

数控机床及工装的发展与创新设计

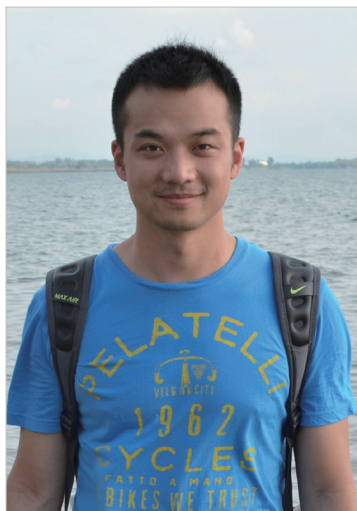
李 清,王家齐,王 焱

(中航工业北京航空制造工程研究所,北京 100024)

[摘要] 在现代数控加工中,由于被加工件的精度要求以及复杂度不断提高,传统加工系统无法满足使用需求,为解决这一问题,数字控制系统的核心算法以及驱动系统得到了快速发展,一些创新机构也应用到了数控机床的整机结构设计中。这些解决措施大幅提升了被加工件的精度和表面质量,促进了市场上一系列新型数控机床的出现,如复合机床、镜像铣削机床等,与之配合的新型加工工装技术也取得了相应的突破。

关键词: 数控机床;控制系统;驱动系统;先进机床;工装系统

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.06.047



李 清

北京航空制造工程研究所读研究生,主要研究方向为数控加工设备和加工工装系统。

数控机床是现代机械制造业的关键基础装备,其发展很大程度上体现了一个国家机械制造业的现代化水平,也关系到一个国家的工业战略地位和综合实力。对于航空制造领域,机床装备是航空复杂结构件高效

精密加工的重要工具,是促进航空科学技术和工业发展的战略性基础,其性能体现了国家先进制造技术的综合水平^[1-2]。

正是因为上述原因,世界各国均非常重视高档数控机床的研发,从20世纪80年代起西方发达国家就已将五轴联动加工机床应用于工业生产。近年来我国在五轴联动数控机床的研发也得到迅速发展,诸如沈阳机床集团、北京第一机床厂、济南第二机床厂、秦川发展等企业均推出了系列化的数控机床产品。

数控机床的出现和发展经历了一个较为漫长的时期。早期的机床多为原始的人力手工操作,已经无法满足被加工件精度要求的提高及外形复杂度的变化。1949年,麻省理工学院应美国空军的委托,开始针对直升机螺旋桨研制数值控制。1952年,麻省理工学院通过和Parsons公司合作研制出首台数控机床,从此,机械加工进入了一个新的领域。我

国的数控机床发展时间也比较早,1958年2月,第一台数控机床在沈阳第一机床厂试制成功。这是一台2轴的车床,由程序配电器控制,由哈尔滨工业大学研制。同年9月,第一台真正意义上的数控铣床由清华大学和铣床研究所合作研发完成,并在北京第一机床厂试制成功。数控加工设备是一个国家高端机械制造的基础,我国在多年的发展中已经具有了低端和中端的数控机床研发生产能力,但是高端数控机床与国外存在着较大的差距。2006年,国家科技部发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》,同期国务院发布《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》确定的16个重大专项,将“发展大型、精密、高速数控装备和数控系统及功能部件”列为重点支持发展领域。2009年5月,国家发改委颁布《装备制造业技术进步和技术改造投资方向(2009-2011年)》将高速、精密加工

中心及五轴联动龙门加工中心作为国家重点扶持发展的产品^[3-5]。

现代飞机要求具有优异的飞行性能、较长的服役寿命、合理的制造与使用成本等,其结构设计与制造目标是满足低能耗、长寿命、高可靠性、低成本要求,使得现代飞机从气动外形、材料体系、零件结构形式上都发生了重大变化。例如,现代飞机机体材料以复合材料、钛合金和高性能铝合金为主体(尤其是复合材料用量得到大幅提升),为飞机的减重、耐腐蚀、长寿命需求提供了基本保证;机体零件结构向大型化、整体化、结构功能一体化等方向发展,这些变化要求产品的制造手段向高效化、精确化、数字化方向发展,数控机床成为现代飞机零件制造过程中必不可少的基础手段。针对飞机复杂结构件,为控制零件的质量误差、尺寸精度、壁厚尺寸,满足零件的设计要求和装配协调要求,提升零件的制造精度是目前航空领域极为关注的核心问题。实现零件制造精度的提升,一方面要依靠数控机床来满足高精度加工的需求;另一方面也需要高性能的工装(高精度定位、高效率装夹)来保证加工过程中整个工艺系统的稳定性和可靠性。

