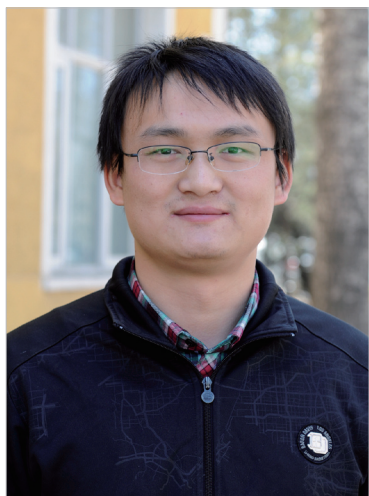


# 数控机床关键技术变革 与未来发展\*

## Key Technology Reform and Future Development of NC Machine Tool

中航工业北京航空制造工程研究所 汪鹏 王焱



汪鹏

中航工业北京航空制造工程研究所  
在读研究生,主要研究方向为数控工  
艺与设备、数字化集成制造技术。

自18世纪开始发生的工业革命以来,机械加工机床在推动制造技术发展、工业文明的进步方面扮演了极为重要的角色。自1796年亨利·莫兹利(Henry Maudslay, 1771~1831)发明车床以来,机床的发展和变革可谓翻天覆地,尤其是1952年第一台数控机床的出现,将机械加工能力推向了新的高度,通过机床的多轴联动,解决了具有曲线、曲面的复杂形

数字控制技术的核心是脉冲技术,通过脉冲发生器改变发出脉冲数量或频率,使进给伺服电机能够实现可控的直线进给,同时主轴伺服电机实现可控的回转运动。

状零件的加工难题,也使零件的一致性好、加工精度和表面质量稳定,且在大型、复杂零件加工中,切削加工效率较普通机床有极大提高。1958年第一块集成电路诞生后,推动了自动控制、计算机技术的发展,数控技术也随之不断变革,形成了“控制单元—位置控制—速度控制—检测反馈”的机床控制形式。

机床的发展经历了手工操作、机械自动化、电气控制、计算机控制等不同阶段,机械液压、电子技术、微电子技术、计算机技术在机床发展的不同阶段中发挥了关键作用,推动了机床的进步和变革,而计算机技术、软件技术的发展,又将机床推进到了网络化/信息化时代,形成了手工、自动、高速高精、智能等不同工作形态。机床的发展变革历程如图1所示。

数控机床所追求的是运动响应

及时性与位置定位正确性的统一,其主轴、丝杆、导轨等关键运动部件均与普通机床有较大的区别,对机床的刚性、抗振、抗热变形等方面也有较高要求。机床控制能力、关键运动部件、机床结构的不断发展和创新,直接推动了数控机床的发展,带来了金属加工技术的不断进步。

### 数控机床控制技术的 研究与发展

#### 1 控制能力的变革

从手工操作发展到机械控制,再发展到数字控制,机床操作与控制方式经历了手工、靠模、仿形加工,目前已经进入了依靠程序运行的阶段——用数字量实现机床运动的控制。数字控制技术的核心是脉冲技术,通过脉冲发生器改变发出脉冲数量或频率,使进给伺服电机能够实现

