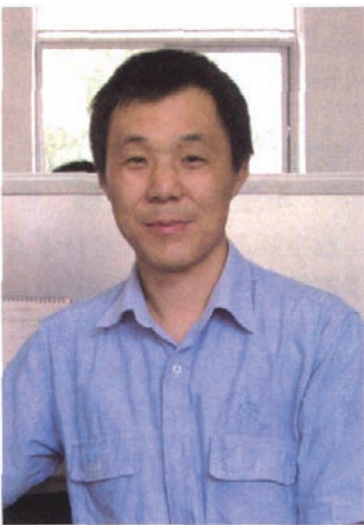


航空产品的切削加工 与未来机床

Cutting for Aviation Product and Future Machine Tool

北京航空制造工程研究所 王 焱



王 焱

北京航空制造工程研究所研究员。一直从事切削加工技术、数控工艺技术、数字化集成制造技术等方面的研究,曾参加或主持完成科技预研、型号攻关、型号零件生产等多项工作。

机床作为机械加工的重要装备一直是工业革命以来备受关注的对象。机床经历了皮带传动、齿轮传动、直线电机驱动等几代的发展,操作方式上经历了手工操作、仿形控制、机械自动进给、数字控制等主要阶段,每一次发展都给制造技术带来新的变化和进步。19世纪,随着新型冶炼技术、内燃机技术、电气技术的发明与完善,以及H·福特大规模生产方

现代航空产品的性能要求越来越高,产品的更新换代速度越来越快,对零件的加工效率要求不断提高,精度和成本的控制也越来越严格,这对于数控机床的性能提出了更高的要求,高效加工、高精度控制、低成本制造、绿色环保是当今制造过程所追求的更高目标。

式和泰勒科学管理理论的出现,机械制造业开始进入大批量生产的时代。

航空产品大多采用高强铝合金、钛合金、不锈钢、高温合金等高性能材料,零件结构复杂,精度要求严格,这些零件的制造一直对制造工艺与装备有着较高的要求,高精度、高性能的机床是满足航空产品制造需求的关键手段之一。据不完全统计,飞机制造过程中,有40%以上的工作是通过机械加工完成的,零件的机械加工已成为飞机产品制造的重要环节,作为实现机械加工关键基础的机床,其性能优劣对于产品质量的提升、交付周期的缩短起着至关重要的作用。

航空制造业是先进制造技术密集型行业,从数控机床的领先应用开始,航空产品设计已经实现全数字化

建模,制造过程也在数字量传递、无纸化制造、信息化集成方面积累了成熟的经验,机械制造工艺也从传统的切削加工原理,发展成为高速加工、精密加工、适应性控制等新型综合技术。随着计算机技术的发展,人类已经进入了信息化和网络化时代,信息技术成为21世纪经济发展的强大推动力,也成为机械加工过程的重要依托。

零件切削加工技术基础

切削加工一直是零件加工的主要技术手段之一。随着科学技术的进步与发展,新的加工方法不断涌现,如电物理加工、电化学加工、束流加工、精密铸造及精密锻造成型等加工方法,并且得到了日益广泛的应用,但是切削加工仍然是目前应用最

多、使用最为广泛的加工方法。据专家估计,机械制造中约有30%~40%的工作是由切削和磨削加工来完成的,对于尺寸和形状的配合精度要求越来越高的零件(在 μm 内),就越需要经过切削和磨削加工来完成,除了切削和磨削,至今还没有更好的加工方法^[1]。

自数控机床出现以来,伴随着制造自动化技术、系统集成技术的发展,满足切削加工需求的机床装备不断进步和完善,为切削加工技术的发



展与应用提供了坚实的基础。在此基础上,围绕提高生产效率和加工精度两个方面,零件的加工技术从普通精度的、独立的、分散的单项技术,逐步朝着精密化、自动化、系统化、集成化、加工方式复合化的方向发展,形成了现代制造的技术体系。

提高生产效率一直是切削加工领域十分关注并不断追求的目标,高速加工、超高速加工方法不但成倍地提高了零件的加工效率,而且进一步改善了零件的加工精度和表面质量,还能解决常规加工中某些特殊材料难以解决的加工问题,如薄壁结构与细长结构的精确加工、高硬状态零件的加工、脆性材料零件的加工等。

