

# 国产数控机床的技术发展与差距

## Technology Development and Gap of Domestic NC Machine Tool

中国质量协会全国数控设备用户委员会 么炳唐 李永新



么炳唐

教授级高级工程师、中国质量协会全国数控设备用户委员会副理事长兼秘书长、中国机械工程学会高级会员。

编写中国机床工具工业“七五”、“八五”综合科技发展规划及其数控机床、激光加工技术、工业机器人技术、CAD技术等国家重点科技攻关规划。近年来为促进我国数控机床的发展和应,组织实施了数控机床用户满意工程。主要获奖项目有:《七五机床工具产品技术发展政策研究》,获科委技术进步一等奖;《2000年机床工具产品振兴目标》获科委技术进步二等奖、机电部科技进步一等奖。获得全国数控机床用户第三届代表大会授予的“全国数控机床用户协会优秀领导者”奖牌。编著作品9部,翻译作品2部,并参与多项评标工作。

不断追求高质量和高效率是机械制造业研究的永恒主题和目标,是促进其工艺装备发展的源动力。工艺要求和变革是机械制造工艺装备技术发展创新和变革的根据和基础。

国产数控机床走过了50年发展的漫长历程,在近10年来得到了较快发展,特别是得到了政府的重视,设立了重大技术攻关专项,有效地促进了数控机床的发展。目前,国产数控机床可供品种达1500多种,覆盖了数控金属切削机床、数控板材加工机床(数控冲压机床、数控激光加工机床、火焰切割机床等)、数控电加工机床、工业机器人、三坐标测量机等,种类基本齐全。2010年数控金属切削机床保有量约为150万台(其中进口超过40万台),仅金属切削机床的年产量就超过了16万台,2011年1~10月份累计达到21.8万台、全年可达到25万台左右。国产品牌数控机床的数量和价值占国内市场50%以上。在代表先进技术水平在五轴联动和复合加工中心、数控系统和其他配套技术产品方面也都取得了新进展。本文主要围绕数控技术发展

与差距展开讨论。

不断追求高质量和高效率是机械制造业研究的永恒主题和目标,是促进其工艺装备发展的源动力。工艺要求和变革是机械制造工艺装备技术发展创新和变革的根据和基础。

围绕质量、效率和工艺变革的要求,我国机械制造工艺装备——主要是数控设备在技术层面发生了深刻的变化。数控机床功能不断丰富,采用了工序、工艺集中化和复合化技术;机床在结构布局和新材料应用方面都有了新发展;数控技术在开放化、智能化、网络化、高速高精化方面取得了新发展。其目的都是为了提高生产效率,提高精度,保证质量和实现效益最大化。

### 追求高生产率

为了追求机械制造的高生产率,促进数控设备向加工复合化(工序复

合和工艺复合)、高速化、智能化、网络化、工艺参数优化方向发展。

### 1 复合化

数控机床复合加工,主要指工序集中化、复合化和工艺复合化。

#### 1.1 工序集中化、复合化

自从 20 世纪 70 年代末,随着三联动加工中心开始用于机械制造,开始进入机械加工工序集中化时代。20 世纪 80 年代,我国自制的三联动加工中心也开始在机械制造中得到应用,主要是用于箱体件和模具加工。在一次装卡中就可以实现镗、铣、钻、攻丝等多道工序,提高了加工效率和精度。

2000~2011 年是我国数控机床发展最快的时期。在此期间,自主开发了五轴联动加工中心、车铣复合加工中心、车铣磨复合加工中心和磨削复合加工中心等。有的国内制造厂商已经能够提供五轴联动和多轴联动复合加工中心等,但有一些是属于重大专项攻关产品,有待进一步商品化和产业化。

