

## 第二章 制造自动化系统典型设备及其控制

### 2.1 加工设备

#### 2.1.1 专用自动化机床及自动线

##### 2.1.1.1 专用自动化机床的分类与结构

使用专用自动化机床是大批量生产提高生产率降低成本的重要途径。专用自动化机床往往具有投资省、见效快等特点，因而在大批量生产中被广泛采用。

自动机床或半自动机床主要用于轴类和盘套类零件的加工自动化，如单轴自动车床、多轴自动车床等。用户一般可根据加工工艺和生产纲领的需要向制造厂购买，不需特殊订货。这类机床的最大特点可以根据生产需要，在更换或调整部分零部件（例如凸轮或靠模等）后，可加工不同的零件，适合于大批量少品种生产。因此，这类机床使用比较广泛。

专用机床是按一种零件（或一组相似的零件）的一个加工工序而专门设计制造的自动化机床。专用机床的结构和部件大都是专门和单独制造的，这类机床的设计、制造往往时间较长，投资也较大，因此采用这类机床时，必须考虑以下基本原则：

- （1）被加工的工件除具有大批量的特点外，还必须结构定型。
- （2）工件的加工工艺必须是合理和可靠的。在大多数情况下，需要进行必要的工艺试验，保证专用机床所采用的加工工艺先进可靠，所完成的工序加工精度稳定。
- （3）在机床上采用一些新的结构方案时，必须进行结构性能试验，待取得较好的结果后，方能在机床上采用。
- （4）必须进行技术经济分析。只有在技术经济上效果明显，才能采用专用机床实现单机自动化。

图 2-1 所示为单轴自动车床的一个实例。

作为专用机床的实例，图 2-2 所示为一台专门加工 MZ-1 型煤电钻端盖零件的三工位十面半自动转塔车床。

##### 2.1.1.2 刚性自动线的组织设计

###### 1. 自动线的发展历史

刚性自动线是由流水生产线方式发展而来的。20 年代美国 Henry Ford 创立了汽车工业的流水线，由此揭开了现代流水生产的序幕。福特流水线的主要内容可以包括以下两个方面：

（1）实施零件和产品的标准化、设备和工具的专用化以及工场专业化。为了追求高效率和低成本，福特认为首先要将生产集中于唯一最佳的产品型号，提出了所谓的“单一产品原则”。福特汽车公司曾在 20 年间连续生产 T 型汽车，由此而奠定了现代流水生产线的基础。这种“单一产品原则”在当今市场需求日益多样化的环境下也许已不再适用，但在当时的经济条件下却适应了美国的国情，福特汽车公司也由此而迅速发展起来。

零件标准化是产品标准化的进一步发展，目的在于提高零部件的互换性，减少零件种数和扩大生产批量。零件标准化后，便于分别组织专业化工厂或车间制造，这样可以采用高度专门化的设备和工具，从而达到生产的高效率。由于工人的作业活动是不断地重复同一作业，所以作业和操作也可以实现标准化。

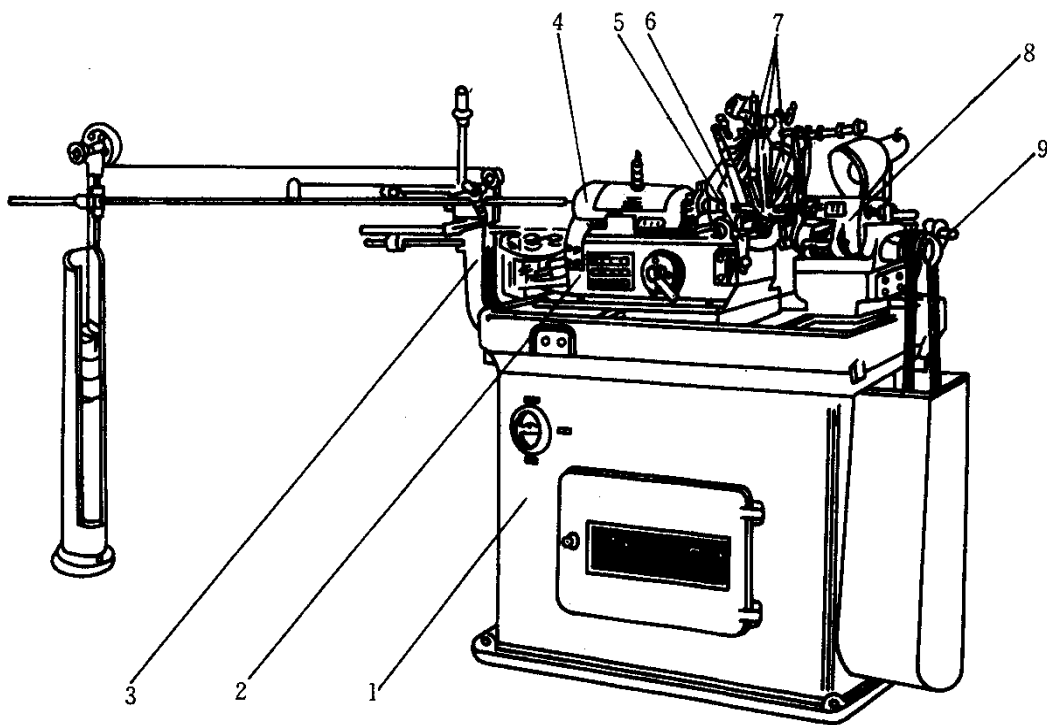


图 2-1 CM1107 型单轴纵切自动车床外形图

1—底座 2—床身 3—送料装置 4—主轴箱 5—天平刀架  
6—中心架 7—上刀架 8—钻铰附件 9—分配轴

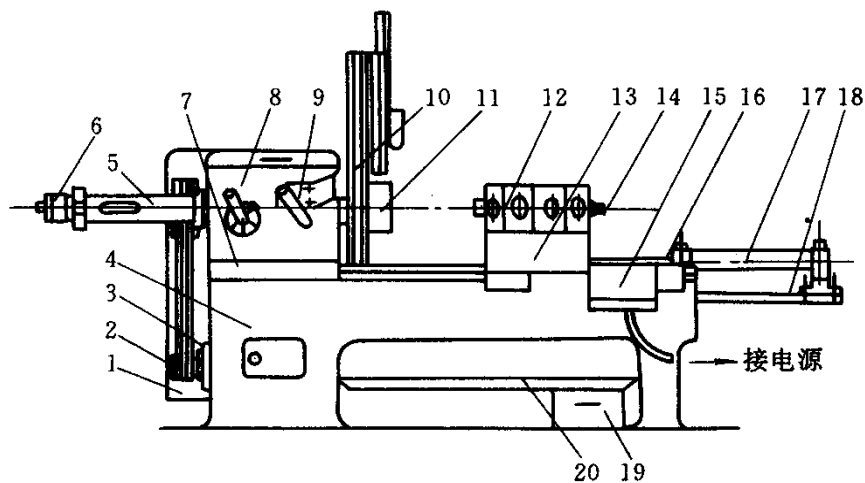


图 2-2 半自动转塔车床外形结构图

1-带传动罩 2-带轮 3-电机 4-床身 5-换心机构 6-换心液压缸 7-垫 8-主轴箱  
9-立刀架支架 10-立刀架 11-小型回转工作台 12-转塔头 13-转塔座 14-刀具 15-  
操纵盘 16-进给液压缸活塞杆 17-进给液压缸 18-液压缸座 19-冷却液箱 20-油盘

(2) 创造了流水作业的生产方法，建立了传送带式的流水生产线 由于传送带的广泛应用，使得原材料均可在使用机械装置搬运的移动中，加工成为各种零件。而部件装配和汽车总装配，则采用移动装配法完成。由于把生产工序分细，大大提高了操作熟练程度和劳动生产率。作业的速度也为传送带的速度所规定，借助于传送带的应用，使生产过程的各项作业能在同一时间进行

并且各种零部件在各条流水线的投入和产出互相衔接配合，不至于发生在制品过多或不足的现象，恰能保证总装配线的需要，形成同步化的流水生产体系。

起源于福特制的流水生产方式近一个世纪以来在工业中得到了广泛的采用，并且在内容上和形式上不断地创新。进入本世纪后半期，在二次世界大战之后迅速崛起的日本又出现了被称之为“准时生产制”(JIT 生产方式，其详细内容在本书中另有论述)的新型流水生产方式，使这一制造业的主要生产方式又进一步得到了发展和创新。现在，流水生产线不仅用于产品的装配和零件的机械加工，而且在铸造、锻造、热处理、电镀、焊接、油漆以及包装等方面，也都得到了广泛的应用。

流水生产线开始出现时，采取的是单一对象流水线的形式，以后又出现了多对象的可变流水线 and 成组流水线。流水生产线的组织大大提高了工作的专业化水平，使各工序采用高效率的专用设备和工艺装备成为可能。50 年代以后，专用设备、专用工装同机械化运输装置、电气控制装置相结合，很自然地向着自动化发展。开始出现自动化、半自动化的流水线，即被称之为刚性自动线。特别是电子计算机和自控技术的发展，极大地促进了生产过程的自动化，不仅使各种类型的刚性自动生产线成为可能，而且出现了自动化的车间和工厂。

2.自动线生产的基本特征 自动线生产是指工件按照一定的工艺路线，顺序地通过各个工作地，并按照一定的生产速度(节拍)完成工艺作业的连续重复自动生产的一种生产组织形式。自动线生产的基本特征如下：

(1) 工作地专业化程度高，在自动线上固定地生产一种或几种工件，而在每个工作地上固定完成一道或几道工序。

(2) 生产具有明显的节奏性，即按照节拍进行生产。所谓节拍，是指自动线上出产相邻两件制品的时间间隔。

(3) 各道工序的工作地设备数量与该工序单件工时的比值相一致(若不一致则需要临时缓冲库)。即，如设自动线上各道工序的工作地设备数分别为  $s_1, s_2, s_3 \dots s_m$ ；各工序的工时定额为  $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$ ；自动线生产节拍为  $r$ ，则：

$$\frac{t_1}{s_1} = \frac{t_2}{s_2} = \frac{t_3}{s_3} = \frac{\Lambda}{\Lambda} = \frac{t_m}{s_m} = r$$

上述公式所表明关系，是保证生产过程的比例性和平行性的要求所决定的。

(4) 工艺过程是封闭的，并且工作地设备按工艺顺序排列成链索形式，工件在工序间作单向移动。

(5) 工件如同流水般从一个工序转到下个工序，消除或最大限度地减少了工件的因等待加工而耽搁的时间和机床设备加工的间断时间，生产过程具有高度的连续性。

(6) 工件从进入加工工位到所有工位操作完成，均在主控制器的控制之下自动完成。这种自动过程不仅包括工件的流动自动化控制，还包括机床的加工全过程的自动化控制。

仅满足上述前面 5 项特征的生产线，只能称之为流水生产线，还不能称之为自动生产线。加工设备由专用自动化机床或组合机床组成的，能加工固定一种或少数几种相似零件的自动线称之为刚性自动线。加工设备由数控机床或加工中心等组成的可加工多品种少批量零件的自动线称之为柔性自动线。

在刚性自动化生产条件下，生产过程的连续性、平行性、比例性、节奏性都很高，所以它具有可以提高加工设备专业化水平、提高劳动生产率、增加产量、降低产品成本、提高生产的自动

化水平等一系列优越性。但是反过来也有不少不利的地方。例如：由于设备高度专用化，对产品的变化缺乏适应力；一旦在某处发生设备故障，就有可能导致全线停车，带来较大的损失；生产率的调整幅度不可能很大；技术改造困难较大等等。

3. 自动线的分类 自动线有多种形式，可以按照不同的标志进行分类：

(1) 按工件的移动方式来分，可分为固定自动线和移动自动线。固定自动线是指工件固定，加工设备及工具沿着顺序排列的工件移动，经过一个循环完成一批工件的加工或装配。例如重型机器机座等的加工及装配，大型部件的焊接加工等。移动自动线是指工件移动，加工设备、工具位置固定，工件经过各道工序的工作地(设备)进行加工或装配后，变成成品或半成品。

(2) 按自动线上加工零件的数目来分，可以分为单一产品自动线和多品种自动线。设计单一产品自动线的必要条件是在制品的产量很大，能够保证自动线的设备有足够的负荷。如果产量不够大，不能保证设备足够的负荷则只有增加在自动线上生产的在制品品种，组织多品种自动线。

