

智能化电主轴关键技术与系统开发

李小虎, 万少可, 洪军

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 高端数控机床作为装备制造业母机,被我国列为加快突破的战略必争领域,其智能化更是重要发展方向。其中,主轴系统对于高档数控机床的加工性能与可靠性具有锚定作用,是当之无愧的核心功能部件。同时,随着航空航天、汽车、能源等高端制造领域对高性能加工的迫切需求,实现状态感知与性能调控的智能化主轴技术已经成为目前高端数控机床领域发展的重要方向。作为直接夹持刀具参与切削的关键核心部件,如何对切削加工过程以及自身运行状态进行在线精准感知评估从而保障切削加工过程和机床加工性能、如何通过主轴自身的智能主动调控提升复杂工况下的切削加工质量,已经成为高性能、智能化主轴发展所亟需攻克的核心难题。在此背景下,研究团队面向高端机床智能化发展趋势与实际需求,构建了一系列面向智能主轴的状态感知评估与振动主动抑制方法,解决了主轴系统状态评估难、主动调控能力弱等难题,开发出两类智能电主轴原型样机,实现了主轴在线状态评估以及颤振监测与颤振抑制,并在部分机床企业得到应用,为我国机床领域开发智能化主轴提供了理论基础与使能技术。

关键词: 智能化主轴; 状态评估; 颤振监测; 颤振抑制

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511010 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0104-11

Key Technologies and System Development of Intelligent Electric Spindles

LI Xiaohu, WAN Shaoke, HONG Jun

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High-end computer numerical control (CNC) machine tools, recognized as the “mother machines” of the equipment manufacturing industry, have been identified by China as a strategic priority requiring accelerated breakthroughs, with intelligence being a critical development direction. Among their components, the spindle system plays a pivotal role in determining the machining performance and reliability of high-grade CNC machine tools, making it the undisputed core functional unit. Meanwhile, with the growing demand for high-performance machining in advanced manufacturing sectors such as aerospace, automotive, and energy, intelligent spindle technology—capable of state sensing and performance regulation—has become a key focus in the development of high-end CNC machine tools. As the critical component directly clamping and driving cutting tools, two core challenges must be addressed to advance high-performance and intelligent spindles: how to achieve online, accurate perception and evaluation of the cutting process and the spindle's operational state to ensure machining stability and performance, and how to enable intelligent active control of the spindle to enhance machining quality under complex working

conditions. In this context, the research team has developed a series of methods for state sensing, evaluation, and active vibration suppression tailored to intelligent spindles, addressing long-standing issues such as difficulties in state assessment and weak active control capabilities. Two types of intelligent electric spindle prototypes are developed, demonstrating capabilities in online state evaluation, chatter monitoring, and chatter suppression. These prototypes have been applied in select machine tool enterprises, providing theoretical foundations and enabling technologies for the development of intelligent spindles in China's machine tool industry.

Keywords: intelligent spindle; status evaluation; chatter monitoring; chatter suppression

1 研究背景

近年来,“工业 4.0”的提出极大地推动了以智能制造为核心的第四次工业革命的到来,世界各国也纷纷将智能制造技术作为国家重点发展领域,努力推动本国工业技术能力的提升,以期在新一轮的工业革命中占据制高点^[1-2]。我国也在 2015 年提出了《中国制造 2025》计划,并将智能制造技术列为其中需要重点发展的技术问题之一,同时也明确指出智能化机床装备将是未来高端数控机床重要的一个发展趋势^[3]。主轴系统作为数控机床的核心功能部件,其智能化水平在很大程度上也影响着机床的智能化水平。此外,主轴单元相较于其他功能部件而言,具有更高的独立性,可以服务于不同机床整机的需求^[4]。因此,智能化主轴单元对于推动智能化机床的发展具有重要的工程实际意义。

早在 2010 年,机床领域著名学者,加拿大英属哥伦比亚大学 Altintas 教授、德国亚琛工业大学 Brecher 教授、达姆斯特工业大学 Abele 教授,就共同在国际生产工程科学院年会上对机床主轴的研究进展进行了综述,并指出集成传感器、作动器从而保证自身性能的主轴系统将是未来重要的发展趋势^[5]。2012 年,轴承企业巨头日本精工株式会社的主轴专家 Nakamura 通过总结近 40 年来机床主轴的发展过程,同样明确指出具备感知与调控功能的智能主轴单元将会是下一代机床主轴的重要发展方向^[6]。

目前,全球各大机床/主轴制造厂商已经推出了不同形式的智能化主轴产品。为了提升满足机床使用过程中对于主轴运行状态的在线监测以及状态评估的需要,瑞士 Step-Tec 主轴公司通过在主轴内部集成温度、振动等传感器获取主轴状态信息,并开发了 intelliSTEP 软件实现主轴故障的诊断、寿命的预测等^[7]。德国西门子公司旗下主轴品牌 WEISS 基于西门子数控系统,开发了智能化感知模块,可以实现主轴运行过程中温度、负载等信息的统计与数据的云管理^[8],如图 1 所示。通过近距离无线通信技术,

每根主轴建立数字身份,实现主轴运行信息的查看与管理等。同时,西门子公司目前也开发出边缘计算 SINUMERIK Edge 产品,通过获取包括主轴、传动轴等运行过程中的物理量信息,实现了加工过程状态监测、机床运行状态分析、加工参数自适应优化等功能^[9]。日本大隈机床近期全面引入了人工智能(AI)技术以提升其机床的智能化水平,从而保证机床优良的加工性能与运行可靠性。该公司开发了如图 2 所示的 OSP-AI 主轴智能自诊断系统,通过控制机床主轴完成既定的诊断动作(主轴加减速),获取主轴电流、振动等关键信息,利用其开发的 AI 诊断模型,从而实现主轴健康状态的智能诊断与预防性维护,避免突发的停机维修造成的损失^[10]。同时,大隈机床也赋予其机床主轴更多的 AI 功能,包括切削加工过程中刀具破损、折断智能监测,提高了刀具的使用寿命。



