

智能主轴状态监测诊断与振动控制研究进展*

陈雪峰^{1,2} 张兴武^{1,2} 曹宏瑞^{1,2}

(1. 西安交通大学高端制造装备协同创新中心 西安 710054;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710054)

摘要: 智能主轴兼具加工状态感知、决策与执行三大特征, 可实现加工状态的自反馈与自控制, 是智能制造的核心部件, 是工业 4.0 和中国制造 2025 的基础支撑技术, 是下一代主轴的技术发展方向。状态监测诊断与振动控制作为智能主轴三大功能特征的典型体现, 是保障智能主轴高效运行的核心技术。因此, 针对智能主轴的监测诊断与振动控制问题, 以故障高发部件以及功能失效模式的监测、诊断与控制为线索, 系统综述当前的国内外研究现状, 归纳存在的问题并提出潜在的发展趋势。

关键词: 智能主轴; 状态监测; 故障诊断; 振动控制

中图分类号: TH12; TB535

Advances in Condition Monitoring, diagnosis and vibration control of Smart Spindles

CHEN Xuefeng^{1,2} ZHANG Xingwu^{1,2} CAO Hongrui^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center of High-end Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054;

2. State Key Laboratory Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054)

Abstract: The intelligent spindle possesses three major characteristics of processing state perception, decision-making and execution. It can realize self-feedback and self-control of machining status, which is the core component of intelligent manufacturing. It is the basic supporting technology for "Industrie 4.0" and "Made in China 2025" and the development direction for next-generation spindle technology. Condition monitoring, diagnosis and vibration control, as the typical embodiment of the three major functional features, are the core technologies for ensuring the efficient operation of intelligent spindles. Therefore, aiming at alleviating the problem of monitoring, diagnosis and vibration control of intelligent spindle, and with the monitoring, diagnosis and control of high-failure parts and failure modes as the clues, the current research status both at home and abroad is systematically summarized, the existing problems are concluded and the potential development trends are proposed.

Key words: smart spindle; condition monitoring; fault diagnosis; vibration control

0 前言*

“工业 4.0”的提出推动了以智能制造(Intelligent manufacturing, IM)为核心的第四次工业革命^[1-2], 突破工业大数据的信息爆炸, 实现制造业的柔性化、集成化与智能化。为了在新一轮工业革命中抢占制高点, 世界各国均将智能制造作为目前先进制造技术的重点研发领域, 并出台各类国家政策和计划予以扶持, 全力推动以智能制造为核心的

工业技术能力提升^[1]。2015年, 国务院围绕制造强国的战略目标, 提出《中国制造2025》, 明确9项战略任务和重点, 8方面战略支撑和保障, 分三步走全面推进我国的制造强国之路。19位两院院士及100余专家编著的《中国机械工程技术路线图》明确将“智能”列为机械工程技术五大发展趋势之一, 并将智能制造列为影响我国制造业发展的八大机械工程技术问题之一^[3]。政策引导, 技术先行, 智能制造已成为制造业技术与工业领域的核心关键词, 受到众多学者与技术人员的关注和重视。

机床作为制造业的母机, 是制造业腾飞的基础和支撑。智能机床作为最重要的智能制造装备, 将

* 国家自然科学基金资助项目(51775408, 51575423)。
20170311 收到初稿, 2017 收到修改稿

成为未来 20 年高端数控机床发展的趋势^[3]。作为世界机床行业领跑者之一的日本马扎克(Mazak), 推出集智能热屏障、智能安全屏障、智能语音提示以及智能振动控制等于一体的智能机床(图 1a), 可实现热误差自动补偿、防碰撞、抑制加工振动等智能操作, 有效提升加工效率和加工质量^[4]。作为国内机床行业龙头企业的沈阳机床以工业化、信息化、网络化、智能化以及集成管理为理念, 推出 i5 系列智能机床(图 1b), 变革了机床的生产模式, 提升了管理和制造能力^[5]。



(a) Mazak 智能机床功能^[4] (b) 沈阳机床 i5 系列智能机床^[5]

图 1 智能机床

主轴作为机床的核心功能部件, 其性能直接决定机床整机的技术水平。主轴单元既是机床整体的一个有机组成部分, 又具有相对的独立性。这种独立性表现为主轴单元可以作为独立的产品, 同一个主轴可以为不同使用要求的整机服务^[6]。随着航空航天等重大领域对高速高效和高可靠加工的迫切需求以及智能机床的发展, 主轴单元智能化势在必行。

美国国家标准技术研究所(National Standards Institute of Technology, NIST)认为智能机床应具有如下功能: ① 能感知自身状态和加工能力并可进行标定; ② 能监视和优化自身加工行为; ③ 能对加工工件的质量进行评估; ④ 具有自学习能力^[7-8]。目前, 国内外关于智能主轴尚没有形成一个公认的定义。智能主轴定义于智能机床的架构之下, 我们认为应该至少具备如下三大特征: ① 感知, 即主轴能够感知自身的运行状况, 自主检测并能与数控系统、操作人员等交流、共享这些信息; ② 决策, 即主轴能够自主处理感知到的信息, 进行计算、自学习与推理, 实现对自身状态的智能诊断; ③ 执行, 即主轴具备智能控制(包括振动主动控制、防碰撞控制、动平衡控制等)、加工参数自优化与健康自维护等功能, 保障主轴的高可靠运行。智能主轴与普通主轴的最大区别也在于智能主轴具有感知、决策与执行这三大基本功能。通过对振动、温度、转速、力矩等工况信号的实时监测与控制, 智

能主轴可以比普通主轴达到更高的加工效率、加工精度和可靠性。

国外许多著名大学、企业研究机构纷纷设立智能主轴研究项目, 抢占理论和技术制高点。2010 年, 国际生产工程科学院(The International Academy for Production Engineering, CIRP)三位会士: 德国达姆斯达特工业大学 ABELE 教授、亚琛工业大学 BRECHER 教授、加拿大不列颠哥伦比亚大学 ALTINTAS 教授, 共同在 CIRP 年刊上撰文综述了机床主轴单元的研究进展, 指出在主轴中集成传感器、驱动器使其成为一个内在质量保证系统(inherent quality insuring system)是主轴的未来发展趋势^[9]。2012 年, 日本精工株式会社(NSK)学者 Nakamura 总结了近 40 年来机床主轴的发展历程, 明确指出智能主轴将是下一代主轴的发展方向^[10]。德国亚琛工业大学(RWTH Aachen University)设立了“ISPI”智能主轴单元研究项目, 基于传感器与驱动器技术开发了智能主轴原理样机(图 2)^[11]; 德国西门子电主轴公司(Siemens Weiss)开发了主轴监控和诊断系统(SPIDS), 传感器被直接集成到主轴中, 用于碰撞检测、轴承状态诊断等; 瑞士希菲尔公司(Fischer)提供面向主轴单元智能化的整套软、硬件解决方案, 可以对主轴的运行状态进行监控, 预测轴承的剩余使用寿命等。2013 年, 沈阳机床(集团)设计研究院关晓勇等以“智能化主轴单元”为题对国外智能主轴的技术进行了概括性的功能介绍^[6]。近年来, 国内在主轴设计、分析、制造和测试等方面开展了大量研究工作, 国产高性能主轴开发取得了很大的进步, 但与国外产品相比较, 在转速、精度、可靠性、使用寿命等方面还有较大差距, 在智能主轴的研究方面, 国内尚处于探索研究阶段。

