

# 大型飞机制造中的 关键数控技术及装备

Key Numerical Control Technology and Equipment  
for Large Commercial Jet Manufacturing

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 刘强  
国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心



刘强

工学博士, 现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授和博士生导师、国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心主任, 国防科技工业“511 人才工程”学术带头人, “泰山学者”特聘专家。现主要从事数控加工仿真优化与虚拟加工、现代数控装备动态分析与优化设计、高性能运动系统设计与控制及微机电系统制造技术等方向的科研与开发工作。曾先后获省部级科技进步二等奖 3 次、美国联合技术公司容阔科技教育奖、《机械工程学报》50 周年优秀论文奖等科技成果奖。发表学术论文 60 余篇, 申请国家发明专利和实用新型专利 16 项。

从大型飞机制造中数控加工零件的材料及结构特点和要求出发, 介绍了大型飞机制造中高速数控加工技术、新结构数控机床、专用数控加工机床、多功能复合加工、高效数控加工使能技术等方面的内容, 并对相关的技术和装备要求及发展趋势进行了分析。

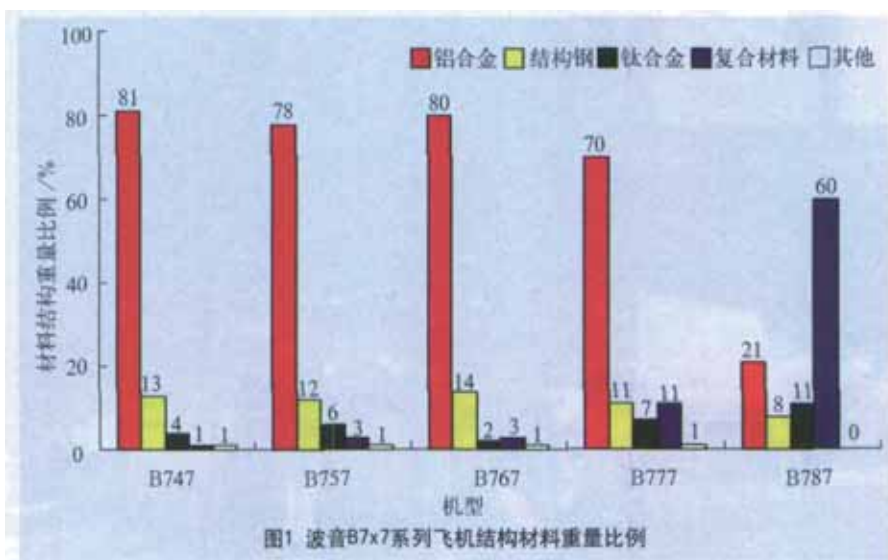
大型飞机结构与材料的特点对数控加工技术及装备提出了很高的要求, 主要表现为:

(1) 铝合金结构零件数控切削

加工的高速化和高效化;

(2) 钛合金及结构钢零件数控切削加工大扭矩和高刚性要求;

(3) 复合材料铺放及加工的自



动化和数控化;

(4) 数控加工工艺与装备技术解决方案的一体化。



图2 空客A380和A350飞机结构材料重量比例

以上4个方面的要求,使得面向大型飞机零件数控加工技术及装备的发展与应用呈现出新的特点。本文就上述前2个方面,以飞机结构零件加工过程中涉及的一些关键数控加工技术及装备为重点,对大型飞机制造中的数控技术、装备以及相关的使能支撑技术的发展进行讨论。

### 大型飞机选料和结构特点

现代大型飞机在材料选择方面呈现出新的特点和趋势。波音系列和空客系列飞机结构材料的选用最具代表性,图1、2分别给出了这2个系列主要机型的选材情况。

从图1、2中可以看出,铝合金(包括铝锂合金)在大型飞机结构材料中所占比例较大,但在新的机型中铝合金的用量呈现出下降趋势,即由原来占结构重量的70%~80%下降为20%左右(B787和A350),而复合材料在飞机结构中的使用量则大幅度增长,原机型复合材料用量多在11%左右,到A380复合材料用量上升到22%,而A350和B787的复合材料用量比例高达52%和60%;钛合金和高强度结构钢的用量比例也呈增加的趋势,在B787、A380结构上增加到10%以上,而在A350上则高达21%。大型飞机结构选用材料方面呈现的主要特点和趋势是:复合材料用量大幅度增加,钛合金和钢用量也有较大增加,铝合金用量明显减少。