图 1 西门子公司开发的 WEISS Smart Spindle 系统^[8]

Fig. 1 WEISS Smart Spindle system developed by SIEMENS^[8]

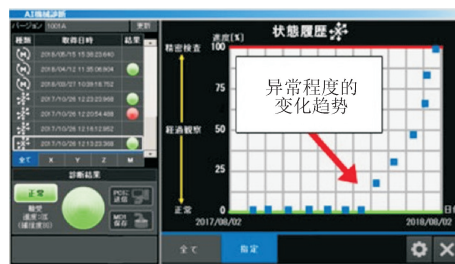


图 2 大隈机床公司开发的 OSP-AI 主轴智能自诊断系统^[10]

Fig. 2 OSP-AI spindle intelligent self-diagnosis system developed by Okuma^[10]

此外,为了提高机床主轴的加工性能,避免由于切削过程中颤振现象造成的加工质量恶化、刀具磨损加剧、主轴寿命下降等不良影响,机床厂商与研究机构也基于主轴系统开发了切削过程颤振在线监测以及主动抑制技术。山崎马扎克(Mazak)公司开发出了如图 3 所示的 SMOOTH AI Spindle 技术,利用主轴上的振动传感器对切削过程中的颤振进行在线监测,并基于 AI 技术对主轴的转速进行主动调控,从而抑制颤振的发生,保证工件的平稳切削^[11]。类似地,大隈机床也开发出了基于颤振监测以及主轴转速自适应调控的 Machining Navi 系统^[12],如图 4 所示,利用麦克风传感器监测切削颤振信息并自适应推荐最佳主轴转速实现无颤振切削,保证工件加工表面质量。一些研究机构与学者也尝试在主轴上集成作动装置或元器件,通过施加主动控制力从而对切削过程中的振动进行主动抑制,在保证稳定切削的同时可以大幅提高切削颤振稳定域边界,从而有利于提高机床切削加工效率。德国汉诺威莱布尼兹大学生产工程与机床研究所开发出了如图 5 所示的自适应主轴(Adaptive Spindle)^[13],通过在主轴前端安装压电作动器对切削加工过程的振动进行抑制。瑞士苏黎世联邦理工大学的机床与制造研究所则与瑞士 Stec-Tec 公司合作开发出了如图 6 所示的主动式主轴(Active Spindle)^[14],通过设计切削颤振主动控制策略,利用集成在主轴前端的压电作动器施加主动控制力,从而实现颤振的主动抑制。

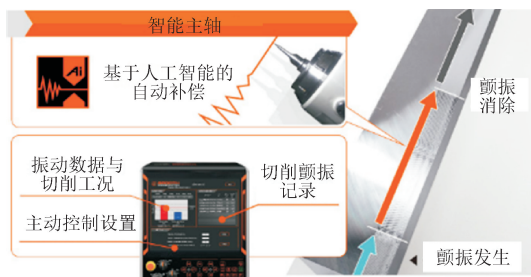


图 3 Mazak 公司开发的 SMOOTH AI Spindle^[11]
Fig. 3 SMOOTH AI Spindle developed by Mazak^[11]

目前,电主轴监测系统中对于电主轴的状态评估大多聚焦于电主轴轴承的故障识别,并据此判断电主轴的健康状态。在电主轴部件中,轴承作为基础零部件,在旋转机械故障中所占比例相当大。根据统计,旋转机械的故障大概有 40% 是由滚动轴承引起的^[15],有时甚至能达到 70%。近年来,学术界在主轴轴承状态识别算法研究中取得了很多成果。Patil 等^[16]对轴承的振动信号进行快速傅里叶变换,

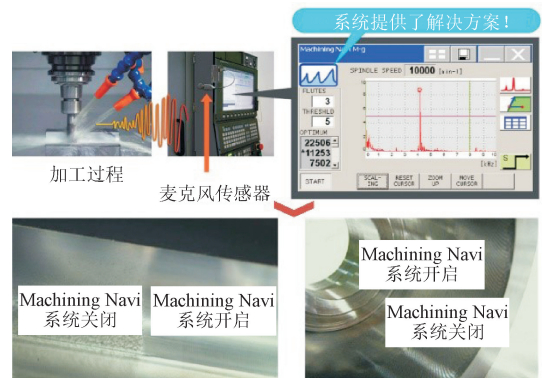


图 4 大隈机床公司开发的 Machining Navi 系统^[12]
Fig. 4 Machining Navi system developed by OKUMA^[12]

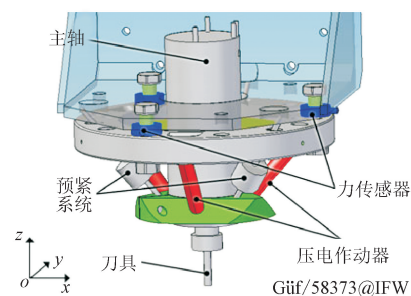


图 5 汉诺威莱布尼兹大学生产工程与机床研究所开发的 Adaptive Spindle^[13]
Fig. 5 Adaptive Spindle developed by IFW, Leibniz University Hanover^[13]

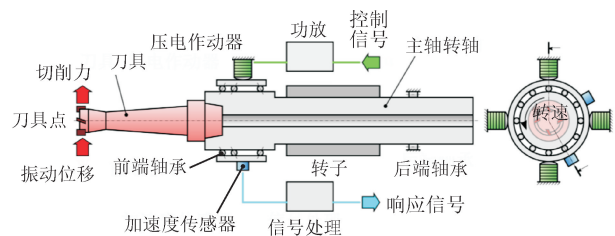


图 6 苏黎世联邦理工大学机床与制造研究所开发的 Active Spindle^[14]
Fig. 6 Active Spindle developed by WZL, ETH Zurich^[14]

