

CAPP 计算机辅助工艺规程编制

何博雄 白万民 周志友

西安工业学院

目 录

第一章 机械制造系统与工艺过程设计	1
§ 1.1 机械制造领域的发展概况	1
1.1.1 材料及制造方法的发展	1
1.1.2 制造精度的发展	2
1.1.3 生产类型方面的情况	3
1.1.4 计算机的发展及其在机械制造领域的应用	5
§ 1.2 生产系统与机械制造系统	8
1.2.1 生产系统的基本概念	8
1.2.2 机械制造系统的概念	10
§ 1.3 机械加工工艺过程设计	12
1.3.1 传统的工艺过程设计工作中存在的问题	13
1.3.2 计算机辅助工艺过程设计	13
1.3.3 CAPP的发展概况	14
第二章 成组技术基础	17
§ 2.1 成组技术的基本概念	17
2.1.1 零件的相似性	17
2.1.2 成组技术的基本概念	19
2.1.3 成组技术的应用领域	20
§ 2.2 零件分类编码系统	21
2.2.1 零件分类编码的定义	21
2.2.2 对零件分类编码系统的要求	22
2.2.3 零件分类编码系统的分类	23
2.2.4 典型零件分类编码系统介绍	25
§ 2.3 成组技术中的零件分组	29
2.3.1 零件分组的概念	29
2.3.2 利用分类编码系统划分工艺相似零件组	30
§ 2.4 成组技术在机械加工中的应用	32

2. 4. 1 工艺标准化和成组工艺	32
2. 4. 2 成组工艺的编制方法	31
第三章 零件信息的描述方法	40
§ 3. 1 零件信息的分类	40
3. 1. 1 零件的几何信息	40
3. 1. 2 零件的拓扑信息	41
3. 1. 3 零件的工艺信息	44
§ 3. 2 零件信息的描述方法	44
3. 2. 1 概述	44
3. 2. 2 模型的维数	45
3. 2. 3 $2\frac{1}{2}$ 维模型的建立	45
3. 2. 4 三维建模方法简介	46
§ 3. 3 一种实用的轴套类零件描述方法	49
3. 3. 1 轴套类零件的信息特征	49
3. 3. 2 主要表面的几何、工艺参数	52
3. 3. 3 数据结构	52
第四章 数据结构	54
§ 4. 1 引言	54
§ 4. 2 线性列表 (List) 结构	55
§ 4. 3 单向链表 (Linked List)	59
§ 4. 4 循环链表与多重链表	65
§ 4. 5 串 (String)	68
§ 4. 6 树 (Tree)	72
§ 4. 7 图 (Graph)	82
§ 4. 8 排序与查找	87
§ 4. 9 数据管理技术与数据库系统	96
第五章 计算机辅助工艺规程设计原理及方法	106
§ 5. 1 工艺规程设计及其自动化 (计算机化)	106
5. 1. 1 工艺规程设计	106
5. 1. 2 工艺规程设计自动化 (计算机化)	107
§ 5. 2 修订式 CAPP 系统的设计原理及方法	107
5. 2. 1 修订式 CAPP 系统的定义	107

5.2.2	修订式CAPP系统的工作流程	107
5.2.3	修订式CAPP系统的原理	109
§ 5.3	创成式CAPP系统	117
5.3.1	概念	117
5.3.2	正向设计和反向设计	118
5.3.3	输入格式	119
5.3.4	决策逻辑	121
5.3.5	工艺规程自动生成的流程	138
第六章	CAPP图形输出的基础——计算机绘图	141
§ 6.1	计算机绘图的发展及应用	141
§ 6.2	计算机绘图系统的基本知识	143
6.2.1	硬件基本知识	143
6.2.2	绘图机的作图原理	148
6.2.3	图形的坐标变换	153
6.2.4	功能绘图软件介绍	158
第七章	CAPP系统的开发	164
§ 7.1	开发系统时要考虑的因素	164
7.1.1	制造系统的特点	164
7.1.2	零件的产量	164
7.1.3	零件族的数目	165
7.2	CAPP系统的研制过程	165
7.2.1	系统分析	165
7.2.2	系统设计	166
7.2.3	应用程序的编制	166
第八章	CAPP技术的发展趋势	167
§ 8.1	CAD与CAPP、CAM的集成	167
8.1.1	零件的几何造型	168
8.1.2	CAD与CAPP系统间的数据共享	171
8.1.3	TIPPS中的CAD数据结构	172
§ 8.2	CAPP智能化趋势	176
8.2.1	目前创成式CAPP系统存在的问题及发展趋势	176
8.2.2	CAPP智能化的关键技术	176

8. 2. 3 国内外研究的进展情况	181
8. 2. 4 进一步研究的方向及问题	182
参考文献	184

第一章 机械制造系统与工艺过程设计

§ 1.1 机械制造领域的发展概况

机械制造是人类一个古老的行业，其起源可以追溯到原始社会，从铜器、铁耙到金属货币，经历了一个漫长的发展过程。近二百年来，随着世界科学技术的巨大进步，大大推动了机械制造工业的迅速发展，由二百年前的个体手工劳动，已经由大规模的机械化、自动化生产方式所替代，过去产品的质量和特性，完全取决于劳动者个人的手艺与经验，而现在，计算机已经渗透到机械制造领域的各个生产环节，整个生产过程可以用计算机进行自动地适应性控制，不仅降低了工人的劳动强度，而且可以提高产品质量及生产率，降低成本。人类在自己的生产活动中，不断地总结经验和采用最新的科学技术来促进生产的发展，同时，在促进生产的过程中，又不断地向科学技术提出新的课题，推动科学技术的进步。研究机械制造领域的发展过程，以及这种科学技术与生产互相促进，共同发展的历史，不仅可以理解今天的科学技术同发展生产的关系，而且能够预测未来的生产及其所依赖的科学技术的发展方向。

