273-285.
- [106] BRECHER C, SPIERLING R, DU BOIS-REYMOND F, et al. Thermo-elastic deformation of rotary axes[C]// Laser Metrology and Machine Performance XII - 12th International Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM and Robotic Performance, LAMDAMAP 2017. Wotton-under-Edge, United kingdom: 2017, 2017-January: 111-121.
- [107] GEBHARDT M, SCHNEEBERGER A, WEIKERT S, et al. Thermally caused location errors of rotary axes of 5-axis machine tools[J]. International Journal of Automation Technology, 2014, 8(4): 511-522.
- [108] GEBHARDT M, CAPPARELLI S, ESS M, et al. Physical and phenomenological simulation models for the thermal compensation of rotary axes of machine tools[C]//EUSPEN, 2013, 1: 304-309.
- [109] GEBHARDT M, KNAPP DR. W, WEGENER DR. K. Messung thermischer einflüsse auf werkzeugmaschinen zur steuerungseitigen fehlerkorrektur am beispiel von dreh-/schwenkachsen[J]. Technisches Messen, 2014, 81(4): 158-165.
- GEBHARDT M, KNAPP DR. W, WEGENER DR. K. Measurement of thermal influences on machine tools for axis correction using the example of rotary-/swivelling axes [J]. Technisches Messen, 2014, 81(4): 158-165.
- [110] GEBHARDT M. Thermal behaviour and compensation of rotary axes in 5-axis machine tools[D]. Swiss : Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2014.
- [111] BITAR-NEHME E, MAYER J R R. Modelling and compensation of dominant thermally induced geometric errors using rotary axes' power consumption[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 547-550.

作者简介: 刘阔, 男, 1983 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为数控机床综合误差补偿技术、数控加工装备智能化技术等。

E-mail: liukuo@dlut.edu.cn

王永青(通信作者), 男, 1969 年出生, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师。主要研究方向为测量-加工一体化、超低温冷却加工、装备在机测量理论与技术等。

E-mail: yqwang@dlut.edu.cn