#### 1.1.1 五轴联动加工中心

国内生产五轴联动加工中心的厂家正在不断增加。如沈阳机床厂生产的 GMC2590 $\mu$  桥式五轴联动加工中心、VM22120 $\mu$  立式五轴加工中心、VMC05656e 门式五轴加工中心、HS664RT 五轴高速加工中心;大连机床产生的 VDM500 五轴立式加工中心;北京机电院生产的 XKR32G 五轴联动加工中心和 XKH800 五轴联动叶片加工中心;济南二机床生产的 XV2525 $\times$ 60 高架式五轴联动加工中心等都能实现一次安装完成零件的铣、镗、钻、铰、攻丝等多道工序。

开发五轴联动加工中心有 2 个关键核心部件技术难度较大,一个是双摆角万能加工头(见图 1);一个是双轴回转台(见图 2)。这 2 种部件国内厂商也已开发出来,但有待进一步的完善和商品化。双摆角万能加

工头用于大型机床,双摆轴回转台用于小型机床。目前这 2 种部件都采用直驱力矩电机,并装有编码器,以提高动态性能和精度。

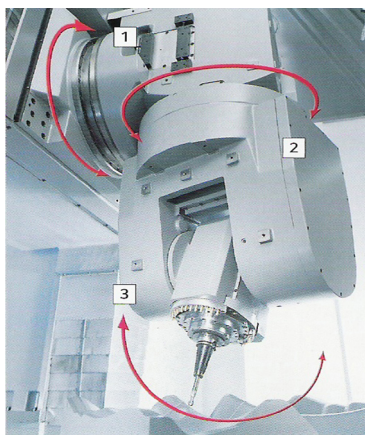


图1 力矩电机直驱的双摆头

双摆角万能加工头技术难度更大一些。国内某厂商开发的一种直驱双摆角万能头的主要参数如下:

额定扭矩: A 轴 500~1000Nm(可选)、C 轴 660~2000Nm(可选);

定位精度:  $\pm 2''$ 、 $\pm 2.5''$ 、 $\pm 3''$ 、 $\pm 5''$ (可选);

绝对编码器分辨率: 26 位、29 位(可选);

摆角范围: A 轴  $\pm 110^\circ$ 、C 轴  $\pm 360^\circ$ 。

我国还没有形成双摆角万能头系列化商品,而国际上像德国

CYTEC 公司可以供应系列化商品。

#### 1.1.2 车铣复合加工中心

车铣复合加工中心既有在数控车床基础上开发出来的,也有在立式加工中心基础上开发出来的。如南京数控机床有限公司生产的 CK1840S 型车铣复合加工中心是在数控车床基础上开发出来的。该机床具有双主轴、双刀架、双 C 轴和 W 轴,共 7 轴,分为二组三联动全闭环控制。其中 C 轴分辨率达到  $0.001^\circ$ 。该机床对回转体零件一次装卡可完成车削、分度偏心钻削、定位铣削等多道工序,即 1 台车铣复合加工中心能完成 2 台数控车床的加工工序,提高效率 1 倍,且因能减少二次安装误差而提高了精度。安阳鑫盛机床股份有限公司生产的 CX110 立式车铣复合加工中心,是在立式加工中心基础上增加车削装置开发出来的。该机床具有车、镗、铣、钻、铰、攻丝等功能,可实现五轴联动的五面加工。此外大连机床开发的 VHT800 五轴联动车铣复合加工中心、CHD25 五轴联动车铣复合加工中心;武汉重型机床集团公司开发的 WHGS7000 车铣复合加工中心等,也都能实现零件一次装卡,完成复杂结构和复杂型面零件的多道工序加工。

#### 1.1.3 车铣磨复合加工中心



图2 高动态性能双轴回转台

宁波海天精工机械有限公司开发的 HTM-V120L 数控立式车铣磨复合加工中心,工件一次装卡可完成车、铣、磨多道工序,还可进行重切削高精度加工,适合用于大型轴承加工。

