

# 面向 21 世纪的柔性制造技术

邓宏筹

(中国航空工业制造工程研究所, 北京 100024)

**[摘要]** 市场全球化的竞争局面, 使我国制造业面临严峻的挑战, 如何扭转大多数企业缺乏竞争力的被动局面? 积极的对策是主动迎上, 改革生产经营管理体制, 逐步调整产品结构, 从发展中走出困境。在发展战略上, 作者认为积极发展以数控机床为重点的机床工业, 将对整个机械行业起促进作用。作者从以数控机床应用为基础的柔性制造技术的产生和应用着手, 论证了这一发展战略的可行性及其对人类生产发展的历史必然性的顺应。作者对制造业在改革中碰到的一些问题发表了意见, 希望有助于讨论和取得共识。

**[关键词]** 柔性制造技术; 数控机床; 柔性制造单元; 柔性制造系统; 柔性自动线

## 1 迎接时代的挑战

中国加入 WTO 已成定局, 实际上, 我们已处于市场全球化的经济环境中, 这为我国经济发展带来机遇, 也使制造业面临更严峻的挑战。长期实行的计划经济, 使大部分企业的产品同市场需求不对路, 而新品开发的基础薄弱、设备陈旧、工艺落后与管理不良, 使企业缺乏活力与竞争力, 形势迫使我们有效地实施改革, 通过企业联合、兼并、重组, 调整产品结构, 改革生产经营管理体制, 不断发展适合国情的先进制造技术, 加强新品开发能力, 逐步形成自己的产品优势, 在竞争中求得发展。

关于什么是适合国情的发展制造技术的方针的问题, 目前在产业界和科技界众说纷纭。有人认为我国机械制造业同世界先进国家相比存在着阶段性差距, 认为现在发展先进制造技术是不现实的, 主张只能发展工艺成熟的大批量生产的自动化技术, 发展组合机床、专用机床、刚性自动线, 认为 70、80 年代发展的数控机床可靠性差、质量问题多、用户反映大, 要接受教训, 等等。看来, 到底应如何

发展, 确实需要认真讨论研究, 以作出正确决策。

R·N·纳吉尔在《21 世纪制造企业的战略》报告的开头, 有一句引人思索的话: “以大量生产的制造方式为主导的现行工业纪元已走向结束, 正让位于以敏捷制造企业为主导的新纪元。”

综观世界的工业发展, 从 20 世纪初叶到 80 年代, 以大量生产为代表的先进制造方式曾经创造过辉煌。在 1955 年的全盛时期, 作为工业中工业的美国汽车制造业, 首次创出年产 700 万辆汽车并占据世界汽车总销售量 75 % 的记录, 通过广泛应用专用高效机床、组合机床、单品种加工自动线和流水装配线等制造技术, 使汽车的装配周期从过去单件装配方式的 514 min, 缩短为 1.9 min。大量生产创造了比单件生产高数百倍的生产效率, 成为世界性主导的生产方式传播到各工业国, 甚至连欧洲最保守的本茨公司也向大量生产方式转变。

尽管美国汽车产量在 1965 年达到了 930 万辆, 1973 年达 1 260 万辆, 在经济衰退期后的 1993 年还达到近 1 000 万辆, 但随着经济的发展, 世界经济的构成出现了多元化, 经济和科技的发展, 以及冷战结束后关税壁垒的拆除, 使市场日益国际化、全

球化，用户对产品的需求日益多样化、个性化，竞争更加激烈。日本汽车工业屏弃了大量生产方式在人力资源、库存资金积压上造成的极大浪费，特别是单一品种生产对市场变化的需求极不适应的种种弊端，发展了按市场订单进行及时生产的丰田汽车模式，即精益生产（Lean Production）模式。日本汽车从 1950 年仅生产 6.7 万辆，到 1970 年已达 530 万辆，1980 年达到 1 000 万辆，开始超过美国。

60~80 年代，以数控机床应用为基础的柔性制造技术在汽车、飞机及一些行业中得到发展，其应用结果表明，柔性制造适于多品种、变化批量产品的生产，80 年代末，柔性制造技术发展了以数控加工中心、数控加工模块及多轴加工模块组成的柔性自动线，使自动线柔性化，给单一品种的大量生产方式带来了转机。

作者认为，正在不断发展和进步的柔性制造方式，将是适应 21 世纪工业生产的主导方式，是我国制造企业为摆脱当前竞争力不强的被动局面，走向经济强国所应重点发展的制造技术。

为了论述清晰完整，有必要考察一下柔性制造技术的产生、发展和应用。

## 2 柔性制造技术的产生及发展概况

柔性制造技术（Flexible Manufacturing Technology, FMT），是建立在数控设备应用基础上的、正在随着制造企业技术进步而不断发展的新兴技术。概括地说，凡是在计算机辅助设计辅助制造系统支持下，采用数控设备（NC）、分布式数控设备（DNC）、柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）、柔性自动线（FTL）、柔性装配系统（FAS）等具有一定制造柔性的制造自动化技术，都属于 FMT 的应用范围。

FMT 是在数控机床研制和应用的基础上发展起来的，考察其背景，则离不开计算机技术、微电子技术的发展，其交互发展过程如图 1 所示。

其中有几个重要的里程碑，如表 1 所示。

为了获得较明确的技术概念，对 FMT 各构成单元定义如下：

1) NC（数控设备 Numerical Control）是一种机床或工业加工设备（包括焊机、金属成形及钣金加工设备等），其加工运动的轨迹或加工顺序是由数字代码指令（NC Program）确定的，它通

常是用计算机辅助制造（CAM）软件工具生成的。

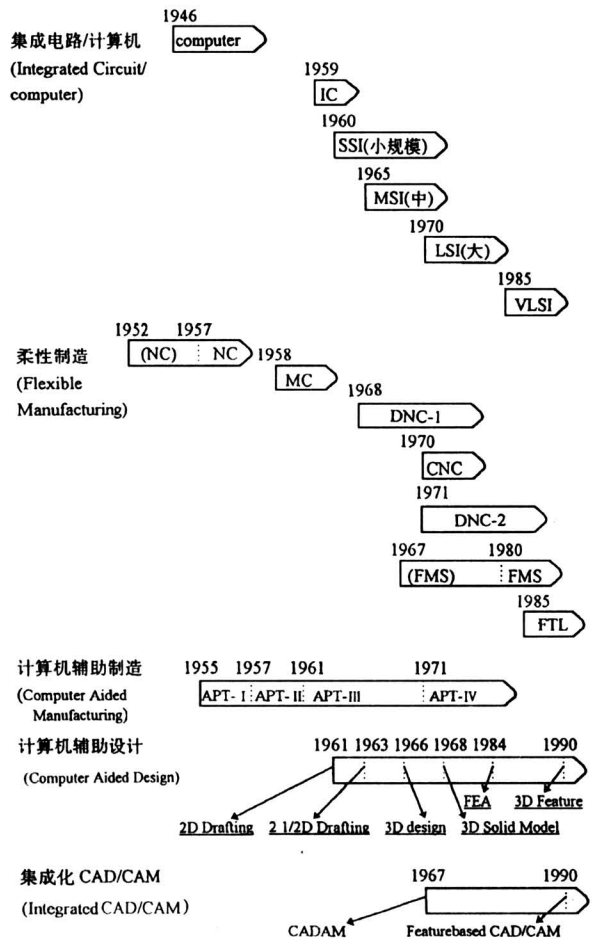


图 1 柔性制造技术的发生和发展历程

Fig.1 The development cours graph of FMT

2) CNC（计算机数控 Computer Numerical Control）是一种具有内装式专用小型计算机的数控系统。

3) DNC-1（计算机直接数控 Direct Numerical Control）是将一组数控设备连接到一个公共计算机存储器的系统，该存储器能按需要在线地分配数控指令给数控设备的控制器。

4) DNC-2（分布式数控 Distributed Numerical Control）是能将主控计算机存储器中存储的各个零件加工的 NC 程序，通过分布式前端控制器（也称工作站）分配、发送到数控设备的控制器去，并能采集数控设备上报的工况信息的系统。

