

航空数控加工机床发展方向 及其关键技术

Development Trend and Key Technologies of NC Machine Tool for Aviation Industry

成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 汤立民 宋智勇



汤立民

研究员级高级工程师,现任成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂厂长,长期从事数控技术和信息化技术研究工作。国内航空数控加工知名专家,曾获“中央企业劳动模范”称号。

数控机床是40年代后期为适应加工复杂外型零件而发展起来的一种新型自动化控制机床,数控机床的研制和应用首先起源于航空制造业,并伴随着航空制造业的发展而发展。飞机结构件是飞机的主要受力部件,零件外形与飞机的气动外形相关,周边轮廓与其他零件具有复杂的装配协调关系,槽腔、薄壁、筋、肋及高精

随着微电子、计算机技术的飞速发展,数控机床的一些关键技术得以突破,同时由于飞机结构件中新材料、新结构的大量应用,高速、高精、智能、环保等成为航空数控加工机床未来的主要发展方向。

度孔等是其主要的结构特征,因此飞机零件呈现出材料昂贵、结构复杂、切削加工量大、加工精度高、工艺性差等特点。目前,各国在航空制造业方面的竞争极为强烈,我国大飞机项目的上马促进了国内航空工业的发展,因此航空数控加工机床已成为各国数控设备制造商关注的热点,国家《高档数控机床与基础制造装备》科技重大专项也把航空制造装备列为最为重点支持的对象。现代飞机为满足隐身、超音速巡航、超常规机动、高信息感知能力、长寿命、结构轻量化等方面性能的需要,对航空数控加工机床的加工效率、加工精度提出了新的要求。

航空数控加工机床未来的 发展方向

随着微电子、计算机技术的飞速

发展,数控机床的一些关键技术得以突破,同时由于飞机结构件中新材料、新结构的大量应用,高速、高精、智能、环保等成为航空数控加工机床未来的主要发展方向。

1 高速加工机床依然是数控加工机床发展的主要方向

整体结构设计是减轻飞机重量、提高性能的主要途径,在现代飞机设计中整体结构件数量越来越多,结构越来越复杂,尺寸越来越大。如F-22战机后机身整体框毛坯尺寸达到4000mm×2000mm。图1所示为整体结构零件在飞机上的分布示意图。

飞机整体结构零件的一个显著特点就是材料利用率非常低,只有2%~10%,因此提高加工效率是飞机零件加工必需解决的问题。由于计算机技术和刀具技术的快速发展,以

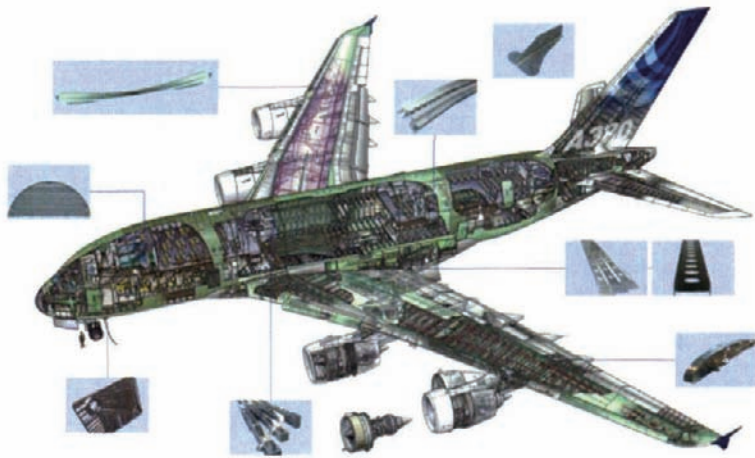


图1 整体结构零件在飞机上的分布示意图

高转速、高进给为特点的高速加工机床在航空加工领域得以应用,这不但成倍地提高了生产效率、改善了零件的加工精度和表面质量,而且有效地解决了常规加工中难以解决的问题(如超薄零件的加工问题,钛合金、纤维增强塑料等特殊材料的高效加工问题),是提高生产效率和薄壁结构零件加工的有效解决方案。因此,高速加工数控机床依然是实现飞机整体零件高效加工的主要装备。图2为某大型整体结构零件图,其技术参数如表1所示。

2 高精度数控机床应用日渐广泛

作为主要承力部件的飞机结构件,不但要满足与其他零件的装配协调关系,还要满足自身的结构尺寸精度、零件重量等方面的要求。为了提高飞机整体性能,飞机结构零件正向尺寸更大、精度更高、数量更多的方向发展,精确制造将是未来飞机制造业中的一个热点。航空制造领域对高精度数控机床的需求非常旺盛,大型飞机结构件的精密加工将对数控机床行业的一个挑战,提高数控机床基础大件结构特性和热稳定性,控制环境温度、加工状态等不确定因素以提高机床加工精度将是机床制造业与航空制造业共同关注的焦点。

