

# 数控机床主轴运行状态智能监测与故障预警系统研究

赵帅 倪永军 李明

浙江恒大数据装备有限公司 浙江 诸暨 311800

**【摘要】**：数控机床主轴作为核心执行单元，其运行状态直接关系到加工效率与产品质量。本文针对主轴运行状态监测与故障预警问题开展系统研究，在分析主轴典型故障机理与演化规律的基础上，探讨了多源传感信息采集系统的构建原则，研究了基于信号处理的特征提取方法与基于机器学习的状态识别模型，提出了一套包含数据采集、特征分析、状态辨识与趋势预测的智能监测预警体系，并重点讨论了预警阈值设定与系统可靠性保障等关键问题。研究表明，通过融合振动、温度等多维信息并采用智能算法进行状态识别，能够有效实现主轴运行状态的在线监测与潜在故障的早期预警，为数控机床的预测性维护提供了理论支撑。

**【关键词】**：数控机床；主轴；状态监测；故障预警；特征提取

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.065

## 1 引言

在现代机械制造领域中，数控机床作为关键的加工装备，其运行的可靠性直接决定了生产线的连续性与产品的质量稳定性。在数控机床的众多组成部分中，主轴系统承担着传递切削动力和维持旋转精度的核心任务，其工作状态最为复杂，负荷最为繁重，同时也是故障发生率最高的部位之一，一旦出现异常不仅会导致当前加工工件报废，还可能引发连锁反应损坏其他部件，造成较长时间的生产中断。

长期以来针对主轴设备的维护主要采用两种传统模式：一是事后维修即等到故障发生后再进行修复，这种方式往往伴随较大的经济损失；二是定期维修即按照固定的时间间隔对设备进行保养和部件更换，这种方式虽然在一定程度上降低了突发故障的风险，但容易造成过度维修且无法完全避免偶发性故障。随着传感技术、信号处理技术以及人工智能算法的快速发展，基于设备运行状态的预测性维护理念逐渐兴起，其核心在于通过实时监测设备运行过程中的各种物理量，及时捕捉异常征兆并评估设备健康状态。开展数控机床主轴运行状态的智能监测与故障预警系统研究具有重要的理论意义和工程价值，本文从主轴典型故障的物理机理出发，探讨传感系统的优化配置方法，研究信号特征提取与状态识别的理论途径，分析预警策略的制定原则，旨在为提升主轴运行可靠性提供参考。

## 2 主轴常见故障类型及其演化机理

主轴系统在长期运行过程中由于承受交变载荷、高速摩擦以及热力耦合作用，各组成部分会逐渐产生性能退化或突发性损伤。从故障发生的部位来看，主轴系统的故障主要可以分为轴承故障、转子不平衡、不对中以及结构松动等几种典型形式。

轴承是主轴系统中最为关键的支撑部件也是最易发生故障的环节，在高速旋转过程中轴承滚动体与内外圈滚道之间不断接触和分离产生周期性交变应力，当润滑不良或存在异物侵入时滚动表面可能出现疲劳剥落或磨损，这些局部损伤在轴承运转时会激发出周期性的冲击脉冲进而引起系统振动。随着损

伤程度的加剧冲击能量逐渐增大，冲击频率的谐波成分也日益丰富最终导致振动水平超出容许范围。轴承故障的演化通常经历从微观损伤到宏观失效的渐进过程，这为早期预警提供了时间窗口。

转子不平衡是另一类常见的主轴故障，由于制造误差或运行过程中零部件松动脱落，主轴的质心可能偏离其几何中心线，当转子以一定转速旋转时不平衡质量会产生与转速同频的离心力激起主轴的强迫振动。在临界转速附近这种不平衡响应会被放大严重时可能导致转子与定子发生碰磨。不平衡故障的特征相对明显主要表现为振动幅值随转速升高而增大，且振动能量主要集中在旋转基频及其倍频成分上。不对中故障通常发生在主轴与电机或传动装置之间的连接部位，当联轴器两端轴存在偏移时连接件在传递扭矩的同时会受到附加的弯矩和径向力，这不仅会引起系统振动还会加速联轴器和轴承的磨损。结构松动则是指主轴与其支撑部件之间的连接刚度下降，松动故障会改变系统的动力学特性使振动响应呈现非线性特征。

上述各类故障并非孤立存在，在实际工况中往往相互耦合相互激发。例如初始的不平衡会加剧轴承负荷加速轴承磨损，而轴承磨损后间隙增大会进一步加剧不平衡响应，这种复合故障的演化过程更为复杂，给状态监测与故障辨识带来了更大的挑战。