5) MC（加工中心 Machining Center）是一种带自动换刀的多工序加工的数控机床，如钻镗铣、车削、车铣加工中心等。

表 1 FMT 发展历程中的里程碑

Table 1 The milestones in the development cours of FMT

里程碑	发生时间	主要内容
数控机床首次问世	1952	按照著名先驱者约翰·蒂·帕尔逊提出的用穿孔带输入数据,以控制加工直升机变截面桨叶的设计,美国麻省理工学院伺服机构实验室于 1952 年研制出三坐标数控铣的原型样机,开创了 NC 加工新纪元 <sup>[1-3]</sup> 。
加工中心首次出现	1958 年	由凯尼·特雷克公司 (Kearney & Tracker) 首先研制出带自动换刀功能的多工序加工的数控镗铣床 <sup>[3]</sup> 。
计算机直接数控 (DNC-1) 问世	1968	为解决使用纸带阅读机造成的数控系统差错率高的问题,导致了计算机直接数控的发展 <sup>[2]</sup> 。
计算机数控 (CNC) 出现	1970	利用英特尔公司开发的微处理器芯片,研制出小型计算机数控系统,具有可存储零件程序、系统可靠性提高、造价便宜的优点,是数控技术走向软件数控的一大进步 <sup>[2]</sup> 。
分布式数控 (DNC-2) 问世	1971	是在应用 CNC 之后发展的新型 DNC,具有分布控制的特点,扩展了 DNC 计算机对机床的生产监控及统计管理功能 <sup>[1,2]</sup> 。
FMS 的发明	1967	英国工程师狄奥·威廉姆逊研制出莫林-24 (The Molins System-24),意即全天 24 小时都可工作,系统由几台类似于卧式加工中心的数控机床、轨道运输车式工件托盘及刀具托盘运送系统、自动仓库组成 <sup>[3-5]</sup> 。
FTL 的出现	1985	德国洪斯贝格开发出 CNC MACH 数控加工模块及换箱模块结构,并拼装成 FTL,使柔性制造应用到大量生产中。

6) FMS (柔性制造系统 Flexible Manufacturing System) 是一个在中央计算机控制下由两台以上配有自动换刀及自动换工件托盘的数控机床与为之供应刀具和工件托盘的物料运送装置组成的制造系统,它具有生产负荷平衡调度和对制造过程实时监控功能以及制造多种零件族的柔性自动化。

7) FMC (柔性制造单元 Flexible Manufacturing Cell) 通常是由一台加工中心、一组公共工件托盘及其传送装置组成的,工件托盘按单一方向传送,传送装置的循环起点是工件装卸工位,控制系统没有生产调度功能(少数 FMC 由多台加工中心组成,具有初步的调度功能)。

8) FTL (柔性自动线 Flexible Transfer Line) 由多台柔性加工设备及一套自动工件传送装置和控制管理计算机组成。柔性加工设备可以是 1~3 坐标数控加工模块、多轴加工模块(转塔式或自动换箱式)或数控加工中心的组合,工件按传送线流向顺序加工,适合于大批量生产,并具有加工零件品种在一定范围内变化的制造柔性。

9) FAS (柔性装配系统 Flexible Assembly System) 由控制计算机、若干工业机器人、专用装配机及自动传送线和线间运载装置(包括 AGV、滚筒式传送器)组成。用于印刷电路板插装电子器件或各种电动机、机械部件等的自动装配。

### 3 国外 FMT 的发展与应用

#### 3.1 航空工业的需求强劲地推动 FMT 的发展

50 年代,航空工业进入研制喷气式飞机的新时代,高速飞行使飞机承载急剧增加,结构上大量采用整体构件,它们外形复杂(大多与飞机的气动外形有关),零件尺寸大(如波音 747 的起落架梁长 6 m,机翼蒙皮长 31.5 m, F-111 战斗机机翼大梁长 7.5 m, C-5A 军用运输机框架宽 7 m、DC-10 运输机的大梁缘条长 7.62 m),构件材料特殊(多为钛合金、高强度合金钢、铝合金),加工困难,常规机床根本无法加工,必须发展大型多坐标联动的数控机床,才能满足要求。

1955 年吉丁斯·刘易斯公司 (G&L) 研制的第一台商用数控机床就是蒙皮铣,洛克希德飞机公司、通用动力公司及马丁公司订购了它,并于 1957 年首批用于飞机生产。波音公司从 1958 年开始应用数控加工,为研制 B-52 轰炸机及波音 707 远程客机,相继向 G&L、辛辛纳提、圣斯特兰和 K&T 等机床公司订购了一大批数控机床,到 1961 年已有数控机床 150 台。1965 年 9 月为扩大波音 707 及 727 的生产并规划波音 737 及 747 的制造,在奥本建立了大型结构件制造工厂,到 1969 年波音公司拥有的数控机床已达 290 台。

洛克希德公司为生产 C-130 军用运输机, F-104、F-14 战斗机及 P-3 反潜机,于 1960 年建立数控车间,到 1963 年已拥有大型数控机床 22 台,后为生产 C-141 远程运输机、C-5 重型运输机及 L-1011 宽体客机,又数次增订数控机床,现已拥有数控机床 150 多台。麦克唐纳·道格拉斯

公司为生产 F-4 战斗机、A-4 舰载机及 DC-8 远程客机, 并为 F-15 重型战斗机研制作准备, 于 60 年代数次订购数控机床, 到 1970 年, 其圣路易斯工厂已拥有数控机床 80 台。北美洛克维尔公司为生产 B-1B 战略轰炸机、F-86 及 F-100 战斗机, 于 1966 年订购了 21 台大型数控机床, 包括德国福洛瑞甫 (Froriep) 的五坐标数控立式车铣床 (加工直径达 13 m), 辛辛纳提的 63 m 长的七坐标大梁铣及 63 m 长的蒙皮铣, 还包括一台工作台 3.6 m × 112 m 的巨型蒙皮铣, 具有 6 个龙门架和 24 个主轴, 是世界上最大的数控机床<sup>[6-23]</sup>。

在航空发动机制造中, 数控加工主要用于压气机及涡轮的各类机匣、压气机盘及涡轮盘和涡轮轴及压气机轴等复杂构件。普拉特·惠特尼公司为研制大型飞机用的 JT9D、JT8D、JT3D 系列涡扇发动机及作战飞机用的 PW-1128、F100-PW-100、TF30 等涡扇发动机, 配置了 200 台数控机床。通用电气公司为研制 TF34、CF6、F110、F404 系列涡扇发动机及 J79 系列等涡喷发动机, 在其艾文德尔的工厂配置了 190 台数控机床。英国研制大型飞机用的 RB211 涡扇发动机的罗尔斯·罗伊斯公司拥有数控机床 200 台。

波音公司拥有的数控机床 (表 2), 反映出一个年产 200 架大型飞机的现代化飞机制造公司所配置的数控机床的类型、规模及其性能。

60 年代数控技术在航空工业的应用, 促进了它在机床、汽车、造船、工程机械等行业的推广。美国数控机床拥有量 1969 年达 14 259 台, 其中飞机业 326 台, 汽车业 132 台; 1978 年达 40 019 台, 其中飞机业 7 400 台, 汽车业 1 000 台。美国的数控技术在 60~70 年代处世界领先地位<sup>[24,25]</sup>。

80 年代以后, 由于发展战略的错误, 美国失去了在数控技术发展上的优势。

### 3.2 汽车工业的发展推动日本 FMT 后来居上

日本 70 年代着力发展的数控机床及数控系统。日本汽车工业于 1972 年投资 19 亿日元、1978 年再次投资 100 亿日元、1981 年又投资 326 亿日元购置数控机床, 这极大地促进了数控机床、FMS、FMC 的发展。到 1987 年日本拥有的金切机床共 60 万台, 其中数控机床占 6.6 万台; 汽车工业拥有金切机床 21 万台, 其中数控机床占 2 万台; 全国共有 FMS 256 条, 汽车工业占 21 条。从 1978 年起, 日本的数控机床年产量、出口销售量均超过

美国 (1978 年日本年产 7 342 台, 美国为 5 688 台, 1990 年日本达到高峰为 61 697 台, 美国为 7 927 台, 后两年日本经济衰退, 产量有所下降, 仍在美国之上, 1995 年恢复后, 日本达 41 805 台, 美国为 17 052 台, 到 1997 年日本达 56 113 台, 美国为 17 414 台)<sup>[26]</sup>。在此期间世界各工业国的数控技术都有较大发展, 以 1995 年数控床的年产量作比较, 法国较差, 年产 6 943 台, 英国为 14 258 台, 德国达 23 688 台<sup>[26]</sup>。

### 3.3 数控系统经六代更新发展更臻成熟

随着微电子技术的发展, 数控系统有了巨大的技术进步, 概括地说, 经历了六个发展阶段:

- 电子管式硬件数控 1952~1958 年, 如 MIT 数控铣
- 晶体管式硬件数控 1959~1964 年, 如 Bendix Dynamic path 20
- 小规模集成电路式数控 1965~1969 年, 如 Acramatic IV
- 小型计算机数控 (CNC) 1970 年开始, 如 Acramatic CNC
- 微处理器数控 (MNC) 1974 年开始, 如 Sinumerik 8M, GE2000
- 基于个人计算机的数控 (PC-Based NC) 1990 年开始, 如 HNC1 (华中 I 型)、Acramatic 2100