由于现代飞机存在大量复杂结构件的加工需求,而传统的通用型定位工装不能很好地胜任工作。最初,为了解决这一问题,普遍使用专用工装,但随着技术的进步和对绿色制造的要求,模块化工装的使用逐步提升比重,并且在未来的使用中会占据更加重要的地位。其中,模块化工装最主要的两个组成部分是可重构工装和柔性工装。

数控机床的关键技术基础

机床在它的整个发展过程中,由最原始的手工操作控制到现在的数字化控制,驱动方式也由人力、畜力或者水动力到现在的伺服电机。这

些变化带来了人类加工水平的大幅提升,机床加工水平提升最主要的两点就是控制系统和驱动系统。

目前,高速、高精、复合、多轴联动和智能化是面向航空制造领域数控机床的基本特征,高刚性大阻尼机床结构、高速大功率精密主轴、高速大推力直接驱动、高分辨率数控系统、网络化智能监控等从不同侧面反映了高端数控机床的发展趋势和方向。

1 数字控制系统

数控加工过程涉及数控工艺与程序设计、数控程序驱动数控机床的加工执行两个主要过程,其主要流程如图1所示。

上述流程中,三维建模、工艺与程序设计、后置处理都是在加工数据准备阶段完成的工作。控制系统是驱动数控机床执行指令、实现运动的核心。

控制系统的硬件主要由总线、CPU、电源、存储器、操作面板和显示屏、位控单元、可编程序控制器逻辑控制单元以及数据输入、输出接口等组成。

目前,比较先进且常用的控制系统主要是德国西门子(SIEMENS)、

日本发那科(FANUC)、德国海德汉(HEIDENHAIN)的数控系统,我国自主研发的数控系统主要有华中数控系统、广州数控系统、大连光洋数控系统等。在高端数控机床上(如五轴数控机床)主要采用的还是国外控制系统,国产数控系统主要集中在中低端数控机床中,近年来国产数控系统也开始进入俄罗斯数控装备市场。国产数控系统在系统功能、控制精度、运行稳定性等方面与国外先进数控系统尚存在一定的差距,主要表现在控制系统的插补运算及处理模块方面。

控制系统包含多个模块,其中插补模块发挥了非常重要的作用,其性能主要取决于插补算法,表现为利用一种数学方法在理论模型的已知点间插入一些中间点,这些中间点的坐标位置主要依据理论模型的外形轮廓、加工精度、加工工艺等方面的要求来计算。数控系统中运动控制和加工路径都需要依靠这些中间点的坐标位置。插补算法的优劣决定了这些中间点计算所需要时间以及中间点坐标值的精度,从而间接影响到数控系统的加工效率和加工精度。数控系统通过插补器来完成插补功