飞机结构零件主要有壁板、梁、框、肋、缘条、长桁和接头及骨架等,由于高性能、轻量化和高可靠性的要

求,在结构方面,这些零件采用整体结构和复杂型面结构的设计大大增加,从而使飞机结构零件呈现出几何尺寸大、加工精度高、型面复杂、工艺特征多、壁厚薄、切削加工过程材料

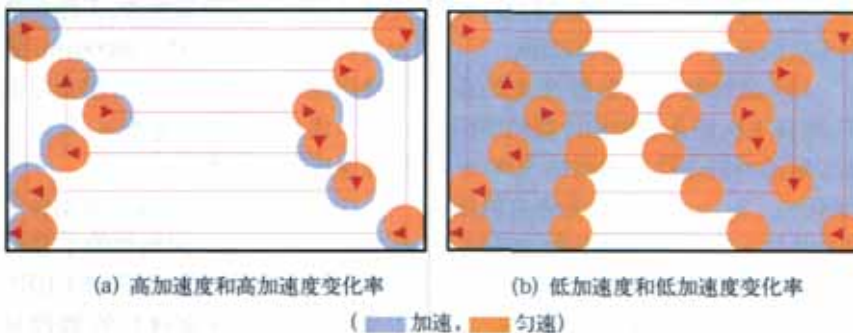


图3 高性能机床与传统机床加工过程走刀的动态过程比较

去除量大、加工变形控制难度大等特点,对数控机床性能、加工精度、变形控制和加工效率提出了很高的要求。

### 机身机翼等结构零件数控加工技术与装备

虽然B787、A350等最新型大型客机结构中复合材料的用量在增加,但大型飞机的机身、机翼、尾翼等结构多采用铝合金板材、型材等加工,近年来预拉伸铝合金板材在飞机整体结构件中的用量越来越大;机身承力框及加强框、机翼翼梁和加强肋等部件多采用高强度铝合金和合金钢锻造毛坯,经切削加工而成。某铝合金整体结构机翼翼盒肋板的实际零件结构尺寸为3100mm×1600mm×100mm,材料去除量达95.5%,最小壁厚接近

1mm。

数控切削加工是机身机翼等结构零件的主要制造工艺方法,实际应用中对于多坐标/高速/高刚性/大功率的数控龙门铣床、床身式立铣床、立式加工中心以及专用高速蜂窝铣床和长桁缘条铣床等数控加工设备的需求量大,这些设备主要用于整体构件(如机身、机翼、尾翼上的大型整体壁板/框等),钛合金、复合材料结构件以及其他高强度合金钢的梁、肋、接头类复杂结构零件等的数控加工中。

#### 1 高速数控加工技术

以高性能数控机床及先进刀具为基础的高速数控铣削加工技术为

飞机主要结构件中的铝合金零件提供了高效率、高质量数控切削加工解决方案。该项技术已成为航空数控加工的一个发展方向,并开始从航空制造向其他制造领域推广应用。此类数控加工技术与装备的特点及要求可概括为:

(1) 采用高速主轴系统,提供尽可能高的材料去除速率(Material Removal Rate, MRR),当前应用的高速主轴,转速可达42000r/min,甚至更高。采用内冷、静压轴承、内装式力矩电机等技术的新型大功率电主轴在提供高转速的同时还可获得大的主轴功率,如Fisher公司的MFW-2320/30 VC HSK-A63主轴系统的功率和转速可分别达到100kW、30000r/min。

(2) 采用高性能的进给系统,在

加工中各种走刀路径获得很高的伺服动态特性,从而缩短切削加工时间。高性能数控机床不仅有高的主轴转速和主轴功率,同时,进给系统的高速度、高加速度、高加速度变化率产生的各坐标轴走刀运动的高动态响应,可以大大缩短进给运动的动态加减速时间,直接缩短加工时间,同时还可以保持高的表面加工质量。图3显示了具有高加速度和高加速度变化率的高性能机床与传统机床在加工同一个型腔时同走刀路径对应的进给速度变化情况。图3(a)显示走刀加速过程很短,机床很快进入到给定的匀速进给切削阶段,从而可以获得好的切削性能和加工效率。图3(b)则显示走刀加速过程长,机床不能快速进入匀速进给切削。

(3) 高性能切削数控技术的应用,使得飞机铝合金结构件数控切削加工时的材料去除速率高达 $5000 \sim 7000 \text{cm}^3/\text{min}$ ,当然,这里还有机床结构优化、刀具、主轴动平衡、控制系统等的贡献。

