

航空零件数控加工的特点

NC Machining Characteristics of Aviation Parts

西飞国际数控中心 田 辉 王俊斌



田 辉

毕业于南京航空航天大学机械制造工艺与设备专业,现任西飞国际数控中心高级工程师,长期从事航空零件数控加工技术研究。

随着现代航空制造业的高速发展,数控加工技术已经成为飞机制造的关键技术之一。数控加工技术的进步使飞机设计理念发生了转变,零件设计向整体化、复杂化方向发展,同时,设计理念的转变也给数控加工技术提出了新的挑战,如何高质量、高效率、低成本地完成大型零件的数控加工成为了必须攻克的难题。

国外发达国家航空制造史很长,特别是飞机大型复杂结构件的设计、制造技术都已非常成熟。随着近年

随着近年来国内各类军民机的研制,国内主要航空企业在航空数控加工技术方面积累了丰富的技术经验,解决了一系列关键技术难题,初步形成了以飞机大型复杂结构件制造为代表的核心技术优势。但是,随着我国大飞机项目的启动,航空零件数控加工技术将面临更大的挑战。

来国内各类军民机的研制,国内主要航空企业在航空数控加工技术方面积累了丰富的技术经验,解决了一系列关键技术难题,初步形成了以飞机大型复杂结构件制造为代表的核心技术优势。但是,随着我国大飞机项目的启动,航空零件数控加工技术将面临更大的挑战,因此,我们在数控加工技术领域还需要不断进行深层次的研究,以缩小和西方国家的差距。

国内航空零件数控加工技术现状

与其他行业产品相比,航空类产品零件具有一些显著的特征,从而决定了航空零件数控加工技术的特点以及发展的方向。这些特征主要体现在以下方面:

(1)产品类型复杂,具有小批量、多样化特点。由于现代飞机结构复

杂,零件品种繁多,同时,飞机研制通常为小批量生产,因此无法采用大规模流水线生产方式来提高效率和降低成本,因此航空零件数控加工也必须适应这种特点。

(2)结构趋于复杂化和整体化,工艺难度大,加工过程复杂。现代数控技术的进步促使航空零件的设计趋于复杂化和整体化,简化装配,提高结构性能,这也给数控加工技术提出了更高的要求。

(3)薄壁化、大型化特点突出,变形控制极为关键。为了控制飞机重量,飞机零件的一个显著特点就是进行了薄壁化设计,另一方面,飞机的大型化也使得零件结构趋于大型化,出现了许多超大型零件,因此加工变形成为了突出的矛盾。如图1所示为典型飞机薄壁结构件—787短舱梁。

(4)材料去除量大,切削加工效

率问题突出。飞机零件材料去除量一般都在 90% 以上,切削效率对生产周期和成本影响较大。

(5) 质量控制要求高。航空零件由于具有极高的安全性要求,对产品质量控制十分严格。

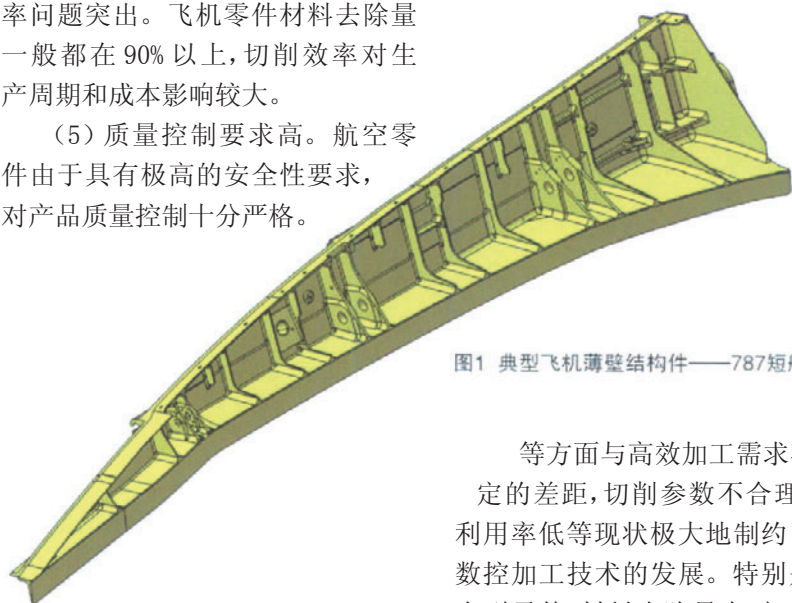


图1 典型飞机薄壁结构件——787短舱梁

(6) 产品材料多样。随着材料、冶金技术的发展,高强度钛合金、复合材料等的应用范围和用量正在逐步地得到扩展,对航空数控加工技术的适应性提出了广泛的要求。

(7) 大型结构件毛料价值高,质量风险大。

经过多年的技术应用研究和探索,我国在航空零件数控加工技术研究与应用上取得了较大的进步,但是目前我国数控加工整体技术水平和国外先进水平差距仍较大,尤其在大型结构件研制方面,存在诸多下述亟待解决的问题:

(1) 混线生产,专业化、集成化程度低。在目前的生产资源配置中,普遍存在专业化程度低,布局不合理,各种类型产品交叉生产现象严重,极大地制约了产品效率的提高。

(2) 数控加工准备时间、辅助时间占用过多,装夹效率低下。在数控加工中程序调整、工装夹具准备、刀具准备及零件检测等占用的时间较多,加工效率偏低。据统计,机床有效切削时间比例仅为 30%,极大地影响了产品加工效率的提高。

(3) 切削加工效率低,高速切削应用比例较低。在数控加工仿真、程序优化、工艺参数库、制造资源管理

等方面与高效加工需求存在一定的差距,切削参数不合理、机床利用率低等现状极大地制约了高效数控加工技术的发展。特别是飞机大型零件,材料去除量大,加工周期长,加工效率低成为制约生产研制的突出矛盾。

(4) 信息化程度低,制约了生产研制的高效运作。数控机床是一个孤岛,各环节数据信息传递和交换存在瓶颈,总体上制约了企业的高效运作,影响生产效率。

(5) 大型结构件变形控制仍然是亟待突破的难题。不同类型的航空零件结构、尺寸、材料各不相同,难以掌握准确的变形规律,是数控加工中最大的变数之一。

(6) 研制成本高,研制风险大。大型航空结构件、新型材料构件等一般毛料价值较高,任何质量损失都会给企业带来巨大的财产损失。

国外航空零件数控加工技术

在发达国家,航空零件的制造加工过程普遍实现了高度专业化、信息化和自动化,不需要人工干预,装夹定位过程简单快捷,加工效率高(如图2为空客带自动托盘交换的卧式加工中心加工的大型梁类零件),这些特性主要体现在以下方面:高度专业化的生产资源配置和布局;

普遍应用高速无人干预加工技术;普遍应用大功率高效切削,主轴功率使用率在 70% 以上;普遍实现快速装夹、托盘交换等不间断加工过程,减少空机时间;生产资源集成化信息管理程度高;配套设施完备:包括主轴测头、集中刀库、安全防护、铝屑处理系统等;采用自动测刀,芯片读写的方式进行刀具参数、刀具寿命管理。

航空零件数控加工技术发展探索

1 以产品特征成组划分为基础,形成专业化的精益生产线

目前,在航空零件的大规模研制中往往面临较大的被动局面,无法形成具有极大竞争力的核心技术优势,其根本原因就在于原有的相对落后的生产资源配置和布局已经无法满足当前研制需要,尤其是国家大飞机项目的启动在给我们带来极大机遇的同时也对现有的生产能力和制造技术水平敲响了警钟。

首先,要确立零件族的概念,应用成组技术建立典型零件族。

其次,在确立典型零件族的基础上,分类建立标准化的典型零件族工艺流程。

最后,在标准化的典型零件族工艺流程的基础上形成专业化、集成化的生产资源配置和布局,并最终形成各类典型航空零件的精益生产线。特别是对于大型结构件,建立专业化



图2 空客带自动托盘交换的卧式加工中心

的典型零件生产单元对于提高其加工技术水平、降低成本尤为重要。

2 以装夹快捷化为目标,形成高效可靠的装夹技术

对高速加工的数控设备来说,正确设计夹具、缩短夹具生产准备周期,实现零件在数控机床上的快速装夹定位非常重要,能大大提高有效切削时间比例,保证加工质量,从而达到提高数控加工效率的最终目的。

在传统夹具具体上,采用机械定位、人工夹紧和拆卸通常要花费大量的时间和人力,而高速加工大型工件时,采用半自动化或全自动化装夹技术是非常有经济价值的,液压定位和夹紧非常有效。

液压夹具的主要优势是节省夹紧和松卸工件时所花的大量时间,有关统计资料表明液压夹紧相比机械夹紧节省约 90% 的时间,缩小了生产循环周期,降低了成本。另一个明显的优势在于夹紧力在定位和夹紧过程中保持恒定不变,从而确保了同一道工序下加工质量的一致性。

柔性夹具系统也是一种新型的替代传统夹具的装夹系统。目前先进的柔性夹具系统都具有自适应能力,针对产品变化实现自动化调整,从而适应了产品变化较大时的情况(如图 3 所示的空客-MELT 全自动柔性装夹系统及生产线)。