3 智能化是实现高精、高效加工的主要途径



图2 大型整体结构零件

表1 某大型整体结构零件的技术参数

技术参数		值
尺寸	长/mm	1920
	宽/mm	1161
	厚/mm	116
材料		铝
加工去除率/%		95
框格数/个		104
最小腹板厚度/mm		1.2
最小壁厚/mm		2.0
五轴加工量/%		80
零件重量/kg		17.4
材料重量/kg		400

实现高精加工需要数控设备对加工状态进行实时监控,并根据监控情况自动进行调整或补偿,从而实现零件精密加工。如加工过程刀具状态监控、零件在线检测、故障自诊

断和智能维护等就是对加工系统各要素进行实时状态监控的智能技术。

4 环保

目前,环保已经成为工业发展的一个重要目标。环保型机床是指无污染、节能低耗的机床,符合ISO1400环保标准。在机床设计中可采用脂润滑代替油润滑,以减少泄漏污染,将液压油与冷却液彻底分离,采用油液回收装置、整体防护罩及空气过滤净化装置等,把加工中产生的污染在加工区域进行处理以免产生扩散;另外,干切削加工技术是绿色制造的一个主要方向,干切削相对于传统的湿切削而言,可以节约大量的冷却液支出,更重要的是可以保护工人的健康和环境,其社会效益更为巨大。因此,在未来的机床中,环保因素将会越来越强烈地得到体现。

航空数控机床发展的关键技术

1 开放式数控系统

由于数控设备智能化和数字化生产的需要,开放式数控系统成为目前乃至未来数控系统发展的主要趋势。开放式数控系统的主要特征在于系统对不同软硬件平台的可移植性、系统功能的可伸缩性、系统功能模块的可替代性和功能模块间的互操作性。开放式数控系统构筑于一个开放的平台之上,具有模块化组织结构,允许用户对功能模块进行选配、更改和扩展,以迅速满足不同的应用需求,各功能模块可来源于不同第三方供应商并相互兼容。目前,开放式数控系统最典型的代表就是SIEMENS的SINUMERIK系列数控系统,它将PC板卡嵌入专用数控系统中,开放了数控系统的人机界面,为数控机床的智能化、网络化和集成化提供了技术平台,具体特点如下:

(1) 自适应控制功能。在数控系统上安装第三方专业软件,并配合数控系统的运动控制功能,数控机

床就能够根据切削条件的变化自动调节加工参数,使得加工过程中能保持最佳工作状态,从而得到较高的加工精度和较小的表面粗糙度值,同时也能提高刀具的使用寿命和设备的生产效率。

(2) 自诊断、自修复功能。在整个工作状态中,系统随时对 CNC 系统本身以及与其相连的各种设备进行诊断、检查,还可以自动使故障模块脱机而接通备用模块,以确保无人化工作环境的要求。在有些数控设备上嵌入了人工智能专家诊断系统,以满足更高的故障诊断要求,并通过网络实现对设备的远程诊断和远程维修服务、技术服务,以提高机床的利用率。

(3) 机床信息采集功能。通过数控系统配置的网卡将数控设备与生产车间的以太网连接起来,利用嵌入数控系统的专业信息采集软件获得数控机床的实时工作状态、加工信息等,并将制造过程的信息资源在网络上共享。网络生产管理系统通过企业内部网随时监视生产现场情况、进行最优计划和调度,实现工厂内部 CAD/CAPP/CAM/CNC 自动化生产;通过因特网与外界连接,快速响应用户的要求,实现异地 CAD/CAPP/CAM/CNC 网络制造。

开放式网络数控系统革命性地将数控机床功能由原来的数控系统厂商开发转向了系统制造商、机床制造商、最终用户和其他专业领域共同完成,而且各部分相对独立,极大地丰富了数控设备的功能,是现代制造企业智能化生产的必然产物。

2 直接驱动技术

高速加工设备之所以能够迅速在生产中得以应用,一方面得益于以计算机技术为核心的数控系统的快速发展,另一方面源自直接驱动技术(简称直驱技术)的成熟与完善。直接驱动技术指驱动元件与执行元件之间没有传动环节,由驱动元件直

接驱动执行元件的技术,即通常所说的“零传动”。直驱技术最典型的应用就是电主轴、力矩电机和直线电机。由于没有了传统传动方式的传动环节,传动链中固有的间隙、振动、噪声、磨损和运动响应速度低等问题在直驱技术的应用中都得到了极大的改善,从而提高了机床的运动速度、精度和刚性。图3为直线电机驱动与滚珠丝杠传动的精度比较。在直驱技术方面,目前出现了许多专业的制造厂家对直驱产品进行专业化生产,其产品涵盖了各种机床产品,呈现出了产业化的趋势。比如高速电主轴就有 FISCHER、WEISS、OMLAT、GMN 等著名专业生产公司生产,这些公司都拥有高速电主轴的专业研发、生产和维修队伍。另外,直驱技术解决了低速大扭矩问题,克服了传统传动副的间隙问题、磨损问题以及响应速度慢、调整困难等缺点,使得直驱技术的应用更为广泛。在现代机床设计中,直驱技术除了在高速加工设备中大量采用外,在一些难加工材料机床上也开始得到应用,比如在 INGERSOLL 公司的 POWERMILL 机床上就选用了 8000RPM 的电主轴加工钛合金,主轴扭矩最高达到 $900\text{N}\cdot\text{m}$ 。

随着直驱技术的不断完善,尤其是低速性能、使用寿命和工作温度关键技术方面取得的突破性进展,在未来数控机床上直驱技术将全面取代先用的传动技术。

3 自动化卧式加工设备技术

航空整体结构件材料利用率低(通常不超过 10%)、切削加工量大。零件在立式加工设备中加工时,大量切屑堆积在零件上,切屑的热量会传递给零件而造成零件的二次变形;另外由于切屑在加工部位的堆积极易造成切屑参与二次切削,从而出现质量事故。在卧式加工中,工件在竖直平面内加工,重力的作用使得切屑得到迅速排放,从而避免了切屑参与二次切削,延长了刀具的使用寿命并提高了零件的表面加工质量,切削效率大大提高,因此卧式加工在整体结构件生产中具有极大的优越性。

卧式加工设备是构成 FMC(柔性制造单元)和 FMS(柔性制造系统)的理想设备,多工作台交换与刀具在线检测、加工坐标系自动找正等辅助功能的有机组合,在投资较低的情况下实现了高效率的自动化加工。多工作台使工件装夹、拆卸与工件加工过程相对独立,在工件加工的同时可以进行其他工件的装夹与拆卸,从而

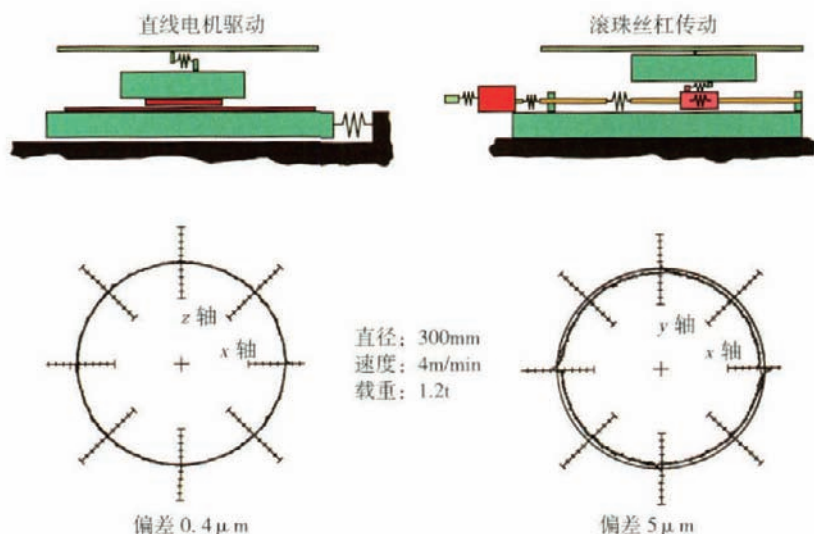


图3 直线电机驱动与滚珠丝杠传动精度比较

减少了机床停机时间,提高了机床利用率。加工坐标系自动找正系统由雷尼绍测头与专有测量软件构成,能够实现加工坐标系的自动找正,找正工件加工坐标系耗时小于1min;另外该系统还可以在加工坐标系重定位时纠正坐标系的偏差并进行自动补偿,从而避免了因为工件错位引起的质量问题,提高了产品质量。刀具在线检测系统可以在加工前、加工中和加工后对刀具的长度、直径等主要切削参数进行检测,并根据使用要求

床,是机器人技术和数控机床技术相结合的产物,其主要特点在于能够灵活地以最短路径实现空间任意姿态,且结构简单、元器件少。图4所示为几种典型的虚拟结构。这些诱人的优点立刻引起了各国机床行业的兴趣,虚拟轴机床的研究与开发成为全球机床行业的一个热门课题。

目前,虚拟轴机床技术获得了巨大进展,德国DST公司开发的Sprint Z3结构五轴坐标铣头采用了虚拟轴技术,并应用到其ECOSPEED系列

大量采用,逐渐成为飞机结构件的主要材料。钛合金是其中最主要的代表。在美国第四代战斗机的典型代表F-22军用飞机上,钛合金的比例高达41%,成为该飞机使用比例最高的材料。在波音-777上大约采用了11%的钛结构,估计每架波音-777飞机大约要使用12~13t钛制结构材料和零件。

钛合金等材料的特性导致其切削加工性能差,故将其统称为难加工材料,它们的相对切削加工性在0.05~0.4之间,故加工效率极低。当这些材料在飞机上大量使用时,难加工材料的高效、高精度加工就成为航空制造企业必须面对的问题。要实现难加工材料的高效、高精度加工,一方面依赖于刀具技术的进步,同时对数控设备也提出了新的要求。因此,钛合金高效加工设备成为最近几年机床行业讨论和关注的热点,AB摆角结构的机床受到了市场的再次青睐。大功率、高刚性、高精度、快响应、无振动是难加工结构件高效、高精度加工对数控设备提出的要求。FOREST-LINE公司将力矩电机应用到新型AB摆角铣头设计中,INGERSOLL公司将电主轴应用到了钛合金加工设备中,直驱技术的应用提高了设备响应速度、结构刚性和加工精度;另外,卧式加工在新型钛合金设备设计中被普遍采用,以提高切削效率、加工精度和机床利用率。

可以大胆预测,新型的高效、高精度钛合金加工设备将是未来机床市场上的主角。

结束语

航空制造业的发展对数控机床提出了新的需求,各项专项技术的发展为数控机床提供了技术支持,数控机床业迎来了一个崭新的发展空间。如何把握机遇是每个机床制造企业共同关心的问题,更是我国机床行业何去何从的关键问题。(责编 小颖)

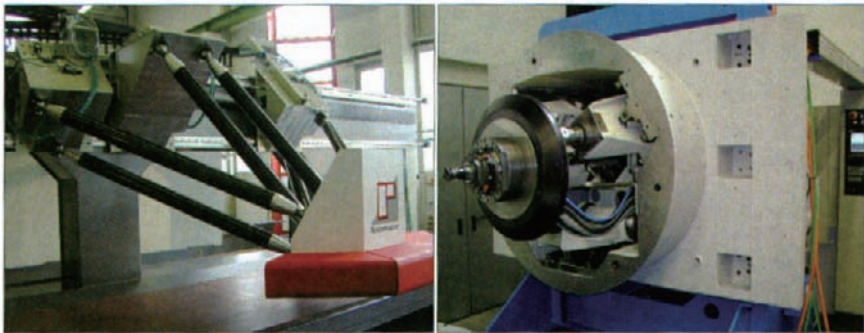


图4 几种典型的虚拟结构

对刀具误差进行补偿或判断,从而达到控制产品质量的目的。

具有自动化加工特点的卧式加工中心在铝合金加工和难加工材料加工方面的应用越来越广,是提高加工效率和产品质量的有效途径。卧式加工中心越来越向大型化方向发展,它将是现代航空制造业中高效加工设备的主要代表。

4 虚拟轴数控机床技术

传统摆角铣头在航空结构件加工中一直存在结构复杂、尺寸大、质量大等缺点,而且主轴电缆、油管、液压管路等随摆角的运动不停做回转运动,这些元部件的快速往复运动易造成破损。尤其是在高速加工中这种缺陷表现更为突出,严重地影响了设备高速加工性能。这一问题一直以来困扰着航空制造企业,近年来全球制造业都在积极探索和研究新型制造装备,20世纪90年代中期问世的并联机床是机床结构技术上的突破性进展。并联机床又叫虚拟轴机

床上。虚拟轴技术的采用,使得该设备整体高速加工性能大大提高,X轴向移动速度达65m/min,Y和Z轴向移动速度达50m/min,所有轴线加速度达到1g,从而保证了机床具有良好的动态性能,加工效率、加工精度和表面质量大为提高,金属切除率高达8000cm³/min。ECOSPEED系列机床在欧洲许多飞机制造厂首先获得了应用并获得一致好评。

虚拟轴技术为机床结构技术注入了新的血液,但其工作空间小,特别是回程运动范围有限的缺点对扩大其在数控机床上的限制也非常明显,因此虚拟轴技术如何更好地应用于数控设备依然是机床行业最为热衷的研究方向。

5 高效、高精度难加工材料机床技术

随着现代飞机高速、高精度性能要求的不断提高,具有比强度高、抗腐蚀性好、耐高温等一系列突出优点的材料(如钛合金、高温合金、沉淀硬化不锈钢等)在飞机设计中