

# 未来机床制造业发展探析

## Resolve of Development of Future Machine Tool Manufacturing

北京机床研究所 黄韶娟 盛伯浩



黄韶娟

北京机床研究所副总工程师、教授级高工,从事机械设计与制造相关的科研工作。主持和参加过北京市科技计划、科技部专项、国家科技攻关及国家“863”等项目,多次获得机械工业科技进步奖,2009年获国务院颁发的政府特殊津贴。

作为工具机的机床,其发展目标是为了各机械制造产业提供具有更优异的加工精度、更高的生产效率、更稳定的可靠性、更持久的精度寿命和更节能环保制造过程的高性能加工设备。我国机床产业发展的主导模式从注重产量和价格优势向构建产品创新和品质方向发展。创新将基于新加工工艺方法的研究、机床结

构性能试验和关键件制造的精巧工艺,而优良的品质将得益于精益制造的实施和可靠性及精度保持性的测评与控制。

构性能试验和关键件制造的精巧工艺,而优良的品质将得益于精益制造的实施和可靠性及精度保持性的测评与控制。

### 数控机床技术的演进

随着数控机床的诞生和成功应用,数控机床成为柔性自动化和高精加工的有效制造平台而进入全面发展时期。飞速发展的航空航天、汽车、高速铁路、船舶、工程机械、模具等先进制造业,对数控机床提出了更高的要求,进一步推动了数控机床技术的发展。数控系统技术的突破更为数控机床的进步提供了条件。

#### 1 20世纪50~70年代,电子元器件快速发展

1952年美国麻省理工学院研制出世界上第一台数控机床,它是由电子管组成的数控装置和液压伺服马达驱动三轴数控铣床。1964年美国通用电气公司推出了晶体管化的

数控装置。这一时期的数值控制技术主要有两类:以计算机为支撑对运动全过程伺服控制的计算机数控机床;以及对工序设定的起动、停止位置进行控制的顺序控制机床。

1958年,由清华大学和北京第一机床厂合作研制出我国第一台电子管电路控制系统的数控立式升降台铣床,标志着我国从此踏上了数控机床研制的道路。

#### 2 20世纪70~90年代,数控系统进一步完善

20世纪70年代,计算机技术经历了大规模集成电路到小型计算机再到微处理器技术的突破过程,具有较完善的功能和较低成本的数控装置,可以与插补单元、可编程控制器(PLC)等集成为计算机数控系统(CNC)。

20世纪80年代开始,多品种、小批量零件高效生产的柔性制造单元(FMC)和柔性制造系统(FMS)得

到成功应用与发展。进入 20 世纪 90 年代,由高效、精密数控机床为主体组成的柔性生产线(FML)成为汽车等行业大批量生产的主要制造设备。同时,发展出以信息集成为监控管理基础构建的各类数控机床集群,规模较大的形成自动化工厂,标志着数控机床技术进入成熟阶段。

### 3 21 世纪,智能化技术成为主流

智能化技术是对数控技术的提升,也是在当今数字控制技术基础上向更高阶段发展的方向。智能化可提升数控机床的功能和品质,使加工更优、更快、更灵巧。这个时期数控机床技术进入了复合化、精细化、智能化、绿色化、网络化,并向敏捷制造与虚拟制造技术相结合的更高阶段迈进。

## 世界制造强国重视机床制造业

机床是工业母机,是制造机器的机器,其发展程度直接制约着国家制造业水平的高低。无论是飞机、轮船、火箭、卫星还是汽车、电子产品、医疗器械等,所有机械设备的主要零件都分别由机床加工制造出来。尽管机床行业本身的产值在国民经济中所占的比重并不高,但美国、日本、德国等发达国家均将其列为本国的战略产业,通过各种法律法规和政策予以保护、扶持。

### 1 日本——经济适用,追求利润

“二战”后的日本为加速经济腾飞,制定了振兴机械工业的《机械工业振兴临时措施法》、《振兴特定电子工业及特定机械工业临时措施法》及《特定机械情报产业振兴临时措施法》等“特别措施法案”,着眼于扶持企业核心竞争力,加强创新设计方法、基础制造工艺、试验测试规范等共性技术的研究,为企业建立“造血”功能。为了振兴计算机硬件和软件产业,扶持汽车产业的发展,日本制定了《振兴特定信息产业临时措施