之后检测振动模式发生的变化,从而进一步得出故障情况。Liu 等^[17]构造了一种加权的香农函数,对小波变换中的系数函数进行合成,并采用平均自相关功率谱来突出轴承故障特征。值得注意的是,很多主流的轴承故障状态识别方法用到了卷积神经网络,其具有深度特征提取、状态识别准确率高等优点。Jia 等^[18]提出了一种用于海量数据的旋转机械故障特征挖掘和智能状态识别的深度神经网络(DNN)方法。Wang 等^[19]利用多传感器信息特征融合提高了轴承故障诊断的准确度。

对于切削加工过程中的颤振现象,学者开展了颤振在线监测的研究。考虑到颤振发生过程中的信号属于非平稳信号,信号中的频率往往随时间发生变化,因此为了实现颤振的早期辨识,很多学者采用了时频域的信号分析方法来获取信号中频率成分随时间的变化信息。Wang 等^[20]对铣削过程中采集得到的信号进行离散小波变换,并根据小波变换极大模的统计特性实现了颤振的识别。Al-Regib 等^[21]通过加工系统瞬时能量的变化来表征铣削加工状态的变化,并利用 Teager-Kaise 非线性能量算子与时频分布特征提出了颤振监测指标。Zhang 等^[22]利用多模态数据驱动的方法对铣削加工过程中的颤振进行了监测。

为了实现切削加工过程中的颤振主动抑制,研究人员设计了不同形式的主动式主轴系统来实现颤振的主动抑制。目前,主动式主轴系统主要分为基于主动式电磁轴承的磁悬浮主轴系统和基于压电作动器的主动式主轴系统两大类。主动式电磁轴承属于非接触式轴承,由于其相对于普通的滚动球轴承具有无摩擦的优点,因此适用于高速超高速主轴系统的支撑。Knospe^[23]搭建了一个安装有主动式电磁轴承的实验原型样机,通过改变其控制器参数提高了铣削系统的稳定域边界。Cui 等^[24]将电磁式作动装置与主轴刀柄进行集成,实现了铣削加工颤振的主动抑制。由于压电作动器具有作动力大、工作频率宽的优点,也有研究人员将压电作动器集成到主轴系统中。Albertelli 等^[25]利用 4 组压电作动器对主轴前端轴承的外圈施加主动控制力,提高了主轴系统的刚度。Monnin 等^[26-27]设计了类似的主轴系统,通过压电作动器施加控制力到主轴前端轴承的外圈,间接地将主动控制力作用到旋转的主轴系统上,从而实现铣削过程的颤振抑制。同样地,Zhang 与 Li 等^[28-29]利用压电作动器将主动控制力施加到特制的主轴刀柄的深沟球轴承外圈上,间接地将主动控制力传递到旋转的主轴-刀具系统上,并基于不同的控制器算法实现了铣削颤振的抑制。

通过上述分析可见,目前的智能化主轴产品主要围绕主轴自身状态的智能监测诊断技术、面向切削加工过程的振动监测与主动控制/抑制技术等,相较于国外,我国目前尚处于技术研究阶段,尚未有成熟的产品出现。正是在上述背景下,本团队在国家科技重大专项、国家自然科学基金等项目的支持下,围绕兼具感知与调控功能的智能化主轴关键核心技术开展了研究工作,创建了一系列面向智能主轴的

状态感知评估与振动主动抑制方法,解决了主轴系统状态感知评估难、主动调控能力弱等难题,开发出了相关智能化主轴技术原型样机,并在部分机床企业得到实际应用。

2 关键技术与创新

2.1 智能主轴面向切削加工过程的状态感知评估技术

如图 7 所示,本团队揭示了高速切削颤振发展阶段信号特征演变规律,发展了针对智能主轴切削过程颤振监测信号的动态步长自适应滤波理论,创建了基于在线自适应滤波特性的无量纲颤振指标构建方法,实现了多工况、恒阈值、无漏判、无误判的早期颤振辨识。团队进一步提出了改进增强学习的无阈值智能颤振识别方法,建立了信号时频域统计特征与降噪自编码抽象特征相融合的智能颤振识别模型,突破了数据标签鲁棒性与颤振识别准确率相矛盾的应用瓶颈。

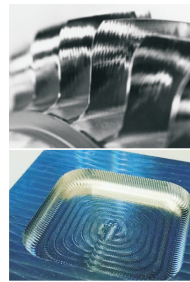
作为直接夹持刀具参与切削的机床关键核心部件,智能化主轴系统需要具备面向切削加工过程的状态感知评估功能。目前,由于刀具/工件的自激性振动引起的再生效应进而诱发的颤振现象,已经成为机床切削加工过程中日益凸显的问题,也是目前机床加工行业普遍面临的难题。颤振的发生会造成工件表面加工质量恶化(表面形成鱼鳞状振纹)、刀具磨损加剧、主轴寿命降低、机床加工效率下降等消极影响。因此,利用智能化主轴对切削过程进行感知评估,实现颤振早期(工件表面尚未形成明显的颤振纹理)的在线辨识,进而提醒操作人员或机床加工系统做出应对,具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

从实际工程应用的角度,切削颤振的早期辨识需要满足 3 个基本条件:时效性,即能够在工件表面未形成明显的颤振纹理之前及时地识别出颤振的发生;无漏判,即避免将实际加工中由于刀具切入/切出、切削参数突变等引起的信号中振动冲击误判为颤振;无漏判,即能够尽可能准确地对颤振进行识别。

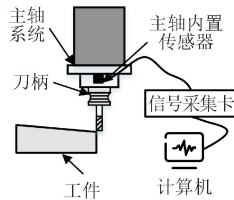
通过设计楔形工件变切深切削实验,使得切削过程历经平稳阶段到颤振早期诱发阶段再逐渐过渡到颤振爆发阶段,进而揭示了高速切削颤振发展阶段信号特征演变规律,发现在颤振发生早期(尚未形成振纹)时监测信号中已经存在颤振相关成分,但被主轴转频及其谐频成分所淹没。为此,本团队发展了针对智能主轴切削过程颤振监测信号的动态步长自适应滤波理论,提取出颤振诱发早期信号中被转

