

展望未来机床 服务航空工业

Look Forward to Future Machine Tool, Services for Aviation Industry

沈阳机床(集团)中捷机床有限公司 刘峰 高长才



刘峰

沈阳机床(集团)中捷机床有限公司工程师,主要从事五轴机床的设计与研发工作。

随着航空工业的发展,整体结构件的大量使用,使数控加工工艺方法发生了根本性变化,对数控提出了新的要求,数控机床从传统的低转速、大扭矩切削加工向高转速、高进给、轻负荷切削加工方向发展。高速切削时,机床主轴高速旋转,刀具的每齿进给量很小,断屑方式由带态切削变为脆断切削,所产生的工件材料挤压变形非常小,切削力得到有效减小;刀具与工件摩擦、工件材料变形等产生的热也大大减少,且热量的大

航空结构件中新材料、新结构被大量应用,以高可靠性、高精度保持性、高效的五轴联动加工为特点的航空制造业标志着高档未来机床的技术水平。

部分被切屑带走,避免了切削区域的热聚积,因此零件的加工变形小,表面质量高;同时,机床的快速进给保证了单位时间内的金属切除率很高,所以,高速加工非常适合具有薄壁、整体等特征的飞机零件的高效加工。同时,航空结构件中新材料、新结构被大量应用,以高可靠性、高精度保持性、高效的五轴联动加工为特点的航空制造业标志着高档未来机床的技术水平。

航空结构件制造的发展对数控机床的要求

航空结构件材料现大量采用铝合金、钛合金、复合材料等,而且为了减轻飞机重量,增加飞机的机动性、有效载荷和航程,进行轻量化设计,航空结构件广泛采用复合材料,如空客 A350,波音 787 中复合材料的比例均已到达 50% 以上。针对航空结构件中铝合金、钛合金、复合材料 3 种材料的各自特点,铝合金高速五轴

加工、钛合金强力高效五轴加工和复合材料的绿色制造技术成为未来飞机结构件数控机床发展的新要求。

1 铝合金高速五轴加工技术

近年来,航空结构件采用大型整体铝合金坯料制造大型部件,如机翼、机身等,来替代多个零件,以避免众多的铆钉、螺钉和其他连接方式。这样不仅可省去昂贵的装配工时和工装,还可使构件的强度、刚度和可靠性得到提高。然而,铝合金零件常具有厚度极薄的壁和筋,刚度很差。只有高速切削时切削力很小才能对这些筋、壁进行加工。因此,用于航空结构件的大型高速五轴加工中心需具备以下特点:

(1) 进一步提高主轴转速和功率。由于航空结构件采用整体坯料“掏空”的方法加工零件,切削量极大。因而,主轴转速和功率可增加的空间也很大。以往在航空工业中,主轴转速和功率达 24000r/min 和 40kW 就是高速了,随着技术进步,先进机

床已提高到 60000r/min 和 80kW。

(2)超长的 X 行程和龙门移动。由于“机翼”类为细长形零件,据称用于加工欧洲下一代战斗机的机翼,机床的 X 轴行程长达 30m,而 Y 轴只 2m,如此长的 X 行程,只能是龙门(往往是多个龙门和多个主轴)不是工作台移动。

(3)采用直线电机作高速直线传动。与以往航空工业大型机床用斜齿轮齿条或蜗杆条传动不同,为了适应主轴超高速、特大功率和超长 X 行程的需要,这类高速铣床使用了直线电机。机床采用直线电机以后,最高进给速度可达 100m/min,加速度达 2g。据称,由于高速主轴和高速进给,加工时间可减少 50%,机床结构还得到简化,减少了 25% 的零件,从而更易于维护。