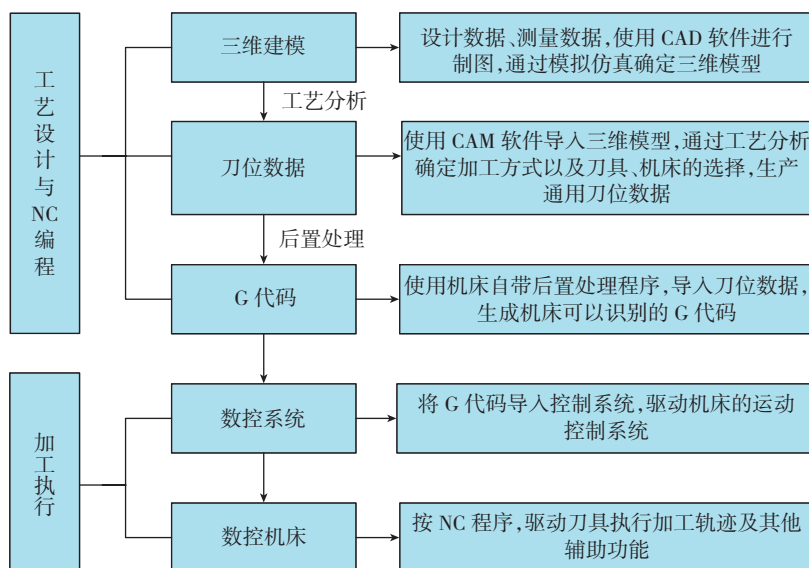


图1 数控加工的主要流程
Fig.1 Main process of CNC machining

能。在数控加工的过程中,首先依据零件理论数模和加工工艺文件完成数控加工程序编制,然后将加工程序导入到数控系统中。通过编译和预处理后,按照加工要求对插补算法参数进行设定,利用插补算法计算得到刀位点坐标等数据。运动控制系统根据获得的坐标数据协调控制各运动轴的位移和旋转,从而得到所要求的刀具位置、姿态以及运动轨迹,完成预期的工件外形轮廓加工。目前插补算法主要包含经典插补技术、参数曲线插补技术与智能插补技术。

(1) 经典插补算法。

这类算法主要是针对直线、圆弧、抛物线、螺旋线的插补,插补的方法有脉冲增量插补和数据采样插补两种,经典插补算法已经十分成熟,但近年来也有针对这类方法的改进性研究^[6]。

(2) 参数曲线插补算法。

参数化曲线被国际标准化组织规定为 CAD/CAM 的数据交换标准,针对参数化曲线的插补研究是当前的一个研究热点,目前主要有两种参数化曲线的插补研究工作: B 样条曲线插补和 NURBS 曲线插补。其中, NURBS 插补算法更具优良特性,是当前运动控制技术的一个研究热点。在实际的控制系统中有 FANUC、Siemens、三菱等的部分数控系统支持这种插补运算。然而高速、高精度的 NURBS 插补技术还有很多问题急需研究(如插补计算的稳定性问题、插补计算时延问题、插补精度与插补速度的矛盾问题)。运动控制系统的 NURBS 插补和数控机床的插补又不完全相同,运动控制系统应用对象广泛,针对不同的控制对象,插补算法又有不同的要求。插补算法的适应性问题运动控制系统插补所特有的问题^[6]。

(3) 智能插补算法。

由于神经网络技术的发展,利用基于三层前向神经网络的插补算法

也有报道。神经网络是近年发展起来的一门新兴学科。由于它具有逼近任意非线性函数的能力,使得采用神经网络进行非线性轮廓插补成为可能。神经网络具有并行处理的特点,能大幅度缩短插补周期,提高插补精度,且由于其插补时间与曲线表达式无关,使其对非线性轮廓,尤其对高次参数方程的插补表现出较大的优越性^[6]。但是它尚处于起步阶段,极少有真正的工业应用。

2 驱动系统

现代数控加工领域向着高精度、高速度方向发展,传统的驱动方式已经显现出技术瓶颈,在定位精度、启停加速度、大扭矩驱动方面都无法满足需求。为了解决这一困境,各研究机构及厂商展开广泛的研究,推出一系列先进驱动器件及系统。

传统的主轴头采取电机通过皮带、齿轮箱或者联轴器的方式驱动主轴头的转动,这样的方式限制了主轴的转速和体积,在性能上难以满足目前高速、高精度、高复杂度的零件加工需求,电主轴是近年来快速发展并不断带来新突破的功能部件之一。电主轴是高频主轴的简称,根据它的结构特点也会被称作直接传动主轴,主要表现为主轴电机单元内部安装,不通过传动系统传输动力,以此保证零距离的机床主传动链。由于传动方式的特点,该结构具有机械效率高,外形紧凑等特点,同时可以获得极高的转速且控制精度高、共振小、运行平稳,在先进机床中得到了大量