#### 1.1.4 车铣磨齿轮加工复合中心

有的车削中心在回转刀架上安装了第二主轴和砂轮轴。在第二主轴上也可安装齿轮刀具加工轴齿轮和蜗轮,甚至可以实现五轴联动,用指型铣刀加工弧齿轮和锥齿轮等。

#### 1.1.5 磨削复合加工中心

上海机床厂有限公司开发的 H405-BE 型数控复合磨床,采用西门子数控系统分别控制砂轮架和工作台进给,头架主轴旋转和砂轮架旋转,具有外圆磨削和砂轮架自动分度等功能。一次装卡可完成内外圆和端面自动循环磨削。

#### 1.2 工艺复合

工艺复合加工在国内还不多见。沈阳机床集团 SCHIESS 公司开发的 VTM3501 立式车铣磨及激光淬火复合加工中心。可实现车、镗、钻、攻丝、铣、磨及激光淬火等加工。该机床把冷加工工艺和热加工工艺复合在一起,大幅提高了生产效率。

据有关资料显示,1 台五轴联动加工中心或多工序复合加工中心比三联动加工中心能提高生产效率 1 倍以上。多轴联动和复合加工不但能提高生产效率,而且减少了二次安装误差,提高了精度和质量。国内已经可以生产五轴联动加工中心和多轴联动复合加工中心,但有些属重大攻关产品还有待进一步商品化和产业化。

## 2 高速化

为实现数控加工高速化,传动系统采用直驱技术,数控系统采用高速运算处理技术。

### 2.1 直驱技术

为了提高生产效率,数控机床传动部件逐步采用直驱技术。主轴采

用电主轴直驱,进给采用直线电机驱动,回转工作台采用力矩电机直驱,五轴联动的摆角万能头采用力矩电机直驱等。

早在 2000 年以前,我国就开始了直驱技术的研究与开发。目前山东博特精工股份有限公司和洛轴研科技股份有限公司都能生产和供应电主轴系列产品,北京首科凯奇电气技术有限公司也开发了直线电机。用户对以上产品性能和技术指标反应良好,但与国外先进水平相比还有差距。

目前,国外先进的电主轴单元转速可达 15000~100000r/min,一般的用到 40000~50000r/min 的较多。采用直线电机直驱的进给部件既要求速度高,还要求有高的加减速功能。快速移动速度可达 60~200m/min,加速度达 2g~10g;工作进给可高达 60m/min 以上,加速度达 1g~2g。采用传统的滚珠丝杠传动的进给部件的进给速度为 20~30m/min,加速度为 0.1g~0.3g;一般情况下,进给速度为 30m/min 左右。直驱比用滚珠丝杠驱动的进给速度提高了 1 倍以上,从而减少了辅助时间,提高了生产效率。直线电机驱动技术有着广阔的应用前景,但还需进一步降低成本和解决发热问题。

目前,我国一些厂家开发的数控机床已采用了直驱技术。如济南二机床开发的 XHV2525×60 高架式五轴联动高速镗铣加工中心,x、y 轴采用了直线电机驱动。北京机电院开发的 XKR32G 五轴联动加工中心工作台的 2 个回转轴采用力矩电机直驱,XKH800 五轴联动叶片加工中心的主轴采用电主轴直驱等。国内数控机床采用直驱技术还处于初级阶段,还不普遍,在性能方面还存在一定差距。而德国 DMG 公司每年生产的数控机床中有 1500 多台采用了直驱技术。德国巨浪公司生产的 FZ12KS 五轴加工中心,主轴转速达

40000r/min,换刀时间低于 0.6s,进给加速度达 1g~2g,快速进给速度可达 90m/min,工件交换时间为 2s。

### 2.2 数控系统高速运算处理技术

高速直驱进给要求数控系统运算速度快,采样周期短,具有足够的超前路径加(减)速优化程序段预处理能力。较先进的数控系统可预处理几千和几万个程序段。在多轴联动控制时可根据预处理缓冲区的 G 代码进行加减速优化处理。为保证加工速度,第六代数控系统每秒可进行 2000~10000 次进给速度改变。

## 3 智能化

为追求数控机床加工效率和加工质量,数控系统不但有自动编程、前馈控制、模糊控制、自学习控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿等智能化功能,并有故障诊断专家系统,使自诊断和故障监控功能更趋于完善。伺服驱动系统智能化,能自动感知负载变化,自动优化调整参数。

