

数控机床的智能化及其在航空领域的应用*

方 辉, 许 斌

(四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065)

[摘要] 数控机床是国民经济关键领域的基础性支撑装备,按照用户的需要进行个性化设计、制造,逐渐成为市场对生产体系的基本要求。机床的智能化是数控机床的高级表现形式,是机床产业应对个性化制造趋势的有效途径,具体体现在加工过程、操作与管理、加工能力的智能化。航空工业是典型的个性化制造领域,机床设计制造企业纷纷通过提高机床智能化水平、提高机床专业化程度、提供复合化加工能力,来满足航空工业对数控机床的要求。

关键词: 数控机床; 智能化; 增材制造; 航空

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.050



方 辉

四川大学制造科学与工程学院机械工程系副教授,博士,主要研究方向为数控机床结构优化与误差补偿、增材制造(3D打印)技术与设备、精密超精密加工理论与技术。

20世纪初出现的以流水线为代表的大批量生产模式创造了巨大的物质财富,提高了人们的生活水平,丰富了生活内容。但是,由于大批量生产模式的高刚性,不仅使生产组织方式,甚至科学探索、技术创新、产品应用的转化扩散都受到较强的制约,难以为社会提供多样化、个性化、低成本的产品和服务,同时带来了资源能源的高消耗、环境代价高昂、不同国家社会的发展鸿沟扩大等问题。

随着经济社会和科学技术的发展,20世纪60年代以后,大批量生产模式逐步向多品种、中小批量生产模式过渡。进入21世纪,由于信息技术的大规模应用,人们对个性化产品的需求迅速增长,按照用户的需要进行个性化设计、制造,逐渐成为市场对生产体系的基本要求。着眼于个性化服务的定制生产,成为从日常消费品到复杂工业系统的典型生产模式。这样的外部条件,对包括数控机床在内的生产设备的智能化提出

了更高的要求。目前的数控技术与设备在适应和满足个性化制造等方面仍然有巨大的提升空间,机床智能化发展存在强烈的内在动力^[1-2]。

机床智能化的体现

加工过程、使用操作和加工能力的智能化,是机床智能化的具体体现。

(1)加工过程的智能化。以金属切削为代表的数控机床加工过程的智能化具体体现在:通过力、功率、扭矩、速度、加速度、振动、声、光、电等多传感器综合优化配置,实现对加工过程中多物理量的识别、监测,并分析上述物理量及其复杂耦合对机床关键部件、整机和工件所产生或可能产生的影响,通过高可靠性高速工业信息与通讯系统,适时调整加工状态或工艺参数,实现产品经济精度条件下的高效、低耗个性化制造^[3-4]。

以温度传感与监控为例,德马吉森精机公司推出的DIXI 210龙门五

*基金项目:四川省科技支撑计划“民用飞机结构部件关键制造技术研究与应用”项目(2014GZ0122)。

轴加工中心在主轴、滚珠丝杠、驱动电动机、变速箱等多处设置了高通量冷却装置,所设的热量控制点由传感系统采集和传输数据,一旦超过设定温度范围即启动控温程序。通过这类措施及采用高性能传动部件,使机床的精度显著提高,各轴定位精度达到 $4\mu\text{m}$ ^[5]。

随着机床智能化程度的不断深化和扩展,越来越多的机床添加了故障诊断、温控、防碰撞、空间插补、振动控制、刀具视觉检测^[6-7]等智能模块或子系统,特别是故障诊断与修复技术,不仅保障了智能机床的高效、高可靠运行,提升了机床维护的智能化水平,也为包括机床在内的制造系统的连续工作创造了有利的技术条件^[8-10]。上述技术的互相协调与综合运用,为机床的综合智能集成奠定了技术基础。

(2)操作与管理的智能化。数控机床是高度专业化的生产设备,但目前的数控机床及其配套技术在很大程度上存在操作技术难度大、系统兼容性和可移植性差、维护成本高、难以协同管理等问题。机床智能化的关键内容,就是提高机床操作、管理的智能化水平,降低机床操作、管理的技术门槛和时间成本,使机床使用者能够将主要精力放在更好地理解用户需求上,从而进行更高质量的设计和 optimization 制造,更好地满足用户对产品的个性化需求。