使用。

在数控机床中,各运动轴的移动一般都采取旋转电机加滚珠丝杠副的方式驱动,但是这种驱动方式存在一些局限性:(1) 旋转电机加滚珠丝杠副的直线驱动方式存在着多个弹性环节,当整个系统在高速运动时会变形,导致刚度下降,同时弹性变形使系统的阶次变高,系统的鲁棒性降低,从而使伺服性能下降。而且,弹性变形是数控机床产生机械谐振的根源;(2) 中间传动环节的存在,增加了运动体的惯量,使得位移和速度的动态响应能力较差;(3) 存在间隙死区,由于运动部件摩擦、误差积累等因素,使进给速度和加速度受到限制;(4) 运转平稳性较差,在高速运动下噪声大且容易发热;(5) 由于传动方式存在摩擦,精度保持寿命相对短。1993 年德国第一次将直线电机用在数控机床上面,取得了极好的效果,从此直线电机开始广泛地出现在数控机床中。直线电机的原理如图 2 所示,可以简单理解为回转电机通过径向剖开,沿圆周展开成直线。

直线电机具有许多独特的优势:(1) 快速响应性。主要表现在缩短动力传递路径,减少机械传递件,将动态响应时间较大的机械传递改为更加敏捷的电气控制,大幅度提升控制系统的动态响应能力;(2) 结构简单,直线电机只有一个运动部件且驱动力不需要通过接触传递,可以做到几乎无磨损使用,延长使用寿命,可靠度高;(3) 传动刚性高、推力平

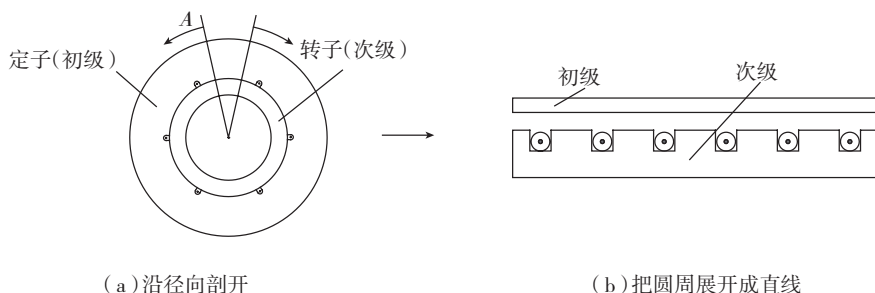


图2 直线电机原理
Fig.2 Theory of linear motor

稳。由于缩短动力传递路径,系统弹性变形减小,提升了整体刚性,优化了传递效率;(4)精度高、重复定位准确,相对伺服回转电机和滚珠丝杠副组合的重复定位精度提高7~10倍;(5)移动速度快,加速度大,最大速度可达90~180m/min,最大加速度可达1~10g;(6)行程不受限制,可定制各种位移距离。但是目前直线电机在部分领域相对旋转电机加滚珠丝杠副还是有一些差距,主要表现在重载时的散热和寿命的问题,同时直线电机相对而言成本也比较高昂,对于经济型数控机床仍然没法普及。

3 整机结构

为了适应高速、高精度加工的要求,近年提出了整机结构创新、布局优化的要求。传统的数控机床都是采取的单侧驱动的模式。根据基本力学知识,如果在构件的单边施加驱动,会破坏力学平衡、产生振动,影响加工精度和表面粗糙度。但是如果

在重心两端平均施加驱动,就可以理想的改善这种情况,这即为重心驱动技术。重心驱动与非重心驱动原理对比图如图3所示。

日本的森精机制作所2006年首次提出了重心驱动技术,并且成功地应用在他们最新的数控机床中。实际使用证明,重心驱动不管在加工精度、表面粗糙度、提高刀具寿命等方面都优于普通的驱动方式。通过森精机制作所的试验可得到重心驱动与普通非重心驱动振动对比图如图4所示。

但是由于重心驱动技术结构复杂,需要考虑的因素繁多,导致成本比价高,一般只用在中高端机床上。

数控机床研发方向

数控机床是支撑先进制造技术领先发展的主要基础,先进制造理念的不断发展和完善,推动了数控机床结构的变化和相关技术的不断发展。

目前,高性能数控机床的主要特征可以概括为:高精度、高刚度、多轴联动、高速主轴、高动态响应、智能化控制,由此带来了数控机床整体结构形式的变化,近年来,数控机床变化主要体现在复合加工、虚拟设备、镜像铣削等方面。