频及谐波成分所淹没的颤振敏感成分,并利用其优异的在线滤波效果以及非滤波成分的放大效应,创建了基于在线自适应滤波特性的无量纲颤振指标构

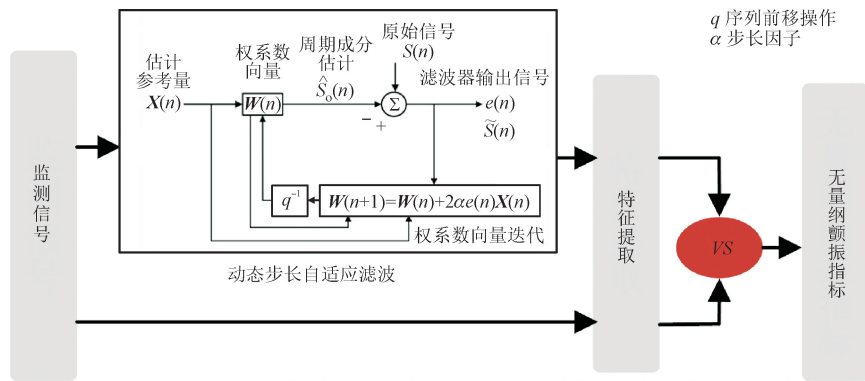
建方法,实现了多工况、恒阈值、无漏判、无误判的早期颤振辨识,解决了目前基于信号处理方法进行切削颤振在线早期辨识存在的应用痛点。



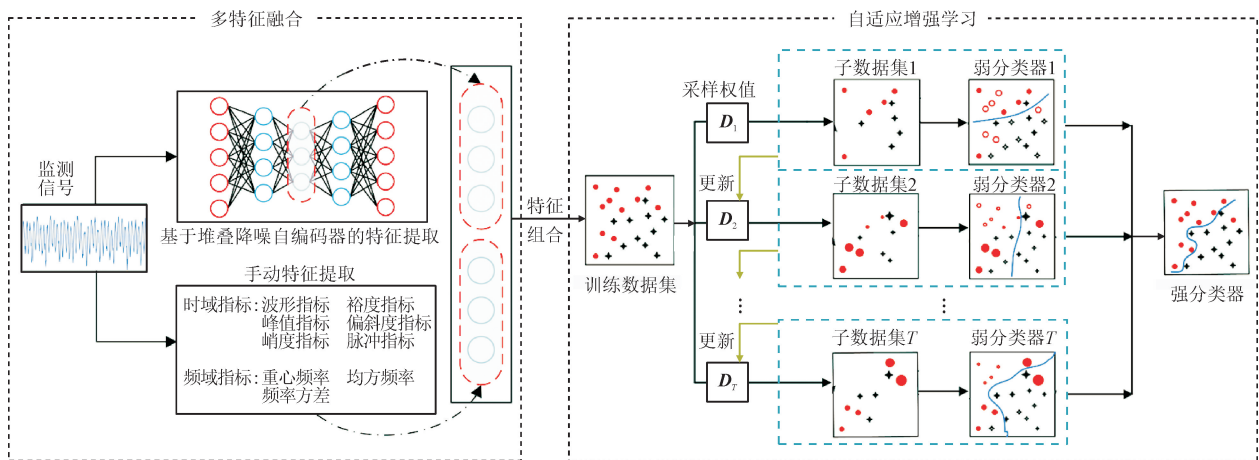
(a) 切削颤振现象



(b) 智能主轴系统



(c) 基于自适应滤波理论的颤振识别方法



(d) 改进增强学习的无阈值智能颤振识别方法

图7 智能主轴面向切削加工过程的状态感知评估技术

Fig. 7 State evaluation technology of intelligent spindle for cutting process

考虑到基于信号处理技术构建颤振监测指标的方法需要确定合适的阈值,对工程人员的要求较高,因此本团队进一步创新地将切削颤振的早期辨识问题转化为二分类问题,提出了改进增强学习的无阈值智能颤振识别方法。为提升切削颤振早期辨识准确率,基于多信息融合思想,建立了信号时频域统计特征与降噪自编码抽象特征相融合的智能颤振识别模型。同时,切削颤振早期(即平稳切削与颤振发生过渡阶段)存在数据标记困难的问题,极易发生的数

据标签误标记现象大大降低了智能颤振识别方法的准确性。为此,在增强学习方法中设计了自适应权重环节,最终突破了数据标签鲁棒性与颤振识别准确率相矛盾的应用瓶颈。

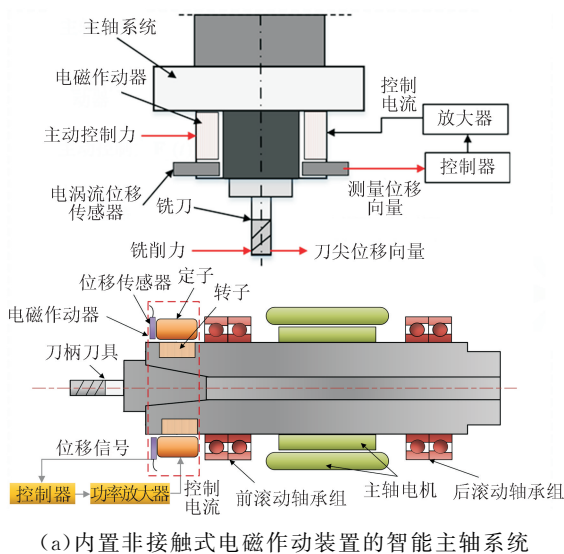
该技术为实现智能主轴面向加工过程的在线感知状态评估功能提供了重要的理论支撑。具体地,利用智能化主轴系统对切削加工过程中的早期颤振现象进行在线识别,从而提醒操作人员或机床加工系统做出应对,对于保障机床平稳加工、提高机床加

