

智能加工技术的发展与应用

Development and Application of Intelligent Machining Technology

西北工业大学 张定华 罗明 吴宝海 唐明
中航工业西安航空动力控制公司 齐国宁



张定华

西北工业大学机电学院院长, 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。

智能加工技术概念

1 智能加工问题的提出

在生产实践中, 数控加工过程并非一直处于理想状态, 而是伴随着材料的去除出现多种复杂的物理现象, 如加工几何误差、热变形、弹性变形以及系统振动等。加工过程中经常出现的问题是, 使用零件模型编程生

智能加工技术借助先进的检测、加工设备及仿真手段, 实现对加工过程的建模、仿真、预测, 对加工系统的监测与控制; 同时集成现有加工知识, 使得加工系统能根据实时工况自动优选加工参数、调整自身状态, 获得最优的加工性能与最佳的加工质效。

成的“正确”程序, 并不一定能够加工出合格、优质的零件。正是由于上述各种复杂的物理现象, 导致了工件的形状精度和表面质量不能满足要求。在产品的生产制造中, 一旦加工过程设计或工艺参数选择不合理, 就会导致产品加工表面质量差、设备加工能力得不到充分发挥, 同时机床组件及刀具的使用寿命也会受到影响。

产生上述问题的原因在于, 传统加工过程中, 经常只考虑了数控机床或者加工过程本身, 但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, 大大增加了加工过程控制的难度。为解决上述问题, 必须变革传统的理念, 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。同时, 借助先进的传感器技术和其他相关技术装备数控机床, 对加工过程中的工况进行及时的感知和预测, 对加工过程中的参数与加工状态进行评估和调整, 达到经济有效提升形状精度与表面质量的目的。

2 智能加工技术概念

智能加工技术借助先进的检测、加工设备及仿真手段, 实现对加工过程的建模、仿真、预测, 对加工系统的监测与控制; 同时集成现有加工知识, 使得加工系统能根据实时工况自动优选加工参数、调整自身状态, 获得最优的加工性能与最佳的加工质效。智能加工的技术内涵包括以下几方面。

(1) 加工过程仿真与优化: 针对不同零件的加工工艺、切削参数、进

给速度等加工过程中影响零件加工质量的各种参数,通过基于加工过程模型的仿真,进行参数的预测和优化选取,生成优化的加工过程控制指令。

(2) 过程监控与误差补偿: 利用各种传感器、远程监控与故障诊断技术,对加工过程中的振动、切削温度、刀具磨损、加工变形以及设备的运行状态与健康状况进行监测; 根据预先建立的系统控制模型,实时调整加工参数,并对加工过程中产生的误差进行实时补偿。

(3) 通讯等其他辅助智能: 将实时信息传递给远程监控与故障诊断系统,以及车间管理 MES 系统。

以上流程的描述如图 1 所示。

智能加工技术研究现状

智能加工技术已是现代高端制造装备的主要技术特征与国家战略重要发展方向,在美国及欧洲等发达国家倍受重视,近年来不断投入大量资金进行研究,典型研究计划有 PMI

计划、SMPI 计划和 NEXT 计划。

1 PMI 计划

PMI 计划由学术性团体——国际生产工程学会(CIRP)发起,CIRP于2003年成立了联合研究小组进行该领域的研究,参加机构包括CIRP的相关成员单位以及德、法等国的大学。

PMI 的研究内容主要包括: 加工过程模型的建立与研究、设备的在线监控研究以及连接二者的工艺与设备交互作用的研究。其中加工过程建模方面的研究包括切削、磨削、成形过程的研究,设备在线监控包括智能主轴系统、刀具磨损预测等的研究,工艺与设备交互作用的研究包括交互作用的描述、仿真与优化,以及机床系统结构行为的研究。

2 SMPI 计划

SMPI 是美国政府支持的智能加工系统研究计划。该计划于2005年提出,美国国防部累计拨款超过1000万美元资助该项研究。参与单位包括美国宇航局(NASA)、武器装

备研究发展与工程中心(ARDEC)等政府部门,GE、波音、TechSolve 等公司,美国马里兰大学、德国亚琛工大等科研机构。SPMI 的研究内容包括基于设备的局部活动以及基于工艺的全局活动,如图 2 所示。

