

金属切削机床的智能化技术应用现状与发展趋势

单位：中航工业北京航空制造工程研究所 作者：陈闯 王增新 发布时间：2014-6-13 10:52:45

金属切削机床是现代制造业的关键设备，其产量和技术水平在某种程度上代表了一个国家的制造业水平和竞争力。中国制造业正在实现由制造大国向制造强国的历史性跨越，由此引发的产业升级必将引领中国机加工行业从低端向高端制造转型。而当前存在的机床生产效率偏低，人员成本持续升高以及机加工工艺水平有限等一系列问题，正成为严重制约金属切削行业实现产业升级的瓶颈。智能金属切削技术所具有的无人化加工、高效率制造和工艺整合能力有助于解决上述难题，平衡效率、成本和质量三者之间的关系，为金属切削机床的制造和应用提供新的发展模式和发展方向。

智能金属切削技术的定义

从20世纪50年代以来，机械制造技术开始进入现代制造技术时代，并经历了4个主要发展阶段，包括实现机械加工过程自动化的直接数控（DNC）技术、实现在线过程调度与规划的柔性制造系统（FMS）、实现CAD/CAM/CAPP技术综合及其与管理、经营集成的计算机集成制造系统（CIMS）和当前正在成为研究热点的智能制造系统（IMS）和智能制造技术（IMT）。IMS/IMT主要解决制造知识和经验的形式化描述，研究不确定性和不完全信息下的制造约束问题求解，通过智能化的手段来增强制造系统柔性及自治性。也就是说，DNC和FMS主要用来替代人的体力劳动，CIMS强调物流和信息流的集成，而IMS/IMT则更注重制造系统的自组织、自学习、自适应能力[1-3]。

智能制造技术作为先进制造技术与数字化技术相结合的产物，其本质是将计算模型、仿真工具和科学实验应用于制造装备、制造过程和制造系统的定量描述与分析，通过对制造全过程中的复杂物理现象和信息演变过程进行定量计算、模拟与控制，结合科学实验，揭示制造活动乃至产品全生命周期过程中的科学规律，提高制造装备的自律性和适应性，实现对制造过程和产品性能的预测和有效控制，增强制造系统的可维护性和制造信息的可重用性，促使制造活动由部分定量、经验的试凑模式向全面数字化的计算和推理模式转变，实现基于科学的高性能制造。智能制造强调信息集成与知识融合、制造系统与制造过程之间协同、虚拟仿真和数字加工软硬件技术并重，更多关注数字建模、数字加工等底层技术以及制造过程中物理因素对产品质量的影响机理和高速、高精度数字加工装备的实现[4]。

金属切削机床是智能化制造的主要组成单元，其本身也是一个复杂的机电一体化系统。当前，在全球化竞争的背景下，高、精、尖装备的生产不断向金属切削机床的极限能效提出新的挑战，亟需综合运用信息与计算技术、多学科联合仿真方法和科学实验手段，通过对切削过程中的复杂物理行为的数字化建模、

息与计算技术、多学科联合仿真方法和科学实验手段，通过对切削过程中的复杂物理行为的数字化建模、仿真和优化，实现对加工过程的定量主动控制。国外21世纪初就提出了“智能机床”的概念，旨在通过数字化制造技术在机床上的应用来取代人的部分脑力劳动，通过自主监控和决策来控制加工质量。欧美等发达国家也通过制定研究计划，如PMI、SMPI、NEXT计划等，用于机床智能化的研究。因此，将智能制造技术应用于金属切削机床，在加工设备与加工过程之间建立协同关系，为实现生产制造更高层次的智能化奠定基础，是国家科技战略的重要发展方向之一。

金属切削机床的智能化技术

目前，对智能机床尚无规范完整的定义。美国的SMPI计划给出了智能机床的基本特征，主要包括：

(1) 知晓自身的加工能力和工作条件；(2) 能够自动监测和优化自身的运行状态；(3) 可以测量和判断产品加工质量；(4) 具备自学习与自适应能力；(5) 机器之间能够无障碍地进行交流。