工效率、避免工件表面加工质量恶化等具有重要意义与价值。

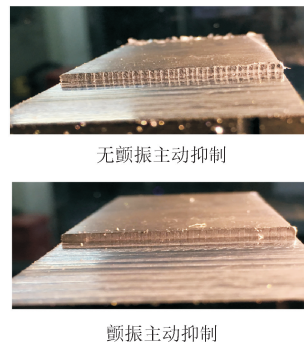
2.2 智能主轴面向切削加工过程的振动主动抑制方法

如图 8 所示,本团队构建了智能主轴切削颤振主动抑制系列新方法,开辟了基于振动主动控制的智能化主轴无颤振加工技术新方案;提出了非接触

式主动阻尼的颤振主动抑制新思路,创新开发了集成非接触式电磁作动器的智能化主轴系统;创建了位移单反馈的滑模变结构颤振主动控制方法,实现了主轴系统时变非线性特征影响下的颤振主动反馈控制;创新提出了智能主轴系统主动叠加辅助振动实现颤振主动抑制的新思路,首次研究并揭示了辅助叠加振动扰乱再生效应进而抑制颤振发生的作用机理。



(a) 内置非接触式电磁作动装置的智能主轴系统



(b) 智能主轴有、无颤振主动抑制效果对比

图 8 智能主轴面向切削加工过程的振动主动抑制方法

Fig. 8 Active vibration suppression method of intelligent spindle for cutting process

当智能主轴系统识别到切削过程中的早期颤振发生时,需要进一步实现颤振(自激振动)的主动抑制功能。通过智能主轴的振动主动抑制,能够消除切削过程中颤振造成的负面影响、保障切削过程的平稳进行、提高机床加工效率与加工性能。因此,研究智能主轴颤振主动抑制方法与策略对于高端数控机床具有重要的理论研究意义与工程应用价值。

从切削颤振的产生机理以及颤振稳定域的影响因素出发,归纳构建了 3 类智能主轴切削颤振主动抑制方法与策略。第 1 类方法:基于主轴系统动力学特性调控的颤振主动抑制方法。针对广泛使用的加工中心电主轴系统,提出了利用非接触式主动阻尼实现颤振主动控制的新思路,借鉴电磁轴承工作原理,创新地开发了集成非接触式电磁作动器的智能化主轴系统方案,通过在主轴切削加工过程中施加主动式阻尼力,从而提高主轴系统的阻尼特性,进而实现颤振的主动抑制^[30]。第 2 类方法:基于主轴刀具切削加工系统稳定性控制理论的颤振主动抑制方法。从动力学的角度看,颤振现象本质上属于主轴刀具切削加工系统的失稳,因此可以利用稳定性

控制理论构建系统的稳定性主动控制方法。然而,主轴刀具切削系统属于典型的高度非线性系统,包括主轴转速/温升引起的动力学特性参数变化、刀具磨损引起的切削力系数变化等。同时,常规的“位移+速度”的动力学系统控制策略也会产生由噪声引起的速度反馈干扰问题。为此,本项目创建了位移单反馈的滑模变结构颤振主动控制方法,实现了主轴系统时变非线性特征影响下的颤振主动反馈控制^[31]。第 3 类方法:基于扰乱切削过程再生效应的颤振主动抑制方法。颤振产生的根本原因在于主轴刀具系统振动引起的再生效应,因此通过扰乱这种再生效应能够有效抑制颤振的发生。为此,本项目受到振动辅助加工的启发,创新地提出了利用智能主轴系统在切削过程中主动叠加辅助振动进而实现颤振主动抑制的新思路,通过在主轴进给方向和垂直进给方向上施加一定幅值与频率的叠加振动,使得切削过程中的再生效应被扰乱,首次研究并揭示了辅助叠加振动扰乱再生效应进而抑制颤振发生的作用机理,提出了不同主轴切削工况下主动叠加振动幅值/频率的确定准则^[32]。

2.3 智能主轴运行状态智能诊断评估技术

如图 9 所示,本团队发展了智能主轴运行状态评估与智能诊断理论,提出了多源信息变权融合与向量数据描述的主轴运行状态自适应评估方法,创建了针对匿数据工业环境下主轴轴承微弱故障智能

诊断模型,破解了传统基于海量数据、超复杂网络的智能诊断方法在实际应用中的局限性,创新提出了融合智能主轴多类别传感器信息的互注意力作用机制,突破了多源、多类别传感器信息深度融合的难题。

