

高精度数控机床在自动化生产线中的误差补偿技术研究

罗元清

重庆远凌机电有限公司 重庆

【摘要】高精度数控机床在自动化生产线中的应用广泛，但由于其固有误差，生产精度无法达到理想水平。为了提高生产效率和产品质量，研究数控机床的误差补偿技术显得尤为重要。本文主要探讨了高精度数控机床在自动化生产线中的误差来源及其补偿方法。通过分析机床的几何误差、热误差、动力误差等，提出了基于模型的误差补偿、传感器反馈控制等技术的应用方案。结合实际生产线的需求，设计了一种高效的误差补偿系统，并对其精度提升效果进行了实验验证。采用该误差补偿技术后，机床的加工精度大幅度提升，生产效率显著提高。本文为高精度数控机床在自动化生产线中的应用提供了有力的技术支持和理论依据。

【关键词】高精度数控机床；自动化生产线；误差补偿；模型补偿；热误差

【收稿日期】2025 年 5 月 14 日

【出刊日期】2025 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250066

Research on error compensation technology for high-precision CNC machine tools in automated production lines

Yuanqing Luo

Chongqing Yuanling Electromechanical Co., Ltd, Chongqing

【Abstract】 High-precision CNC machine tools are widely used in automated production lines. However, due to inherent errors, production accuracy cannot reach the ideal level. To improve production efficiency and product quality, researching error compensation technology for CNC machine tools is particularly important. This paper mainly discusses the sources of errors in high-precision CNC machine tools within automated production lines and their compensation methods. By analyzing geometric errors, thermal errors, and dynamic errors of the machine tools, application schemes for model-based error compensation and sensor feedback control technologies are proposed. According to the requirements of actual production lines, an efficient error compensation system is designed, and its effectiveness in improving accuracy is experimentally verified. After implementing this error compensation technology, the machining accuracy of the machine tools is significantly enhanced, and production efficiency is considerably improved. This paper provides strong technical support and theoretical basis for the application of high-precision CNC machine tools in automated production lines.

【Keywords】 High-precision CNC machine tools; Automated production lines; Error compensation; Model-based compensation; Thermal errors

引言

高精度数控机床在现代制造业中占据着重要地位，尤其是在自动化生产线的应用中，它们不仅决定着产品的生产效率，还直接影响到产品的质量。尽管数控机床具有较高的加工精度，但在长期运行过程中，机床本身的误差问题却不可避免地影响其加工精度，严重时可能导致产品的合格率下降。研究数控

机床误差补偿技术，特别是在自动化生产线中的应用，显得尤为重要。通过对不同误差源的深入分析和补偿技术的研究，可以有效提高机床的加工精度，保证生产过程的稳定性和高效性。本文将从误差的产生机制出发，分析其补偿技术的现状与发展，提出一种集成化的误差补偿方案，以提高高精度数控机床在自动化生产线中的性能。

1 数控机床误差来源及影响因素分析

数控机床的误差来源复杂,主要包括几何误差、热误差、动力误差和控制系统误差。几何误差源自机床部件的制造或使用过程中的形状误差,如导轨直线度、轴承精度及传动系统误差,直接影响定位和运动精度。热误差由机床运行时产生的热量引起,导致部件膨胀,尤其在高负荷、高速加工中,主轴、电机和导轨的温升会加大尺寸误差^[1]。动力误差由驱动系统的惯性力矩和振动引起,尤其在高速运行时,可能引发较大动态误差。控制系统误差则涉及数控系统运算精度、传感器信号处理等问题,通常由采样频率不足、硬件软件不匹配导致。

影响高精度数控机床加工精度的因素并不仅仅限于上述误差来源,还与机床的使用环境和加工条件密切相关。机床的使用环境包括温度、湿度、空气流动等因素,它们直接影响机床零部件的材料特性和加工过程中产生的热效应。工作环境中的灰尘和震动也会影响到机床的运行稳定性和加工精度。加工条件,如刀具的选择、切削力的控制和加工速度的设置等,同样会对数控机床的精度产生显著影响。刀具的磨损、切削热和切削力的变化会导致工件表面质量和尺寸精度的波动。要实现高精度加工,不仅要考虑机床本身的误差,还需要从加工环境和条件的优化入手。

