

数控机床的现状与发展

盛伯浩

(北京机床研究所)

0 前言

进入 21 世纪,我国机床制造业既面临着提升机械制造业水平的需求而引发的制造装备发展的良机,也遭遇到加入 WTO 后激烈的市场竞争的压力。从技术层面上来讲,加速推进数控技术将是解决机床制造业持续发展的一个关键。

数控机床及由数控机床组成的制造系统是改造传统产业、构建数字化企业的重要基础装备,它的发展一直备受人们关注。数控机床以其卓越的柔性自动化的性能、优异而稳定的精度、灵捷而多样化的功能引起世人瞩目,它开创了机械产品向机电一体化发展的先河,因此数控技术成为先进制造技术中的一项核心技术。另一方面,通过持续的研究,信息技术的深化应用促进了数控机床的进一步提升。

本文将着重于剖析数控技术的现状及动向,从中窥探机床制造业的发展趋势。

1 现代数控机床的两个基本评定指标

成本、质量、生产率和产量、交货期是衡量企业生产能力和市场竞争能力的 4 个要素,采用传统的非数控生产方式只有达到一定阈值的大批量的规模生产才能取得上述 4 个方面的统一。但在当前激烈的市场竞争环境下,以生产为中心,企业为主导的卖方市场已转向以市场需求为中心、用户为主导的买方市场,产品需求呈现多样化和个性化,且产品经济寿命大大缩短,这首先将形成以多品种变批量的生产方式为主流的生产环境;其次,衡量企业竞争力的首位因素也由成本转为交货期。

为此,发展柔性结构体系的数控制造装备及制造系统是实现在快速多变的市场环境中对用户驱动的市场需求作出灵活、快速响应的关键。所谓制造装备及制造系统的柔性化是指当产品的品种的需求发生变化时,它们仍能在满足经济性的前提下,实现及时转换生产的适应能力。同时,持续地提高经济加工精度也是适应市场竞争的另一个主要目标。

因而作为评定数控机床及系统效能的基本指标也将由传统的工作精度和切削能力改为用高效柔性和高精化的程度来衡量。

高效柔性化和高精化分别反映了制造业在竞争激烈的市场环境下的两个最主要的要求,即产品生产变换的敏捷性和产品质量的持续提高。

(1) 高效柔性化 虽然传统的非数控机床也具有一定的柔性,但它不能获得高的效能和稳定的精度,更不适应复杂型面的加工。因此,基于数控技术的高效柔性化的制造装备及制造系统需兼具下列特性:①高度的灵活性和多品种生产的快速适应性。②高效的生产能力,包括:高生产率,借助于高速化和提高金属切除率等途径。高稳定性,对于光机电集成的数控机床,着重要求其降低故障率,提高可靠性,以提高制造装备及系统的开动率(利用率)。

制造装备及其系统高效柔性化的具体指标的内涵如表 1 所示。

表 1 高效柔性化指标的内涵

基本指标		指标组成项目		影响因素
高效	高的机床利用率	高生产率	高金属切除率	<ul style="list-style-type: none"> • 高速强力切削 • 高功率 • 空载快速运动 • 高机床刚度和抗振性
			缩短辅助时间	
高运行稳定性	低的故障率和短的修复时间	<ul style="list-style-type: none"> • 可靠性增长技术和健壮化设计 • 智能化和适应控制技术 		
	无人化环境下的连续工作能力			
柔性	短的新产品上市期	多品种生产变换的敏捷性	<ul style="list-style-type: none"> • 缩短调整和试切周期 • 扩大加工零件族(组)的能力 • 技术准备和生产安排的及时性 • 低重构成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 品种变换所需调整和试运行时间 • 工夹刀具供应的快速性 • 制造装备及系统的重构技术 • 大批量定制化生产技术 • 优化工艺和物流及信息流
		经济可承受性		