智能机床不仅注重为使用者提供智能化的人机交互系统,还具有强大的数据获取、挖掘、分析和运用能力,例如,通过基于大数据的信息物理系统实现人与机床、机床与机床、机床与生产体系其他环节的信息共享与协调运行;利用移动互联技术和设备与机床状态信息的互联互通,实现机床远程操作与管理,在提高机床使用效率的同时,降低机床采购、维护、升级和管理成本^[11-12];采用开放性的数控软件,通过逻辑控制器的

高可靠实时联接,使其与传统意义上的数控系统逐步融合,降低各类数控设备之间的数据运用障碍,同时,通过开源硬件和开源软件构建低成本、高智能、高可靠性的可重构软硬件体系,实现智能数控机床开发者、使用者的融合。

当前出现的机器人与数控机床融合发展(如图1所示)的趋势,就是机床操作与管理智能化发展的具体体现。

(3)加工能力的智能化。加工能力的智能化不仅包括一般意义上的加工过程智能化和使用操作智能化,还包含了数控机床的集成、复合、高速、高效、高精、柔性、绿色等诸多内涵^[13-14]。例如,加工效率是困扰齿轮制造企业的难题,将滚齿与磨齿相结合,或者铣齿和磨齿相结合,制造面向粗精加工一体的智能化齿轮加工机床(如图2所示),将极大地提高齿轮加工的效率 and 精度。

具备加工能力智能化水平的数控机床,是已经发展进化到可针对具体加工任务选择加工方式和加工工具辅具,并自行进行工艺规划和决策,进行柔性、高效和绿色加工的智能化制造系统。它能够对所加工工件的材料特性、结构特征、工艺参数、加工程序、加工过程及相关各类物理



图2 一次装夹实现齿轮全套加工的车铣加工中心

Fig.2 Gear machining in one clamping by a milling machining center

量进行记录,建立各型各类加工对象参数库,积累相应的加工经验,通过数据挖掘、机器学习和人工智能技术使机床具备学习能力^[15],并且随着使役期的逐步提高为各类工件加工提供高效、经济和绿色的加工解决方案。同时,智能机床具备对机床本体、刀具、控制系统等的智能故障诊断与自修复能力,是智能机床的核心能力,也是国内外学术界的热点研究领域^[8-10,16-17]。

智能机床的发展,不是哪一类单项技术发展的结果,而是各项技术综



图1 机器人与数控机床的融合发展

Fig.1 Development of integration of robot and CNC machine tool

合集成运用的结果^[18]。制造技术从来都是对科学探索、技术创新和产品应用最敏感的领域,现代科学技术的发展为包括智能机床在内的制造技术与装备的发展提供了强有力的支撑。

机床智能化的支撑条件

从 1845 年美国的菲奇发明转塔车床,到 1952 年出现数控机床,时至今日,机床设计、制造和应用的外部环境已发生了巨大变化,信息、控制、材料甚至生物、医学等众多领域基础科学和支撑技术的发展,为机床设计制造行业不断吸收科学探索、技术创新和产品应用的最新成果,实现机床产品的智能化,创造了前所未有的良好环境。

(1) 传感、测试与控制理论、技术与设备的发展。不论是机床的热误差检测与控制、空间插补与误差补偿,还是机床与工件在位检测、远程监控,都离不开传感、测试、控制理论与设备的发展。以温度传感为例,铂电阻温度传感器精度可达 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,已远高于常用数控机床所需要的温度检测需要。虚拟仪器、仿真测试、优化控制算法等领域的发展也日新月异^[19-20],为智能机床的出现和发展提供了基本技术条件。

(2) 计算机、信息与人工智能理论与技术的发展。从工艺数据库与知识库到开放式数控系统,从三维建模到计算机辅助工程分析,从刀具缺陷识别到机床本体的实时监控与故障诊断,都离不开计算机、信息与人工智能理论与技术的支持^[21]。以工艺知识的获取和学习为例,只有利用计算机、信息与人工智能理论与技术,采用智能化方法对工艺过程进行存储、对比和学习,才有可能实现针对特定工艺的智能决策^[22]。计算机、信息与人工智能理论、技术与设备的发展,为智能机床的出现和发展创造了使能技术条件。

