航空产品与机床设备发展的相互影响

Mutual Influence of Aviation Product and Machine Tool Equipment Development

中航工业沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司技术中心　叶洪涛　贺　芳　李培阳

叶洪涛

中航工业沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司技术中心工艺技术研究所专职技术专家、高级工程师，研究方向涉及航空零件数字化制造技术、虚拟加工技术、切削数据智能专家系统技术、难加工材料高速高效加工技术等方面。

航空产品与机床设备发展的相互影响可以从两个方面来分析：一方面，对于航空产品设计性能的不断追求，促进了相关多种技术和装备的发展。如熔模铸造、粉末冶金、数控、在线检测等。而这些技术和装备的广泛应用，又促进了其他行业（诸如机械设备、交通运输、医疗、消费等）水平的普遍提高；另一方面，相关技术装备、材料工艺及配套软硬件技术的提升以及新装备新技术（如无余量加工、增材制造、FMS、PDM、MBD 技术）的普遍应用，又反过来影响和改变着航空产品的设计模式，不但使以前无法实现的设计得以实现，而且不断促进产品设计性能和制造水平的提升。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.05.042

航空产品的性能、质量与生产效率是与其制造装备，尤其是机床设备的发展密不可分的。一般说来，产品的设计以用户与市场需求为导向，但设计目标能否最终实现，受到装备与制造工艺水平的制约。航空产品也是如此。航空零部件普遍具有十分复杂的几何结构、较高的精度和检测要求，同时大量使用钛合金、高温合金、不锈钢、高强度铝合金、复合材料等高性能材料，以保证航空产品对于其使用性能及环境、强度与重量的特殊要求。这些零部件从制造到检测对于其制造工艺与装备有着很高的要求。同时伴随着科学技术的日新月异，面对风云变幻的国际形势和瞬息万变的市场，过去长达 10~15 年的航空产品研制周期已经不能满足现今的客户需求。这就要求航空制造企业必须对市场的变化有快速反应的能力，尽量缩短产品的研制周期，并能够对预研产品有足够的预验证能力。这些也对航空产品制造装备以及相配套的软硬件条件提出更高的需求。

航空产品与机床设备发展的相互影响可以从两个方面来分析：一方面，对于航空产品设计性能的不断追求，促进了相关多种技术和装备的发展。如熔模铸造、粉末冶金、数控、在线检测等。而这些技术和装备的广泛应用，又促进了其他行业（诸如机械设备、交通运输、医疗、消费等）水平的普遍提高；另一方面，相关技术装备、材料工艺及配套软硬件技术的提升以及新装备新技术（如无余量加工、增材制造、FMS、PDM、MBD 技

术）的普遍应用，又反过来影响和改变着航空产品的设计模式，不但使以前无法实现的设计得以实现，而且不断促进产品设计性能和制造水平的提升。

毛料精化与无余量制造机床设备

航空产品毛料对成品质量有着至关重要的影响。由于航空零件普遍结构复杂、精度要求高，传统的毛料制造技术往往无法满足其表面尺寸与精度要求。很多表面在铸造和锻造成型之后还需要由机械加工来完成，如发动机轮盘、压气机叶片等。由于航空零件大量采用造价昂贵的难加工材料，较大的毛料余量不但造成材料的浪费，而且使航空产品机械加工的效率十分低下。同时，机械加工本身会破坏毛料原本内部金属流线的完整性，并释放内部应力，造成零件变形，对产品的最终质量产生不利的影响。因此，航空产品对于毛料制造的精化、细化及无余量制造技术及装备产生广泛的需求。

近几年来，毛料的精化、细化技术日臻完善。精密铸造工艺设备不涉及机床概念，在此不加讨论。无余量精密锻造技术采用高精度的锻造机床设备、完善的检测和辅助处理工艺，可使发动机锻造叶片型面及缘板面达到无余量状态。该技术的应用可提高锻件尺寸精度，保证叶片内部金属流线的完整性，提高产品可靠性，同时降低叶片加工成本，提高叶片的生产效率。精密冷辊轧机床设备不仅使加工技术简化，更重要的是可使叶片的机械性能、产品质量和使用性能得到提高，有利于叶片材料潜在性能的发挥[1]。

近年来，粉末冶金材料和工艺开始广泛应用于航空产品，如发动机轮盘、飞机结构件等的制造。粉末冶金技术的关键在于粉末的制备以及零件的成形和致密化技术。合金粉末一般采用热等静压、热挤压、喷射成形、快速成形和注射成形等工艺进行成形和致密化。其中激光快速成型工艺又称3D打印，也称为金属材料增材制造技术，以区别于以塑性加工工艺为代表的等材制造和以机械加工工艺为代表的减材制造。该技术是以金属粉末、颗粒或金属丝材为原料，通过CAD模型预分层处理，采用高功率激光束熔化堆积生长，直接从CAD模型一步完成高性能构件的“近终成形”。3D打印设备虽然没有被明确称为机床，但是具备机床这一概念所具备的一切特征。同时将其功能融入现有的数控机床设备也是机床行业近年来努力的一个方向。

增材制造技术以其灵活多样的工艺方法和技术优势在现代航空产品的研制与开发中具有独特的应用前景。在航空制造领域中，难加工材料、复杂型面的结构件等都可以很好地采用增材制造技术实现高精度加工。由于没有传统机加工艺对于刀具的可达性限制以及铸造及塑性加工中的脱模限制，3D打印几乎可以实现能够在CAD中设计的任何结构形式，从而产生全新的设计，如图1所示。同时，由于3D打印几乎不需要传统工艺需要的夹具、模具制造等工艺准备环节，可以大幅度缩短航空产品的研制周期，提高快速响应能力。

图1　使用3D打印制造的全新设计航空零件

数控设备与柔性制造

尽管随着新型航空材料与成型技术的不断应用，机械加工在航空产品制造工艺中的比重有减少的趋势，但是对于高精度尺寸和表面特征，切削加工仍然是无法替代的加工手段。同时，随着航空零部件中新材料和新结构的不断应用，机械加工的难度也在不断增加。

与其他尖端制造行业一样，航空产品加工所使用的数控机床正朝着高速化、精密化、智能化、绿色化等方向发展。自20世纪90年代初以来，各国相继推出了许多主轴转速10000~60000r/min以上的数控机床。高速加工技术的应用缩短了切削时间和辅助时间，不仅可以提高生产效率，还可以改善加工质量，已成为机床技术重要的发展方向。同时，通过优化机床的结构，提高了制造和装配的精度，减少了数控和伺服系统的反应时间。采用温度、振动误差补偿等技术，提高了数控机床的几何精度、运动精度等。

随着人们环境保护意识的加强，对环保的要求越来越高。不仅要求在机床制造过程中不产生对环境的污染，还要求在机床的使用过程中不产生二次污染。在这种形势下，装备制造领域对机床提出了无冷却液、无润滑液、无气味的环保要求，机床的排屑、除尘等装置也发生了深刻的变化。上述绿色加工工艺愈来愈受到机械制造业的重视。

（1）数控设备的集成化与智能化。

数控设备的集成化包括将多种机械加工工艺集成于一台数控机床或者在数控机床设备中融合其他加工或检测等工艺技术。复合加工是机械加工的重要发展方向之一。其

中车铣复合加工是最具有代表性的技术领域。车铣中心具有多轴联动功能，能够完成任意角度的车削、铣削、钻削、镗削、滚齿、攻、铰、扩等任务，具有高柔性、多任务的特点。在单件和成批生产中均可获得较高的关联加工尺寸精度、大大缩短加工辅助时间，是加工精密、复杂回转零件的理想设备。它对于提高航空回转关键零部件的制造精度及缩短制造周期有着重要的作用。在线测量通过将检测技术融于数控加工的工序过程中，可以避免脱机检测返修带来的二次装夹定位，解决零件制造中通用工装和专用工装无法测量部位的测量，显著提升加工效率，保证加工质量。在航空产品研制和生产中，可以对正在加工中的零部件进行及时的修正与补偿，以消除废次品的产生。

智能化的内容包含在数控系统中的各个方面：为追求加工效率和加工质量方面的智能化，如加工过程的自适应控制、工艺参数自动生成；为提高驱动性能及使用连接方便的智能化，如前馈控制、电动机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型、PID 参数自整定等；简化编程、简化操作方面的智能化，如智能化的自动编程、智能化的人机界面等；还有智能诊断、智能监控方面的内容、方便系统的诊断及维修等[2]。

自适应控制技术通过在加工过程中，根据采集到的电机扭矩、主轴振动等机床运行状态信息，进行机床的自我调整和控制，以此保证机床的正常加工和运行，保持机床以最佳动态性能加工零件。这样既提高了设备生产效率，又保证了加工精度。智能化故障诊断技术包括机床信号数据采集和监控、数据传输和智能化人机界面设计开发等内容。根据数控机床故障机理分析，选择能反映机床特征的信号，通过在机床关键部件安装不同类型传感器，进行机床特征信号的采集，经处理后进行可视化界面监控。智能化实时补偿技术通过外接传感器，采集主轴在轴向和径向的热膨胀伸长误差，通过对这些误差数据分析处理，进行实时补偿，提高机床加工精度[3]。

（2）生产线与制造装备的柔性化。

所谓柔性制造，传统意义上是指用可编程、多功能的数控机床设备更换刚性自动化机床设备，用易编程、易修改、易扩展、易更换的软件控制代替刚性联结的工序过程，使刚性生产线实现软性化和柔性化，能够快速响应市场的需求，完成多品种、中小批量的生产任务。柔性制造系统（FMS）中的柔性具有多种涵义、除了加工柔性外、还包括扩展的柔性、工艺的柔性、批量的柔性、设备的柔性、产品的柔性、流程的柔性以及生产的柔性[4]。图 2 为大型飞机的柔性生产线。

图2　大型飞机的柔性生产线

航空产品尤其是飞机和发动机的一些关键零件，由于其结构的特殊性，往往采用较为分散的工序和较长的生产线。在柔性制造技术研究的早期，由于数控机床设备本身功能和性能以及配套软硬件条件的限制，柔性制造系统必须在较大的生产线级别和较大投资水平上才可以实现。对于航空产品来说，仅在成熟产品和实力十分雄厚的航空制造企业获得了有限的实际应用。随着数控设备及相关信息化技术的发展，以占地面积小、成本低、功能完善为特点的柔性制造单元（FMC）得到了长足发展和应用。通过工序集中，在较小的柔性制造单元中完成大部分在较长生产线中才能完成的加工工序。而柔性加工机床更是将柔性制造单元集中到一台设备中，可以在一台设备中完成零件从毛料到成品的大部分加工，柔性组合机床如图 3 所示。对于一些小型航空零部件的快速研制有着十分重要的价值

除了机床设备的柔性，辅助工艺装备（如夹具等）的柔性也是重要的一环。柔性夹具是以组合夹具为基础的能适用于不同机床、不同产品或同一产品不同规格型号的机床夹具。由预先制造好的各种不同形状、不同尺寸规格和不同功能的系列化、标准化元件、组件和合件拼装而成。夹具元件通过组装—使用—分解—再组装周而复始循环使用，可以大量减少制造夹具材料、动力消耗，降低其制造费用，减少夹具的设计、制造、调节时间。与专用夹具相比较，柔性夹具元件具有明显的技术经济效果，适用于多品种、小批量生产以及 FMC、FMS 和 CIMS 等加工系统。

信息化与虚拟机床

随着信息化技术的发展，航空产

图3 柔性组合机床

品的研制也正在从实体制造验证向虚拟制造验证的方向转变。虚拟制造是一种广义概念,但从习惯性和狭义角度也可将虚拟制造理解为:利用虚拟现实技术在计算机上完成产品的成型、加工和装配过程。虚拟制造技术的发展填补了CAD/CAM技术和生产管理活动之间的鸿沟,使人们在真实产品生产前,就可以在计算机上虚拟地进行产品成型、加工、装配和测试,减少试切、试装次数,及时发现工艺过程、作业计划、生产调度及加工质量方面的问题。虚拟加工实现的关键是在提供的虚拟工作环境下,对不同的加工方法建立由机床、刀具、工装组成的加工系统的运动学、动力学模型及误差分析模型。虚拟装配利用VR技术构建的多模式(包括视、听、触等)交互装配仿真环境,由装配规划人员交互地建立产品零部件的装配顺序和装配路径及确定工、夹具和安装方法,可视化地比较不同的装配工艺过程,在不进行实物试装的情况下,人机协同地对产品的可装配性问题进行全面、精确的检查和分析,尽可能早地发现并解决潜在的装配问题[5]。

虚拟机床是使用软件元素工具包构建的,包括机床的三维模型、加工仿真软件、软件内核和控制器的人机界面软件。虚拟机床能减少机床的非生产性时间。虚拟机床的成本仅相当于实际机床的零头,但非常逼真,可以用于减少实际机床的非生产时间。利用虚拟机床技术,可以提高加工效率,保证数控编程质量,减少数控技术人员与操作人员的工作量和劳动强度,提高数控编程制造加工一次成功率,缩短产品设计和加工周期,提高生产效率。

传统航空产品制造是以二维工程图纸为依据。随着数控及CAD/CAM等相关软硬件技术的发展,大量新产品研制都已引入二维和三维结合的数字化制造技术。但从产品设计、工艺工装、数控编程及检测等环节中仅包含几何信息的三维数字模型的应用效果并不理想,其重复工作量大,数据不唯一。基于模型的定义(MBD)技术通过集成的三维实体模型来完整表达产品信息,详细规定了三维实体模型中产品的尺寸、公差标注规则和工艺信息。全面实施MBD对于提升航空产品制造水平、缩短制造周期、降低制造成本、提高产品质量有着重要意义[6]。产品数据管理(PDM)则是对企业全生命周期产品数据、资源与业务流程进行整体优化管理的一种信息技术,是产品数字化制造的技术平台。它以产品数据为核心,是其他各种软件工具和分析、管理工作的集成环境与基础。它能提供一种结构化的方法,有效、有规则地存取、集成、管理、控制产品数据和数据的使用流程。PDM系统提供的版本管理功能能够保证所有参加同一项目的员工采用单一数据来工作,并且是及时和最新的数据,确保设计过程数据的一致性,减少设计中重复和更改次数。

综上所述,航空产品与机床设备的发展是一种相互依存且相互促进的关系。从100多年前第一架飞机升空飞行伊始,人类从来没有停止过探索飞行奥秘的脚步。对于航空产品性能的不断追求对机床设备在精密、高效、环保与智能化等方面提出了更高的要求。同时,各类新技术及新工艺的不断应用也在不断推进航空产品与机床设备技术水平的提升,从而促进社会整体科技水平的不断进步。

参 考 文 献

[1] 邰清安,李治华,孙立群,等. 航空发动机塑性成形技术的应用与展望. 航空制造技术,2014(7):34-39.

[2] 杨建武. 国内外数控技术的发展现状与趋势. 制造技术与机床,2008(12):57-62.

[3] 邓凌,乔永忠. 智能化技术在数控机床上的开发应用. 航空制造技术,2013(5) :48-51.

[4] 唐敬来,陈相羽,王书标. 基于FMS的自动化制造技术. 才智,2013(18):175.

[5] Xu H S. Digitization technology and manufacturing Automation. Journal of Shanghai Universiing, 2004,8(8):64-69.

[6] 赵娜. 航空制造企业PDM集成技术应用研究. 信息技术与标准化,2013(4):39-43.

(责编 叶枫)