

# 智能加工工艺引领未来机床 发展方向

Intelligent Machining Process Leads Future Direction of Machine Tools

西北工业大学 张定华 侯永锋 杨沫 吴宝海  
中航工业西安航空动力股份有限公司 刘智武



张定华

现代设计与集成制造技术教育部重点实验室主任,教授,博士生导师。主要研究方向为高速切削工艺、航空复杂零件的高效精密数控加工、智能加工及无损检测等。

在高性能、难加工材料零件的加工过程中必须采用智能加工工艺,对加工系统、时变工况进行在线监测,获取加工过程的状态信息。在此基础上,针对实时工况变化采用智能化方法对工艺过程进行自主学习及决策控制,实现高品质零件制造过程的智能决策和自主控制。最大限度地提高加工质量、加工效率,减少或者避免不必要的损失,降低生产成本。

数控机床是现代装备制造业的工作母机,是实现制造技术和装备现代化的根本。同时,数控机床作为国防军工的战略装备,也是实现国防军工现代化的重要保证。因此,国际上一些发达国家一直把高性能数控机床作为战略物资而严加控制,限制我国进口高性能数控机床。

在数控机床问世的60多年里,它一直朝着高速化、高精化和复合化的方向发展。然而,在现代航空航天领域,尤其是航空发动机中,由于其性能要求高、结构复杂,越来越多地采用了各种难加工材料。该类材料抗高温、抗腐蚀等综合性能优异,但可加工性差。采用传统方法加工该

类零件时,由于无法在线监测加工过程中力-热-变形场的分布特点,不能实时掌握加工中工况的时变规律,并针对工况变化即时决策,引起加工前后材料表面力学性能变化大,加工变形难以控制,质量一致性难以保证,导致零件服役性能差、寿命短,甚至引发安全事故。

因此,在高性能、难加工材料零

过程控制的难度。因此,必须引进智能加工理念,将机床与加工过程一起考虑,对交互作用进行建模与仿真,进而优化加工过程、改进加工系统设计,减少加工过程中的缺陷。这就要求未来机床具备加工系统状态监测、时变工况监测、在线学习与知识积累以及智能决策与控制等功能。智能化的加工过程如图1所示。

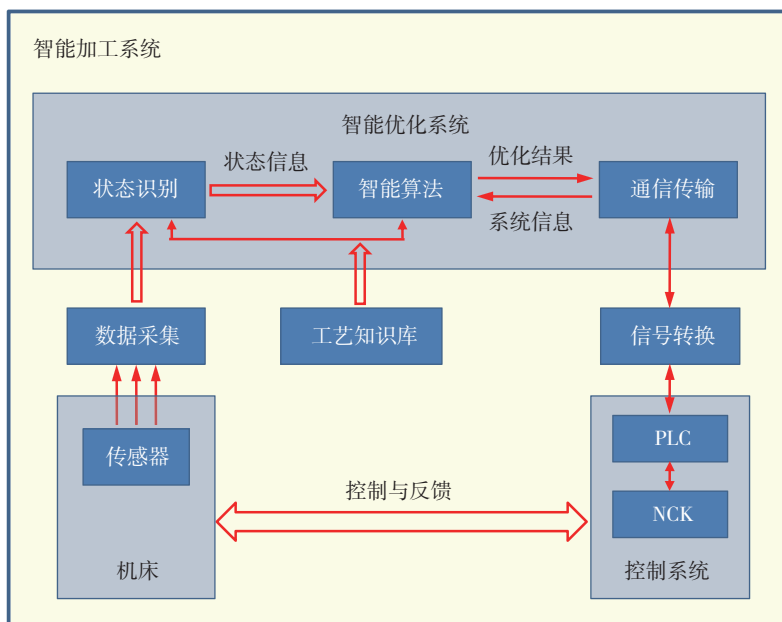


图1 智能化的加工过程

件的加工过程中必须采用智能加工工艺,对加工系统、时变工况进行在线监测,获取加工过程的状态信息。在此基础上,针对实时工况变化采用智能化方法对工艺过程进行自主学习及决策控制,实现高品质零件制造过程的智能决策和自主控制。最大限度地提高加工质量、加工效率,减少或者避免不必要的损失,降低生产成本。