(3) 多领域科学、技术、产品的

相互支撑与协同发展。高端数控机床是机械、电气、计算机、控制、软件、通讯、材料等多学科综合交叉集成的高技术产品,但是,以工程科学技术为主的学科集成已无法满足智能机床发展完善的需要。例如,基于数据挖掘、机器学习和人工智能的智能工艺规划,需要数学、计算机、脑科学甚至心理学的交叉与融合;智能人机交互系统的实现,离不开自然语言辨识与理解的支持,而这一领域包含广泛的社会学内容。在当前科学技术发展条件下,已经没有任何学科领域可以抛开其他领域而独自发展了,学科交叉不仅是一个领域获得发展的内在要求,也是任何一个领域所不得不面对的客观环境。多领域科学、技术、产品的相互支撑与协同发展,为智能机床的出现和发展创造了协同创新环境。

智能机床对航空工业的支撑作用

数控机床的产生就是直接为航空工业服务的。1948 年,美国 Parsons 公司因为掌握了使用计算机进行飞机桨叶形状三维插值的技术,获得了一项来自美国空军的订单,制造军用飞机的变截面机翼;麻省理工学院作为该订单的二次承包单位,负责相应的伺服系统的开发,并在 1952 年开发出了可靠的伺服控制系统,将其用在铣床上——世界上第一台三坐标数控立式铣床就这样诞生了。从第一台数控机床诞生到现在的 60 余年间,数控机床逐步成为包括航空工业在内的制造业的基础设备。随着航空工业的不断发展,数控机床所面对的加工对象不仅材料特性日益复杂,而且结构更趋复杂化和大型化(如大型异形件的整体一次加工等)。面对这样的环境与需求,机床设计制造企业纷纷通过提升机床的智能化水平、提高机床专业化程度和提供复合化加工能力,来满足航空

工业对数控机床的要求。

(1) 随着民用航空器向大型化、轻量化方向发展,航空工业中越来越多地采用钛合金、复合材料,并且对于铝合金等常规材料的加工(如大型薄壁件的加工)也提出了诸如超大曲面结构、小形变等极高的加工要求。达到这样的加工要求,必须对加工过程状态参数及时获取、反馈和调整,使加工过程中工件的力、热、变形均得到有效控制,否则可能会因个别加工参数的偏离而造成巨大浪费。增强数控加工过程、操作管理和加工能力的智能化水平,是解决航空用复杂结构件高效高质量加工的有效途径。例如,日本马扎克公司开发了新一代具有人机对话式编程方式的智能化、网络化数控系统 MAZATROL,实现了 CNC 和 PC 的双向通讯;国内沈阳机床的 i5 系统将工业化、信息化、网络化、集成化、智能化深度融合,不仅提升机床单机的智能化水平,而且为云制造奠定了技术基础,这与高端航空业设计、生产、服务全球化布局的特征是高度契合的。

(2) 航空工业是高度专业化的领域,通用设备往往难以满足其制造需求,需要根据具体的加工需求定制特定功能和性能的机床。以飞机蒙皮加工为例:蒙皮是飞机外表面受力构件,外形复杂,由于飞机减重设计使蒙皮存在大量下陷面,最薄处厚度仅约 1mm,是典型的航空用复杂曲面薄壁零件,其数控加工是制造领域的难题。通常蒙皮是先经过拉伸或滚弯成形,再采用化铣工艺进行后续加工,存在化学污染严重、耗电量大、铝材消耗率高等问题^[23]。针对上述问题,一些企业提出镜像顶撑铣削技术,并研制了相应的数控加工系统。镜像顶撑铣削系统 MMS (mirror milling system,如图 3 所示)专门用于飞机蒙皮的数控加工,如法国的 Dufieux 公司及西班牙 MTorres 公司。蒙皮镜像顶撑铣削系统由两台五坐