\* 基础科研“复杂结构件精确数控加工技术研究”项目(A0520110010)资助。

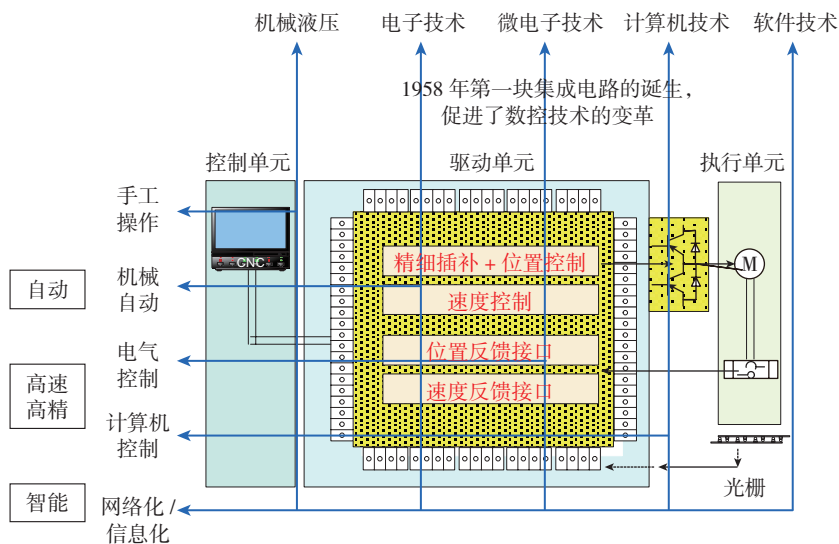


图1 机床的发展变革历程

可控的直线进给,同时主轴伺服电机实现可控的回转运动。数控机床的控制能力体现在3个方面:运动控制、插补方式、数据处理。

(1)运动控制是数控机床控制能力变革的第一个标志。

运动控制涉及到运动轴的位置、速度、加速度控制。在数控机床发展的初期阶段,位置是控制的焦点,位移与脉冲数直接相关,运动轴的控制实质上是以时间 $t$ 为基线的,轴移动位置可以表示为: $S=s(t)$ ;在多轴联动状态(特别是直线运动轴和回转运动轴联动时),速度控制成为重要要素之一,要求各参与联动的坐标轴在预定时间段内到达同一目标点,各轴速度可以表示为: $V(t)=S'(t)$ ;高速机床出现以后,轴进给速度可以超过10m/min以上,必须保持各运动轴运动速度的平稳性,运动轨迹误差不能超过允许范围,加速度控制成为新的控制要素,各轴加速度可以表示为: $a(t)=V'(t)$ ;当轴进给速度更高时,对各轴运动突变亦需要进行控制,以避免轴运动过程中出现冲击,其控制参数表示为: $J(t)=a'(t)$ 。

(2)插补方式是数控机床控制能力变革的第二个标志。

直线插补、圆弧插补是数控机床运动控制的最基本插补方式,也是在

数控机床应用中普遍使用的方式,可以满足大多数零件加工的需要。然而,对于具有流体、气动外表面的零件来讲,采用离散的直线、圆弧参数点来拟合理论形状不仅数据量大,而且存在计算误差;另一方面,随着数控机床进给速度的提高,大数据量的数控程序与运动的实时控制矛盾逐步凸现出来,数控系统中开始采用样条曲线插补方式,从3次样条曲线插补,扩展到具有NUBRS曲线插补能力,为复杂曲面数控加工提供了更有效的控制方式。此外,为满足五轴联动中刀具长度补偿、数控程序编制简化要求,RTCP(Rotation Tool Center Point)成为现代数控系统的代表性功能之一,为数控机床应用提供了更为有效的手段。

(3)数据处理是数控机床控制能力变革的第三个标志。

数控机床的数据处理能力是随着数控系统的变化不断变革的,数控系统经历了电子管元件、晶体管元件、集成电路、大规模集成电路、计算机控制的持续发展过程,数据处理能力随着硬件的变化不断提升,实现了从数控程序的顺序处理发展到高速加工阶段的程序段“前看”功能的变革,预先完成运动轨迹数据处理,满足对运动轨迹的实时性控制要求。

此外,图形处理功能也在数控系统中不断增强,可以完成刀具运动轨迹的三维实体仿真显示,为操作者提供了直观的监视检查手段。

数控机床控制能力将随着控制技术、计算机技术的发展而不断改善,机床动态性能、多轴联动方式、数据处理实时性仍然是未来控制能力发展的核心。

## 2 开放式数控系统的研究

随着数控技术的不断发展,传统的数控系统的封闭性与实际使用中变换频繁的需求之间产生了矛盾,解决这一矛盾则需要建立统一可重构的数控系统平台,增强数控系统柔性,降低开发难度;同时,近些年来计算机技术和“物联网”技术发展迅速,这两方面因素正驱使着传统的数控系统向“开放式数控系统”方向迅速发展。

根据IEEE的定义<sup>[1]</sup>,符合系统规范的应用可以运行在多个销售商的不同平台上,可以与其他的应用互换操作,并有一致风格的用户界面,则称之为开放系统。根据IEEE的定义,开放式数控系统应当具有模块化、标准化、移植性、可再次开发性、网络化等特点。由于基于PC的开放式数控系统可以充分利用微机丰富的软硬件和适于PC机的各种先进技术,已成为未来控制系统的发展潮流和趋势。传统数控系统与开放式数控系统简要对比如表1所示。