与普通数控机床或加工中心的主要区别在于，智能化的金属切削机床除了具有数控加工功能外，还具有感知、推理、决策、学习等智能功能，具体体现在以下几个方面。

1 工序集成与模块化加工

工序集成化通常也称为复合加工或完整加工，是指在一台机床上能加工完一个零件的所有工序。例如，德国INDEX公司的车铣复合加工中心就能够完成车削、铣削、钻削、滚齿、磨削、激光热处理等许多工序，完成复杂零件的全部加工。不仅使生产管理和计划调度简化，而且使透明度明显提高，无需复杂的计划系统就能够迅速解决所发生的事情并使之优化。工件越复杂，它相对传统工序分散的生产方法的优势就越明显[5]。

在如上所说的工序集成过程中，采用了不同的加工模块进行合理调配；在实际的生产制造中，为满足柔性化制造要求，不但需要即插即用的智能工作单元，同时也需要模块化制造技术来统筹安排加工方案和加工过程。模块化制造有2个关键的概念，一是标准化、特征化的可重构智能加工单元；二是快速设计、评价和使用单元组合方案的决策系统[6]，尤其需要考虑避免工艺冗余和坐标干涉的问题。瑞典Modig公司的柔性制造系统(TransFlex System)，采取倒置式龙门配置，可以很方便地以串联或并联的方式，加上物流系统及装卸机械手组成自动生产线或无人化加工车间，将高效率的大批量生产和柔性制造结合起来。德国DS-Technologie公司按照飞机结构件加工工艺的特点，独创性地推出采用并联运动机构的Sprint Z3型动力头(如图1)，并充分利用其可重构特点，开发了Ecospeed系列加工中心，兼顾了加工空间和加工效率的要求，已在航空制造领域得到广泛应用。

型动力头（如图1），并充分利用其可重构特点，开发了Ecospeed系列加工中心，兼顾了加工空间和加工效率的要求，已在航空制造领域得到广泛应用。

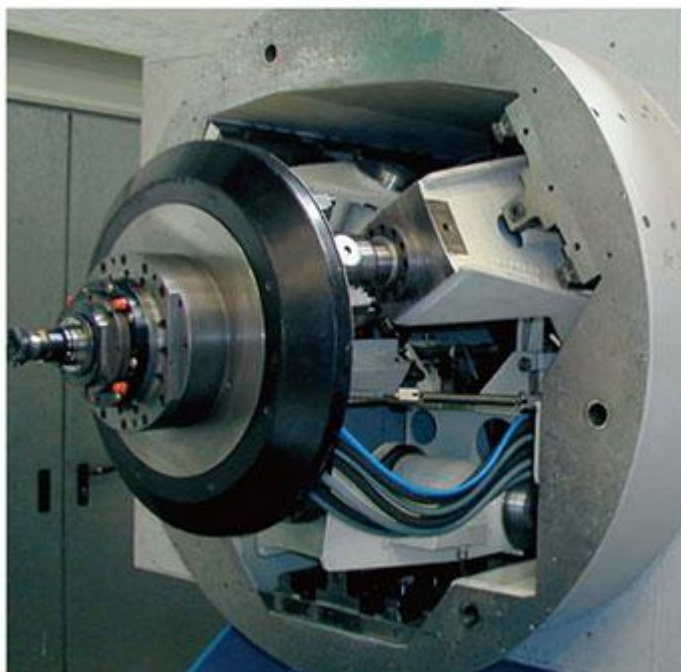


图1 Sprint Z3动力头

近年来，Mikron、DMG、EMAG等品牌都开发了各自的工件托盘管理模块，和传统的托盘交换模块不同之处在于，新的模块包含智能化且独立于机床控制系统以外的专用控制系统，操作员可以把不同工件混编在一起，并且可以在线更改、增删工件的加工内容和排序，而不影响机床加工过程，如图1所示。

2 监控决策自主化

智能机床需具有自优化、自监控、自诊断和预维护功能。在加工过程中，可借助各种传感器、声频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[7]，进而通过预先建立的系统性能参数库或知识库进行切削参数的自动优化与误差补偿。同时，根据健康状态进行及时维护，保障加工质量，减少停工时间。