§ 1.1.1 材料及制造方法的发展

材料的发展与产品的发展密切相关，关于材料伴随着产品发展的情况，如图 1-1 所示，从图中所表示的产品发展过程可以看到，继 1770 年瓦特发明蒸汽机以后，陆续出现了 Daimler 汽油发动机，Parson 蒸汽轮机，高速斜齿轮，柴油发动机，1910 年左右出现了滚动轴承，以后又发展出燃气轮机，喷气发动机等，在本世纪五十年代，则出现了导弹和人造卫星，而今天航天飞机已经进入实用阶段，人类正在开创宇航的新时代。

随着产品的发展，材料也不断发展，由图中可见，1770 年出现的第一台蒸汽机，它所用的材料主要是低碳钢和铸铁，这些材料的极限拉伸强度很低，约为 2100 公斤力/cm^2 ($30 \times 10^3 \text{ 磅力/inch}^2$)，1770 年以后很长一段时间内，材料强度方面没有发生明显的变化，但是随着产品性能和结构要求的提高，例如要制造燃气轮机，就必须要有耐热、耐磨的新材料，于是出现了耐热耐磨的合金钢，1950 年左右，由于发展飞机和人造卫星的需要，又出现了钛及钛合金，随后又发展了高强度钢以及各种新

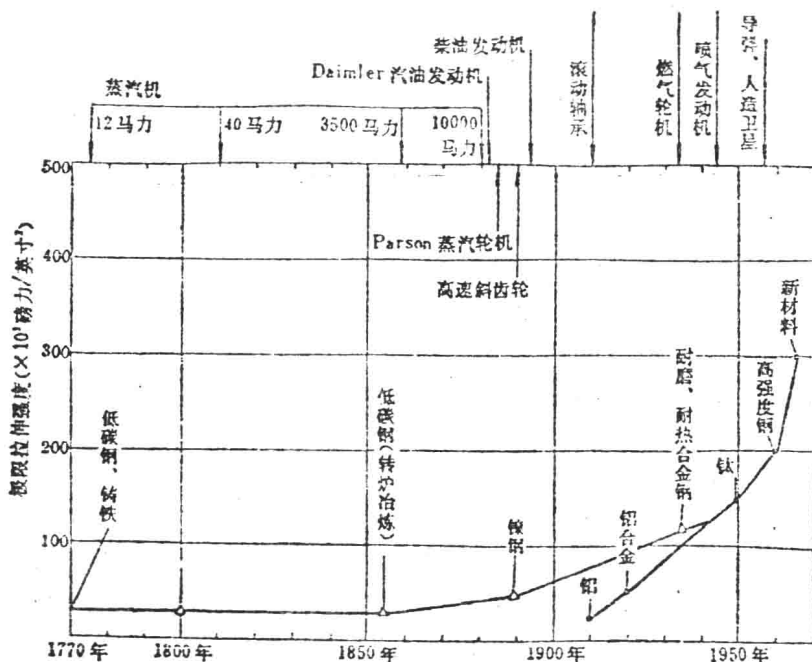


图 1—1 材料的发展

材料，使材料的极限拉伸强度达到 $21100 \text{ 公斤力}/\text{cm}^2$ ($300 \times 10^3 \text{ 磅}/\text{inch}^2$) 即比 1770 年提高了 10 倍。

材料的发展对制造方法的发展有很大影响，随着材料性能的提高，加工方法就必须相应地改进，尤其是出现了高强度钢以后，用传统车削、铣削、磨削等加工方法，已很难对用这类材料制造的零件进行加工，于是新的加工方法相继出现，如电火花加工，电化学加工，电子束加工，激光加工等等，可见，加工方法的发展是与材料性能的发展，产品结构的改进，以及性能要求的提高密切相关的。

§ 1.1.2 制造精度的发展

近二百年来，制造精度的发展如图 1—2 所示，在 1770 年，制造第一台蒸汽机汽缸用的 Wilkison 汽缸镗床，所能达到的制造精度约为 1mm ，而汽缸本身设计所要求的精度为一个磨损了的先令，可见当时的机械制造业的水平是很低的，后来，随着产品性能要求的不断提高，加工方法的不断改进，制造精度也不断提高，相继出现了 Stowell 螺纹加工机床，Whitney 铣床，Fitch 转塔车床等等，上述车床所能达到的加工精度见图 1—2，第二次世界大战期间，又出现了光学比较仪。二次大战后，在喷气发动机、导弹及其控制系统的发展过程中，出现了电子比较仪，继而又出现了测量精度可达 0.5 微米 的 Tal y rond 圆度仪，而 Tal y rond 本身的制造精度，比其所能达到的测量精度还要高一个数量级，例如圆度仪上的一个标准球，其加工精度为 0.01