1 复合机床

复合机床实现了一次装夹、多种加工的要求。复合加工机床是将车、铣、磨等多种不同类型的加工工序集中到一台机床上,只需要将工件进行一次装夹定位,然后通过数控系统控制不同的主轴和进给部件对工件进行联动加工,在复合机床中完成传统需要多台机床加工的复杂零部件加工。典型复合机床如图5所示。



图5 车铣复合机床
Fig.5 Turning-milling machine tool

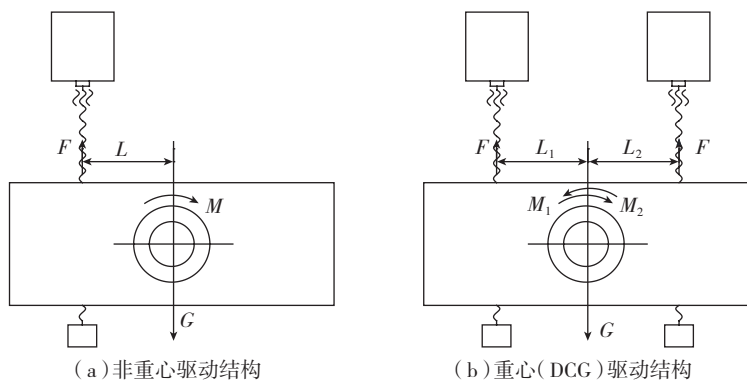


图3 重心驱动与非重心驱动原理对比图

Fig.3 Theory comparison chart of DCG and non-DCG

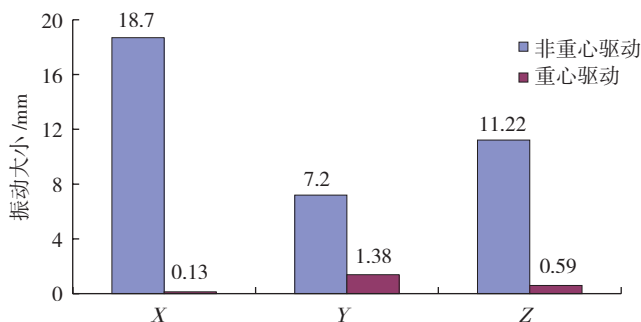


图4 重心驱动与非重心驱动振动对比图

Fig.4 Vibration comparison chart of DCG and non-DCG

复合加工机床在主轴转速和加工精度方面并不具备优势,其优势表现在工件只需要进行一次定位装夹,这样可大幅度降低多次装夹造成的基准偏差,可显著提升复杂工件的加工精度。同时由于多种加工工序集中在一台机床上,减少了所需机床的台数和占地面积,简化了物流系统,缩短了整个工艺流程,降低工艺局限性对产品设计的约束。

2 虚拟机床

随着计算机仿真技术的发展,广大机床厂商提出了“虚拟机床”的概念,通过对数控机床的加工过程进行模拟仿真,使用专门的软件分析加工过程中刀位轨迹、是否有过切、欠切、干涉和碰撞,同时通过对数控加工过

程建模分析,得出在不同加工工艺情况下工件表面温度变化、加工刀具磨损情况及主轴头负载情况等相关信息。以“虚拟机床”得出数据为基础,可以在实际加工以前对工艺流程和加工方法进行优化,可以大幅度提高加工效率并且显著降低加工成本。

3 镜像铣削机床

针对大飞机蒙皮加工及绿色制造理念的需求,法国杜菲(DUFIEUX)公司提出镜像铣系统(MMS),MMS关键技术是在铣头相对蒙皮的对称面上加上一个随动的支撑头,工作原理如图6所示。

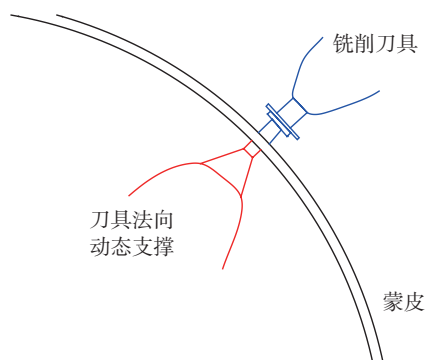


图6 镜像铣原理图

Fig.6 Theory of mirroring milling machines

通过支撑头的作用,保证被加工蒙皮的刚性,通过降低蒙皮因为刀具导致的共振来提高蒙皮表面的加工精度和表面粗糙度。镜像铣系统主要用来替代传统的化铣和龙门铣,配立柱真空吸盘柔性夹持系统,通过杜菲公司的验证,镜像铣相对化铣加工时间和加工成本都降低一半,并且被加工工件具有更好的质量。但是由于镜像铣系统的复杂性,目前全球只有空客和我国的洪都航空使用了这种系统。