影响开放式数控系统实现的因素有诸多方面,其中的一个主要问题是数控系统的体系结构及其标准接口的问题。

而直至目前为止,开放式数控系统的体系结构尚且无同一标准,一些国家或组织正在研究开放式数控系统的结构体系,也取得了一些成果。其中,以美国的SOSAS(NGC计划)、欧共体(欧盟前身)的OSACA、日本的OSEC为代表,这3种体系结构是现在比较成熟的体系结构<sup>[1]</sup>,其结构

表1 传统数控系统与开放数控系统对比

系统	项目				
	操作系统	编程语言	人机接口	软件应用	应用范围
传统数控系统	多种	多种	非标准	不可移植	固定
开放式数控系统	较单一	主要为 C、C++	标准	可移植	灵活

表2 3种数控体系结构特点

对比项目	美国 NGC	欧共体 OSACA	日本 OSEC
底层结构	无	有	无
结构类型	基于组件	客户机 / 服务器	封装
模块化程度	细致	中等	粗糙
编程语言	NML (可映射到 C、C++、Java 等)	C++	C
应用程序接口类型	面向对象的方法	面向对象的信息模型	函数调用
应用 DCOM、CORBA 等	是	否	否
有限状态机	有	有	无

特点对比如表 2 所示。

通过表 2 内容可以了解到 3 种体系结构各有各的优点,但目前尚不能将 3 种结构体系简单的统一到一种开放式的数控系统中来形成一个国际标准。

由于开放式数控系统都将采用模块化设计,因此数控系统内部模块之间信息传递、数控系统与外界信息传递的接口标准尤其重要。只有其接口满足国际标准或者行业标准,才能满足移植性、可再次开发性等特

点,实现真正的开放式数控系统。

开放式数控系统的接口可以分为内部接口和外部接口 2 个方面。内部接口主要指数控系统内部应用程序之间的接口;而外部接口主要指数控系统与 NC 程序、I/O 设备、伺服系统之间的接口以及与工厂管理网络的接口。开放式数控系统的接口及其遵循的协议如图 2 所示。

虽然开放式数控系统现无统一标准,但数控系统的开放性代表着整个数控机床行业的长远利益,是一股

不可逆转的潮流。特别是 1993 年国际电工委员会(IEC)正式颁布了可编程控制器的国际标准 IEC 1131(后来改称 IEC 61131),其中规范了可编程控制器的编程语言及其基本元素。这一标准为可编程控制器软件技术的发展,乃至整个工业控制软件技术的发展,起到举足轻重的推动作用,它成为工业控制走向开放式系统的坚实基础。

## 数控机床关键功能部件的发展

在数控机床的发展变革中,控制技术和计算机技术的发展使机床控制能力不断提高,数控机床从控制技术方面来讲可以实现更加精确、高速和高效的加工。但这也对数控机床的功能部件提出了更高的要求,如要求一些功能部件能够快速响应数控系统的命令、机械传动误差小等,这样的使用需求促进了数控机床功能部件的不断发展。其中,伺服电机、主轴、机床导轨等技术更是得到广泛的研究,并由此诞生了直线电机、电主轴和各种性能更佳的导轨,促进了数控机床的发展。

### 1 直线电机的应用

传统的常用伺服电机主要有功率步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机等。在传统的传动链当中,从作为动力源的电机到工作部件之间要经过齿轮、涡轮副、皮带、丝杆副、联轴器、离合器等中间传动环节,在这些环节中产生了较大的转动惯量、弹性变形、反向间隙、运动滞后、摩擦、振动、噪声及磨损等,这些在传统的动力传动结构中的问题给数控机床向精密和高速加工方向发展带来了困难。虽然这些方面可以通过不断的技术改进使传动性能有所提高,但是很难从根本上解决问题,于是“直线电机”应运而生,并且使机床性能有了新的飞跃。直线电机是一种将电能直接转换成直线运动机械