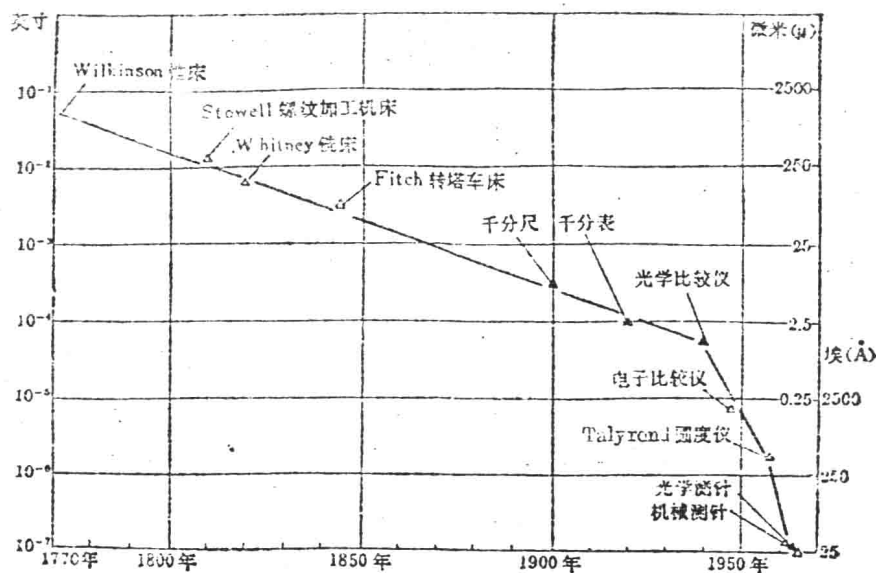


图 1-2 制造精度的发展

微米。本世纪六十年代以后，由于大规模、超大规模集成电路的发展，需要能测量极小尺寸的测量仪，其测量精度要求达到 $20 \sim 30$ 埃（ $1 \text{ 埃} = 10^{-7} \text{ mm}$ ），于是，Talyron 圆度仪制造厂和另一家生产光洁度测量仪的公司，共同研制了一种 Talystep 测量仪，该测量仪所用的测量头，是一种很小的机械测针，它的测量精度可达 $25 \text{ \AA}$ ，这就是近年来发展起来的微细加工新技术。

由此可见，制造精度和测量技术是随着产品性能的不不断提高而发展，同时由于制造精度和测量技术的发展，又促使产品性能的不不断提高，这就是它们之间互相依赖、互相促进的相互关系。

§ 1.1.3 生产类型方面的情况

1972 年以前，国际生产工程研究协会（CIRP）曾对美国、日本、欧洲各工业部门所采用的生产类型进行过一次调查，其调查结果如图 1-3 所示。

从图 1-3a 可见，单件生产的零件品种，占生产零件种类种数的 35% 左右，小批生产的零件约占 50%，大批生产（指一万至几万件）约为 10%，而大量生产（指十万件以上）只占 5% 左右，这些比例数字有一定的变化范围，但基本上反映出当时这些国家生产类型的情况。

我国对机械工业的统计表明，批量为 $10 \sim 100$ 件的零件约占生产零件种类种数的 70%，单件生产还不包括在内。由此可见，无论在国际或国内，单件、小批生产的零件占大多数，这种情况今后必将继续存在，随着科学技术和生产技术的进步，产品更新换

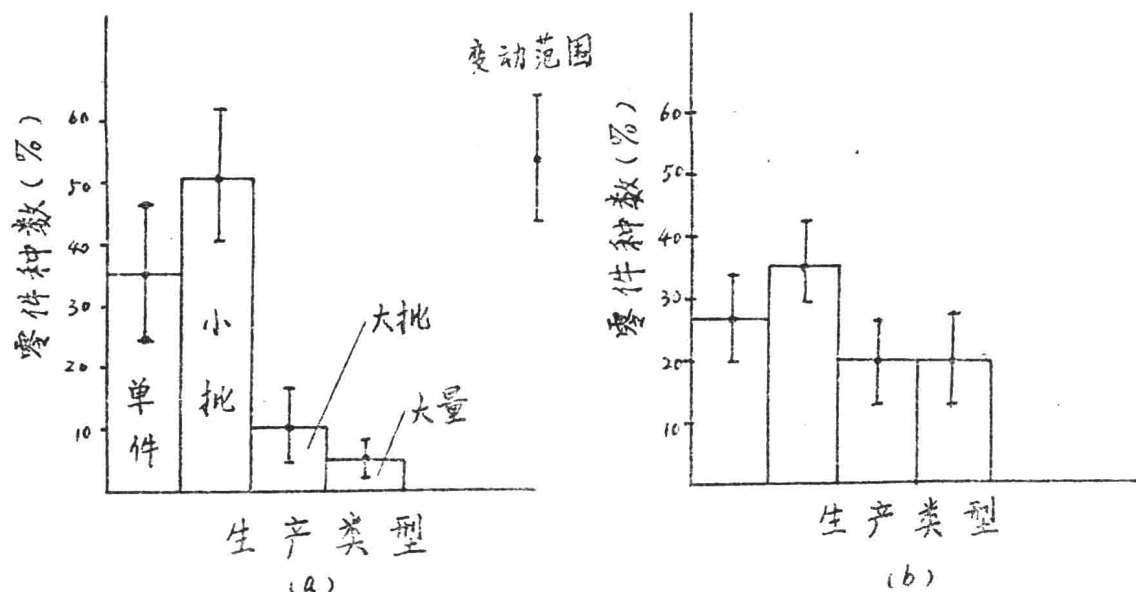


图 1—3 生产类型的分布

代的周期越来越短，同时由于市场竞争的需要，以及人类生活需求的多样化，产品的品种规格，将会不断增加，因此，多品种、小批量生产在今后不仅不会减少，而且还有增长的趋势。