先进工装系统

在采用数控机床进行产品零件加工过程中,工装系统是极其重要的部分,它在一定程度上决定了被加工件的精度和质量。现代航空产品零件的结构和外形都比较复杂,特别

表1 典型可重构工装

代号	类型	示意图	所用到的接头	连接板数量	螺栓数量	用途说明
a	基本类型			2	4	用于构成其他复杂类型的盒式连接接头
b	双盒类型			4	4	连接空间异面正交的两个方形梁,用于较大载荷
c	单盒类型			2	4	连接空间异面正交的两个方形梁,用于较小载荷
d	正交类型			12	8	连接空间异面正交的三个方形梁,用于较大载荷
e	斜交类型			8	8	连接空间异面斜交的两个方形梁,用于构成加强肋
f	角度类型			4	4	连接空间异面斜交的两个方形梁,用于构成加强肋
g	共面类型			4	4	连接空间共面正交的两个方形梁,用于较大载荷

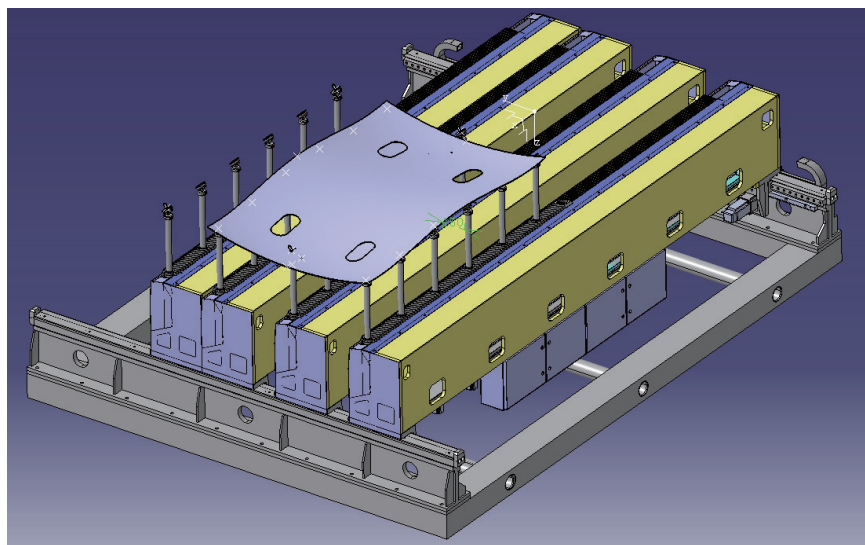


图7 蒙皮壁板柔性加持工装

Fig.7 Flexible tooling of skin panel

是大型复杂结构零件,普通标准化的工装无法胜任工件的定位装夹工作。为了满足工艺基准协调、工件变形控制、加工质量稳定控制等的关键技术要求,传统解决方案是制作专用工装。近年来,航空领域产品零件具有多品种、小批量生产特点,使用专用工会大大提升成本和加工时间。为了解决这一问题,人们提出了可重构工装和柔性工装的新型解决方案。

基于框架结构的模块工装系统一种适用于大型产品定位夹持的可

重构工装技术方案,它由螺栓组装的连接盒与方形梁搭建而成,利用摩擦力固定,所有的零件都是具有一定尺寸规格的标准件,可以通过拆装实现重用^[6]。使用这种方式可以实现工装的模块化设计,大大提升了工装的设计、安装及工作效率。通过使用可重构工装,对于不同的被加工件,模块化的框架结构以组合的方式实现定位,替代传统数控机床上使用的固定标准化工装系统,保证对于被加工件的准确配合。典型可重构工装的

示意图如表 1 所示。

作为一种新型工装,可重构工装展现了优良的效率和环保性,但是由于是组合型工装,相对于传统的一体式工装有着稳定性较差的缺点。在未来的研究方向中,提高可重构工装的稳定性将是非常重要的方面。