2 钛合金强力高效加工技术

钛合金航空结构件是现代战斗机的核心承力部件,在飞机零件中所占比例越来越大,然而因钛合金强度高、弹性模量小、塑性变形严重,且排屑困难、导热率低、加工区域温度高、化学活性高、易氧化、加工硬化严重,且具有闭角变壁厚结构、复杂曲面,其相对加工系数在 0.05~0.4 之间的相对切削加工性导致加工效率极低,如何实现钛合金的高效加工,提高其加工效率,是数控机床行业和航空企业共同面对的难题。以往航空企业采用机械主轴进行大扭矩切削,由于机械主轴需要主电机驱动导致结构上不易实现大摆角。往往航空企业需要做大量的专用工装满足航空钛合金的大角度切削。解决结构上的难点,需要用电主轴取代机械主轴,电主轴的低速大扭矩问题得到解决,电主轴在钛合金切削上也开始应用,如 INGERSOLL 公司的 POWERMILL 机床已选用了 8000RMP 的电主轴加工钛合金,主轴扭矩最高能达到 900N·m。

3 复合材料的绿色制造技术

复合材料是一种由高强度、高刚度增强材料构成的新型材料,具有高强度、高刚性、良好的抗疲劳性、抗腐蚀性等一系列优点,从而使其成为世界航空发展的趋势,也代表着一个国家飞机工业的水平。在飞机上采用复合材料意味着可以明显减轻飞机的结构重量、提高飞机的性能。有专家称,复合材料在军机、直升机、无人机上的用量早已达到或超过 50%,如今大型客机上的用量也超过了 50%,这给业已存在的飞机结构复合材料化趋势涂上了浓墨重彩的一笔。

相对密闭的防护间是复合材料数控加工的装备的关键点,此技术可在现有产品(如桥式五轴加工中心和龙门五轴加工中心)增加全防护间配置工业吸尘除尘装置,并配置带吸尘功能的双摆五轴铣头,使加工产生的粉尘大量被吸除。目前,大部分采用水幕方式收集粉尘,如何让防护间内密闭,且能产生负压,这一技术难点是复合材料绿色制造的关键所在。

当前国产高档数控机床技术中存在的不足

1 缺乏自主创新的数控机床产业链

航空制造业主要以多轴联动高

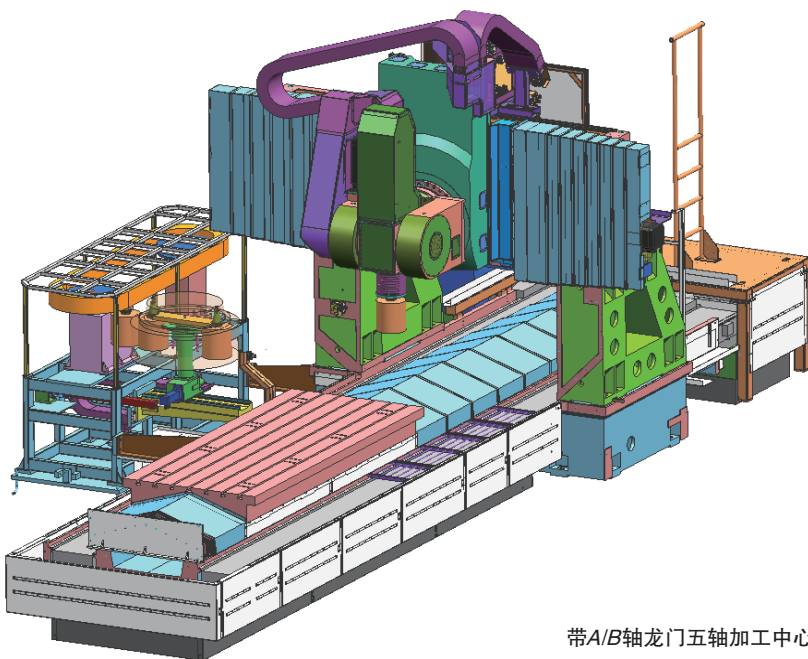
速加工为主,因此数控系统、核心功能部件都是装备制造中的核心部分,然而当前国产高档数控机床技术中,产业链自主研发和创新能力有所欠缺。

