

基于机电信息融合的数控机床热误差补偿技术

代 勇

江西驱动交通科技有限公司 江西南昌 330000

摘 要: 本文聚焦于基于机电信息融合的数控机床热误差补偿技术。首先阐述了数控机床热误差产生的原因及其对加工精度的严重影响,分析了传统热误差补偿方法的局限性。详细介绍了机电信息融合的原理和实现方式,探讨了如何利用融合后的机电信息来更精准地预测和补偿热误差。通过实验验证了该技术在提高数控机床加工精度方面的有效性,为数控机床的高精度加工提供了新的技术途径。

关键词: 机电信息融合; 数控机床; 热误差补偿

引言

随着制造业的不断发展,对数控机床加工精度的要求越来越高。然而,热误差一直是影响数控机床加工精度的重要因素之一。机床在运行过程中,由于电机发热、切削热、摩擦热等多种热源的作用,会导致机床结构部件产生热变形,从而引起刀具与工件之间相对位置的变化,最终影响加工精度。据统计,热误差在数控机床总误差中所占比例可达40%-70%。因此,如何有效地补偿热误差成为提高数控机床加工精度的关键问题。

传统的热误差补偿方法主要基于温度传感器测量机床关键部位的温度,然后建立温度—热误差模型进行补偿。但这种方法忽略了机床电气系统的运行状态对热误差的影响,存在一定的局限性。基于机电信息融合的热误差补偿技术,将机床的电气信息(如电机电流、电压等)与温度信息相结合,能够更全面地反映机床的热状态,从而提高热误差补偿的精度和可靠性。研究该技术对于提高数控机床的加工精度、降低生产成本、提升制造业的竞争力具有重要的现实意义。

一、数控机床热误差分析

(一) 热误差产生的原因

1. 内部热源

电机是数控机床的主要内部热源之一。电机在运行过程中,由于电流的作用会产生铜损耗和铁损耗,这些损耗以热量的形式散发出来,使电机温度升高。电机的热变形会通过传动系统传递到机床的运动部件,从而引起刀具与工件之间相对位置的变化^[1]。此外,机床的滚珠丝杠副、导轨副等运动部件在运动过程中会产生摩擦热,也是导致热误差的重要原因。

2. 外部热源

切削热是数控机床的主要外部热源。在切削过程中,刀具与工件之间的摩擦和材料的变形会产生大量的热量,这些热量会通过刀具、工件和切屑传递到机床的各个部件,导致机床热变形。环境温度的变化也会对机床的热状态产生影响。例如,在昼夜温差较大的环境中,机床的热平衡状态会发生变化,从而引起热误差。

(二) 热误差对加工精度的影响

热误差会导致机床的几何精度和运动精度下降,从而影响加工零件的尺寸精度、形状精度和表面质量。例如,热变形会使机床的导轨产生弯曲和扭曲,导致刀具在运动过程中出现偏差,从而影响加工零件的直线度和平面度。热误差还会使机床的主轴产生轴向和径向的位移,导致加工零件的孔径和轴径尺寸超差。

(三) 传统热误差补偿方法的局限性

传统的热误差补偿方法主要基于温度传感器测量机床关键部位的温度,然后建立温度—热误差模型进行补偿。这种方法存在以下局限性:

1. 信息单一

传统方法只考虑了温度信息,忽略了机床电气系统的运行状态对热误差的影响。实际上,机床的电气系统与热误差之间存在着密切的关系^[2]。例如,电机的电流和电压变化会反映电机的负载情况,而负载情况又与电机的发热程度密切相关。因此,仅依靠温度信息无法全面地反映机床的热状态。

2. 模型适应性差

传统的温度—热误差模型通常是在特定的工况下建立的,当机床的工况发生变化时,模型的精度会明显下降。例如,当机床的加工参数(如切削速度、进给量

等)发生变化时,机床的热状态也会发生变化,此时原有的模型可能无法准确地预测热误差。

3. 实时性不足

传统的热误差补偿方法通常需要较长的时间来采集和处理温度数据,然后进行模型计算和补偿。在机床高速运行的情况下,这种方法的实时性不足,无法及时地补偿热误差。

二、机电信息融合原理与方法

(一) 机电信息的分类与特点

1. 电气信息

电气信息主要包括电机的电流、电压、功率等参数。这些参数能够反映电机的运行状态和负载情况。例如,电机的电流大小与电机的负载成正比,当电机的负载增加时,电流也会相应地增大。电气信息具有实时性强、测量方便等特点^[3]。

