

# 大型航空结构件数控加工装备 与先进加工技术

NC Machining Equipment and Advanced Machining Technology for Large Aircraft Component

成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 韩 雄 汤立民  
国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心



韩 雄

成飞公司数控加工厂技术科副科长、工程师。长期从事大型航空结构件数控加工工艺技术研究工作,参与并组织完成了多项工艺技术攻关工作。参与完成的科研课题多次获得原中国一航及成飞公司科技成果及管理创新奖。

自 20 世纪 50 年代第一台数控机床问世以来,数控机床及数控技术经历了半个多世纪的发展,如今数控加工已普及到各个制造领域,不仅提高了产品加工质量和效率,缩短了生产周期,改善了劳动条件,而且对制造企业的产品结构和生产方式都产生了深远的影响。数控加工作

本文从航空结构件的发展特点出发,结合国内外航空制造业现状,对大型飞机结构件的数控加工装备及数控加工技术进行探讨,论述了当前大型航空结构件数控加工装备的发展方向及先进数控加工技术。

为一种高效、精密的数字化切削加工技术,成为飞机复杂结构件机械加工的主要手段,飞机结构件 50% 以上的加工工作量由数控加工完成。而随着航空工业的不断发展,飞机性能不断提升,飞机结构件日趋大型化、复杂化,对相应的数控加工装备及数控加工技术提出了更为苛刻的要求。本文从航空结构件的发展特点出发,结合国内外航空制造业现状,对大型飞机结构件的数控加工装备及数控加工技术进行探讨,论述了当前大型航空结构件数控加工装备的发展方向及先进数控加工技术。

## 航空结构件的 发展和特点

### 1 航空结构件的发展趋势

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的主要组成部分,随着现代飞机为满足隐身、超声速巡航、超常规机动、高信息感知能力、长寿

命、结构轻量化等方面的性能要求,大量地采用新技术、新结构、新材料,其结构件呈现出以下的发展趋势。

#### (1) 结构大型化。

相对于以往的小型结构件焊接、组装模式,采用大型整体结构件可大量减少结构件零件数量和装配焊接工序,并有效减轻飞机整机重量,提高零件强度和可靠性,使飞机的制造质量显著提高,如 F-22 战机后机身整体框毛坯尺寸达到 4000mm×2000mm。

#### (2) 结构复杂化。

飞机整体结构日趋复杂,其外形多数与飞机的气动外形相关,周边轮廓与其他零件还有复杂的装配协调关系。同时,薄壁加筋结构使得结构件刚性弱,筋顶结构复杂,壁厚最薄部位不足 1mm。

#### (3) 材料多元化。

随着新一代战机性能的逐步提高,新型高性能材料不断引入,高强

度难加工材料和低密度轻质材料成为航空结构件的两大类主要材料,结构件材料逐渐由铝合金为主转变为铝合金、钛合金、复合材料并重的局面。

#### (4) 制造精确化。

精确制造对结构件形位、尺寸公差都提出了更高的要求,以满足精确装配的需要,如腹板最高精度达到



±0.1mm,比前一代飞机提高一倍以上。

#### 2 航空结构件的工艺特点

航空结构件的上述发展趋势决定了其工艺特点:结构复杂,加工难度大——零件外形涉及机身外形、机翼外形及翼身融合区外形等复杂理论外形,且需与多个零件进行套合;切削加工量大——材料去除率达到90%以上,部分零件甚至达到98%;薄壁,易变形——存在大量薄壁、深腔结构,为典型的弱刚性结构;加工精度高——装配协调面、交点孔等数量多,零件制造精度要求高;难加工材料比例大——以钛合金、复合材料为代表的难加工材料比重越来越大,对航空制造业提出了严峻的挑战。