(1) 对外依赖性强的数控系统。

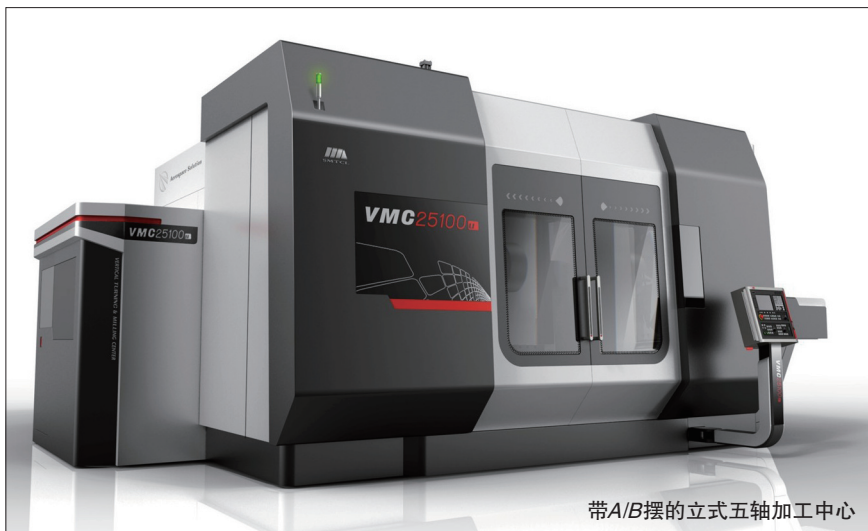
航空制造技术的发展需要相应的高档数控机床来提供服务,而数控系统是机床的大脑,其好坏直接影响到机床的性能。国内制造企业为了保证机床整机性能,不得不选择国外的数控系统。我们现在大多采用的数控系统有 Siemens、Heidenhain、Fidia、Fanuc 等,尽管可以借助这些国外系统进行二次开发,但由于过多依赖进口,容易受制于人。当前,国产高档数控系统需研发适合高速高效加工的通信协议和接口、驱动技术以及适合高档机床的编程技术。

(2) 欠缺竞争力的核心功能部件。

作为五轴加工中心的核心功能部件——双摆铣头在航空结构件中的精度起到主要影响作用。双摆铣头分为: A/B 轴和 A(B)/C 轴。成熟应用于五轴加工中心的 A(B)/C 轴双摆铣头几乎全部依赖进口,这占去很大一部分的设备和成本,从而导致我国高档机床竞争力不强。A/B



带 A/B 轴龙门五轴加工中心



带A/B摆的立式五轴加工中心

按照切削力分为强力A/B轴和高速A/B轴。强力A/B轴适合钛合金的切削,高速A/B轴适合铝合金的高速切削。A/B轴的五轴加工中心只有少数国内企业具有开发能力,虽已投入市场应用,但还需不断地改进完善。

2 不完善的产品研发流程

在欧美发达国家,航空制造企业的高档数控机床基本具有了本国的一家或几家主要供给格局,如美国波音等公司的装备供应商为MAG/INGERSOLL,德国宇航的数控装备主要来源为DST,法国宇航的数控装备主要来源为Forest-line。这样,机床制造商与机床用户形成长期的技术合作联盟。机床制造商可以密切关注用户需求,针对用户新的需求采用联合研制的方式进行新产品的研发,并根据用户建议进行完善和改进,形成完善的产品研发流程,提高了设备的利用率和可靠性。而目前国内的研发流程主要是依据客户提出的产品要求提供相关的设备,比如,工作台的尺寸、行程及规格尺寸等,而很少客户和用户一起就加工工件工艺及机床的技术方案进行研讨,因此,急需完善我国国产高档数控机床的研发模式。

展望未来技术,缩短国外差距

1 直驱技术——高速加工的核心应用

针对航空制造的需求,直驱技术可以很好地实现数控机床高速加工。直驱技术是力矩电机和直线电机驱动统称,分别代表旋转轴的驱动和直线轴的驱动,不仅具有响应速度快、运动平稳等优点,还大大改善了机床的运动速度、精度和刚性。其中,电主轴是力矩电机直驱技术应用成功的典型例子,在航空结构件高速加工中,电主轴的作用已不可替代。在不久的将来,待技术进一步成熟,成本相对降低后,力矩电机将大量运用在旋转轴上,从而取代现有的传动链传动,如蜗轮蜗杆、伞齿轮等。对于直线电机驱动来说,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就不会对机床可靠性与精度保持性产生影响。目前直线电机驱动技术已趋于成熟,并呈现出产业化的趋势。