(3) 按生产的连续程度来分，可以分为连续自动线和间断自动线。在连续自动线上，零件从投入到出产连续地从一个工序转向下一个工序，不停留地进行顺序作业，无论在加工或传送中都没有等待停歇现象。连续自动线通常用于大量生产中，是一种较为完善的自动线形式。设计连续自动线的条件是所有工序的各个加工时间等于自动线的节拍或是其整数倍。由于工艺条件的限制等原因是不平衡的，因而在单位时间内各个工序上所能生产的产品数量是不等的，这就使零件在工序间不能连续移动而产生了间断时间。存在间断时间的自动线称为间断自动线。

(4) 按自动线的节奏性程度来分，可分为强制节拍自动线、自由节拍自动线和粗略节拍自动线。强制节拍自动线是准确地按照既定节拍加工零件的自动线，这种自动线对设备、工艺和工人的操作有严格的要求。设计强制节拍自动线的必要条件之一是采用自动化的物流设备，这种设备严格地按时传递零件，保证节拍的实现。最常用的这种物流设备是传送带(在本文的第三章将作专门介绍)。强制节拍自动线一般用在大量生产。

在自由节拍自动线上，不要求严格按节拍出产产品，生产节拍主要靠工人的熟练操作和加工设备的生产性能来保证，因而可能有波动。自由节拍自动线一般在大量生产或成批生产的装配车间和机械加工车间中采用。

粗略节拍自动线的特点是各个工序的加工时间与自动线节拍相差很大，如果按节拍组织生产，就会使机床设备和工人处在时断时续工作的状态。为了充分地利用人力和设备，加工设备可以在一段时间内连续地进行生产，各个加工设备经过不同的时间达到相同的产量。因此，可以确定一个合理的时间间隔(如半个工作日，一个工作日，一天等等)，并按它组织各个加工设备连续生产。这样既能避免各个加工设备生产的时断时续，较合理地利用人力和设备，又能够在一定程度上保证产品生产的节奏性。这个规定的时间间隔就是粗略节拍。粗略节拍自动线也是一种间断自动线。

4. 刚性自动线的组织设计

(1) 组织自动化生产的必要条件 组织自动化生产须具备一定的条件，这些条件主要是：

1) 产品结构和工艺相对稳定。在产品结构方面，要求所设计的产品结构能反映现代科学技术成就并基本定型；有良好的工艺性并符合自动化生产工艺及工序同期化的要求；能分解成可独立进行加工、装配与试验的零部件，以便于组织自动线的平行生产；有良好的互换性，保证加工与装配时间的稳定。在工艺方面，要求产品的工艺能稳定地保证产品质量；采用先进的经济合理的工艺方法、高效率的专用机床、组合机床、自动化或半自动化机床和专用工夹具。

2) 工艺过程能划分为简单的工序，又能根据工序同期化的要求把某些工序适当合并和分解，

各工序的工时不能相差太大。

3) 产品产量足够大, 单位劳动量也较大, 以保证自动线各加工设备有足够的负荷。

(2) 刚性自动线的组织设计和技术设计 建立自动线之前, 首先必须作好自动线的设计工作。自动线设计得正确与否, 对自动线投入生产以后是否能顺利运行和企业的技术经济指标将有很大影响。

自动线的设计包括技术和组织设计两个方面。自动线的技术设计是指工艺路线、工艺规程的制订、专用设备的设计、设备改装设计、专用工夹具设计、物流设备的设计以及控制系统、信息系统的设计等等, 通常可称为自动线的“硬件”设计。自动线的组织设计是指自动线的节拍和生产速度的确定、设备需求量和负荷的计算、工序同期化设计、工人配备、自动线的布局设计、自动线工作制度、服务组织和标准计划图表的制订等等, 也称为自动线的“软件”设计。

自动线的技术设计和组织设计的关系十分密切。组织设计是进行技术设计的前提和根据, 技术设计应当保证组织设计的每一个项目的实现。当然, 进行组织设计时也必须考虑到技术设计的可能性。此外, 无论是自动线的组织设计还是技术设计, 都应当符合技术上先进、经济上合理的原则, 并事先充分做好建立自动线的可行性研究。本节重点介绍自动线的组织设计, 自动线的技术设计将结合在其它章节的各加工设备的介绍中进行论述。

(3)自动线组织设计的准备工作 在设计自动线之前, 要做好以下各项准备工作:

1) 进行产品零件的分类。分类的目的有两个, 第一是为了明确适于和不适于用自动线加工的零件和部件; 第二是对于用自动线制造的零件选定自动线的形式。为了达到第一个目的, 应当将企业、车间的零件按结构与工艺的相似性进行分类, 然后根据产量和工时定额加以衡量, 确定是否适于组织自动化生产。为了达到第二个目的, 应当按适合于自动化加工的零部件进一步分类分组, 即按照零件的形状、尺寸和工艺过程的相似程度进一步详细分类, 然后对每个零件或每类零件的产量和工时定额进行核查, 将可以使用单一产品自动线加工的零件和可以使用多品种自动线加工的零件组分别编制零件明细表。对使用多品种自动线加工的零件组, 应检查加工各工序的设备型号、规格和加工精度的一致性, 防止发生同类工艺所采用的加工设备不一致的情况。

2) 改进产品结构, 使之适合于自动线加工。 产品的零部件应保证充分的互换性, 零部件的各结构要素应尽量标准化和通用化。这与非自动化生产相比是一个较严格的要求, 这里不允许有修配和刮研工作, 因为这些操作的劳动量波动大, 将有可能影响自动线按节拍进行生产。同时, 也应当对零部件的精度和公差要求进行检查, 用修配方法达到的精度在自动化生产中管理难度较大。

3) 审查和修改工艺规程。 其内容包括: 在一条自动线上生产的零件或零件组的全部工序应封闭地在自动线上完成; 零部件的加工(装配)基准应力求一致; 各部件的装配和零件的加工顺序要尽量一致; 提高工序作业的机械化程度, 减少手工操作, 使工序时间保持稳定。

4) 收集整理设计所需资料。如现有设备明细表, 有关车间的厂房建筑和生产面积资料, 车间平面布置图, 工时定额与超额完成系数, 技术组织措施计划等等。

(4)自动线组织设计的一个实例 单一产品自动线的组织设计 单一产品自动线组织设计的一般程序是:

一确定自动线的节拍;

一确定各工序所需的加工设备数, 计算设备负荷系数;

一进行工序同期化;

- 一计算所需作业人数;
- 一确定自动线节拍性质, 选择运输方式和物流系统;
- 一进行自动线平面布局设计;
- 一编制自动线标准计划图表。

1) 确定自动线的节拍 节拍是自动线最重要的工作参数, 它表明自动线生产速度的快慢或生产率的高低。自动线节拍的计算公式为:

$$r = \frac{F_e}{N} = \frac{F_o \cdot e}{N}$$

式中  $r$  自动线节拍(分/件)  
 $F_e$  计划期有效工作时间(分)  
 $N$  计划期内生产的产量(件)  
 $F_o$  计划期内制度工作时间(分)  
 $e$  时间有效利用系数

系数  $e$  主要考虑设备检修时间、设备调整时间与更换工具时间, 以及工人班内休息时间等因素, 一般取 0.9~0.96。

如果计算出来的节拍数值很小, 同时工件的体积、重量也很小, 不适于按件传送时, 则需实行成批传送。这时, 顺序加工两批同样零件之间的时间间隔称为节奏或运输批节拍, 它等于节拍与运输批量的乘积, 用公式表示为:

$$r_g = r_n$$

式中  $r_g$  节奏(分/批);  
 $r_n$  运输批量。

自动线采取成批传送零件方式时, 正确设计运输批量, 对于合理使用物流系统, 减少运输时间, 充分利用生产面积和减少在制品数量, 都有重要的意义。

2) 确定各工序所需的加工设备数, 计算设备负荷系数 为了使在制品在自动线各工序间平行移动, 每道工序的加工设备数目应当是工序时间和自动线节拍之比, 即:

$$S_i = \frac{t_i}{r}$$

式中  $S_i$  自动线第  $i$  道工序所需加工设备数(台);  
 $t_i$  自动线第  $i$  道工序的单件时间定额(分/件)。

工序单件时间定额内应包括把加工零件从传送带上取走和放上的时间。

计算出来的设备数若为整数, 就可以确定它是该工序的设备数。若不是整数, 则采用的设备数  $S_{ei}$  应取接近于计算数的整数, 一般  $S_{ei} \geq S_i$ 。在这种情况下, 该工序在加工每个工件之后发生间断, 其数值为:

$$t_{ei} = r - \frac{t_i}{S_{ei}}$$

式中  $t_{ei}$  第  $i$  道工序加工每个工件之后的间断时间。

由于计算出的设备数往往不是整数, 而采用的设备数只能是整数, 所以设备负荷必然出现不足的情况。反映此情况的指标称为设备负荷系数( $K_i$ ), 其计算公式如下:

$$K_i = \frac{S_i}{S_{ei}}$$

工序数为 m 的自动线的总设备负荷系数(Ka)等于:

$$K_a = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \Lambda + S_m}{S_{e1} + S_{e2} + S_{e3} + \Lambda + S_{em}}$$

式中 m 自动线上工序数。

设备负荷系数决定了自动线作业的连续程度。一般根据它来决定自动线是连续的还是间断的。当 Ka 值小于 0.75 时, 宜设计间断自动线。假如大多数工序的工时定额超过自动线的生产节拍, 可考虑采用两条或三条加工同一零件的自动线, 这样比只采用一条自动线而每道工序的加工设备数目很多, 便于组织管理。在这种情况下, 对每条自动线来讲, 生产节拍相应地增大。

3) 工序同期化 工序同期化是组织连续自动线的必要条件, 也是提高设备负荷, 提高劳动生产率和缩短产品生产周期的重要方法。所谓工序同期化, 就是通过技术组织措施来调整自动线各工序的工时定额, 使它们等于自动线节拍或者与节拍成整数倍关系。

工序同期化一般分为两步进行。首先是初步同期化。在初步同期化过程中, 主要是找出影响同期化的关键因素, 解决这些关键问题, 使各工序的单件工时定额与自动线节拍之比基本上达到 0.85~1.05 的范围内。同期化的第二步是在自动线的调整过程中进行, 这时主要是发现初步同期化的遗留问题并加以解决, 以进一步提高工序同期化的水平。

机械加工工序同期化的主要措施有:

① 在影响同期化的关键工序上, 通过改装机床, 增加机床附件、同时加工多个零件等办法, 来提高工序的同期化水平。

② 采用高效专用工艺装备, 以减少装夹零件、更换刀具和测量尺寸的时间。

③ 改进加工设备布局与操作方法, 减少辅助作业时间。

④ 改变切削用量, 如加大切削速度与走刀量, 减少走刀次数, 以减少工序的机动时间。

⑤ 加强对工人的培训, 提高工人的操作熟练程度和工作效率, 以提高装夹速度。

工序同期化后, 各工序所需要的加工设备数会发生变化。因此, 应根据同期化之后的工序工时定额重新计算加工设备的需求量, 并重新计算设备负荷系数。

4) 计算所需作业人数 在以手工劳动和使用手工工具为主的自动线上下料工位上, 工人人数按下式计算:

$$P_i = S_{ei} \cdot W_i \cdot g$$

式中  $P_i$  第 i 工序所需工人人数(人);

$W_i$  第 i 工序每一工位同时工作人数(人/工位·班);

$g$  每日工作班次(班);

$S_{ei}$  自动线上实际采用的上下料工位数。

整个自动线的上下料工人人数, 就是所有上下料工位的工人人数之和。在计算工人数量时, 要考虑后备工人。

5) 确定自动线节拍性质, 选择运输方式和物流系统 自动线节拍的性质主要取决于自动线的连续程度。如果所设计的自动线是连续自动线, 那么就应当在工序同期化的基础上确定选用强制节拍还是自由节拍。其主要选择依据是工序同期化程度和加工零件的重量、体积、精度以及工艺性等特征。当工序同期化程度较高、工艺性良好、加工对象的重量、精度以及其他技术条件容许严格地按节拍加工零件时, 应当采用强制节拍。当实现强制节拍有困难, 不能很好地实现同期化、工艺尚不够稳定时, 可采用自由节拍。在间断自动线上, 通常采用自由节拍或粗略节拍。

