

## 机械工程

## 基于多传感器融合的数控机床主轴热误差实时补偿技术研究

赵帅 李明 倪永军

浙江恒大数控装备有限公司 浙江绍兴 311800

**【摘要】**数控机床高速切削时,主轴热变形误差会严重影响加工精度。本文针对热误差实时补偿问题,开展多传感器融合技术理论研究。在分析主轴热误差机理与传递特性的基础上,指出传统单点测温的局限性,构建了基于多传感器优化布置的信息采集体系,引入数据融合算法对温度与热变形进行关联分析。通过建立具有自适应能力的多维热误差预测模型,研究模型参数在线修正策略,提出了一套完整的热误差实时补偿控制方法。研究表明,多传感器融合能更全面捕捉主轴热态特性,结合先进算法构建的补偿模型具备较高预测精度与鲁棒性,为实现加工精度稳定性控制提供了理论依据。

**【关键词】**数控机床; 主轴热误差; 多传感器融合; 数据建模; 实时补偿

Research on Real-Time Thermal Error Compensation Technology for CNC Machine Tool Spindles Based on Multi-Sensor Fusion

Zhao Shuai Li Ming Ni Yongjun

Zhejiang Hengda CNC Equipment Co., Ltd. Shaoxing, Zhejiang 311800

**【Abstract】**During high-speed machining of CNC machine tools, spindle thermal deformation errors significantly impact processing accuracy. This study conducts theoretical research on multi-sensor fusion technology for real-time thermal error compensation. By analyzing the mechanisms and transmission characteristics of spindle thermal errors, the limitations of traditional single-point temperature measurement are identified. An optimized multi-sensor information acquisition system is established, incorporating data fusion algorithms to correlate temperature measurements with thermal deformation. Through developing an adaptive multidimensional thermal error prediction model and implementing online parameter correction strategies, a comprehensive real-time thermal error compensation control method is proposed. The study demonstrates that multi-sensor fusion enables comprehensive capture of spindle thermal state characteristics. The compensation model integrated with advanced algorithms exhibits high prediction accuracy and robustness, providing theoretical foundations for achieving stable machining precision control.

**【Key words】**CNC machine tool; spindle thermal error; multi-sensor fusion; data modeling; real-time compensation

## 引言

在现代机械制造领域,数控机床的加工精度直接决定产品质量与生产效率,制造业发展对机床加工稳定性与精度保持性提出了更高要求。实际切削过程中各运动部件产生大量切削热和摩擦热,这些热量在机床结构中传导积聚导致零部件热变形,其中主轴系统作为核心执行单元,其热变形引起的刀具与工件相对位置偏移即热误差,已成为制约加工精度提升的关键因素。

早期通过改善结构热对称性或采用低膨胀系数材料来减小热变形,但这类方法受成本和技术难度制约无法完全消除热误差。随着传感与计算机技术发展,基于误差补偿的思路逐渐成为主流,其基本原理是通过实时监测机床关键点温度变化,建立热误差与温度场数学模型,进而通过数控系统对刀具路径实时修正。

然而传统热误差补偿技术多依赖单点或少点温度测量,难以全面反映主轴复杂三维温度场分布及其动态演化规律。主轴运转时内部热源分布、散热条件及热传导路径均十分复

杂,不同位置热变形对最终加工误差的贡献存在显著差异,仅凭有限测点温度信息建立的误差模型往往存在表征能力不足、预测精度有限及环境适应性差等问题。随着传感器微型化智能化及信息处理技术进步,采用多传感器融合技术全面感知主轴热态特性,并结合先进算法进行数据挖掘与建模已成为当前研究热点。

本文从主轴热误差产生的物理机制出发,分析热误差传递基本规律,探讨多传感器信息采集系统构建原则与优化方法,重点研究基于多源信息融合的热误差建模理论与模型参数在线修正策略,形成一套面向实时补偿的理论方案,旨在为提升数控机床加工精度提供理论支撑。

## 一、主轴热误差的产生机理与影响因素

## 1.1 热误差的核心产生机制

主轴系统的热误差,本质上是由于温度分布不均匀导致的结构热变形。在机床运行过程中,主轴轴承高速旋转、电机电磁损耗以及切削区热量传入共同构成复杂的内外热

源,这些热量通过传导、对流和辐射等方式在主轴部件间传递,使得各部位温度呈现非均匀上升态势。由于材料线膨胀系数通常为正值,温度升高部位产生相应膨胀变形,而不同部位温升速率和幅值的差异则导致主轴轴线发生偏移或倾斜,最终体现为刀具中心点相对于工件的位置误差。

### 1.2 热误差的动态演化特性

深入分析热误差产生机理,需从热传导理论出发,将主轴系统视为一个具有多热源多边界条件的热传导系统。根据傅里叶导热定律,热量在主轴内部传递时遵循特定路径和规律,而温度场的分布则取决于热源强度、材料热物性参数及结构几何形状等因素。实际工况下主轴转速、切削负载及冷却条件均处于动态变化之中,这使得热源强度和散热边界条件随之改变,进而导致温度场呈现非稳态特征,温度场瞬态变化必然引起热变形场滞后响应,这种热惯性使得热误差演变呈现出复杂的非线性与时间滞后特性。