总之,直驱技术在适应高速加工的需要上具有独特的优势,从加工精度的提高上避免了传动链中间环节,在响应速度、动静刚性的调节方面具有优势。直驱技术将是未来机床高速加工的一个值得关注和大量应用研究的方向,也是未来机床应对航空制造业发展的必要技术。

2 带自动翻转交换工作台的卧式加工中心——高效加工的典范

由于工件挠度和热应力作用,整体结构件的薄壁特点使得加工中的零件变形难以控制,因此高速加工成为航空结构件加工的必然选择。高速加工时,80%以上的切削热随切屑带走,有效地减小了零件的热应力变形。整体结构件材料利用率极低,切削加工量极大,造成零件在加工过程中产生大量切屑堆积在零件上,切屑的热量传递给零件而造成零件变形量大。在卧式加工中,工件在竖直平面内加工,在重力作用下使切屑排放极其迅速,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。

3 虚拟轴机床——刀具空间的高速定向

摆叉式或万能主轴头的优点是主轴的偏转角度较大,可以实现矩形零件的五面加工,但刀具空间定向速度仍然较低,对机床X、Y、Z轴线的补偿运动不能及时反应。这种机构运动学上的先天缺陷,使叉式主轴头在加工飞机结构件时存在缺陷,主要表现为过象限加工时摆角自动回转铣伤零件、加工中无效路径长造成摆角速度与线性轴速度不匹配而出现机床报警,加大了产品质量控制难度。虚拟轴机床为并联机构,并联机构和串联机构相比,具有承载能力大(比刚度高)、响应速度快及运动精度高等优点。对机床而言,比刚度、响应速度、运动精度正是航空工业所追求的重要技术指标。

沈阳机床在高档数控机床研发方面的探索和实践

作为国内机床行业的重要组成部分,沈阳机床应对航空制造业的发展不断调整研发模式,革新关键技术,在未来高档数控机床研发方面进行了探索和实践。

1 调整研发模式,形成战略联盟

“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项实施以来,沈阳机床承担重大专项通过“产、学、研、用”合作模式,探索了满足国内航空工业需求的高端五轴产品研发过程,本文以钛合金强力五轴联动加工中心为例加以介绍。

沈阳机床(集团)有限责任公司进行大量调研并研制了第一台钛合金强力五轴联动加工中心,首台样机在典型S试件切削测试时发现Y向运动不稳定,面对此状况,3家合作单位融入,“产学研用”研制体系,共同制定包含修改机床参数、改进机床结构、提升关键部件刚性3个步骤的修改方案,如航空制造企业参考国外同类型机床结构特点,结合该机床的Y向实际运动情况,建议对机床立柱进行详细测试;高校开展了结构动力学建模与仿真、切削过程稳定性分析、试验模态分析;沈阳机床(集团)有限责任公司应用首台样机进行典型S试件切削,通过典型S试件的表面质量判断机床薄弱环节,综合3家单位意见分析确认:机床立柱及立柱支撑部位的刚性不足是导致Y向运动不稳定的主要原因。