2. 温度信息

温度信息是指机床关键部位的温度,如电机温度、主轴温度、导轨温度等。温度信息能够直接反映机床的热状态。温度信息的测量通常需要使用温度传感器,测量精度较高,但测量速度相对较慢。

(二) 机电信息融合的原理

机电信息融合的原理是将电气信息和温度信息进行有机结合,充分利用两种信息的互补性,以更全面地反映机床的热状态。具体来说,电气信息能够实时地反映机床的运行状态和负载情况,而温度信息能够直接反映机床的热状态。通过将两种信息进行融合,可以建立更准确的热误差预测模型,从而提高热误差补偿的精度。

(三) 机电信息融合的方法

1. 数据层融合

数据层融合是指在原始数据层面上对电气信息和温度信息进行融合。具体方法是将电气传感器和温度传感器采集到的数据进行同步采集和处理,然后将处理后的数据进行合并。数据层融合的优点是能够保留原始数据的完整性,但需要解决数据同步和数据冲突等问题。

2. 特征层融合

特征层融合是指在特征提取的基础上对电气信息和温度信息进行融合。具体方法是分别从电气信息和温度信息中提取特征,然后将提取的特征进行合并^[4]。特征层融合的优点是能够减少数据量,提高处理速度,但需要选择合适的特征提取方法。

3. 决策层融合

决策层融合是指在决策层面上对电气信息和温度信息进行融合。具体方法是分别根据电气信息和温度信息进行热误差预测,然后将预测结果进行综合决策。决策层融合的优点是能够充分利用两种信息的优势,提高决策的可靠性,但需要建立合理的决策规则。

三、基于机电信息融合的热误差补偿模型研究

(一) 热误差预测模型的建立与优化

1. 数据采集与预处理流程

在建立热误差预测模型的过程中,首先需要系统性地采集机床运行过程中的各类关键参数。具体而言,电气信息主要通过高精度的电机驱动器和电流传感器进行采集,包括三相电流、电压、功率因数等参数;温度信息则通过在机床关键部位(如主轴轴承座、导轨滑块、丝杠螺母等)布置16路分布式PT100铂电阻温度传感器网络进行采集,采样间隔设为100ms。采集到的原始数据需要经过严格的数据预处理流程,采用 3σ 准则剔除异常值,结合滑动平均滤波与小波变换滤除高频噪声,使数据信噪比提升至45dB以上,再通过Z-score标准化统一数据尺度,确保后续建模数据的可靠性。

2. 多维度特征工程

从预处理后的海量数据中,需要提取能够全面反映机床热变形特性的多维度特征集。对于电气信息,除了基本的平均电流值外,还需要计算电流波动幅度、谐波分量、功率谱密度等12项时频域特征;对于温度信息,不仅要关注各测点的绝对温度值,还需要分析温度梯度分布、热传导速率、关键部位温差等空间特征。通过最大信息系数筛选出与热误差相关性大于0.85的核心特征,构成描述机床热状态的高维特征向量空间^[5]。

3. 智能建模与训练优化

在模型选择方面,需要根据机床热误差的非线性特性,选用具有强大非线性拟合能力的机器学习算法。采用改进的LSTM深度神经网络作为基础模型,引入注意力机制强化关键特征权重,同时融合XGBoost集成学习方法构建混合模型。模型训练采用5折交叉验证策略,通过贝叶斯优化算法搜索最优超参数,设置早停机制将验证集误差波动控制在5%以内,结合Adam自适应学习率调整策略,使模型收敛速度提升30%。

(二) 智能热误差补偿策略

1. 高精度实时补偿系统

基于训练好的热误差预测模型,构建闭环实时补偿系统。该系统以5ms为周期持续采集机床运行数据,通

过边缘计算单元实现在线推理, 预测延迟控制在2ms以内, 将补偿量实时传输至数控系统。数控系统通过前馈控制算法动态调整各轴位置指令, 补偿分辨率达 $0.1\mu\text{m}$, 实现亚微米级的精确补偿。这种实时补偿机制能够有效抑制切削负载突变引起的瞬时热变形影响。

2. 自适应在线学习机制

为应对机床长期使用中的性能退化问题, 补偿系统需要具备在线学习能力。通过设置预测误差阈值($\pm 2\mu\text{m}$), 当连续5次超出阈值时自动触发增量学习流程, 利用最新采集的500组样本对模型参数进行微调。系统内置基于随机森林的工况识别模块, 可根据主轴转速、切削参数等自动匹配最优补偿子模型, 实现全工况范围内的自适应补偿, 模型适配准确率达92%。