3 NEXT 计划

NEXT 计划是由欧盟委员会第六框架研发计划支持的下一代生产系统研究计划,由欧洲机床工业合作委员会(CECIMO)管理。参加单位包括西门子、达诺巴特集团等机床生产企业,博世、菲亚特等终端用户企业,以及德国亚琛工大机床与生产工程研究所(WZL)、汉诺威大学生产工程研究所(IFW)、布达佩斯技术与经济大学(BUTE)等研究机构。

NEXT 计划中的第三部分涉及制造技术前沿的研究,主要包括加工仿真与新技术开发、新型机床研发、轻型结构及机床组件研究和并联机床研发等内容。加工仿真方面包括表面加工质量检测与切削参数优化、铣削/车削加工过程建模与仿真、超精密加工技术等方面的研究。新型机床研发包括高速机床研发、开放式数控系统以及光纤传感器应用等方面的研究。机床组件方面包括轻型材料机床组件、旋转轴准确度测定及空气静力轴承等的研究。

智能加工关键技术

1 加工过程仿真与优化

加工过程的仿真与优化涉及数控系统伺服特性的分析、机床结构及其特性分析、动态切削过程的分析,以及在此基础上进行的切削参数优化和加工质量预测等。

(1) 机床系统建模。

通过机床结构建模与优化设计,可提高机床的运行精度、降低定位与运行误差,同时可进行误差的预测与补偿。主轴系统的建模分析可根据主轴结构预测不同转速下的刀具动刚度,以及基于加工稳定性分析结果

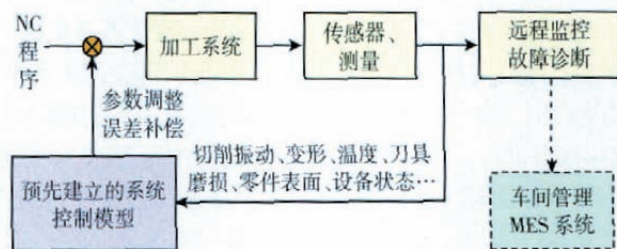


图1 过程监控与误差补偿实现流程

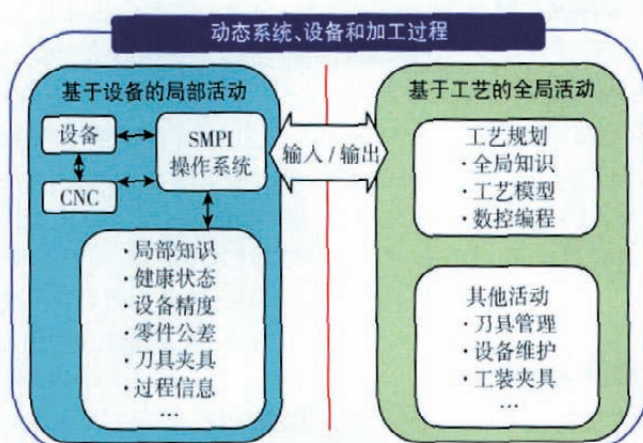


图2 SMPI研究内容

优化选取加工参数、提高加工质量和效率。刀具方面,通过刀具结构的分析与优化设计,在加工过程中可以获得更大的稳定切深;通过刀具负载的优化,获得变化的优化进给可以获得更高的加工效率与经济效益。

(2) 切削过程仿真。

切削过程仿真借助各种先进的仿真手段,对加工过程中的切屑形成机理、力热分布、表面形貌以及刀具磨损进行仿真和研究。通过仿真选择优化的切削参数,提高表面加工质量。

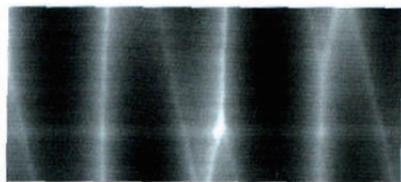
(3) 加工过程优化。

借助预先建立的仿真模型与优化方法,或者已有的经验知识,对复杂加工工况及加工过程中的切削参数、机床运动进行优化。例如,在整体叶片的加工中,通过建立的分析模型预测不同工况下的切削状态及稳定性,优选合适的刀具姿态、切深、行距,保证加工过程的稳定,获得高的叶片表面加工质量。