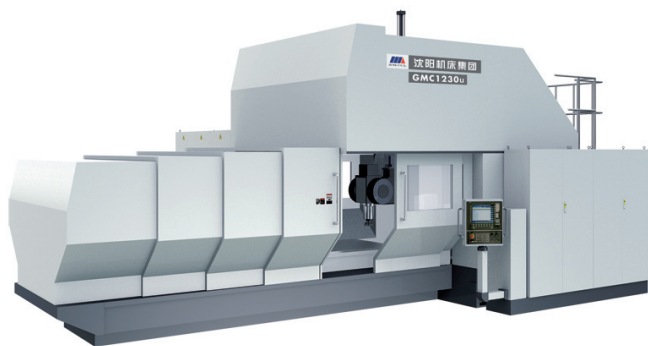
根据修改方案,沈阳机床(集团)有限责任公司设计、研制了第2台机

床,将机床加工钛合金所需要的特性,通过切削实验的方式得到有效验证,如大扭矩的AB摆轴,通过大角度强力铣削验证;大扭矩主轴,通过铣削试验

满足最大扭矩验证等。目前,第2台改进型机床完成S试件切削,并已在国内重点航空制造企业投入应用。

基于航空制造企业数字化车间管理系统,对第二台改进型机床实际应用情况进行了详细记录,为沈阳机床(集团)有限责任公司对第一台机床的工艺性试验和后续改进提供了有力的数据支持,这一研发流程在当前我国高档数控机床的产业化、工程化阶段作用显现十分突出,为高端产品满足国内重点领域需求的探索积累了有益经验,起到了应用示范作用。

通过上述研发过程,我们得出以下经验供大家参考:机床企业和用户企业形成战略同盟,这将成为我国高档数控机床研发的主要模式。通



复合材料加工中心

过与用户企业的合作研发,可以了解和明确用户工艺需求,解决以往对用户要求不清的问题;用户参与设计和技术方案评审,可以了解用户关注点,解决设计与应用现场脱节的问题。用户参与设计、制造、安装等过程,通过用户把关,解决产品质量控制问题,同时制造企业、产品、用户三者之间增强互信和了解,为产品后期熟练应用奠定了基础。用户的大量使用数据的反馈为机床企业的进一步提升产品实用性提供了宝贵的素材。同时,机床企业进一步贴近客户完善产品,更好地为航空工业服务。

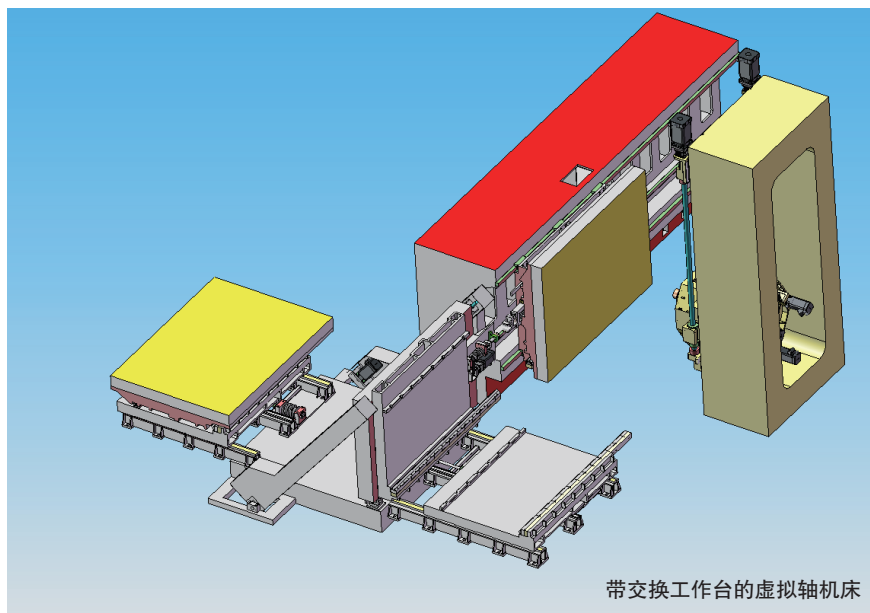
2 突破关键技术,服务航空工业

针对钛合金强力高效加工,沈阳机床开发一款带A/B摆主轴的强力立式五轴加工中心,能一次装夹完成多种空间方向的加工,提高空间自由曲面的加工精度、质量和效率,适用钛合金、有色金属的加工。

结束语

随着时代的发展,我国机床业在产品结构调整方面取得明显进步,中档数控机床逐步趋向成熟,高档数控机床基本实现了“由不能做”到“能做”的升级和跨越。然而,当前我国国内高档数控机床仍存在一些问题,需要通过加大技术创新、完善研发模式等方式,提高满足航空工业的高档数控机床的可靠性与精度保持性。

(责编 深蓝)



带交换工作台的虚拟轴机床