柔性工装主要用来替代传统的专用曲面工装,如飞机蒙皮加工工装。柔性工装通过多个阵列支撑头顶端的真空吸附盘或者其他装夹设备来固定被加工件,同时支撑头具有 X、Y、Z 3 个方向的自由度,可以在空间贴合被加工件的表面,保证被加工件的稳定性。柔性工装在加工中的使用如图 7 所示。

柔性工装通常都会与其他工装混合使用以获得更好的经济性。比如在镜像铣系统里面,通过柔性工装固定蒙皮周边,然后再依靠动态支撑头与加工刀具随动来保证加工质量。柔性工装在现在数控加工领域有着广泛的使用,同时它的灵活性使它还有很大的挖掘潜力。

结束语

数控机床作为人类历史上最伟大的发明之一,已经具有百年历史了,它推动着人类工业技术的前进,同时电子设备的进步、信息技术的革

命也给它带来了质的飞跃。如今物联网的提出、绿色制造的推行又给了数控机床一个发展的契机,通过虚拟人机关系优化设计的数控机床具有更友善的操作方式,智能化设备的融入使自动化加工成为可能。这些技术的推进让数控机床无论从结构形式,还是综合性能和加工精度方面都发生了巨大的变化,具有多轴联动、高速切削、复合加工等功能的数控机床满足航空航天、船舶汽车等高新技术领域中高精度、复杂结构、难切削材料零件的制造需求,新的数控机床结构也不断出现(如并联机床、镜像铣削机床、柔性智能加工系统等),有效地支撑了复杂产品技术的发展。

纵观机床多年的发展史,具有一个普遍的特征,都是产品结构变化和制造理念变革的需求驱动了数控机床的发展。在我国产业结构改革的今天,智能制造、精密制造的提出创造了一个良好的契机来推动机床技术的革新。随着我国工业技术的进步,对先进机床的需求会更加的迫切,国产数控机床将会迎来更好的发展。

参考文献

[1] 张军. 聚合优势, 打造高端, 推动航空专用装备产业化发展——中航工业北京航

空制造工程研究所“高档数控机床与航空专用装备”发展回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2012(13):28-31.

ZHANG Jun. Gather superiority to promote industrial development of aviation special equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(13):28-31.

[2] 张辉. 航空工业制造设备发展分析[J]. 世界制造技术与装备市场, 2008(3):32-38.

ZhangHui. Analysis on advance of equipment for production in aviation[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2008(3):32-38.

[3] 尹霞. 数控机床插补算法改进研究[D]. 成都: 西华大学, 2009.

YIN Xia. The research on interpolation technique of CNC system[D]. Chengdu: Xihua University, 2009.

[4] 陆启建, 刘明灯. 数控技术的新进展[J]. 制造技术与机床, 2002(5):5-9.

LU Qijian, LIU Mingdeng. New development of CNC system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2002(5):5-9.

[5] 张国梁. 数控机床中两种直线驱动机械[J]. 现代零部件, 2004(6):34-37.

ZHANG Guoliang. Two linear drive machinery in CNC machine tools[J]. Modern Components, 2004(6):34-37.

[6] 郑联语, 王建华. 盒式连接可重构柔性工装技术及应用展望[J]. 航空制造技术, 2013(18):26-31.

ZHENG Lianyu, WANG Jianhua. Development and application prospect of boxjoint-based reconfigurable and flexible tooling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(18):26-31.

Development and Innovation Design of CNC Machine Tool and Tooling

LI Qing, WANG Jiaqi, WANG Yan

(AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In modern CNC machining, since the precision and complexity of the workpiece continues to improve, traditional processing system can not meet the demand. To solve this problem, core algorithm of digital control system and drive system has been developed rapidly. Some innovation device have been applied to design of the whole structure of CNC machine tool. These solutions significantly improve the accuracy and surface quality, promoting a series of new CNC machine tool on the market, such as complex machine tool, mirroring milling machine tool, etc., associated with the new machining tooling technology has also made corresponding breakthrough.

Keywords: CNC machine tool; Control system; Drive system; Advanced machine tool; Tooling system

(责编 玲犀)