运输方式和物流系统在自动化生产中占有重要的地位。不同类型的自动线需选用不同类型的运输方式和物流系统，反过来，运输方式和物流系统又起着保证自动线生产节拍实现的重要作用。

在强制节拍自动线上，为了保证严格的节拍，通常采用三种类型的传送带：分配式传送带，连续式工作传送带和间歇式(脉动式)工作传送带。分配式传送带用于工序之间传送加工零件，允许各工序的工时有小的波动。这种传送带一般用于产量较大的小型产品的生产。连续式工作传送带和间歇式工作传送带严格按节拍所需要的速度运动，零件一般装在传送带上加工或装配。其中连续式工作传送带常用于产量较大的产品加工或装配，间歇式工作传送带则用于工序时间较长、产量不太大而精度要求较高的零件加工或装配。

在自由节拍自动线上，由于工序同期化水平和连续程度较低，一般采用连续方式运输带、滚道(辊道)以及平板运输车、运输箱、滑道等运输工具。这些运输装置的共同特点是允许工序间储存一定数量的在制品，用以调节节拍的摆动。

在粗略节拍自动线上，由于生产连续性很差，一般采用滚道、重力滑道、手推车、吊车、叉车等运输工具。在滚道和重力滑道上，在制品运输时间很短，且允许工序间储存一定的在制品，以调整工序的不同生产率，保证粗略节拍的实现。吊车通常同时为几个加工设备服务，而且运输效率不高，一般用于批量较小的重型零件加工自动线。手推车用于运输储存在工序间的数量较大的在制品，在加工中小型零件的粗略节拍自动线上使用。

6) 自动线的平面布局设计 进行自动线的平面布局设计时应遵循这样一些原则：有利于工人操作方便；在制品运动路线最短；有利于自动线之间的自然衔接；有利于生产面积的充分利用。这些原则同自动线的形状、自动线内工作地的排列方法、自动线的位置以及它们之间的连接形式有密切关系。设备的选择与布局将在另外的 2.4 中进行介绍。

7) 编制自动线标准计划图表 由于自动线的每个加工设备都是按一定的节拍重复完成规定的工序，所以有可能为自动线制订标准计划指示图表。自动线标准计划指示图表将反映自动线各项工时定额标准、工作制度和 work 程序。它是编制月度作业计划的重要依据。

连续自动线各道工序的生产率比较协调，所以其标准计划图表的编制工作比较简单，只需规定整个自动线统一的工作时间和间断时间。间断自动线标准计划图表的编制则比较复杂，需要分工序规定每一加工设备的工作时间与 work 程序。

## 2.1.2 组合机床自动线

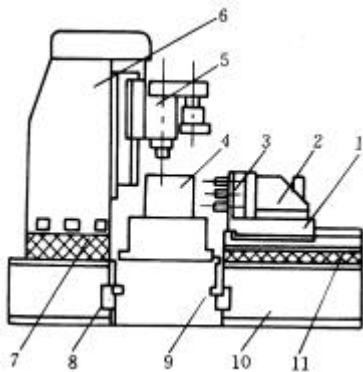
### 2.1.2.1 组合机床的概述

1. 组合机床的概念 组合机床，是近年来发展较快的一种具有新型加工方式的机床。所谓组合机床，就是以通用部件为基础，配以少量的按被加工零件特殊要求而设计的专用部件，对一种或几种被加工零件按预先确定的工序进行加工的高效机床。它既具有专用机床的结构简单、生产率和自动化程度较高的特点；又具有一定的重新调整能力，以适应工件变化的要求。它可以把机床分解为若干个具有一定功能的独立部件，对其中一些能够在机床上相互通用的部件，预先设计、制造，使这些部件标准化、系列化和通用化，专供配置和组成组合机床时应用。这种具有特定功能，按标准化、系列化、通用化原则设计制造的组合机床基础部件，称为组合机床的通用部件。在生产中可以根据工件加工要求、利用这些通用部件，再设计和制作少量的专用部件，就可以组成组合机床了。当加工的工件改变时，则只要重新设计和制造新的专用部件，与组合机床通用部件一起重新配置，组合成能适应新的加工要求的组合机床。

图 2-3 为组合机床外观图。它由滑台 1、动力箱镗削头 2、钻削头或铣削头 5、主柱 6、主



柱底座 8、中间底座 9、侧底座 10 等通用部件，以及多轴箱 3、夹具 4、调整垫 7、11 等专用部件所组成。上述专用部件中也有不少零件是通用零件，因此给设计、制造和调整带来极大的



方便。

图 2-3 组合机床外观图

1-滑台 2-动力箱镗削头 3-多轴箱 4-夹具 5-钻削头或铣削头  
6-主柱 7-调整垫 8-主柱底座 9-中间底座 10-侧底座 11-调整垫

2. 组合机床的主要特点

(1) 组合机床主要是由通用部件配置组成。组合机床的部件大部份(70% 以上) 是通用部件，这些通用部件如前所述，可以根据工件的不同加工要求而进行配置组合。各种通用部件虽然结构有所差异，但它的在组合机床上的工作性能是协调的。因此无论组合机床采用哪种配置的组合形式，只要掌握了通用部件的使用方法，就可以触类旁通了。

(2) 组合机床可以从几个方向对工件同时进行加工，所以组合机床上的加工工序是很集中的。只有对各部件的运动顺序、速度、以及运动、停止、正向、反向等，都做到心中有数，在使用中有条不紊，才能发挥出组合机床的生产效能。

(3) 组合机床在操作使用和配置时需要精心调整。因为组合机床可以从几个方向同时进行加工，参加切削的刀具也较多，加工过程基本上是自动的或半自动的，所以对于机床、刀具、夹具以及辅助工具等的每一环节，都要精心调整，否则出现了问题，就会影响整个组合机床(或自动线)的加工进程。因而掌握调整技术是很重要的。

3. 组合机床的加工范围 组合机床一般可以完成的加工内容有钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、攻丝、套丝、切端面、镗止口、挖沟槽、倒角等。此外，也可以进行一些简单的装配工序（如压套、压堵头等），还可以实现抛光等工序。

目前组合机床正在向扩大加工范围的方向发展，今后将逐步扩大到仿形加工、磨削、拉削等。组合机床还能进行某些非切削性的加工，如检查、清洗和零件的分类及打印等。

2.1.2.2 组合机床自动线的设计

1. 组合机床及其自动线的型号表示方法 组合机床及其自动线分类代号的意义，如表 2-1 所示。其型号的表示方法如下：

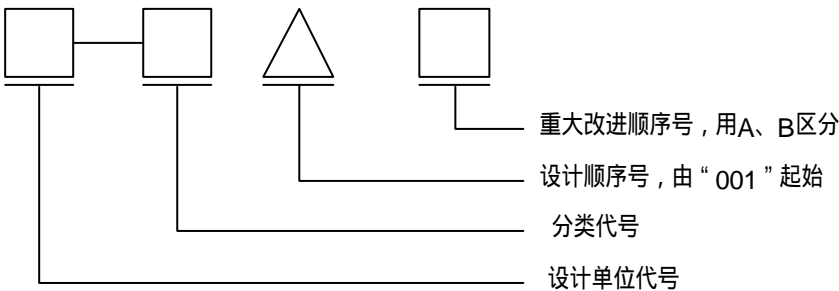


表 2-1 组合机床及其自动线的分类代号

分类	大型组合机床	小型组合机床	大型组合机床 自动线	小型组合机床 自动线	自动换刀数控 组合机床
代号	U	H	UX	HX	K

例如：ZHS—U 1 6 0 A，表示大连组合机床研究所（ZHS）设计的第 1 6 0 台（1 6 0）经过第一次重大改进的（A）大型组合机床（U）。

2. 组合机床的通用部件功能及型号 组合机床的通用部件分类如下：

(1) 动力部件 动力部件是指滑台、各种切削动力头（箱）、多轴箱、转动装置等。它是完成组合机床刀具切削运动和进给运动的部件。只完成进给运动的动力部件叫动力滑台。动力滑台加装切削头，既能完成刀具切削运动又能完成进给运动的动力部件叫动力头。

(2) 输送部件 输送部件用来完成工件在加工中的输送工作。通用的输送部件主要有：分度回转工作台、移动工作台等。

(3) 支承部件 支承部件是组合机床上的基础部件，它是组合机床的“骨架”。主要有主柱、主柱底座、中间底座、侧底座等。

(4) 夹具部件 夹具部件是指定位销及其操纵机构、夹紧机构、导向装置、钻模板与托架、攻丝装置、板手等。

(5) 控制部件 是指液压元件、气动元件、控制板、档铁等，也包括电气、数控等部件。它是组合机床的“中枢神经”。

(6) 其它部件 常指刀具、测量装置、排屑、润滑及冷却装置等。

组合机床通用部件的分类字头代号的含义见表 2-2，其型号表示方法如下

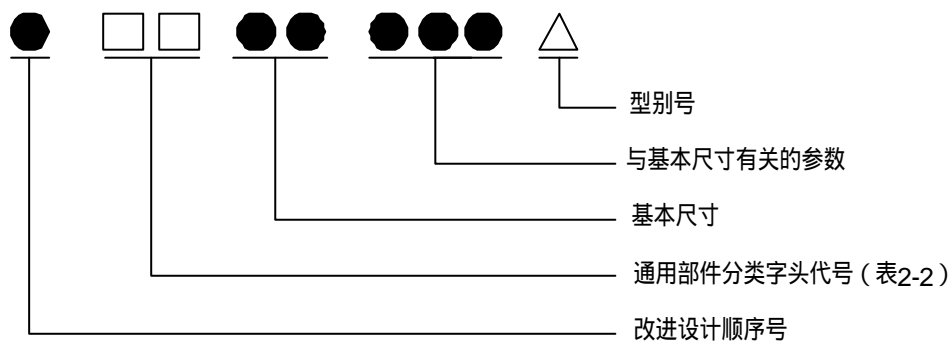


表 2 — 2 通用部件分类字头代号

通用部分	字头代号	通用部件	字头代号
动力箱	TD	液压滑台	HY
立 柱	CL	侧底座	CC
支 架	CJ	镗车头	TC
机械滑台	HJ	镗削头	TA
钻削头	TZ	铣削头	TX
立柱底座	CD	中间底座	CZ

3. 组合机床的选配 根据工件加工的工艺需求，将通用部件和专用部件组合起来，选配成各种形式的组合机床。

组合机床的选配方式有两种：

(1) 单工位组合机床 单工位组合机床是选配形式中最简单的一种。因夹具位置固定不变，适于完成较简单工艺的大型、中型工件的加工。动力部件可以配置为卧式（如图 2-4a 所示），或配置为立式（如图 2-4b 所示）的单面型的配置；还可配置成卧式双面型（如图 2-6a），立卧复合双面型（如图 2-6b），立卧复合三面型（图 2-6c）。为了方便排屑，还有配置成倾斜型如图 2-5 所示。

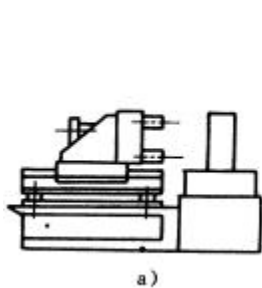
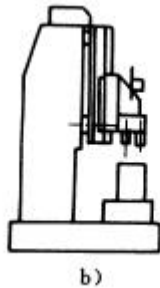


图 2-4 组合机床单面型配置

a) 卧式单面型



b)

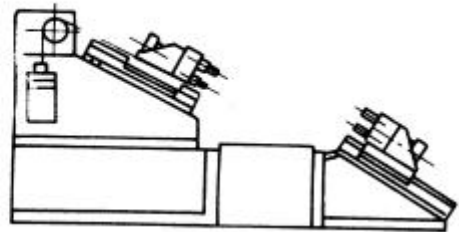
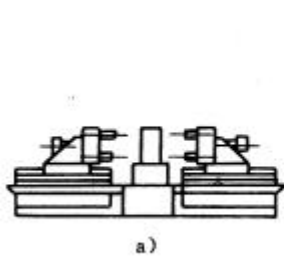
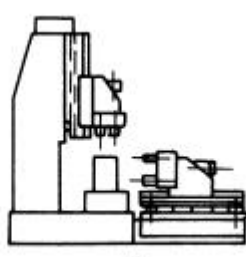