法》,在为机械信息产业立法的同时,增加了相应的国家补贴和财政补贴等,为企业的发展提供了大量的资金。这些政策以基础机械、通用零部件和出口机械等产品为振兴对象,并通过资本借贷、进口许可及税收优惠等政策,托起了一个在国际上极具竞争力的机床制造业,在日本机床产业的发展过程中发挥了重要的作用。

在政府的引导下,日本机床业走出了一条“引进—模仿—创新”的发展之路。注重团队精神和技术积累,重视基础元器件和功能部件技术,以汽车、电子等产业所需要的中高档数控机床为主要目标,突出应用创新,利用先进的制造设备和管理手段,追求精益求精的产品品质,大量占领市场。1989 年,日本发起了“智能制造系统”国际合作计划,对下一代制造系统和智能制造装备等进行前期技术研究,对自动化技术和智能化技术的先知先觉,使日本的数控技术快速发展,进而促进机床行业走向世界制高点。

日本政府还通过加大对钢铁、汽车、航空、造船、模具、电子和核电等制造企业的额外资本投入,刺激了对机床的需求,从而促进企业对机床产品的采购。既有助于机床行业的发展,更新的现代化生产设备也增强了企业市场竞争力。

### 2 美国——服务国防,高端先进

美国历届政府都十分重视机床工业,由于国防部门、航空航天工业、汽车工业、模具、建筑和医疗设备等行业不断对机床发展提出新的需求,由政府提供充足的经费,组织引导科研单位和企业间的有效合作,组织用户推广使用新产品,推进科研进一步深化。注重基础技术创新研究,追求更高的加工效率、可靠性和环保要求,推动机床技术的不断进步。

国际金融危机发生后,美国、欧盟国家为代表的发达国家纷纷提出“再工业化”战略。2009 年奥巴马政

府提出《重振美国制造业框架》,从国家战略层面提出了加快创新、促进美国先进制造业发展的具体建议和措施,要求确保美国在先进制造业的领先地位。并先后在 2010 年发布和签署了《制造业发展战略:创造就业机会,提升美国竞争力》、《美国制造业促进法案》,消减了部分进口生产原材料的关税,对机床产业的主要制造设备延长了免税期,降低企业的制造成本,有助于提高其市场竞争力,刺激出口。2011 年启动“先进制造伙伴关系”计划,聚合工业界、高校和联邦政府为信息技术、生物技术、纳米技术、3D 打印技术等新兴技术进行投资,建设智能制造平台,帮助美国的制造商降低成本、提高品质、加快产品研发速度,从而提供良好的就业机会。2012 年实施的“先进制造业国家战略计划”是对美国“再工业化”战略的贯彻落实,根据美国竞争法规定提供充足资金,奖励技术创新、新产品研发和目标发展技术攻关,成为美国保持先进制造业领先的行动纲领。

为保护美国本国的数控机床产业,美国政府会适时对其竞争力情况进行国家干预,如通过总统国内行动计划,根据 1962 年《贸易发展法案》,对数控机床的进口采取数量上的配额限制等。

由于美国人工成本相对较高,对环境保护有严格的监督,机床用户要求机床性能更灵活,自动化程度更高,并符合苛刻的环保要求。国防工业的高要求使智能化、高速化、精密化成为美国机床业发展的主流;计算机及网络技术的领先发展,使制造过程科学管理、远程监控与诊断、在线设备维护与故障排除等成为可能,客观上支撑了美国机床工业的高端发展。