高速加工、超高速加工的基础是1931年德国切削物理学家萨洛蒙(Carl Salomn)提出的高速切削加工理论及著名的“萨洛蒙曲线”。1979年美国的“先进加工研究计划”的研

究成果表明,随着切削速度的提高,刀具磨损主要取决于刀具材料的导热性,铝合金的最佳切削速度范围在1500~4500m/min之间。目前,高速切削加工在实际生产中已经开始得到应用,铝合金材料切削速度已达到1000~4000m/min(最高速度为5000~7500m/min),铸铁精加工和半精加工速度为500~1500m/min,精铣灰铸铁最高可达2000m/min,普通钢速度为300~800m/min,淬硬钢(HRC45~65)速度为100~500m/min^[2]。

复合加工是为提高难加工材料、难加工结构的加工效率和质量,应用多种形式能量的综合作用、多种加工工艺的协同工作来实现零件材料去除的加工方法。机械复合加工以常规机械加工为主,辅助其他加工方法,应用机械、化学、光学、电磁、流体力学和声波等多种能量进行综合加工,常见的复合方式有机械加工与电化学加工复合、机械加工与超声加工复合、机械加工与高能束加工复

合、电加工与超声加工复合、车铣复合等。

20世纪以来,信息技术已经成为现代生产力发展的主导因素,工业生产由“能源和材料密集型”向“信息密集型”转变,支持产品制造过程的机床装备由机械向机电一体化、信息集成控制方向转变,呈现出向“软件控制”和高知识附加值方向发展的趋势。特别是波音公司1990在波音777飞机研制中,以数字化技术为核心,建立了全球第一个全数字样机,促进了数字化设计制造技术的发展。在数字化制造过程中,制造信息学、计算制造、智能制造成为数字化制造系统的基础理论与技术^[3],信息集成、智能计算、网络通讯成为新一代机械制造装备的突出功能。

航空产品零件加工特点与生产系统发展

航空制造一直是先进技术高度密集的行业之一,航空产品的零部件形状和结构复杂、材料多种多样、加工精度要求严格。航空产品零件制造的复杂性主要体现在:

(1) 通常带有复杂的理论外曲面、纵横交错的加强筋结构、厚度较小的薄壁结构等;



LINKS-EXE700 并联机床(哈量集团)

(2) 零件材料以高强度铝合金、钛合金、高温合金、不锈钢、复合材料、蜂窝结构为主,多数为难加工材料;

(3) 现代飞机具有长寿命、高可靠性要求,使得零件的表面质量控制要求更为严格;

(4) 越来越多地采用整体结构

数控机床的出现起源于飞机制造业。从1952年数控机床诞生之日起的一段时间内,数控机床主要以单机制造的形式承担着航空产品复杂零件的制造,其技术发展也主要围绕着机床本体的设计优化、伺服控制技术、检测与反馈装置、数控系统功能完善等方面进行,形成了不同形式、

数控机床主要组成部分包括机床本体、数控装置、伺服系统、检测与反馈装置等^[4],从早期的数字逻辑控制,发展到基于微处理器的控制,一直到现代的基于PC的控制;可控制轴数也从早期的三轴控制发展到五轴、多轴联动;机床本体结构更是从小型的立式、卧式,发展到大型的龙门结构、转台结构;机床的主传动系统、进给传动系统也从早期的电机驱动的机械式机构(如传送带、齿轮、滚珠丝杠等)发展为机电一体化的功能部件(如电主轴、直线电机等);控制方式从早期的实时控制、机械误差补偿发展到现在的前馈控制、非线性补偿、伺服环与速度环的软件控制,适应不同类型机床对不同精度及速度的控制,满足数控设备高性能控制的要求。

不同的产品类型、不同的生产模式对机床结构、控制能力、信息交换能力等都有不同的需求,数控机床加工的适用性主要考虑的因素包括零件结构形式、材料特性、精度要求以及生产现场的系统集成要求。

飞机结构件以机翼梁、机身框、翼肋、壁板为典型代表,零件形式为扁平形结构,零件尺寸较大,带有机身、机翼理论外形,适应这类零件加工的数控机床以具有龙门结构、五轴联动控制、 AB 摆角组合的为最佳(AC 、 BC 摆角组合则更适合加工圆柱形、半球形零件),也便于大型毛坯吊装和加工过程中的定位装夹。