国产数控系统正在努力朝智能化方向发展,引入了一些智能化技术。比如中华的“中华 8 型”和凯恩帝 K1000TIV 型等,数控系统都具有自诊断功能、状态实时显示和故障实时报警等智能化功能,并都在进一步丰富和完善智能化技术。

国外如西门子、发那科、三菱生产的数控系统融入的智能化技术更为丰富。国产数控系统与之相比还有不少差距。如西门子的 SINUMERIK828D BASICM 具有圆柱形零件加工智能坐标转换功能,具有 SINUMERIK MDynamics 工艺包,含有全部“精优曲面”功能,可以实现高效加工和获得加工最佳表面质量。发那科的 Oi-D 和 OiDMate 具有有轮廓智能控制功能、30i/31i/32i/35i-MODEL B 系列数控系统是最新的人工智能纳米级系统,能灵活地支持镗铣加工中心、数控车床多轴联动复合加工机床等。智能化技术对于提高

数控加工机床生产效率有极大的贡献率,必须重视。

#### 4 开放化和网络化

数控装置的开放化可以更容易地实现智能化网络化制造,有效地促进生产效率的提高。

##### 4.1 开放化

开放式数控装置是指硬件、软件和总线对用户是开放的。开放式数控装置最主要的优点是具有更好的通用性、灵活性、适应性和可扩展性,可以满足用户二次开发的要求。

##### 4.1.1 NC 和 CNC 概念及开放化

目前,数控装置主要有 NC 和 CNC 2 种。由硬件逻辑电路组成的数控装置被称为 NC 装置;由计算机硬件和软件共同组成的数控装置被称为 CNC 数控装置。硬件是软件运行的物理基础,软件是整个 CNC 运行和功能实现的灵魂。NC 正逐步被 CNC 所取代。

CNC 数控装置硬件除具有 CPU、EPROM、RAM 外,还有位置控制器、手动输入(MDA)接口、显示(CRT)接口和 PLC 接口等,因此 CNC 数控装置是一种专用计算机。

CNC 软件分为管理软件和控制软件 2 种。管理软件用于管理零件程序的输入输出、刀具位置系统参数、零件程序显示、机床状态故障诊断及报警等。控制软件由译码、插补、运算、刀具补偿、速度控制、位置控制等软件组成。

现代开放式数控装置主要是在 PC 机平台上开发的 CNC 数控装置。我国“华中 8 型”数控装置采用了基于多处理器的开放式软硬件体系结构和自主创新的总线技术。硬件跨平台,软件可以置换,具有软硬件多层次开放功能。北京凯恩帝的 K1000TIV 数控装置采用开放式 PLC,提供调试软件支持用户二次开发。广州数控的 GSK25i 数控装置也采用了开放式 PLC,支持 PLC 梯形图在线编辑、诊断及信号跟踪功能。

##### 4.1.2 标准与规范

能否实现数控装置的开放化与建立技术标准和规范密切相关。数控技术诞生 50 多年来,信息交换都是基于 ISO6983 标准,即采用 G、M 代码描述如何加工。显然,该标准越来越不能满足现代数控技术高速发展的要求。

欧美和日本等国家在 20 世纪 90 年代就开始研究制定了开放式数控装置的体系结构规范(OMAC、OSACA、OSEC),开发了开放式数控装置并作为发展战略。我国于 2000 年也开始研究并制定了开放式数控装置规范框架,但还很不完善。

##### 4.2 网络化

网络化有利于信息共享和提高生产效率。有资料介绍在多品种小批量生产中,1 台数控机床用于切削的时间只占机动时间的 25%~35%,联成网络后,可以提高到 60%~65%。