瑞士Mikron公司配置智能加工系统的Mikron HSM系列高速铣削加工中心（如图2）可选用加工过程监控模块，以使用户能够观察铣削过程是否正常。通过电主轴壳体中前端轴承附近安装的加速度传感器，使铣削过程中产生的振动可以加速度“g载荷”值的形式显示，振动大小在0~10g范围内分为10级，并可预测在该振动级主轴部件的工作寿命，操作员可根据振动级别采取不同处理措施。





图2 MIKRON HSM 800高速铣削加工中心

此外，该公司开发的ITC智能热补偿系统，采用温度传感器实现对主轴切削端温度变化的实时监控，并将这些温度变化反应至数控系统，数控系统中内置了热补偿经验值的智能热控制模块，可以根据温度变化自动调整刀尖位置，避免Z方向的严重漂移[8]。

Fischer公司推出具有轴向位移补偿的电主轴，这种结构在电主轴的壳体中安装了轴向位移传感器，可以检测由温升引起的热变形和机械力造成的轴向位移，数据经过处理并输入数控系统后，就可以进行相应的补偿，提高工作台的移动精度[9]。

近年来，各数控系统制造商（如SIEMENS、FANUC等）推出的系统都具有较好的刀具监控功能，如在西门子SI NUMERIK 810/840D系统内就可以集成以色列OMAT公司的ACM自适应监控系统，能够实时采样机床主轴负载变化，记录主轴切削负载、进给率变化、刀具磨损量等加工参数，并输出数据至Windows用户图形界面。GE fanuc智能平台公司Proficy MTE设备效率监控与分析软件，可将工厂各环节产生的信息数字化，构建成一个可以在任何地点、时间通过任何方式访问的虚拟工厂，可根据用户需要生成相应的数据图表。同时，系统可根据设备使用情况预测维护时间点，制订维护计划，并通过远程诊断工具延长机床平均故障工作时间，缩短维护时间[9]。

3 信息化和网络化

对于现代制造工厂来说，除了要提高机床的智能化水平，更要使数控机床具有双向、高速的联网通讯功能，以保证信息流在车间的底层之间及底层与上层之间通信畅通无阻，从而充分发挥智能机床的制造能力和特点。而对计算机、手机、平板电脑、机外和机内摄像头等现代通信设备的应用，实现了其与加工装备的语音、图形、视像和文本的通信功能。设备还可通过与生产计划调度联网，实时反映机床工作状态和加工进度。操作者在授权后可在各类终端上观察加工过程及故障报警，并进行在线处理。

加工进度。操作者在授权后可在各类终端上观察加工过程及故障报警，并进行在线处理。

日本Mazak公司生产的车铣复合加工机床，不仅能够进行零件的复合加工，在一台机床上完成全部加工工序，还可通过配置信息塔（e-Tower）设备，通过不同终端实现对机床的在线计划调度和信息处理，如图3所示。



图3 Mazak公司配备e-Tower的INTEGREX e-420H II复合加工中心

企业的生产计划调度系统可以安排一周的加工任务，并发送到信息塔。信息塔向操作者发出指令，并在屏幕上显示机床的实时工作状态。操作者可以按照作业计划下载零件的数控程序，按照屏幕指示进行模拟仿真，无误后进行加工，并将机床状态和任务完成情况报告给有关人员[10]。

智能切削技术的发展趋势

目前，应用于金属切削机床上的智能化技术主要是由数字化制造技术衍生发展而来，其主要目标是智能化的闭环加工，即通过智能传感装置将机床在加工过程中产生的应变、振动、热变形等实时状态反馈到控制器中，通过采用针对性的控制算法，对加工轨迹进行在线补偿，从而有效提高加工精度、表面质量和加工效率；通过工序智能集成和模块化加工方式缩短加工流程，提高加工效率；通过网络化技术实现机床之间、机床与人的智能交互。随着物联网和云计算技术的不断成熟，未来的智能机床将呈现以下形式。

1 基于智能体的制造技术

当前的金属切削加工中，智能化技术主要集中应用于机床这个加工体上，工件、刀具等仍然处于被加工、被操作地位，物联网技术的不断发展，尤其各种智能元件的微型化、自主化，使得工件、刀具甚至机床的各工作模块作为智能体存在成为可能。在未来的制造过程中，工件可以作为施令方根据自身特点和

床的各工作模块作为智能体存在成为可能。在未来的制造过程中，工件可以作为施令方根据自身特点和加工目标确定工艺流程、选择和控制工装夹具，直至完成对自身的质量检测；刀具可以根据工艺要求“毛遂自荐”，与机床、工件进行“多向选择”，可以根据工况条件调整加工参数，并根据日常使用情况预测自身的使用寿命；在模块化加工方式中，各模块之间可以互相协调统筹，既能够向中央控制系统提供自己的使用特点和应用方向，也可以对系统下达的组合方案和调配指令提出整改或优化意见。由于各级智能体的存在，金属切削过程将由现在的自上而下形式转变为自下而上形式，各生产制造要素得到充分调动，生产效率进一步提高。

2 开放式制造模式

多年以来，我国的机床（尤其是高端机床）进口量和持有量均“高居世界第一”，然而这些机床的生产效能并未得到充分发挥，平均利用率远低于世界主要工业国家。这其中管理的原因，也有生产制造模式的原因，许多企业虽然建成了企业层级生产制造网络，但终究是各自为战，机床资源没有得到充分利用，而许多好的产品制造思想又由于资源匮乏而搁置、放弃。

这个问题不仅存在于中国，在世界范围内也越来越受到重视。美国国防先进研究规划局（DARPA）由此提出了开放式制造的思想，即充分利用社会制造资源，降低生产成本，缩短开发周期，使好的创意尽快转化为现实。

而机床企业能够做的，就是沿着这一“世界大同”的发展思路，运用日益成熟可靠的云计算技术，赋予机床“云端制造”的能力。这不但要求企业具有良好的信息化基础，也需要攻克许多技术难关，例如知识的制造资源云端化，制造云管理引擎、云制造应用协同、云可视化等技术都是未来需要攻克的重要基础技术。

结束语

金属切削机床的智能化，将使得多品种、小批量、定制式的智能化协同制造成为企业的主要生产制造模式，在我国由制造大国向制造强国迈进的过程中起着重要的基础支撑作用。

智能机床相关技术已有部分实现了商品化，但是仍存在技术难点需要解决，例如知识库与专家系统的创建、多学科信息融合与处理技术以及智能化标准体系的建立等，需要结合我国数控装备的特点和需要，通过产学研结合的创新平台，加强基础研究，促进成果转化，从而充分推动我国智能金属切削机床以及智能加工技术的快速向前发展。

加工技术的快速向前发展。

参考文献

- [1]?周济. 制造业数字化智能化. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2395-2400.
- [2]?朱剑英. 智能制造的意义、技术与实现. 航空制造工程, 2013(23): 30-35.
- [3]?李圣怡. 智能制造技术和智能制造系统. 国防科技大学学报, 1995, 17(2): 1-11.
- [4]?国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011~2020). 北京: 科学出版社, 2010.
- [5]?张曙. 数控机床发展的新趋势. 数字化制造与装备, 2005 (5): 149-151.
- [6]?刘光富, 张曙. 面向联盟企业的智能化制造装备. 制造技术与机床, 2001 (3): 8-10.
- [7]?张定华, 罗明, 吴宝海, 等. 智能加工技术的发展与应用. 航空制造技术, 2010 (21): 40-43.
- [8]?吴宝海. 现代数控机床的智能化发展及应用. 航空制造技术, 2008 (17): 52-56.
- [9]?高彬彬. 美国智能机床研究发展概况. 国防制造技术, 2009 (1): 58-60.
- [10]?张曙. 数控新纪元: 聪明加工系统. 航空制造技术, 2007 (4): 38-41.

(责编 杰一)