从产值来说(图 1—3b)，单件、小批生产所占的比例也很大，约占全部零件产值的 60%。

为了提高生产率和降低生产成本，对如何组织各种批量的零件生产，已进行了许多研究和实践，这些研究和实践表明，对于大批量生产，应尽可能采用专用机床、组合机床、专用工装并按流水线组织生产，而对大量生产则应组织机械化、自动化的生产线。自动线的生产是按节拍自动地、连续地进行的，这不仅大大减少了工件的装卸、换刀、测量等辅助时间，而且减少了工序间的运输等待时间，此外，还减少了生产工人数量和对工人体力和技能的依赖。例如美国底特律福特汽车公司，它是世界上第一个采用自动化生产线进行大量生产的公司，该公司采用自动线生产 10~12 年后，不仅大幅度地提高了生产率，而且使得每辆汽车的制造成本降低为原来的 $1/3$ 。

至于单件小批生产，传统的生产方式大都按产品组织生产，采用机群式布置设备方式，用普通机床和通用、专用工装进行生产，因此生产率是很低的。据统计，小批生产中工件在车间内停留的时间如果为 100，那么工件在机床上的时间仅占其中的 5%，其余的 95% 的时间是材料、工件的运输和等待时间，如图 1—4 所示，在这 5% 工件在机床上的时间中，实际进行切削、磨削等的机动时间又只占 30%，而 70% 的时间是花费在工件的装卸、定位、换刀、测量等辅助工作上。

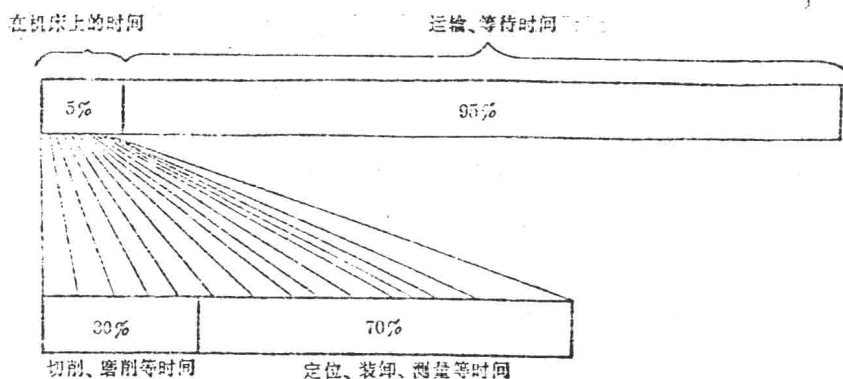


图 1-4 小批生产中零件制造过程的时间分配

由此可见，要提高小批生产的生产率，缩短生产周期，不仅要不断地提高切削、磨削等加工效率，努力减少工件的装卸、定位、换刀、测量时间，改变机动时间与辅助时间的比例关系，尤其重要的是要尽量扩大工件在机床上的时间比例，减少生产中材料、工件的运输和等待时间。现在由于计算机技术在机械制造中的应用，已经能够借助计算机把若干台机床连结在一起，组成柔性制造系统（Flexible Manufacturing System），这种制造系统使工件在机床上的时间比例扩大到 70~80%，这是小批生产制造方法的一大进步。

§ 1.1.4 计算机的发展及其在机械制造领域的应用

第一台电子计算机是在 1946 年研制成功的。四十多年来，它以惊人的速度向前发展，现在的计算机无论在体积、价格方面，还是在功能和应用范围方面，都已经发生了巨大的变化。为了对它的过去、现在和未来有一个初步了解，下面就它的发展历史和应用情况作一简单介绍。

（1）计算机体积的变化

从 1946 年研制成功第一台电子计算机起至 1958 年，这个时期的计算机，它的信息位都是用电子管来实现的，因此它的体积很庞大，这个时期的计算机属于第一代。例如五十年代初期的一台通用电子计算机，其占地面积约为 8.5 平方米，如图 1-5 所示。晶体管出现后，计算机进入第二代，这个时期的计算机，它的信息位是用晶体管来实现的，因而计算机的体积明显地缩小，到了 1964 年以后，由于微电子学的发展，出现了集成电路，体积更加缩小，这是第三代计算机，集成电路的发展，导致以大规模集成电路为基础的微处理机和微型计算机的出现，这种计算机被称为第四代计算机，自从 1971 年美国 Intel 公司研制成功第一台微处理机以来，微处理机和微型计算机的发展突飞猛进，现在，美国、日本、法国等国家许多计算机公司都在重点开发系列微型计算机。