(2) 高精度 产品的加工精度直接影响到其工作性能、寿命、能耗和噪声等，因此，数控机床的高精度是市场需求和技术发展的必然结果。

分析汽车的某些关键件的精度需求，如发动机的缸体、缸盖、曲轴、凸轮轴、连杆、化油器、制动器、减震器的阀体、泵体、盘类以及模具等在近十几年内有明显的提高，如表 2 所示。

表 2 汽车零件关键配合部位的精度提升

	20 世纪 70~80 年代	20 世纪 90 年代
尺寸精度	IT7~IT8 级	IT5~IT6 级
圆度/mm	0.015~0.020	0.005~0.010
同轴度/mm	0.020~0.030	0.015~0.020
孔距精度/mm	0.030~0.050	0.010~0.015
车铣加工表面粗糙度 Ra/ μm	1.6~3.2	0.8~1.2

统计自上世纪 80 年代至 2002 年国内外先进水平数控机床的工作精度提高的过程，平均每年提升 10%，即每隔 8 年误差约减小一半，如图 1 所示。

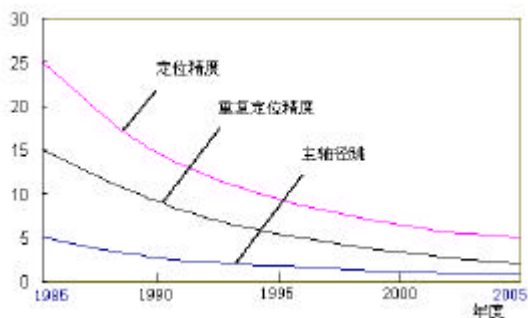


图 1 加工中心工作精度提升的历程

2 我国数控机床现况

从上世纪 80 年代起, 机床制造业的发展虽有起伏, 但对数控技术和数控机床一直给予较大的关注。经过“九五”数控车床和加工中心(包括数控铣床)的产业化生产基地的形成, 所生产的中档普及型数控机床的功能、性能和可靠性方面已具有较强的市场竞争力。但在中、高档数控机床方面, 与国外一些先进产品相比, 仍存在较大差距, 这是由于欧美日等先进工业国家于 80 年代先后完成了数控机床产业进程, 其中一些著名机床公司致力于科技创新和新产品的研发, 引导着数控机床技术发展, 如美国英格索尔公司和德国惠勒喜乐公司对用于汽车工业和航空工业高速数控铣床的发展, 日本牧野公司对高效精密加工中心所作的贡献, 德国瓦德里希公司在重型龙门五面加工铣床方面的开发, 以及日本马扎克公司研发的车铣中心对高效复合加工的推进等等。相比之下, 我国大部分近代机床产品在技术处于跟踪阶段。表 3 以 40 号刀柄的中型加工中心为例, 列出国内外先进产品主要技术指标, 由此可以看到效率、精度和可靠性等方面均有明显差距。

表 3 中型加工中心主要技术指标对比

项目	国内	外国
主轴最高转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	6000~10000	10000~40000
快移速度/ $m \cdot \text{min}^{-1}$	24~30	60~90
金属切除率 45 钢($\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	200~300	400~600
定位精度/mm(全行程)	0.01~0.016	0.004~0.006
重复定位精度/mm	0.005~0.008	0.002~0.003
平均无故障运行时间 MTBF/h	500~600	>1000