### 智能加工工艺 对未来机床的要求

传统加工过程中,一般只考虑数控机床或者加工过程本身,缺乏对机床与加工过程中交互作用机理的综合理解。而这种交互作用又经常产生难以预知的效果,大大增加了加工

#### 1 系统状态监测

在加工过程中,电动机的旋转、移动部件的移动和切削等都会产生热量,且温度分布不均匀,造成数控机床产生热变形,影响零件加工精度。因此未来数控机床应具备热误差监测功能,以识别主轴、立柱和床身热变形的影响,提高机床加工精度。刀具失效是引起加工过程中断的首要因素。实践表明,切削中实施刀具的有效监测可以减少机床故障停机70%,提高生产效率10%~60%,提高机床利用率50%以上。实现刀具磨损和破损的自动监测是完善未来机床发展不可缺少的部分。

现代数控加工技术的特点是生产率高、稳定性好、灵活性强,依靠人工监视系统的状态已远远不能满足

智能化程度日益提高的要求。智能化的加工过程应该借助先进的传感分析技术对机床与刀具状态进行实时监测,并将监测数据反馈给控制系统进行数据的分析与误差补偿。可定期通过测试设备与传感器测定设备的性能参数,并及时对系统性能参数库或知识库进行更新。

#### 2 时变工况监测

在加工过程中,切削界面上的热力耦合效应与材料、结构、加工过程具有较强的相关性,导致传统方法难以建立精确的工艺模型。由模型不精确导致的工艺过程预测和控制误差对产品质量造成严重的影响。因此,未来机床需要将试切融入到加工过程中,实时获取加工过程中的界面状态和交互行为信息,并对时变工况特征进行在线辨识,为加工过程的智能决策提供基础数据。

时变工况在线监测可借助各种传感器、声音和视频系统对加工过程中的力、振动、噪声、温度、工件表面质量等进行实时监测。根据监测信号和预先建立的多个模型判定实际加工参数、工件变形、振动状态以及加工质量,为工艺模型的在线学习与切削参数优化、加工误差补偿等智能决策过程提供支持。

#### 3 在线学习与知识积累

由于在强热力耦合的加工过程中,传统方法难以建立精确的工艺模型。因此,需要在监测识别加工过程的时变工况后,通过工艺知识在线学习的方法来精化局部的工艺过程模型。同时将获得的工艺知识存储于工艺知识库中,供工艺过程优化使用。

在探明工艺系统界面的热力耦合作用与系统响应机制,建立强时变工艺过程的多态演化模型的基础上,建立描述工况、耦合行为和工件品质映射关系的联想记忆知识模板,通过自主学习实现基于模板的知识积累和工艺模型的自适应进化,为未来机

床智能决策单元提供理论支撑。

#### 4 智能决策与控制

未来机床应该能够在复杂的加工环境中、在无人干预的条件下自主有效的工作,这就需要控制系统具有类似于人类的信息处理能力,即面向实际工况的智能决策与工艺过程自适应调控。

在加工过程中,加工系统对加工过程进行实时监测,控制系统根据监测得到的实际工况以及学习获得的工艺知识对工艺参数进行在线优化与反馈控制。同时根据建立的切削过程工艺系统演化模型,结合工件的加工状态实时调整夹具的装卡参数。

### 未来机床应具备的硬件模块

为了满足智能加工工艺的功能需求,未来机床除了传统机床已有的结构部件外,还应该集成传感器、采集系统、网络化存储等硬件模块。

#### 1 传感器

智能加工工艺需要通过实时监测加工过程来获得信息。在线监测直接面向加工过程,与机床和工装相联系。因此,适用于加工过程的具有高实时性、高精度和高可靠性的传感器是在线监测的关键。可用于加工过程监测的传感器主要有:功率传感器、力传感器、扭矩传感器、声发射传感器、振动传感器、机器视觉和激光测量。

##### (1) 功率传感器。

加工过程中的机床主轴或者驱动电机的功率可以通过功率传感器获得,根据监测到的功率数据,可对功率变化中出现的波动、尖峰及突变进行判断和预测,从而通过相关算法对功率曲线做平滑处理。此外,主轴有效功率可以表征刀具的切削力,根据切削力与主轴功率的关系,可将实时监测到的主轴功率转换为刀具的切削力,从而获得切削力的实时数据。