#### 航空结构件数控加工装备发展方向

随着航空工业的快速发展,一方面,飞机结构件尺寸越来越大,结构

越来越复杂;加工精度越来越高;另一方面,飞机结构件中难加工材料比例越来越高,使得加工效率逐步成为制约飞机研制和批量生产的关键因素。为适应航空结构件的高效、高精度数控加工要求,高速、高精、智能、复合、环保等特点成为了实现现代飞机结构件数控加工装备的主要发展方向。

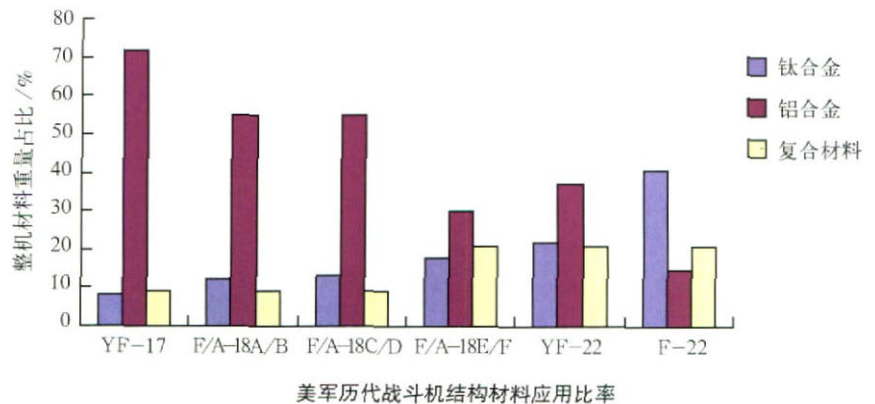
#### 1 高速加工是实现高效加工的主要途径

高速加工技术不仅成倍地提高生产效率、改善零件的加工精度和表面质量,而且有效地解决了低速加工中一些难以解决的问题:例如实现超薄零件的加工、某些特殊材料(如纤维增强塑料等)的高效加工等。高速加工依然是目前实现这些飞机结构件高效加工的主要途径。

近年来,高速加工相关技术得到

了迅猛的发展,反映高速加工能力的各项性能指标不断提高。当前应用的高速主轴,转速可达420000 r/min,甚至更高;直线电机和力矩电机已逐步进入应用阶段,进给速度越来越快,达到120m/min;进给加速度越来越大,大型机床进给加速度达到9.81m/s<sup>2</sup>,中小型机床进给加速度达到19.62m/s<sup>2</sup>,反映加速度变化率的加加速度(Jerk)已成为衡量高速性能的一项主要指标;切削效率越来越高,铝合金结构件数控加工的材料去除率高达5000~7000cm<sup>3</sup>/min。

目前,以德国DS Technologie公司生产的Ecospeed系列机床为代表的高速五坐标并联机床主轴摆动速度达到80°/s,加速度达到685°/s<sup>2</sup>,远高于普通的串联机床;其线性轴移动速度超过50m/min,加速度达到9.81m/s<sup>2</sup>;主轴最高转速30000r/min,功率达到80kW,在航空铝合金结构件生产中金属去除率可达7000cm<sup>3</sup>/min,无疑代表着当今航空结构件高速加工的最高水平。同时,随着机床技术的不断发展,高速电主轴也开始逐步应用于钛合金的高效加工,如INGERSOLL公司生产的H22-3R卧式机床采用了OMLAT的高速电主轴,主轴最高转速10000r/min、最大扭矩830N·m,在1000r/min时扭矩可保持在400N·m,在3000r/min时功率为45kW、扭矩仍超过150N·m,为