(4) 加工质量预测。

加工质量预测采用可视化方法对切削加工过程中形成的表面纹理及加工质量进行预测,为切削参数的优化选取提供支持,从而进一步地提高工件表面的加工质量,如图3所示。

从目前的研究发展来看,仿真正在朝着基于时变和物理模型的方向



(a) 实际加工结果



(b) 仿真结果

图3 工件表面纹理的实际加工结果与仿真结果

发展,通过仿真可以得到理论意义上的最优结果。但是,由于目前模型本身的不完善、加工过程的复杂性和加工形式的多样性,现有的仿真手段仍然难以满足实际工程的需要。同时,由于加工过程中出现的材料、机床、系统状态等方面的突发性情况,必须对加工过程进行实时监控,并进行误差补偿和现场控制。

2 过程监控与误差补偿

加工过程监控借助先进设备对加工工况、工件、刀具与设备状态进行实时监控与控制,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。加工设备的性能表征是进行过程监控的前提,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。在加工过程中,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控,根据监测信号和预先建立的多个模型判定加工状态、刀具磨损情况、机床工作状态与加工质量,进而进行切削参数的自动优化与误差补偿。同时,可将设备的健康状态信息通过通信系统传送至车间管理层(维护部门、采购部门等),根据健康状态进行及时维护,保障加工质量,减少停工时间。

3 智能加工机床

智能加工机床借助微型传感器将机床在加工过程中产生的应变、振动、热变形等检测出来,传递给预先建立的模型,根据该模型进行数据的分析与误差补偿,从而提高加工精度、表面质量和加工效率。此外,智能机床也可进行人机对话,实现系统故障的远程诊断。典型的智能加工机床有 Mikron、Mazak、Okuma 等公司的产品。

智能加工技术应用

1 数控加工工艺过程模型

目前为止,绝大多数数控编程系

统是基于产品几何模型来生成数控加工轨迹的,所解决的主要问题是走刀轨迹规划与运动干涉的处理。但这种数控编程技术难以解决薄壁件高速加工中出现的高速加工运动学与机床复杂工艺系统的动力学问题。而工艺系统在加工过程中又具有时变特性——其动力学响应与加工过程中材料切除等因素引起的系统模态变化密切相关,这种现象在薄壁件的高速加工中对质量与稳定性的影响尤为显著。

为解决上述问题,必须建立起加工过程模型,并开展基于该模型的新一代数控加工编程理论研究。加工过程模型包括由机床-刀具-工件-卡具构成的复杂工艺系统及其子系统的几何与运动学模型、动力学模型,以及与加工过程相关的刀具-工件子系统演化模型。

通过上述模型的建立,对工艺系统的动力学特性进行分析,在此基础上进行工艺系统的控制及误差补偿。这些模型的建立奠定了智能加工实现的理论基础。

2 加工过程仿真与优化

利用加工过程中的几何与运动仿真可以对刀具的运动轨迹和机床运动进行仿真,验证加工路线是否合理,避免加工过程中的碰撞干涉,降低事故的发生率。同时,还可在加工过程中通过对加工工况的分析,实现工艺参数的优化选取。通过对加工过程中机床各运动轴的分析与运动的优化,对机床运动与加工参数进行优化,消除加工缺陷。

利用加工过程的物理仿真可以预测加工过程中的切削力、切削温度、加工变形等的变化,以及仿真预测机床系统组件、加工刀具的工作状态,在此基础上进行加工过程的优化。例如,在薄壁叶片的加工过程中,通过工艺系统动力学特性的分析,采用余量优化方法可以有效减少加工过程中的振动,提高叶片表面的加工