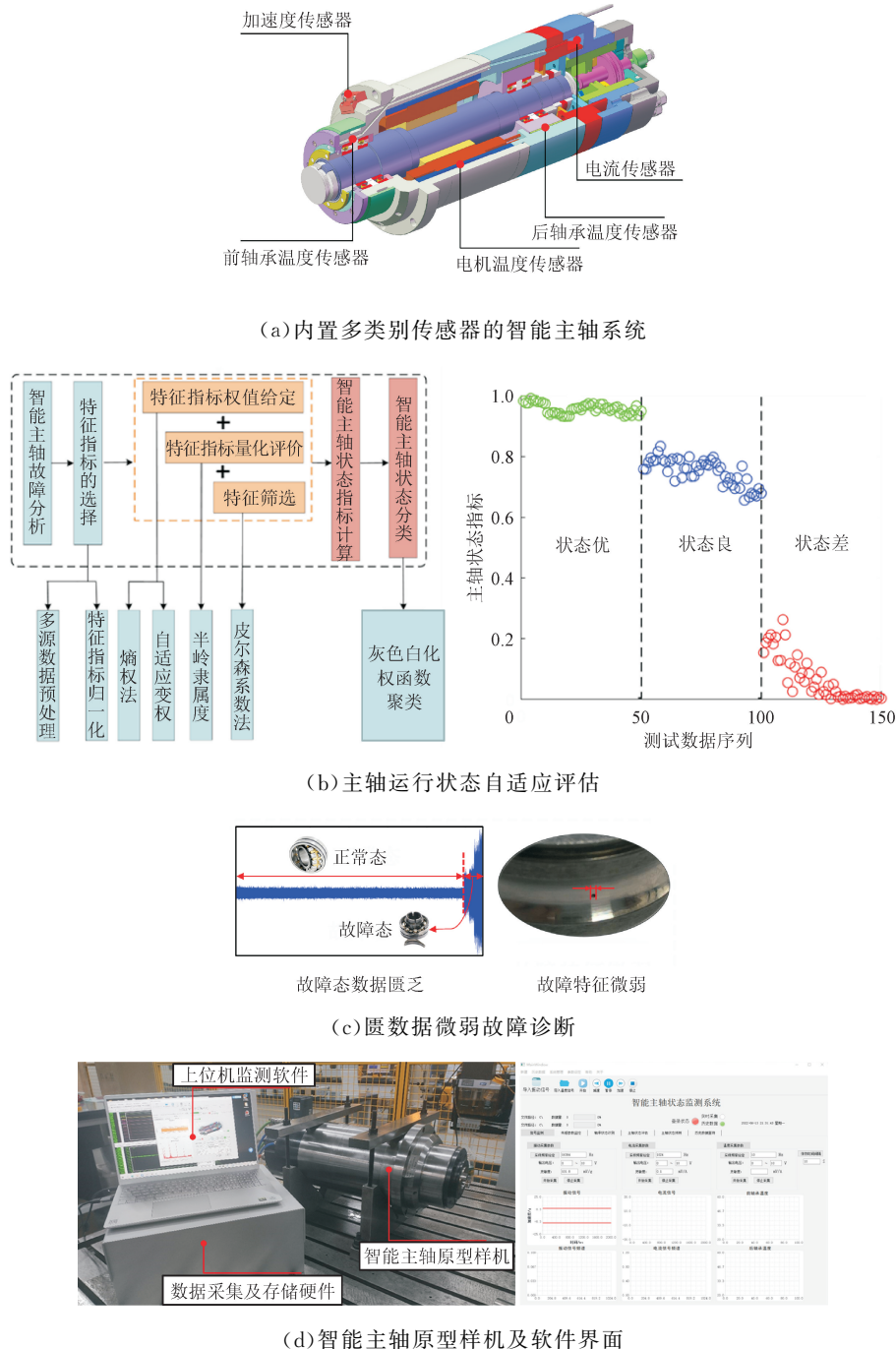


图 9 智能主轴运行状态智能诊断评估技术

Fig. 9 Intelligent diagnosis and evaluation technology of running state of intelligent spindle

主轴系统作为数控机床的核心关键部件之一,其自身的运行状态对于机床的加工性能具有直接的影响,因此实现自身运行状态的感知评估是智能化

主轴需要具备的重要功能。为了充分获取主轴的运行状态信息,设计开发了内置多类别传感器的智能主轴系统,从而获取主轴运行时的振动、温度、电流、

位移等多物理量信息。进一步地,发展了改进熵权法及考虑短板效应的变权理论,提出了多源信息变权融合与向量数据描述的主轴运行状态自适应评估方法,创新提出了融合智能主轴多类别传感器信息的互注意力作用机制,突破了多源、多类别传感器信息深度融合的难题,从而实现非故障状态下主轴状态的自适应评估。

作为主轴系统的核心支承零件,轴承的状态直接影响主轴系统的极限转速、温升、刚度、回转精度等。为此,本团队引入信号准周期性的概念,设计了基于长短时记忆网络的微弱故障特征提取框架。同时,使用深度残差块对信号局部时频特点进行了挖掘,实现了微弱特征的增强。进一步地,针对现有基于海量数据驱动的智能故障诊断模型构建方法与真实工业场景中故障数据匮乏的现实矛盾,以及模型依赖复杂结构挖掘数据特征导致模型训练周期长而模型应用需要快速部署的现实需求,提出了一种基于自动编码器和胶囊网络的胶囊自动编码器模型。通过设计胶囊特征提取器,实现了传统自动编码器标量特征向向量特征的转化,特征信息表征从长度

维度扩展到长度-角度维度,特征信息表达能力得到极大提升。最终,创建了针对匿数据工业环境下主轴轴承微弱故障智能诊断模型,破解了传统基于海量数据、超复杂网络的智能诊断方法在实际应用中的局限性。

3 推广应用情况

面向新能源汽车制造领域,为了提升高端机床的加工性能与智能化水平,受宝鸡某机床公司的技术委托,采用本团队所开发的智能化电主轴技术,针对其最新研制的高精密三轴立式加工中心产品,为其提供内置多类别(振动、温度、电流)传感器的智能化电主轴系统及配套状态监测软件(如图 10 所示),实现了主轴运行状态监测软件与数控系统的集成。通过获取主轴多物理量感知信息,实现了机床切削加工过程中主轴运行状态的自适应评估。该智能化电主轴采用 BBT40 刀柄接口形式,主轴最高转速为 16 000 r/min,主轴功率为 15.5 kW,最大扭矩为 60 N·m,主轴近端径向跳动为 1 μm 、远端(检棒悬伸长度为 200 mm)径向跳动为 4 μm 。



图 10 实现运行状态在线监测与评估的智能主轴

Fig. 10 Intelligent spindle for online monitoring and evaluation of operation status

采用本团队提出的面向智能主轴的振动主动抑制技术,基于所开发的铣削颤振主动抑制智能主轴原型样机,利用研制的用于振动主动抑制的非接触式电磁作动装置及控制系统,与洛阳轴承研究所有限公司共同合作开发了如图 11 所示的智能化铣削