图 2-5 组合机床倾斜型配置

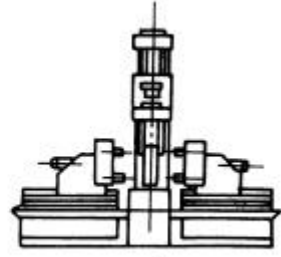
b) 立式单面型



a)



b)



c)

图 2-6 组合机床双面、多面型配置

a) 卧式双面型 b) 立、卧复合型 c) 立、卧复合三面型

(2) 多工位组合机床 使用多工位组合机床加工的工件可以借助夹具，改变加工位置。夹具位置的变动，可以是手动也可以是机动。夹具一般采用移动或回转来完成位置的改变，以使得在各个工位上对工件进行不同工序的加工。这种配置形式，工序的集中程度较高，通常适用于工件需要多工位加工的大批量生产。此时一台多工位的组合机床，可以完成一个工件的全部或大部分的加工工作，能节省很多辅助时间，生产率较高。

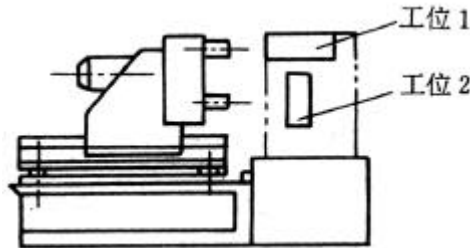


图 2-7 双工位组合机床的配置形式

图 2-7 所示，是一种换装工件型的双工位组合机床的配置形式。通过工件在工位 1 和工位 2 的换装，可进行两个工位的加工。未经加工的工件安装在工位 1 进行加工，加工后换装到工位 2，在工位 2 加工后取下。被加工的工件按此循环，就可以达到双工位加工的目的。这种换装工件型的工位不能太多，工件也不能太大，否则因换装工件的辅助时间长，而加工的机动时间短，反而

会影响生产率提高。

图 2-8 所示为移动工作台型组合机床的配置形式。工件安装好后，先后在两个工位上完成不同的工序（如钻、扩、铰或铣端面、镗孔等）。这种移动工作台型的配置形式，工位数也不能太多（一般为 2—4 个），原因是工位多了，工作台的移动长度势必增加，这样会给操作、调整带来不方便。

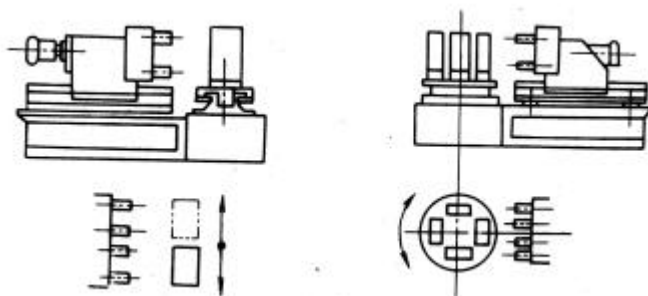


图 2-8 移动工作台型组合机床的配置形式

图 2-9 回转工作台型的配置形式

图 2-9 所示为回转工作台型的配置形式。这种配置的组合机床动力头，可以依次地对每一个回转工位上的工件进行加工。动力头每进退一次，回转工作台既回转一个工位。这种形式的动力部件配置较为集中，在中、小型工件的加工中应用较广泛。

以上介绍的只是几种常用的典型配置形式。在实际的生产现场，应用的配置形式是多种多样的。选择配置形式的依据是工件的加工要求和不同生产批量的需要。同理，根据加工的需要，还可以由这些组合机床配置组成组合机床自动线。本文仅简介了上述几种典型选配形式的概念，更详细的资料请参见有关设计手册。

## 2.1.3 数控(NC)机床

### 2.1.3.1 NC 机床的概述

#### 1.NC 机床的定义

数字控制(Numerical Control)是近二十年来高度发展和大量应用的一种自动控制技术，是用数字化信号对机床各运动部件在加工过程中的活动进行控制的一种方法，简称为数控(NC)。

数控机床(简称 NC 机床)即是装备了数控系统，加工活动控制采用数控技术的自动化机床。根据国际信息处理联盟(International Federation of Information Processing, 即 IFIP)第五技术委员会，对数控机床作了如下定义：

数控机床是一个装有程序控制系统的机床。该系统能够逻辑地处理具有控制编码，或其他符号编码指令规定的程序，并将其译码，从而使机床动作和加工零件。数控系统包括：数控装置、可编程序控制器、主轴驱动及进给驱动装置等部分。

由大量组合机床及专用机床等组成的刚性自动化生产线，在汽车等大批量的生产方面发挥了很大的作用，且生产精度稳定，生产率也比较固定并且自动化程度也比较高。但进入 80 年代以来，随着人们的生活水平的提高，市场需求个性化产品日益增多，产品更新换代极为迅速，因此中、小批量零件的生产越来越多。另外，随着航空工业等高技术产业的兴起，复杂形体的另件越来越多，精度要求也越来越高。这样，传统的由组合机床构成的自动生产线已很难满足柔性及高精度复杂曲面的加工要求。因此，

作为实现柔性自动化最重要的装备，数控机床的高速发展和大量推广应用也就成为了现实。

## 2. 数控机床的构成、功能及分类

(1) 数控机床的构成 数控机床一般由下列几个部分组成。如图 2-10：



图 2-10 数控车床外形图

- 1) 主机 是数控机床的主体，包括床身、立柱、主轴、进给机构等机械部件。
- 2) CNC 装置 是数控机床的核心，包括硬件(印刷电路板、CRT 显示器、键盘、纸带阅读机等)以及相应的软件。
- 3) 驱动装置 是数控机床执行机构的驱动部件，包括主轴驱动单元、进给驱动单元、主轴电机及进给电机等。
- 4) 数控机床的辅助装置 指数控机床的一些必须的配套部件，用以保证数控机床的运行。它包括液压和气动装置、排屑装置、交换工作台、数控转台和数控分度头，还包括刀具及监控检测装置。
- 5) 编程机及其他一些附属装备。

### (2) 功能和特点

1) 主机 主机是数控机床的主体，是用于完成各种切削加工的机械部分，根据不同的零件加工要求，有车床、铣床、钻床、镗床、磨床、重型机床、电加工机床以及其它类型。与普通机床不同是，数控机床在主机结构上具有以下特点：

① 由于大多数数控机床采用了高性能的主轴及伺服传动系统，因此，数控机床的机械传动结构得到了简化，传动链较短。

② 为了适应数控机床连续地自动化加工，数控机床机械结构具有较高的动态刚度、较好的阻尼特性及耐磨性、热变形较小。

③ 更多地采用高效传动部件，如滚珠丝杆副，直线滚动导轨等。

2) CNC(Computerized Numerical Control)装置 这是数控机床的核心。用于实现输入数字化的零件程序，并完成输入信息的存储、数据的变换、插补运算以及实现各种控制功能。

现代数控机床的数控装置都具有下面一些功能。

- ① 多坐标控制(多轴联动)。
- ② 实现多种函数的插补(直线、圆弧、抛物线等)。
- ③ 代码转换(EIA/ISO 代码转换、英制/公制转换、二进制/十进制转换、绝对值/增量值转换等)。
- ④ 人机对话、手动数据输入、加工程序输入、编辑及修改。

- ⑤ 加工选择，各种加工循环，重复加工、凹(凸)模处理加工、镜像处理等。
- ⑥ 可实现各种补偿功能，进行刀具半径、刀具长度、传动间隙、螺距误差的补偿。
- ⑦ 实现故障自诊断。
- ⑧ CRT 显示，实现图形、轨迹、字符显示。
- ⑨ 联网及通信功能。

3) 驱动装置 是数控机床执行机构的驱动部件。普通机床的主轴和进给系统，主要由电机驱动进给箱及主轴箱的齿轮来实现运动和变速。而数控机床主轴和进给则是由数控装置发出指令，通过电气或电液伺服系统实现的。当几个进给轴实现了联动时，可以完成点位、直线、平面曲线或空间曲线/面的加工。

一般来说，数控机床的伺服驱动，要求有好的快速响应性能，能灵敏而准确地跟踪由数字控制装置发送来的数字指令信号。

4) 数控机床的辅助装置 它是保证数控机床功能充分发挥所需要的配套部件。由于这些配套装置包括的面很广，有电器、液压、气动元件及系统，冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运等一系列装置，它对开发数控机床本身的功能具有很大的作用，因此受到了各产业部门的重视，发展极为迅速。

5) 程编机及其他一些附属设备 现代数控机床，不仅可以利用 CNC 装置上的键盘直接输入零件的程序，也可以利用自动程编机，在机外进行零件的程序编制，将程序记录在信息载体上(如纸带、磁带、磁盘等)，然后送入数控装置。对于较为复杂的零件，一般都是采用这种办法。这种方式，我们称为自动程序编制，或计算机程序编制。

数控机床构成框图如图 2-11 所示

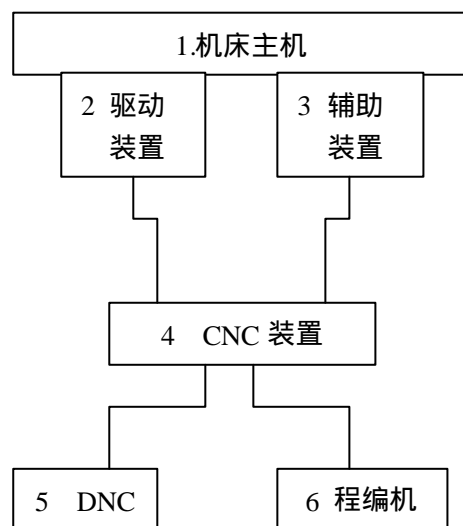


图 2-11 数控机床构成框图

(3) 数控机床的分类 目前，为了研究数控机床，可从不同的角度对数控机床进行分类。

#### 1) 按控制系统的特点分类

① 点位控制数控机床 对于一些孔加工用数控机床，只要求获得精确的孔系坐标定位精度(见图 2-12)，而不管从一个孔到另外一个孔是按照什么轨迹运动，如坐标钻床，坐标镗床以及冲床等，就可以采用简单而价格低廉的点位控制系统。

这种点位控制系统，为了确保准确的定位，系统在高速运动时，一般采用 3 级减

速，以减小定位误差。但是由于移动件本身存在惯性，而且在低速运动时，摩擦力有可能变化。所以即时使关断系统后，工作台并不立即停止，形成定位误差 $\Delta d$ ，而且这个值有一定的分散性。

② 直线控制数控机床 某些数控机床不仅要求具有准确定位的功能，而且要求从一点到另一点之间按直线移动，并能控制位移的速度(见图 2-13)。因为这一类型的数控机床在点间移动时，要进行切削加工，所以对于不同的刀具和工件，需要选用不同的切削用量及进给速度。

这一类的数控机床包括： 数控镗铣床、数控车床、加工中心等。一般情况下这些数控机床，有两个到三个可控轴，但同时控制轴只有一个。

为了能在刀具磨损或更换刀具后，可得到合格的零件，这类机床的数控系统常常具有刀具半径补偿功能、刀具长度补偿的功能和主轴转速控制的功能。

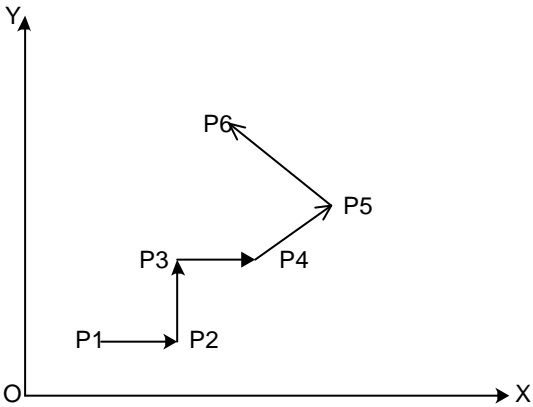


图 2-12 数控机床的点位加工

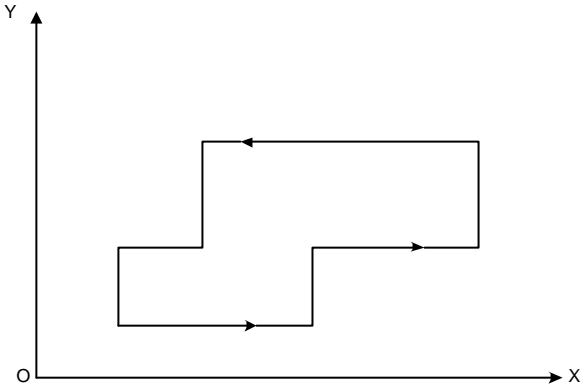


图 2-13 数控机床的直线加工

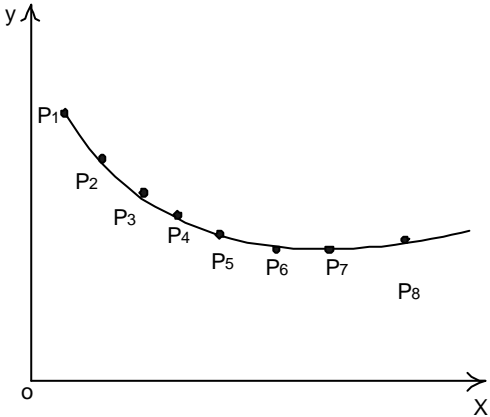


图 2-14 数控机床连续轮廓加工的理想加工曲线与插补曲线

③ 轮廓控制的数控机床 更多的数控机床，具有轮廓控制的功能(见图 2-14)，即可以加工曲线或者曲面的零件。这类机床有：二坐标以上的数控铣床、可加工曲面的数控车床、加工中心等。