发动机零件以机匣、整体叶盘、叶片以及轴、盘为典型代表,除轴、盘类零件适合采用车削加工外,其他零件也为回转形结构,部分部位需要车削加工,大部分涉及安装及气流通道的部位还需要铣削加工,五坐标联动控制、转台结构的数控机床适合机匣、整体叶盘等大中型航空发动机零件的加工,一是满足零件的回转精度要求,二是便于加工沿周向分布的结构及定位装夹。

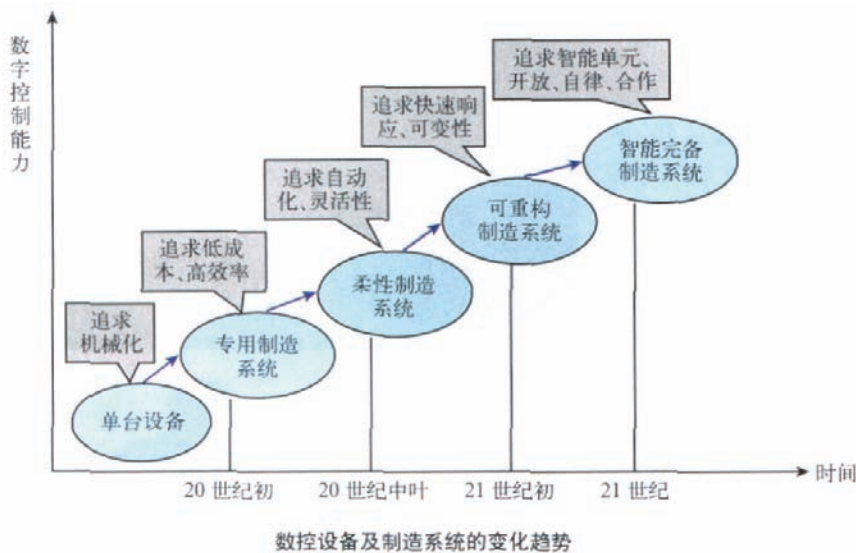


图1 数控设备及制造系统的变化趋势

设计,零件的外廓尺寸也越来越大,整体结构数控加工在现代航空产品制造中所占的比例快速增加。航空产品的切削加工过程,对实现高效、准确加工有着迫切的需求。

飞机机体的梁、框、肋、壁板以及发动机的压气机风扇、整体叶盘等都是现代飞机、航空发动机的关键零件,这些零件大多以整体结构为主,不仅大多采用难加工材料、结构复杂,而且材料去除量大、精度及表面质量要求高,导致加工周期较长。

在传统飞机、发动机的设计中,由于技术条件的限制,零件采用分段制造、分段组合的方式制造出大型整体构件,这种条件下的零件加工以工序分散的形式进行,零件以流动的方式经过一系列设备完成全部加工内容;整体结构零件加工时定位装夹繁琐,加工周期长,更适合以工序集中的方式完成加工,常常在单台机床上完成一组工序的加工。

功能强大的数控机床产品,满足了航空零件曲面形式与结构复杂、精度要求严格、材料去除量大的加工需求。

随着波音777客机及新一代战斗机F22的研制,数字化设计制造已经成为航空产品研制的新模式,计算机技术及机床控制技术的发展,使得数控机床从单机自动化迈向智能化、集成化,具有更多的柔性、可重组性和智能性,制造系统集成、信息共享、生命周期管理已经成为现代航空制造的先进生产方式。

生产方式的变革与制造系统的变化,也促使数控机床本身从结构、功能、控制过程上产生了深刻的变革,但前提是其结构和功能的变化必须满足机床的加工适用性要求。

机床结构与加工适用性

数控设备的发展一直与产品结构的变化、制造技术的发展和计算机技术的进步密切相关。

航空产品中,不同的材料对主轴的切削能力要求也不同,对于钛合金、高温合金、不锈钢等难加工材料,材料变形屈服极限高,切削变形抗力大,导致切削力大、切削功率高,需要机床主轴有更大的扭矩和功率,机械主轴结构通常可以提供满足难加工材料加工要求的功率及扭矩,功率通常可达十几到几十 kW,扭矩从几百到上千 $N \cdot m$; 对于铝合金、蜂窝结构和复合材料的切削加工,材料屈服强度低,切削过程产生的切削力小,适合采用高速高效加工方法,可采用很高的切削速度、较快的进给速度来实现高速、高精度加工,高速大功率电主轴是满足高速加工的关键条件之一,其功率一般为十几到几十 kW,扭矩通常只有十几到几十 $N \cdot m$,可以满足铝合金、蜂窝结构及复合材料零件的加工需要。