早期的数控系统因受逻辑元器件 (真空管、晶体管) 质量限制, 系统故障率高 (MTBF 1~10 h); 基于大规模集成电路及计算机控制技术的 CNC 数控系统, 具有一定的零件 NC 程序存储功能 (16 KB~64 KB), 系统可靠性提高 (MTBF 10~100 h); 微处理器数控采用多微处理器, 控制坐标轴数可达 8、12、16, NC 程序存储容量可扩 (16 KB~320 KB), 使用方便灵活, 系统可靠性大为提高 (MTBF 2 000~5 000 h), 数控系统进入成熟阶段; 基于 PC 机的数控采用工控级 PC 机主板及模块化结构, 是开放式控制器, 为用户灵活使用及网络化系统监控管理提供了很大的活动空间, 如设置圆弧点动、任意角度点动、简明语句加工循环、直接蓝图编程、刀具轨迹检验、机床及系统故障诊断等。同时, 零件程序存储容量很大 (4 MB~64 MB)。系统可靠性极高 (MTBF 达 10<sup>5</sup> h)。

在与控制系统相关的伺服驱动技术方面, 也经历了模拟式电液伺服 (主要在欧美)、电液脉冲马达 (主要在日本、中国)、直流伺服及数字式交流伺服驱动的发展阶段, 当前交流伺服获广泛应用。

### 3.4 FMC、FMS 及 FTL 的发展和应

数控机床单机运行形式 (stand-alone) 始终是柔性制造的最常用形式。但机床利用率因外部因素影响往往偏低。随着生产和科技发展, 出现了

FMC、FMS、FTL 等新应用形式, 它们自动化程度更高、制造周期更短、生产效率更高。

表 2 波音公司数控机床简表

Table 2 The configuration of Boeing company's NC machine tools

机床类型	2A			3A			4A			5A			6A	7A	合计	
	IS	2S	3S	1S	2S	3S	4S	1S	2S	4S	1S	2S	4S	2S		3S
柔性制造单元													$\frac{C_1}{4}$	4		
航空工业类铣床	型面铣	立式	$\frac{C_8 C_9 C_{10} W_2 O_1}{1 1 3 1 1}$			$\frac{L_1}{2}$										9
		卧式	$\frac{C_1 C_2 K_1 G_1}{1 3 4 1}$			E1	$\frac{W_1}{1}$									
	大梁铣				$\frac{F_3}{3}$	$\frac{F_2}{2}$	$\frac{F_4}{2}$	$\frac{C_1 F_1}{1 3}$	$\frac{C_3}{5}$						$\frac{C_2}{1}$	17
	蒙皮铣				E2											13
	挖 铣	$\frac{E_1 E_2}{1 1}$	$\frac{C_1 C_2 E_3 E_4}{2 2 1 1}$													8
	刨式铣				$\frac{G_1}{1}$										$\frac{B_1}{1}$	2
加工中心	立式	$\frac{S_1}{11}$													11	
	卧式	E3			$\frac{S_3}{17}$			$\frac{S_4}{1}$	$\frac{S_5}{8}$							64
通用铣床	钻镗铣	立式	$\frac{C_1}{2}$	$\frac{G_1}{2}$												4
		卧式	$\frac{C_2}{2}$	$\frac{D_1 G_2 S_1 S_2 S_3}{1 1 1 4 1}$	$\frac{C_3}{1}$	$\frac{P_1 P_2}{3 1}$	$\frac{F_1}{1}$	$\frac{S_4}{1}$							17	
	床身式铣	立式	$\frac{C_1 C_2 K_1}{1 1 1}$												3	
	卧式	$\frac{S_1}{1}$	$\frac{C_3 G_1}{1 1}$			$\frac{C_4 C_5}{2 2}$										7
	龙门铣	$\frac{M_1 C_1}{1 1}$			$\frac{C_2}{2}$	$\frac{C_3 C_4 C_5 K_1}{4 2 2 2}$										14
车 床	普通车	$\frac{A_1 D_1}{2 1}$														3
	转搭车	E4												$\frac{J_3}{1}$	5	
	立 车				$\frac{G_1 B_1}{1 1}$											2
钻 床	立 钻	E5	$\frac{E_1}{1}$													21
	转塔钻	$\frac{B_1 B_2 B_3 B_4}{1 1 3 1}$	$\frac{B_5}{1}$													7
镗 床	卧式镗床			$\frac{G_1 G_2 G_3 G_4 L_1}{2 1 1 5 1}$			$\frac{L_2}{1}$									11
	坐标镗	立 式	$\frac{P_1 P_2 D_1}{2 3 1}$	$\frac{P_3 S_1}{1 1}$												8
		卧 式	$\frac{D_2 D_3}{1 1}$													
钻铆机床	$\frac{G_1 G_2}{5 4}$												$\frac{H_1}{1}$	$\frac{G_3 G_4}{1 1}$	9	
其他机床															27	
总 计															295	

注: 1. “A” 指数控坐标数, “S” 指机床的主轴数; 2. 栏内分母指机床台数, 分子指类型代码, 参见附注;

$$3. E1 = \frac{G_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7 P_1}{2 3 1 5 2 2 2}, E2 = \frac{C_1 C_2 K_1 K_2}{5 2 1 5}, E3 = \frac{C_1 K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 S_2}{1 5 7 15 6 2 2}, E4 = \frac{J_1 J_2}{1 3}, E5 = \frac{C_1 H_1 P_1 P_2 P_3}{1 1 2 10 6}$$