这类数控机床应能同时控制两个或两个以上的轴，具有插补功能，对位移和速度进行严格的不间断控制。

④ 按照可联动(同时控制)轴数，且相互独立的轴数，可以有 2 轴控制、2.5 轴控制、3 轴控制、4 轴控制、5 轴控制等。

2.5 轴控制(两个轴是连续控制, 第三轴是点位或直线控制)的原理, 实现了三个主要轴 X, Y, Z 内的两维控制。

3 轴控制是三个坐标轴 X, Y, Z 都同时插补, 是三维连续控制(见图 2-15)。

5 轴连续控制是一种很重要的加工形式(见图 2-16), 这时 3 个坐标 X, Y, Z, 与转台的回转, 刀具的摆动, 同时联动(也可以是与两轴的数控转动联动, 或刀具做两个方向的摆动)。

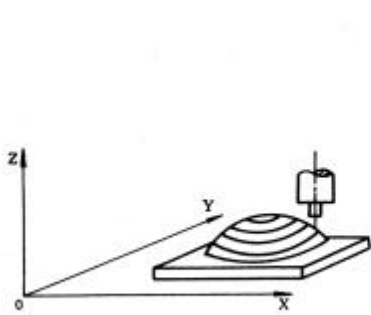


图 2-15 三轴联动的数控加工

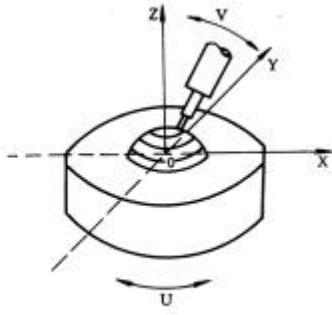


图 2-16 五轴联动的数控加工

由于刀尖可以按数学规律导向, 使之垂直于任何双曲线平面(double curve), 因此特别适合于加工透平叶片、机翼等。

2) 按执行机构的伺服系统类型分类

① 开环伺服系统数控机床 这是比较原始的一种数控机床, 这类机床的数控系统将零件的程序处理后, 输出数字指令信号给伺服系统, 驱动机床运动。没有来自位置传感器的反馈信号。最典型的系统就是采用步进电机的伺服系统。这类机床较为经济, 但是速度及精度都较低。因此, 目前国内, 仍作为一种经济型的数控机床, 多用于对旧机床的改造。

② 闭环伺服系统数控机床 这类机床可以接受插补器的指令, 而且随时接受工作台端测得的实际位置反馈信号, 进行比较, 并根据其差值不断地进行误差修正。这类数控机床可以消除由于传动部件制造中存在的精度误差给工件加工带来的影响。

这种采用闭环伺服系统的数控机床(见图 2-17), 可以得到很高的加工精度。但是, 由于很多的机械传动环节, 如丝杠副、工作台都包括在反馈环路内, 而各种机械传动环节, 包括丝杠与螺母、工作台与导轨的摩擦特性, 各部件的刚性, 以及位移测量元件安装的传动链间隙等等, 都是可变的, 都直接影响伺服系统的调节参数, 这些参数有些是非线性的参数, 因此闭环系统的设计和调整都有较大的难度。设计和调整得不好, 很容易形成系统的不稳定。所以, 闭环伺服系统数控机床, 主要用于一些精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精铣床等。

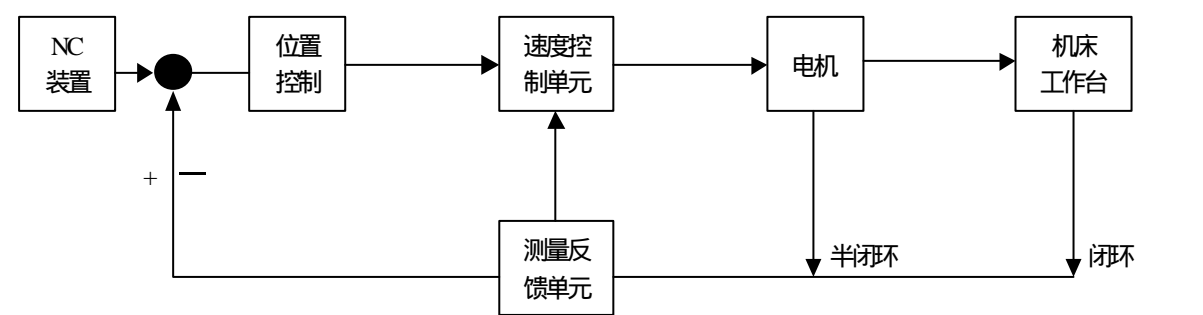


图 2-17 数控机床的闭环伺服系统工作原理



### ③ 半闭环伺服系统的数控机床

大多数数控机床是半闭环伺服系统，将测量元件从工作台移到电机端头或丝杠端头。这种系统的闭环环路内不包括丝杠、螺母副及工作台，因此可以获得稳定的控制特性。而且由于采用了高分辨率的测量元件，可以获得比较满意的精度及速度。

#### 3) 按加工方式分类

① 金属切削类数控机床 如数控车床、加工中心、数控钻床、数控磨床、数控镗床等。

② 金属成型类数控机床 如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等。

③ 数控特种加工机床 如数控线(电极)切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床等。

④ 其他类型的数控机床 如火焰切割机、数控三坐标测量机等。

#### 4) 按照功能水平分类

可以把数控机床分为高、中、低档(经济型)三类：

这种分类方法，目前在我国用的很多，但是因为没有一个确切的定义，所以涵意不很明确。这里，按照功能水平分类的界限作一个限制：

① 分辨率和进给速度 分辨率为 10 $\mu$ m，进给速度在 8-15m/min 为低档；分辨率为 1 $\mu$ m，进给速度为 15-24m/min 为中档；分辨率为 0.1 $\mu$ m，进给速度为 15--100m/min 为高档。

② 伺服进给类型 采用开环步进电机进给系统为低档；中高档则采用半闭环或闭环的直流伺服系统及交流伺服系统。

③ 联动轴数 低档数控机最多联动轴数为 2~3 轴，中、高档则为 2~4 轴或 3~5 轴以上。

④ 通信功能 低档数控一般无通信功能。中档可以有 RS-232 或 DNC(Direct Numerical Control 直接数字控制)接口。高档的可以有 MAP(Manufacturing Automation Protocol 制造自动化协议)通信接口，具有联网功能。

⑤ 显示功能 低档数控一般只有简单的数码管显示或简单的 CRT(Cathode Ray Tube 阴极射线管)字符显示。而中档数控则具有较齐全的 CRT 显示，不仅有字符，而且有图形，人机对话，自诊断等功能。高档数控还可以有三维图形显示。

⑥ 内装 PC(Programmable Controller 可编程控制器) 低档数控一般无内装 PC，中、高档数控都有内装 PC。高档数控具有强功能的内装 PC，有轴控制的扩展功能。

⑦ 主 CPU(central processing Unit 中央处理单元) 低档数控一般采用 8 位 CPU，中档及高档已经逐步由 16 位 CPU 向 32 位 CPU 过渡。外国的一些新的数控系统已经选用了 64 位 CPU，并选用具有精简指令集的 RISC 中央处理单元，以提高运算速度。

根据以上的一些功能及指标，就可以将各种类型的产品分为低、中、高档三类数控系统。

所谓经济型数控，都是相对标准型数控而言。在不同的国家和不同的时期含意是不同的。其目的是根据实际机床的使用要求，合理地简化系统，以降低产品价格。

在我国，把由单板机、单片机和步进电机组成的数控系统和其它功能简单，价格低的系统称为经济型数控。主要用于车床、线切割机床、以及老机床的改造等。

它是属于低档数控的一种，目前我国，这类数控有一定批量的生产。

区别于经济型数控，则把功能比较齐全的数控系统，称为全功能数控，或称标准型数控。

3. 我国数控机床发展概况 我国数控机床是从 1958 年开始研制的，已经历了 30 多年的发展历程。50 年代末到 60 年代中，我国数控机床是处于研制、开发时期。当时，我国的一些高等院校、科研单位，都投入了人力、物力从事数控机床的研制工作。开始也是从电子管着手的。

1965 年，国内开始研制晶体管数控系统。60 年代末和 70 年代初，研制的圆锥数控铣床、非圆齿轮插齿机都获得了成功，在生产上发挥了明显的经济效益。1968 年研制成了 CJK-18 晶体管数控系统及 X53K-1G 立式数控铣床。这一时期，数控机床的数量和品种不多，但在少数复杂零件的加工中已经进入了试用阶段。

70 年代初，数控技术在车、铣、钻、镗、磨、齿轮加工、电加工等领域全面展开，数控加工中心也相继在上海、北京研制成功。

1976 年 5 月，在第一机械工业部举办的“仪器仪表自动化装置展览会”上共展出了各类数控机床 34 种，40 台，显示了当时我国的数控机床，已经进入了实用阶段。

70 年代前期，国产的数控机床由于电子器件的质量和制造工艺水平差。致使数控系统的稳定性、可靠性问题，未得到解决。另外，售价也较贵，因此未能广泛推广。

而在这—时期，数控线切割机床，由于结构简单，使用方便，价格低廉，在模具加工中得到了推广，保持着年产 600~700 台的水平。

根据国家统计局的资料，1973~1979 年，我国生产了数控机床 4108 台，其中数控线切割机床占 86%左右。

80 年代初，随着我国实行改革、开放政策，我国先后从日本、美国等国家，引进了部分数控装置及伺服系统的技术。并于 1981 年在我国开始批量生产。

这些数控系统稳定性好，可靠性高。使数控机床很快地在国内为用户所接受。推动了我国数控机床的稳定发展。使我国的数控机床在质量、性能及水平上有了一个质的飞跃。

1982 年青海第一机床厂生产的 XHK754 卧式加工中心，长城机床厂生产的 CK7815 数控车床，北京机床研究所生产的 JCS018 立式加工中心，上海机床厂生产的 H160 数控端面外圆磨，都能可靠地进行工作。并陆续形成了批量生产。

1985 年，我国数控机床的品种已有了新的发展，除了各类数控切割机床以外，其他类型的各种数控金属切削机床，也都有极大的发展。新品种总计 45 种，其中各种规格的立式、卧式加工中心 16 种，卧式、立式数控车床 11 种，数控铣床 11 种，此外还有数控钻镗床、磨床等。在重型机床，锻压设备上开发了数控新品种。例如：4m 数控立车，镗杆直径为 160mm 的数控落地镗铣床，以及 40t 的数控冲模回转头压力机，也都陆续地研制出来。

为了跟踪国外的技术发展，北京机床研究所，在立式加工中心和卧式加工中心基础上，加上有 10 个工件位置的自动交换工作台(APC)。组成了柔性制造单元 JCS-FMC-1、2。这种具有多工位的托盘自动交换装置的 FMC，可以获得夜间(二、三班)无人看管自动加工。可以安装不同工件，实现混合加工，用软件控制托盘的任选交换、

识别工作，并按工件自动调出相应的加工程序。

北京机床研究所还建立了一条以五台国产数控机床组成的，以直流伺服电机驱动的轴类、法兰盘类、刷架本类等 12 种零件为加工对象的 FMS。90 年代我国科技人员相继研制了几条 FMS。