## 3 多源传感信息采集系统的构建

要实现主轴运行状态的准确感知，首先需要建立科学合理的信号采集系统。主轴在运行过程中会释放多种形式的物理信息，包括振动、温度、声音、转速以及功率等，这些信息从不同侧面反映了主轴的运行状态，单一类型的传感器往往只能捕捉到故障演化的部分特征，难以全面描述系统的健康全貌，因此现代监测系统普遍采用多传感器融合的思路。

振动信号是反映主轴机械状态最为直接和敏感的信息载体，当主轴发生故障时其动力学特性会发生变化，在振动响应

上表现为特定频率成分的能量增减或新的频率成分出现。用于振动测量的传感器主要包括压电式加速度计和速度传感器，加速度计因其频响范围宽、体积小、安装方便等优点被广泛应用于主轴振动监测，在选择加速度计时需要考虑其灵敏度、频率范围以及安装方式等因素，确保传感器能够有效捕捉到故障特征频率范围内的信号，通常将传感器布置在轴承座等振动传递路径的关键节点上以获取尽可能丰富的故障信息。

温度信号同样不容忽视，主轴轴承在出现润滑不良或早期磨损时摩擦功耗会增大导致局部温度升高，温度监测虽然响应速度较慢但对于反映热态变化和渐进性故障具有独特价值。常用的温度传感器有热电偶和热电阻，它们可以直接安装在轴承外圈或箱体表面也可以嵌入关键部位测量内部温度，测点位置的选择需要经过仔细分析以保证对早期异常有足够灵敏度。除了振动和温度，主轴驱动电机的功率或电流信号能够反映负载的变化，当切削过程异常或主轴内部摩擦增大时功率消耗会相应改变；声发射技术对高频应力波非常敏感能够捕捉到材料微观断裂时释放的弹性波，对于轴承早期疲劳剥落等微弱故障具有独特优势。

多传感器系统的构建不仅仅是传感器的简单堆叠，还需要考虑传感器的优化布置和数据同步采集。传感器数量过多会提高系统成本增加数据处理负担且可能引入信息冗余，数量过少则可能遗漏关键信息，因此需要在理论分析和实验验证的基础上确定既能全面覆盖故障模式又尽可能精简的传感器配置方案。同时由于不同类型信号的采样频率差异较大，系统设计时需要统筹考虑数据采集卡的参数并保证多源数据在时间上的同步性，为后续的信息融合奠定基础。

#### 4 基于信号处理的状态特征提取方法

原始采集信号中包含着反映设备状态的大量信息，但这些信息通常混杂在噪声和干扰之中难以直接用于状态判断。特征提取的目的就是通过信号处理手段从原始信号中分离出能够表征设备健康状态的敏感特征量，为后续的状态识别和预警提供输入。针对主轴振动信号的处理，常用的方法包括时域分析、频域分析以及时频域分析。

时域分析是最为基础的信号处理方法，通过计算振动信号的统计指标可以初步判断设备是否存在异常，常用的时域特征包括均值、均方根值、峰值、峭度指标等。其中均方根值反映了振动的总体能量水平对于不平衡等稳态故障较为敏感，峭度指标对冲击型故障非常敏感，当轴承出现局部损伤时峭度值会显著增大。这些时域指标计算简单、物理意义明确，适合作为连续监测的初步判据。

频域分析能够将时间信号转换到频率域揭示信号中各频率成分的分布情况。快速傅里叶变换是实现频域分析的主要工具，对于旋转机械而言不同的故障类型往往对应特定的频率特

征：不平衡故障主要表现为转频分量增大，不对中故障常伴随二倍频分量升高，轴承故障则激发与其特征频率相关的振动成分。通过频谱分析可以识别出这些频率成分的能量变化，从而判断故障的性质和严重程度。

由于主轴转速和负载在加工过程中可能发生变化，振动信号往往呈现非平稳特性，此时需要引入时频分析方法。短时傅里叶变换通过在时间轴上滑动窗口对信号分段进行傅里叶变换得到信号的时频谱图，小波变换则具有多分辨率分析的优点能够在高频段提供较好的时间分辨率、在低频段提供较好的频率分辨率，对于提取瞬态冲击信号尤为有效。对于温度信号通常提取稳态温度值、温升速率以及温度梯度等特征，声发射信号则需要分析其幅值、能量以及频率分布特征。在实际应用中往往需要从多个维度提取特征形成一个多维特征向量，并结合主成分分析等方法进行特征降维和优选。

#### 5 基于机器学习的智能状态识别与故障预警

提取出的特征向量需要转化为对设备状态的明确判断，这就需要建立从特征空间到状态空间的映射模型。基于机器学习的方法能够从历史数据中自动学习特征与状态之间的复杂映射关系，具有较强的适应性和识别能力。