现代航空产品的性能要求越来越高,产品的更新换代速度越来越快,对零件的加工效率要求不断提高,精度和成本的控制也越来越严格,这对于数控机床的性能提出了更高的要求,高效加工、高精度控制、低成本制造、绿色环保是当今制造过程所追求的更高目标。

未来机床性能的发展趋势

随着产品制造技术、机床设计技术和一些单项应用技术的发展 and 成熟,新型数控机床不断出现,并逐步进入实用状态,典型的代表有: 并联

结构的数控机床、精密加工中心、车铣复合加工机床、柔性制造单元、高速铣削中心等。

这些新型机床结构的出现是与制造技术的发展相适应的。传统的机械制造以机械—电力为核心,而现代制造以新材料、数控技术、微电子和自动化技术为基础,生产方式也从劳动密集型的手工操作,发展成为信息密集型的制造过程,更进一步向着知识密集型、智能密集型的方向发展(表1)。作为制造系统中的单机设备,复合加工、自适应控制、信息集成制造已经成为现代数控机床的发展方向之一。

现代数控机床已为当代航空产品的制造提供了好的支持,生产方式和技术的进步仍然是促进新型机床产生和发展的源泉。未来数控机床的发展,主要应满足以下需求:

(1) 高精度、高效率加工的需求。

航空产品零件加工过程一般都需要使用数量不等的一组刀具才能完成加工,加工误差不仅影响零件的尺寸精度,也影响零件的重量参数,航空零件的精确加工是近年来切削加工过程中十分注重的,不仅仅涉及到机床本身能达到的精度,还与刀具系统密切相关。在机床运行过程

中,如何方便地对刀具重复安装精度进行有效控制,是现代与未来机床需要考虑的重要内容之一,尽管现代数控机床有些已经配备了刀具参数测量系统,但与运行过程的集成度较低,难以实时监测刀具尺寸的变化。

高效加工的主要手段是提高工

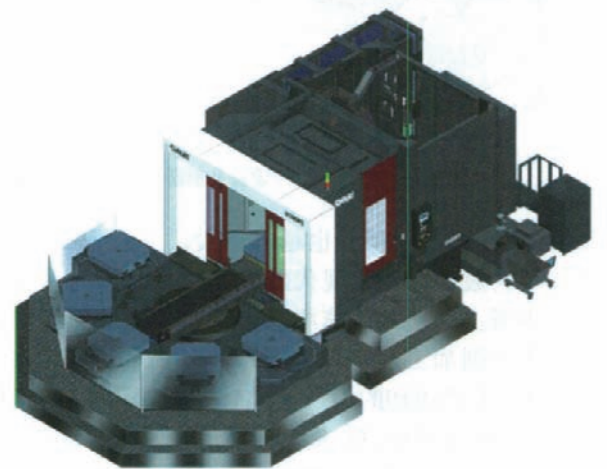
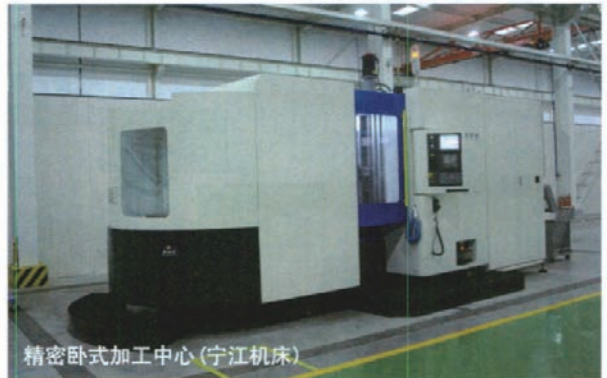


表1 制造系统的生产方式及其特点

生产方式	技术特点
劳动密集型	手工劳动,对工人技术水平要求高、产品精度一致性差
设备密集型	手工操作,劳动生产率较高、产品精度一致性较好
信息密集型	以数控机床为典型代表,人一机之间有信息交流,能快速、准确地实现加工
知识密集型	生产系统,具有数据库、专家系统,获取较少信息完成加工要求
智能密集型	在探索的方式,试图使制造系统本身具有人工智能,目标是无图纸加工、无人化加工