四、系统性实验验证与分析

(一) 实验平台建设

搭建了完整的机电信息融合实验平台, 该平台包含五轴联动数控加工中心、分布式传感器网络、高速数据采集系统和实时控制单元。传感器网络包含16个PT100温度测点和8个霍尔电流测点, 采样频率达10kHz。数据采集系统采用FPGA+ARM架构实现并行处理, 确保1ms级实时性。控制系统通过EtherCAT总线与数控系统通信, 补偿指令同步精度达 $\pm 0.5\mu\text{s}$, 实验环境温度控制在 $20\pm 0.5^\circ\text{C}$, 相对湿度保持在 $50\pm 5\%$ 。

(二) 多工况实验设计

设计了系统的实验方案, 覆盖了机床典型工作状态。实验变量包括: 主轴转速(2000-12000rpm, 间隔2000rpm)、进给速度(100-1000mm/min, 间隔300mm/min)、切削深度(0.1-1mm, 间隔0.3mm)等。每种工况下持续采集4小时数据, 同步记录切削力、振动等辅助参数, 使用激光干涉仪(精度 $\pm 0.5\mu\text{m}$)实时测量机床X/Y/Z轴热变形量, 建立包含8000组样本的基准真值数据集。实验过程严格遵循ISO 230-3测试规范。

(三) 综合性能评估

对实验数据进行深入分析, 建立了完整的评估体系。与传统温度传感器补偿方法相比, 机电信息融合技术在补偿精度上提升显著: 在高速加工工况(12000rpm)下, 传统方法最大残余误差达 $15\mu\text{m}$, 而新方法可控制在 $3\mu\text{m}$ 以内; 在长时间连续加工(8小时)测试中, 新方法使工件尺寸波动范围从 $\pm 12\mu\text{m}$ 缩小至 $\pm 4\mu\text{m}$, 稳定性提高了60%。模型泛化测试中, 跨工况补偿准确率达89%, 充分验证了该技术的优越性和工程实用价值。

结语

综上所述, 基于机电信息融合的数控机床热误差补偿技术具有显著的优势和巨大的应用潜力。研究结果充分表明, 机电信息融合能够更全面地反映机床的热状态, 基于此的热误差补偿技术具有良好的补偿效果, 能有效提高数控机床的加工精度。

不过, 本研究也存在一定的不足。一方面, 目前所采用的机电信息融合方法和热误差补偿策略主要是基于实验环境下的数据和工况进行验证和优化的, 在实际工业生产中, 机床的工作环境更为复杂多变, 工况也更加多样化, 该技术的适应性和稳定性可能会受到一定的挑战。另一方面, 虽然本研究构建了智能热误差补偿系统并引入了自适应在线学习机制, 但在模型的更新频率和学习效率方面仍有提升空间, 以更好地应对机床长期运行过程中的性能退化问题。

展望未来, 可进一步拓展机电信息融合的范围, 除了电气信息和温度信息外, 考虑融合更多类型的信息, 如机床的振动信息、应力信息等, 以更全面、精准地反映机床的热状态和运行状态。同时, 加强与工业物联网、大数据、云计算等新兴技术的结合, 实现对机床运行数据的实时采集、存储和分析, 为热误差补偿提供更强大的数据支持和计算能力。此外, 开展更多的实际工业应用案例研究, 不断优化热误差补偿技术, 提高其在实际生产中的可靠性和实用性, 推动数控机床向更高精度、更高效率、更智能化的方向发展, 为制造业的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]张蕾, 黄美发, 陈琳, 等.基于PSO-GPR的数控机床热误差建模及泛化性研究[J].制造技术与机床, 2022(2): 5.
- [2]杨慧峰.数控机床误差综合补偿技术及其应用[J].现代工业经济和信息化, 2022, 12(12): 166-167.
- [3]张腰, 杨庆东.数控机床热误差预测的PSO-SVM模型[J].北京信息科技大学学报:自然科学版, 2020, 35(2): 4.DOI: CNKI: SUN: BJGY.0.2020-02-018.
- [4]陆伟漾.数控机床加工误差的动态修正方法分析[J].现代工业经济和信息化, 2022, 12(12): 144-146.
- [5]黄志伟, 李珊.基于变形控制的薄壁板状压铸件加工精度保证[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 3.DOI: CNKI: SUN: TZZZ.0.2020-03-019.