## 2 新结构数控机床技术



图4 A320的铝合金翼肋

为适应飞机结构零件工件材料与结构的数控加工方面越来越高的效率和质量要求,一些新结构、新概念的数控机床的研制开发也受到人们的关注。2007年汉诺威的欧洲机床展览会上,DS Technologie公司展出的ECOSPEED、ECOFORCE系列机床采用并联结构SPRINT Z3主轴头,主轴采用卧式结构布局,全系列机床可进行完全的五轴联动加工,并具有高刚性、高阻尼特性、高加速度( $9.81\text{m/s}^2$ )等特点,可采用最小量润滑、刀具内喷冷却和普通冷却液等方式进行切削加工冷却润滑,工作台最大直线工作行程可达 $15800\text{mm}$ ,最大快移速度达 $65\text{m/min}$ ,摆角范围 $\pm 40^\circ$ ,摆角回转定位速度 $\geq 80^\circ/\text{s}$ ,角加速度达到 $685^\circ/\text{s}^2$ 。

DS Technologie公司分别针对航空结构件2种不同类型的工件材料进行了相应的开发,ECOSPEED主要应用于铝合金材料的数控切削,主轴参数可选用功率为 $80\text{kW}$ ,转矩为 $46\text{N}\cdot\text{m}$ ,转速为 $30000\text{r/min}$ 或功率为 $75\text{kW}$ ,转矩 $72\text{N}\cdot\text{m}$ ,转速为 $24000\text{r/min}$ ;ECOFORCE主要应用于钛合金难加工材料飞机零件的数控切削,采用低速大转矩主轴,进行三轴粗加工时,主轴参数可选用功率为 $60\text{kW}$ ,转矩为 $4000\text{N}\cdot\text{m}$ ,转速 $2000\text{r/min}$ ,而用于五轴精加工时,主轴参数可选用功率为 $50\text{kW}$ ,转矩为 $1100\text{N}\cdot\text{m}$ ,转速为 $5000\text{r/min}$ 。

DS Technologie新结构数控加工中心以其独特的设计理念及新颖的结构,为具有不同材料和不同结构特点的飞机结构零件加工提供了

高效的解决方案。A320客机铝合金翼肋零件(图4)加工实例表明,采用这种新结构的机床,可将零件加工时间由传统数控机床加工时的 $9.5\text{h}$ 缩短到 $2.05\text{h}$ 。

可以预见,未来还将出现一些专门针对大型飞机结构零件高效优质数控加工设计的新概念、新结构的机床。

## 3 高效专用数控机床及相关技术

为了进一步提高加工效率,多主轴头、立卧转换(翻板)工作台、大型卧式主轴布局、柔性夹具等结构已成为大型飞机结构件加工用数控机床的重要特点。

多主轴头机床一般采用大型龙门结构,在一台机床上设计有2个甚至2个以上相同的主轴头,在同一个工作台上,多个主轴头可以同时加工多个相同的结构零件,从而使数控切削加工时间成倍缩短。

立卧转换(翻板)工作台是为方便飞机大型结构零件定位、装夹和切削过程排屑设计的一种多工作台形式,在使用时,先以立式工作台的形式进行零件的定位和装夹,零件定位装夹好以后,再将工作台自动转换到卧式加工位置,从而便于切削加工过程中大量切屑的快速排除。立卧转换工作台多采用双工作台形式以节省工件装备时间,提高机床主轴的利用率。

大型卧式主轴布局主要是针对飞机大型结构零件尺寸大、加工中材料去除量大的特点设计的。卧式主轴切削时形成的大量切屑,可以依靠自重自动掉落,避免了立式切削时必须采用人工或辅助工具清除切屑的麻烦。

柔性夹具采用数控多点可调支撑、真空吸附或机械夹头的方式,实现对不同形状的大型结构件在机床上的柔性、快速的定位和装夹,非常适合单件或小批量大型结构零件以及大型复合材料构件数控加工时的

装夹。

## 起落架零件 数控加工技术与装备

大型飞机起落架零件大多采用钛合金或超高强度钢锻件毛坯,如 B777 的主起落架载重梁采用 Ti-10V-2Fe-3Al 合金锻件,重 3175kg,投影面积 1.23m<sup>2</sup>; B747 主起落架梁采用 Ti-6Al-4V 合金锻件,重 1290kg,投影面积 4m<sup>2</sup>,长 6m,是迄今为止最长的钛合金锻件。