附注：表 2 所列机床的简要性能

柔性单元：C <sub>1</sub> ：Cincinnati FMC 4 立轴龙门式 X2870 Y1727 Z711 A ± 25° B ± 25°		
型面铣：C <sub>1</sub> ：Cincinnati 168 型 1 卧轴动柱立台 X4470 Y1320 Z457 20-3600/30 (HP)	C <sub>2</sub> ：Cinc. 120 型 1 卧轴动柱立台 X3175 Y1575 Z660 20-3600/30	K <sub>1</sub> ：K&T 168 型 1 卧轴动柱立台 X4368 Y1320 Z457
G <sub>1</sub> ：G&L* 750 型 1 卧轴动柱纵移立台 X3150 Y1828 Z457 8-1800/30	G <sub>2</sub> ：G&L Numerimill 型 3 卧轴动柱纵台 X4368 Y1625 Z915	C <sub>3</sub> ：Cinc. 42 × 36 型 3 卧轴横动柱纵移立台 X1016 Y508 Z381 36-3600/25
C <sub>4</sub> ：Cinc. 40 × 52 型 3 卧轴横动柱纵移立台 X1016 Y508 Z381 36-3600/25	C <sub>5</sub> ：Cinc. 120 × 60 型 3 卧轴动柱立定台 X3048 Y1524 Z762	C <sub>6</sub> ：Cinc. 240 × 120 型 3 卧轴动柱立定台 X6274 Y1524 Z762
C <sub>7</sub> ：Cinc. 280 × 120 型 3 卧轴动柱立定台 X7112 Y1524 Z1220	P <sub>1</sub> ：P&W 40 × 52 型 3 卧轴动柱纵移立台 X915 Y500 Z297	W <sub>1</sub> ：Wilson-P&W 240 × 24 型 1 卧轴动柱立定台 X6096 Y915 Z457 A ± 10°-30°
C <sub>8</sub> ：Cinc. Hydrotel 83° 型立轴滑枕纵移台 X1320 Y762 Z357	C <sub>9</sub> ：Cinc. Hydrotel 143° 型立轴滑枕纵移台 X3048 Y762 Z357	C <sub>10</sub> ：Cinc. Hydrotel 床身型立轴滑枕纵台 X3048 Y762 Z357
W <sub>2</sub> ：Wilson 144 × 40 型 1 立轴滑枕纵移台 X3048 Y762 Z457	O <sub>1</sub> ：OUSRUD 72 × 36 型立轴龙门定 X1524 Y965 Z254	L <sub>1</sub> ：LUCAS VM-46-H 型 3 立轴龙门定 X1930 Y660 Z305
大梁铣：C <sub>1</sub> ：Cinc. 动龙门 2 卧轴 X37998 Y457 Z406 A ± 20°	C <sub>2</sub> ：Cinc. 动龙门 2 立轴 1 卧轴 X35941 Y <sub>1</sub> , Y <sub>2</sub> , Y <sub>3</sub> 1905 Z <sub>1</sub> , Z <sub>2</sub> , Z <sub>3</sub> 762	C <sub>3</sub> ：Cinc. 动龙门 2 卧轴 2 立轴 X35610 Y762 Z559 A ± 20°
F <sub>1</sub> ：FARNHAM 2 卧轴在龙门架前后各 1 X43900 Y812 Z305 A ± 20°	F <sub>2</sub> ：FARNHAM 3 立轴 2 前 1 后 X43900 Y812 Z305	F <sub>3</sub> ：FARNHAM 2 立轴 1 前 1 后 X43900 Y812 Z305
F <sub>4</sub> ：FARNHAM 4 卧轴前后两侧各 1 X43900 Y559 Z406		
蒙皮铣：C <sub>1</sub> ：Cinc. 144 × 1560 型 2 立轴动龙门 X39624 Y3760 Z305	C <sub>2</sub> ：Cinc. 144 × 1200 型 2 立轴动龙门 X30683 Y3860 Z305	K <sub>1</sub> ：K&T* 108 × 312 型 2 立轴动龙门双台 X85344 Y2743 Z457
K <sub>2</sub> ：K&T 144 × 965 型 2 立轴动龙门 X24511 Y1320 Z266		
挖 铣：E <sub>1</sub> ：EKSTROM CARLSON 444 型 1 立轴动滑枕定台 X3658 Y915 Z200-14400/10	E <sub>2</sub> ：EK. CAR. 446 型 1 立轴动滑枕定台 X3658 Y1219 Z20-14400/15	
C <sub>1</sub> ：CRAMIC 180 × 72 型 1 立轴动龙门 X4572 Y1930 Z305	C <sub>2</sub> ：CRAMIC 360 × 76 型 1 立轴动龙门 X6096 Y1930 Z356	
E <sub>3</sub> ：EKSTROM CARLSON 720 × 24 型 1 立轴动滑枕定台 X18288 Y6102 Z305	E <sub>4</sub> ：EKSTROM CARLSON 76 × 36 型 1 立轴动滑枕定台 X1828 Y915 Z305	
刨式铣：B <sub>1</sub> ：Bohle 2 立轴动龙门 X <sub>1</sub> 6350 Y <sub>1</sub> 2946 Z <sub>1</sub> 762 X <sub>2</sub> 6350 Y <sub>2</sub> 2070 Z <sub>2</sub> 762	G <sub>1</sub> ：Gorton tapemaster 型 1 立轴升降台立铣 X762 Y305 Z381	
加工中心：S <sub>1</sub> ：Sund strand JIGMATIC 21 型 1 立轴动龙门 X2134 Y1016 Z489 10-2000/10 20ATC	C <sub>1</sub> Cinc. 24ATC 型 1 卧轴立柱横动 X813 Y660 Z736 35ATC	K <sub>1</sub> ：K&T Milwaukee-Matic E 型 1 卧轴十字滑台 X608 Y356 Z356 100-2970/5 15ATC
K <sub>2</sub> ：K&T Milwaukee-matic EA 型 1 卧轴十字滑台 X610 Y356 Z356 12ATC	K <sub>3</sub> ：K&T Milwaukee-Matic EB 型卧轴十字滑台 X610 Y406 Z406 16ATC	K <sub>4</sub> ：K&T Milwaukee-Matic II 型 1 卧轴移动立柱 X610 Y406 Z508 100-4000/8 30ATC
K <sub>5</sub> ：K&T Milwaukee-matic III 型 1 卧轴移动立柱 X1118 Y1118 Z1270 50-2000/15 32ATC	S <sub>2</sub> ：Sundstrand Omnimil OM <sub>2</sub> 型卧轴纵移台动立柱 X2134 Y1524 Z2622 40ATC	S <sub>3</sub> ：Sun. Omni. OM <sub>2</sub> 型 2 点头卧轴十字滑台带转台 X1220 Y1220 Z1220 A ± 30°-120° C360° 25-4000/15 60ATC
S <sub>4</sub> ：Sun. Omni. OM <sub>3</sub> 型点头 1 卧轴十字滑台带转台 X1220 Y1220 Z1220 A ± 30°-120° C360° 25-4000/15 60ATC	S <sub>5</sub> ：Sun. Omni. OM <sub>3</sub> 型点头 2 卧轴十字滑台带转台 X1220 Y1220 Z1220 A ± 30°-120° C360° 18-3200; 25-4000/15 60ATC	
钻 镗 铣：C <sub>1</sub> ：Cinc. Cintimatic NO3 型 1 立轴十字滑台 X1016 Y508 73	G <sub>1</sub> ：G&L Numericenter 70 型 1 立轴十字滑台 X1524 Y812 Z1003	C <sub>2</sub> ：Cinc. CIM-X 型 2 卧轴立柱横移 X624 Y508
D <sub>1</sub> ：DEVLIEG 4H-72 型 1 卧轴单柱十字滑台 X1828 Y1220 Z508 20-1000/10	G <sub>2</sub> ：G&L 落地型动柱定台 1 卧轴 X9144 Y30 8 Z1524	S <sub>1</sub> ：Sun. Omni. OM <sub>4</sub> 型 1 卧轴十字滑台 X1828 Y1118 Z1803
S <sub>2</sub> ：Sun. RIGIDMILL NC3 型 1 卧轴纵台动柱 X1220 Y584 Z305 14-1457/20	S <sub>3</sub> ：Sun. RIGIDMILL NC3 1 卧轴纵台动柱 X1220 Y584 Z305 10-1475/10	S <sub>4</sub> ：Sun. Omni. OM <sub>4</sub> 型 2 点头卧轴十字滑台带转台 X2438 Y2438 Z1828 A ± 30°-120° C360° 18-3200, 25-4000/15
F <sub>1</sub> ：FRORIEP Spheromill 型摆立轴单柱纵台卧转台 X6376 Y2998 Z1524 A120° C360°	C <sub>3</sub> ：Cinc. CIM-X-220 型 2 卧轴立柱横动 X624 Y711 Z508 28-2240/5	
P <sub>1</sub> ：P&W 3 卧轴立台 X890 Y482 Z482 40-3600/25 × 3	P <sub>2</sub> ：Pratt & Whitney K303N-3 3 卧轴立台 X3048 Y838 Z534 40-3600/30 × 3	
床身式铣：C <sub>1</sub> ：Cinc. Veri-PWR 625-24 型 1 立轴十字滑台 X1524 Y457 Z610 14-1400/25	C <sub>2</sub> ：Cinc. Veri-Power 型 1 立轴十字滑台 X1270 Y610 Z457 14-1400/25	K <sub>1</sub> ：K&T 3008 型 1 立轴动柱纵台 X2438 Y838 Z660 15-1500/30
S <sub>1</sub> ：Sun. C4 型 1 卧轴滑枕式 X2286 Y830 36-1792/30	C <sub>3</sub> ：Cinc. Veri-PWR625-24 型 1 卧轴十字滑台 X1524 Y610 Z457 14-1400/25	G <sub>1</sub> ：G&L 36 × 158 型 1 卧轴动柱式 X3658 Y1220 Z457
C <sub>4</sub> ：Cinc. 48 × 146 型 3 卧轴动柱立定台 X3048 Y1524 Z914 18-3600/30	C <sub>5</sub> ：Cinc. 40 × 128 型 3 卧轴动柱立定台 X4876 Y1524 Z914 18-3600/30	
龙门铣：M <sub>1</sub> ：MOREY A-50 型 1 立轴动龙门 X1320 Y1320 Z305 20-3600/30	C <sub>1</sub> ：Cinc. 74 × 30 型 1 立轴动龙门 X1524 Y864 Z305 24-2400/15	C <sub>2</sub> ：Cinc. 72 × 30 型 2 立轴动龙门 X1626 Y864 Z305 18-3600/30
C <sub>3</sub> ：Cinc. 260 × 96 型 3 立轴动龙门 X6198 Y2540 Z458 18-3600/30	C <sub>4</sub> ：Cinc. 126 × 60 型 3 立轴动龙门 X3048 Y2032 Z458 18-3600/30	C <sub>5</sub> ：Cinc. 146 × 60 型 3 立轴动龙门 X3658 Y2032 Z458 18-3600/40
K <sub>1</sub> ：K&T 122 × 96 型 3 立轴动龙门 X4368 Y2692 Z458		
普通车：A <sub>1</sub> ：AMERICAN 2413 型 1 四方刀架 X584 Z1997	D <sub>1</sub> ：Dodge & Shipley Numer-Turn II 型 1 四方刀架 X1981 Z520 0-2000/15	
转塔车：J <sub>1</sub> ：Jones & Lamson 312 NCTL 型 1 数控转塔刀架 X610 Z330	J <sub>2</sub> ：JONES & Lamson 2512NCTL 型 1 数控转塔刀架 X610 Z610	J <sub>3</sub> ：Jones & Lamson 312NCTL 型前后转塔刀架 X381 Y702 六角刀架 Z610
立 车：G <sub>1</sub> ：GISHOLT FRORIEP KE-10 型 主刀架 X800 Z800, 侧刀架 X900 Z900	B <sub>1</sub> ：BULLARD 92 Dynatrol 型 侧刀架 X876 Z1245, 主刀架 U1524 W1282	
立 钻：C <sub>1</sub> ：Cinc. 25 型 1 立轴十字滑台 X1016 Y508	H <sub>1</sub> ：HEALD 20-48 型 1 立轴十字滑台 X3658 Y1220	P <sub>1</sub> ：P&W Tape-0-Matic A 型 1 立轴十字滑台 X508 Y381 90-4500/3
P <sub>2</sub> ：P&W Tape-0-Matic B 型 1 立轴十字滑台 X508 Y381 90-4500/3	P <sub>3</sub> ：P&W Tape-0-Matic C 型 1 立轴十字滑台 X508 Y660	E <sub>1</sub> ：Ekstrom Carlson 110 型 3 立轴动龙门 X1220 Y508 30-1800/15
转塔钻：B <sub>1</sub> ：BURGMASER 2-BHT-XL 型 1 立式六位转塔头十字滑台 X1016 Y508	B <sub>2</sub> ：BUR. 25-AHTL-S 型 1 立式六位转塔头十字滑台 X1016 Y508	B <sub>3</sub> ：BUR. BHTL-SH 型 1 立式八位转塔头十字滑台 X1016 Y508
B <sub>4</sub> ：BUR. ECON-0-CTR. II-25 型 1 立式八位转塔头十字滑台 X1016 Y508	B <sub>5</sub> ：BUR. 3 BHTL-SH 型 1 立式八位转塔头十字滑台 X1143 Y890 Z305	
镗 铣：G <sub>1</sub> ：G&L L1 型 1 卧轴定立柱十字滑台 X2743 Y1828 Z1066	G <sub>2</sub> ：G&L 65-H5-T 型 1 卧轴定立柱十字滑台 X1524 Y1220 Z1066 5-1020/30	G <sub>3</sub> ：G&L 62-H5-T 型 1 卧轴动轴套纵台 X1524 Y1220 Z990
G <sub>4</sub> ：G&L 70-HS-T 型 1 卧轴定立柱十字滑台 X2134 Y1220 Z1066	L <sub>1</sub> ：LUCAS 542-B-84 型 1 卧轴定立柱十字滑台 X1828 Y1828 Z940 9-1200/25	L <sub>2</sub> ：LUCAS 542-B-120 型 1 卧轴带尾座十字滑台 X3048 Y1828 Z1550 W915
坐标镗：P <sub>1</sub> ：P&W* 3E 型 1 立轴十字滑台 X1220 Y711	P <sub>2</sub> ：P&W 4EA 型 1 立轴十字滑台 X1524 Y915	D <sub>1</sub> ：DEVLIEG Spiramatic 4-3H-48 型 1 立轴十字滑台 X1220 Y1220
P <sub>3</sub> ：P&W 3E 型 1 立轴十字滑台 X1220 Y711 Z356 40-1834/3	S <sub>1</sub> ：S.I.P. 7A-CN-4 型 1 立轴动龙门 X1320 Y990 Z305 40-2000/8	D <sub>2</sub> ：DEVLIEG 3H-96 型 1 卧轴十字滑台 X2438 Y915
D <sub>3</sub> ：DEVLIEN 5H-96 型 1 卧轴十字滑台 X2438 Y1524		
钻 镗 机：G <sub>1</sub> ：Gemoor Drivmatic 138 × 3600 型 1 立轴 X91440 Y3505	G <sub>2</sub> ：Gem. dri. 135 × 710 型 立轴 X18034 Y3429	G <sub>3</sub> ：Gem. Dri. 144 × 1400 型 2 立轴 X35560 Y1828 Z915 A ± 10°-25° B ± 15°
G <sub>4</sub> ：Gem. Dri. 144 × 1115 型 2 立轴 X28321 Y1828 Z915 A ± 10°-25° B ± 15°	H <sub>1</sub> ：Hydramatics 72 × 3000 型 1 立轴 X7620 Y2540 Z1524 A30° B ± 10°	