1985 年以后，我国的数控机床，在引进、消化国外技术的基础上，进行了大量的开发工作。到 1989 年底，我国数控机床的可供品种已超过 300 种，其中数控车床占 40%，加工中心占 27%，其他的品种为重型机床、镗铣床、电加工机床、磨床、齿轮加工机床及拉床等。

一些较高档次的数控系统，如五轴联动的数控系统，分辨率为 0.02 $\mu\text{m}$  的高精度车床用数控系统，数字仿型数控系统，为柔性制造单元配套的数控系统，也陆续开发出来，并制造出了样机。

经过 30 年的努力，我国数控机床的生产已经初步建立了以中、低档数控机床为主的产业体系，为 90 年代向高档数控机床逐步发展奠定了基础。

#### 4. 数控机床的发展趋势

随着科学技术的发展，制造技术的进步，以及社会对产品多样化的需求愈加强烈，产品的更新换代加速，产品种多样，中小批量生产的比重明显增加。要求现代数控机床成为一种新的高效率，高质量、高柔性和低成本的新一代制造设备，满足市场需要。

同时，为满足机械工业向更高层次发展，为柔性制造单元(FMC)，柔性制造系统(FMS)以及计算机集成制造系统(CIMS)提供基础装备，现代数控机床正向更高的速度，更高精度，更高的可靠性及更完善的功能发展。

(1) 实现长时间地、连续地自动加工 普通机床在零件加工过程中，操作者总是根据图样的要求，不断地测量工件的尺寸，并调节操作手柄，修正加工量的偏差。数控加工零件时，则可以完全按照预定的程序自动进行。操作者只需发出起动命令，并进行加工过程的监视。刀具的进给、工件的检测，全部由数控系统完成，操作者都不需干预。还可以实现两班、三班的夜间无人管理下运行。

因此，在现代数控机床上，装有各种类型的监控、检测装置。例如红外、声发射(AE)检测装置，对工件及刀具进行监测。发现工件超差、刀具磨损、破损，都能及时报警，并给予补偿，或对刀具进行调换。提高了机床的自动化程度。保证数控机床长期工作时的产品质量。

(2) 向高速度、高精度发展 现代机械制造业要求数控机床向高速化、高精度化和高机能化发展，以适应生产的需要。现代数控机床都装备了新型的数控系统及伺服系统。有很高的分辨率和进给速度，达到了 0.1 $\mu\text{m}$ (24m/min)，1 $\mu\text{m}$ (100~240m/min)，在一些特殊要求的数控系统中，可以达到 0.01 $\mu\text{m}$ (400~800/min)。

要提高速度，首先要提高数控系统的运算速度。现代数控系统已经逐步地由 16 位 CPU 过渡到 32 位 CPU(FANUC15 最近已开发出 64 位 CPU 的系统)，频率由原来的 5MHz，10MHz，提高到 16MHz，20MHz，新型数控系统(FANUC16)已经采用了精简指令集运算的芯片 RISC 作为主 CPU，进一步提高了运算速度。

与数控系统相配合，伺服系统的质量，直接关系到 CNC 机床的加工精度。现代的数控系统，采用了交流数字伺服系统。伺服电机的位置、速度及电流分配环都实现了

数字化，并采用了新型控制理论，实现了不受机械负荷变动影响的高速响应伺服系统。

1) 前馈控制 早期的数控机床伺服系统，是把检出伺服电机位置的检测器信号与位置指令的差，乘以位置环的增益  $G$  的值，作为速度指令。这种控制方式在以进给速度  $F$  加工时，伺服系统的追踪滞后是  $F/G$ ，这使得在拐角加工及圆弧切削时加工精度降低。前馈控制就是在原来的控制系统上加上速度指令的控制方式。采用这种方式后能使伺服系统的追踪滞后减少二分之一。拐角及圆形轨迹的切削加工精度获得了改善。

2) 机床静止摩擦的非线性控制 对于一些具有较大静止摩擦系数的数控机床，其 CNC 系统由于没有采取有效的控制，因此在圆弧切削时，圆度较差。新型的数字伺服系统，具有补偿机床驱动系统静摩擦的非线性控制功能，能改善圆弧切削时的圆度。

3) 伺服系统的位置环和速度环，均采用软件控制。以适应高速工作时，根据不同类型的机床，不同精度及速度的要求，预先调整加速及减速。

4) 采用高分辨率的位置编码器：

增量位置检测为 10,000P/r

绝对位置检测为 1,000,000P/r

5) 现代数控机床还利用计算机数控系统的补偿功能，提高数控机床的加工精度及动态性能。

可以补偿轴向运动误差。首先测量出运动系统的误差曲线，并将相应的补偿值输入并保存在数控系统中。轴向运动误差就能得到补偿。如设定每步的补偿量为  $\pm 1 \sim 10\mu\text{m}$ 。在机床长期工作造成磨损而使误差曲线发生变化时，可以适时地改变补偿量。

也可补偿丝杠、齿轮等间隙误差。当由于丝杠或齿轮等传动部件存在有问题，造成运动方向改变时，就产生误差。测量其误差曲线，并输给控制系统一个与间隙相应的校正值。则当机床做正、反向运动时，数控系统立即给予补偿以消除间隙误差。在间隙变化时，也可以及时地调整校正值。

在新一代的数控系统中，还开发了具有热补偿和空间误差补偿功能的传感器件及软件。

以上这些技术的采用，保证了在现代数控机床上，比较圆满地解决高速度及高精度这一对矛盾。

(3) 提高数控机床的利用率及生产效率 数控机床的初期投资大，为了使采用数控机床的用户能真正获得效益，要求数控机床有更高的性能/价格比，提高设备利用率及系统生产率。

为了提高数控机床的利用率，实现一机多能，现代数控机床上一般都采用自动换刀，自动更换工件等机构，实现一次装卡完成全部加工工序。减少装卸工件及调整、维修机床的辅助时间。在同一台机床上不仅能实现粗加工，还能进行精加工，提高了机床的开动率。

为了提高数控机床的生产效益，现代数控机床一般采用更大的功率，并选用新型的刀具，以提高切削效率，缩短加工时间。

(4) 提高数控机床的可靠性 提高数控机床的可靠性关键是提高数控系统的可靠性。

现代数控机床采用 CNC 系统，只要改变软件或控制程序，就可以适应各类机床的

不同要求。数控系统的硬件，制成多种功能模块，根据机床数控功能的需要，选择不同的模块。可自行扩展或裁剪，组成满意的数控系统。由于数控系统的模块化、通用化及标准化，便于组织批量生产，故保证了产品的质量。

新型的数控系统，大量采用大规模或超大规模的集成电路，采用专用芯片及混合式集成电路，提高了线路的集成度，减少了元器件的数量，降低了功耗，提高了可靠性。

新型的大规模集成电路，采用了表面安装工艺(SMT)，实现了 3 维高密度安装技术，元器件经过严格的筛选，建立由设计、试制到生产一整套质量保证体系，使得现代数控系统的平均无故障时间 MITBF=10000~36000h。

现代数控机床，都具有很好的故障自诊断功能及保护功能。数控系统一般都具有软件、硬件的故障自诊断程序。为了防止超行程，可以在系统内预先设定工作范围，避免由于限位开关的不可靠，造成轴端超程。具有自动返回功能，当机床在加工过程中，如果出现某种特殊情况，譬如刀具断裂等原因，造成加工中断时，CNC 系统可以将刀具位置储存起来。在更换刀具后，只要重新输入刀具的数据，刀具就能自动地回到正确位置上，保证通电后继续工作，而不使工件报废。

(5) 具有很好的操作性能 大多数数控机床，都有很"友好"的人机界面。使用户在使用机床操作面板时，一目了然。采用彩色的 CRT 屏幕显示，配合手动操作的硬件及软件键。并大量采用菜单选择操作方式，使操作越来越方便。

FANUC6 还专门安排了 Help 键，对不会使用该系统的操作者，提供操作方法的提示。并采用了保护人眼的 TFT(薄膜晶体管)彩色液晶显示器。

减少操作面板上的按钮数目和指示灯数，改进了操作方法，减少了误操作的可能性。

(6) 采用自动程序编制技术，具有人机对话功能

数控机床的零件程序编制是实现数控加工很重要的环节。传统的数控机床，零件程序编制都是脱机进行的。用专用的编程机或电子计算机来完成。编好的零件程序，由穿孔纸带或其他数据载体(如磁带、磁盘)输入数控系统。

现代的数控机床，可以利用 CNC 很强的存储及运算能力，把很多自动编程机具有的功能，植入数控系统。使零件的程序编制工作可以在数控系统上在线进行，实现了人机对话功能。通过彩色显示与手动操作键盘的配合，可以实现程序的输入、编辑、修改、删除；具有前台操作、后台编辑的前后台功能。

具有机械加工技术诀窍的程序编制功能，除了具有圆切削、固定循环和图形循环外，还有宏程序的设计功能、会话式自动编程、蓝图编程等功能。

新型的数控系统中，还装入了小型的工艺数据库，使得在程序编制过程中可以根据机床性能，工件的材料及零件加工要求，自动选择最佳的刀具及切削用量。并具有自适应控制功能。还有两维的图形轨迹显示，或者三维彩色动态图形显示。

(7) 具有强功能的内装式机床可编程控制器

机床数控系统中有内装可编程控制器(PC)，可采用其指令来编制 PC 程序，绘制梯形图(Ladder)。利用 PC 的高速处理功能，使 CNC 与 PC 之间有机地结合起来。而且可以利用梯形图的监控功能，使机床故障诊断和维修更为方便。

新型数控系统 PC 基本指令执行时间是 0.2us/Step, 梯形语言程序 16000 Step/sec 以上, 能用 C 语言编程的 PC, 可以在个人计算机的开发环境下工作。

强功能的可编程控制器, 还具有多轴控制的功能。

(8) 具有更高的通信功能

为了适应 FMC, FMS 以及进一步联网组成 CIMS 的要求, 一般的数控系统都具备有 RS232 和 RS422 高速远距离串行接口。可以按用户级的格式要求, 同上一级计算机进行多种数据交换。

高档的数控系统应具有 DNC 接口, 可以实现几台数控机床之间数据通信, 也可以直接对几台数控机床进行控制。

现代数控机床, 为了适应自动化技术的进一步发展, 适应工厂自动化规模越来越大的要求, 为了满足不同厂家不同类型数控机床的联网需要, 纷纷采用 MAP 工业控制网络, 现在已经实现了 MAP3.0 版本, 为现代数控机床进入 FMS 及 CIMS 创造了条件。

#### 2.1.3.2 数控机床的机械结构及特点

1. NC 机床机械结构的主要组成 数控机床的机械结构, 除机床基础件外, 由下列各部分组成:

- (1) 主传动系统;
- (2) 进给系统;
- (3) 实现工件回转、定位的装置和附件;
- (4) 实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置。如液压、气动、润滑、冷却等系统和排屑、防护等装置;
- (5) 刀架或自动换刀装置(ATC);
- (6) 自动托盘交换装置(APC);
- (7) 特殊功能装置, 如刀具破损监控、精度检测和监控装置等;
- (8) 为完成自动化控制功能的各种反馈信号装置及元件。

机床基础件或称机床大件, 通常是指床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台等。它是整台机床的基础和框架。机床的其他零、部件, 或者固定在基础件上, 或者工作时在它的导轨上运动。其他机械结构组成则按机床的功能需要选用。如一般的数控机床除基础件外, 还有主传动系统、进给系统以及液压、润滑、冷却等其他辅助装置, 这是数控机床机械结构的基本构成。数控机床可根据自动化程度、可靠性要求和特殊功能需要, 选用各类刀具破损监控、机床与工件精度检测、补偿装置和附件等。有些特种加工数控机床, 如电火花加工数控床和激光切割机, 其主轴部件不同于一般数控金属切削机床, 但需要用伺服电机驱动机床运动部件实现进给运动, 则是各类数控机床的共性。

#### 2. 数控机床机械结构的主要特点和要求

(1) 高刚度和高抗振性 为满足数控机床高速度、高精度、高生产率、高可靠性和高自动化程度的要求, 与普通机床比较, 数控机床应有更高的静、动刚度, 更好的抗振性。例如, 有的国家规定数控机床的刚度系数比普通机床至少高 50% 以上。

提高数控机床结构刚度的常用措施:

1) 提高机床构件的静刚度和固有频率 机床静刚度直接影响着工件的加工精度及其生产率。机床构件的静刚度和固有频率则是影响机床动刚度诸因素中的重要因素。因此, 为提高机床构件的动刚度, 提高抗振性, 在很多场合下, 提高机床构件的静刚度和固有频率往往是最合适的方法(在个别特殊情况下, 如床身等支承大件的固有频率与其上的零、部件的固有频率接近时, 也可以用增加支承大件的重量和降低其固有频率来获得较好的动刚度)。主要措施有以下几个方面:

① 针对机床在各种不同工作条件下的薄弱环节, 改善其结构或布局, 以减少所承受的弯曲负载和扭矩负载。如图 2-18。

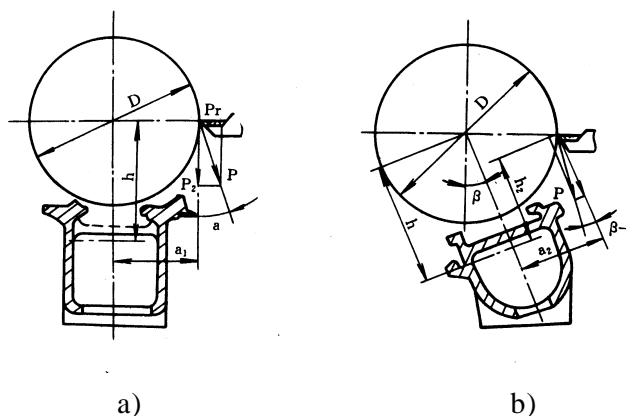


图 2-18 车床床身布局

a)改进前的布局

b)改进后的布局

② 合理设计构件的截面形状及尺寸, 采用合理布置的筋板结构, 以便在较小重量下具有较高的静刚度和适当的固有频率。

③ 设置卸荷装置来平衡载荷以补偿有关零部件的静力变形。如铣镗类数控机床的主轴箱或滑枕常用重锤或液压缸来平衡。重型机床横梁和滑枕的平衡卸荷装置也仍用于同类数控机床。

④ 改善构件间的接触刚度或构件与地基联结处的刚度等。

2) 改善机床结构的阻尼特性

① 大件内腔充填泥芯和混凝土等阻尼材料。在振动时利用相对摩擦来耗散振动能量。

② 在大件表面采用阻尼涂层。对于弯曲振动构件, 在其表面喷涂一层具有高内阻尼和较高弹性的粘滞弹性材料(如沥青基制成的胶泥减振剂, 高分子聚合物和油漆腻子等), 涂层厚度愈大, 阻尼愈大。

③ 充分利用接合面间的摩擦阻尼。在焊接构件上采用间断焊缝, 以获得良好的阻尼特性。

3) 采用新材料和钢板焊接结构 长期以来, 机床大件材料主要采用铸铁, 但近来部分机床大件已开始用新材料代替; 同时, 钢板焊接的构件已成功地应用于重型机床, 甚至中、小型机床。

沈阳第三机床厂曾用有限元法计算了该厂生产的 Star-Turn 1200 型数控车床的焊接床身和铸造床身的刚度, 并在同样的试验条件下作了对比, 结果如表 2-3 所示:

从计算结果看，焊接床身的刚度高于铸造床身。这是因为两种床身的隔板和筋板布置不同，钢板焊接结构容易采用最有利于提高刚度的隔板和筋板布置形式，能充分发挥壁板和筋板的承载及抵抗变形的作用，另外，焊接床身采用钢板，其弹性模量  $E$  为  $2 \times 10^5$  MPa，而铸铁的弹性模量  $E$  仅为  $1.2 \times 10^5$  MPa，两者几乎相差一倍。因此，采用钢板焊接床身有利于增大固有频率。

表 2—3 焊接床身与铸造床身刚度对比

床身结构	$P_y/Y$	$P_x/X$
焊接床身	3156N/ $\text{mm}$	1891N/ $\text{mm}$
铸造床身	1881N/ $\text{mm}$	1372N/ $\text{mm}$

(2) 减少机床热变形的影响 机床的热学特性是影响加工精度的重要因素之一。由于数控机床主轴转速 进给速度远高于普通机床，而大切削用量产生的炽热切屑对工件和机床部件的热传导影响远较普通机床严重，而热变形对加工精度的影响往往难以由操作者修正。因此，减少数控机床热变形影响的措施应予特别重视。常用的措施有下列几种：

1) 采用热对称结构 这种结构相对热源来说是对称的。在产生热变形时，其工件或刀具回转中心对称线的位置基本不变，因而可减少加工工件精度的影响。这种热对称结构的设计思想已被广泛用于主轴箱设计和机床总体结构设计。如图 2-20 所示

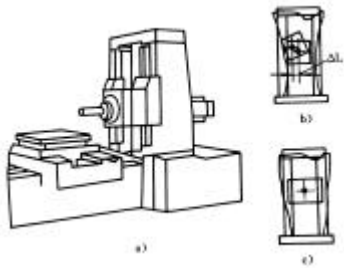


图 2-19 加工中心框式立柱

a)卧式加工中心 b)主轴箱以左立柱侧面定位 c)主轴箱以左右两立柱的侧面定位

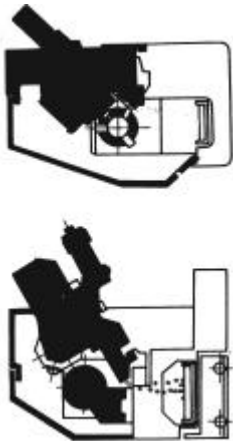


图 2-20 数控车床床身及滑板结构

a) 斜床身 b) 平床身和斜滑板

2) 采用倾斜床身、平床身和斜滑板结构 数控车床采用这样的结构便于配置倾斜的防护罩，有利于切屑的及时排出和冷却液的彻底冲洗。如图 2-20 所示



3) 采用热平衡措施 某些重型数控机床由于结构限制, 不能采用如前所述的热对称结构时, 可采用热平衡措施。如控制升温, 对切削部位采取强冷措施、热位移补偿等。如图 2-21。补偿是通过将采集的位置信号自动输入到 NC 控制系统中, 由 NC 控制系统自动完成的。

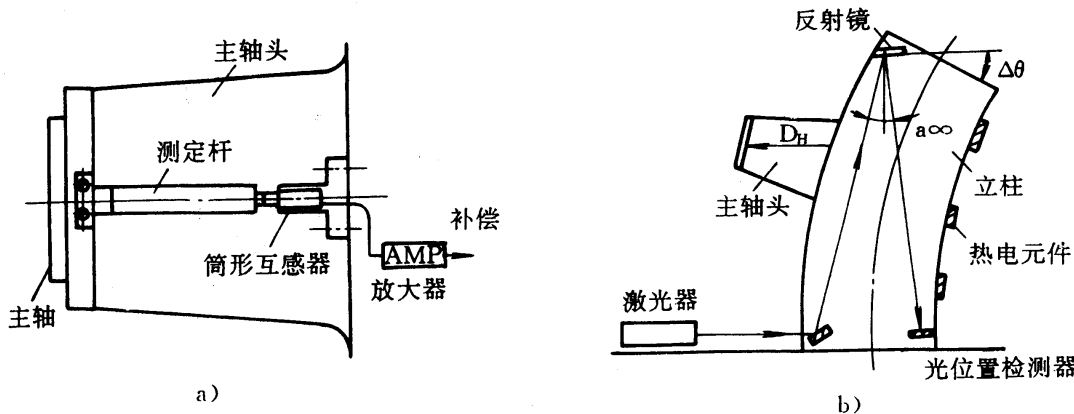


图 2-21 热变形自动补偿装置

a) 轴向补偿 b) 立柱热平衡补偿

(3) 传动系统机械结构大为简化 数控机床的主轴驱动系统和进给驱动系统分别采用交、直流主轴电机和伺服电机驱动, 这两类电机调速范围大, 并可无级调速。因此使主轴箱、进给变速箱及传动系统大为简化, 箱体结构简单。齿轮、轴承和轴类零件数量大为减少甚至不用齿轮, 由电机直接带动主轴或进给滚珠丝杠。图 2-22 为数控车床的传动系统图。从图中可以看出, 主轴箱内传动轴和齿轮数大为减少。庞大而复杂的变速箱和溜板箱则为伺服电机通过齿形带驱动所代替。普通车床传统的两杠---即走刀光杠和滑动丝杠以及挂轮架的功能由数控系统、伺服电机和一根滚珠丝杠来完成。

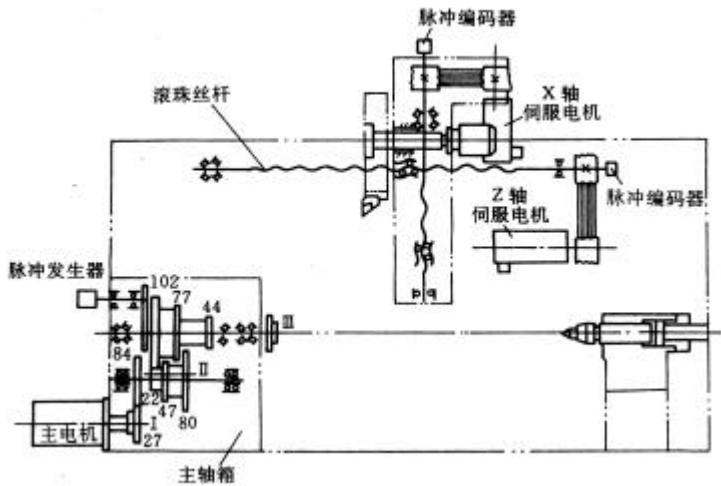


图 2-22 某数控车床传动系统

(4) 高传动效率及无间隙的传动装置和元件 数控机床在高进给速度下, 工作要平稳, 并有高的定位精度。因此, 对进给系统中的机械传动装置和元件要求具有高寿命、高刚度、无间隙高灵敏度和低摩擦阻力的特点。目前, 数控机床进给驱动系统中常用的机械传动装置主要有三种, 即滚珠丝杠副、静压蜗杠-蜗母条和预加载荷双齿条。图 2-23 所示

(5) 低摩擦系数的导轨 机床导轨是机床基本结构的要素之一。从机械结构的角度来说，机床的加工精度和使用寿命很大程度上决定于机床导轨的质量，而对数控机床的导轨则有更高的要求。如：高速进给时不振动，低速进给时不爬行，有高的灵敏度，能在重负载下长期连续工作，耐磨性要高，精度保持性要好等。现代数控机床使用的导轨，从类别来说虽仍是滑动导轨、滚动导轨和静压导轨 3 种，但在材料和结构上起了"质"的变化，已不同于普通机床的导轨。

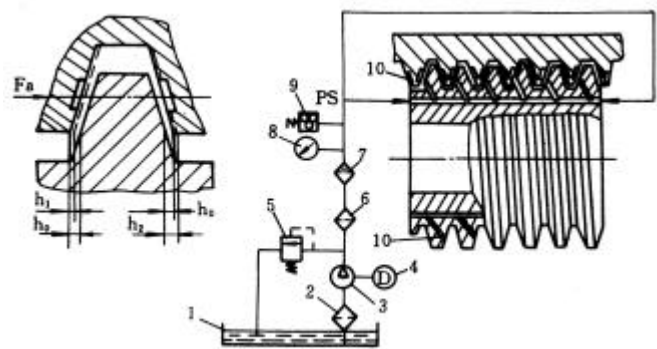


图 2-23 静压蜗杆蜗母条工作原理

1-油箱 2-滤油器 3-油泵 4-电动机 5-溢流阀 6-粗滤油器 7-精滤油器  
8-压力表 9-压力继电器 10-节流器

### 2.1.3.3 计算机数字控制系统(CNC 系统)

1. CNC 系统的组成 数控机床在数控系统的控制下，自动地按给定的程序进行机械零件的加工。数控系统是由程序、输入输出设备、计算机数字控制装置、可编程控制器(PC)、主轴驱动装置和进给驱动装置等组成一个系统，习惯上又称为 CNC 系统。如图 2-24 所示。