由于起落架零件材料的比强度高、弹性模量小、热导率低,采用锻件毛坯进行切削加工的方式,切削性差。在零件几何结构方面,起落架零件的内外圆表面、凸台、孔等均需要进行数控加工,且几何和形位精度要求高,对数控机床精度、刚性的要求以及对刀具的要求都非常高,同时要求在一台数控机床上可实现多功能的复合加工,如车、铣、钻、镗等多种切削加工,以达到一次装夹完成全部加工的目的。此外,采用车铣方式加工回转表面,还可获得变单刀连续车削为多刀非连续铣削,从而降低切削力,改善刀具散热条件,减小刀具磨损。因此,高刚性多功能的复合加工数控技术及装备、新型涂层刀具材料及刀具结构设计已成为起落架零件切削加工的重要关注点。

### 高效数控加工使能技术

如上所述,大型飞机制造中的数控加工过程,关键在于优质和高效。真正地实现高效数控加工,机床、刀具等“硬件”条件是基础,同时,支持高效加工的“软件”使能技术和工具也必不可少,主要包括:高效智能化的数控编程系统、数控加工过程运动仿真软件、数控加工过程力学仿真软件、虚拟数控加工系统和数控加工切削参数数据库等。

数控制编程系统和加工运动仿真软件已有较长的发展历史,并有

大量成熟和商品化的工具软件,如 CATIA、UG、Pro/E、Vericut、Delcam、EdgeCAM 等。

数控切削加工过程中,“机床、刀具、工件”三者构成了一个具有动力学特性的加工工艺系统。在数控加工过程中,除了各个控制轴坐标运动形成刀具与工件之间的相对几何运动关系之外,该加工工艺系统还会产生切削力变化,切削热、工件和刀具变形、振动等力学特性的变化。这些变化直接影响到数控加工过程尤其是高速加工过程的质量、效率和成本。因此,对数控加工过程特别是对高速加工进行力学仿真,获得不同切削参数条件下的动态切削力、刀具和工件的变形与振动状态、颤振稳定域、切削温度变化、已加工表面形貌等,可以为切削参数和刀具的选择和优化提供可靠依据。

从 20 世纪 90 年代后期开始,面向数控切削加工过程力学特性仿真的相关技术和工具得到学术界和工业界的重视,国外已开发出相应的仿真软件,如 CutPro/Shop-Pro、MetalMAX 等,可实现对铣削、车削、钻(镗)削等切削过程的力学仿真,最早在波音飞机、普惠发动机等航空制造企业中得到了成功的应用,现已应用到汽车、模具、机床等多个制造领域。

在国内,北京航空航天大学研究开发了“数控铣削加工动力学仿真系统(SimuCut)”和“数控加工动力学特性测试与分析系统(DynaCut)”。这 2 套系统具有“主轴、刀具、工件”动力学特性测试、铣削加工过程力学仿真、切削参数优化选择、生成切削参数数据手册等功能,已成功应用到飞机、直升机、导弹、雷达等产品的关键结构件的数控加工过程的力学仿真和工艺优化,大大提高了数控加工主轴转速、切削速度、主轴功率利用率、材料去除速率和表面加工质量,取得显著效果。

采用数控加工运动仿真,特别是力学仿真,为数控加工程序、切削参数、切削工艺进行优化,已成为航空产品数控加工的重要要求和新的发展趋势。虚拟数控加工技术将是数控加工仿真的进一步发展,即将运动(几何)仿真、力学(物理)仿真相结合,在虚拟环境中考虑机床及加工过程的运动学、动力学、控制系统响应、空间精度、切削力、主轴转矩/功率、加工误差等,建立仿真模型,在实际零件加工之前对加工过程进行仿真和优化,从而可以正确、经济和高效地加工出首件合格零件。

数控加工切削参数数据库是支撑高效数控加工应用的基础技术,世界各工业发达国家大都开发了各自的金属切削数据库,其中以美国的 CUTDATA 和德国的 INFOS 最为著名。一些刀具生产厂商也建立了与刀具产品相关的切削数据库供用户选用,取得了一定的效果。切削数据库的建立和应用带来可观的经济效益,据 CIRP 对切削数据库经济效益的调查,切削数据库可使加工成本下降超过 10%。从 20 世纪 80 年代开始,国内一批高校和研究所虽然开展了切削数据库的研究和建设工作,但是,当前针对大型飞机制造中零件材料和结构的高效优化切削参数数据库十分匮乏,有待于学术界和工业界共同努力,建立起有我国航空制造特色的数控切削加工参数数据库。

### 结束语

本文从大型飞机制造中数控加工零件的材料及结构特点和要求出发,介绍了大型飞机制造中高速数控加工技术、新结构数控机床、专用数控加工机床、多功能复合加工、高效数控加工使能技术等方面的内容,并对相关的技术和装备要求及发展趋势进行了分析,期待对相关的工程技术人员有所裨益。

(责编 钟元)