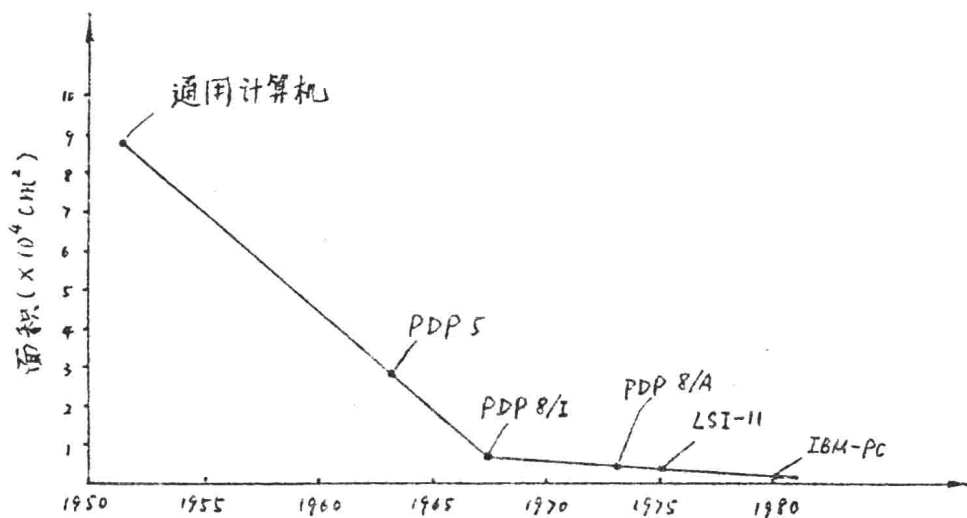


图 1-5 计算机的微型化

(2) 计算机价格的变化

微处理机的种类，按字长分有 4 位、8 位、12 位、16 位和 32 位，随着集成度的提高和制造工艺的发展，制造成本也越来越低，图 1-6 所示为近二十年来计算机存储器 RAM 每位价格的变化情况。

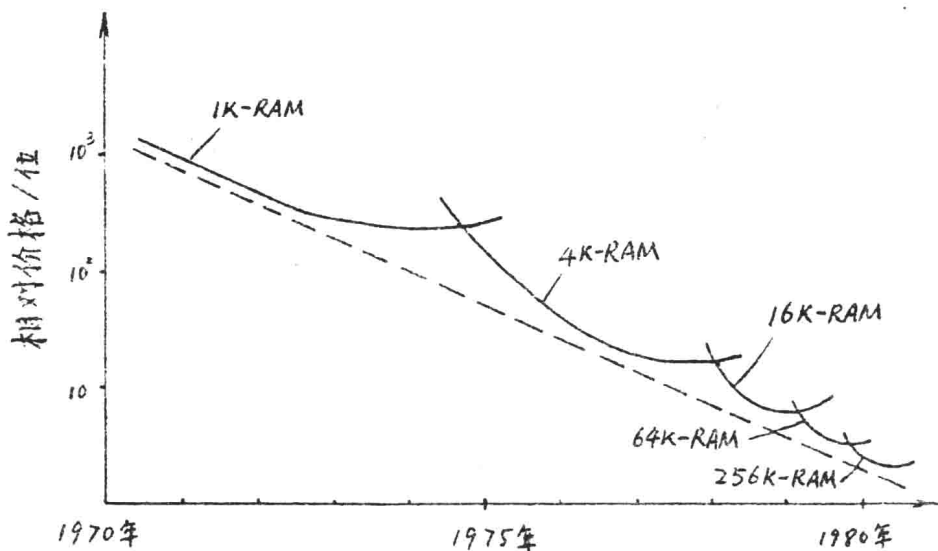


图 1-6 RAM 价格的变化情况

假设七十年代初容量为 1 K 的 RAM，其每位的价格为 1000，那么到八十年代中期，512 K 位的 RAM 每位相对价格只有 1~2，也就是说，现在每位的价格仅为原来的 0.1%~0.2%。

随着计算机及其元器件制造工艺水平的提高,计算机的价格不断地、大幅度地下降,例如美国通用自动化公司 1977 年生产的 GA/330 小型计算机,价格仅为 3500 美元,它的功能超过了该公司 1970 年生产的售价为 35000 美元的小型计算机,而在 1965 年生产的具有相似功能的计算机,其价格高达 350000 美元,可见计算机价格变化之迅速,近十年来,计算机价格的变化如图 1—7 所示。