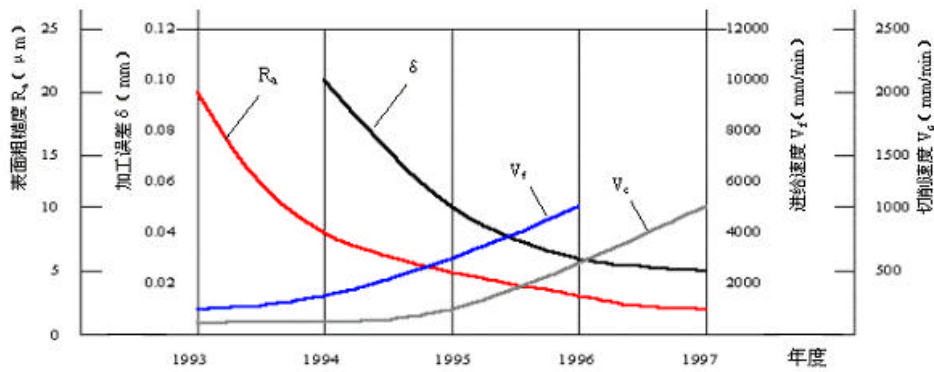
基于这一现实, 为了加速振兴我国的机床制造业, 当前宜加强如下五方面的研究和发

- 展工作:
- (1)以高速化为先导, 提高数控机床的综合性能。
 - (2)加快数控机床向高效柔性化和高精化发展的步伐, 推进 μm 级精度机床工程的规划和实施。
 - (3)加强发展多功能复合加工的数控机床来提高单件和中小批量生产的加工精度和高效柔性化。
 - (4)对于中大批量生产、发展快速重组制造系统(Rapidly Reconfigurable Manufacturing System 简称 RRMS)和可重构机床(Reconfigurable Machine Tool 简称 RMT)将是一个合理的解决方案。
 - (5)发展网络制造单元以适应数字化企业的构建。
- 以下各节将对上述五个发展方面作扼要的叙述。

3 以高速化为先导, 提高数控机床的综合性能

数控机床的高速化是提高其高效柔性和高精化的一个重要措施。它既可提高机床的切削能力和缩短辅助时间, 又能改善切屑形成过程, 减少刀齿每转进给量和降低切削力, 有助于提高加工精度, 图 2 示出德国 BMW 公司用硬质合金刀片加工钢件随着高速化使精度得到提高的实例。

分析中型加工中心的高速化与高精化的发展历程, 可以得出, 作为表征其切削运动高速化的主轴最高转速和最大进给速度, 大致持续地以每 10 年增长 1 倍的比率上升, 而表征压缩机床辅助时间的快移速度(指以滚珠丝杠和旋转伺服电机驱动)和自动换刀/工作台转位速度, 基本上以每 12~15 年翻一番的速度增长, 1993 年后逐步推广用直线电动机直接驱动的新技术, 使加工中心的快移速度比用滚珠丝杠副驱动时又提高了 1 倍。



δ ——加工尺寸精度 R_a ——加工表面粗糙度 V_c ——主切削速度 V_f ——切削进给速度

图2 高速切削对提高加工质量的作用

但主轴转速和进给速度的提高也会引起一些负面影响，使机床结构和测量系统的热变形和位置控制的跟踪误差随之增大。为此，应用信息技术发展诸如热误差补偿、进给速度前瞻控制、位置环前馈控制和加减速控制等一系列先进控制技术（图3），使在高速控制条件下仍能保证加工精度不断改善。