##### (2) 力传感器。

为实现对切削加工过程的可靠

监测,需要对金属切屑分离过程所产生的力进行精确地测量和分析,从而识别出切削过程中出现的缺陷,如刀具磨损或断裂,以及加工工件的损伤。切削力的测量可以采用直接法或间接法测量。在直接测量方法中,传感器安装在力的通道中,测量全部力。测量非常准确,与力的作用点无关;在间接测量方法中,部分力通过旁路传递。由于只有部分力作用在传感器上,间接测力系统安装后需要标定,系统的灵敏度与力的作用点有关。

##### (3) 扭矩传感器。

相对于有效功率,主轴扭矩能够更准确地表征刀具的切削状态。直接测量机床主轴的扭矩可以获得更精确的切削状态。钻孔、攻丝和多主轴加工过程的监测使用测量主轴扭矩的方法来获得切削状态尤为有效。在多主轴加工过程中,每一个主轴上的切削过程所消耗的功率都比总的功率小得多。因此在这种情况下就不能用有效功率来表征切削状态。而通过主轴扭矩来表征切削状态就不存在这样的问题。

##### (4) 声发射传感器。

在切削过程中当刀具断裂时,会产生声发射信号。声发射传感器能监测到在切削过程中产生的声发射信号,通过分析监测到的信号可以获得刀具的信息。在加工过程中传感器可以监测到非常小的声发射信号,再与有效功率或者主轴扭矩相结合,能够可靠地监测到刀具的破损。尤其是在大型机床中监测非常小的刀具和多主轴加工过程,更能突显出声发射传感器的优势。

##### (5) 振动传感器。

在切削过程中掉刀、刀具破坏、机械碰撞等会产生异常的振动。振动传感器可以监测切削过程中机床结构产生的振动,通过分析振动可以监测到掉刀、刀具破坏、工件超差、机械碰撞和严重的过程故障。振动传

感器也可以监测机床主轴的振动,为加工过程中的振动预测与控制提供数据。

##### (6) 机器视觉。

在多主轴加工过程中,分别监测每个主轴成本比较高。这种情况下,可以采用摄像头监测全部主轴。摄像头可以监测20个或更多不同的主轴。在多钻头加工中摄像头可以监测每一个钻头的掉刀和破损。监测系统在学习的时候,记录并且存储多钻头的图像,在监测过程中通过比较轮廓来监测每一个钻头。当光学识别系统性能优于基于其他传感器的系统时,它可以用于更多的过程监测,如检查工装、位置、完整性等。

##### (7) 激光测量。

当切削刀具过于细小时,出现异常情况引起的波动比较小,使用功率传感器、力传感器无法监测,或者没有合适的位置安装声发射传感器时,可以使用激光光栅。激光光栅可以提供一套可靠的刀具掉刀和破损监测方案。激光光栅也可以监测机床热变形,如监测加工中心主轴的长度变形。激光的另一个应用是,通过分析工件的反射光监测工件的粗糙度、颤振、切削的波纹等。

### 2 数据采集系统

传感器在加工现场采集到的模拟信号一般为模拟电信号,是不能被监测系统直接使用的,需要转化为数字信号进而转换为有实际意义的物理量。转换过程一般包括转换、放大、滤波、平滑等,这个转换过程需要信号处理的技术支持。

一般力、声发射和振动传感器都是压电型传感器,需要前置放大器把传感器的电荷信号转换成成正比例的电压信号。声发射放大器从传感器获得原始信号,并提供信号的学习条件、分析方法来增强声发射监测。通过使用放大、过滤和均方根平均,将原始声发射信号转换成有价值的声发射信号,可以在较低的频率下可

视化和监测。此外,振动放大器可配备有过滤器和均方根转换器,可以过滤掉无意义的噪声获得振动信息。通过数据采集卡对处理过的信号进行采集转换成数字信号,供检测系统使用。

络,实现各个机床设备之间的数据及工艺知识的共享。通过网络实现对设备的远程控制和无人化操作、远程加工程序传输,能够有效提高机床生产率。网络化开放式数控系统与传统数控系统的比较见表1。