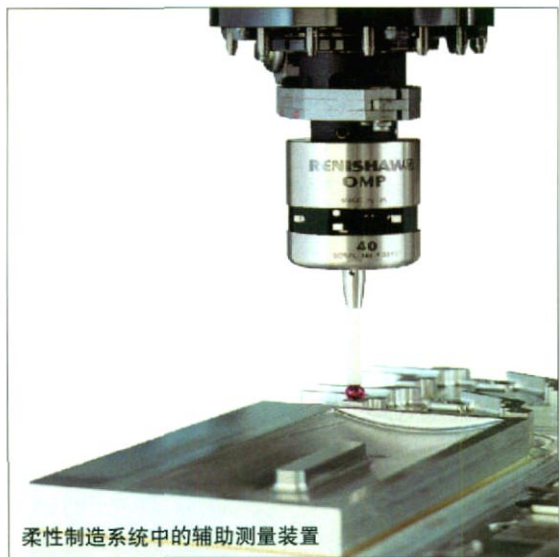


钛合金高效加工提供了良好的硬件基础。

## 2 航空数控装备逐步精密化

随着飞机整体性能要求的提高,飞机结构件正向尺寸更大、精度更高的方向发展,大型结构件的精密加工是实现飞机结构件高效数控加工必须面临的挑战。而随着数控机床基础大件结构特性和热稳定性的提高、全闭环控制技术、温度实时补偿技术、在线监控技术等突破,可使数控机床获得更好的加工精度。

目前,提高机床精度的措施主要有:框中框热对称结构设计,可获得高刚性、高精度和低移动质量;有限元结构优化设计,使机床结构刚性均匀分布,固有频率提高3~4倍,减小振动,提高表面加工质量;对发热



柔性制造系统中的辅助测量装置

元件进行实时温度控制和补偿;机床几何精度误差和热变形实时监控与补偿。这些技术的应用使得机床精度大为提高,当前纳米级数控机床已在生产中得到应用,最为典型的代表是瑞士DIXI公司的精密镗铣床:定位精度 $\leq 0.8\mu\text{m}$ ,重复定位精度 $\leq 0.1\mu\text{m}$ 。

## 3 航空数控装备的智能化、柔性化

数控机床智能化是指数控机床能够获得加工过程中产生的应变、振动、热变形等与加工相关的信息,并自动补偿和优化机床加工性能,以提

高加工精度、表面质量和加工效率。目前,很多机床都逐步集成Artis等自适应控制系统,不仅可通过机床主轴监控(刀具平衡检测、冲突检测、轴承检测等)及刀具监控(破损检测、磨损检测等)实现刀具、机床的过载保护,而且可通过加工过程中的数据采集及系统自动判断进行实时速度调控,从而实现稳定负载的高效加工。

为进一步提高设备利用率及数控加工效率,航空制造业开始大量引进柔性制造单元(FMC)及柔性制造系统(FMS),而卧式加工中心及立卧转换加工中心由于其排屑性能良好,在柔性制造单元及柔性制造系统中得到了更为广泛的应用。在柔性制造系统中,多台加工设备及刀具

在线检测、加工坐标系自动找正辅助装置结合在一起可以实现高效率的自动化加工:工作台自动交换与装夹系统实现加工零件的自动更换;加工坐标系找正系统采用测头实现加工坐标系的自动找正、设定和补偿;刀具在线检测系统实现对使用刀具的长度、直径等主要参数进行检测并自动输入,根据使用要求对刀具误差进行补偿或状态判断。

## 数控加工技术的新发展

大型航空结构件的数控加工,关键在于质量和效率。而制约数控加工质量和效率的主要因素,一方面在于机床硬件条件,而更为重要的还在于支撑高效数控加工的相关使能技术,如刀具技术、工装技术、工艺设计及仿真技术等。

### 1 刀具技术的发展

刀具技术是数控加工的关键技术之一,也是限制难加工材料加工效

率的一个技术瓶颈。随着刀具技术的进步,刀具材料和刀具结构不断改进,刀具种类越来越多,如何合理选择刀具及切削参数是提高数控加工效率的核心所在。

在铝合金材料加工方面,高速切削技术已经得到全面应用,在高速粗加工过程中大量应用可转位高速立铣刀,在大功率高速机床上可达到 $6000\text{cm}^3/\text{min}$ 的金属去除率,加工成本也可得到有效的控制;整体硬质合金刀具是当前铝合金高速加工的主要刀具,主要用于铝合金零件的精加工或窄槽的粗精加工,可获得好的表面质量并具有较长的刀具寿命。而陶瓷、金刚石及立方氮化硼等超硬刀具具有极高的耐磨性,几乎不受切削速度的限制,切削抗力小,没有积屑瘤,能够最大限度地发挥高速机床的加工效率,非常适合于铝合金的高速加工,将逐步成为铝合金高速加工的首选刀具。

在钛合金材料加工方面,由于钛合金的切削加工性较差(其相对切削性在0.15~0.25之间),采用传统加工方式时切削速度一般不超过 $50\text{m}/\text{min}$ ,粗加工金属切除率一般不超过 $40\text{cm}^3/\text{min}$ ,精加工金属切除率不超过 $10\text{cm}^3/\text{min}$ 。目前,国内一些航空制造企业已经开始探索并应用钛合金高效加工方法:粗加工采用可转位玉米铣刀实现大切深、小进给的强力切削,该刀具有效避免了大悬伸刀具在加工过程中的振颤现象,比普通圆柱立铣刀加工效率更高;精加工前先使用插铣刀具对圆角进行加工,使精加工余量均匀;精加工过程中采用PVD涂层硬质合金刀具进行小切宽、大切深的高速铣削(切削速度达到 $170\text{m}/\text{min}$ )方式,使精加工时间缩短60%以上。

### 2 工装技术的发展

目前,国内大型航空结构件的装夹方式较为单一:铝合金结构件主要采用预留工艺耳片,并使用螺钉压

紧或真空吸附；钛合金等难加工材料主要采用压板压紧；蜂窝芯材料则主要采用双面胶带粘结固持。而数控发达国家已大量使用带气动、液压及控制系统的自动夹具。采用数控多点自动调节、真空吸附或机械夹头的柔性夹具，可实现对不同形状的大型结构件在机床上的柔性、快速定位和装夹，已成为数控工装设计制造的发展方向，是提高数控加工效率的另一关键技术。这项技术在加工薄壁结构件、大型复材结构件及蒙皮类零件时的优势尤为明显。当前，国内部分航空企业已开始引进带有柔性夹具的专用数控设备进行复合材料的加工。在蜂窝芯材料加工方面，浙江大学研究出一种基于强磁场和摩擦学原理的高速加工固持方法，并研制出相应的工装，取得良好的应用效果，加工蜂窝芯的质量和效率均有大幅提升。

### 3 工艺设计及仿真技术

工艺编程人员充分利用各种工艺资源进行零件工艺及数控程序编制的

全过程即为数控工艺设计，它直接影响零件生产计划及现场加工的质量，是整个数控生产至关重要的环节。航空制造业所面临的通常都是多品种、小批量的生产任务，新机研制任务繁重，数控工艺设计已成为制约数控生产新的“瓶颈”。在此背景下，国内航空企业纷纷展开基于知识的高效编程技术研究，其中成飞公司与国内相关院校合作开发了基于三维特征的快速编程系统，该系统在CAD/CAPP/CAM集成环境下，以加工特征为基础，实现了对飞机结

构件的快速编程。目前该系统已完成开发并获得验证成功。

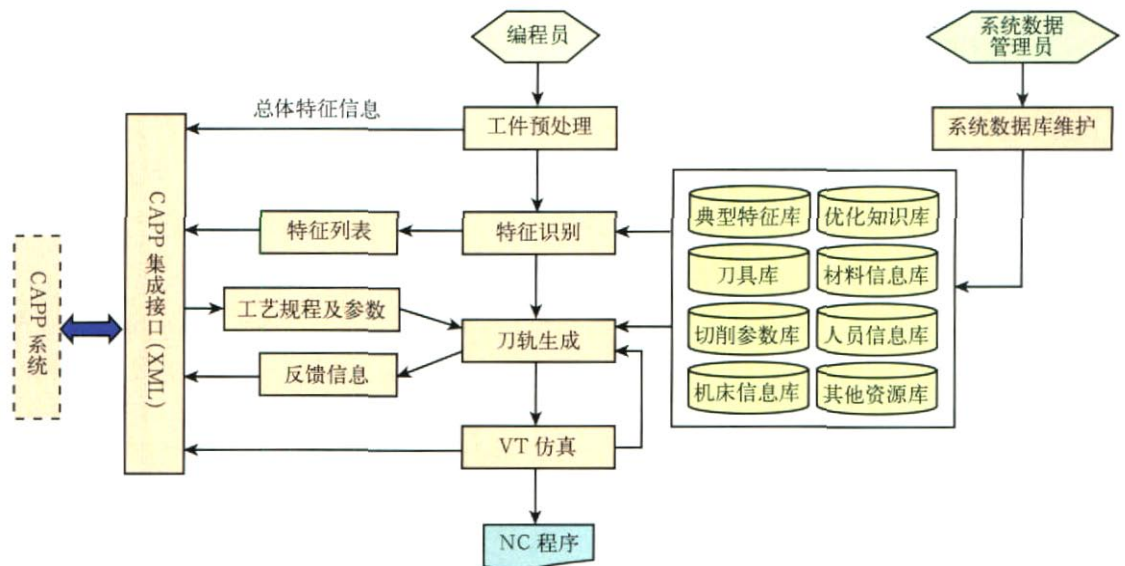
国外的情况，西门子公司收购UG后，正致力于搭建虚拟环境（工艺设计环境）与现实环境（实际加工环境）的无缝平台，以实现CAM-CNC集成：在车间数字化协同平台下，实现在工艺设计过程中机床系统信息（如系统内核、精度设置、高级指令、刀具寿命管理等）集成，在CNC端实现在线仿真和工件的在线检测，并将信息反馈回CAM系统。该项目的实施不仅促成工艺设计与实际加工信息的集成，同时也将大幅提升NC程序编制的效率和质量。

数控加工过程的仿真是虚拟制

模具等多个制造领域。国内，北京航空航天大学刘强教授等人开发了一套铣削加工动力学仿真优化系统SimuCut，该系统可实现铣削过程的力学仿真及切削参数的优化选择，并已在军工行业得到成功应用。

### 4 其他相关前沿技术

振动切削是在刀具（工具）或工件上附加一个或多个不同方向的低频、中频或超声振动，使传统封闭切削区加工变成切削区周期性打开的间断、瞬间、往复的断续切削过程。与普通切削相比，振动切削具有切削力小、切削热低、工件表面质量显著提高等优点，目前在钻孔、攻丝、铣削、车削、磨削等领域都有了广泛的



基于三维特征的快速编程系统框架

造技术的核心技术之一，主要分为几何仿真和物理仿真。目前国内航空制造业进行的数控加工仿真还只停留在几何仿真的层面上，其作用主要是检查数控程序刀具轨迹的正确性和几何干涉碰撞问题，而要实现更精确的仿真则必须对加工过程中的物理现象进行研究。国外在物理仿真技术研究方面起步较早，已开发出相应的仿真软件，如Cutpro、MetalMAX、AdvantEdge等，最早在波音、普惠等航空制造企业中得到成功应用，现已应用到刀具、汽车、

应用，是机械加工的一个重要发展方向。国外应用较为成功的蜂窝芯超声切割，其切割力小，切割精度高，切割边缘平滑，无破损碎屑，可很好地解决蜂窝芯薄边加工技术难题。

另外，绿色制造作为一种综合考虑环境影响和资源效率的先进制造模式，已逐步成为制造业发展的风向标。目前，国内部分航空企业正努力通过高速加工技术、微量润滑技术（MQL）、成组加工技术等各种途径，逐步向绿色制造迈进。

（责编 侧卫）