3 从常规切削向高速切削过渡,逐步实现无人干预高速加工

现代飞机的高性能要求其结构具有轻量化、薄壁化和整体化的特点,零件须实现较高的精度和表面质



图3 空客-MELT全自动柔性装夹系统及生产线

量,传统的低速加工方法已经难以满足现代航空制造的需要。大量的型号研制应用证明,高速切削加工技术具有极大的优越性,不仅加工效率大大提高,零件的加工质量也得到提高。

国内目前在高速加工应用方面和国外存在着较大的差距,主要表现在 20000r/min~40000r/min 的大型高速铣削设备数量少,配套设备缺乏,技术经验匮乏,严重制约了国内整体数控技术水平,未来无论在硬件环境的建设,还是应用技术的研究方面都需要投入大量精力。

4 实现刀具资源的信息化管理及优化配置

随着产品任务量的加大、设备的增加,用于机械加工的刀具需求量也越来越大,品种也越来越多。但长期以来,刀具管理模式主要采用人工管理模式,刀具管理制度不健全,刀具库房不规范,在刀具的集中配置方面不完善,严重影响了刀具管理水平,增加了数控加工的准备时间,制约了数控加工的效率 and 加工能力的进一步提高。随着数控加工和刀具技术的高速发展,面对高效生产的挑战和不断降低制造成本的压力,刀具的管理成为各制造企业日益关注的热点。

建立自动化、信息化的刀具管理存储环境是解决目前刀具应用管理落后、低效现状的有效途径。可以通过植入芯片进行刀具的全生命周期管理,从而合理地应用刀具资源。

5 深化仿真技术应用研究,推动数字化制造体系的建立

随着计算机技术的发展,数控加工仿真技术也得到了迅速的发展,尤其在航空、航天、国防及其他大规模复杂系统的研制开发过程中,数控加工仿真在减少损失、节约经

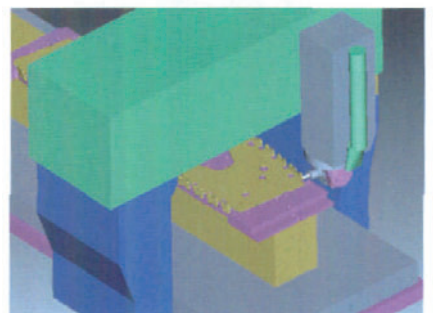


图4 加工复杂肋零件仿真示意图

费、缩短开发周期、提高产品质量等方面发挥了巨大作用。

基于 VERICUT 软件构建的数控加工仿真环境实现了数控编程的虚拟制造,比刀位文件仿真更真实、直观,极大地提高了数控编程的效率和质量。如图 4 所示为五坐标加工中心加工复杂肋零件时的仿真示意图。

仿真加工技术目前已经成为数控加工研制过程中必不可少的环节。尤其对于飞机大型复杂结构件来说,其材料昂贵、结构复杂、大量采用高



速切削,相关设备极为昂贵。确保加工过程中刀具轨迹、切削参数的正确性、合理性,杜绝过大余量切削、碰撞干涉、超程等意外错误至关重要。因此,建立准确、完整的仿真加工环境是必要的。

6 突破典型大件变形控制关键技术

对于飞机结构件的数控加工来说,由于产品类型多样,结构复杂,加工条件各异,因此,零件的数控加工变形是数控加工中最难确定的因素,加工变形控制仍然是困扰数控加工的主要难题之一。

(1) 数控加工变形控制的一般方法。

a. 应力释放原理。充分释放内应力是减小加工变形的有效手段。通过有限元模拟的状态证明,当零件材料沿某一个方向出现不连续状态时,则沿此方向的内应力将无法传递,在此断裂界面上沿此方向的内应力为零。如图 5 所示是一种典型飞机结构件内应力释放示例。

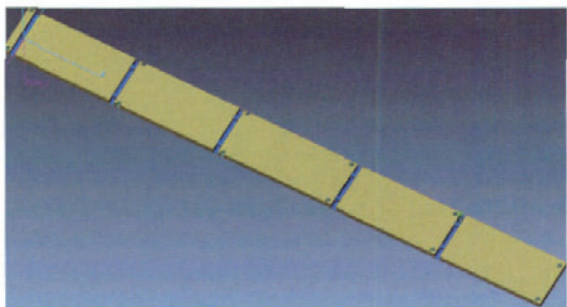


图5 一种典型飞机结构件内应力释放示例

b. 应力平衡原理。内应力不可能消除,只能尽量减小,或者使内应力尽可能处于平衡状态,平衡的内应力使零件处于“动态”的稳定状态,达到控制变形的目的。

c. 余量补偿原理。在加工过程中,如果已经出现了明显的变形,则可以通过余量补偿的形式减小变形。基于这个原理控制变形的措施有:基准面、基准孔的重新修正,预留适当的精加工余量等措施。

d. 减少应力的产生。除了材料固有的内应力外,加工过程也会产生应力,造成加工变形,因此,尽可能减少加工中产生的应力,也是主要控制变形措施之一。例如,高速加工能大大减少加工表面应力的产生;提高冷却效果也能大大减少加工表面应力的产生。