表1 网络化开放式数控系统与传统数控系统的比较

比较项	传统数控系统	网络化开放式数控系统
系统结构	专用硬件,专用软件,用户可控性弱	基于PC的硬件,基于通用操作系统的控制软件,用户可根据需要进行配置
软件开发	软件为CNC制造商独占,用户难于进行二次开发以引进独创部分	开放的软件平台,用户可以根据工艺需求开发自己的功能模块
网络支持	专用硬件和专有通讯技术,联网实现难度大	基于通用网络技术,联网容易实现,针对工艺的个性化定制更容易实现
PLC软件	制造商专用PLC,难以移植,维修困难	使用符合标准的PLC,可移植性强,容易开发

### 3 网络化的数据存储设备

智能化的加工过程需要对加工过程进行实时监测与分析,监测过程会产生巨大的数据量。因此,基于网络云端的大数据量存储设备在未来机床中是不可或缺的。网络化存储分摊了数据处理和存储管理的功能,计算机负责数据处理,而存储子系统负责数据的存储和管理。网络化存储是将存储设备连接到现有的网络上,来提供数据存储和文件访问服务。

网络化存储具有多个机床的数据集成管理;存储部署简单,设备位置灵活;管理容易且成本低等优点。

## 未来机床控制系统应具备的功能模块

为了满足智能加工工艺的功能需求,未来机床应该采用网络化开放式的控制系统。网络化开放式的控制系统除了具备传统数控系统的功能,还应该具有信息融合与状态识别、工艺知识管理、在线学习与工艺过程优化、工艺过程反馈控制等功能模块。

### 1 网络化开放式的控制系统

所谓网络化的数控系统,指的是数控系统与系统外的其他控制系统或外部上位电脑可以连结成控制网

### 2 信息融合与状态识别

由于加工过程中切削条件和切削状态的多样性,导致对切削过程进行准确监控非常困难。传统的基于单一传感器的测量和分析往往难以保证识别精度。为了能够更准确的获得加工过程的状态信息,需要使用多个相同或不同的传感器从不同的方面进行测量。利用不同传感器测量和输出信息的互补性,采用多传感器集成和信息融合技术,将描述同一个加工系统的多个物理量整合成系统的状态向量,为系统的分析与诊断提供更全面的信息,使监测结果更加真实、可靠。

最简洁的多传感器信息融合方法是,将每个传感器的测量数据单独输入到融合系统中,如果每个传感器所提供的信息反映的是环境中完全不同的方面,那么可以将每个传感器提供的信息直接转换为加工系统状态向量的不同分量。该方法的主要优点是融合算法简单,运算量小。如果传感器所提供的环境信息出现重叠,以及可能出现信息的冗余、矛盾和相关,甚至出现其中的某个传感器影响其它传感器的工作,则来自不同传感器的信息就必须在多种表达层次上进行融合,最终获得加工系统的

状态向量。在这种情况下,多传感器信息融合能获得更精确的状态信息。多传感器信息融合主要有以下几个方面的优点:提高了信息的可信度、增加了系统状态向量的维数、提高了系统的容错能力。

### 3 工艺知识管理

基于数据库技术的工艺知识库主要包括机床、刀具、工件材料、冷却润滑、加工匹配、零件特征、切削参数、运行状态等信息。其中机床、刀具、工件材料、冷却润滑、加工匹配、零件特征给出了工艺系统的基本信息,切削参数、运行状态描述了工艺系统在不同工艺参数下的运行状态信息。工艺知识库是工程实践中经验数据长期积累的结果,具有实际应用价值,可以为专家系统的决策提供工程经验。

### 4 在线学习与工艺过程优化

控制系统获得了加工系统的状态信息之后,综合分析加工过程中监测到的数据,获取加工过程中的振动、切削力、切削温度、刀具磨损、加工变形等数据,与理想的加工状态对比。将实际状态和理想状态信息交给内部专家系统处理,专家系统的推理机读取知识库中的经验数据和加工系统自身的信息,分析加工系统的状态信息来判断加工系统的运行状态是否理想。专家系统将机床、刀具、工件材料、冷却润滑、加工匹配、零件特征等工艺系统信息与工艺参数、运行状态选取优化规则,以工艺系统当前的运行状态、切削参数、加工过程振动、变形等因素为基本事实,依据加工过程理论模型及工艺参数库中的经验数据进行演绎推理,最终得到系统当前的优化参数。同时,专家系统将参数调整后的系统状态响应作为新的工艺知识存储于工艺知识库中。在使用过程中工艺知识库逐渐完善,为工艺过程识别与优化提供强有力的支持。