在有足够历史故障数据的情况下，监督学习是首选方法。支持向量机是一种性能优良的分类算法，其基本思想是通过核函数将原始特征映射到高维空间，在高维空间中寻找能够最大化分类间隔的最优分类超平面，对于小样本、非线性问题具有良好的泛化能力。人工神经网络则通过模拟人脑神经元的工作方式构建多层网络结构，利用反向传播算法调整网络权值实现对复杂模式的拟合。深度学习方法通过堆叠多层网络自动学习特征的层次化表示，也逐渐被引入机械故障诊断中。

但在实际工业场景中获取大量带有明确标签的故障数据往往比较困难，因为设备在正常运行期间多数时间处于健康状态，故障样本相对稀缺。此时可以采用无监督学习或半监督学习策略。聚类分析根据特征向量之间的相似性将样本自动归为若干类别，通过观察新样本所属分类是否偏离正常样本聚集区域来判断状态是否异常。自编码神经网络通过训练网络对输入数据进行重构，当输入为正常数据时重构误差较小、当输入为异常数据时重构误差显著增大，这种基于重构误差的方法也可用于异常检测。

状态识别解决的是当前状态是什么的问题，而故障预警则需要回答未来状态会怎样，实现预警功能需要建立对状态发展趋势的预测模型。对于缓慢退化的过程可以采用多项式回归或灰色模型进行趋势预测，对于具有随机波动特征的过程可以采用自回归移动平均模型。

无论采用何种识别与预测方法，预警阈值的设定都是系统设计中需要审慎考虑的问题。阈值设置过低会导致虚警频繁影

响操作人员对系统的信任,阈值设置过高则可能漏报真实故障失去预警的意义。合理的阈值应当综合考虑设备的重要性、故障的危害程度以及监测信号的统计特性,通常可以采用统计过程控制中的原则基于正常工况下特征量的均值和标准差设定控制限。

## 6 监测预警系统的可靠性保障与实施策略

智能监测与故障预警系统在理论研究的基础上最终要应用于实际生产环境,其自身的可靠性是需要重点关注的问题。硬件层面的可靠性主要体现在传感器和采集设备的选型与防护上,工业现场的电磁干扰、温度变化等因素都会影响传感器的工作稳定性,选择具有良好环境适应性的传感器产品是基础保障。对于关键的监测部位可以采用冗余配置,通过信号对比识别单传感器故障提高系统的容错能力。

软件层面的可靠性体现在算法的鲁棒性和系统的自诊断能力上,特征提取和模式识别算法应当具备一定的抗干扰能力,对于偶尔出现的异常值能够自动识别和处理,避免将采集噪声误判为设备故障。系统应建立数据有效性校验机制对传感器断线等情况进行实时监控,并在检测到异常时及时发出系统自检报警。

在实施策略方面,监测预警系统的构建应当遵循循序渐进

### 参考文献:

- [1] 徐丹丹,张帝.基于数据驱动和本体建模的数控机床主轴故障诊断与推理[J].机床与液压,2024,52(12):244-252.
- [2] 杨晋.数控机床主轴故障判断与维护保养[J].机械管理开发,2018,33(10):280-281.
- [3] 郑秀丽,王辉,庄千芳,等.基于振动的数控机床主轴故障预警分析[J].机械工程师,2016,(08):153-154.
- [4] 刘学平.基于傅里叶变换的数控机床主轴故障预测技术[J].机械管理开发,2022,37(06):141-143.

的原则。对于已经投入运行的设备可以先从加装必要的传感器开始建立初步的数据采集系统积累运行数据,在数据积累到一定程度后逐步完善特征库和故障案例库训练状态识别模型,随着对设备特性认识的深入再逐步引入趋势预测功能。

## 7 结语

本文围绕数控机床主轴运行状态的智能监测与故障预警问题进行了较为系统的理论探讨。从主轴典型故障的演化机理入手分析了轴承故障、转子不平衡、不对中及结构松动等常见故障的形成原因与振动特征,阐述了多源传感信息采集系统的构建思路强调了传感器优化配置与数据同步的重要性。针对监测信号的处理探讨了时域分析、频域分析及时频分析等多种特征提取方法的特点与适用场景,在状态识别层面论述了基于支持向量机、神经网络等机器学习算法的故障分类原理以及基于时间序列分析的故障趋势预测方法,最后从硬件选型、算法鲁棒性及实施策略等方面讨论了保证监测系统自身可靠性的若干途径。

随着新一代信息技术的快速发展,主轴状态监测技术正朝着微型化、无线化、智能化的方向不断进步。未来研究可通过持续深化理论研究与技术突破,主轴运行状态的智能监测与故障预警系统必将在保障设备安全运行、降低维护成本方面发挥更加重要的作用。