### 3 欧盟——以德国为代表,精益求精,服务全球

欧盟对数控机床工业的发展十

分重视,为提高其竞争力,欧共体资助由欧洲机床协会、制造厂家、科研院所、最终用户和银行等联合组成研究队伍,进行“下一代生产系统”的研究,推行“未来的工厂”计划。2009年在《欧洲2020智慧、可持续、包容增长战略》中提出,重点发展信息、节能、新能源和以智能化为代表的先进制造业。2010年推出“欧洲2020战略”,将欧盟转型进入一个智能化、可持续发展以及具有包容性的高就业率、生产率和社会凝聚力的新经济战略模式,促进共同发展。在“地平线2020”计划中,倡导“打造资源节约型欧洲”,投巨资支持科技创新,并致力于科技成果可被大众“公开获取”,以促进知识传播和提高欧盟整体创新能力。这些政策的实施对各国机床行业发展起到了巨大的推动作用。

欧盟还力推生态化设计,由环保产品生命周期管理(Environmental Product Lifecycle Management)组织公布了《最佳环境实践手册》,其中面向机床工业部分,为机床设计者提供了一系列具体的指导方针和实用的设计规则,包括设计阶段、制造和装配阶段以及使用阶段,强调从能耗、安全性、振动等方面根据相应的生态标准改善机床设计,从而使得不同类型机床的设计和使用变得更加环保。

德国机床工业倡导的“蓝色竞争力”对节能机床制定专门的标准,提出节能的理念不仅涉及本体机床,还应借助客户和供应商的力量去提高整个产销过程的能源效率,体现了工业生产的可持续性发展思路。

德国政府始终认为机床工业是整个机器制造业中最重要、最活跃、最具创造力的战略性行业。在工业化大发展时期,德国政府立足于自己制造和应用机床,并建立了首个机床实验室,不断进行机床结构对比试验并加以改进。为满足大重型机械加工需求,逐步建立了世界重型机床生

产基地,为全球提供重型机床、大型精密机床以及数控精密机床等。第二次世界大战后,德国政府全力加强机床工业的发展,如制订机床精度标准,更新产品结构,将传统技术与现代电子技术相结合,注重与主机配套的基础零部件、光学元器件、刀具、数控系统等功能部件的专业性研究,诞生了许多全球著名的企业和产品。以重工业、汽车和机械制造、化工、电气等作为支柱产业,成为机床工业创新发展的不竭源泉。

德国政府特别强调知识产权的保护,启动机械设备制造企业专有技术(Know-How)保护计划,重点保护创新程度高的世界市场领先企业。

### 我国机床制造业技术的发展

当前,振兴装备制造业已经成为国家的重大发展战略,国家为包括数控机床产业在内的装备制造业振兴提供了良好的政策环境。发布了《国务院关于加速振兴装备制造业的若干意见》,制定了《数控机床发展规划》,对机床产业的发展提出了具体要求。

2009年启动“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项,以史无前例的持续投资,助推了企业自主创新、高端产品研发和中高端产品产业化进程,彰显了政府对于发展高档数控机床与基础制造装备的决心。

2013年5月30日,国务院发布了《“十二五”国家自主创新能力建设规划》。集聚、整合机床制造业基础工艺、基础材料、基础元器件、关键零部件和软件系统等各产业链各环节的创新资源,加强制造业共性技术创新平台建设。完善和提升产业技术创新、检测检验和系统验证服务等平台,提高重大成套技术装备开发能力。加强生产过程智能化和生产装备数字化应用示范,提升集散控制、数字控制等自动化和信息化技术集成创新能力,推动工业化和信息化深

度融合。

在国家重大专项的支持下,国内高档数控机床在高速切削技术、难加工材料超高速磨削技术等很多重大技术方面实现了突破,制造出龙门五轴联动车铣复合机床、超重型数控卧式镗铣床、精密立式加工中心等一批标志性的重大设备,有效地打破了国外技术封锁和市场垄断。

现在的中国的机床行业,已由为中国汽车产业提供单机配套向提供整条生产线服务过渡。如轿车齿轮生产线、汽车缸体生产线、油缸生产线、盘套类零件生产线、数控冲孔柔性加工生产线、曲轴零件生产线、汽车刹车盘生产线、大型汽车覆盖件冲压生产线等,无论在技术水平还是应用服务方面都进步很大。如LED灯的使用、变频技术、减少润滑油用量、减少待机耗电、油水分离等技术都已成熟应用。