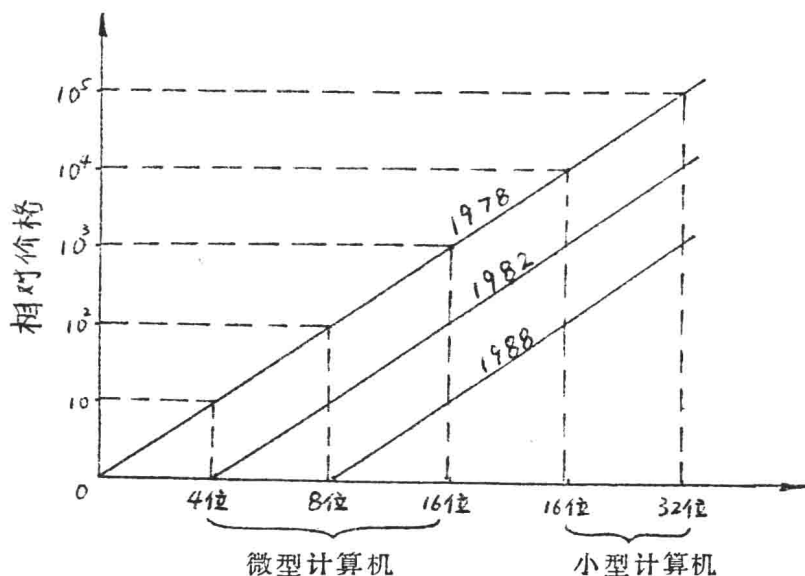


图 1—7 计算机价格的变化

(3) 计算机在机械制造领域的应用

近二十年来,由于电子技术和计算机技术获得了巨大的发展,促使机械制造业发生了深刻的变化,计算机在机械制造业各方面的广泛应用,使得机械工业的劳动生产率得到了大幅度的提高,同时在缩短产品设计及制造周期,提高和保证产品的性能和质量、改善劳动条件、改进企业经营管理和节约能源等方面,也取得了显著的经济效益。

计算机在机械工业中的应用的的发展过程,大致可分为两个阶段:

第一阶段:50年代和60年代,首先出现了数控技术,并初步发展了CAD技术与CAM技术,从而使得机械工业的自动化水平得到了迅速提高。

在这一阶段,数控技术得到了迅速发展,自从1950年美国麻省理工学院(MIT)研制成功第一台数控机床以来,相继出现了数控(NC)、直接数字控制(DNC,亦称群控),适应性控制(AC)等技术,并得到各工业发达国家的重视。现在,数控机床的年产量约占全部金属切削机床的五分之一,产值则占全部机床总产值的一半以上。

在这一时期,还初步发展了CAD技术以及CAM技术,当时的CAD技术主要偏重于数据处理及图形处理,CAM则偏重于生产过程控制,如CNC系统的APT语言。

第二阶段：从 70 年代开始至今，在原来发展的基础上，机械工业广泛吸取了各个领域的最新科技成果，把电子技术、计算机技术、激光技术、信息论及人工智能等应用于机械制造的整个生产过程，一些国家发展了 CAD/CA M 系统，微型计算机的 CNC 系统，柔性制造系统（FMS）、集成制造系统（IMS）和计算机网络系统，使生产的规模达到了车间或工厂的综合自动化水平。图 1—8 为计算机应用于机械工业两个阶段的对比情况，其中，A——数控技术，B——数据处理及图形处理，C——生产过程控制及辅助管理。

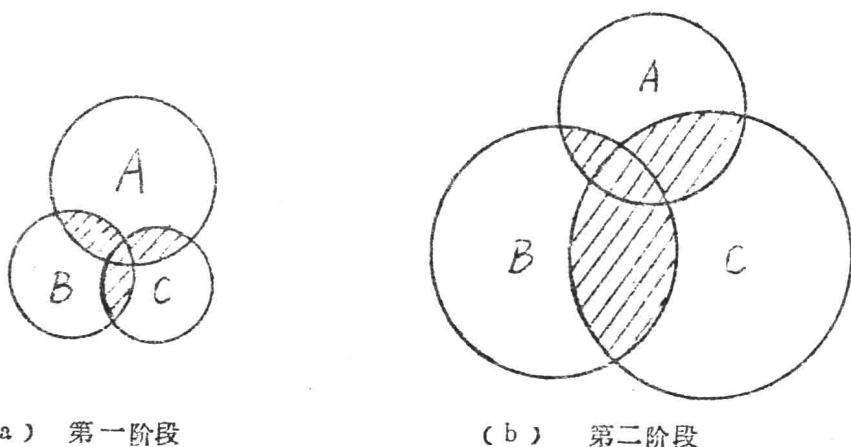


图 1—8 计算机在机械工业中的应用的变化

从图中可以看出，在第一阶段，数控技术的应用得到了迅速发展，而在第二阶段，虽然在数控技术方面有一定的发展，但在数据及图形处理、生产过程控制及管理得到了更加迅速地发展。

§ 1.2 生产系统与机械制造系统

1.2.1 生产系统的基本概念

工厂是社会生产的基层单位，企业应该根据国家的发展规划、市场供销情况以及自身的生产条件，决定自己生产的产品类型和产量，制定生产计划，进行产品设计、制造、装配等。最后输出产品，所有这些生产活动的总和，用系统的观点看，就是具有输入和输出的生产系统。