G&L\* 指 GIDDINGS & LEWIS; K&T\* 指 KEARNEY & TRECKER; P&W 指 PRATT & WHITNEY

自 1967 年莫林-24 问世以来, FMS 经过约 10 年的技术开发和研究, 逐渐成熟起来, 70 年代末开始走出实验室, 成为汽车、航空、机床工业的一些先进企业生产线上的主力设备。

据德国马丁博士调查<sup>[27]</sup>, 到 1974 年全世界拥有 FMS 17 条, 1978 年达 38 条, 1981 年增到 87 条, 1984 年达 157 条。据欧洲经济委员会统计<sup>[28]</sup>, 1985 年世界 FMS 已达 349 条。这时 FMS、FMC 技术更为成熟, 并开始形成产业。世界上有近 100 个厂家生产 FMS、FMC 产品, 能成套设计供应 FMS 系统的厂家有近 30 个, 如美国的辛辛纳提·米拉康等。据国际应用系统研究所 (ITASA) 统计, 到 1988 年全世界已拥有 760 条 FMS<sup>[3]</sup>。预计到 2000 年全世界拥有的 FMS 将达到 3 500 条<sup>[29]</sup>, 实际上 FMC 的应用远比 FMS 更多、更普遍, 例如, 1989 年美国拥有 FMS 280 条, 而拥有的 FMC 达到 8 100 条<sup>[30]</sup>, 1994 年日本拥有 FMS 2 194 条, 而 FMC 为 11 506 条<sup>[30]</sup>。

航空、汽车、机床工业应用 FMS、FMC 及 FTL 较多, 到 80 年代中期, 世界主要的飞机公司几乎都应用了 FMS、FMC, 德国 MBB 公司奥格斯堡军机分部实现了全部数控加工任务均纳入 FMS 线内的较高应用水平。

在汽车工业中, 许多知名厂家如通用汽车、本茨、宝马、丰田、雷诺、大众、Volvo、IVECO 等都采用 FMC 及 FMS, 使用 FMS 及 FMC 最好的厂家集中在机床制造业, 如日本的山崎马扎克、法那克, 他们创造了柔性制造自动化的高水平, 经济效益显著。表 3 列出航空工业、汽车工业和机床工业应用的部分实例。

### 3.5 与柔性制造相关配套技术的发展

高效的数控机床仅是实现柔性制造的必要条件, 必须加上高效的 NC 编程工具、高效的工艺规程设计手段、高效的数控刀具、柔性夹具及工艺装备等相关技术的协调发展, 才能形成实施柔性制造的充分条件。限于篇幅, 配套技术的发展从略。

## 4 我国 FMT 的开发与应用

### 4.1 起步阶段

我国数控机床研究起始于 1958 年。北京机床研究所、清华大学、北京航空工艺研究所和北京航空学院相继开展了三坐标数控铣的研究, 尽管未能获得工业应用, 但通过在样机上的刻字, 对数控加

工进行了原理性验证。1966 年, 航空工艺所与机床所合作, 研制出我国航空工业第一台 X53K-1G 三坐标数控铣, 采用磁带输入闭环系统, 电液伺服驱动, 1973 年在 130 厂应用, 加工飞机零件多批。1973 年机床所研制出全国第一台卧式加工中心 JCS-013, 并进行了商品化生产, 对我国数控技术发展起了推动作用, 这一时期还研制出劈锥数控铣和非圆齿轮插齿机, XK-5040 数控立铣, XSK-5040 等商品化机床。1976 年航空工艺所研制出 XSK5040 (IV) G 四坐标数控铣, 用于成飞公司加工带变斜角的天窗凸块、框架零件; 1977 年研制出 SKX-3000 数控龙门铣, 用于成飞加工钢质飞机结构件, 使用情况较好。北京第一机床厂曾为航空工厂研制出 XKD2012/14 四坐标数控龙门铣。