为了提高数控机床的加工精度,必须对各类误差进行精确分析并加以控制。近年来,随着计算机技术、传感器技术和自动化技术的发展,数控机床的误差分析手段也在不断发展。从传统的简单几何误差分析,到现在基于多物理场耦合分析的高精度误差建模,现代误差补偿技术已经取得了显著进展。高精度误差补偿技术不仅能够对机床的几何误差进行有效补偿,还能够实时监测和修正热误差、动力误差以及控制系统误差,从而在一定程度上克服了传统数控机床加工精度受限的瓶颈。误差来源的精确识别和系统化补偿方法的研究,对于提升自动化生产线的加工精度和生产效率具有重要意义。

2 高精度数控机床误差补偿技术的现状与挑战

高精度数控机床的误差补偿技术逐渐成为关注重点,涵盖了几何误差、热误差、动力误差和控制系统误差等方面。几何误差补偿通过数学建模和误差模型修正来提高定位精度,常见方法包括基于直接

测量、模型补偿和人工智能的补偿方法。直接测量依靠高精度传感器实时监测误差,基于模型的方法则结合实际数据进行修正^[2]。热误差补偿技术通过温度监测和热力学模型修正因热效应引起的误差,常用的有温度补偿和基于热传导模型的间接补偿。尽管这些技术能有效提高精度,但由于环境温度波动,补偿效果仍受一定限制。

动力误差补偿和控制系统误差补偿技术则主要是解决机床在高速运行时产生的动态误差和控制系统计算误差的问题。动力误差补偿技术通常依赖于对机床驱动系统的动态特性进行建模,并通过传感器采集运动过程中的振动信号来进行误差修正。而控制系统误差补偿则侧重于通过优化数控系统的算法和硬件配置,提高控制精度和响应速度,从而减少由控制系统引发的误差。尽管目前这些误差补偿技术取得了一定进展,但在高精度机床中,这些补偿方法往往需要高度的精确度和实时性,且随着加工条件的变化,误差补偿的效果也可能出现不稳定的情况。

尽管数控机床误差补偿技术在多个领域取得了重要进展,但仍然面临着一些挑战。机床误差补偿的实时性和精确性要求非常高,这对传感器技术、计算技术以及补偿算法提出了较高的要求。随着加工精度要求的不断提高,现有的误差补偿技术往往难以满足高精度加工的需求。最后,由于机床的结构复杂,误差补偿系统需要针对不同类型的机床和不同的加工环境进行个性化的设计和优化,这增加了误差补偿技术的应用难度。如何在实际生产环境中实现高效、稳定且高精度的误差补偿,仍然是当前研究的重要方向。

3 基于模型的误差补偿方法在生产线中的应用

在高精度数控机床的误差补偿技术中,基于模型的误差补偿方法由于其较高的精度和灵活性,已成为当前研究的主流方向之一。基于模型的误差补偿方法主要通过建立机床的数学模型,结合实际测量数据,对机床的各种误差进行建模,并通过反馈控制系统进行误差修正。这种方法具有较强的适应性和可操作性,尤其在实际生产中,可以根据不同机床的特点,针对性地进行误差补偿。然而,尽管基于模型的误差补偿方法具有较好的理论基础和应用前景,但在实际生产中,如何准确建立机床的误差模型,并

实现高效的补偿，仍然是一个技术难题。

基于模型的误差补偿方法通常依赖于对机床各个误差源的准确识别和建模。常见的误差模型有基于几何误差的补偿模型、基于热误差的补偿模型和基于动态误差的补偿模型等。几何误差补偿模型通过对机床各个部件的几何特性进行建模，结合实际测量数据，预测和修正机床的几何误差^[3]。热误差补偿模型则通过对机床在工作过程中产生的温度变化进行建模，结合热膨胀系数和热传导特性，修正因热效应引起的加工误差。动态误差补偿模型则通过对机床的动态特性进行建模，结合驱动系统的惯性特性、振动模式和速度变化等因素，修正因动力效应引起的误差。