图3 镜像顶撑铣削系统
Fig.3 Mirror milling system

标机床组成,其中一台五坐标铣床用于正面加工蒙皮工件,另一台五坐标机床主轴则安装顶撑装置,与用于加工的五轴铣床刀具做同步镜像顶撑运动,保证了工件加工部位的刚性支撑,有效防止了加工过程中的振颤,适用于不同尺寸蒙皮的精密铣削;同时,采取真空吸附装夹,并将切边、钻孔及精密加工功能集成,消除了重复装夹对工件精度的影响。类似这样的专用高端数控装备必将日益智能化,为航空工业提供更多更好的加工技术装备支持。

(3)增材制造设备被称为金属切削机床、成形机床之外的第三类机床,从工作原理的角度而言,增材制造是完全符合个性化产品定制要求的制造技术;同时,由于材料损耗率极低,某些增材制造工艺原理上甚至没有材料损耗,因此具有绿色制造的典型特征^[24];增材制造设备还具有操作简便,易于通过开源软硬件实现系统重构等优势^[25]。基于以上优点,增材制造技术及设备受到了全球制造业的广泛关注。目前由于受到材料、工艺等方面的制约,增材制造技术及设备尚未在诸如航空工业这样

高端工业领域获得广泛应用,但其技术特征是符合航空工业的基本要求的,在2015年10月意大利米兰举办的欧洲国际机床展览会上,专门设立了增材制造专区,共有11家企业展示了增材制造技术和产品。其中,来自德国的ConceptLaser公司展示了利用金属激光熔覆这一增材制造技术所生产出来的飞机零件(如图

4所示),能够兼顾零件力学要求与轻量化设计要求。在适当提高材料性能,解决材料、设备、加工精度和加工效率^[26]的综合经济性问题后,激光熔覆增材制造技术将在航空制造领域展现巨大的潜力。另外,增材制造与金属切削的复合加工技术与设备,也将为航空工业提供更为有效的加工手段。

结束语

智能机床是数控机床的高级表现形式,具体体现在加工过程、操作与管理、加工能力的智能化,而现代传感、测试、控制、计算机、信息、人工智能理论与技术的发展,多领域科学、技术、产品的相互支撑与交叉融合,为智能机床的发展创造了协同创新环境。以智能化为目标的先进数控技术和高端数控机床是充满创新潜力和市场机遇的领域,但也存在巨大的风险和挑战。我国在数控机床设计制造领域已经取得了显著的进步,但机床产业水平不仅是经济、技术和基础工业能力的综合体现,也需要执着的工匠精神作为支撑。只要认清差距,找准切入点,坚持科学探



图4 ConceptLaser增材制造设备及所加工的零件
Fig.4 ConceptLaser additive manufacturing equipment and the manufactured part

索、技术创新与产品应用的紧密结合,以为用户提供满意的机床装备为目标,保持对新技术及其应用的敏感性,就一定能够使我国的机床产业像其他领域一样,逐步实现对世界先进水平的赶超。

参考文献

[1] 汪鹏,王焱.数控机床关键技术变革与未来发展[J].航空制造技术,2013(5):55-60.

WANG Peng, WANG Yan. Key technology reform and future development of NC machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(5): 55-60.

[2] 董一巍,李晓琳.未来机床发展走向及热点技术浅谈[J].航空制造技术,2015(5):32-37.

DONG Yiwei, LI Xiaolin. Development trends and key techniques of the future machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(5): 32-37.

[3] 张定华,侯永峰,杨沫,等.智能加工工艺引领未来机床发展方向[J].航空制造技术,2014(11):34-38.

ZHANG Dinghua, HOU Yongfeng, YANG Mo, et al. Intelligent machining process leads future direction of machine tools[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(11): 34-38.

[4] ADAM W, MICHAL J. Wireless communication influence on CNC machine tool probe metrological parameters[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82: 535-542.

[5] 向兵飞,黄晶,许家明,等.蒙皮铣削镜像顶撑技术研究[J].制造技术与机床,2015(4):92-96.

XIANG Bingfei, HUANG Jing, XU Jiaming, et al. Mirror top bracing technology in milling aircraft skin[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(4): 92-96.