### 4.2 引进—开发阶段

80 年代以来数控机床的发展如表 4 所示。

### 4.3 FMC、FMS 的开发应用

我国 FMS 的开发应用见表 5。

### 4.4 FTL 的开发应用

我国 FIL 的开发应用见表 6。

FTL 突破了大量生产只适用于单一品种的束缚, 一批加工零件可变的柔性自动线应运而生。

### 4.5 数控系统技术的发展

数控系统可靠性差, 曾是 70、80 年代我国发展数控技术的最要害的障碍, 不少国产数控机床故障率高, 不能保持正常生产, 造成用户对国产数控机床失去信心, 遂形成一种心态: 数控机床只能用外国的, 买不起外国数控机至少数控系统要配外国的, 宁可多花钱, 总比买了不能用强。种种严酷的事实告诫数控界的人们, 必须下决心解决可靠性问题。业内人士励精图治, 80 年代中期, 在吸收国外技术的基础上, 确定严格的可靠性考核标准, 采用先进的 CAD 技术, 用引进设备及工艺制板焊接及贴附元件, 对电子元件进行严格的处理和筛选, 生产及最终产品检验严格按国际规范执行, 这样在 80 年代中后期, 情况终于发生了变化, 我国一些有实力的数控系统研制单位开发出一批具有 80 年代中期国际水平的数控系统产品, 这批产品销售之后一直正常运行至今, 如北京“航天”数控集团的用户美联制动设备公司 (合资), 使用“航天”系统 30 多套, 已连续可靠运行 7 年以上, 还有 30 多家用户使用“航天”系统都在 7~8 台以上, 一直

表 3 航空、汽车及机床制造业在用 FMS 举例

Table 3 Examples of FMS in use in aircraft, automobile and machine tool industries

产品类型	用户	建设时间	FMS 供应厂家	主要设备	使用情况
航空	麦道公司圣查理斯分部 (Saint Chales MI)	1985	Giddings & Lewis	TC-2 BM-5 CMM-1 AGV-4 AS/RS-1 DR-3	加工导弹弹体 72 种零件年产 34 800 件, 制造成本降低 50%
	沃特航宇公司 (Vought, Dallas)	1984.6	Cincinnati Milacron	5A/HMC-8 AGV-4 CMM-2 CL-1 LU-2	制造 B-1 轰炸机结构件 5 天 1 批 541 种, 1986 年生产 7 万工时, 相当常规 20 万工时
	波音公司奥本分部 (Auburn, WA)	1985	SHIN NIPPON KOKI	5A/HMC-5 AGV-2 CMM-1 LU-3 AS/RS-1	加工飞机结构件 150 种
	波音公司切塔分部 (Wichita, KS)	1988	Cincinnati Milacron	5A4S/HMC-4 RGV-1 LU-6	加工 A-6 舰载攻击机折叠端翼翼肋铰链 M 形接头等 100 多种零件, 工时省 45%, 产量增加 1 倍
	通用动力公司福特·沃斯工厂 (GE Fort Worth, TX)	1988	DEVLIEG	5A/HMC-6 AGV-2 CMM-1 测量机器人-1	加工 F-16 战斗机结构件, FMS 有智能调度, 加工有刀具破损监控及加工位置误差跟踪补偿, 性能好
工业	凌·特姆科、沃特航宇公司 (LTV)	1989	Ingersoll	5A/HMC-7 (可换主轴头) RGV-2 AGV-2 换刀 R-7 (排屑系统-1)	加工 C-17、B747、B757、B767 的 200 种钛合金件及铝件, 效率提高 1 倍 (铝合金切削主轴头 n=20 000 r/min)
	MBB 公司奥格斯堡军机分部 (Augsburg)	1980	Droop & Rein	FMS-1: 3A-5A/GM-11 HM-5 VM-4 SM-2 MC-2 AGV-4 FMS-2: MC-15 FMC-1 L-5 CG-1 VNC-24	加工狂风战斗机 F-104、F-4 及 C-160 运载机结构件 300 多种, 月产 1 500 多件, 年工时 94 000 h 加工中小结构件 1 500 多种月产 7 000 件, 年工时 110 000 h
	罗耳斯·罗伊斯 (Rolls-Royce)	1986	Cincinnati, Mandelli 及 Heyligenstaedt	5A/HMC-1 4A/TC-4 4A/ MC-4 (主轴头可立卧改变) CRG-1 AGV-3 VNC-29, 共组成 10 个制造单元	制造 RB211 系列发动机等各类涡轮盘及压气机盘 10 种和叶片的部分工序, 使盘的制造周期从 6 个月降为 6 周, 周产达 50 件, 节省在制品费用 175 万美元/年。
机床	普·惠公司 (Pratt & Whitney Comumbus plant)	1986	Ingersoll	PTC-3 AGV-3 (线外运送) RGV-1 (线内运送), 工件托盘条码识别, 运送的毛坯尺寸在线检测	加工 40 种 14 族钛合金及镍基合金盘, 年产 12 000 件, 单件时间从 17 h 减为 2 h, 加工精度高, 制造柔性好。
	Ingersoll Rockford, IL	1986	Ingersoll	HMC-9 AGV-5 (2 辆带 TCR) CMM-3 AS/RS-1	加工 1 500 种机床零件, 年产 25 000 件, 单件时间减为 30%, 工时减少 1/3
床及	山崎马扎克·美浓加茂本部 (Yamazaki Minokamo)	1981	Yamazaki Mazak	TC-12 HMC-21 VMC-3 VNC-24 RGV-6 AGV-6 Robot-17	月产车床及加工中心 120 台, 全厂人员 240 人, 线上 39 人 (一班 20, 二班 19, 三班无人)
	日立精机 (Hitachi Seiki)	1983	Hitachi Seiki	HMC-4 RGV-1 AS/RS-1	加工 79 种机床零件, 3.7 年收回投资
汽车	法努克公司 (FANUC Fuji)	1984	FANUC	加工工厂 FMS: MC-60 FC-5 AGV-4 电机厂 FMS: MC-54 Robot-54 AGV-3 注塑机 FMS: MC-13 TC-5 AGV-1	生产机器人、电火花机床零件, 月产 1 100 套, 机床产品零件 月产 25 000 台, 500 种类的电机 月产注塑机 100 台的零件
	宝马公司 (BMW, Munchen)	1985	Scharman FMS EXCILO FMS Fritz Werner FMS	HMC-14 CL-2 LU-2 RGV-1 HMC-12 CL-2 LU-2 RGV-1 HMC-5 CL-1 LU-1 AGV-1	各类大型发动机汽缸头 4 缸及 6 缸类发动机汽缸头 4 缸及 6 缸汽缸头

系统利用率达 84.8%, 月产能力为 28 800 台

符号注释: 5A-5 坐标; MC-加工中心; HMC-卧式加工中心; VMC-立式加工中心; TMC-车铣加工中心; FC-Fanuc cell 60 柔性单元 (可 72 h 无人化工作); FMC-柔性制造单元; GM-龙门铣; BM-镗铣; SM-超高速铣; L-数控车; TC-车削中心; PTC-桥式车削中心; CG-外圆磨; CRG-蠕进磨; VNC-其他数控机床; CMM-坐标测量机; CL-清洗机; AGV-无轨式自动导引小车; RGV-有轨小车; LU-装卸站; AS/RS-自动仓库; DBR-去毛刺机器人; TCR-换刀机器人。

表 4 引进—开发阶段数控机床的发展<sup>[31]</sup>

Table 4. The development of NC machine tools in introducing - developing phase

开发、引进项目	开发、引进单位	完成时间	使用单位	应用情况
日本 FANUC 5、7、3、6 的许可证生产 JCS-018 我国第一台立式加工中心	北京机床所 北京机床所	1980 年 1981 年	相关机床厂 较广泛的应用	可靠性较高 性能良好 对航空工业效用显著, 如 1984 年沈飞新机研制用五坐标加工出口框架、进气道唇口、风挡样件及零件, 保证了研制的要求 对行业发展有促进
法国福雷斯特航空工业用数控龙门铣合作生产	北京航空工艺所	1980 年	先后为 7 个飞机工厂提供 15 台三、五坐标数控龙门铣及 1 台自研的四坐标机床	
引进开发各类数控机床 200 余种	相关研制单位	80~90 年代	用于机械制造业	
为重大工程项目研制关键设备: ·XK4860 五坐标数控螺旋桨铣床	北京机床一厂	80 年代	大连红旗船厂 10 万吨轮生产	解决了加工螺旋桨关键
·XK715C 四坐标数控叶片铣	上海机床四厂	90 年代	哈汽制造秦山核电站大叶片	解决加工关键, 替代进口
宽 3.1 m 龙门数控镗铣	济南机床二厂	90 年代	重庆 ABB (合资)	解决三峡电站变压器加工关键
16 m 数控立车	武汉重型机床厂	90 年代	30 万 kW 水轮发电机生产	解决加工关键
磨削直径 2 m 的数控轧辊磨床	险峰机床厂	90 年代	冶金、造纸、橡胶业用	可磨任意曲线轴颈表面
1.4 m×4 m 数控龙门坡口铣	济南机床二厂	90 年代	长春客车制造厂	解决客车构架、摇枕加工关键
1.4 m×8 m 数控铣边机	济南机床二厂	90 年代	株洲电力机车厂生产用	解决加工关键
2.4 m×6 m 五面加工中心	济南机床二厂	90 年代	山东潍坊生建机械厂	解决大型机械加工关键
2 m×4 m、2 m×6 m 数控龙门铣	济南机床二厂	90 年代	十堰先锋模具公司等	汽车大型复盖件模具加工
一批汽车工业用高性能齿轮、曲轴数控加工机床	天津、重庆、长江、上海、秦川机床厂等	80~90 年代	国内各汽车发动机制造厂	解决加工关键