### 1.3 热误差的多维度影响因素

影响主轴热误差的因素是多方面的。从内部因素看,主轴结构设计、轴承配置形式、预紧力大小及润滑方式等均影响热量产生与传导,不同轴承类型和布置方式其摩擦热产生位置和热量传递路径会有显著差异,润滑油黏度和供油量则直接关系到摩擦热生成与带走热量的效率。从外部因素看,环境温度变化、切削液使用状况及机床基础稳定性等同样对主轴温度场产生影响,这些因素往往相互耦合,共同作用于主轴热态特性,使得热误差精确预测相当困难。

### 1.4 主轴热误差的多维变形特征

传统研究方法通常将主轴热误差简化为一个或多个温度测点的线性或多项式函数,这在很大程度上忽略了热误差形成的物理本质。主轴在空间三个方向上均存在热变形且各方向变形之间相互关联,例如径向热膨胀会引起轴线偏移,轴向热伸长则影响刀具轴向定位。更为复杂的是由于结构不对称性或约束条件差异,主轴还可能产生热倾斜或热弯曲,这些多维变形共同构成最终的空间位置误差,因此若要实现热误差精确补偿,必须建立能够完整描述主轴热态特性的温度场与变形场之间的映射关系。

## 二、多传感器信息采集系统的构建与优化

### 2.1 传感器的类型选择与搭配

准确获取主轴系统温度分布信息,是实现热误差建模与补偿的基础。传统单点测温方式往往选择主轴轴承外圈或箱体外壁等易于测量的位置作为测温点,但这种布点策略缺乏理论指导,难以保证所测温度信息与最终热误差之间的强相关性。多传感器信息采集系统的构建首先需要解决传感器类型选择、测点位置确定以及采样策略制定等问题。

从传感器类型看,目前用于主轴温度测量的传感器主要包括热电偶、热电阻和红外测温仪等。热电偶因体积小、响应快、成本低,被广泛用于多点温度测量;热电阻精度高、稳定性好,适用于关键部位;红外测温仪可非接触测量旋转部件,但精度受发射率影响。实际应用中常以热电偶为主,

其他类型传感器为辅,兼顾测量全面性与准确性。

### 2.2 测点位置的优化配置原则

测点位置优化配置是多传感器系统构建的核心环节,理论上测点越多获取的温度场信息越丰富,但测点数量增加不仅提高系统成本还会引入数据冗余增加后续处理复杂性,因此需要在保证信息完整性的前提下确定最优测点数量和位置。从热误差形成物理机制来看,测点应优先布置在热源附近、热传导路径关键节点及约束边界处,前后轴承部位是主要热源产生地应布置测点监测其温升情况,主轴箱体与床身连接面是热量传递关键通道该处温度梯度对整体热变形有重要影响,冷却通道出入口温度差异则反映冷却系统散热效果。

### 2.3 测点布局的优化方法

为了进一步优化测点布局,可以借助理论分析与实验验证相结合的方法。通过有限元热特性仿真可以预先分析主轴在不同工况下的温度场分布规律,识别出温度变化剧烈且与热变形关联度高的区域作为候选测点,在此基础上采用相关性分析、聚类分析或基于熵值法的信息冗余度评估剔除信息重叠严重的测点,最终形成一套测点精简方案。这种基于先验知识与数据驱动相结合的优化方法,既保证了温度场重建精度又提高了传感器系统经济性与可靠性。

### 2.4 数据采集的采样策略设计

在数据采集层面,需要考虑采样频率与同步性问题。热误差是一个缓变过程其时间常数通常以分钟计,过高的采样频率会产生大量冗余数据增加系统负担,采样频率过低则可能丢失热过程动态细节。一般而言采样频率应至少高于热过程最高频率成分的两倍,同时兼顾数据处理的实时性需求。对于多传感器数据,必须确保各通道采样同步性以保证同一时刻不同测点温度数据的可比性,可以通过硬件触发或软件同步的方式实现多通道数据同步采集,为后续融合建模奠定数据基础。

## 三、基于多源信息融合的热误差建模理论

### 3.1 信息融合的两层实现维度

多传感器采集得到的温度数据,只有通过有效信息融合与建模才能转化为对热误差的精确描述。信息融合目的在于充分利用多测点互补信息与冗余信息,消除单一传感器不确定性,提高状态估计准确性与可靠性。在主轴热误差建模中,信息融合主要体现在两个层面:一是数据层融合,即对原始温度数据进行预处理与特征提取;二是模型层融合,即建立温度特征与多维热误差之间的映射关系。

### 3.2 数据层融合的预处理方法

数据层融合的首要任务是对原始测量数据进行滤波与校正,受传感器精度、电磁干扰及环境波动等因素影响,实测温度信号往往混杂有噪声成分,需要采用数字滤波技术进行平滑处理。对于因传感器安装位置差异或测量原理不同而导致的系统偏差,还需要通过标定实验进行校正,确保不同传感器数据在物理意义上的一致性。