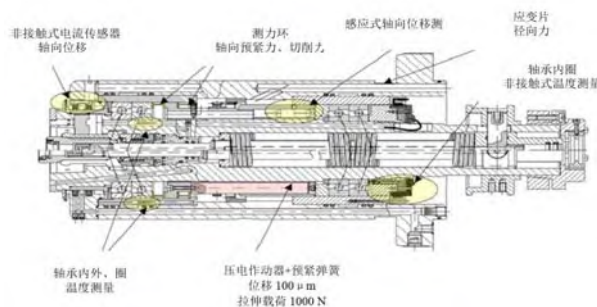


图1 德国 ISPI 智能主轴内部结构^[11]

状态监测诊断与振动控制作为智能主轴核心特征的集中体现, 是保障主轴高效可靠工作的核心要素, 是构建智能主轴的重要技术, 因此, 本文针对

智能主轴的故障高发部件失效模式(如轴承、刀具)与典型功能失效模式(如颤振、不平衡), 综述状态监测与故障诊断的研究现状, 并进一步归纳功能失效治理, 即不平衡振动与颤振控制方面的研究进展, 归纳存在的问题并提出潜在的发展趋势。

1 智能主轴振动监控关键技术与研究现状

智能主轴的状态监测诊断对应于感知与决策功能特征, 振动控制隶属于执行功能。下面以主轴的两种失效模式(部件失效与功能失效), 三种状态(监测、诊断与评估)展开状态监测与故障诊断的研究现状分析, 针对两种典型功能失效模式的控制问题(颤振控制与不平衡控制), 综述国内外的动态。

1.1 主轴状态监测与故障诊断

主轴系统加工状态监测一直是研究的热点, 通过布置传感器获取振动、温度、声发射、超声波、切削力、转矩、电流等运行状态信息, 进行状态监测、故障诊断以及性能评估, 实现主轴部件失效诊断、功能失效判断以及加工能力评估。

1.1.1 主轴部件失效监测与诊断

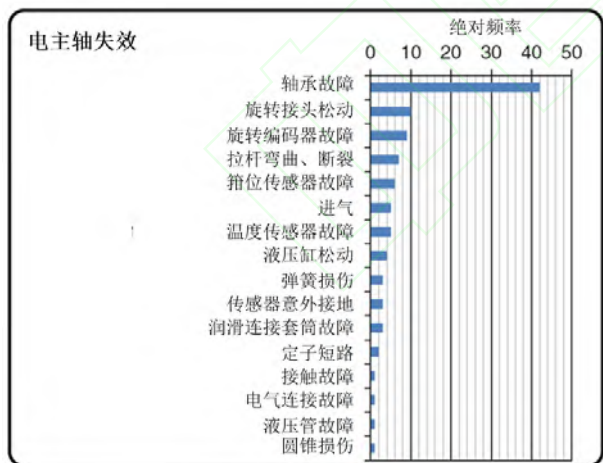


图3 电主轴失效部件统计

主轴故障的主要部件及原因包括轴承损伤、换刀机构失效和旋转接头泄漏等。早期主要集中于刀具破损、磨损的监测诊断, 发展至今已日趋成熟, 已有大量文献见诸报道^[12]。德国 GMN 主轴公司对 231 个主轴系统故障案例进行了调研, 发现 40% 以上的主轴故障是由于滚动轴承失效引起的, 居主轴

部件故障率之首(图 3)^[13], 因此, 主轴轴承的监测诊断受到了更为广泛的关注和研究。主轴轴承损伤将引起主轴系统的强迫振动, 影响主轴运行精度和寿命。主轴轴承监测诊断的研究主要是基于振动、声等运行信号, 采用现代信号处理方法, 提取特征, 决策诊断, 小波分析、经验模式分解等方法被深度挖掘, 如: 2012 年韩国光州科学技术院(Gwangju Institute of Science & Technology)LAW 等^[14]提出一种基于小波包分解和希尔伯特-黄变换的主轴轴承状态监测方法; 2013 年西门子公司(Siemens Corporation)LIAO 等试验研究了多种主轴轴承故障下的主轴可靠性评估与寿命预测, 丰富了主轴轴承故障的工业案例^[15]; 2014 年法国南特大学(University of Nantes) CASTELBAJAC 等构造了主轴轴承噪声指标(Spindle bearing noise, SBN), 用于主轴轴承磨损等分布式损伤的评价与检测^[16]; 国内, 2009 年西安交通大学曹宏瑞等^[17]采集主轴箱体振动信号, 利用 S 变换结合奇异值分解提取出轴承外圈损伤特征。2011 年东南大学严如强等^[18]提出了一种结合小波包变换和主特征分析方法的主轴轴承故障监测和诊断方法; 2013 年兰州理工大学谢小正等^[19]基于粗糙集理论构造区分矩阵算法, 实现数控机床主轴轴承故障的分类与诊断; 2015 年台湾大学 HSIEH 等^[20]基于经验模式分解主轴振动信号, 多尺度熵评价主轴轴承损伤特征, 实现主轴轴承的故障诊断。

针对滚动轴承局部剥落、压痕等局部损伤类故障的诊断问题, 国内外学者展开了大量研究, 取得了丰硕的成果。然而, 磨损作为主轴轴承最常见的失效形式之一, 分析研究不足。主轴轴承磨损包括磨料磨损、疲劳磨损、粘着磨损和腐蚀磨损等, 引起磨损的原因也是多种多样, 例如润滑不良、摩擦、杂质侵入、急加减速、载荷过大、预紧力大、打滑等。主轴轴承内部的磨损, 会引起系统刚度和阻尼的变化, 导致振动响应具有强烈的非线性, 增加了主轴系统运行状态识别及故障诊断的难度。因此需要进行主轴轴承磨损类非线性故障特性及智能识别的理论、数值与试验研究, 以解决智能高速主轴最常见故障的自诊断问题。

1.1.2 主轴功能失效监测与诊断

主轴功能失效是指非部件失效导致的主轴功能下降或者功能丧失, 如颤振、不平衡等。虽然非主轴部件失效, 但同样会降低主轴加工能力, 导致加工质量无法接受, 严重时损伤系统硬件等。主轴颤振是由切削加工过程中的系统自激励产生的一种典型的主轴功能失效, 会导致加工能力下降, 切

削不稳定, 刀具磨损甚至破损, 工件表面质量降低等。自 20 世纪 50 年代开始, 众多的学者已经开始关注颤振问题, 经过几十年的发展, 在颤振监测以及检测方面已取得大量成果, 并吸引了越来越多学者和工程师的关注与研究^[21-22]。颤振检测的基本流程如图 4 所示, 首先基于时域分析^[23-24]、频域分析^[25]以及时频分析^[26-27]等现代信号处理方法分析监测信号, 提取与运行工况契合的敏感特征指标, 然后基于人工神经网络^[28]、支持向量机^[29]、模糊逻辑^[30]等智能方法, 实现对颤振的预警以及预测。国内外学者分别针对信号分析、智能算法以及试验研究开展了诸多工作, 如: 2011 年日本学者庆应义塾大学(Keio University)KAKINUMA 等利用主轴控制系统中的伺服信息, 采用扰动观测器检测铣削颤振^[31]; 2012 年巴西联邦科技大学(Federal University of Technology)POLLI 等采用测量的声压信号、切削力及刀具位移等信息对高速铣削的动态稳定性进行了分析^[32]; 2013 年美国佐治亚理工大学(Georgia Institute of Technology)MA 等利用切削力信号, 采用复指数模型对切削厚度进行动态建模以使切削再生效应从切削力信号中分离, 实现了颤振的早期检测^[33]; 2014 年加拿大魁北克大学(École de Technologie Supérieure)LAMRAOUI 等在角域中将切削力和瞬态角速度信号进行分析, 实现了铣削颤振诊断^[34]; 2015 年意大利佛罗伦萨大学(University of Florence)GROSSI 等^[35]基于借此分析监测颤振的发生, 构造主轴转速提升实验(Spindle Speed Ramp-up)实现铣削稳定性的判断, 简化了传统稳定性 Lobe 图方法的流程; 国内, 2011 年华中科技大学 L IU 等^[36]提出了一种利用伺服电动机电信号进行颤振在线检测的方法; 2013 年西安交通大学曹宏瑞等^[26]利用振动加速度信号, 基于小波包和希尔伯特-黄变换法进行铣削颤振辨识; 2015 年上海交通大学 QIAN 等^[37]用小波包分析提取特征, 最小二乘支持向量机决策的方法完成颤振检测; 2016 年华中科技大学 FU 等人基于能量回归 Hilbert-Huang 变换分析振动信号, 提取特征, 采用高斯混合模型构造计算预警阈值, 实现颤振的在线监测诊断与预警^[38]。颤振是机床主轴在切削过程中的自激振动, 是主轴系统的一种典型非线性故障。对于高速铣削, 颤振从发生到形成往往在 100 ms 以内, 早期颤振的识别与预示至关重要, 以便为颤振抑制提供尽可能多的时间。现有颤振检测方法对已经存在的较为明显的颤振具有较好的检测效果, 但对潜在的、早期的颤振缺乏还有效的识别和预示手段。主轴早期颤振信号特征微弱, 在强切削激励干扰下在线识别难度

大, 有待继续深入研究。

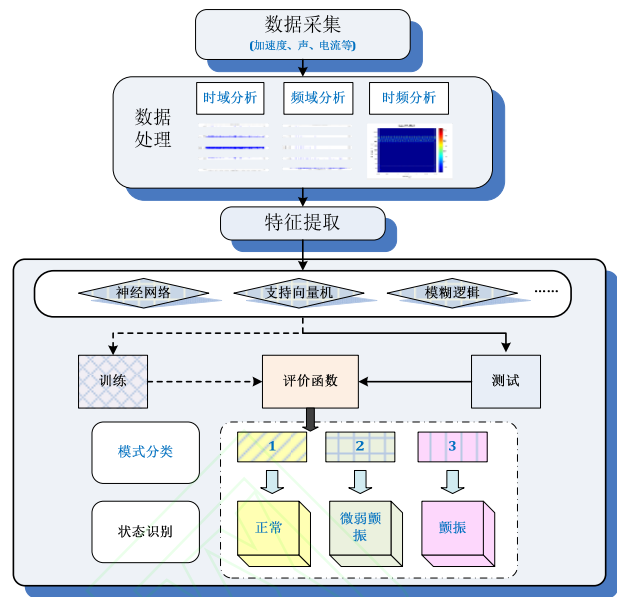


图 4 颤振检测流程

不平衡是导致主轴功能失效的另一典型形式, 特别是运行过程中工况的变化以及初始装配形态改变导致的动态不平衡。由于主轴转速不断提升, 加工精度不断提高, 动平衡对主轴的影响也日趋严重。动平衡监测与诊断的目的在于通过实时监测主轴的运行信息, 分析主轴的平衡状态, 提供预警信息以及为不平衡的在线控制奠定基础。常用的主轴不平衡监测诊断方法有: 模态平衡法^[39]、影响系数法^[40]、混合平衡法^[41]以及全息平衡法^[42]。前三种方法是动平衡分析中较为传统且经典的动平衡方法, 理论体系相对完善, 在转子动平衡领域已经相对成熟、在主轴动平衡中也得到了一定的应用。例如: 韩国亚洲大学(Ajou University)LEE 等^[43]将模态平衡法用于机床主轴的动平衡中, 成功实现 2000~9000 r/min 时不平衡量消减 70%; 北京科技大学 CHEN 等^[44]采用小波变换和功率谱密度分析实现主轴不平衡特征的提取与诊断; 绍兴大学 QIAO 等^[45]基于模态平衡法, 通过对高速电主轴的模态分解建立模态平衡方程, 分别实现 10 g·mm、50 g·mm、100 g·mm、200 g·mm 不平衡量的动态平衡。全息平衡法是由西安交通大学屈梁生院士提出^[46], 融合同一横截面上两个相互垂直方向上的振动信息, 构建三维全息谱, 并将其分解为力和力偶信息, 实现不平衡量的定量诊断, 该方法已广泛应用于转子类结构的现场动平衡^[47-48], 并探索了高速主轴动平衡分析^[49], 均取得较好效果。目前的动平衡的诊断研究大多集中于静态环境下的测试诊断或者动态数据

的静态分析, 由于主轴转速的不断提高, 不平衡对主轴加工能力的影响愈加突出, 因此, 如何从受各种噪声污染的工业测试数据中快速、准确地定量不平衡, 并结合在线控制手段实现不平衡的消除是下一步亟待解决的瓶颈。

1.1.3 主轴状态评估

事后维修-定期维修-视情维修是机械故障诊断的三个发展阶段^[50], 主轴也不例外, 在定性认识、定量诊断的基础上, 更进一步实现主轴的性能评估、维护周期以及寿命预测等问题是提升主轴能力和经济性的必然之路。一个典型的主轴健康监测与性能评估系统如图 5 所示^[51], 包含数据采集、信号处理、状态监测与退化评估等几大部分, 其中退化评估为其最高层次。国内外的众多科研工作者致力于主轴状态评估与性能提升, 如: 2011 年德国弗朗霍夫机床与成型工艺研究中心(Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology)提出了基于状态的主轴预知维护策略, 具有一定自适应性^[52]; 美国克莱姆森大学(Clemson University)WERNER 等^[53]开发了基于运行状态的主轴早期故障预警系统, 可实现主轴轴承性能退化的实时评估; 2012 年重庆大学 LIAO 等^[54]利用主轴负载信号提出了一种基于数据驱动的机床性能退化评估预测模型, 并建立了预知维修策略。2013 年吉林大学谷东伟等^[55]以 40 台主轴现场试验数据为基础, 提出了主轴系统可靠性评价指标; 2014 年西安理工大学蒋喜等^[56]基于伪寿命分布法和 Bayes 法构造混合可靠性评估方法, 试验对比研究了混合陶瓷球轴承电主轴和钢球轴承电主轴的可靠性指标; 2015 年东南大学严如强等^[57]采用随机子空间法对主轴进行在线在位模态参数提取, 根据模态参数的变化构造指标, 评价了主轴的可靠性与状态。

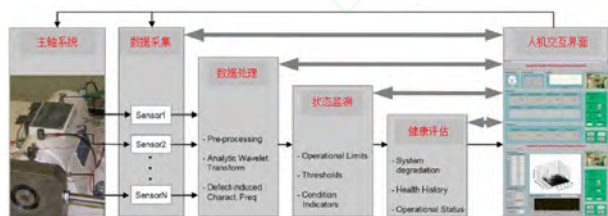


图 5 主轴健康监测与性能评估系统组成^[51]

主轴状态评估与性能退化的研究取得了不少的成绩, 开发了一定的系统与软件, 初步有效的实现了主轴的性能退化评估, 保障了主轴的健康运行。然而, 目前的研究大多为基于数据驱动下的特征提取与状态判定, 一是缺乏有效的数据支撑, 二

是缺乏可靠的失效阈值设定准则。因此, 建立大数据制造环境, 基于广泛的数据资源, 研究具有普适性的失效阈值准则, 提升评估的可靠性和准确性是实现其工业普及的基础。

1.2 主轴振动在线主动控制

状态监测与故障诊断完成了智能主轴的感知与决策, 如何在决策的基础上, 通过控制手段, 完成智能主轴的执行特征, 消除影响加工能力的潜在威胁是保障主轴健康工作的关键。不平衡和颤振作为主轴两种典型失效模式, 对主轴的加工能力影响最为广泛, 因此, 聚焦这两种模式的研究进展, 综述研究成果, 归纳当前问题。

1.2.1 主轴颤振在线主动控制

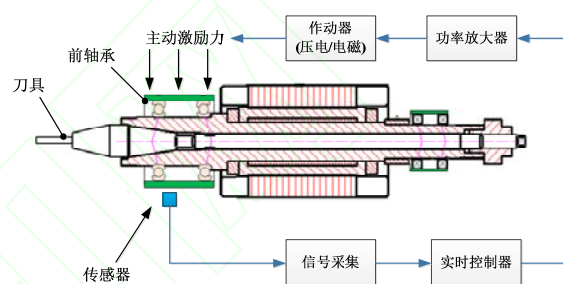


图 6 智能主轴颤振主动控制架构

主轴颤振的控制与消除有三种方式: 工艺参数调整、转速调控以及主动控制。由于主动控制具有高度的自适应性, 易于实现集成与在线控制, 因此更受青睐。典型的主轴颤振控制系统如图 6 所示, 包括数据采集器、作动器、功率放大器以及实时控制器等。通过在主轴内部集成次级激励源(压电作动器/电磁轴承), 构造控制器, 优化控制输出力, 实现主轴颤振的抑制与消除。

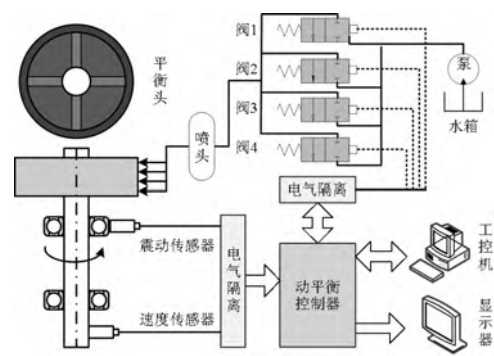
根据次级激励源类型, 现有的颤振主动控制原型与样机主要有两大类: 基于压电作动器的颤振主动控制与基于电磁轴承的颤振主动控制。基于压电作动器的颤振主动控制是由美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratory)DOHNER 等于 1998 年提出理论模型及仿真^[58], 并于 2004 年构造主轴原型, 成功试验实现主动控制在铣削颤振控制, 以及加工质量提升^[59]。2006 年, RIES 等^[60]通过在主轴前轴承处安装两个相互垂直的径向激励的压电作动器, 构造颤振主动控制主轴原型, 成功实现铣削材料去除率的有效提升。基于电磁轴承的颤振主动控制是利用磁浮轴承替换主轴轴承(一般是主轴前轴承), 通过控制磁浮轴承施加次级作用力, 达到颤振的抑制与抵消。德国达姆施塔特工业大学产品管理与机床技术研究所(Institute of Production

Management, Technology and Machine Tools, Technical University Darmstadt)所长 ABELE^[61-62]在这方面做了前期的探索与深入的研究, 在名为“AdHyMo”研究计划的支持下, 构造了磁浮轴承颤振控制系统原型, 成功实现材料去除率提升 50%, 系统稳定性明显提高。国内华中科技大学丁汉院士团队也在这方面做了初步探索, 构造了预测控制模型, 并理论仿真分析了磁浮轴承颤振控制系统在稳定性提高和加工效率提升方面的优良性能^[63-64]。

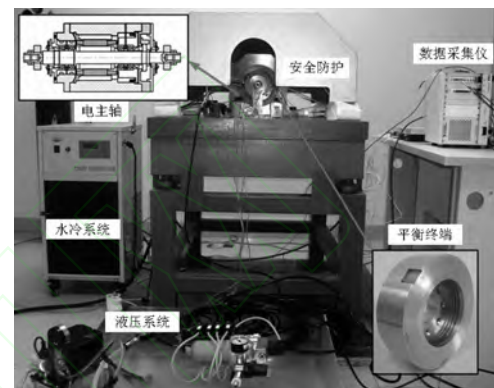
2014 年, 加拿大英属哥伦比亚大学(The University of British Columbia)CHEN 等^[65-66]提出基于电磁作动器的镗削主动控制原型, 通过在镗杆銜铁处附加电磁激励装置, 成功实现双向位移以及转角的振动抑制。颤振主动控制系统的优良性能同样吸引了众多制造厂商的关注与研发, 典型如瑞士米克朗阿奇夏米尔(Mikron Agie Charmilles AG), 德国海德汉(Heidenhain)以及日本马扎克(Mazak)等。2014 年, 瑞士米克朗阿奇夏米尔公司 MONNIN 等^[67-68]从理论建模、控制器构造以及试验主轴原型等方面系统的研究了基于压电作动器的颤振主动控制, 结果表明, 轴向切深可提高 55%, 加工效率提升 91%。德国海德汉已将主动颤振控制模块集成于其数控系统中并产品化, 经过在各种机床中验证, 可最少提高材料去除率 25%, 但是其控制振动频率目前只适用于 100Hz 以下^[69]。日本马扎克在其 VARIAXIS 系列高端五轴加工中心中集成主动控制功能, 有效提高了加工效率, 延长了刀具寿命, 但是该主动控制模块只对限定的转速和切削参数有效^[70]。

建模、控制理论以及试验研究是颤振主动控制的三大问题, 建模是控制的前提, 目前的研究主要集中于机械特性模型, 忽略了电磁特性、热效应等的影响, 限制了控制的精度和准确度。目前的颤振控制大多为事后控制, 即作用于颤振发生之后, 降低了控制时效性和有效性。目前的颤振主动控制主轴原型大多为分布式离散系统, 其传感器、激振器以及控制器都未完成集成, 无法实现工业现场的应用。因此, 细化模型、提升控制时效性, 提高集成度, 扩展颤振控制的工业化有待进一步研究发展。

1.2.2 主轴不平衡在线主动控制



(a) 系统架构



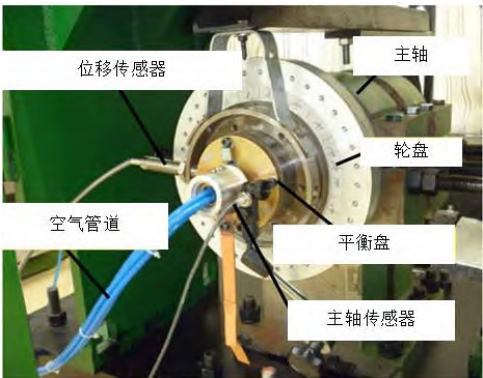
(b) 试验原型

图 7 四通道喷液式电主轴主动平衡系统

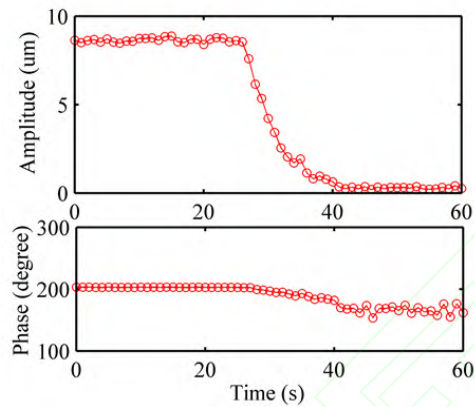
随着主轴转速的不断提升(目前可达 100 kr/min 以上), 不平衡量产生的离心应力对转速系统的威胁也越来越大, 虽然主轴出厂时已经做了高精度的动平衡, 但是由于主轴工况的改变, 运行状态、动态负载以及环境的影响, 势必造成主轴产生加工状态下的不平衡, 因此主轴不平衡在线主动控制的需求愈发迫切。目前主流的主轴不平衡在线主动控制是利用平衡环作为外界激励源集成于主轴, 并结合数据采集系统(传感器和数据采集器)以及实时动平衡控制器完成主轴的动态在线平衡。根据平衡环种类的不同, 可大致分为两类: 喷液式平衡系统以及电磁式平衡系统。喷液式平衡系统是 BIRKENSTACK 于 1976 年以专利的形式首次提出^[71], 其原理是通过实时控制位于平衡环内液体(如水、油液等)对主轴的冲击力, 实现不平衡量的消除, 由于液体是回路循环, 因此, 每次开机都需要进行重新平衡。西安交通大学章云等采用四通道电磁阀以及液压泵结合的喷液式平衡头, 以 150SD40Q7 高速电主轴为对象, 成功实现 20700 r/min 时的在线动平衡(图 7), 不平衡量由 1.6 mm/s 降至 0.34 mm/s^[72]。

北京化工大学 PAN 等^[73]采用四通道同步控制构造控制策略, 以压缩空气承载平衡力, 通过在磨

削主轴上的试验验证，可成功实现主轴 5000 r/min 时不平衡振动量由 8.6 μm 减小到 0.3 μm ，减小幅度达 96.5%，而控制时间仅需 15 s。



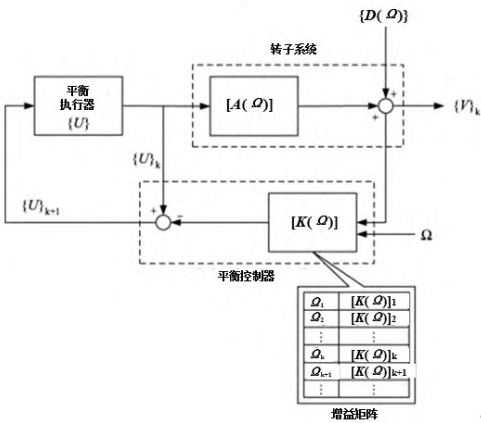
(a) 试验系统



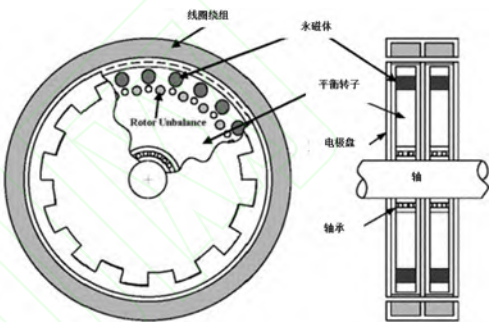
(b) 控制效果

图 8 压缩空气作用的磨削主轴主动平衡系统

电磁式动平衡系统与喷液式的原理相似，不同点在于控制力是以电磁控制的方式施加，无需外部液体循环系统，结构相对紧凑。韩国亚洲大学 MOON 等^[74]以影响系数法为基础在线分析决策，线圈电磁力为次级激励力，系统研究了电磁式动平衡的系统模型分析、控制器构造以及试验原型机搭建，通过 10000~16000 r/min 的试验验证，表面该方法可在临界转速下降低不平衡振动 54%，其他转速下降幅高达 80%以上，如图 9 所示^[74]。



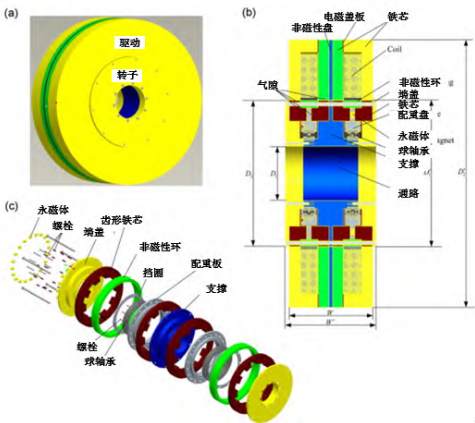
(a) 控制架构



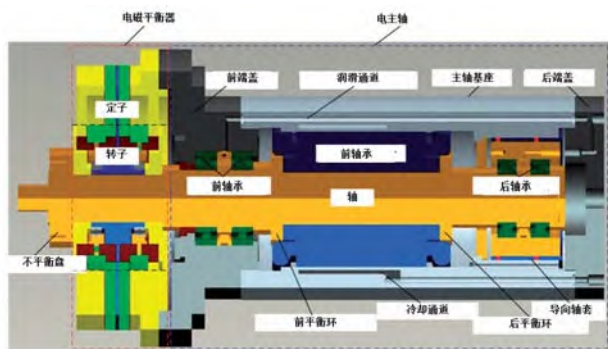
(b) 平衡头结构

图 9 电磁式平衡头

西安交通大学 FAN 等^[75-76]以电磁式平衡头为对象，采用理论模型和有限元，系统分析了电磁式平衡头的磁力参数、作用域等参数，制作平衡头，将其平衡环集成于主轴前轴承前端构建原型机，图 10 所示为该平衡头的作用参数以及原型机系统模型，以该原型机为对象，试验验证了该平衡头各参数的影响机制以及动平衡控制效果。



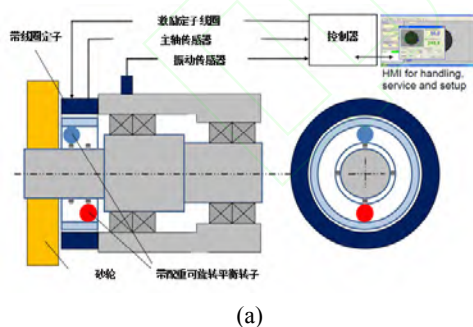
(a) 平衡头



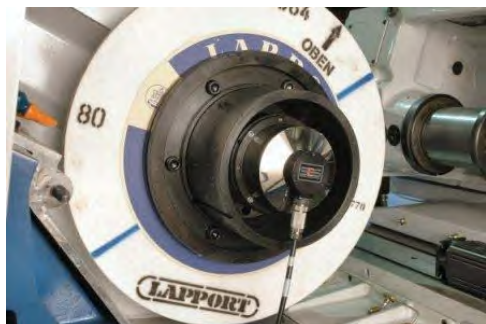
(b) 原型机

图 10 电磁式主轴主动平衡系统

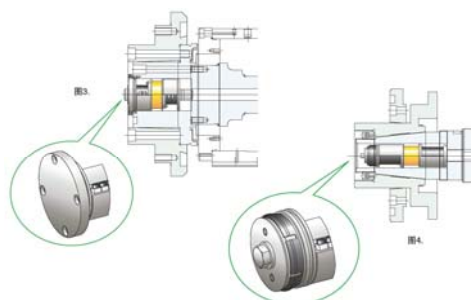
在线主动平衡的优良特性与控制效果也吸引了众多厂家的关注和开发, 如: 德国 Hofmann^[77] 公司的 AB9000 系列平衡头, 通过与主轴配合安装, 实时采集与计算主轴的转速, 不平衡位置以及不平衡量, 并通过预设的振动阈值自动启动平衡控制系统; 美国 SBS^[78] 开发出一系列平衡头产品, 通过主轴连接器与主轴集成, 振动传感器采集振动信息, 控制器驱动平衡头实现主轴的自动平衡; 意大利 Marposs^[79] 推出主轴用平衡头以及高速主轴用平衡头多款产品, 并提出平衡控制器可实现在机床数控系统的集成等。商业产品的大力推广与产品开发极大地推动了在线主动平衡技术进步与产业应用, 然而, 现有商业产品的应用转速以及工业加工种类都比较有限, 如转速多为 10000 转以下, 而且多限定在磨削加工。因此, 高转速及超高速的技术提升、产品转化以及多种类加工模式的平衡技术等有待进一步深入。



(a)



(b)



(c)

图 11 主轴主动平衡商业产品 (a) Hofmann (b) SBS (c) Marposs^[77-79]

2 智能主轴振动监控研究的热点、难点与发展趋势

智能主轴集感知、决策、执行于一体, 可有效提高加工效率、加工质量以及加工稳定性, 延长设备使用寿命, 因此得到了学术界和工业界的共同关注。振动作为主轴工作性能的重要影响因素和评判指标, 其监控技术更是多年来的热点问题, 但同时也面临诸多难点, 存在以下发展趋势。

(1) 故障形式的多样化。轴承作为主轴故障的高发部件, 从机理、信号处理方法、特征指标、智能诊断等方面开展了卓有成效的研究。然而, 目前的研究主要集中于轴承损伤诊断, 如局部剥落、压痕等, 磨损作为主轴轴承最常见的一种失效模式, 可由润滑、摩擦、杂质、载荷等多种因素引起, 却未得到足够的关注。另外, 针对主轴其他部件如电动机、拉刀机构的故障诊断需要进一步发展。

(2) 诊断形式的量化。故障预警阈值作为主轴监测诊断的重要参数之一, 是工业诊断量化的重要指标之一, 尚无可靠有效的评价措施与设定策略。因此, 开展主轴轴承故障的非线性故障特性与智能识别理论, 构建主轴运行状态的大数据系统, 正反问题相结合, 建立早期故障模式的表征指标, 研究故障预警阈值的量化策略, 实现主轴状态的量化诊断、性能评估与维修指导。

(3) 先进的实时信号处理与决策手段。主轴运行振动故障具有突发性, 对加工造成的影响不可逆。智能主轴的目的在于实时实现主轴状态信息的感知、决策以及控制。因此, 研究先进的实时信号处理手段, 提高主轴状态(如颤振、不平衡等)决策的时效性, 是保证控制功能有效执行的前提条件。

(4) 自顶向下的智能主轴设计制造。振动监控作为智能主轴的一项支撑技术, 需要多个模块的支撑配合, 如传感、激励等, 后期的改造不仅降低经济性, 而且空间受限, 对主轴的结构和机能造成潜在威胁。因此, 开展自顶向下的主轴设计制造, 在设计之初融入监控部件, 优化结构, 是智能主轴发展的必由之路。

(5) 制造大数据融合。大数据被称为新的第四科学研究范式, 已成为国家基础性战略资源并受到科学瞩目。智能主轴需要切削等数据库和知识库作为支撑。数据是智能的基础, 案例是诊断的知识储备, 随着工业 4.0 的提出与智能工厂的构建, 将振动监控集成于机床数控系统, 融入智能化大数据管理模式, 是有效提升监测的时效性, 决策的准确性以及控制的可靠性的重要手段和发展趋势。

3 结论

智能主轴的提出与发展已有数十年, 状态监测诊断与振动控制作为最重要的功能得到了不断的进步与完善。针对于智能主轴三大特征紧密联系的监测诊断与控制问题, 对智能主轴振动监控技术的发展进行了综述和概括。目前智能主轴振动监控的研究还大多处于独立功能研究的模式, 开展自顶向下设计, 集成功能模块, 加强基础技术是智能主轴迈向成熟的必由之路。随着工业 4.0 的提出, 智能制造号角的吹响, 大数据制造模式的支撑, 必将智能主轴的带上一个全新的发展阶段。

参 考 文 献

- [1] Leitaio P, Karnouskos S, Ribeiro L, et al. Smart agents in industrial cyber-physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1086-1101.
- [2] KAGERMANN H, WAHLSTER W, HELBIG J. Securing the future of German manufacturing industry : Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0[R]. German National Academy of Science and Engineering, Technical Report, 2013.
- [3] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011.
Chinese mechanical engineering society. Chinese mechanical engineering technology roadmap [M]. Beijing: Chinese science and Technology Press, 2011.
- [4] Mazak company. Intelligent Technology [EB/OL]. [2016-04-13]. <https://www.mazakeu.com/machines-technology/Technology/intelligent-technology/>.
- [5] 凤凰网. 沈阳机床首创平台型智能机床 i5M8 全球首发 [EB/OL]. [2016-04-13]. http://news.ifeng.com/a/20160411/48419819_0.shtml.
- [6] 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
- [7] 鄢萍, 阎春平, 刘飞, 等. 智能机床发展现状与技术体系框架[J]. 机械工程学报, 2013, 49(21): 1-10.
YAN Ping, YAN Chunping, LIU Fei et al. Development Status and Technical System Framework for Smart Machine Tool[J]. JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2013, 49(21): 1-10.
- [8] NIST. Smart machine tools[EB/OL]. [2003-02-18]. <http://mel.nist.gov/proj/smt.htm>.
- [9] ABELE E, ALTINTAS Y, BRECHER C. Machine tool spindle units[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 781-802.
- [10] NAKAMURA S. Technology development and future challenge of machine tool spindle[J]. Journal of SME-Japan, 2012, 1 (1): 1-7.
- [11] European Mechatronics and Intelligent Manufacturing. European Mechatronics for a new Generation of Production Systems[EB/OL]. [2016-04-03]. <http://www.eu-mecha.org/fp6.about.htm>.
- [12] REHORN A G, JIANG J, ORBAN P E. State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 26: 693-710.
- [13] ABELE E, BRECHER C, GSELL S C, et al. Steps towards a protection system for machine tool main spindles against crash-caused damages[J]. Production Engineering - Research and Development, 2012, 6(6): 631-642.
- [14] LAW L, KIM J H, LIEW W Y H, et al. An approach based on wavelet packet decomposition and Hilbert-Huang transform (WPD-HHT) for spindle bearings condition monitoring[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 197-211.
- [15] Liao L, Pavel R. Machinery time to failure prediction-Case study and lesson learned for a spindle bearing application[C]// 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management, June 24-27, 2013, Gaithersburg, MD, USA: IEEE, 2013: 1-11.

- [16] DE CASTELBAJAC C, RITOU M, LAPORTE S, et al. Monitoring of distributed defects on HSM spindle bearings[J]. *Applied Acoustics*, 2014, 77: 159-168.
- [17] 陈雪峰, 曹宏瑞, 何正嘉. 数字化制造装备的主轴服役性能监测与诊断[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(5): 140-146.
- CHEN Xuefeng, CAO Hongrui, HE Zhengjia. Monitoring and diagnosis of spindle service performance of digitized manufacturing equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 140-146.
- [18] YAN R, GAO R X. Wavelet domain principle feature analysis for spindle health diagnosis[J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(6): 631-642.
- [19] 谢小正, 赵荣珍, 靳伍银. 数控机床主轴轴承故障知识获取方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(5): 804-808.
- XIE Xiaozheng, ZHAO Zhenrong, JIN Wuyin. Knowledge acquisition of spindle bearings fault based on discernibility matrix algorithm[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(5): 804-808.
- [20] HSIEH N K, LIN W Y, YOUNG H T. High-speed spindle fault diagnosis with the empirical mode decomposition and multiscale entropy method[J]. *Entropy*, 2015, 17(4): 2170-2183.
- [21] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2004, 53: 619-642.
- [22] QUINTANA G, CIURANA J. Chatter in machining processes: A review[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51: 363-376.
- [23] SOLIMAN E, ISMAIL F. Chatter detection by monitoring spindle drive current[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1997, 13: 27-34.
- [24] VAN DIJK N J M, DOPPENBERG E J J, FAASSEN R P H, et al. Automatic in-process chatter avoidance in the high-speed milling process[J]. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 2010, 132: 031006.
- [25] QUINTANA G, CIURANA J, FERRER I, et al. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49: 203-211.
- [26] CAO Hongrui, LEI Yaguo, HE Zhengjia. Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert-Huang transform[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, 69: 11-19.
- [27] KULJANIC E, SORTINO M, TOTIS G. Multisensor approaches for chatter detection in milling[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 312: 672-693.
- [28] LAMRAOUI M, BARAKAT M, THOMAS M. Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2013, 21: 1251-1266.
- [29] WU S, JIA D K, LIU X L. Application of continuous wavelet features and multi-class sphere SVM to chatter prediction[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 188: 675-680.
- [30] LIANG M, YEAP T, HERMANSYAH A. A fuzzy system for chatter suppression in end milling[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2004, 218: 403-417.
- [31] KAKINUMA Y, SUDO Y, AOYAMA T. Detection of chatter vibration in end milling applying disturbance observer[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, 60 (1): 109-112.
- [32] POLLI L M, WEINGAERTNER W L, SCHROETER R B, et al. Analysis of high-speed milling dynamic stability through sound pressure, machining force and tool displacement measurements[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2012, 226 (11): 1774-1783.
- [33] MA L, MELKOTE S N, CASTLE J B. A model-based computationally efficient method for on-line detection of chatter in milling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*, 2013, 135(3): 031007.
- [34] LAMRAOUI M, THOMAS M, EI BADAOU I M, et al. Indicators for monitoring chatter in milling based on instantaneous angular speeds[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 44(1-2): 72-85.
- [35] GROSSI N, SCIPPA A, SALLESE L, et al. Spindle speed ramp-up test: a novel experimental approach for chatter stability detection[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 89: 221-230.
- [36] LIU H, CHEN Q, LI B, et al. On-line chatter detection using servo motor current signal in turning[J]. *Science China-Technological Sciences*, 2011, 54(12): 3119-3129.
- [37] Qian S, Sun Y, Xiong Z. Intelligent chatter detection based on wavelet packet node energy and LSSVM-RFE[C]// 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 7-11, 2015, Busan, Korea: IEEE, 2015: 1514-1519.

- [38] FU Y, ZHANG Y, ZHOU H, et al. Timely online chatter detection in end milling process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 75(15): 668-688.
- [39] DEEPTHIKUMAR M B, SEKHAR A S, SRIKANTHAN MR. Modal balancing of flexible rotors with bow and distributed unbalance[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(24): 6216-6233.
- [40] DARLOW M S. Balancing of high-speed machinery[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] PARKINSON A G, DARLOW M S, SMALLEY A J. A theoretical introduction to the development of a unified approach to flexible rotor balancing[J]. Journal of Sound & Vibration, 1980, 68: 489-506.
- [42] 屈梁生, 邱海, 徐光华. 全息动平衡技术: 原理与实践[J]. 中国机械工程, 1998, 9(1): 60-63.
- QU Liangsheng, QIU Hai, XU Guanghua. Rotor balancing based on holospectrum analysis: principle and practice[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(1): 60-63.
- [43] LEE S H, KIM B S, MOON J D, et al. A study on active balancing for rotating machinery using influence coefficient method[C]// Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2005. CIRA 2005. Proceedings. 2005 IEEE International Symposium on, 2005, 659-664.
- [44] CHEN D, FAN J, ZHANG F. Extraction the unbalance features of spindle system using wavelet transform and power spectral density[J]. Measurement, 2013, 46(3): 1279-1290.
- [45] QIAO X, ZHU C S. The active unbalanced vibration compensation of the flexible switched reluctance motorized spindle[J]. Journal of Vibration & Control, 2013, 20: 1934-1945.
- [46] 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- QU Liangsheng. Holospectrum and holobalancing technique in machinery diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [47] 郎根峰, 林京, 廖与禾. 全息动平衡相位补偿方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 16-21.
- LANG Genfeng, LIN Jing, LIAO Yuhe. Phase compensation method of holobalancing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22): 16-21.
- [48] LIU S, QU L. A new field balancing method of rotor systems based on holospectrum and genetic algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 446-455.
- [49] 章云. 高速主动平衡及其在线控制技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- ZHANG Yun. Research on dynamic balance and on line control technology of high-speed spindle[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012.
- [50] 徐克俊. 航天发射故障诊断技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- XU Kejun. Fault diagnosis for aerospace launch[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [51] ZHANG L, YAN R, GAO R X, et al. Design of a real-time spindle health monitoring and diagnosis system based on open systems architecture[C]// International Smart Machining Systems Conference, France, 2007, 373-378.
- [52] NEUGEBAUER R, FISCHER J, PRAEDICOW M. Condition-based preventive maintenance of main spindles[J]. Production Engineering, 2011, 5 (1): 95-102.
- [53] WERNER A F. An early warning monitoring system for CNC spindle bearing failure[D]. Clemson: Clemson University, 2011.
- [54] LIAO W, WANG Y, PAN E. Single-machine-based predictive maintenance model considering intelligent machinery prognostics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1-4): 51-63.
- [55] 谷东伟, 申桂香, 张英芝, 等. 数控机床主轴系统可靠性评价[J]. 中南大学学报, 2013, 42(2): 540-545.
- GU Dongwei, SHEN Guixiang, ZHANG Yingzhi, et al. Reliability evaluation of spindle system of CNC[J]. Journal of Central South University, 2013, 42(2): 540-546.
- [56] 蒋喜, 刘宏昭, 瞿佼佼, 等. 基于伪寿命分布和 Bayes 法的电主轴可靠性对比[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(11): 1694-1699.
- JIANG Xi, LIU Hongzhao, ZI Jiaojiao, et al. Comparative study on the reliability of motorized spindle based on false life distribution and bayes method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(11): 1694-1699.
- [57] YAN R, GAO R X, ZHANG L. In-process modal parameter identification for spindle health monitoring[J]. Mechatronics, 2015, 31: 42-49.
- [58] DOHNER J L, HINNERICHS T D, LAUFFER J P, et al. Active chatter control in a milling machine[C]// Proceedings of SPIE 3044, Smart Structures and Materials 1997: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, 1997, doi:10.1117/12.274672.
- [59] DOHNER J, LAUFFER J P, HINNERICHS T D, et al. Mitigation of chatter instabilities in milling by active

- structural control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 269(1-2): 197-211.
- [60] RIES M, PANKOKE S, GEBERT K. Increase of material removal rate with an active HSC milling spindle[C]// Adaptronic Congress, 2006.
- [61] ABELE E, SCHIFFLER A, ROTHENBUCHER S. System identification during milling via active magnetic bearing[J]. German Academic Society for Production Engineering, 2007, 1(3): 309-314.
- [62] KERN S, SCHIFFLER A, NORDMANN R, et al. Modelling and active damping of a motor spindle with speed-dependent dynamics[C]// Vibration in Rotating Machinery – International conference, 2008: 465-475.
- [63] CHEN Z Y, ZHANG H T, DING H. Mitigation of chatter instability in milling processes by active fourier series compensation[C]. Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on. IEEE, 2012: 167-171.
- [64] ZHANG H T, WU Y, HE D F, et al. Model predictive control to mitigate chatters in milling processes with input constraints[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2015, 91: 54-61.
- [65] CHEN F, LU X D, ALTINTAS Y. A novel magnetic actuator design for active damping of machining tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 85: 58-69.
- [66] LU X D, CHEN F, ALTINTAS Y. Magnetic actuator for active damping of boring bars[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 369-372.
- [67] 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.
- [68] 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.
- [69] Heidenhain company. Dynamic+Efficiency[EB/OL]. [2016-04-13]. http://www.heidenhain.com/en_US/products-and-applications/cnc-controls/dynamic-efficiency/.
- [70] Mazak company. Variaxis i-1050T[EB/OL]. [2016-04-13]. <https://english.mazak.jp/machines/variaxis-i-1050t/>.
- [71] BIRKENSTACK D, JAGER O. Multi-chambered fluid balancing apparatus: America, 3950897[P]. 1976-04-20.
- [72] 章云, 梅雪松. 高速主轴动平衡及其在线控制技术[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 87-92.
- ZHANG Yun, MEI Xuesong. Study on online balancing control technique for high-speed spindle[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 87-92.
- [73] PAN X, WU H Q, GAO J J, et al. Study on online active balancing system of rotating machinery and target control method[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2014, 13: 302-311.
- [74] MOON J D, KIM B S, LEE S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 978-987.
- [75] FAN H W, JING M Q, WANG R C, et al. New electromagnetic ring balancer for active imbalance compensation of rotating machinery[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333: 3837-3858.
- [76] FAN H W, JING M Q, LIU H, et al. New machine tool motorized spindle integrated with one electromagnetic ring balancer driven by optimal square wave[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229: 1509-1522.
- [77] Hofmann company. Active balancing[EB/OL]. [2016-04-13]. <http://www.hofmann-balancing.com/products/active-balancing-systems/ring-balancer-ab-9000.html>.
- [78] Schmitt Company. SBS automatic balancing system[EB/OL]. [2016-04-13]. <http://www.schmitteurope.com/Balancers/SBS-automatic.html>.
- [79] Marposs company. Balancing heads[EB/OL]. [2016-04-13]. http://www.marposs.com/product.php/eng/grinding_wheel_balancer.

作者简介: 陈雪峰(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为有限元动态分析与数字化制造, 机械故障诊断、安全监测与寿命预测, 大数据与智能制造。

E-mail: chenxf@mail.xjtu.edu.cn

张兴武, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为小波有限元动力学分析, 振动优化控制与智能制造。

E-mail: xwzhang@mail.xjtu.edu.cn

曹宏瑞, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能主轴动力学建模, 故障诊断, 数字化制造。

E-mail: chr@mail.xjtu.edu.cn