表 5 我国 FMS 的开发应用

Table 5. The development and Application of FMS in China

开发的型号	研制单位	完成日期	系统组成	应用情况
JCS-FMS-1	北京机床所	1985	HMC-1 VMC-1 L-2 CG-1 Robot-4 AGV-1	经两年多调试二次开发, 1988 年通过行业评审
BQ-FMS	兵总 55 所与 58 所、华东工学院	1991 建成 1994 扩建	VMC-2 HMC-1 TC-1 CMM-1 AS/RS-1 RGV-1	曾为 627 厂、电子 14 所加工中小型零件, 运行尚好
JCS-MFS-2	北京机床所与天津减速总厂等	1992. 11	VMC-1 HMC-2 RGV-1 LU-1	加工 8 种减速器机座, 运行基本正常
国防科工委 BFEC-FMS	北京航空工艺所与 303 所、南航、北航	1996. 12	5A/HMC-1 5A/GM-1 4A/HMC-1 AGV-1 LU-3 AS/RS-1 CMM-1 CL-1	飞机结构件加工, 为成飞公司加工多批飞机复杂结构件, 运行尚好
863CIMS-FMS	清华大学与北京航空工艺所、机床所等	1992. 12	HMC-1 VMC-1 TC-1 AGV-1 LU-2 AS/RS-1	用于实验、示范、教学

表 6 我国 FTL 的开发应用<sup>[31]</sup>

Table 6. The development and application of FTL in China

柔性自动线名称	研制单位	使用单位	FTL 组成	使用情况
大众汽车变速箱壳体柔性自动线	大连机床厂	一汽大众	一批三坐标 NC 加工模块	年产 36 万件, 节拍 40.5 s, 有工况、刀具寿命监控诊断 Cp>1.33
三菱主轴盖数控加工自动线	大连机床厂	沈阳航空三菱公司		年产 10 万件, 节拍 1.35 min
气缸套柔性加工自动线	大连机床厂	中原内燃机配件厂		年产 20 万件, 节拍 1 min
凸轮轴承盖柔性自动线	大连组合机床所	一汽大众	7 台 NC 机床, 带随行夹具	节拍 38.4 s
变速箱柔性生产线	天津第一机床厂	江西五十铃项目	7 台加工中心	
B3X-001 汽车纵梁柔性加工线	北京第三机床厂		加工中心、钻削中心	加工 5.5~11.79 m 纵梁
摩托车曲轴箱体柔性生产线	北京机电研究院	南方航空动力机械公司	21 台加工中心	年产 20 万套
摩托车制动泵体类零件柔性生产线	北京机电研究院	中航总 605 所		
刹车泵体类零件柔性生产线	北京机电研究院	瓦轴集团 ABS 公司		
摩托车曲轴箱体柔性生产线	北京机电研究院	天津港田铁牛机车车辆厂		
6 缸柴油机缸体柔性线	青海第一机床厂	淄博柴油机厂	提供立式中心及数控镗	
船用柴油机缸体柔性线	青海第一机床厂	上海 711 所	提供 XH768 加工中心	
摩托车柔性生产线	宁江机床厂	春兰集团	8 台加工中心	
摩托车曲轴箱体柔性自动线	北京第三机床厂			日产 300 套
缝纫机壳体柔性生产线	青海第一机床厂	中国标准缝纫机公司	12 台加工中心	

保持可靠运行。上海“开通”销售出的系统，累计也在2 000台以上。北京机床所研制的“中华I型”，沈阳自动化所的“蓝天I型”，华中数控集团的“华中I型”等产品，保持可靠运行的已达5 000台以上<sup>[31]</sup>。实事求是地说，这些严格按标准规范生产的国产系统，可靠性已不存在问题了，至于前面提到的用户心态，要扭转尚需时日，一则多数用户还没有得到使用过国产系统的厂家对系统可靠性的确证信息；再则，市场上尚存在一些劣质系统产品，使国产数控系统的品牌叫不响。看来，宣传工作和市场管理还得加强。此外，鼓励机床厂主动应用国产数控系统也有必要。昆明机床厂销售14台TH5456立式加工中心及34台TPK4680数控坐标镗时，主动配售国产数控系统的作法，颇具民族工业企业家的风范。当然最最要紧的还是数控系统厂家自己要严把质量关，不能砸自己的牌子。

## 5 几个问题的讨论

### 5.1 发展数控机床的必要性

据统计，工业化国家经济总产值的50%（日本）至68%（美国）是由制造业创造的<sup>[32]</sup>，制造业对国家经济发展有决定性影响，而发展机床业是发展制造业的根本。以日本为例，战后经济实力衰落，机床业水平比欧美落后10年，但50年代开始搞振兴，大量引进国外先进机床技术，对名牌机床进行试验测绘仿制，并开展数控机床的基础研究，尽管到1965年，数控机床年产仅39台，但已具备自研的基础，并开始发展有创新意义的数控机床，1970年产量已上升到1 651台，1978年达到7 342台，年产量及出口销量都居世界第一，其成功的关键，就是重视发展数控机床，搞自行研制。

美国之所以是世界第一经济强国，这与60、70年代重视发展机床、特别是为发展数控机床建立了良好的基础有关。以波音公司为例，50年代研制B-52，得到美空军大笔投资，订购了大批数控机床，为日后开发客机打下了基础，后又几经发展，建立了拥有数控机床300台、9个研制分部的强大生产研制基地，凭借技术实力和先进的研制设施，波音公司在世界客机销售市场上常年保持了60%左右的份额，到1996年12月，进而兼并了麦·道公司，扩大了市场优势，民机市场占有率达70%，军机市场占56%，运输机市场占95%。在大型客机方面，现今，除英国航宇还能勉强在竞

争中生存外，大部分公司已纷纷落马。日本多年来曾试图自研大型客机，但鉴于研制基地及研究开发投入的极其庞大，最近也表示放弃。由此可见机床等基础工业对航空、国防的作用。

作为社会主义大国，若没有独立完整先进的机械制造体系，将是脆弱的、不安全的；不发展现代化的、以数控机床为代表的机床工业，只能建成一个二流水平的国家，单靠买是买不来输出国的综合实力和水平的，引进国外先进技术是必要的，但目的是为了自行研制和创新。

### 5.2 发展数控机床的可能性与市场需求

数控机床是发展机械工业，促进国民经济增长的一个牛鼻子。

最近，国家已经明确，要从财政债券资金中，拿出一大笔资金，支持航天航空、国防军工、汽车装备、铁路造船等工业的技术改造，这是我国机床工业大发展的最好契机。

航天航空型号研制，需要增配大量高性能数控机床，据航空工业总公司与航设院前不久的调查统计，我国八个主要飞机制造公司总共拥有三、四、五坐标数控铣床、加工中心才169台，其中五坐标仅54台，相比之下尚不及国外一家飞机公司拥有量的56%，远不能适应“十五”期间我国研制新型歼击机、轰炸机及启动民用飞机开发的需要，显然航空航天工业用数控机床需要大发展。

我国汽车工业近年来有所发展，1997年年产量达158万辆，1999年应达到170多万辆，2010年的目标是600万辆，几乎还要翻两番。汽车工业历来是数控机床业的最大用户，因此，发展汽车工业用数控机床的空间极为广阔。

其他如船舶、电力、机车车辆行业以及机床工业自身的技术改造，也需要数控机床的大发展。

这里所说的数控机床，是数控机床、FMC、FMS、FTL的统称，在实际发展中数控机床、FMC是要首先发展的。随着各行业技改的发展，相应地需要FTL及FMS的发展，由于FMS投资大，发展时宜慎重，并作好充分的可行性论证。