主轴样机,该主轴具备铣削过程中主轴切削状态的在线监测以及铣削颤振(自激性振动)的主动抑制功能。切削实验表明,所开发的智能主轴能够有效抑制铣削加工过程中的颤振(自激)现象并提升工件加工质量,为下一代国产智能化主轴产品奠定了基础。

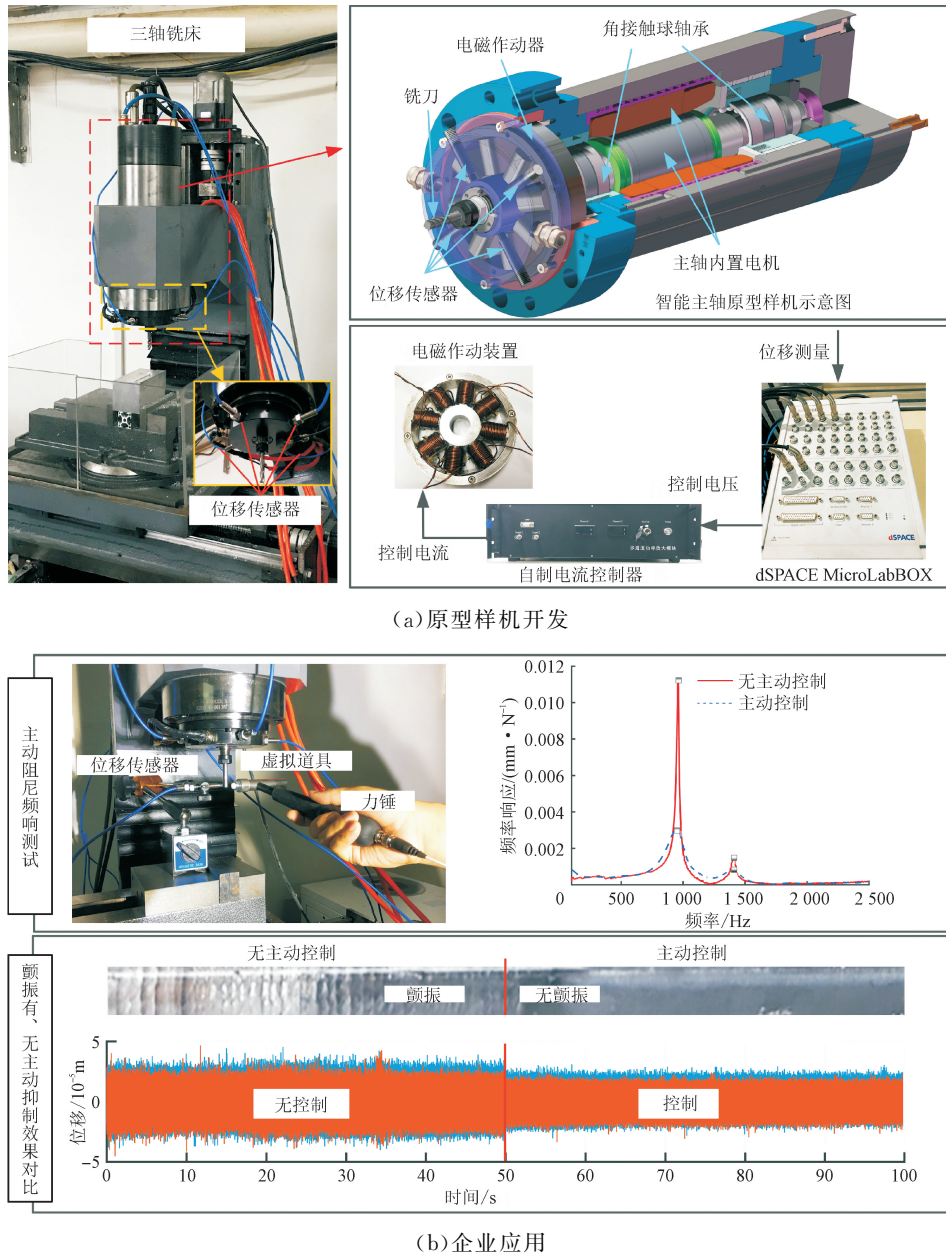


图 11 铣削颤振主动抑制智能化主轴开发

Fig. 11 Development of intelligent spindle for active chatter suppression in milling

4 前景展望

随着精密加工与智能制造技术的不断发展,为了提升机床设备的使用可靠性与加工使用性能,高档数控机床生产企业以及用户对于机床智能化技术展现出了浓厚的兴趣与迫切的实际需求。此外,目

前国外高端电主轴企业不断推出的智能化电主轴产品在提高自身产品附加值的同时,也证明了主轴智能化技术的重要发展趋势和机床市场对于电主轴智能化技术的强劲需求。通过发展国产智能化电主轴技术,不但能够产生可观的经济效益,而且能够促进高档数控机床国产化水平的长足进步。

参考文献:

- [1] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Securing the future of German manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 [EB/OL]. [2023-03-01]. https://www.ups.com/assets/resources/media/knowledge-center/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf.
- [2] LEITÃO P, KARNOUSKOS S, RIBEIRO L, et al. Smart agents in industrial cyber-physical systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(5): 1086-1101.
- [3] 周济. 智能制造:“中国制造 2025”的主攻方向 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- ZHOU Ji. Intelligent manufacturing: main direction of “made in China 2025” [J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [4] 关晓勇, 张明洋, 刘春时, 等. 智能化主轴单元 [J]. *制造技术与机床*, 2013(7): 67-70.
- GUAN Xiaoyong, ZHANG Mingyang, LIU Chunshi, et al. Intelligent machining spindle units [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2013(7): 67-70.
- [5] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units [J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(2): 781-802.
- [6] NAKAMURA S. Technology development and future challenge of machine tool spindle [J/OL]. *Journal of SME:Japan*, 2012 [2023-03-01]. <http://www.sme-japan.org/journal1-nakamura-eng.pdf>.
- [7] GF Machining Solutions Management. Step-Tec:始终领先一步 [EB/OL]. [2023-03-01]. <https://www.gfms.com/zh-cn/solutions/step-tec-spindles.html>.
- [8] WEISS Spindeltechnologie GmbH. The smart spindle [EB/OL]. [2023-03-01]. <https://www.weissgmbh.com/en/products/the-smart-spindle/>.
- [9] Siemens. The power of digitalization in manufacturing [EB/OL]. [2023-03-01]. <https://www.siemens.com/global/en/markets/machinebuilding/machine-tools/cnc4you/fokus-digitalisierung/sinumerik-edge.html>.
- [10] 大隈机床公司. AI(人工智能)在主轴诊断中的应用:通过自诊断技术 OSP-AI 研发的主轴轴承的诊断功能 [EB/OL]. [2023-03-01]. <http://www.okuma-cn.com.cn/tdtw/16.html>.
- [11] Yamazaki Mazak Corporation. Smooth AI spindle [EB/OL]. [2023-03-01]. <https://english.mazak.jp/machines/technology/smooth-ai-spindle/>.
- [12] 大隈机床公司. 加工条件搜索功能 [EB/OL]. [2023-03-01]. <http://www.okuma-cn.com.cn/Intelligent/> 124.html.
- [13] DENKENA B, GÜMMER O. Process stabilization with an adaptronic spindle system [J]. *Production Engineering*, 2012, 6(4): 485-492.
- [14] MONNIN J, KUSTER F, WEGENER K. Optimal control for chatter mitigation in milling: part 2 experimental validation [J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 24: 167-175.
- [15] 苗学问. 航空发动机主轴承使用寿命预测技术研究 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2008.
- [16] PATIL SS, GAIKWAD J A. Vibration analysis of electrical rotating machines using FFT: a method of predictive maintenance [C]//2013 Fourth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies (ICCCNT). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-6.
- [17] LIU Jie, WANG W, GOLNARAGHI F, et al. Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(1): 015105.
- [18] JIA Feng, LEI Yaguo, LIN Jing, et al. Deep neural networks: a promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 72/73: 303-315.
- [19] WANG Daichao, ZHANG Yue, ZHANG Hongbo, et al. Bearing fault diagnosis method based on multisensor hybrid feature fusion [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2025, 74: 3504111.
- [20] WANG Lei, LIANG Ming. Chatter detection based on probability distribution of wavelet modulus maxima [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25(6): 989-998.
- [21] AL-REGIB E, NI Jun. Chatter detection in machining using nonlinear energy operator [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2010, 132(3): 034502.
- [22] ZHANG Xuexin, Zheng Liangyu, Fan Wei, et al. Multi-domain data-driven chatter detection in robotic milling under varied robot poses based on directional attention mechanism [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2025, 227: 112406.
- [23] KNOSPE C R. Active magnetic bearings for machining applications [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2004, 37(14): 7-12.
- [24] CUI Gang, ZHOU Jin, ZENG Lei, et al. Enhanced chatter control in milling with electromagnetic actuator embedded in the tool holder [J]. *The International*

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 135: 2939-2959.
- [25] ALBERTELLI P, ELMAS S, JACKSON M R, et al. Active spindle system for a rotary planing machine [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(9/10/11/12): 1021-1034.
- [26] MONNIN J, KUSTER F, WEGENER K. Optimal control for chatter mitigation in milling: part 1 modeling and control design [J]. Control Engineering Practice, 2014, 24: 156-166.
- [27] MONNIN J, KUSTER F, WEGENER K. Optimal control for chatter mitigation in milling: part 2 experimental validation [J]. Control Engineering Practice, 2014, 24: 167-175.
- [28] ZHANG Xingwu, WANG Chenxi, LIU Jinxin, et al. Robust active control based milling chatter suppression with perturbation model via piezoelectric stack actuators [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 808-835.
- [29] LI Denghui, CAO Hongrui, ZHANG Xingwu, et al. Model predictive control based active chatter control in milling process [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 128: 266-281.
- [30] WAN Shaoke, LI Xiaohu, SU Wenjun, et al. Active damping of milling chatter vibration via a novel spindle system with an integrated electromagnetic actuator [J]. Precision Engineering, 2019, 57: 203-210.
- [31] WAN Shaoke, LI Xiaohu, SU Wenjun, et al. Active chatter suppression for milling process with sliding mode control and electromagnetic actuator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 136: 106528.
- [32] WAN Shaoke, JIN Xiaoliang, KUMAR Naresh, et al. Effect of vibration assistance on chatter stability in milling [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture: Design, research and application, 2019, 145: 103432.

(编辑 陶晴)

团队介绍:

西安交通大学李小虎教授课题组长期致力于高端数控机床主轴关键技术的研究与工程应用。课题组隶属于洪军教授领衔的数字化设计与制造研究团队,现有包括教授、副教授及青年骨干教师在内的核心成员 10 余人,硕士、博士研究生 270 余人。李小虎教授现任西安交通大学科研院副院长、重大专项处处长,承担国家重点研发计划、国家自然科学基金联合基金、陕西省重点研发计划等 10 余项国家级/省部级项目,出版学术专著 2 部,参与制定国家标准 2 项,获得中国机械工业科学技术发明一等奖 1 项、教育部高等学校科学研究优秀成果奖 1 项、陕西高等学校科学技术发明奖 3 项。团队围绕机床主轴系统设计、装配、测试与智能化关键核心技术,在多物理场耦合的主轴数字化设计仿真、高性能主轴创新测试技术、性能驱动的主轴数字化装配技术以及智能化主轴技术等方面取得了丰富的研究成果。相关技术已在秦川机床、宝鸡机床、通用技术集团、洛阳轴承研究所有限公司等国内重点装备制造企业得到成功应用,为提升国产高端数控机床的核心竞争力提供了关键技术支撑。



团队负责人:李小虎



团队合影