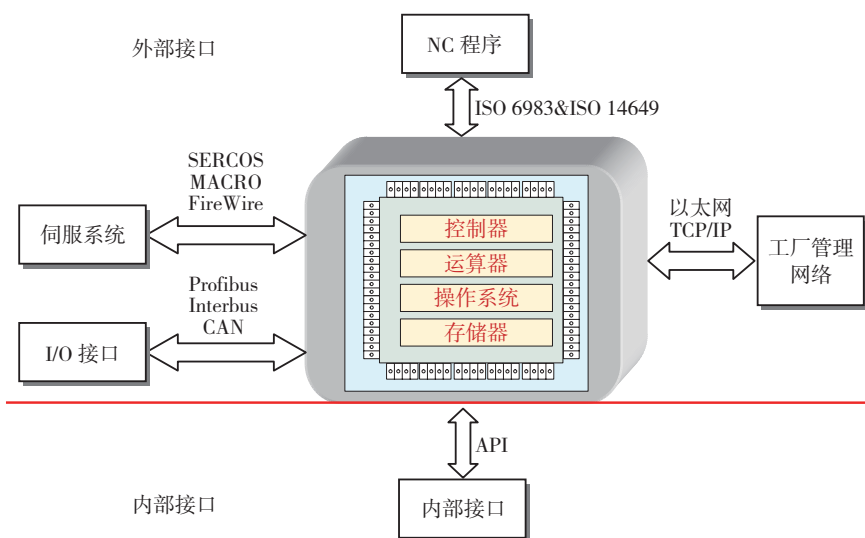


图2 开放式数控系统接口

性能,而不需要任何中间转换机构的传动装置,其结构是电机圆柱面的展开,演变原理如图3所示。

在一些数控机床的设计中采用直线电机驱动能使机床的性能更好,采用旋转电机和直线电机驱动给数控机床带来主要设计、性能参数变化的简要对比如表3所示。

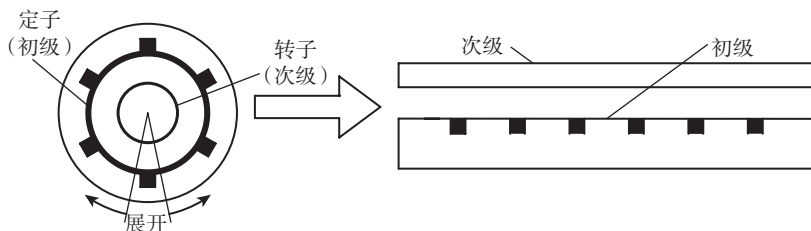


图3 直线电机演变图

表3 旋转电机与直线电机机床性能对比

对比项目	电机类型	
	旋转电机	直线电机
加速度	0.5~1g	5~10g
速度	≤ 60m/min	可达 300m/min
进给力	减速后可增大	一般小于 10kN
工作行程	受限于滚珠丝杆	无限制
传动链	由力和速度要求决定	无传动链,电机直接驱动
导轨	不限	直线滚动或气压、静压导轨
磨损	大,传动部件都会磨损	小,仅直线导轨磨损
控制方式	开环/半闭环/闭环	闭环
防护方式	机械防护为主	电气防护为主

直线电机在数控机床上最早的应用是1993年德国公司研发出的型号为HSC-240的加工中心<sup>[2]</sup>。该加工中心采用德国Indramat公司的感应式直线电机,机床主轴最高转速达到24000r/min,最大进给速度为60m/min,加速度达到了1g,当进给速度为20m/min时,其轮廓加工精度可达0.004mm。

虽然直线电机有很多优点(如进给速度范围宽、加速度大、定位精度高),且已经得到了一定范围的应用,但在某些应用场合,由于直线电机本身未解决的技术难题依然存在,例如直线电机在大功率、大扭矩加工

时散热问题未能很好地解决;直线电机很大的加速度对直线导轨的机械结构要求较高,要求直线导轨运行速度在20000km以上等,这些技术问题决定了现阶段在重载加工场合直线电机依然无法取代传统的旋转电机。

未来,随着直线电机及其驱动控

将空心的电机转子安装在主轴上,定子通过冷却部件固定在主轴箱上,形成一个完整的主轴单元,通电后转子直接带动主轴运转<sup>[3]</sup>。

和传统的数控机床主轴相比,电主轴主要有以下优点<sup>[4]</sup>:

(1) 主轴由电机直接驱动,省去中间变速和传动环节,因此结构紧凑,效率高,振动小。

(2) 利用交流变频技术,可在额定转速范围内无极变速,适应各种工况要求。

(3) 通过对电机的闭环矢量控制和伺服控制,不但能够实现大功率,高速精加工,而且能够实现准停等功能。

(4) 由于没有中间变速和传动环节,运行平稳,因而使用寿命长。

随着数控机床对高性能电主轴的需求越来越多,未来数控机床电主轴将主要向高速度、高刚度、高速大功率、低速大扭矩方向发展。同时其工作精度、可靠性、使用寿命将进一步增大,形式也将更多样化。

### 3 导轨的发展

自数控机床自发明之日起,导轨就是其核心功能部件之一。在数控技术多年的发展中,导轨技术的创新也无时不在,至今已经产生了多种实用导轨形式。目前,数控机床中常用的导轨主要分类如图4所示。其中,滑动导轨、滚动导轨是目前导轨的常用形式。

数控机床导轨技术发展到现在经历了滑动导轨、滚动导轨、静压导轨、磁浮导轨等阶段。但是虽然导轨发展经历了若干阶段,产生了多种形式,但在这些发展阶段并不是相互独立的,更不是一种导轨技术简单地取代了另一种,而是这些导轨技术一直并存着并且相互促进发展。将来,多种形式的导轨还将继续并存下去,究其原因,主要是各种形式的导轨在不同的应用场合各具优势。

滑动导轨具有优良的刚性、减振

制系统在技术上的日趋成熟,直线电机系统成本将进一步降低,直线电机数控机床性价比将更高,直线电机数控机床将更趋向于产业化。

### 2 电主轴的应用

随着数控技术的发展,高速加工技术越来越受到行业的重视,而传统的主轴系统由于机械传动效率低、振动大、噪音大等缺点,并不能很好的在高速加工行业内得到应用。此时,电主轴由于具有高转速、高精度、高效率等优点,被越来越多地应用在高速数控机床,极大地促进了高速数控技术的发展。电主轴与传统数控机床主轴的不同之处在于,它直接

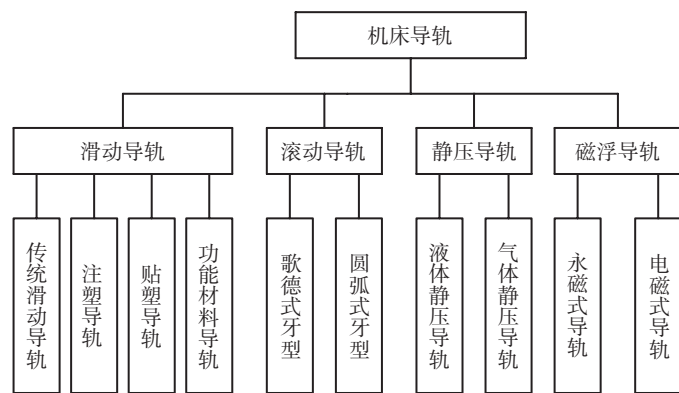


图4 机床导轨的主要分类

性和阻尼性,且结构简单、成本低、经济耐用,在各类机床和设备中应用广泛。但是随着高速加工机床的发展,要求机床应当具有更高的响应速度和更快的移动速度,传统的滑动导轨在这种高速加工场合不再具有优势,而滚动导轨由于采用钢球或滚柱作为滚动体,与导轨的接触为点接触或线接触,摩擦小,在对复杂曲面工件进行加工的高速加工机床中得到广泛应用。但其始终无法替代滑动导轨,主要原因也“缘于”它的优势:与导轨的接触面积小,因而刚性低,在重载机床中应用有待进一步研究。

滑动导轨响应慢、精度低,滚动导轨刚性低。因此,在既需要响应快、精度高,又需要刚性好的场合,选择滑动导轨或是滚动导轨都不是最佳方案,而最佳方案则是选择液体静压导轨。

液体静压导轨是在2个相对导轨面间通入压力油,使导轨浮起,因而运动摩擦小,降低了导轨运动时的动力损耗,具有很高的运动精度;同时由于液体油膜承载能力大、吸振性比较好,因而液体静压运动平稳。由于和滑动导轨、滚动导轨相比具有以上优势,因此液体静压导轨在要求高精度的重型机床扮演了重要角色。但其也具有本身固有的缺点:需要一套好的过滤装备,成本较高。