(2) 基于有限元仿真的数控加工变形模拟技术:

对于零件数控加工变形控制的研究,目前国内外仍然缺乏十分有效的研究手段,在实际生产中主要凭借技术经验的积累及反复试验为基础来设计数控加工工艺过程,存在很大的不确定性因素和研制风险。

有限元模拟切削分析技术,是研究数控加工变形的有效技术之一。有限元仿真加工变形模拟技术使得在加工之前可利用数值仿真技术模拟加工过程,对加工过程进行分析,确定各种参数对零件变形的影响,预测复杂零件在加工过程中的变形、破裂情况,给设计和工艺技术人员提供

进行设计和工艺分析的依据。

7 推动切削参数优化技术的应用,实现切削参数的标准化应用

合理的切削参数是数控加工实现高速高效加工的前提,也是实现高速无人干预加工过程的必要条件。目前,基

本的切削优化技术主要有:基于动力学仿真的切削优化技术、基于优铣技术的切削参数优化和基于几何仿真切削的优化技术,分别有各自的应用优势和特点。

(1) 基于动力学仿真的切削优化技术。

基于动力学仿真的切削优化是以切削加工系统物理特征为基础的

每个机床主轴上的负载/功率,以最优进给速率的计算以及用计算所得的最优进给速率对切削过程进行实时控制。优铣技术需要对每项零件多次进行切削优化,得到的优化结果只对该零件有效。

(3) 基于几何仿真切削的优化技术。

基于几何仿真的切削优化是针对切削过程中切削条件和待切削材料量的实时变化自动调整进给率的优化措施,它能够在一定程度上提高加工效率,改善切削过程。其基本原理是,以刀具实时材料去除率和刀具前进方向为优化基础,切削大量材料时,刀具进给率降低;切削少量材料时,进给率相应地提高,保持机床负载的相对均衡和切削稳定。

这3种优化技术在实际应用中

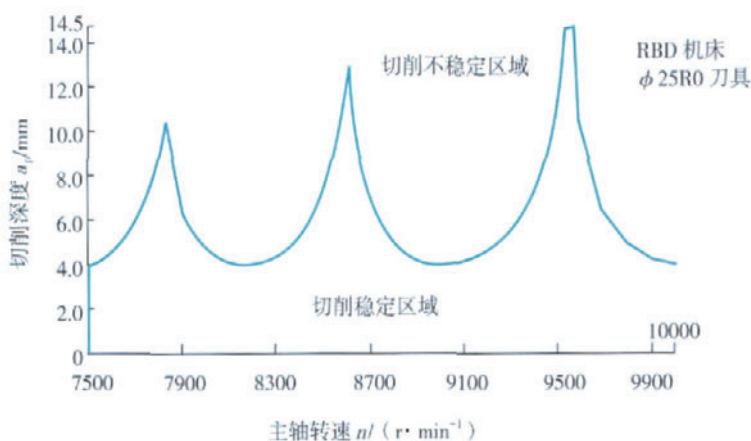


图6 加工大型机翼壁板时颤振稳定域示例

仿真切削优化技术。基本原理是通过对机床加工系统进行动力特性测试和分析,得到其固有频率、阻尼比、模态刚度等参数,然后采用切削加工动力学仿真系统进行颤振稳定域仿真,得到颤振稳定域仿真曲线;最后根据颤振稳定域仿真曲线,结合被加工工件特征选择合理的切削参数(如图6所示)。

(2) 基于优铣技术(OPTIMILL)的切削参数优化。

优铣技术是一种采用自适应控制技术的应用系统。通过实时监测

都具有各自的特点和优势,但也各有一定的局限性,将其结合起来则能够达到较好的效果。同时,在此基础上通过建立典型切削参数库,能够实现同类零件切削的参数标准化。

结束语

进入21世纪,中国航空制造业面临大飞机研制的历史机遇,也面临激烈的市场竞争压力,加速推进以数控技术为核心的高效制造技术将是解决制造业持续发展的关键环节。

(责编 泰山)