

数控机床误差补偿技术研究综述

温钰林 蔺国民 曾林

西京学院机械工程学院 陕西西安 710123

摘要：提高数控机床加工精度，对于现在的机械加工制造业来说至关重要。几何误差和热误差这两大误差源在数控机床误差中所占比例约为45%~65%，为了提升数控机床的加工精度和生产效率，对于两类误差类型的测量和补偿这就显得十分重要。因此，深入研究机床误差的分类、测量、建模和补偿等关键技术，有助于未来设计数控机床误差补偿系统时提供有益参考。

关键词：数控机床；误差补偿；误差模型

1. 绪论

在机械加工领域，追求高稳定性、高效率和高精度是行业的关键目标。医疗、航空等各种高精尖的复杂产品需求向现代加工制造行业提出了新的挑战。随着人们对各种工业产品的要求不断提高，数控机床作为“工业母机”其加工精度也得到了全世界专家的广泛关注。因此，如何分类、测量、建模和补偿影响机床加工精度的误差，已成为近期研究的热点。

2. 误差分析

在机床加工零件过程中会有许多误差因素影响零件的精度，从误差来源看可以把误差归类为三大部分：机床加工过程中的误差、机床本身的误差和检测误差，这三类误差所占比例如表1所示：

表1 机床各误差占比

机床误差	热误差	25%~35%
	几何误差	20%~30%
加工过程误差	夹具误差	6%~10%
	刀具误差	10%~15%
	工件力变形误差	3%~5%
	操作误差	6%~10%
检测误差	安装误差	2%~5%
	不确定误差	8%~10%

几何误差和热误差占了大部分的误差比重，约为总误差的45%~65%^[1]。因此，如何降低这两种误差是提高机床加工精度的关键。几何误差主要源自机床的结构设计、传

动系统装配和关键零件制造误差。这种误差归类于机床的原始误差，属于静态误差。机床的热误差则主要是来自于机床主轴高速运转带来的热变形误差和加工过程中机床结构的热变形，这些误差会让高端精密的机床零件在实际生产加工过程中达不到预期的精度要求。随着中国制造业的快速发展，同时随着人工智能、大数据和物联网等新技术的不断发展和应用，国内制造业加工精度和几何误差控制水平逐步提高，数控加工几何误差的监测、分析和修正也得到了进一步的改善。对于高端机床设备而言，热误差成为主要影响加工精度的因素，且随机床精密度增加，热误差所占比例也随之增加，最终可能达到约70%^[2]。数控加工热误差在国内的研究逐渐受到重视，一些国内企业和研究机构致力于研究机床热误差的产生机理和影响因素，通过优化机床结构、改进冷却系统设计、引入先进的温度补偿技术等手段，有效降低了数控加工中的热误差，提高了加工精度和稳定性。测量补偿这两种误差类型，可以显著提高机床加工精度和生产效率。

3. 机床误差测量与识别

进行数控机床误差补偿的关键要素是要测量出和识别出机床存在的误差原因。测量是否准确，直接关系到后面误差补偿数学模型是否精确，关系到最后补偿效果。现在已经知道的技术和与此相关的资料可知，测量方法可以分为两种，一种为直接测量而另一种为间接测量。直接测量是指通过测量仪器直接获取误差元素的数值，无需进行其他

复杂的运算；间接测量是指通过运用先进的技术手段，如激光测量系统和精密传感器，来捕捉机床精度的各种误差元素之间的相互作用。这种方法需要依赖复杂的数学模型来分析和识别误差元素，从而实现对机床精度的精准评估^[3]。与传统的直接测量方法不同，间接测量方法不仅能够测量机床各部件的单项几何误差，还可以对整个机床工作空间内特定点的综合定位误差进行全面评估。通过对综合误差的参数辨识和分析，可以准确获取机床的几何误差数据^[4]。举例来说，利用先进的激光跟踪测量系统，可以对机床或坐标测量机的几何误差进行高精度测量，而且激光跟踪技术的灵活性和高效性使其成为评估整个机床工作空间误差的理想选择。结合其他测量方法，可以全面获得机床各个误差元素的数据，为精准的机床精度评估提供有力支持。如图1所示。



图1 激光跟踪仪测量误差图

4. 机床热误差模型

在研究数控机床热误差模型时，可以采用不同的方法来对数控机床的热误差模型进行研究。一种方法是基于深入分析机床在运行过程中产生的热量、热传导方式以及引起热变形的机制，构建相应的热误差模型^[5]。另一种方法是依据已采集到的温度数据和热误差数据，运用数据分析技术和数学建模方法，尝试建立准确的数学模型来预测机床的热误差。这两种方法各有优势，可以帮助研究人员更好地理解和控制机床在高温环境下的性能表现，为提高机

床加工精度提供有力支持。

欧美发达国家很早就开始在机床误差补偿方面进行了研究，美国、瑞士、德国、日本四国是机床误差补偿技术研究领先的国家。对于机床高速主轴的温度场分布进行研究是一项重要的工作。研究人员通过建立主轴电机和轴承的热量产生模型，深入探讨了在不同工况下的热量分布和热变形情况。此外，利用有限元分析方法，他们还揭示了相同情况下的现象，并提出了优化温度传感器布点的原则和方法，为机床性能的提升提供了重要参考。另外，进行了多元线性回归分析，建立了进给轴的几何误差和热误差的误差补偿模型，成功将进给轴的定位精度提高了60%左右^[6]。还有基于最小二乘法建立了神经网络模型，用于车床主轴的热误差建模，以及建立了能够预测与位置相关的热误差的神经网络模型，从而提高了机床的空间定位精度^[7]。这些研究成果为机床精度的提升和性能的优化提供了有益的理论支持。