图 1—9 所示为生产系统最简单的框图，首先要有生产的动机，有了正确的动机，

再同必要的设想、技术知识和经验结合起来，进行生产决策，然后根据这一决策进行产品设计，安排生产计划、制定生产流程等。

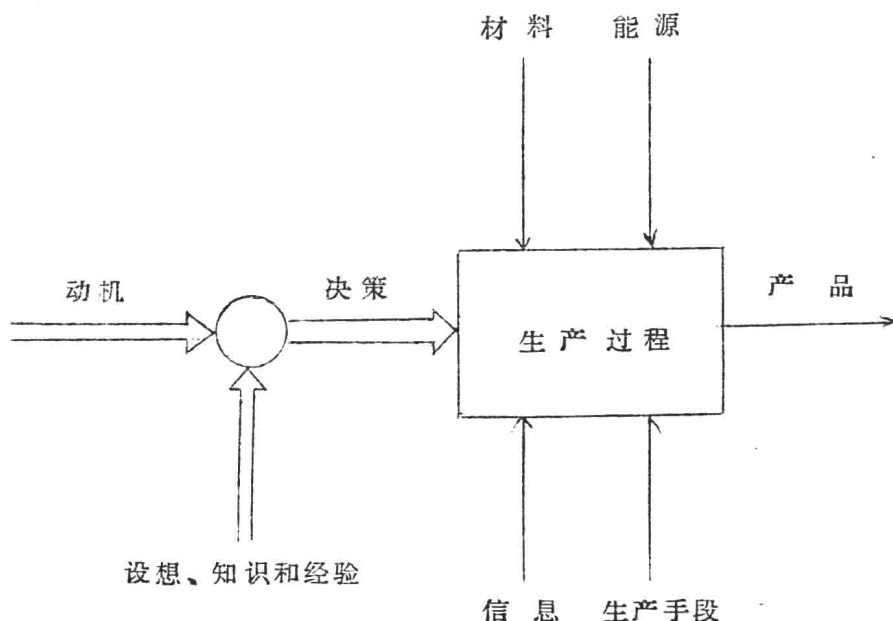


图 1—9 生产系统的基本概念

在生产过程中，则必须输入材料、能源、信息（如图纸、加工参数、市场情况等）以及生产手段（如机器、厂房、工具等），把这些综合组织在一起进行生产，最后便得到产品输出。

图 1—10 是一个生产系统的基本框图，虚线框内所表示的是一个生产系统。虚线框外表示生产系统的外界环境。

整个生产系统的生产过程分为三个阶段：

第一阶段是决策和控制阶段。在此阶段中，工厂最高决策机构根据生产动机，必要的设想、技术知识、经验以及市场情况，对生产的产品类型、产量作出决定，同时对生产过程进行控制和指挥。

第二阶段是产品设计和发展阶段。

第三阶段是产品制造阶段。

每个阶段的工作过程中，都需要和数据库交换必要的信息，此外，在第三阶段中，还必须从外部输入能源和材料。经过上述三个阶段的活动，系统最后输出所生产的产品，产品投放市场后，还需将竞争能力、质量评价、改进要求等信息反馈到决策机构，以便于决策机构及时地对生产作出新的决定。

以上是用系统的观点来看待生产过程的各个环节，以及它们之间的相互关系，用系

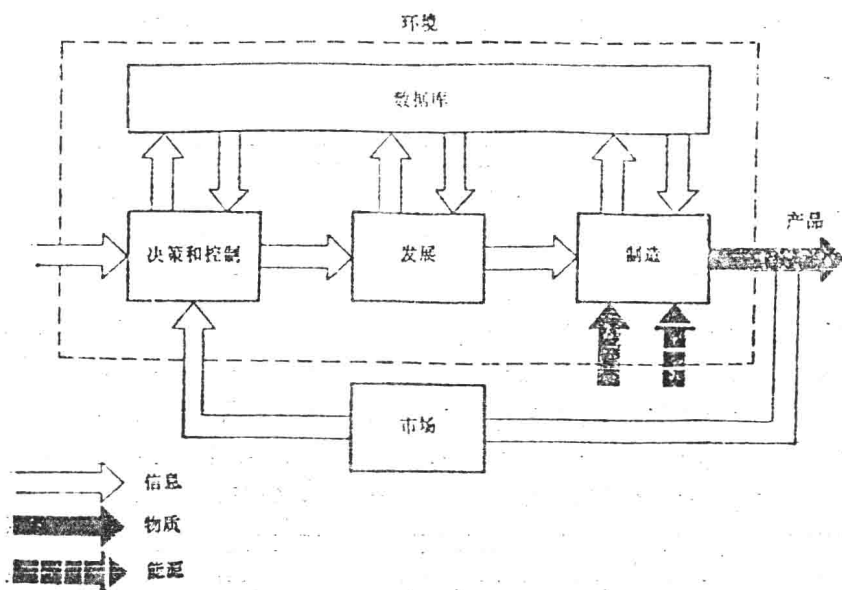


图 1—10 生产系统的基本框图

系统工程学的原理和方法来组织生产、指挥生产，可使工厂的生产和管理科学化，可使企业按照市场的情况，及时地改进、调节生产，不断地进行产品更新，以满足社会的要求，可使生产的产品质量更好，周期更短，成本更低。因此，系统工程学越来越普遍地得到企业的重视和采用。

1.2.2 机械制造系统的概念

长期以来，人们对于机械制造领域所涉及的各种问题，往往都是孤立地看待，对于机械制造中所采用的机床、工具和制造过程，仅限于分别地、单个地加以研究，因此，在很长的时期内，尽管在机械制造领域中取得了许多卓越的成就，然而在大幅度地提高小批量生产的生产率方面，并未发生重要的突破。直到六十年代后期，人们才逐渐认识到，只有把机械制造的各个组成部分看成一个有机的整体，以控制论和系统工程学为工具，用系统的观点进行分析和研究，才能对机械制造过程实行最有效的控制，并大幅度地提高加工质量和生产率，基于这种认识，人们进行了许多研究和实践，于是出现了机械制造系统的概念。