传统的3种类型导轨各有优势,在不同的场合具有不同的优势,随着

研究的不断深入将来仍有不小的应用范围。而磁浮式导轨由于具有无机械摩擦、无接触摩擦和无需润滑等优点,将是未来的一个重点研究方向。

## 数控机床结构的研究与发展

尽管从数控机床诞生到目前为止其核心控制原理没有改变,但为了满足不同的应用需求,数控机床的结构形式一直在不断的发展与变化。在数控机床结构形式的不断演变中,并联机床与功能复合型机床的出现突破了传统机床结构的局限,为数控机床技术的发展注入了新的活力。

### 1 并联机床

在20世纪90年代以前,所有的金属切削机床都是串联机床,都是由一条传动链传递下来的,车床途径是由卡盘—车头箱—床身—床鞍—刀架—刀具,而铣床则由刀具—主轴箱—立柱—床身—床鞍—工作台传来,等等。人们把这种结构称为C字型结构,传动链沿C字状走向。

随着数控技术的发展,研究人员期望能突破机床传统的C字型结构,试图在机床结构的设计上取得创新。由此研究人员结合热门的机器人技术,提出了并联机床的概念。在1994年美国芝加哥国际机床博览会上,美国Giddings & Lewis公司推出了世界上第一款并联机床“Variax”机床,引起了极大的轰动,被称为“机

床行业的革命”。自此之后,国内外数控机床厂商陆续研发了一些并联机床<sup>[5]</sup>,如德国Mikromat公司开发的欧洲第一台商业化的并联机床6X-Hexa、日本大隈株式会社推出的PM-600型立式加工中心、大连机床厂研制的DCB-510等。

并联运动机床以空间并联机构为基础,通过改变桁架杆的长度及移动支点位置来实现刀具与工件的相对位置变动,从而打破了传统机床以直角坐标系为基础的串联运动学原理。其结构的基本特征就是“并联”:床身—刀具—工件这一运动链中包含多条独立的主运动支链。典型的并联机床结构如图5所示。

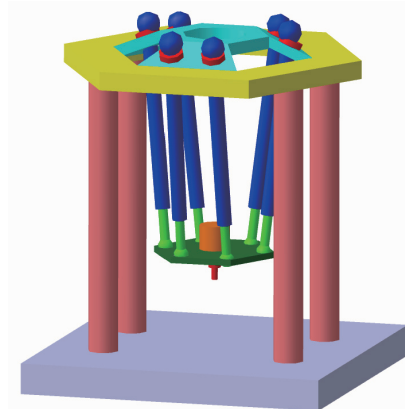


图5 典型并联机床结构

自并联机床问世以来,总体上仍处于研究、试制、试用阶段,对并联机床的动力学特性及其加工精度影响规律等研究内容还处于不断研究探索和不断完善过程中。

### 2 功能复合型数控机床

机床的分类通常是按工艺的种类来划分,如车、铣、磨、镗、钻等,而数控机床还可用工件的运动轨迹或按伺服机构的控制方式来划分。随着数控机床功能的不断增强,工艺界限逐步被打破,具有复合加工能力的数控机床不断出现。

复合加工机床的主要形式有:(1)以车削功能为主,兼备铣削功能的加工形式,称之为车铣复合加工。

具有车铣复合加工功能的机床一般称之为车铣复合加工中心;(2)以铣削功能为主,兼备车削功能的加工形式,称之为铣车复合加工。具有铣车复合加工功能的机床一般称之为铣车复合加工中心。

奥地利 WFL 公司最早推出车铣复合加工中心系列产品 Mill-Turn,其基本构造为斜床身车床结构、双主轴、双刀架,在刀架上方安装一个铣头,它既可作 X、Y、Z 三向直线轴运动,还可绕 Y 轴作 B 轴回转,并带有刀库及换刀装置,可以完成曲轴等复杂零件的高效加工。铣车复合加工中心的基本结构是在加工中心上增加车削主轴来完成铣-车复合加工,如德国 HAMUEL 公司的 HSTM 系列、瑞士 Willemin-Macodel 的 W408MT 复合单元、瑞士 BUMOTEC 的 S-192FT 铣车复合加工中心等。