精密制造一直是全球机床业不懈追求的目标。纳米级数控系统与伺服驱动、纳米级测量与反馈补偿、高速高精度轨迹控制、高刚度高动态驱动、高刚度低惯量结构设计、高精度主轴、抑振、温控等先进技术已经在机床上得到了较广泛应用,越来越多的机床加工精度达到微米级,甚至进入纳米级的研究。

北京机床研究所利用具有自主知识产权的核心技术,研制生产的SPHERE200超精密球面镜加工机床,适用于陀螺仪等有批量生产要求的薄壁及实心球面镜的加工。长期以来这种机床受制于国外严密的技术封锁,机床研制成功后,不仅使用用户的加工技术增进,而且有助于企业产品结构战略转型和升级。 $\mu$ 2000/5ss-800H五轴摆头加工中心,适合五轴或五面零件的加工,主要用于发动机燃烧机匣机体等零件的小批量高精度加工,加工性能稳定、工艺方式先进,具有较高的精度和通用性。在支撑企业提高核心竞

争力的同时,为我国提升现代化建设基础实力,打破国际垄断,实现自主创新做出了贡献。

## 机床制造业发展展望

品种多样化与品质优异化是机床发展的总体目标。为满足用户对数控机床性能要求越来越高和加工产品多样化的要求,数控机床应以高刚性设计为基础,推广模块化设计,并针对用户不同需求进行专门化设计。针对机床可靠性和精度要求的提升,除完善设计外,很大一部分要加强元器件的耐久性以及制造和装配质量。应强化过程质量控制,规范装配和调试流程,提高产品出厂验收要求。重视整机和部件试验技术,进行可靠性测评,对设计标准及制造和试验规范的内涵要做得更细致和可量化。保证制造过程质量和精度的一致性对提升数控机床的稳定性能是非常重要的。发展绿色设计、绿色制造技术,注重经济效益和社会效益共同提高。

### 1 机床智能化——提高加工效率、精度、可靠性和精度保持性

机床智能化可以提升产品的性能及技术附加值,提高产品使用安全性。机床的智能化还可提高生产效率及精密加工的稳定性和可靠性,使加工更优、更快、更灵巧。同时,也是有效地提高能源和原材料的利用率、降低污染排放水平的技术保障。

数控机床的出现首先以信息控制替代了人工操作,并逐步形成具有智能特征的机电一体化的产品。20世纪90年代智能技术已初露端倪,但尚局限于状态平稳调整的优化控制方面,如同服系统的PID预测控制和进给运动的前瞻控制等,故称之为运动参数的自适应控制。21世纪初,针对一些机床的性能和功能的执行机构,发展对静力、动力和热力特性自动进行调整的约束型智能控制。

未来机床智能化主要包括:

(1) 自适应控制功能。综合修正加工特性以适应现实动态特性的变化,使加工性能指标达到最优。

(2) 误差补偿智能控制功能。对机床热变形和空间位置误差进行综合补偿,可将加工误差减少60%~80%。

(3) 运动轨迹优化控制功能。采用前馈控制及非线性控制等方法,提高运动精度。通过仿真预测机床的加工精度,使其性能长期稳定,保证零件的加工质量。

(4) 工艺参数的自动生成功能。给定加工件后,按照工艺流程,机床自动选择参数自动编排和优化加工程序,以最短时间达到最佳的加工质量,从而提高加工效率。

(5) 抑制振动功能。根据主轴切削负荷给以进给量响应,保证最大加工效率和最佳加工质量。

(6) 刀具和工件保护功能。根据刀具负荷和切削工况调整加工参数,并防止刀具和工件发生碰撞。

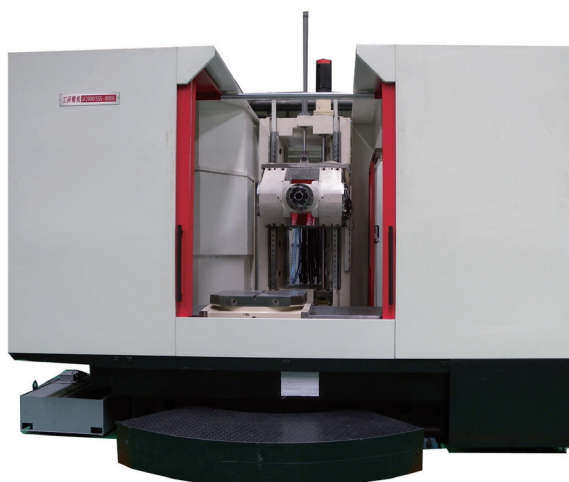
(7) 润滑油冷却液监测功能。根据噪音、温升及流量等数据变化,自动补充润滑油和冷却液等。

(8) 故障远程诊断功能。降低维护成本,提高机床使用率。

(9) 专家系统和人工神经网络。具有逻辑推理、模式联想及自学习等智能决策能力。

### 2 机床复合化——针对加工零件特点,配置机床结构

复合机床是在一台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的全部加工。复合机床具有良好的工艺适用性,避免了在制品的储存和传输等环节及多次安装引起的安装误差,成为一种提高生产率和加工精度更稳定的新型结构高效机床。机器人技术和产品的广泛应用,不仅用于搬运、焊接等独立工位,而且进入机床上下料、换刀、测量等工位,大大提高



μ 2000 5ss-800H五轴摆头加工中心

了数控机床的工作效率。

未来机床的复合化技术主要有:

(1) 车削及磨削加工技术。可对齿轮和类似工件的内孔、端面、锥面进行硬车和磨削。

(2) 超声振动切削技术。给切削刀具施加超高频激振频率,用于加工硬脆材料,可大幅提高切削效率。

(3) 磨削及放电加工技术。适合金刚石等工具的高效高精度加工。

(4) 珩磨及激光加工技术。装在珩磨头上的激光器,对零件珩磨内壁表面进行强化加工,并强制形成润滑油腔,提高珩磨质量和效率。

复合化是基于零件加工工序的需求,因此适用的复合机床必然是从分析典型零件的工艺入手,要有明确的针对性,才能使复合机床具有生命力。同时,需要进一步探索发展可重构技术在复合机床上的应用,它将能扩大复合机床在批量生产条件下应用的经济性。通过对机床布局和结构的创新,使不同类型零件加工具有最佳的适用性,从而避免通用机床在批量生产条件下出现不能发挥最佳性能及存在功能冗余现象的问题。

解决品种多样化与经济性的矛盾,对复合机床的模块化设计提出更高的要求。近年来对并联机构机床和混联机构机床的研究以及对可重构机床技术的探索,反映了对制造装

备能更方便地实现个性化、多样化发展的一个追求。

### 3 机床专门化——采用新工艺和新系统技术,提高加工质量和效率

未来工艺适用性的专门化数控机床将在高效率、多品种、批量生产领域不断涌现。兼顾柔性、高效、低成本和高质量且便于重构的新型制造系统——快速重组制造系统可适应不确定性的市场环境。其原理为通过对制造系统中设备配置的调整或更换设备上的功能模块来迅速构成适应新工艺要求的制造系统。这不仅要求软件具有开放性,硬件也要开放成为功能可重构的机床。

柔性、伺服 CNC 数控控制在成形压力加工领域的发展将使全净成形的坯件轻量化,可减少加工过程中的材料和工时消耗,减少污染物排放。精锻成形和精铸成形可大幅提高材料利用率。塑性成形技术大多在室温下实施,减少了零件生产过程中的能量消耗,提高了内在品质。零件成形后不需要加工或者很少的加工,减少加工工时,实现节能、降耗的目标。