### 5 工艺过程反馈控制

未来机床的控制系统应该能够根据专家系统的优化结果对主轴转速及进给速度进行实时调整。在对主轴转速及进给速度进行调整时,具有完善的调整策略,避免工艺参数突变对加工工件表面质量的影响。还应该能够根据专家系统的优化实时调整智能夹具的预紧力以及装夹的阻尼状态,以抑制加工过程中的振动,提高产品的质量。同时需要对用户开放工艺过程实时控制的外部接口,为针对具体工艺的个性化功能定制提供有效途径。

### 智能机床的技术现状

制造科学与人工智能的交叉和融合,激发了世界各国科学家对智能制造的研究热情,并孕育着制造技术与装备的又一次革命。Mazak、Okuma、Mikron、沈阳机床等国内外各大机床厂商已经开展了研发智能机床的尝试,其典型产品及特点如下。

#### 1 Mazak 的 e 系列智能机床

Mazak 的智能机床能够对自己进行监控,可自行分析众多与机床、加工状态、环境有关的信息及其他因素,能够自行采取应对措施来保证最优化的加工。当前 Mazak 的智能机床能实现以下四大智能:主动振动控制功能,可将机床加工过程中的振动减至最小;智能热屏障技术,实现加工中机床的热位移控制;智能安全屏障,用于防止机床与刀具之间的碰撞;语音提示功能,便于用户操作和使用。

#### 2 Okuma 的 thinc 智能化数控系统

Okuma 的智能化数控系统 thinc (图 2) 不仅可以在不受人干预的情况下,对变化情况做出决策,还可使机床投入使用后,以增量的方式使其功能在应用中不断自行增长,并会更加适应新的情况和需求,易于编程和使用。

#### 3 Mikron 的智能机床模块

目前,Mikron 智能机床(图 3)共



图2 Okuma的thinc新型数字控制器

推出了 4 个功能模块:高级工艺控制系统(APS)、智能热控制系统(ITC)、智能操作者支持系统(OSS)和无线通知系统(RNS)。“无线通知系统”模块开启了通信和灵活性的新纪元。通过这一系统,用户能接收米克朗加工中心的运行情况信息。通过移动电话的短信形式,用户就能知道机床的操作状态和程序执行状态。



图3 MIKRON XSM 600U 高速铣削加工中心

#### 4 GE Fanuc 的效率机床 4.0

GE Fanuc 公司引入的一套监控和分析方案也是智能机床的典型例子,一种名为效率机床 4.0 的基于互联网的智能化方案(图 4)在 2006 年 9 月的 IMTS 展览会得以展示。该方案通过收集机床和其他设备的基本数据进而给出分析方法。它还提供了一套远程诊断工具,从而使故障平均间隔时间尽量延长。

#### 5 沈阳机床的 i5 系统

沈阳机床中捷立式加工中心事业部将 i5 数控系统搭载到立式车床、立式钻攻中心和立式加工中心等产品上,推出了具有自动对刀、特征编程、加工仿真、实时监控、智能诊断、远程控制等功能的智能机床(图 5),可实现网络智能制造以及工厂分布式、分级式布局,引领机床行业进入“智能制造”领域。



图4 GE Fanuc智能平台

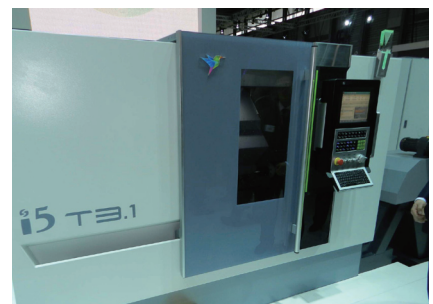


图5 新一代i5-T3.1机床

### 结束语

数控机床从诞生以来已经有了长足的发展。进入 21 世纪以来,数控机床在现有技术基础上,已经逐渐由机械运动的自动化向信息控制的智能化方向发展。但是,数控机床目前的智能化程度尚难以满足高品质零件智能加工工艺的需求。未来数控机床应该在工艺过程中加工系统状态及时变工况的自动获取、工艺知识的组织管理、系统参数的智能优化控制等方面进行全面而深入的研究。智能加工工艺驱动的智能制造系统将是未来机床的发展方向。(责编 深蓝)