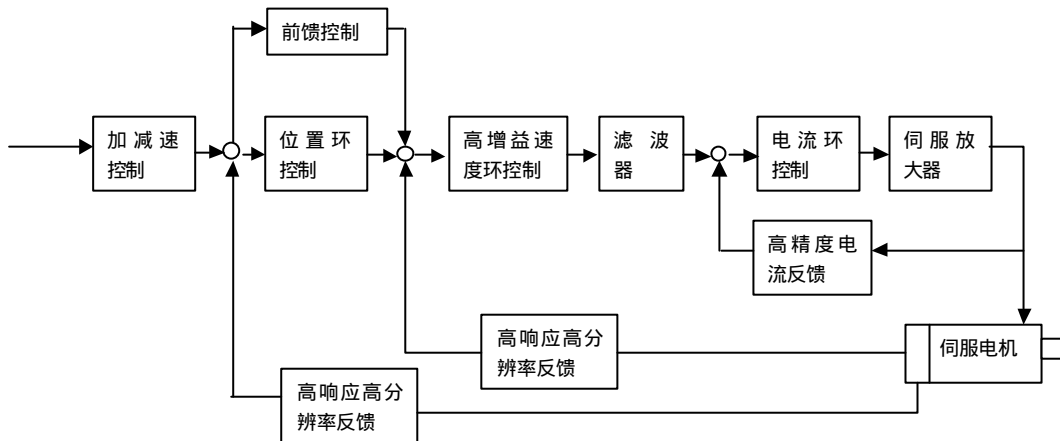


图3 高速高精伺服控制系统

因此，高速化的发展不能单纯地追求转速的提高必须考虑改善各项制约因素，才能不致事倍功半。除了上述提及的热误差和控制精度，还要注意机床结构的静动态刚度、动平衡和刀具的性能等。

4 推进 μm 工程，研制高效精密数控机床

目前国内生产的数控机床尚缺少高效微米精度级的产品，图4示出了汽车零部件加工需求与国产加工中心、CNC铣床、车削中心和CNC车床等满足度现状的比较。

从图4中可看出，现有的数控机床产品（见图4中A、B、C区）大多不能同时满足作为典型的支柱产业的汽车制造业对数控制造装备的高效和高精的综合要求。

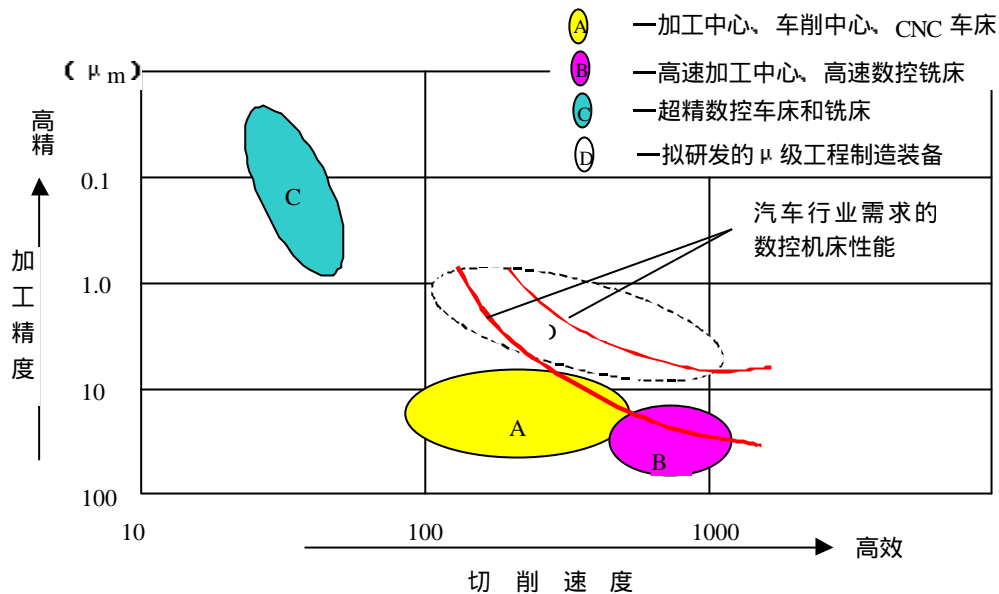


图4 国产数控机床(图中A、B、C)与汽车制造业对数控制造装备在效率和精度方面需求(图中两红线间区域)的差距比较

为此,需研发一些能兼顾高效化和高精化的数控制造装备以适应汽车制造业加工关键零件的需求,它们的性能用图3中D区域来表示。由于这些数控制造装备的加工精度主要在微米级(μm)范围内,因此可称为“ μm 级制造装备及技术研究”,简称“ μm 工程”(Micro Precision Machine Tool Engineering)。