5. 机床误差补偿技术

精密加工领域中的误差补偿技术是一种关键技术，旨在通过引入额外的修正因素来抵消或减少机床加工过程中可能产生的误差。这种技术依托于对误差特性的深入分析，以建立数学模型来实现对误差的有效控制和调节^[8]。其核心目标在于通过精确计算和精心设计，使得引入的修正因素能够与原始误差相互抵消，从而提高加工精度和产品质量。误差补偿技术涉及误差运动学建模、误差检测与测量、误差修正执行以及效果评估等多个方面，为精密加工过程的稳定性和可靠性提供了重要支持。如图2所示。

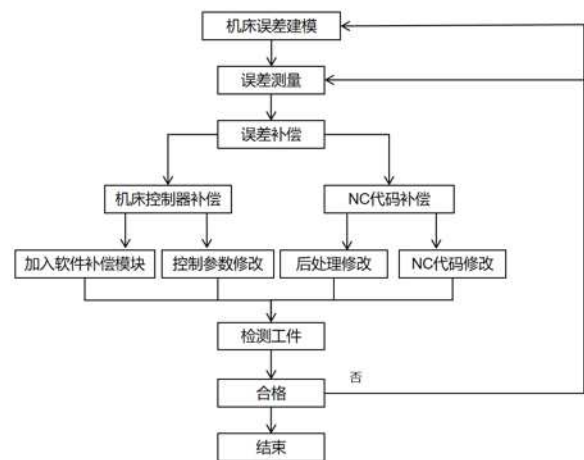


图2 误差补偿技术实施路线图

随着数控机床技术的不断发展,不同时期涌现出多种误差补偿方法,以适应不同类型的数控系统。这些方法包括但不限于:

(1) 软件动态补偿法:随着技术的进步,软件动态补偿技术逐渐成为主流,通过对控制算法和参数的优化,实现对误差的实时监测和调整。

(2) 快速刀具伺服机构补偿法:是一种通过对刀具伺服机构进行快速调整和补偿,以实现刀具位置误差的修正。

(3) 系统参数补偿法:通过对系统参数进行调整和补偿,以实现系统性能优化和误差修正。

(4) 位置环反馈补偿:利用高精度传感器对工件位

置和机床状态进行实时监测,通过反馈控制系统进行误差修正。

(5) 自适应补偿法:根据实时反馈信息自适应调整补偿参数,适应系统变化和环境影响。

(6) 模型补偿法:利用热误差模型等动态模型来进行误差补偿。

(7) NC代码补偿法:是一种通过在数控编程代码中引入修正参数,实现对机床运动轨迹和加工尺寸误差的补偿。

(8) 坐标偏置补偿法:是一种常用的数控加工误差补偿方法,通过在数控编程中设置坐标偏置值,实现对加工零件尺寸和形状误差的修正。

结论

随着制造领域的蓬勃发展,数控技术在各个领域得到广泛应用,数控设备的普及率持续提升。尽管我国在数控技术方面取得了长足进步,但是和欧美发达国家还有很大差距,国外已开始小型商业领域采用数控技术,而国内相关研究仍主要停留在实验室阶段,缺乏实际应用的深入探索。为了推动中国机械制造业的健康发展,研究人员需要全面了解和掌握误差补偿技术,积极探索补偿技术的创新空间,并加强对误差补偿效果的实证研究,以提升我国制造业的竞争力和创新能力。

参考文献

- [1] 李圣怡. 精密和超精密机床精度建模技术[M]. 国防科技大学出版社: 2007.
- [2] 赵昌龙. 高速加工中心主轴及刀具系统热误差综合补偿技术[D]. 博士学位论文, 吉林大学. 2010.
- [3] Liu Y . Intelligent CNC control with improved adaptive thermal error compensation model [J]. Journal of Vibroengineering, 2023, 25 (6): 1217-1229.

- [4] Bernd B ,F. J T . A Power Flow Model for High Speed Motorized Spindles—Heat Generation Characterization [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123 (3): 494-505.

- [5] Science - Mechanical Science; Study Results from Yangzhou University Provide New Insights into Mechanical Science (Geometric Error Modeling and Compensation of Horizontal Cnc Turning Center for Ti Worm Turning) [J]. Journal of Technology, 2020.

- [6] 沈金华, 李永祥, 鲁志政, 等. 数控车床几何和热误差综合实时补偿方法应用 [J]. 四川大学学报: 工程科学版. 2008, 40 (1):163-166.

- [7] J.H. S ,Guo J Y . Application of Partial Least Squares Neural Network in Thermal Error Modeling for CNC Machine Tool [J]. Key Engineering Materials, 2018, 392-394 (392-394): 30-34.

- [8] Mize D C ,Ziegert C J . Neural network thermal error compensation of a machining center [J]. Precision Engineering, 2010, 24 (4): 338-346.