数控的网络化技术,主要是指数控系统与外部的其他控制系统或上位机进行网络连接和网络控制。数控系统首先面向企业内部局域网,然后再经因特网向企业外部传输。这就是所谓的 Internet/Intranet。网络可使企业与企业之间进行跨地区协同设计、协同制造、信息共享、远程监控、远程诊断和服务等。网络能为制造提供完整的生产数据信息,可以通过网络将加工程序传给远方的机床进行加工,也可远程诊断并发出指令调整。网络使各地分散数控机床联系在一起,互相协调,统一优化调整,使产品加工不局限于一个工厂内而实现社会化生产。

我国的机械制造企业信息化集成的发展也比较快,实现了车间级和企业级信息网络集成。数控的网络化发展前景广阔,但真正实现跨企业、跨地区的信息化网路还有很长的路要走。

#### 5 优化工艺参数提高效率

数控加工采用的工艺参数是否

合理,对于提高生产效率和保证加工质量非常重要,必须逐步进行优化并建立工艺数据库。

优化工艺参数有 2 种方法。一种是通过实际试切来选择合理的工艺参数,费时、费力、费材料;另一种方法是应用力学动态优化仿真方法,比第一种方法省时、省力、省材料,同样可以获得较合理的工艺参数。在生产实践中,还可以对这些参数进行合理的调整。

航空行业是数控机床的大用户,对优化工艺参数、建立工艺数据库,并应用到生产实践中有急切的需求。因此,由政府支持组织北京航空航天大学和中航工业北京航空制造工程研究所开展优化工艺参数技术攻关。以上单位开发了一整套工艺参数力学动态优化仿真、预测和数字化软硬件系统,建立了优化工艺参数数据库,形成了优化高速切削工艺参数手册,从根本上实现了工艺参数选择从试切到仿真的跨越,提高了加工效率和质量。这是一项意义重大而又深远的工作。

陕西飞机制造公司在近 100 项零件加工上应用了优化的工艺参数,平均加工效率提高了 2 倍以上;望江工业有限公司在火炮零件加工中采用优化工艺参数,效率提高了 4 倍以上;昌河飞机工业(集团)公司采用优化工艺参数加工铝合金零件,效率提高了 2.8 倍以上。

西门子 828D 数控系统具有动态工艺包(Dynamics),含有全新的“精优曲面”功能,可以实现高效加工并获得最佳表面质量。

我国数控设备生产企业也应该提供这方面的技术和服。采用工艺优化参数不但可以提高生产效率和提高加工质量,而且对节省材料、节能减排,实现绿色制造有着重要意义。

#### 追求高精度高质量

追求数控机床加工工件的高精

度和高质量。首先数控机床本身必须具有这样的性能。为此,数控机床在结构和布局上,在材料选用上必须考虑到提高刚性和承载能力,以保证实现高精度;同时数控系统、伺服驱动系统、传动系统和测量传感器等也必须具有高分辨率、高精度的性能,才能满足加工工件高精度、高质量的要求。

### 1 结构布局

为了实现功能和提高刚性,数控车床、车削中心、立式加工中心、卧式加工中心、龙门加工中心、车铣复合加工中心等在结构布局方面发生了深刻变化。

例如,国内有些厂家生产的立式加工中心和卧式加工中心,横向坐标采用立柱移动,这样减少了一层工作台(传统结构是双层十字工作台),提高了工作台的刚性和承载能力;龙门加工中心从工作台不动、双立柱移动发展成桥式结构,即工作台固定,2个立柱做成固定式墙体,在墙体上面装有导轨,横梁在导轨上做纵向运动。这种结构减少了运动部件的质量和运动惯性,有利于准定位,减少了占地面积。

沈阳机床生产的GMC2590 $\mu$ 桥式五轴加工中心、济南二机床生产的XHV2525 $\times$ 60高架式五轴联动高速镗铣加工中心、台湾亚太菁英(股份)公司生产的跨轨式高速龙门加工中心,都采用了桥架式龙门框架结构。该结构布局合理、刚性好、承载能力强、受力均匀、热平衡性好、精度稳定、占地面积小。典型结构布局形式如图3所示。