5 发展复合加工数控机床、缩短制造过程链

多功能复合加工数控机床简称复合机床,或称为多功能加工或完全加工机床。

复合机床的含义是在1台机床上实现或尽可能完成从毛坯至成品的全部加工。从20世纪70年代以来,出现了以旋转刀具作主切削运动的主要用于镗铣加工的加工中心和以工件旋转作主运动的主要用于车加工的车削中心,这两类多功能的数控机床在推进数控机床的工序集中的工艺方法上发挥了重要的作用。但对于这较复杂的零件它的功能范围尚不足以完成从毛坯至成品的全部工序加工,因而还不能充分提高在单件和中小批量生产条件下的生产效率,且由于工件在多台机床间的转移增加了安装误差,也不利于加工精度的稳定性。

为此,加快复合数控机床的发展步伐,提高工序的集中度,使加工过程链集约化,可以提高多品种单件和中小批量加工的工效。复合数控机床可以减少在不同数控机床间进行工序的转换而引起的待工以及多次上下料等时间。通常这些时间占零件整个生产周期的40%~60%,即使在信息管理良好的情况下,仍将占20%左右。因此,复合数控机床具有明显的技术效果。

复合数控机床根据其结构特点,可以分为如下两类:

(1) 跨加工类别的工艺复合数控加工机床 该类机床主要体现为刀具回转加工、工件回转加工或特种加工等多类功能的复合。因而在机床结构上要体现对不同加工方式的需求。目前常见的有车铣中心、铣车中心和铣削—激光加工机床等。

(2) 多面多轴联动加工的工序复合数控机床。

6 高效柔性化的新一代制造系统

在可重构制造(Reconfigurable Manufacturing)技术支持下, 构建具有适应大批量高效生产的柔性化制造系统是一个值得注意的发展动向。目前常用的 FMS/FML 其制造装备的功能储备通常较多, 在大批量生产条件下, 往往仅能应用其中 20%左右的功能, 因此用扩大功储备以备不时之需的做法, 既是对资源的浪费, 也是增大投资的不经济之举。另一方面, 当加工的产品由于市场需求的变化要作较大的调整时, 往往既费时又耗费资金。为此, 美国 Y.Koren 教授于 1995 年提出了发展可重构制造系统(RMS)的构想。我国从 1997 年起在国家自然科学基金和“十五” 863 计划资助下, 对可重构制造技术以及构建快速重组制造系统(RRMS)的理论与方法进行研究, 其核心为制造系统能物理组态, 即根据加工对象的变化方便地进行调整。为了能在制造系统的设计与规划、集成与整合以及运动与决策等 3 方面实现组态, 需要解决图 5 所示外圈的 6 个关键技术, 使其兼具专用生产线的高效性能和适用的柔性所取得的经济性。为此发展了能对多变的市场需求作出合理的配置规划和易于调整的布局方式、适应重构的控制软件、开放式控制系统和规范化接口以及能快速提升系统重组后制造质量的诊断系统等技术, 并取得了初步成功的应用。



图 5 RRMS 的 6 项基础原理及其对物理组态的作用

7 发展网络化制造单元, 推进企业制造能力的高效柔性化

在信息化技术蓬勃发展的推动下, 制造业正面临着一个以提升竞争能力为目标的构建全企业数字化时代。作为主要制造装备的数控机床及其组成的制造系统也将积极地向数字化制造迈进, 它将成为一个信息集成和快速实施的制造单元, 其主要特征可归结为 3F、3I 和 3S, 即:

3F: 柔性化、联盟化和新颖化

3I: 集成化、信息化和智能化

3S: 系统化、软件化和个性化

当前, 国内外一些机床和数控系统制造企业在从分布式网络化联盟制造的角度出发研究相适应的制造单元, 它将能与企业 ERP、PDM 和 CAD/CAPP/CAM 的信息集成, 进而通过与客户关系管理(CRM)和供应链管理(SCM)的联系作出智能决策, 实施并行工程、可视化监控等以提高机床利用率, 实现高效的柔性生产。