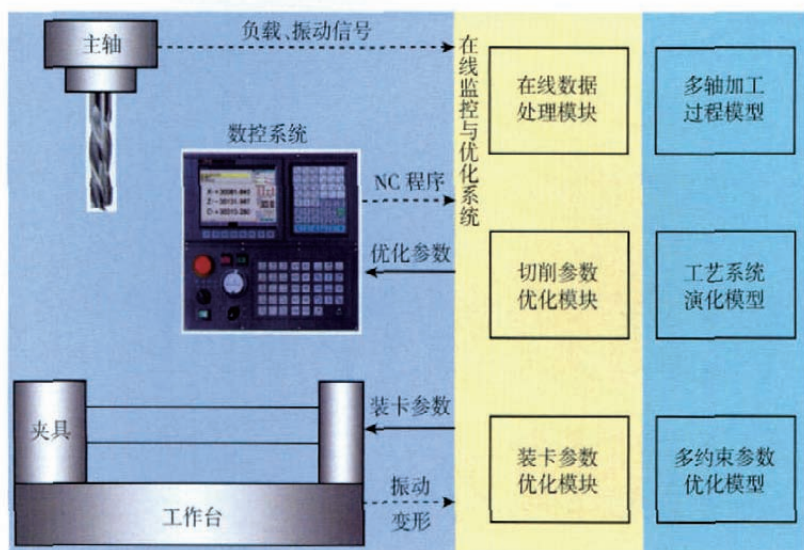


图4 加工过程的在线监控与优化

质量。

目前,物理仿真使用的软件在一定程度上都能较好地反应加工过程中的某些物理因素及其变化情况,但若全面仿真加工过程,单纯依靠一两种软件还远远不够,必须充分利用现有的物理仿真软件。同时,还需将仿真建模理论和生产实际需要进行密切结合。物理仿真与几何仿真的

变形与表面质量变化等情况,根据前述构建的加工过程监测与控制模型对实时数据进行过滤、分解与分析,在此基础上进行切削参数的实时优化与反馈控制;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,优化加工过程,如图4所示。

4 焊接式整体叶盘的加工

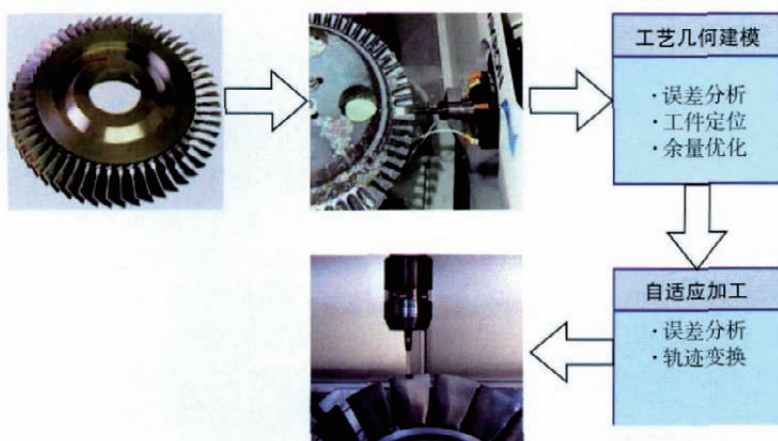


图5 焊接式整体叶盘的加工实现流程

集成是未来数控加工仿真发展的必然趋势。

3 在线监控与优化

在加工过程中,系统实时不断地监测主轴负载、工艺系统振动、工件

采用线性摩擦焊技术制盘是整体叶盘制造的重要方法。采用摩擦焊接制盘时,叶片根部和轮盘的连接处通常留有余量,焊接后采用机加方法去除。同时,焊接时会导致叶片与

盘体之间的相对位置与理论模型相比各有差异。焊接式整体叶盘的机械加工可充分借助智能加工技术。如图5所示,采用在机测量技术,可对每个叶片进行检测,快速生成叶片的实际模型,对叶片与盘体之间的相对位置进行评估并生成对应的加工轨迹。这样可获得良好的加工质量,同时可大大减少因为焊接原因导致的叶片位置偏差。

结束语

智能加工技术已是现代高端制造装备的主要技术与国家战略重要发展方向,它在加工设备与加工过程之间建立了一个纽带,为实现生产制造更高层次的自动化、科学化、智能化创造了条件。目前智能加工技术已在部分领域取得了较大进展,但面向实际的生产应用仍有一定差距,需要在以下几个方面加强。

(1) 智能加工技术的基础研究工作。在智能加工技术的基础研究方面,还有很多关键技术需要突破。例如,融合几何与物理的仿真与优化技术、在线监测多信息的融合与处理技术、在线测量技术等。

(2) 智能加工技术的发展要结合我国国产数控设备的特点。针对目前我国数控机床产业的发展以及大飞机、高档数控机床与基础制造装备等国家科技重大专项的实施,研究发展符合我国国产机床设备的性能测试、监控、优化方法,推动国产设备在高端制造领域的应用。

(3) 产学研用相结合的数控加工创新平台。大力推进建设产学研用相结合的数控加工创新平台建设,建立国产设备生产厂家、航空航天等高端制造企业、大学相关研究机构之间的联盟机制,加强智能加工技术领域的基础研究,实现向实际生产应用的快速转化,从而推动我国装备制造业的快速向前发展。

(责编 小颖)