### 发展趋势

机床的先进性决定人类的生产效率和劳动生产率,机床工业的水平代表了国家工业发展的水平。《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》提出,“强化基础配套能力,积极发展以数字化、柔性化及系统集成技术为核心的智能制造装备”,其中又以高端数控机床为重中之重。2009 年国家发布了《高档数控机床与基础制造装备重大专项指南》,主要针对中国航空航天、船舶、汽车和发电设备四大行业,确立专项目标到 2020 年四大行业所需要的高档数控机床与基础制造装备 80% 以上要立足国内生产,未来将重点发展方向包括:高速、精密、复合数控金切机床,重型数控金切机床,数控特种加工机床,大型数控成形冲压设备,高档数控系统,数控机床功能部件,数字化工具系统及量仪,等等。

汽车、航空、航天、船舶、能源等行业产品的迅速发展,给数控机床的发展提出了更高的期望和要求。事

实上数控机床的发展不但可以从技术上取得创新,还可以在工业设计、人文传统、环境方便去考虑机床的设计。在提高数控机床性能的同时,亦在考虑功能复合、智能控制、美感造型等。以下几例新形式的数控机床展示了新的发展趋势。

### 1 镜像铣削机床

针对航空工业中的蒙皮加工,法国的 DUFIEUX 公司研制了新型蒙皮加工系统——MMS 蒙皮镜像铣削加工系统<sup>[6]</sup>,以替代传统的化学铣削工艺。该系统的原理如图 6 所示,刀具在蒙皮的加工侧,在蒙皮曲面的另一侧是一个辅助支撑头<sup>[7]</sup>,二者轴线位于蒙皮曲面法线上并镜像对称。在铣刀加工蒙皮时,辅助支撑头沿蒙皮曲面随刀具做镜像对称移动,始终在蒙皮的另一面进行支撑,这样能够很好地解决蒙皮机械铣削时的颤振问题。

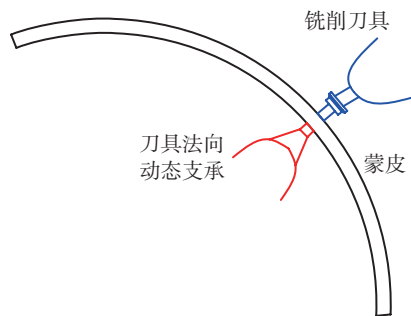


图6 镜像铣削原理

未来,随着控制技术的发展,针对一些传统上不适合数控加工的零部件而开发出的新型机床将越来越多,并且由于控制技术越来越先进,通过新型机床加工出的零部件质量将比传统加工方式加工地更好。

### 2 概念机床

2000 年芝加哥国际机床展览会上,来自日本的 Mazak 展示出一种概念机床<sup>[8]</sup>,并宣告该机床将在公司诞辰 100 周年即 2019 年问世。该机床将机床的实用功能与工业设计、日本的文化以及绿色设计的概念有机结合起来。据介绍,该机床封闭式的加

工环境将不再给环境带来任何噪音、油尘、粉尘等污染,其主要技术指标如表 4 所示。

未来,随着数控技术的不断进步,这种外观设计带有美感造型、文化气息且功能强大的数控机床将会越来越受到人们的喜爱,也会得到研究人员的重视,最终形成数控机床一种新的发展方向。

表4 概念机床参数

Mazak 公司概念机床	
主轴转速	100000r/min
加速度	8g
切削速度	2Mach
工作台转数	8000r/min
联动轴数	6 轴
通信功能	有
自动诊断功能	有

### 结束语

数控机床已经成为机械原理、机构学、控制理论、数值计算、计算机科学综合产物,随着功能部件的不断发展,机床的运动速度、控制方式、运算能力不断提升,机床功能向工艺复合、智能处理方向发展。一直以来,数控机床开发者们梦想着将机器人的灵活性好、工作区域大与传统机床精度、刚性高的优点结合起来,并联机构开始走向实际应用。

制造业中,尽管单台数控机床的能力不断增强,但多台多种类型设备组成的制造系统是解决产品制造的基本途径,在制造系统中,工业机器人在机床上的应用已成为发展的一大趋向。机器人与机床相结合,以往主要是解决工件自动上下料和搬运问题,而现在再配上相关的定位夹具,使数控机床可以实现连续 24h 无人化运转。

本文共有参考文献 8 篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 夏宛)