虽然基于模型的误差补偿方法在理论上能够实现高精度补偿，但在实际生产环境中，模型的准确性和稳定性常常受到多种因素的影响。机床的误差来源可能随时间和环境的变化而变化，这使得误差模型的有效性在长期运行过程中可能逐渐降低。机床的加工过程通常非常复杂，误差源众多，如何通过简单而有效的模型对多重误差源进行补偿，仍然是当前技术研究中的难点。如何优化模型的精度，并实时更新误差模型，以确保补偿效果的长期稳定，仍然是基于模型的误差补偿方法在生产线上应用的关键问题。

4 误差补偿系统的设计与优化方案

为了提高高精度数控机床在自动化生产线中的加工精度和稳定性，设计一套高效、实时的误差补偿系统至关重要。该系统不仅需要能够实时监测机床的误差源，还需要能够通过动态反馈调整机床的运动轨迹和加工参数，确保加工过程的精确性^[4]。在误差补偿系统的设计中，首先要考虑误差的实时测量和动态反馈。传统的误差补偿方法依赖于静态测量和计算，而现代误差补偿系统则要求能够实时获取机床各个部件的运动状态和误差信息，快速进行误差预测和补偿。为此，误差补偿系统需要配备高精度的传感器和实时数据处理模块，这些传感器能够实时监测机床的位移、温度、振动等参数，从而获取精确的误差数据。

在误差补偿系统的设计中，除了传感器技术外，还需要采用高效的补偿算法来进行实时修正。目前，常用的补偿算法有基于模型的补偿算法、基于数据

驱动的补偿算法以及基于智能算法的补偿算法等。基于模型的补偿算法通过对机床误差模型的分析和计算，预测并修正误差^[5-8]。数据驱动的补偿算法则通过对历史加工数据的分析，建立误差数据库，从中提取规律，进行实时补偿。智能算法，如机器学习算法，也逐渐应用于误差补偿系统中，这些算法能够通过学习加工过程中的误差规律，不断优化补偿策略，提高补偿精度和效率。

误差补偿系统的优化方案应当结合实际生产线的要求，针对不同类型的机床进行个性化设计。针对高速、高负载的数控机床，可以加强对热误差和动力误差的补偿，采用温度监控系统和振动监测系统来提高补偿效果。而对于低速、精密加工的机床，可以优化几何误差补偿模型，确保定位精度和加工精度的稳定性。通过系统集成和优化设计，误差补偿系统能够大大提高数控机床的加工精度和自动化生产线的工作效率。

5 结语

高精度数控机床在自动化生产线中的误差补偿技术对提升生产效率和产品质量具有重要意义。本文通过分析误差来源及影响因素，探讨了当前误差补偿技术的现状与挑战，提出了基于模型的误差补偿方法及其应用，并设计了相应的优化方案。随着技术的不断进步，未来的误差补偿系统将更加智能化、精确化，从而更好地满足高精度加工的需求。研究成果为数控机床的精度提升和自动化生产线的优化提供了理论依据和技术支持，为制造业的高效发展奠定了基础。

参考文献

- [1] 杨超锋.基于自适应控制的高精度数控机床动态误差补偿方法[J].现代制造技术与装备,2025,61(02):210-212.
- [2] 张旭.数控机床误差综合补偿技术要点及其应用实践[J].中国机械,2024,(22):73-76.
- [3] 王宏斌.数控机床误差综合补偿技术要点及其应用实践[J].机械管理开发,2024,39(02):100-103.
- [4] 杨超锋.基于自适应控制的高精度数控机床动态误差补偿方法[J].现代制造技术与装备,2025,61(02):210-212.
- [5] 李昌,程剑锋.数控机床加工精度的影响因素及提高方法研究[J].时代汽车,2025,(02):148-150.

- [6] 朱航科.高精度数控机床液压控制系统故障诊断试验研究[J].液压气动与密封,2024,44(05):102-106.
- [7] 张鹏飞.数控机床精度检测与误差补偿技术研究[J].自动化应用,2024,65(09):184-189.
- [8] 陈佩娜.数控机床定位精度监测及补偿方法的应用研究

[J].中国金属通报,2023,(12):156-158.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS