

DOI: 10.3901/JME.2023.23.265

刀具智能化关键技术的研究进展及发展趋势^{*}

叶文昌^{1,2} 郭必成^{1,2} 邓朝晖^{1,2} 王伟³ 邹伶俐⁴
刘超⁵ 尹刚刚⁶ 姜峰^{1,2}

- (1. 华侨大学制造工程研究院 厦门 361021;
2. 高性能工具全国重点实验室 厦门 361021;
3. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731;
4. 厦门金鹭特种合金有限公司 厦门 361021;
5. 厦门钨业股份有限公司 厦门 361009;
6. 奇石乐精密机械设备(上海)有限公司 上海 201107)

摘要: 随着航空航天、医疗器械、汽车制造等领域的发展,零部件的制造越发复杂化和柔性化,对刀具智能化的需求也越来越强烈。相对于传统刀具,智能刀具融合了传感器、数据处理、数字孪生等现代技术,在机械加工中应用智能刀具对改善零件质量,提高生产效率,降低生产成本效果明显。智能刀具系统实现了从智能刀具结构设计、切削状态监测、刀具状态感知到加工反馈控制的全过程闭环管控。提出智能刀具的内涵以及使刀具智能化的多种关键技术,从刀具智能优化设计、切削状态监测、刀具状态感知、切削过程调控四个方面综述了刀具智能化关键技术的研究成果。最后总结了智能刀具系统在未来制造业中的应用前景,指出了实现刀具智能化亟待解决的问题和未来的发展方向。

关键词: 智能刀具; 数字孪生; 传感器技术; 状态监测; 反馈控制

中图分类号: TG71

Advances in Key Technologies of the Intelligence Tool

YE Wenchang^{1,2} GUO Bicheng^{1,2} DENG Zhaohui^{1,2} WANG Wei³ ZOU Lingli⁴
LIU Chao⁵ YIN Ganggang⁶ JIANG Feng^{1,2}

- (1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021;
2. State Key Laboratory of High Performance Tools, Xiamen 361021;
3. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731;
4. Xiamen Golden Egret Special Alloy Co., Ltd., Xiamen 361021;
5. Xiamen Tungsten Industry Co., Ltd., Xiamen 361009;
6. Kistler Precision Machinery (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201107)

Abstract: With the development of aerospace, medical devices, automobile manufacturing and other industrial fields, the manufacturing of complex parts is becoming more flexible, which pushes the cutting tools to be intelligent. Compared with traditional tools, intelligent cutting tools integrate sensor technology, data processing and digital twin. The application of intelligent cutting tools in the machining processes improves the part quality and production efficiency, while reduces the production cost. The definition of intelligent tool is proposed and related key technologies are presented. The research results of the key technologies of the intelligent tool are summarized from four aspects, including the optimization design of intelligent tool, the monitoring of cutting condition the perception of tool state and the control of cutting process. Finally, the application prospect of the intelligent cutting tool system in the future manufacturing processes is summarized, and the development direction of realizing tool intelligence are discussed.

Key words: intelligent cutting tool; digital twin; sensor; monitor; feedback control

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1704804)。20221217 收到初稿,
20230718 收到修改稿

0 前言

随着 2015 年“中国制造 2025”计划的提出,我国的航空航天、医疗器械、汽车制造、军工、化工等领域飞速发展,与其息息相关的制造业也在向精密化、集成化、智能化、绿色化进行转型。以航空航天领域零部件为例,加工需要专用的刀具以满足零部件的高精度、高性能及其生产的高效率,传统的切削刀具已经无法满足现代制造业的加工需求,智能切削刀具就应运而生。2021 年我国的“十四五”规划把智能切削刀具作为机械工业补短板的重要一环^[1]。传统刀具的研究主要包括刀具的材料、几何角度、涂层等方面,集中于刀具的“切削”能力。随着智能刀具^[2]概念的提出,刀具不再是“被动”地根据指令对金属材料去除加工,而是“主动”地根据加工过程状态变化(例如力、温度、振动的变化)进行感知,动态调控加工工艺过程。要想使刀具具有“主动性”来应对加工过程的复杂动态变化,需要刀具智能化设计、切削状态监测^[3]、刀具状态感知^[4]、实时反馈控制等关键技术的突破。

要实现刀具真正的智能化,目前仍面临巨大

的挑战与难题,具体表现在以下四个方面。

(1) 智能刀具的设计和 optimization 面临挑战。传感器在刀具系统中的集成增加了刀具设计的难度,传统的经验法、试切法难以满足智能刀具的快速定制化设计,现有智能刀具系统开发周期长、柔性不足,无法满足先进切削加工技术的需求。

(2) 切削状态监测数据处理面临挑战。传感器技术对切削加工中的力、振动、温度等信号进行在线监测,形成了大量的同源异构数据,这些数据的有效融合及其归一化重构是个难题,数据是否有效处理影响其应用。

(3) 刀具磨损状态精准识别面临挑战。刀具的磨损形式多种多样,不同刀具磨损形式对加工质量的影响也不同。如何通过监测数据精准判断刀具的磨损形式,从而实现刀具更换策略的精准制定是个难题。

(4) 切削状态实时反馈控制策略面临挑战。监控数据最终应用在切削状态的反馈控制,比如工艺参数的调整、刀具补偿量的调整等方面。实时反馈控制是最理想的控制方式,但是实时反馈会与监控信号发生耦合,使切削状态的精准辨识更加困难。

如图 1 所示,智能刀具系统融合了数字孪生技术、智能监测技术、大数据智能感知、智能控制等

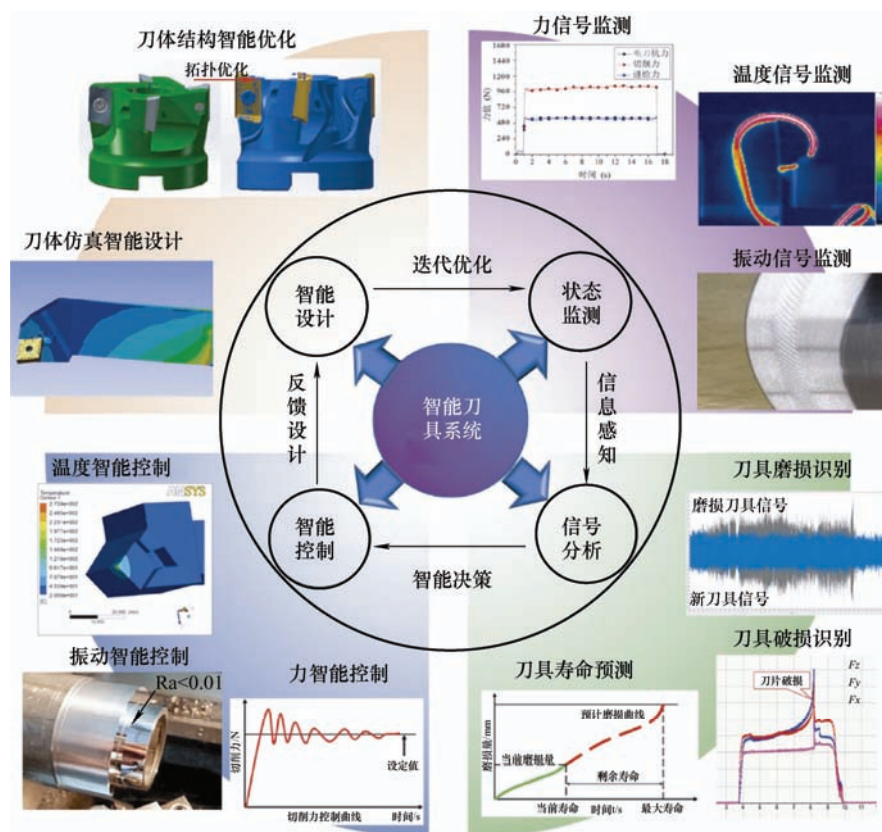


图 1 智能刀具系统体系框架

现代技术,对刀具从参数设计到工程应用进行全周期的智能管控^[5],使刀具的参数设计可优化、生产加工可监测、刀具状态可视化、实时加工可调节。面向刀具的数字孪生技术能够更智能地解决与优化传感器与刀具的集成问题;传感器的微型化,精密化趋势有利于切削状态的监测和刀具状态的自我感知;刀具的智能调节能适应柔性化加工的需要。本文从刀具智能化的角度出发,讨论了为实现刀具智能化需要融合的关键技术,其中包括刀具智能设计优化技术、切削状态监测技术、刀具状态感知技术和切削过程调控技术。

1 刀具智能设计优化技术

1.1 基于仿真技术的刀具结构智能设计

智能刀具的外形、功能、内部结构等方面的设计制造都与传统刀具有所差别,智能刀具的设计更倾向于柔性化和定制化。因为智能刀具的高度定制化,传统的切削试验法不仅耗费时间而且浪费资源。为了实现智能刀具的几何结构、切削性能方面的优化,数值仿真技术在刀具优化设计方面起了重要作用。通过数值仿真可以对切削过程的切削力、切削温度、切屑形状进行模拟分析,利用仿真结果可以发现在刀具在切削过程中可能会发生的切削温度过高、切屑碰撞等问题。如图 2 所示,材料去除仿真能够详细展示刀具切除工件的过程,借助仿真分析能够反映切屑的去除过程,预测切屑与刀具的碰撞,为传感器在刀杆上的布置提供理论基础。通过仿真铣削过程的各轴铣削力,为刀具设计提供最大切削力、切削温度等边界条件。

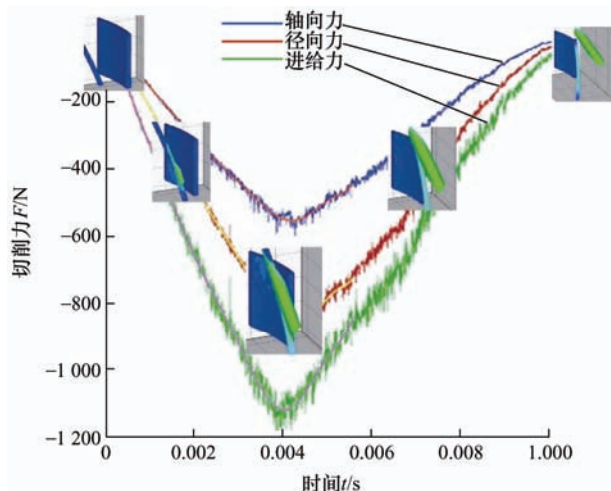


图 2 切削过程仿真^[6]

肖才伟^[7]为进一步提高刀具感知切削力的灵敏度,通过有限元仿真模拟对放置应变片的凹槽尺寸

进行了参数优化,在满足刀具刚度的前提下提高了感知单元的灵敏度。李元祥^[8]在铣削力自感知铣刀的研究中,分析刀体的变形量,优化应变片布置位置使轴向灵敏度提高 30%,如图 3 所示。赵友等^[9]在切削力自感知刀具的研究中,通过有限元仿真技术确定了封装应变传感器在刀杆上的最佳集成区域以及传感器电路方案。所设计的切削力自感知刀具结构紧凑、精度高。ZHAO 等^[10]在切削力传感器的设计与研制中,由于理论计算难以得到传感器的固有频率,采用了有限元仿真的方法得到了传感器的固有频率为切削力采用频率的设定提供依据。

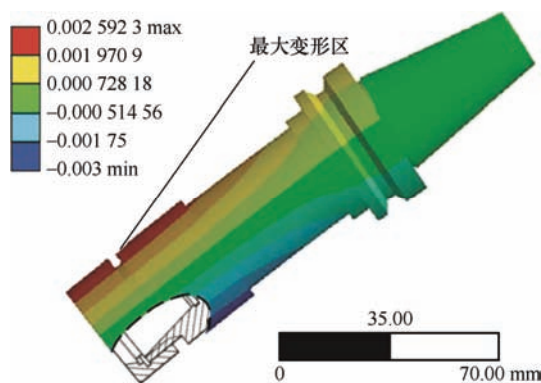


图 3 刀体静态结构仿真^[8]

目前通过 ADVANTEDGE、ABAQUS、DEFORM 等仿真软件对切削加工过程进行仿真、对刀体结构静力学热力学分析,从而对实际加工情况进行预测已经是一项十分成熟的技术。切削过程的数值仿真技术能够为静力学、热力学仿真提供极限应力,最大温度等边界条件。反过来在静、热力学仿真分析的基础上进行数值仿真分析能对切削过程做出更准确的模拟。上述这两种仿真是相互联系,相互耦合的关系。通过两种仿真技术分析能在一定程度上对生产加工有理论指导作用。但是未来仿真技术发展不仅要在虚拟验证、可视化演示方面体现其价值,更要在智能设计、能耗优化等方面发挥相应的价值。同时由于智能刀具包含了内冷通道、信号电缆通道等结构,涉及到了刀具的整体刚度和局部刚度的匹配设计,其制造方法也由传统的机械加工向增材制造、微细孔加工等方法转变。

1.2 基于数字孪生的刀具智能优化

对于智能刀具这类特殊刀具来说,将各类传感器集成到刀具上对切削过程的切削信号监测是主要的设计思路。智能刀具的设计涉及到刀具的外形、功能、参数设计、试验等,传统的试切测试成本高昂。

面向数字孪生的刀具设计成为一种新兴技术。

数字孪生技术用数字化的方式创造实体物体的虚拟模型,在智能制造、工业 4.0^[11-12]等技术的推动下,数字孪生成为时下的研究热点。基于数字孪生的数控加工^[13]、生产调度^[14]、装配设计^[15]等概念的提出,为数字孪生的应用提供了思路^[16]。理想的刀具数字孪生模型是包括几何模型、行为模型、工作模型的多功能、多维度的虚拟模型。有别于传统的三维模型,数字孪生模型更强调虚实之间的动态演化和实时交互。利用数字孪生模型的高精度、高可信度的特征,能够大大降低生产制造成本,实现智能刀具从设计到维护全周期的优化。

KONG 等^[17]提出了一种面向车间的数字孪生系统应用。在该系统中设计了车间的本体模型,并设计了系统的数据结构框架,最后通过预测刀具磨损的应用实例,验证了该数字孪生系统的有效性和可行性。BOTKINA 等^[18]探讨了刀具方面的数字孪生,提出了一种自动收集标准化数据并允许对刀具数字模型进行连续调整的信息模型。刀具数字模型能准确地反映了刀具性能,适用于高精度的工艺模拟、控制和分析,最终能让刀具设计工艺不断改进。TONG 等^[19]搭建了基于数字孪生平台的智能机床,采用多传感器融合技术进行实时数据采集和处理。建立的数字孪生机床模型利用包括加工轨迹、加工状态、功率消耗在内的实时加工数据为加工工艺优化、刀具制造工艺优化所服务。

智能刀具的设计制造过程的数字孪生包括建模仿真、信号采集、大数据分析等多门关键学科。在智能刀具的优化方面,更是要依靠大量监测数据对刀具结构进行迭代优化,因此要充分利用智能刀具

监测技术所得到的数据并进行深度分析。数字孪生技术让智能刀具不仅在使用过程中体现智能,而且在设计优化过程也体现智能。不过目前该项技术仍然处于发展初期,需要广大学者对其进行不断完善。

2 切削状态监测技术

机械加工过程往往伴随着大量的切削状态信息,例如声音、功率、切削力、温度等。感知这些信号,实时地监测刀具状态,是保证高效生产加工、保护加工设备、提高产品质量的关键^[20],也是智能刀具系统重要的组成部分。刀具状态监测系统^[21]一般采用直接法或者间接法来采集切削状态信息。

直接法一般是离线监测,比如利用非切削工作时段通过一定的手段直接对刀具磨损情况进行评估。具体方法有光学测量技术、放射性检测、工件与刀具接触电阻测量、工件尺寸精度测量等。这种方法成本低、测量结果可靠,但有两个明显的缺点:一是需要对生产设备进行停机才能对刀具或工件检测,这会损害生产的连续性;二是检测间隔周期长,不能应对突发故障。

间接法是利用传感器实时监测与切削状态密切相关的信号。通过监测切削信号的变化间接获得刀具的状态^[22]。这种方式的优点:一是能够对切削状态进行实时监控,能广泛应用于各种加工工艺中;二是对加工过程基本无影响或影响较小,确保生产加工不间断。但是,对多种监测信号的处理及切削状态的辨识难度较大。表 1 显示了间接法常用的方法和适用场景。

表 1 间接测量的常用方法

方法	测量要素	传感器	适用场景
切削力	机械加工中的力变化	应变传感器、压电传感器	基本适用于所有的加工环境
温度	切削过程的温度变化	热电偶、红外温度计	传感器的位置应避免受到高温影响
振动	刀杆或刀架的微位移	加速度传感器、位移传感器	对机床、刀架的自身精度要求较高
功率	消耗的功率或消耗的电流	电流表、测功机	易于测量,易于应用,但精度较低

2.1 功率监测

目前已有许多学者利用机床功率或电机电流监测刀具状态。LIAO 等^[23]用实验证明了机床电机电流与刀具磨损之间的关系。AL-SULAIMAN 等^[24]提出一种利用钻头功率监测钻头磨损的方法。AXINTE 等^[25]评估了主轴功率信号在车、铣削和钻孔过程中对刀具状态的灵敏度。FRANCO-GASCA 等^[26]研究了钻头磨损程度与主轴马达驱动电流之间的关系。

但是,由于机床上的功率监测设备远离切削位置,机床对刀具敏感度较低,功率信号并不能很好地表征刀具发生破损的情况。如图 4 所示^[27],刀具发生不同程度破损后,径向和切向力和扭矩信号都发生了明显变化,但是功率信号以及轴向力却没有发生变化。随着传感器技术、信号处理技术、神经网络技术、数字孪生^[28]等技术的发展,监测加工过程的传感器由机床转移到了刀具上^[29],直接采集刀

具产生的信号并利用这些信号为刀具设计优化提供数据支撑或在机械加工中识别和预测刀具状态^[30]。

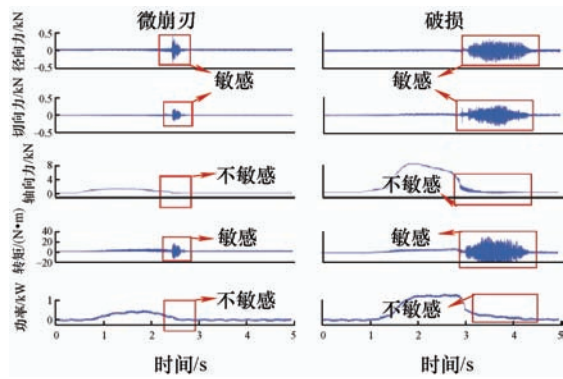


图4 钻头破损后切削力与主轴功率的变化

2.2 切削力监测

在切削过程产生的各个信号中, 切削力是最直观表现切削过程的动态行为和刀具状态特征的物理量^[31]。切削力的大小变化直接反映了刀具的磨损状态, 对切削温度、切削振动等因素也能间接反映, 因此对切削力进行可靠、准确的监测是非常重要的。近年来, 各式切削力感知刀具成为研究热点。

在应变片作为力传感器研究中, RIZAL 等^[32]利用八角环应变片作为力传感器, 用于测量车削中三向力。WU 等^[42]将应变片集成于铣刀测量铣削中的扭矩。ZHAO 等^[33]设计了一种应变式切削力测量刀具。如图 5 所示, 应变片被嵌合到刀杆表面来测量进给力 and 背向力。该刀具与传统刀具在外形上已无太大差别, 但刀杆内部的信号电缆通道可能会降低刀杆刚度。为提高灵敏度, GONG 等^[34]采用半导体应变片, HUANG 等^[35]利用光纤应变片, 设计了高灵敏度应变式测力刀具。

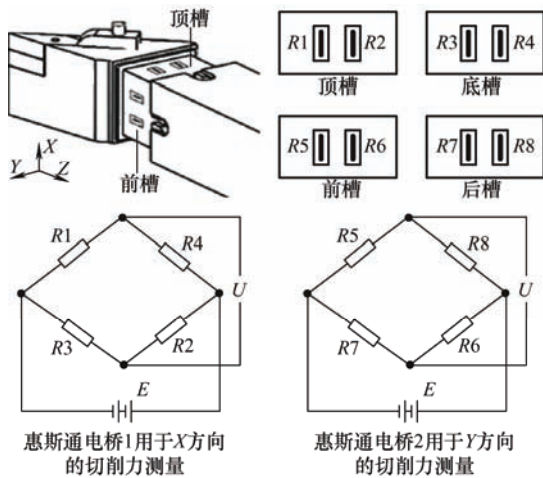


图5 MEMS 应变式力自感知车刀^[33]

相比应变式力自感知刀具, 压电式力自感知刀具在灵敏度方面有更好的表现。CHENG 等^[36]介绍

了一种压电薄膜测力刀具。如图 6 所示, 在刀片和垫片之间放置压电薄膜, 可以测量正交切削过程中的主切削力。XIAO 等^[37]和 CHEN 等^[38]用压电薄膜材料设计了用于超精密切削的高灵敏度小量程的切削力自感知刀具。

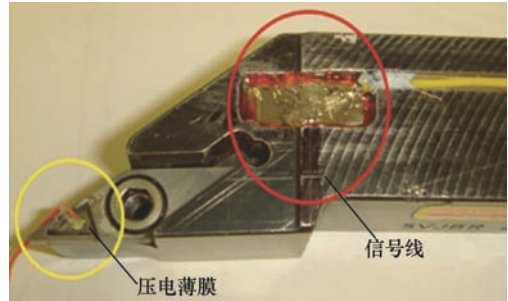


图6 切削力自感知刀具^[36]

电容式力自感知刀具具有非接触测量的优点。XIE 等^[41]改装了一个标准的铣刀架, 使其具有可变形的横梁。如图 7 所示, 在可变形梁放置的电容传感器可以监测电铣削过程中可变形梁的微小变形, 计算铣削过程的三轴切削力和扭矩。

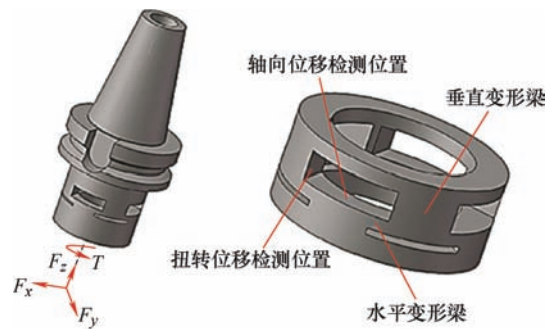


图7 切削力感应刀架^[41]

此外, 声表面波式力自感知刀具可实现无线信号传输功能, 在加工过程在线测量有极大潜力。李文德等^[39]和 WANG 等^[40]以石英谐振器传输信号, 用于测量车削中的力信号。如图 8 所示, 声表面波谐振器通过环氧树脂粘在刀杆上, 刀具在加工时紧邻谐振器夹持。虽结构简单安装方便, 但测量时容易受到干扰使信号失真。



图8 声表面波力自感知刀具^[39]

在商业应用方面^[43], 如图 9 所示, Sandivk 公

司开发了主动减振刀具,在镗刀刀杆集成了传感器,能够主动调整刀具的刃倾角保持刀具和工件中心等高。并在刀架配备了监控系统,实现监测数据的实时可视化。Kistler 公司和 Pro-micron 公司分别生产的无线旋转测力计,其测力传感器的布置都十分接近切削区域,能够精准测量铣削过程的力与力矩。此外 Horn 公司和 Kistler 公司合作开发了集成压电式力传感器的测力刀具,兼容 Kistler 公司生产的数据采集系统和数据分析软件,可以以高采样频率采集车削加工过程的动态力并可实时提取力的时域和频域信号。



图 9 商业化力感知刀具^[43]

测量切削力的传感器类型虽不同,但切削力的测量效果一般由灵敏度、交叉干扰误差以及测量范围这几个指标体现。

(1) 灵敏度。灵敏度就是指传感器输出信号增量与被测量信号增量的比值。灵敏度越高,可以感知的变化量越小。但灵敏度越高,也越容易混入与被测量无关的外界噪声。合理地选用传感元件能有效提高传感器的灵敏度,例如相对于金属应变片,使用半导体应变片能提高应变式传感器的灵敏度。此外在电容式、电感式传感器中常采用差动技术提高灵敏度。

(2) 交叉干扰误差。交叉干扰误差是指测量单向力时,受到其他方向力的干扰程度。测量切削力时,如何提高被测力的灵敏度,同时最大程度降低其余方向力对传感器的响应,是提高传感器抗干扰能力的有效方法。

(3) 测量范围。任何传感器都有一定的线性范围,只有在线性范围内被测量与输出量才成比例关系。线性范围越宽则表示传感器的测量范围越大。尽可能大的动态测量范围是传感器的基本性能要求,选用弹性极限大的传感器元件可以有效提高应变式传感器测量范围。

表 2 统计了近几年来各类切削力自感知刀具力传感器的研究。切削力是表征刀具磨损、加工状态、

表 2 切削力自感知刀具测力传感器的各项参数及参考文献

刀具类型	传感器	测量原理	测力类型	交叉干扰误差(%)	灵敏度/(mV/N)	测力范围 F/N	优缺点	文献编号
车刀	应变式	刀杆在受到外部拉压力时应变片发生形变,使应变片长度、电导率、截面积变化,从而应变片电阻变化,最终电阻测量电路实现电压输出转换	三向力	0.87	<0.172	≤2 900	测量范围广,误差干扰小。但灵敏度较低	[32]
			进给力	1.97	0.1	—		[33]
			吃刀抗力	3.03	—	—	—	—
	压阻式	与应变式相似,应变材料由金属变为半导体,但应变片受力作用形变时仅电导率变化引起电阻变化	主切削力	—	219.38	≤200	灵敏度低但温度稳定性差	[34]
	光纤式	将光信号波长变化转换为力大小变化	三向力	轴向干扰大	3.66	<3 000	灵敏度较高,但制造困难	[35]
	压电式	在切削力作用下,压电材料表面会产生电荷,力撤销时,压电材料重回不带电状态。通过此效应实现力与电荷之间的转换	主切削力	5.97	722	—	灵敏度低但输出电荷信号需要电荷放大器	[36]
			主切削力	2.4	0.33	—	放大为电压信号	[37]
			主切削力进给力	—	97 141	0~10	—	[38]
	声表面波	利用石英晶体的谐振特性,当晶体受力作用时,晶体切变模量 G 随力作用变化,引起晶体谐振频率随被测力变化	主切削力	—	40	≤200	无线传输,但信号受干扰严重	[39]
			主切削力进给力	20.3 13.2	152 185	—	—	[40]
铣刀	电容式	电容器内弹性膜片受力信号产生弹性位移,与极板间距发生变化,引起电容变化,通过转换电路输出的电压变化即可知力信号的变化	轴向力 径向力 扭矩	0.21 6.4 11.63	0.74 6.32 19.32	—	可实现非接触测量,但灵敏度线性度较低	[41]
	应变式	—	轴向力 扭矩	0.16 13	9.537×10 ⁻⁶ 1.38×10 ⁻³	<5 000 <450 N·m	—	[42]

* 文献[39-40]中灵敏度单位为 Hz/N, 文献[41-42]扭矩灵敏度单位为 mV/N·m。

加工效率和表面质量最常用的指标, 而且不论应变传感器还是压电传感器都能方便、有效地集成在刀具上, 因此, 具有测力功能的刀具受到广泛认可。但是, 针对不同的加工方式应考虑选用不同的力传感器。对于那些力周期变化的断续加工方式, 比如铣削、超声辅助振动加工中, 采用压电式或电容式力传感器会有更好的效果; 对于力相对稳定的连续加工过程, 比如车削、钻削等, 采用应变式力传感器也能取得很好的效果。但由于各向力测量存在交叉干扰误差的问题, 目前大多数测力刀具只能测量一个或二个方向的切削力, 且解决上述问题是未来测力刀具发展的重要方向。

2.3 切削温度监测

金属切削加工过程主要是工件材料塑性变形变成切屑的过程。在上述过程中, 会产生大量的切削热。由于高温降低了工件的屈服强度, 切削温度的升高有利于工件的塑性变形。但是过高的切削温度会加剧刀具的磨损, 降低刀具的寿命^[44]。切削温度对工件表面完整和加工精度有直接的影响, 在线切削温度测量对预估刀具寿命有重要的作用。因此对于切削温度的监测是很有必要的。切削温度测量方法主要包括以红外热像仪为代表的非接触式测温 and 以热电偶为代表的接触式测温。

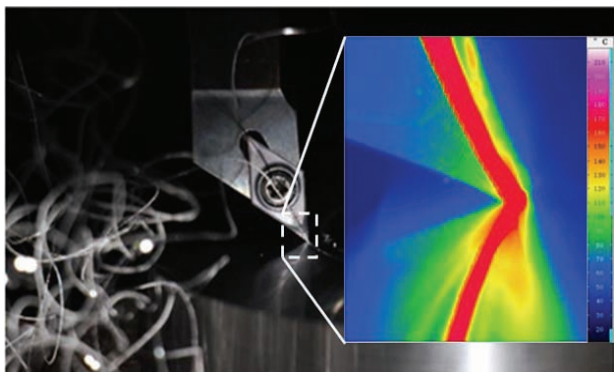


图 10 车削过程的红外测温^[45]

在科研和生产中, 精准、高效和非接触地测量分析被测物的细微和瞬态的温度变化极为重要。红外测温的原理是红外热像仪通过接受被测物体的红外辐射能量分布来反映被测物体的温度分布, 如图 10 所示^[45], 红外热像仪能直观地测得切削过程的切削温度。值得注意的是测量前首先需要测量被测物体的发射率, 红外热像仪只有设置正确的发射率才能测得准确的温度。

SUDINTO 等^[46]利用 MLX90614 红外温度计和 Arduino 微控制器研制了一套用于铝合金材料的铣削加工智能测温系统。LIN 等^[47]研制了一种带光纤的红外高温计系统。在保证刀具温度预测可靠性和准确性的前提下, 通过该光纤红外高温计系统, 可以方便地实现刀具温度的在线测量。KUS 等^[48]利用红外高温计和 K 型热电偶同时测量了车削 AISI4140 合金钢时的刀具-切屑界面和刀具温度。

切削过程不受干扰或者干扰较小的情况下, 红外测温是监测切削温度的最优选择。但是, 切削过程产生大量切屑, 会对刀-屑接触面产生阻挡, 红外测温很难测得最高切削温度^[49]。因此, 非接触法测温还是有一定的局限性, 通过采用测温原件与刀具集成的接触式测温法是避免切削过程干扰的一种办法。

在温度自感知刀具与测温元件集成方面, SEEMANN 等^[50]将铁磁性薄膜与刀具涂层界面结合, 并通过混频技术来监测铁磁薄膜磁导率的变化, 进而来感应温度变化。HAN 等^[51]介绍了一种近红外光纤双色高温计系统。系统将传感器探头插入靠近切削刃的微孔中, 传感器采集热辐射可实现刀刃温度的监测。

LI 等^[53-54, 57]在保证热电偶不与切屑发生接触的条件下, 将薄膜热电偶嵌入前刀面保证测温精度。WERSCHMOELLER 等^[55]考虑将热电偶布置在相对更安全的前刀面, 但热电偶灵敏度不可避免的下降。

LI 等^[52]设计了一种嵌入式薄膜热电偶的 PCBN 刀具。如图 11 所示, 通过皮秒激光处理, 在刀具后刀面刻蚀了一条 100 μm 深的微槽并在微槽中嵌入薄膜热电偶。也有学者^[56]在铣刀尖沉积薄膜热电偶, 测温铣刀相对于车刀有更大的灵敏度。

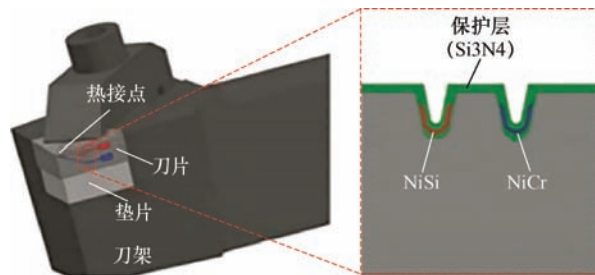


图 11 带内置 TFC 的 PCBN 刀具^[52]

表 3 总结了近年来温度自感知刀具温度传感器的各项指标。可以发现薄膜热电偶在作为温度

自感知刀具测温元件方面具有灵敏度高、响应时间快的优点,在测量瞬时温度时有独特的优势。但是,薄膜热电偶作为微型器件,制作和安装过程相对复杂。热电偶的输出温度与冷端参考温度

有关,切削过程中冷端温度会受到切削热的影响,冷端温度的不恒定会影响测温精度。如何在切削测温中对冷端补偿,是保障热电偶测温精度的关键。

表 3 温度自感知刀具测温传感器的各项参数及参考文献

传感器	测量原理	位置	响应时间 $t/\mu\text{s}$	灵敏度 $/(\mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	优缺点	文献编号
铁磁薄膜	监测磁导率变化感应温度变化	涂层与基体间	—	—	非接触测量,热稳定性好但制备过程复杂	[50]
近红外光纤	利用光纤对不同温度的折射率不同,实现对温度感知	刀垫内	1×10^4	—	非接触测量,响应较快但需制备特种光纤保证灵敏度	[51]
		后刀面	$8 \sim 24 \times 10^4$	14.4		[52]
		前刀面表面	0.15	20.01		[53]
		前刀面亚表面	0.27	19.04		
薄膜热电偶	根据热电效应,将两种导体组合成闭合回路,测温时将回路中一节点与切削过程中切削区连接形成热端,另一节点与刀具的冷部分的连接形成冷端,工作时两端产生电势变化推导出切削温度的变化	前刀面	0.135	21	灵敏度高,响应时间快,动态响应好。切削过程中冷端温度会受到切削热的影响,容易降低测温精度,且刀具的磨损也会影响热电偶的工作性能	[54]
		后刀面	0.15	8.9		[55]
		铣刀尖	85	40.85		[56]
		前刀面	—	30		[57]

2.4 切削振动监测

加工过程的振动会影响零件精度、表面质量,严重的会导致刀具破损和工件报废。振动监测被广泛应用于判断和预测零件加工精度、表面粗糙度以及刀具状态。

加速度监测是评估刀具振动的常用指标。CHUNG 等^[58]介绍了一种无线传感系统。如图 12 所示,该系统由电磁能量采集器、三个单轴压电式加速度计、无线芯片模块以及电路模块组成。系统能通过电磁能量实现自供电,采用的单轴加速度计能够感知铣削过程中的振动。

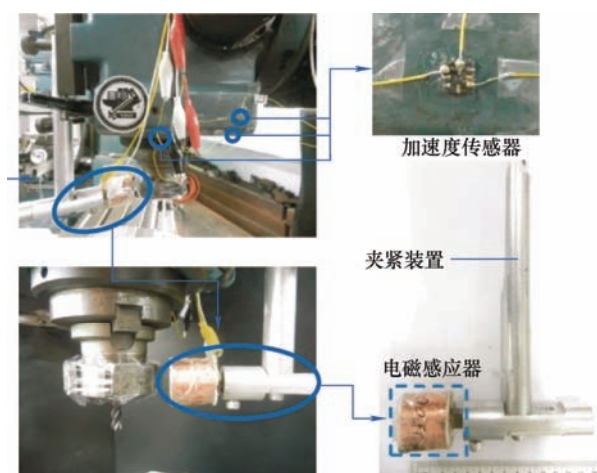


图 12 铣削过程刀具磨损检测无线振动传感器系统^[58]

更多的学者采用电容传感器作为加速度计。

SUPROCK 等^[59]开发出了一种无线式振动感知铣刀,铣刀采用驻极电容计作为加速度传感器,铣削振动通过电容器极距变化感知。为提高电容计线性度,刘海军^[60]、陈奇伟^[61]用差动式电容计作为传感元件分别设计了集成式和外挂式振动自感知刀具。刀具位移也是评估振动的一个指标,DEVILLEZ 等^[62]通过在车刀后端部安装一个质量块,电涡流传感器安装在质量块后方,通过测量质量块放大的刀具振动位移,实现非接触式振动测量。MIN 等^[63]将激光传感器与钻头集成,监测钻削中钻头的偏心位移。ASLAN 等^[64]根据主轴电机电流来间接测量切削力矩的大小变化,但采集信号失真较严重,作者为此设计了补偿机构。在商业应用方面,KISTLER 公司推出微型 3 轴压电式加速度传感器和应变传感器可以方便集成到刀塔和刀具,实时监测刀具振动和应变信号。

表 4 总结了近几年对振动自感知刀具振动传感器的研究。研究结果表明在铣削加工时,由于刀具往复切入工件,加工过程会产生高频循环冲击,在此情况下加速度计能准确地监测到加工振动信号^[65]。但在车削中,振动是由热力耦合造成切削力不稳定而产生的超高频振动^[66],采用的传感器需要更高的采样频率及灵敏度。

表 4 振动自感知刀具振动传感器的各项参数及参考文献

加工方式	传感器	监测信号	测量原理	灵敏度 S/(mV/g)	优缺点	文献 编号
铣削	压电式	加速度	在主轴及刀架上配备 3 个单轴加速度计感知铣削时三向振动	960	灵敏度高，系统可实现自供电但只适用于高转速铣削	[58]
	电容式		铣削振动使电容极板距离变化，使输出电容值变化	100	灵敏度较高，但只小量程内才有较好的线性度	[59]
			采用差动式极距变化传感器，提高被测加速度与输出电容线性度	200	传感器在刀架内集成度好，但刀柄刚度降低	[60]
				32	传感器在刀架外成本低，但切削时振动变大	[61]
车削	电涡流	位移	传感器线圈在磁场中产生电流，当刀具产生微位移时会改变线圈阻抗大小从而使电流改变	30	非接触测量，远离切屑区；但仅在 1mm 内有良好线性度	[62]
钻削	激光		利用激光的强方向性特性监测钻头对主轴的偏移	—	直观监测刀具的偏心程度	[63]
铣削	电流	扭矩	利用主轴驱动电流在线检测铣削振动	0.64	无需外部安装传感器，信号失真较严重，需要补偿机构	[64]

*文献[62]中灵敏度单位为 V/mm，文献[64]中灵敏度单位为 A/N·m。

2.5 同源异构信号监测

单一信号监测技术已经相对成熟。但是在加工过程中，有时只采集单一信号会使识别的加工状态失真。采用多传感器方法测量切削状态能使每个单传感器采集到的信息形成互补。多信号的融合能更准确地识别刀具状态。

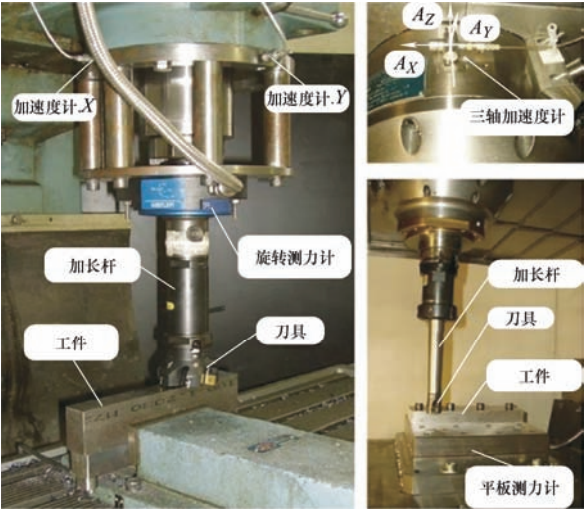


图 13 传统铣床主轴配备单轴加速度计^[67]

KULJANIC 等^[67]提出了基于力和加速度信号的多传感器振动检测系统。如图 13 所示，系统由两个固定在主轴的加速度计测量铣头在 X-Y 平面上的振动，工件下方布置测力仪测量三向力。加速度计的位置能够不妨碍换刀装置和其他系统的运行，系统可检测铣削过程中的颤振及力信号。

多信号的集成识别可以保证高精度的刀具状态预测，WANG 等^[68]通过测量三向力与振动信号来拟合实际刀具磨损状况，弥补了单一传感器在刀具状态监测和预测的不足。BINSÆID 等^[69]从力、振动、主轴功率、声发射等多个信号提取时频域特征，结

合这些信号特征对刀具的后刀面磨损、切屑类型进行了预测与识别。WANG 等^[70]从力、振动、加速度三方面数据融合采用 BP 神经网络算法对铣削过程刀具状态检测。值得注意，提取的信号组不同，检测效果也不同。巩亚东等^[71]在砂轮钝化状态识别中发现力与功率的传感器组合识别准确率大于力与声发射传感器组合。CHEN 等^[72]基于振动和功率信号，探讨不同信号对刀具磨损检测系统性能的影响。BAHR 等^[73]基于自组织映射算法，融合了视觉与振动信息，开发了刀具磨损检测系统。

切削过程信号都来自于切削区域这同一个发生源，具有高度的同步性，但是信号来自不同的传感器又表现出异构性、多样性。同源异构的数据信息表现出一定的互补性、协同性但又有冗余性。要想从海量的数据中发掘出能识别切削状态的有效信号，需要高效的模型算法对多传感器信息进行融合分析。

3 数据分析和反馈控制

3.1 基于数字孪生的刀具磨破损检测和寿命预测

刀具在切削过程中的磨损是一个复杂的现象，刀具磨损受到刀具几何形状、工件和刀具材料、工作环境等多种因素的影响。随着刀具磨损量的增加，会导致切削力增大、温度升高、振动加剧、从而导致工件几何精度超差甚至是工件报废、机床停机等问题。由于刀具磨损的演变、刀具寿命的衰减具有复杂、随机、动态的特点，难以精确地建立刀具磨损模型和寿命演变模型。

采用现代传感器技术所监测到的数据是十分巨大的，且刀具状态变化规律也是非线性。直接将监测数据用于表征刀具状态是不现实的，因此利用信

号处理技术对原始信号进行特征分析,建立切削信号与刀具状态之间的可靠关系,是智能化检测的必由之路。刀具磨损检测模型利用刀具在线监测技术采集切削加工中的各种信号,采用时域、频域等特征分析方法对刀具磨损特征进行进一步分类,最后利用模糊推理系统、隐马尔可夫模型等机器学习方法^[74]或用卷积神经网络、自编码神经网络等深度学习方法^[75]对刀具磨损量进行实时分析。刀具剩余寿命模型是在刀具磨损模型的基础上,根据当前刀具的磨损量,依靠刀具寿命历史数据对于刀具剩余寿命做出预测,从而做出停机换刀、误差补偿等决策。

LIU 等^[76]采集了多源信号并提取时域和频域特征用于钛合金铣削过程中刀具磨损状态的识别。BOUHALAIS 等^[77]通过采集和处理振动信号,分析了刀具磨损水平和振动行为之间的相关性。经研究得出固有模态函数的能量可用于刀具磨损状态检测。GOMES 等^[78]利用传感器采集振动信号与声音信号,用所筛选出的特征集训练支持向量机智能模型能够准确预测出刀具磨损值。磨削加工中,KANNAN 等^[79]基于自回归移动平均模型,为砂轮的定期修锐提供了参考标准。HUANG 等^[80]和 MA 等^[81]用卷积神经网络为代表的深度学习方法,实现了刀具磨损的高效识别。信号分析方法虽然多种,但是并没有一个通用且有效的方法能适应不同切削信号或切削方式来描述其刀具状态特征。

刀具的破损与刀具的磨损一样也是刀具的主要损坏形式之一,但与磨损不同的是刀具破损一般表现为刀具的崩刃、破碎、涂层剥落和塑性破损等。刀具的破损具有典型的随机性和偶然性,依靠加工过程监测信号的突变能及时判断刀具发生破损的现象,从而做出提早换刀的措施。

CHEN 等^[82]采用加速度计作为在线检测刀具破损系统的检测元件,通过设置铣削过程中的加速度信号阈值,辨别铣削中的正常振动信号和刀具破损产生的强振动信号。实验结果表明该刀具破损检测方法成功率有 95%。CHO 等^[83]以铣削中三向力和主轴功率作为数据集建立了基于支持向量机的铣削刀具破损检测系统。该系统模型以切削力作为主要决策来判断刀具破损,而以主轴功率为次要决策再次评估切削力无法判断的模糊情况,提高刀具破损检测的正确率。LI 等^[84]分析了铣床主轴在刀具破损中的电流特征,并利用卷积神经网络对刀具破损状态进行了预测,结果表明该方法可以检测出 93%的刀

具破损情况。

数字孪生技术是依靠物理数据模拟实体行为的一种技术。数字孪生技术通过与加工过程多传感器数据信息虚实交互、相互反馈、迭代优化,能够精确建立刀具磨破损模型,实时检测刀具磨破损状态。

田效康^[85]研究了基于数字孪生的机床加工过程监控系统,实现了机床加工过程的材料去除孪生和切削力孪生。但其研究没有对切削过程的切削热、切削磨损等物理因素进行融合,无法实现对加工过程的全物理状态预测。ZHAO 等^[86]针对现实场景与虚拟场景的多信号数据融合问题,提出一种加工过程中多源异构数据的层次模型和映射策略来产生数字孪生数据模型,从而指导现实加工工艺。XIE 等^[87]提出了刀具生命周期各个状态下的数字化双驱动数据流框架,构建了融合物理刀具磨损数据和虚拟刀具磨损数据的刀具磨损模型,并将刀具磨损在 PC 端可视化,为用户提供动态监控,并提供换刀或磨刀的建议。ZHANG 等^[88]提出一种刀具状态监测—刀具综合集成系统(Tool condition monitoring industrial product-service system, TCM-IPSS)的模型。TCM-IPSS 模型由配置层、设备层、数据采集层、信息处理层和服务层组成。研究开发了一个数字孪生模型来演示刀具使用场景。孙惠斌等^[89]依据数字孪生的理念,提出了面向切削过程的刀具数字孪生模型。详细论述了数字孪生驱动的刀具磨损检测和刀具剩余寿命预测模型。如图 14 所示^[90],在实时监测的数据的支持下,能够了解当前时刻的刀具磨损量并拟合磨损曲线预估刀具剩余寿命。

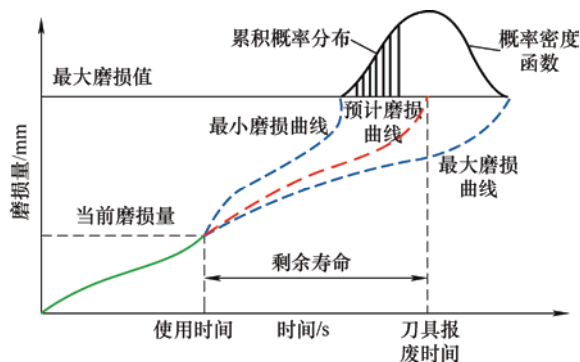


图 14 刀具剩余寿命预测流程^[90]

综上所述,数字孪生技术具有高同步性的特点,将数字孪生技术的高同步性与多信号数据采集的高同步性相融合,能够建立更准确的刀具数字孪生模型,使数字孪生技术在刀具状态感知方面有更广阔的应用前景。不过由于刀具的数字孪生模型涉及学

科范围广，现在的研究还处于初级阶段，包含传感器的智能刀具数字孪生模型还有待开发。

3.2 智能刀具控制技术

一般的机械加工过程，通过调整机床的进给量、转速和切深来对切削状态进行调整。这种操

作一般是人为控制的。采用智能刀具控制技术为加工过程增加一个自动反馈环节，让机床自主做出预警停机、调整参数等动作，这是未来机械加工智能化的发展方向。表 5 总结了智能控制技术常用方法。

表 5 智能控制系统综述总结

方式	主要内容	优点	缺点	文献编号
力	设计了微纳尺度位移刀架控制刀具柔性进给	保持法向切削力恒定	机构安装复杂	[91]
	利用定量反馈理论设计了鲁棒性控制系统	保持切削中切削力稳定在一定范围	最大超调量大于 20%	[92]
温度	通过冷却液在刀片周围循环流动，调整冷却流速，形成内冷式温控刀具	减少冷却液的使用，显著降低刀尖温度，可通过冷却液温度估算刀尖温度	内冷通道结构复杂，制作工艺复杂加工难度大	[93]
				[94]
				[95]
				[96]
振动	在镗杆上安装压电驱动器来抑制镗杆的振动	可主动减振	镗体刚度下降	[97]
	通过改装刀架结构降低车削过程刀具振动	加工工件粗糙度改善 50%	整体刀架过于庞大	[98]
	改装刀架对刀具进给和切深方向施加动态力	控制算法能极大减小刀具位移		[99]
	提出一种混合误差准则频域 LMS 主动控制方法	提高在线抑制振动的效率	无主动减振单元	[100]
刀具磨损补偿	根据预测磨损值提出修改 NC 命令	磨损补偿精度可达 6 μm	对传感器要求高	[101]
	利用 CCD 相机识别刀具磨损引起的误差，并重新定位	磨损补偿精度可达到 1 μm	无法实时在线补偿	[102]
	针对初期磨损设计了微进给刀架进行刀具磨损补偿	可以实时在线补偿	补偿精度较低，为 0.01 mm	[103]
	用光纤位移传感器识别磨损值并由电机补偿进给	可以实时在线补偿	补偿精度较低，为 0.03 mm	[104]

3.2.1 切削力控制

在加工过程中，切削力的大小往往会随着切削状态变化而变化。采用智能控制结构或程序，对机床在线调控，在切削过程中保持切削力的平稳，能够减小工件的几何误差，避免刀具的破损。

HERRERA-GRANADOS 等^[91]研制了一种采用柔性刀架的微纳尺度切削机构。如图 15 所示，安装了单点金刚石刀具的悬臂梁位移变化由线性位移电容传感器测量。反馈控制系统的作用是保持传感器和测量板之间的相对位置不变，从而在加工过程中保持恒定的法向切削力。

ROBER 等^[92]利用定量反馈理论，设计了一种离散分布形式的鲁棒控制器，以对立铣过程中的切削力进行控制。该控制器能在不同的切削参数或者刀具不同的磨损程度下保持铣削力在设定的范围内。

通过对以上切削力控制系统分析可以发现，目前对于切削力控制的研究还比较少，且大都是针对于车削力的控制。对于更为复杂的曲面铣削加工，要设计一套控制铣削力的系统则更为困难。对于刀具切削力智能控制系统的研究要在控制算法、反馈

调节和刀具结构方面进行更深入的研究，努力探索出能够控制切削力的控制系统。

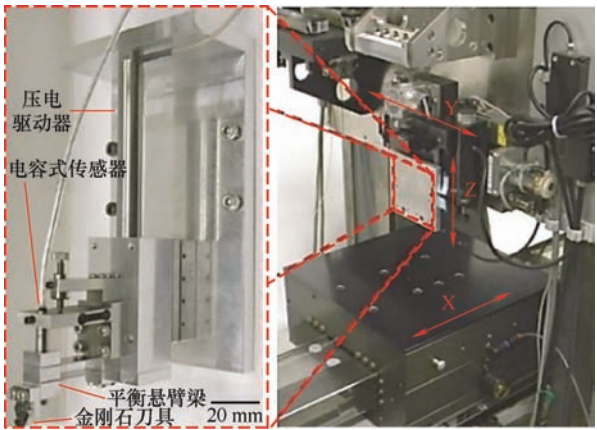


图 15 柔性微尺度切削机构^[91]

3.2.2 切削温度控制

机械加工中，过高的切削温度会造成工件表面的热损伤，降低表面质量和尺寸精度。传统加工中，通常利用冷却液来降低切削温度，但使用冷却液带来的环境污染和高处理成本，让冷却液越来越不受重用。近几年，研究出了干式切削、微量润滑切削、内冷切削等多种更清洁、更绿色的加工工艺方法，

但是其温度控制难度显著增大。

SHU 等^[93-94]介绍了一种基于有限元的内冷刀具的设计, 刀具内部有微通道能够让冷却液在刀杆内循环。该刀具具有内部冷却结构, 并可通过测量进出口冷却液的温度来估算刀尖温度。如图 16 所示, ANSYS 仿真模拟结果表明, 新设计的刀具能有效降低刀具温度, 使刀具温度远离刀具磨损临界温度。

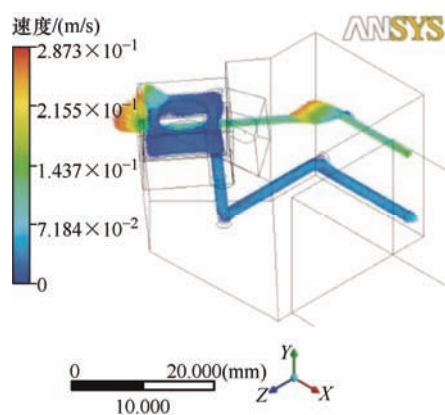


图 16 内冷刀具^[93, 94]

ÖZTÜRK 等^[95]设计并制造了一种的新型智能刀具内置式冷却控制系统(Internally cooled smart cutting tool, ICSCT)。ICSCT 系统可以在刀尖下方喷洒冷却液, 并通过一种流体动力学法来估计刀尖温度。在切削实验中, 与不冷却相比, ICSCT 可以降低刀尖温度 107 °C, 且测得工件的平均表面粗糙度明显小于干切削表面粗糙度。SUN 等^[96]提出了一种在切削刃附近具有简单的可变内部冷却结构的温控型智能刀具, 刀垫被改装为具有内冷循环通道的温控元件, 并在切削温度精准控制方面有了进一步的提升。

通过上述研究可发现, 切削温度的控制研究内容大部分针对车削加工。因为车削加工是连续切削, 热量不容易散失。而铣削加工作为断续切削, 其切削刃在不工作时可散去一部分热量。目前的温控刀具虽能显著降低切削温度, 但还无法保证控温精度, 在精密加工领域这是需要突破的瓶颈。

3.2.3 切削振动控制

现代制造中, 随着各个领域对零件的要求不断提高, 对加工精度与质量的要求越来越高。但是, 加工中的振动往往会使零件的加工质量劣化, 加快刀具磨损, 降低生产率。学者们提出不同的方式来抑制加工中的振动产生。

MATSUBARA 等^[97]通过在镗杆杆体上安装压电驱动器来抑制镗杆的振动。如图 17 所示, 安装在

镗杆上的压电驱动器和作为吸振器的电感—电阻电路对镗杆进行减振。设计了镗杆柔度的频率响应函数, 使其函数实部受到约束以抑制再生颤振。

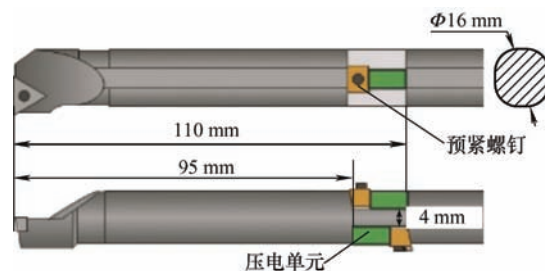


图 17 减振镗杆^[97]

在车削方面, RADECKI 等^[98]开发一种可以主动减振的智能刀架。刀架采用具有自适应正反馈控制算法的高带宽压电驱动器来抑制振动和颤振。EL-SINAWI^[99]通过在刀具和机床之间放置一个双驱动换能器(刀架)来减少机床振动的影响, 采用了一种最优控制算法来控制刀架对刀具施加调整载荷, 减少刀具在进给与切深方向振动。ZHANG 等^[100]提出一种混合误差准则频域 LMS 主动控制方法, 该方法提高了减振控制算法的适应性、抗干扰性和效率。仿真和实验结果表明, 该方法是一种有效、可靠的在线振动抑制方法, 能明显提高加工质量。

综合分析, 切削振动控制已经具有很多成熟的研究成果。但是振动反馈系统中的调控算法需要同源异构监测数据的融合来保证控制精度, 未来可着重研究监测、控制一体的智能减振刀具。

3.2.4 基于刀具磨损的补偿控制

在微细加工、超精密加工中, 刀具的磨损会使工件的尺寸与设定值不符, 影响零件的精度。而且加工中刀具的磨损会导致更大的切削力、切削温度。因此在对刀具磨损状态进行在线检测后, 需要通过特定的机构来偏移刀具位置实现对刀具磨损的补偿。

WANG 等^[101]通过建立振动信号与刀具磨损的联系, 拟合出刀具磨损程度随加工次数变化的曲线。根据磨损预测值, 自动修改 NC 代码进行刀具补偿。WANG 等^[102]利用 CCD 相机拍摄图像识别刀具与工件的位置误差, 并设计了一个误差补偿系统对测量的位置误差进行重新定位。GUO 等^[103]基于 Lipschitz 指数设计了刀具磨损补偿的方法, Lipschitz 指数用来描述信号的奇异性。通过比较刀具磨损不同阶段的 Lipschitz 指数来识别刀具磨损的不同阶段。针对刀具磨损第一阶段, 设计了一个微进给刀架机构进行刀具磨损补偿。为保证车削过程中工件的圆柱度, CHOUDHURY 等^[104]采用光纤位移传感器监测车削

后工件直径的变化来间接检测刀具磨损, 再通过步进电机控制刀具进给进行刀具磨损补偿。

现有的刀具磨损补偿机制有后补偿和实时补偿两种。后补偿无法保证加工精度, 实时补偿会遇到信号耦合问题, 即在进行磨损补偿后无法识别出刀具的磨损信号持续补偿。针对上述问题 WANG 等^[105]提出一种在线迭代学习补偿方法, 利用预测运动模型, 设计了动态前馈补偿, 实现对机床、刀具、机械手运动的实时修正。该方法拥有极强的抗干扰能力, 但其控制精度受预测模型显著影响。所以如何将数字孪生技术驱动的高精度模型融入到刀具磨损补偿中, 形成一个完美的闭环过程是实现刀具智能化需要努力的方向。

4 结论与展望

智能刀具系统是智能制造的重要保障, 智能刀具技术的发展关系着国家众多行业的发展, 更关系着国家的经济实力和综合国力的进步。推动智能刀具技术的发展, 提高加工效率, 改善加工效率, 实现智能化加工, 是新一代智能制造技术发展的关键。但是作为一个新兴技术, 智能刀具技术与实际的生产加工结合的还不够紧密, 同时智能刀具技术在未来发展也面临着新的机遇与挑战。

(1) 智能刀具技术与传统切削刀具相比, 功能范围更加广泛, 智能刀具不仅具备加工的功能, 还需要向着感知、分析、识别、预测、控制的多功能一体化发展。如何将这些功能完美的融合到智能刀具系统中, 是未来的研究热点。

(2) 数字孪生技术能够满足制造业不断增长的数字化需求, 它能够让企业或用户更好地了解生产过程。目前面向刀具的数字孪生技术还有待进一步的研究, 同时随着大数据技术、工业 4.0 等新兴技术的发展, 数字孪生驱动的智能刀具也会得到相应的发展。

(3) 目前的智能刀具大多采用单一传感器只对单一切削信号进行采集。单一种类的传感器往往无法准确表征切削过程的状态, 不充分的数据往往会让使用者对刀具状态进行错误判断。将智能刀具与多传感器技术融合, 能采集更丰富的信息, 分析各种信息的特点, 研究各种信息与加工状态的内在联系, 有助于更加准确地了解刀具状态。但多信号采集会出现信息交叉干扰等问题, 这还需要未来智能刀具系统的完善来解决。

(4) 智能的刀具控制方式面临着新的机遇和挑

战。现有的控制补偿技术没有和状态监测技术紧密联系。监测技术关系着刀具智能调控的准确性、实时性和稳定性。未来要着重发展监测、控制一体化的智能刀具。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工业联合会. 机械工业“十四五”发展纲要[EB/OL]. [2021-05-06]. <http://www.mei.net.cn/jxgy/202105/1620303069.html>.
China Machinery Industry Federation. Development outline of machinery industry in the 14th five year plan[EB/OL]. [2021-05-06]. <http://www.mei.net.cn/jxgy/202105/1620303069.html>.
- [2] 刘强, 张海军, 刘献礼, 等. 智能刀具研究综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 248-268.
LIU Qiang, ZHANG Haijun, LIU Xianli, et al. A review of research on intelligent cutting tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 248-268.
- [3] MOHANRAJ T, SHANKAR S, RAJASEKAR R, et al. Tool condition monitoring techniques in milling process — a review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(1): 1032-1042.
- [4] JEMIELNIAK K, KOSMOL J. Tool and process monitoring-state of art and future prospects[J]. Scientific Papers of the Institute of Mechanical Engineering and Automation of the Technical University of Wroclaw, 1995, 61: 90-112.
- [5] 刘献礼, 李雪冰, 丁明娜, 等. 面向智能制造的刀具全生命周期智能管控技术[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 196-219.
LIU Xianli, LI Xuebing, DING Mingna, et al. Intelligent management and control technology of cutting tool life-cycle for intelligent manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 196-219.
- [6] 姜峰. 数值仿真之金属切削有限元仿真仿真精度保障原理及其实现[EB/OL]. [2020-03-12]. <https://live.eyunbo.cn/live/38247?uin=1729>.
JIANG Feng. The principle of precision assurance of finite element simulation of metal cutting in numerical simulation and its implementation[EB/OL]. [2020-03-12]. <https://live.eyunbo.cn/live/38247?uin=1729>.
- [7] 肖才伟. 基于切削力感知的智能切削刀具设计及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
XIAO Caiwei. Design and key technologies research of smart cutting tool based on cutting force sensing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

- [8] 李元祥. 集结于刀柄的切削力实时感知系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- LI Yuanxiang. Research on real-time sensing system of cutting force assembled on tool holder. [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [9] 赵友, 葛晓慧, 赵玉龙. 高精度动态切削力自感知智能刀具的研究[J]. 机械工程学报, 2020, 55(21): 178-185.
- ZHAO You, GE Xiaohui, ZHAO Yulong. Research on high precision dynamic cutting force self-perception intelligent tool[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 55(21): 178-185.
- [10] ZHAO Y, ZHAO Y, WANG C, et al. Design and development of a cutting force sensor based on semi-conductive strain gauge[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 237: 119-127.
- [11] WANG X V, WANG L. Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3892-3902.
- [12] SCHLUSE M, PRIGGEMEYER M, ATORF L, et al. E-xperimentable digital twins-Streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1722-1731.
- [13] LUO W, HU T, ZHANG C, et al. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1129-1140.
- [14] ZHANG H, LIU Q, CHEN X, et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line[J]. IEEE Access, 2017, 5: 26901-26911.
- [15] ZHUANG C, LIU J, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1): 1149-1163.
- [16] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405-2415.
- [17] KONG T, HU T, ZHOU T, et al. Data construction method for the applications of workshop digital twin system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 323-328.
- [18] BOTKINA D, HEDLIND M, OLSSON B, et al. Digital twin of a cutting tool[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 215-218.
- [19] TONG X, LIU Q, PI S, et al. Real-time machining data application and service based on IMT digital twin[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(5): 1113-1132.
- [20] BYRNE G, DORNFELD D, INASAKI I, et al. Tool condition monitoring (TCM)—the status of research and industrial application[J]. CIRP Annals, 1995, 44(2): 541-567.
- [21] AMBHORE N, KAMBLE D, CHINCHANIKAR S, et al. Tool condition monitoring system: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(4-5): 3419-3428.
- [22] KUNTOĞLU M, SAĞLAM H. Investigation of signal behaviors for sensor fusion with tool condition monitoring system in turning[J]. Measurement, 2021, 173: 108582.
- [23] LIAO Y S. Development of a monitoring technique for tool change purpose in turning operations[C]//Proceedings of the Twenty-Sixth International Machine Tool Design and Research Conference. Palgrave, London, 1986: 331-337.
- [24] AL-SULAIMAN F A, BASEER M A, Sheikh A K. Use of electrical power for online monitoring of tool condition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3): 364-371.
- [25] AXINTE D, GINDY N. Assessment of the effectiveness of a spindle power signal for tool condition monitoring in machining processes[J]. International journal of production research, 2004, 42(13): 2679-2691.
- [26] FRANCO-GASCA L A, HERRERA-RUIZ G, PENICHE-VERA R, et al. Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(3-4): 381-386.
- [27] EYNIAN M, DAS K, WRETLAND A. Effect of tool wear on quality in drilling of titanium alloy Ti6Al4V, Part I: Cutting forces, burr formation, surface quality and defects[J]. High speed mach, 2017, 3(1): 1-10.
- [28] ZHUANG C, LIU J, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1): 1149-1163.
- [29] DIMLA SR D E, LISTER P M. On-line metal cutting tool condition monitoring I: Force and vibration analyses[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(5): 739-768.

- [30] OSTASEVICIUS V, JURENAS V, AUGUTIS V, et al. Monitoring the condition of the cutting tool using self-powering wireless sensor technologies[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(9): 2803-2817.
- [31] LIANG Q, ZHANG D, WU W, et al. Methods and research for multi-component cutting force sensing devices and approaches in machining[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1926.
- [32] RIZAL M, GHANI J A. Design and construction of a strain gauge-based dynamometer for a 3-axis cutting force measurement in turning process[J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 2018, 12(4): 4072-4087.
- [33] ZHAO Y, ZHAO Y L, SHAO Y W, et al. Research of a smart cutting tool based on MEMS strain gauge[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2018, 986(1): 012016.
- [34] GONG T, ZHAO Y, ZHAO Y, et al. Design and manufacturing of a high-sensitivity cutting force sensor based on AlSiCO ceramic[J]. Micromachines, 2021, 12(1): 63.
- [35] HUANG J, PHAM D T, JI C, et al. Smart cutting tool integrated with optical fiber sensors for cutting force measurement in turning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(4): 1720-1727.
- [36] CHENG K, NIU Z C, WANG R C, et al. Smart cutting tools and smart machining: development approaches, and their implementation and application perspectives[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1162-1176.
- [37] XIAO C W, CHENG K, DING H, et al. Design and analysis of a self-sensing smart cutting tool integrated piezoelectric films for cutting force monitoring in ultra-precision machining[C]//2013 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications. IEEE, 2013: 1-4.
- [38] CHEN X, CHENG K, WANG C. Design of a smart turning tool with application to in-process cutting force measurement in ultraprecision and micro cutting[J]. Manufacturing Letters, 2014, 2(4): 112-117.
- [39] 李文德, 丁辉, 程凯. 基于声表面波原理的切削力测量智能刀具研究[J]. 机械制造与自动化, 2014, 43(5): 46-50.
- LI Wende, DING Hui, CHENG Kai. Research on force measuring smart cutting tool based on surface acoustic wave resonator principle[J]. Machine Building & Automation, 2014, 43(5): 46-50.
- [40] WANG C, CHENG K, CHEN X, et al. Design of an instrumented smart cutting tool and its implementation and application perspectives[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(3): 035019.
- [41] XIE Z, LU Y, LI J. Development and testing of an integrated smart tool holder for four-component cutting force measurement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93: 225-240.
- [42] WU F, LI Y, GUO B, et al. The design of force measuring tool holder system based on wireless transmission[J]. IEEE Access, 2018, 6: 38556-38566.
- [43] SZULEWSKI P, NIEGULSKA-GRDZKA D, NEJMAN M. Intelligent sensors in modern machine tools[J]. Mechanik, 2019, 92(11): 686-692.
- [44] LONGBOTTOM J M, LANHAM J D. Cutting temperature measurement while machining—a review[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2005.
- [45] 查旭明. 双层与纳米多层结构 TiSiN/TiAlN 涂层的力学及切削性能研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2020.
- ZHA Xuming. Mechanical and cutting properties of bilayer and nano-multilayer structures of TiSiN/TiAlN coatings[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2020.
- [46] SUDIANTO A, JAMALUDIN Z, RAHMAN A A A, et al. Automatic Temperature Measurement and Monitoring System for Milling Process of AA6041 Aluminum Alloy using MLX90614 Infrared Thermometer Sensor with Arduino[J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2021, 82(2): 1-14.
- [47] LIN J, LIU C Y. Measurement of cutting tool temperature by an infrared pyrometer[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(8): 1243.
- [48] KUS A, ISIK Y, CAKIR M C, et al. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting[J]. Sensors, 2015, 15(1): 1274-1291.
- [49] 郭必成, 王福增, 黄辉, 等. 金属切削仿真的驱动模型及其耦合机制研究[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2022: 1-18[2022-03-22].
- GUO Bicheng, WANG Fuzeng, HUANG Hui, et al. Driving model and coupling mechanism of metal cutting simulation[J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022: 1-18[2022-03-22].
- [50] SEEMANN K, BEIRLE S, THEDE C, et al. Contactless monitoring of temperature change in cutting inserts by

- application of hard coatings and ferromagnetic film sensor phases[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 296: 278-285.
- [51] HAN J, CAO K, XIAO L, et al. In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer[J]. *Measurement*, 2020, 156: 107595.
- [52] LI T, SHI T, TANG Z, et al. Real-time tool wear monitoring using thin-film thermocouple[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 288: 116901.
- [53] LI J, TAO B, HUANG S, et al. Cutting tools embedded with thin film thermocouples vertically to the rake face for temperature measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 296: 392-399.
- [54] KESRIKLIOGLU S, ARTHUR C, MORROW J D, et al. Characterization of tool-chip interface temperature measurement with thermocouple fabricated directly on the rake face[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141(9): 091008.
- [55] WERSCHMOELLER D, LI X. Measurement of tool internal temperatures in the tool-chip contact region by embedded micro thin film thermocouples[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2011, 13(2): 147-152.
- [56] CUI Y, LIU Q, WANG L, et al. Research on milling temperature measuring tool embedded with NiCr/NiSi thin film thermocouple[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 72: 1457-1462.
- [57] SHINOZUKA J, BASTI A, OBIKAWA T. Development of cutting tool with built-in thin film thermocouples for measuring high temperature fields in metal cutting processes[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(3).
- [58] CHUNG T K, YEH P C, LEE H, et al. An attachable electromagnetic energy harvester driven wireless sensing system demonstrating milling-processes and cutter-wear/breakage-condition monitoring[J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 269.
- [59] SUPROCK C A, FUSSELL B K, HASSAN R Z, et al. A low cost wireless tool tip vibration sensor for milling[C]//*International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008, 48517: 465-474.
- [60] 刘海军. 面向铣削过程的无线测振刀柄的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LIU Haijun. Research for key technology of vibration-detecting and wireless-transmitting tool holder in milling process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [61] 陈奇伟. 面向铣削加工的测振刀柄设计与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- CHEN Qiwei. Design and experimental study of vibration-measuring tool handle for milling. [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [62] DEVILLEZ A, DUDZINSKI D. Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2007, 21(1): 441-456.
- [63] MIN B K, O'NEAL G, KOREN Y, et al. A smart boring tool for process control[J]. *Mechatronics*, 2002, 12(9-10): 1097-1114.
- [64] ASLAN D, ALTINTAS Y. On-line chatter detection in milling using drive motor current commands extracted from CNC[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 132: 64-80.
- [65] ZHA X, JIANG F, XU X. Investigating the high frequency fatigue failure mechanisms of mono and multilayer PVD coatings by the cyclic impact tests[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 689-701.
- [66] GUO Bicheng, JIANG Feng, YAN Lan, et al. Research on the analytical modeling of critical conditions of serrated Chip formation based on thermal-mechanical coupled material behavior[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 68: 71-84.
- [67] KULJANIC E, TOTIS G, SORTINO M. Development of an intelligent multisensor chatter detection system in milling[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(5): 1704-1718.
- [68] WANG J, XIE J, ZHAO R, et al. Multisensory fusion based virtual tool wear sensing for ubiquitous manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2017, 45: 47-58.
- [69] BINSAEID S, ASFOUR S, CHO S, et al. Machine ensemble approach for simultaneous detection of transient and gradual abnormalities in end milling using multisensor fusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(10): 4728-4738.
- [70] WANG W H, HONG G S, WONG Y S, et al. Sensor fusion for online tool condition monitoring in milling[J]. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(21): 5095-5116.
- [71] 巩亚东, 吕洋, 王宛山, 等. 基于多传感器融合的磨削砂轮钝化的智能监测[J]. *东北大学学报*, 2003(3):

- 248-251.
- GONG Yadong, LÜ Yang, WANG Wanshan, et al. Intelligent monitoring for grinding wheel passivation based on multi-sensor fusion[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2003(3): 248-251.
- [72] CHEN S L, JEN Y W. Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(3): 381-400.
- [73] BAH R B, MOTAVALLI S, ARFI T. Sensor fusion for monitoring machine tool conditions[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1997, 10(5): 314-323.
- [74] SINGH A, THAKUR N, SHARMA A. A review of supervised machine learning algorithms[C]//2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). IEEE, 2016: 1310-1315.
- [75] GU J, WANG Z, KUEN J, et al. Recent advances in convolutional neural networks[J]. Pattern Recognition, 2018, 77: 354-377.
- [76] LIU C, WANG G F, LI Z M. Incremental learning for online tool condition monitoring using Ellipsoid ARTMAP network model[J]. Applied Soft Computing, 2015, 35: 186-198.
- [77] BOUHALAIS M L, NOUIOUA M. The analysis of tool vibration signals by spectral kurtosis and ICEEMDAN modes energy for insert wear monitoring in turning operation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(9): 2989-3001.
- [78] GOMES M C, BRITO L C, DA SILVA M B, et al. Tool wear monitoring in micromilling using Support Vector Machine with vibration and sound sensors[J]. Precision Engineering, 2021, 67: 137-151.
- [79] KANNAN K, ARUNACHALAM N, CHAWLA A, et al. Multi-sensor data analytics for grinding wheel redress life estimation-an approach towards industry 4.0[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 1230-1241.
- [80] HUANG Z, ZHU J, LEI J, et al. Tool wear predicting based on multi-domain feature fusion by deep convolutional neural network in milling operations[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(4): 953-966.
- [81] MA M, SUN C, CHEN X, et al. A deep coupled network for health state assessment of cutting tools based on fusion of multisensory signals[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6415-6424.
- [82] CHEN J C, CHEN W L. A tool breakage detection system using an accelerometer sensor[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 1999, 10(2): 187-197.
- [83] CHO S, ASFOUR S, ONAR A, et al. Tool breakage detection using support vector machine learning in a milling process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(3): 241-249.
- [84] LI G, YANG X, CHEN D, et al. Tool breakage detection using deep learning[C]// 2018 IEEE International Conference on Big Data, Cloud Computing, Data Science & Engineering (BCD). IEEE, 2018.
- [85] 田效康. 基于数字孪生的机床加工过程虚拟仿真监控系统研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- TIAN Xiaokang. Research and implementation of virtual simulation monitoring system for machine tool machining process based on digital twin[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [86] ZHAO P, LIU J, JING X, et al. The modelling and using strategy for the digital twin in process planning[J]. IEEE Access, 2020, PP(99): 1-1.
- [87] XIE Y, LIAN K, LIU Q, et al. Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 305-312.
- [88] ZHANG G, SUN H. Enabling cutting tool services based on in-process machining condition monitoring[J]. International Journal of Internet Manufacturing and Services, 2018, 5(1): 51-66.
- [89] 孙惠斌, 潘军林, 张纪铎, 等. 面向切削过程的刀具数字孪生模型[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1474-1480.
- SUN Huibin, PAN Junlin, ZHANG Jiduo, et al. Digital twin model for cutting tools in machining [J]. Computer integrated manufacturing system. 2019, 25(6): 1474-1480.
- [90] SUN H, CAO D, ZHAO Z, et al. A hybrid approach to cutting tool remaining useful life prediction based on the Wiener process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(3): 1294-1303.
- [91] HERRERA-GRANADOS G, MORITA N, HIDAI H, et al. Development of a non-rigid micro-scale cutting mechanism applying a normal cutting force control system[J]. Precision Engineering, 2016, 43: 544-553.
- [92] ROBER S J, SHIN Y C, NWOKAH O D I. A digital robust controller for cutting force control in the end milling process[J]. 1997
- [93] SHU S R, DING H, CHEN S J, et al. FEM-based design

- and analysis of a smart cutting tool with internal cooling for cutting temperature measurement and control[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 217: 1874-1879.
- [94] SHU S, CHENG K, DING H, et al. An innovative method to measure the cutting temperature in process by using an internally cooled smart cutting tool[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2013, 135(6).
- [95] ÖZTÜRK E, YILDIZLI K, SAĞLAM F. Investigation on an innovative internally cooled smart cutting tool with the built-in cooling-control system[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(3): 2397-2411.
- [96] SUN X, BATEMAN R, CHENG K, et al. Design and analysis of an internally cooled smart cutting tool for dry cutting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(4): 585-591.
- [97] MATSUBARA A, MAEDA M, YAMAJI I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 373-376.
- [98] RADECKI P P, FARINHOLT K M, PARK G, et al. Vibration suppression in cutting tools using a collocated piezoelectric sensor/actuator with an adaptive control algorithm[J]. Journal of vibration and acoustics, 2010, 132(5).
- [99] EL-SINAWI A H. Two-dimensional vibration suppression in turning using optimal control of the cutting tool[J]. International Journal of Machining and Machinability of Materials, 2008, 3(1-2): 91-103.
- [100] ZHANG X, WANG C, GAO R X, et al. A novel hybrid error criterion-based active control method for on-line milling vibration suppression with piezoelectric actuators and sensors[J]. Sensors, 2016, 16(1): 68.
- [101] WANG S M, CHEN Y S, LEE C Y, et al. Methods of in-process on-machine auto-inspection of dimensional error and auto-compensation of tool wear for precision turning[J]. Applied Sciences, 2016, 6(4): 107.
- [102] WANG S M, LIN J J, YE Z Z, et al. A micro cutter auto-alignment system with on-machine positioning error measurement and compensation methods[J]. International journal of precision engineering and manufacturing, 2014, 15(1): 177-182.
- [103] GUO H, XIONG G, XI F, et al. Detection and compensation of cutting tool wear based on Lipschitz exponent[C]//Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005. IEEE, 2005: 1662-1667.
- [104] CHOUDHURY S K, JAIN V K, RAMA KRISHNA S. On-line monitoring of tool wear and control of dimensional inaccuracy in turning[J]. J. Manuf. Sci. Eng., 2001, 123(1): 10-1.
- [105] WANG Z, ZHOU R, HU C, et al. Online iterative learning compensation method based on model prediction for trajectory tracking control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(1): 415-425.

作者简介: 叶文昌, 男, 1999 年生。主要研究方向为刀具设计技术、数值仿真技术。

E-mail: ywc13645003959@163.com

姜峰(通信作者), 男, 1981 年生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为精密超精密加工技术、切削过程数值仿真技术、刀具设计技术。

E-mail: jiangfeng@hqu.edu.cn