### 5.3 继续发展大批量生产用的机床

我国工业基础较薄弱，各类机械设备中数量极大的通用件，标准件大批量生产用的自动机、组合机床和自动线的发展还很不充分，仍然有很大的发展空间，笔者认为这与发展数控机床并不矛盾，但从国家战略发展的角度考虑，应把重点放到支持数

控机床的发展上。

#### 5.4 发展数控机床要注重实效,按经济规律办事

我国发展数控机床几乎与日本同时起步,日本注重科学精神,先从仿制测绘国外机床着手,逐步走向自行设计,步子平稳,没有大起大落。而在我国,形势起伏的效应很强,不重视基础性试验研究,注重社会效益而忽视经济效益,诸多因素的综合,延缓了数控机床、柔性制造技术的发展,这些都是教训,不能再重演,为此,笔者建议:

1) 用技术经济合同来规范开发项目 新开发的数控机床、数控系统,新型控制驱动元部件的研制,柔性制造技术课题的研究,以签定技术经济合同的形式确定下来,研制方要接受委托方或用户提出的试件加工考核及研制产品技术经济指标考核,达不到要求,可以拒绝验收;应规定必要的保修期及售后服务条款,产品或成果的鉴定验收应以用户和专家为主体,行政不要干预。

2) 建立保护用户利益的规章 设备、工程项目投产试用期间,研制方要负责解决所研制设备或工程项目在运行中出现的问题,对于未及时派员排故造成的生产延误、可靠性未完全达标、质量有遗留问题者,要承担一定经济赔偿;若发现与合同不符合的重大问题,允许退货。

3) 注重树立品牌意识 有眼光的企业应具有创名牌意识,研制设备所采用的新技术要经过试验验证方可用于设计,对研制的设备应有一套合理的检验规范。作为研制方不仅应达到规定的精度和性能,还应优于规范,使出厂产品成为质量信得过的优质品,只有这样才能最终赢得用户、赢得市场。

#### 5.5 高效的企业管理体制是实施柔性制造的前提

柔性制造是未来工业生产的主导模式,是指在企业的制造车间层将主要应用柔性制造方式,它必须在高效的生产经营管理体制下才能发挥效益。不能想象,在原计划经济模式下,在车间与科室脱节、生产的动态信息不明和指挥不灵的管理体制下,能用好柔性制造。因此,我国制造企业生产经营管理体制的改革是实施柔性制造的重要条件。

显然西方国家制造企业的现行管理模式不适合我国,但应参考、借鉴它们正在探索的一些先进管理制造模式,如敏捷制造模式(Agile Manufacturing Enterprise, AME)、精益生产模式(Lean Production, LP)、世界级制造模式(World Class Manufacturing, WCM)、计算机集成制造模式

(Computer Integrated Manufacturing, CIM)等。

CIM的思路是:以信息为媒体,用计算机将企业的各种业务活动领域及其职能(包括从市场分析、产品设计、加工制造到营销等产品开发全过程)集成起来,以追求企业经营的整体优化。

WCM的思路是:以能对全球市场需求作出快速反应为目标,以管理方式创新为核心,以先进制造技术为支持,在信息技术的基础上,通过制造系统中人、设备、工作流程的组合,达到优化配置。

LP的思路是:清除生产中一切浪费和不增值的环节,把责任下放到底层的生产组、项目组(Team),实行及时生产,降低库存,消除废品,以追求生产的尽善尽美。

AME的思路是:在全球信息网络的支持下,敏捷地响应客户及市场的需求,组成动态优化联盟(虚拟公司),用并行工程的方法,以多学科工作组的方式(Team Work)进行产品设计开发,以可重构、可重用、可扩充的柔性制造系统来组织生产,快速低成本地开发出客户满意的产品,并及时投放市场,在竞争中取胜。

上述各种探索模式都有一定的先进性,但都处于探索试验阶段,并没有一个完全成熟的“样板”可供照搬。笔者倾向的看法是,AME的思路更接近于在全球化市场经济环境下,企业又联合又竞争,以赢得用户,究竟如何改革,还得由企业根据自己的特点和市场定位来决定。

#### 参考文献

- [1] Kochan D. CAM Developments in computer-integrated manufacturing [M]. Springer-Verlag Berlin, 1986
- [2] Groover M P, Zimmers E W. CAD/CAM: Computer-aided design and manufacturing [M]. Prentice-Hall Inc., Eaglewood Cliffs, NJ 1984
- [3] Ayres R U. Computer integrated manufacturing [M]. Chapman & Hall, New York, 1991
- [4] Luggen W W. Flexible manufacturing cell and system [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ 1991
- [5] Hartley J. FMS at Work [M]. IFS Ltd, UK, 1984
- [6] Ankeney H E, Jr Bingham D H. Production-proved numerical control: 3 steps from point to point [J]. American Machinist, 1957, 101 (23): 145~155
- [7] Div. of Sundstrand Corp. How to do a day's work in 30 minutes [J]. American Machinist, 1964, 108 (22): 72~73
- [8] Editors. Numerical control: the second decade [J].

- American Machinist, 1964, 108 (22): 119~143
- [9] Hatschek R L. NC today [J]. American Machinist, 1965, 109 (24): 109~116
- [10] Degroat G. New jobs for an old machine [J]. American Machinist, 1967, 111 (20): 136~137
- [11] Editor. Giving big parts their due [J]. American Machinist, 1967, 111 (21): 105~109
- [12] Trends Aerospace. New machine for new plants [J]. American Machinist, 1969, 113 (2): 55
- [13] Hermanson A E. Computer machining online [J]. American Machinist, 1969, 113 (17): 96~103
- [14] Carlson R D. Taking a plunge in DNC [J]. American Machinist, 1969, 113 (15): 84~90
- [15] DeGroat G. Tricky tools build a giant jet [J]. American Machinist, 1969, 113 (25): 69~72
- [16] Herb C O. Convair methods modern as their jet transports [J]. Machinery (N. Y.), 1958, 64 (11): 102~111
- [17] Childs J J. Tapes take over republic thunderchief production [J]. Machinery (N. Y.), 1959, 65 (11): 130~135
- [18] Herb C O. North American tooled up for fighters and bombers of the future [J]. Machinery (N. Y.), 1960, 66 (5): 95~102
- [19] Wallace C F. Machining long panels for DC-8 jetline [J]. Machinery, 1961, 68 (3): 93~95
- [20] Gray R L. Advanced technique for producing stainless steel honeycomb panels [J]. Machinery, 1962, 69 (1): 106~111, 144
- [21] Editor. Eleven-axis NC system speed wing panel machining [J]. Machinery, 1967, 74 (2): 116~117
- [22] Pond J B. Compact machining center monitors itself [J]. Machinery, 1970, 76 (14): 72~73
- [23] Herb C O. 5-Axis tape control profiling under at Douglas [J]. Machinery, 1961, 67 (11): 108~113
- [24] Editor. NC plants in metal working [J]. American Machinist, 1969, 113 (5): 129~133
- [25] Editor. The 12th American Machinist Inventory [J]. American Machinist, 1978, 12 (12): 133~137
- [26] CMTBA INFORMATION [J]. 990908-65
- [27] Mertins K. Entwicklungsstand flexibler Fertigungssysteme, - Linien -, Netz-und Zellenstrukturen [J]. ZWF, 1985, 80 (6): 249~264
- [28] Kochan A. United Nations examines recent trends in FMS [J]. FMS, 1968 (4)
- [29] Tempelmeier H. Flexible manufacturing system [M]. John Wiley & sons Inc., New York, 1992
- [30] CMTBA INFORMATION [J]. 970101-45
- [31] 中国机床工具工业协会行业发展部. 我国数控机床和数控系统的产品开发与市场[J]. WMEM, 2000, (1): 44~50
- [32] 张伯鹏, 等. 推进先进制造技术与制造模式的实施[A]. 见: 海锦涛, 等. 先进制造技术[M]. 机械工业出版社, 1996

## FMT Meets the Needs of 21st Century

Deng Hongchou

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

**[Abstract]** The manufacture industry is faced with serious challenge due to the situation of market globalization. How to change the passive position for most enterprises that lack of competitiveness. The active countermeasures is to go and to meet the challenge. From the strategy point of view, implementing the structural reform, developing the machine-tool industry with NC machine tool as the focal point, should be the right way to promote the manufacture. The author describes the engengering and developing of FMT, which is based on the application of NC machine tool, to proof the feasibility of the strategy and expounds that the strategy is in keeping with the historical certainty of the development of human production mode. The author also expresses his opinion about the problem arising during the reform.

**[Key words]** flexible manufacturing technology; numerical control machine tool; FMC; FMS; FTL