### 3.3 模型层融合的建模方法分类

模型层融合是热误差建模核心,其基本思路是构建一个能够描述温度特征与热误差之间复杂映射关系的数学模型。考虑到热误差通常表现为多维形式,包括轴向热伸长、径向热漂移及热倾斜等,所建模型应具备多输入多输出能力。从建模方法看主要可以分为机理建模和辨识建模两大类:机理建模基于热传导和热弹性理论,通过求解偏微分方程获取温度场与变形场解析关系,这种方法物理意义明确但求解复杂且需要精确边界条件,在实际应用中受到较大限制;辨识建模则通过实验数据驱动,利用统计学习或智能算法建立输入输出之间的黑箱或灰箱模型,具有适应性强、建模过程相对简单的优势。

### 3.4 典型辨识建模方法的应用

在众多辨识建模方法中,基于多元回归分析的方法是最为基础的一类,它假设热误差是各温度测点温度的线性组合,通过最小二乘法确定回归系数。然而热误差与温度之间往往存在明显非线性与时滞特性,单纯线性回归模型难以获得理想预测精度。神经网络方法因其强大非线性映射能力在热误差建模中得到广泛应用,通过构建包含输入层、隐含层和输出层的网络结构,并采用误差反向传播算法进行训练,神经网络能够学习温度特征与热误差之间的任意非线性关系。支持向量机方法则基于结构风险最小化原则,通过核函数将低维输入映射到高维特征空间,在高维空间中构建线性回归函数,同样适用于小样本非线性情况下的热误差建模。

### 3.5 热误差的动态建模方法

考虑到热误差的时变特性,单一静态模型往往难以适应工况变化带来的影响。基于时间序列分析的动态建模方法,如自回归移动平均模型及其与外部输入结合的扩展形式,能够描述热误差随时间演化规律,将历史误差信息纳入模型提高预测准确性。

## 四、实时补偿策略与模型参数在线修正

### 4.1 热误差实时补偿的实现架构

将建立的热误差预测模型应用于实际加工过程,需要解决模型计算实时性与参数自适应性两大核心问题。实时性要求模型能够在数控系统采样周期内完成误差值计算与补偿指令生成;自适应性要求模型能够根据工况变化和系统老化

等因素自动调整模型参数,保持预测精度。

在实时补偿实现层面,通常采用前馈补偿控制架构。基于多传感器实时采集的温度数据,补偿模型计算出当前时刻主轴预期热误差,该误差值被转换为数控系统可识别的坐标修正量,叠加到原有刀具轨迹指令中从而实现误差实时抵消。为了确保补偿实时性,模型算法必须足够简洁高效,能够在嵌入式控制器或工控机上快速运行。对于复杂神经网络或支持向量机模型,可以通过模型压缩或硬件加速方式满足实时性要求,同时需要建立合理通讯机制,保证传感器数据到控制器、控制器到伺服驱动器的数据传输具有极低延迟。

### 4.2 模型参数在线修正的必要性及方法

然而由于机床实际加工工况复杂多变,如切削负载突变、环境温度周期性波动以及冷却系统状态改变等,都会使主轴温升特性与热变形规律发生偏移。基于离线数据训练得到的静态补偿模型,其预测精度会随时间推移和工况变化而逐渐下降,因此引入模型参数在线修正机制是实现高精度持续补偿的关键。

在线修正基本思想是利用可获取的新观测信息对模型参数进行实时调整,一种常用方法是基于卡尔曼滤波的递推估计算法,将模型参数视为状态变量,将温度测量值和误差观测值作为量测信息,通过卡尔曼滤波预测与更新步骤不断修正参数估计值。这种方法能够融合历史信息与当前信息,在噪声环境下给出最优参数估计。

对于基于神经网络的模型,可以采用在线学习方式实现参数修正,当检测到模型预测误差超过设定阈值时,触发网络权值增量式调整,为了防止过度修正导致模型振荡,需要合理设计学习率与修正触发条件。

## 五、结语

本文围绕数控机床主轴热误差实时补偿问题,通过对主轴热误差产生机理深入分析,明确了热误差与温度场之间内在联系,揭示了传统单点测温方法局限性。在此基础上提出了多传感器信息采集系统构建原则,强调了测点优化配置对于全面准确获取温度信息的重要性。在建模理论部分,探讨了从数据预处理到多源信息融合的完整技术路线,比较了不同建模方法优缺点与适用场景。最后针对实时补偿实现需求,研究了补偿策略构建与模型参数在线修正方法,为实现高精度高适应性热误差补偿提供了理论指导。

## 参考文献

- [1]孟璐.高速数控机床主轴热误差预测与补偿研究[J].现代制造技术与装备, 2026, 62(01): 123-125.DOI: 10.16107/j.cnki.mte.2026.0037.
- [2]林伟铨,尹玲,张斐,等.基于单温度传感器的数控机床主轴热误差建模方法研究[J].机床与液压, 2023, 51(13): 58-62.
- [3]郭力.数控机床主轴回转误差在线测试硬件系统[J].装备机械, 2022, (04): 48-50.
- [4]郭婷.数控机床主轴热误差及优化策略研究[J].内燃机与配件, 2020, (14): 88-89.DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2020.14.040.