艺参数,铝合金、镁合金等轻质材料的高速加工已经实用化,难加工材料的高速加工也逐步成为现实,提高效率是切削加工的一个永恒主题。高速加工与恒工况控制是高速高效加工中迫切需要解决的问题,目前主要是依靠工艺人员在工艺设计、程序设计中实现,未来机床上应通过传感器、软件控制实现这种功能。

复杂零件的装夹会增加机床辅助时间,自动化夹具与机床集成是减少非加工时间的有效途径之一,未来机床应具有开放式结构,便于夹具系统与机床集成控制与管理。

多功能化是未来机床的主要特征之一,针对产品结构特点,进行复合加工、在线检测,不仅消除重复定位误差,也通过工序集中提高了加工效率。如航空发动机整体叶盘零件,切削加工需要经过车削、铣削、抛光以及检测等工序,铣车复合加工机床可以提高这类零件的加工精度和加工效率。

(2) 生产系统信息集成需求。

集成化的制造系统是基于网络连接、信息化管理与数字化控制技术实现的,对于未来的数控机床,可靠灵活的网络能力、信息采集与反馈装置、多任务管理与控制功能应当成为基本配置,在这些功能的支持下,数控机床可以方便地进行信息采集与交换,组成具有不同功能的生产线和制造系统。

生产系统信息集成对数控机床的另一方面需求是信息的主动收集与发送功能,对于零件加工状态、设

备运行状态、环境状态应以合适的方式(有线通讯、无线通讯、网络等)直接发送给相关的技术人员、管理人员或运行控制中心。

(3) 智能控制需求。

制造过程的自动化仅仅是解放了生产过程中人们的体力劳动,决策过程的自动化在数控设备上尚难体现,切削参数优化、加工过程监测、故障诊断目前更多地依赖于技术人员和设备操作人员。目前,一些单项技术已经逐步成熟,如切削过程的参数优化控制,已经有可集成到数控机床上的产品得到应用。在未来一段时间,切削参数优化控制、加工过程监控与误差补偿、故障诊断、模式识别等智能性控制与管理应成为数控机床的新亮点,特别是对于工艺系统几何误差、热变形、弹性变形、振动、轨迹误差等参数的智能监测与补偿,应成为未来机床的基本能力,为智能制造提供基础保证。

结束语

航空产品的制造方式已从早期的单机制造走向以信息集成、数字化控制为基础的集成制造过程,零件的复杂程度不断增加、加工精度日趋严格、产品更新周期日益加快。数控机床的出现提高了零件加工精度与效率,将人们从繁重的手工操作中解放出来,数控机床在信息集成、智能控制方面还会有深刻的变革,最终把人们从单调重复的智力劳动中解放出来,这是未来机床的重点发展方向。

参考文献

- [1] 韩荣第,王扬,张文生. 现代机械加工新技术. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 艾兴. 高速切削加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [3] 张世琪,李迎,孙宇,等. 现代制造引论. 北京: 科学出版社, 2003.
- [4] 陈子银,陈为华. 数控机床结构、原理与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. (责编 金卯)

欢迎拨打全国免费热线:
800-828-1012

PRYOR

MARKING TECHNOLOGY

世界领先的打标技术



普锐 便携式点阵打标机



普锐 车间用点阵打标机



普锐 工业用点阵打标系统



普锐 字模及冲头

二维(2D)码打标及识别系统



中 / 国 / 总 / 代 / 理
南京安迈机电有限责任公司

南京市中山东路288号新世纪广场A幢801室 邮编: 210002
电话: 025-86651888(总机), 84703155, 83603118
传真: 025-84703382
电子邮箱: info@aimacindustries.com
网址: www.aimacindustries.com/pryor.htm

英国Edward Pryor & Son Ltd 公司已有150余年的历史,是世界著名的打标机制造商。其产品系列丰富完整。由于优秀的产品质量和服务, Pryor已成为许多世界一流公司的打标产品供应商,更被劳斯莱斯(Rolls-Royce)指定为针式打标机的独家供应商。

广告索引号 08-105