[6] 徐正平.智能机床的应用与未来展望[J].金属加工(冷加工),2013(20):7-11.

XU Zhengping. The application of intelligent machine tool and its future[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2013(20): 7-11.

[7] Wikipedia. John T. Parsons pioneered numerical control for machine tools in the 1940s[EB/OL].[2016-02-20]. http://en.wikipedia.org/wiki/John_T._Parsons.

[8] YU Y, CHEN M, LI Y L. Fault

diagnosis of CNC machine tool based on Bayesian formula[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 271: 1765-1769.

[9] SHEN B, ZHAO S Y, WANG J H, et al. An improved case-based reasoning for fault diagnosis of CNC machine tool[J]. Journal of Information and Computational Science, 2015, 12: 2939-2949.

[10] LIN G M, SHANG M, ZHANG W G. Study on fault diagnosis and repair strategy of CNC machine tool[J]. Advanced Materials Research, 2013, 791: 967-970.

[11] SARHAN A A D, MATSUBARA A. Investigation about the characterization of machine tool spindle stiffness for intelligent CNC end milling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 34(8): 133-139.

[12] ZHAO L P, DIAO G Z, YAN P, et al. A gene recombination method for machine tools design based on complex network[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83: 729-741.

[13] YANG X J, MA C F, LI Y, et al. The analysis and optimization of machining precision based on electromechanical matching in high-speed machine tools[J]. Materials Science Forum, 2016, 836: 584-591.

[14] XIANG S T, YUSUF A. Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 65-78.

[15] RAMESH R, JYOTHIRMAI S, LAVANYA K. Intelligent automation of design and manufacturing in machine tools using an open architecture motion controller[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(1): 248-259.

[16] 王家海,黄江涛,沈斌,等.数控机床智能故障诊断技术的研究现状与展望[J].机械制造,2014,52(5):30-32.

WANG Jiahai, HUANG Jiangtao, SHEN Bin, et al. Current situation and prospects of CNC machine tools intelligent fault diagnosis technology[J]. Machinery Manufacturing, 2014, 52(5):30-32.

[17] 姚鑫骅,徐月同,傅建中,等.基于粗糙集理论的数控机床智能故障诊断研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(10):1719-1724.

YAO Xinhua, XU Yuetong, FU Jianzhong, et al. Intelligent fault diagnosis of CNC machine

tools based on rough set theory[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(10): 1719-1724.

[18] LIU L Y, WANG H F. Integrated design and analysis system for feed drive system of CNC machine tools[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2016, 53: 172-182.

[19] WULFSBERG J P, GRIMSKE S, KONG N X, et al. A function integrated and intelligent mechanical interface for small modular machine tools[J]. Precision Engineering, 2014, 38(1): 109-115.

[20] AHILAN C, KUMANAN S, SIVAKUMARAN N, et al. Modeling and prediction of machining quality in CNC turning process using intelligent hybrid decision making tools[J]. Applied Soft Computing, 2013,13(3): 1543-1551.

[21] HE S P, MAO X Y, LIU X Q, et al. A new approach based on modal mass distribution matrix to identify weak components of machine tool structure[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83: 193-203.

[22] YAO X H, FU J Z, XU Y T, et al. Synthetic error modeling for NC machine tools based on intelligent technology[J]. Procedia CIRP, 2013(10): 91-97.

[23] O'DRISCOLL E, KELLY K, O'DONNELL G E. Intelligent energy based status identification as a platform for improvement of machine tool efficiency and effectiveness[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 105(15): 184-195.

[24] SEIFI M, SALEM A, BEUTH J, et al. Overview of materials qualification needs for metal additive manufacturing[J]. Journal of Material, 2016, 68: 747-764.

[25] MIES D, MARSDEN W, DYER S, et al. Data-driven certification of additively manufactured parts[C]//Proceedings of 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2016.

[26] SMITH C J, DERGUTI F, HERNANDEZ N, et al. Dimensional accuracy of electron beam melting (EBM) additive manufacture with regard to weight optimized truss structures[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 128-138.

(下转第 61 页)