### 2 采用新材料提高刚性

用于数控机床的优质新材料的开发与应用,有利于提高数控机床整体刚性和精度,非常重要。

例如,宁波海天精工机械有限公司在生产的HTM-V120L数控立式车铣磨加工中心上采用了90%花岗岩成分聚合浇铸的床身。据该厂介

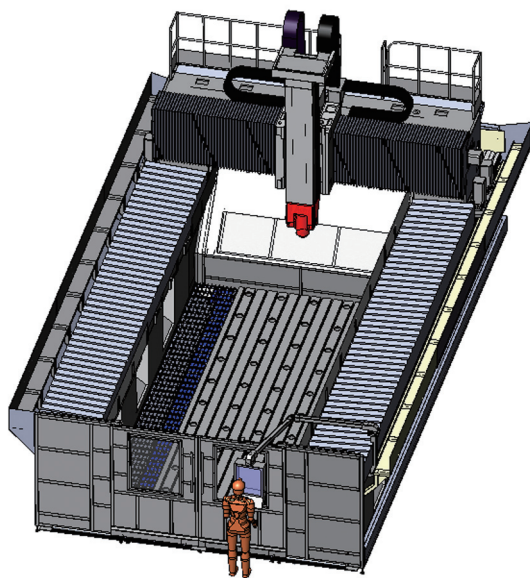


图3 高架桥式龙门加工中心结构布局图

绍,该材料制成的床身比一般铸铁床身抗震强度增加10倍。

又如,大连科德公司在生产的TG-45型六轴(或五轴)联动数控刀具磨床的底座采用了人造石材。

据称以上2家企业应用了这两种新材料,因其具有吸震性好、稳定性好、耐磨等特点,为提高和保持机床精度提供了保证。

此外,还有资料显示,蜂窝状材料、水泥材料、天然花岗岩石材等也有用于数控设备的情况。重视新型材料的开发与应用,必然使机床结构设计和性能发生变革。

### 3 高精度插补数控系统

高位数CPU(64位)在数控装置上的应用,高速纳米级插补运算、高分辨率伺服等功能为提高数控机床精度做出重要贡献。

在数控机床上应用的CPU,从20世纪80年代的16位发展到现在的64位,其频率也从原来的5MHZ、10MHZ提高到上千MHZ。CPU的发展进一步提高了运算速度和分辨率(0.1 $\mu$ m、0.01 $\mu$ m)。国产数控系统开始采用64位CPU,可实现微米级精度插补,但与国外先进数控系统相比还有距离。

例如,发那科30i/31i/32i/35i B系列数控系统、三菱M700V数控系统、西门子的828D数控系统为都是纳米级插补或纳米级运算精度。

实现纳米级精度插补,伺服驱动系统控制分辨率和响应能力是非常关键的。为此,在驱动单元之中伺服电机轴上安装高精度传感器(16 $\times$ 10<sup>6</sup>线/转),在闭环系统中采用高分辨率(1 $\mu$ m)的光栅尺,可使小型数控机床的运动部

件定位精度达到2~3 $\mu$ m。一般情况下,国产小型数控机床还达不到这样的水平。

### 结束语

只有组成数控设备的各种部件(包括软硬件)技术都卓越,整体综合性能才能卓越,才能实现加工的高生产率、高精度、高质量。而且,每个部件都有保证生产效率和质量的功能,只是贡献率不同而已。本文只介绍了数控技术发展的几个重要方面,不够全面。

要特别强调的是,今后要特别重视新工艺的研究与创新,从而促进数控产品的创新;要特别重视数控加工工艺参数的优化和建立数据库的工作,以提高生产效率和加工质量。要特别重视新材料的研究与应用,以提高数控机床性能;要特别重视数控技术的智能化网络化技术的开发与应用,其前景广阔。

以上强调的4个特别,政府应大力支持,数控设备生产企业和机械制造企业应特别重视,不懈地努力工作,使我国数控机床技术发展从跟随变为领跑。

(责编 夏宛)