机械制造系统既然被看成是一个系统，就必然有输入和输出，如图 1-11 所示，输入的是材料或毛坯等信息，输出则为加工后的零件、部件或产品等。

机械制造系统的任务：

(1) 将材料或毛坯转变成一定形状和尺寸的零件或产品。

- (2) 提高工件的质量, 使之达到所要求的形状精度、尺寸精度和表面质量。
- (3) 尽可能使制造过程在最佳条件下进行, 以达到高效率 and 低成本的目的。

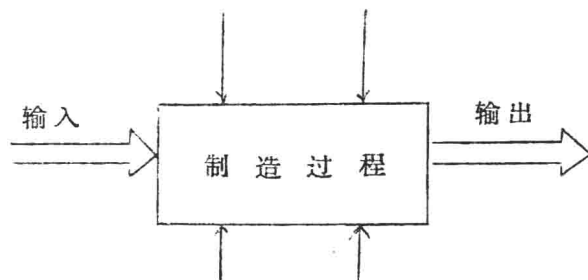


图 1— 11 制造系统的概念

为了说明机械制造系统的概念, 下面以一个只包括单台机床的机械制造系统(图 1— 12)为例, 对其各组成部分及相互关系加以分析。

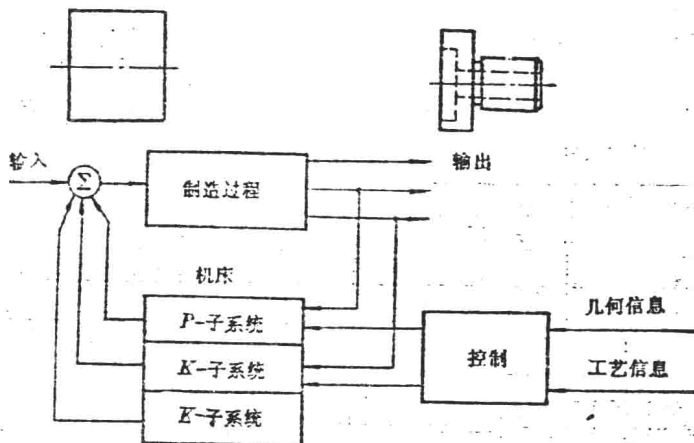


图 1— 12 机械制造系统的组成

1 机械制造系统的组成

机械制造系统的基本组成部分包括机床、工具和制造过程, 一个机械制造系统就是由这三部分所组成的闭回路系统。

机床: 用来向制造过程提供工具与工件之间的相对运动, 以及为转变工件形状、质量提供能量, 它包括三个子系统:

- (1) 定位子系统(P—子系统)。用以建立工具与工件的相对位置。
- (2) 运动子系统(K—子系统)。为加工提供切削速度 v 和进给量 f 。
- (3) 能量子系统(E—子系统)。为加工过程提供能量。

工具: 根据系统的加工方法不同, 工具可以是车刀、铣刀、砂轮或电加工用的工具电极等, 工具与定位子系统相联, 并且通过运动子系统与工件和控制过程形成闭回路。

制造过程：对输入的材料或毛坯以及其它信息进行加工、转变的过程。

输入指的是具有一定几何参数（形状、尺寸、精度、表面粗糙度）和物理参数（材料性质、表面层状态等）的材料、毛坯或半成品，以及刀具等。

输出指的是加工后的零件、材料切除量、刀具的磨损等。

2 机械制造系统的分类

机械制造系统可以根据其结构、拥有机床的数量以及系统的控制水平进行分类。

（1）根据系统拥有的机床数，可把系统分为单级制造系统和多级制造系统。

单级制造系统只拥有一台常规或 NC、CNC 机床，这种系统可以是车削制造系统、磨削制造系统等。

由于零件加工过程往往要经过多道工序、多台机床才能完成，如果把零件的整个制造过程看成是一个系统的话，则这种制造系统称为多级机械制造系统。具有 m 台机床的多级系统称为 m 级机械制造系统。

（2）根据系统的结构情况，可把系统分为常规制造系统和数控制造系统。

常规机械制造系统所拥有的机床为常规机床，这种系统的控制水平很低，一般为手工控制、凸轮或靠模控制。

如果将单级制造系统与专用的或通用的控制和数据处理系统结合在一起，就构成了 NC 或 CNC 制造系统，在 m 级 NC、CNC 制造系统中，所有机床若由一台通用计算机进行集中控制，则形成 DNC 制造系统，这些 NC、DNC 制造系统都是数控制造系统。

另外，还可以根据系统的控制方法和控制水平，把系统分级。控制方法主要有：人工控制、P 控制、K 控制，计算机辅助编程，几何适应性控制，优化控制，联机计算机控制，直接数字控制和监控。其中，人工控制的水平最低。

§ 1.3 机械加工工艺过程设计

随着计算机在机械制造领域的应用和发展，在不断取得技术进步和企业生产效益增长的同时，又给机械制造领域提出新的课题。目前，计算机应用比较成熟的领域有：NC 或 DNC 技术、计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助编程以及适应性控制等，在取得这些应用成就的同时，人们还在探讨机械制造业发展的前景与关键技术。如于 60 年代末提出的柔性制造系统（FMS），得到了世界各工业先进国家的重视和发展，它是由数控加工机床、装卸机器人、运送小车以及对各组成部分进行集中控制的计算机系统组成，实现了从输入毛坯、技术信息到输出产品整个制造过程的柔性自动化。在 FMS 的