增材制造成形(3D 打印)技术,满足结构复杂、传统方式难以生产的高附加值零部件制造的要求,降低新产品推出的周期。

数控系统采用前置反馈、前馈控制、跃度平稳控制和高响应矢量滤波抑振(HRV)控制技术,用以抑制因高速运动所引起的跟踪误差和系统振动等不良后果,以实现高速高效。

新加工方法的探索包括先进切削方法、新的成形方法和新的加工原理 3 方面。根据零件多工序加工特点,采用复合刀具和整体成形刀具在批量生产和专用机床上的应用,将车、钻、镗、攻、扩、铰等工艺合并,大大提高了设备利用率。由于一次加工便得到所需的几何形状和尺寸,节省了工件装卸及刀具调整时间,减少了过程误差,提高了零件加工效率和

加工精度。

新型的快速点磨削成形技术具有磨削区域小、磨削力小、砂轮使用寿命长、磨削温度低、冷却简单等特点,实现了绿色制造。

新的加工原理如基于电化学阳极溶解的原理来去除金属材料,无宏观切削力,对工具阴极无损耗,适宜加工压气机末端高温区的合金和钛合金变截面扭曲叶片的高难度整体涡轮叶盘及叶片加工,用电解加工工艺取代高速铣削及五轴电火花加工。

### 4 机床绿色化——全生命周期管理,保护地球

未来机床以发展高效、节约资源、减少机床制造和应用时对环境的污染为技术核心。采用干切削和微量润滑技术可以节省成本,提高加工效率和表面质量,促进机床的绿色化。

对于汽车生产线等切削载荷较大的场合,切削液具有较好的冷却切削区和冲刷切屑的作用,通过切削液循环系统增加清除液膜破裂排出的油滴和补充乳化剂来提高切削液使用寿命,并添置切屑挤压成块和排清残液的装置,可最大限度减少对环境污染的影响。

绿色设计是机床绿色化的首要环节,包括机床轻型结构设计、绿色材料选择、绿色制造工艺规划、可拆卸和易维护性结构方式、包装运输简便性和回收利用处理方案等。在不牺牲产品功能、质量和不增加成本的前提下,充分考虑产品开发、制造和使用过程中对资源的消耗和对环境的影响,为保证绿色设计的有效性,在设计方案完成后应对资源消耗和环境影响进行综合评价。

机床再制造是机床绿色化的延伸,再制造产品在功能、性能、环保性、经济性等方面不低于新产品,但其制造成本低,能源消耗少,材料剪用率高,对环境的不良影响显著降低。

### 5 机床极端化——为重点工程和

### 国防安全服务

未来机床将向大型化和微小化两极发展。

船舶、能源装备、国防科技及航空航天事业的发展,急需大重型机床加工。光学镜面、导光板模具、医疗器械零件等精密微细加工的产业,需要能适应微小型尺寸结构和微纳米加工的高精度新型制造工艺和装备,从而形成了机床向大型化和微小化两极发展的趋势。由于晶片和光学镜片等硬脆材料加工的需要,超精密磨削和研抛以及非机械能的特种加工方法的设备将进一步发展。

### 结束语

金属切削机床总体上一直沿着加工精度与效率提升和人工智能优化控制相结合的方向发展,以实现智能化的集约制造技术。随着集成电路、光学元器件等微细加工要求以及新型难加工材料的加工需要,探求激光、高能电子束等微纳米制造的新型加工能源的加工装备,也将不断的深化发展。

金属成形加工机床也同样在高效基础上向精密化、柔性化方向发展。CNC 控制技术正在改变传统的冲压与模具的单一成形方式,如同服压力机、点碾成形机、内高压成形机及当前正在兴起的增材制造设备等,正在促进成形加工进一步向精化、省材和节能方向发展

### 参考文献

- [1] 丁雪生. 金切机床复合化技术的发展. 制造技术与机床, 2004(2):27-33.
- [2] 中国机经网. 埃马克实现利用电解加工完全取代高速铣削的加工 [EB/OL]. [2012-12-05]. <http://www.mei.net.cn/jcgcj/201212/466442.html>.
- [3] 周鹏, 屈贤明. 我国发展机床绿色制造的四个途径. 中国制造业信息化, 2012(4): 14-16.
- [3] 盛伯浩, 黄韶娟, 赵宏林. 中国战略性新兴产业研究与发展·数控机床. 北京: 机械工业出版社, 2013. (责编 深蓝)