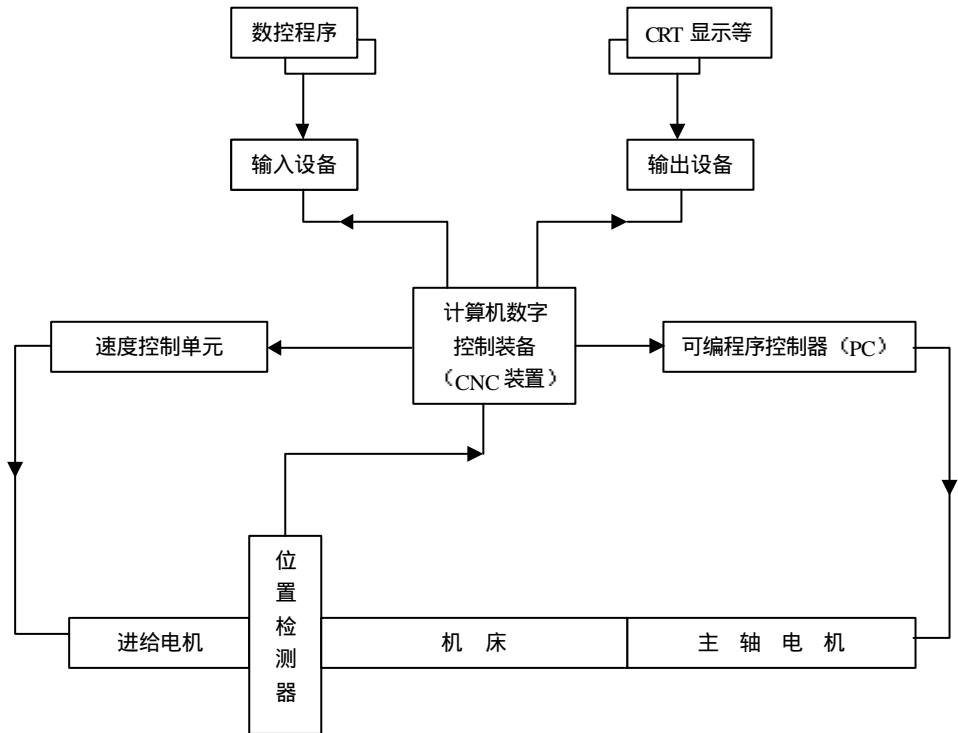


图 2-24 CNC 系统框图

## 2. CNC 系统的功能

CNC 装置的工作是在硬件的支持下，执行软件的全过程。如图 2-25。下面从输入、译码、刀具补偿进给速度处理、插补、位置控制、I/O 处理、显示和诊断来简要说明 CNC 装置的工作情况。

(1) 输入 输入 CNC 装置的信息有零件程序、控制参数和补偿数据。输入的形式有光电阅读机纸带输入、键盘输入、磁盘输入和连接上级计算机的 DNC(直接数控)接口输入。从 CNC 装置工作方式看，有存储工作方式输入和 NC 工作方式输入。所谓存储方式，是将加工的零件程序一次且全部输入到 CNC 装置内部存储器中，加工时再从存储器把一个个程序段调出；所谓 NC 工作方式是指 CNC 装置一边输入一边加工，即在前一个程序段正在加工时，输入后一个程序段内容。CNC 装置在输入过程中通常还要完成无效码删除，代码校验和代码转换等工作。

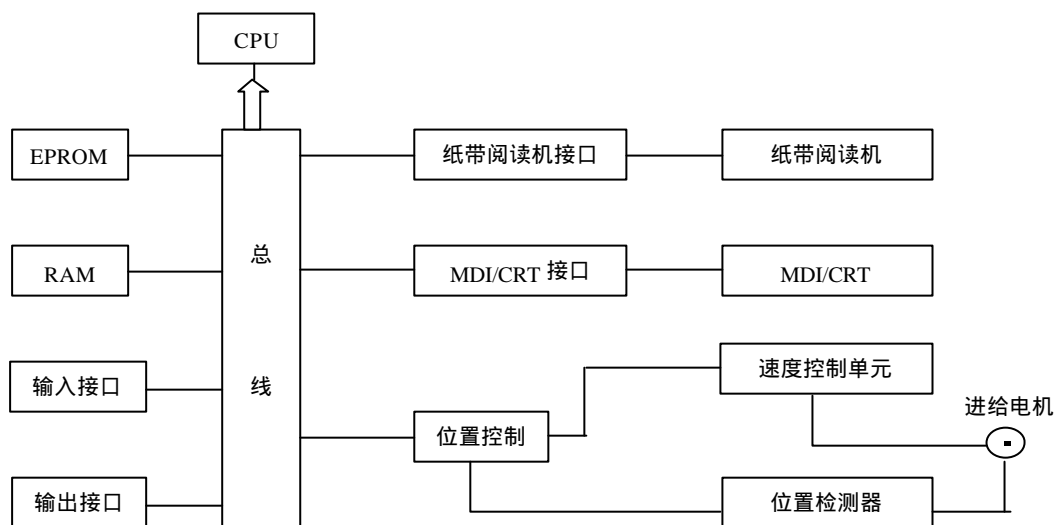


图 2-25 CNC 装置硬件的组成

(2) 译码 译码处理，不论系统工作在 NC 方式还是存储方式，都是将零件程序以一个程序段为单位进行处理，把其中的各种零件轮廓信息(如起点、终点、直线或圆弧等)、加工速度信息(F 代码)和其它辅助信息(M, S, T 代码等)按照一定的语法规则解释成计算机能够识别的数据形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用区间。在译码过程中，还要完成对程序段的语法检查，若发现语法错误便立即报警。

(3) 刀具补偿 刀具补偿包括刀具长度补偿和刀具半径补偿。通常 CNC 装置的零件程序是以零件轮廓轨迹来编程。刀具补偿的作用是把零件轮廓轨迹转换成刀具中心轨迹。目前在比较好的 CNC 装置中，刀具补偿的工作还包括程序段之间的自动转接和刀具磨损过量判别。

(4) 进给速度处理 编程所给的刀具移动速度，是在各坐标的合成方向上的速度。速度处理首先要做的工作是根据合成速度来计算各运动坐标方向的分速度。另外对于机床允许的最低速度和最高速度的限制也是在这里处理。在有些 CNC 装置中，软件的自动加减速也是在这里处理。

(5) 插补的任务是在一条已知起点和终点的曲线上进行"数据点的密化"。插补是在每个插补周期运行一次，在每个插补周期内，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。通常经过若干次插补周期后，插补完一个程序段的加工，即完成从程序段起点到终点的"数据点密化"工作。

目前在一般的 CNC 装置中，仅能对直线、圆弧和螺旋线进行插补计算。但是一些较专用或较高档的 CNC 装置中还能完成对椭圆、抛物线、正弦线和一些专用曲线的插补计算。

(6) 位置控制 位置控制是处在伺服回路位置环上，这部分工作可以由软件来做，也可以由硬件完成。它的主要任务是在每个采样周期内，将插补计算出的理论位置与实际反馈位置相比较，用其差值控制进给电机。在位置控制中，通常还要完成位置回路的增益调整，各坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿，以提高机床的定位精度。

(7) I/O 处理 I/O 处理主要是处理 CNC 装置与机床执行机构之间各种信号的输入、输出(如换刀、换挡、冷却等)。

(8) 显示 CNC 装置的显示主要是为操作者提供方便，通常应有：零件程序的显示，参数显示，刀具位置显示，机床状态显示，报警显示等。有些 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静态和动态图形显示。

(9) 诊断 现代 CNC 装置都具有联机 and 脱机诊断的能力。所谓联机诊断，是指 CNC 装置中的自诊断程序，这种自诊断程序融合在各个部分，随时检查不正常的事件。所谓脱机诊断，是指系统运转条件下的诊断，一般 CNC 装置配备有各种脱机诊断程序纸带，以检查存储器、外围设备(CRT、阅读机、穿孔机)、I/O 接口等。

### 3. CNC 装置硬件结构

(1) 单微处理机结构 在单微处理结构中，只有一个微处理机以集中控制，分时处理数控的各个任务。而有的 CNC 装置虽有两个以上的微处理机，但其中只有一个微处理机能够控制系统总线，占有总线资源；而其它微处理机成为专用的智能部件，不能控制系统总线，不能访问主存储器。它们组成主从结构，故被归于单微处理机结构中。

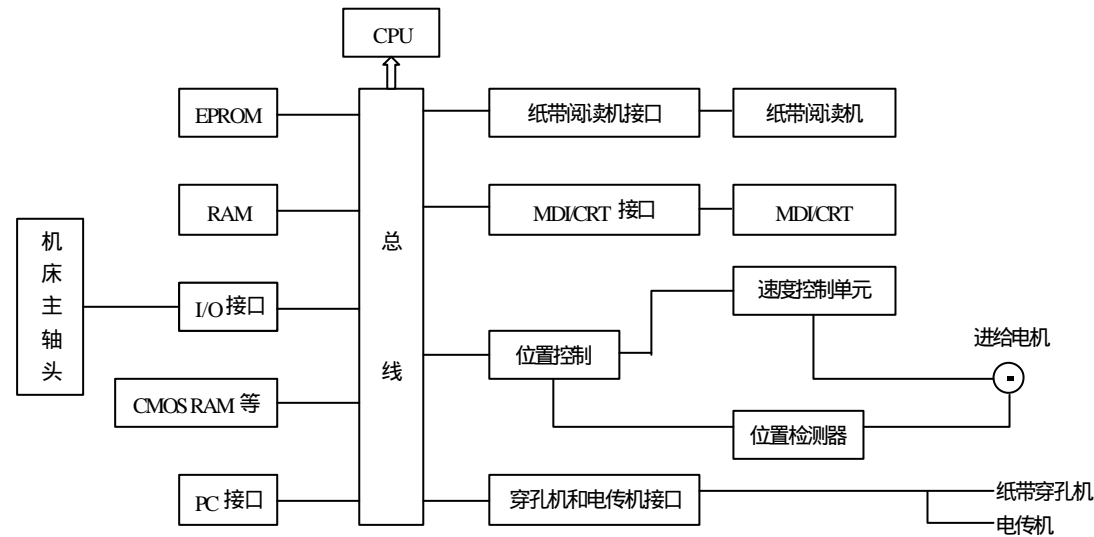


图 2-26 是单微处理机结构框图。

单微处理机结构的基本组成：

- 1) 微处理机和总线
- 2) 存储器
- 3) 纸带阅读机接口

- 4) 纸带穿孔机和电传机接口
- 5) I/O 接口
- 6) MDI (Manual Data input 手动数据输入) /CRT 接口
- 7) 位置控制器
- 8) PC(可编程控制器)

(2) 多处理机结构 CNC 装置的多微处理机结构, 由于采用模块结构, 各模块间的互连与通信是在机柜内耦合的, 典型的有共享总线和共享存储器两种结构。

1) 共享总线结构 以系统总线为中心的多微处理机 CNC 装置, 把组成 CNC 装置的各个功能模块划分为带有 CPU 或 DMA(Direct Memory Access)器件的各种主模块及不带 CPU 和 DMA 器件的各种 RAM/ROM 或 I/O 从模块两大类。所有主、从模块都插在配有总线插座的机柜内, 共享严格设计定义的标准系统总线。系统总线的作用是把各个模块有效地连接在一起, 按照要求交换各种数据和控制信息, 构成一个完整的系统, 实现各种预定的功能。

在系统中只有主模块有权控制使用系统总线。由于某一时刻只能由一个主模块占有总线, 必须要有仲裁电路来裁决多个主模块同时请求使用系统总线的竞争, 每个主模块按其担负任务的重要程度已预先安排好优先级别的顺序。总线仲裁目的, 也就是在它们争用总线时, 判别出各模块优先权的高低。

支持多微处理机系统的总线都设计有总线仲裁机构, 通常有两种裁决方式, 即串行方式和并行方式。

串行总线裁决方式中, 优先权的排列是按链接位置决定的。某个主模块只有在前面优先权更高的主模块不占用总线时, 才可使用总线, 同时通知它后面优先权较低的主模块不得使用总线。

2) 共享存储器结构, 这种多微处理机结构, 采用多端口存储器来实现各微处理机之间的互连和通信。由多端口控制逻辑电路解决访问冲突。由于同一时刻只能有一个微处理机对多端口存储器读或写, 所以功能复杂而且要求微处理机数量增多时, 会因争用共享而造成信息传输的阻塞, 降低系统效率, 因此功能扩展很困难。

#### 4. CNC 装置软件结构

(1) 软硬件界面 CNC 装置是由软件和硬件组成的, 硬件为软件的运行提供了支持环境。同一般计算机系统一样, 由于软件和硬件在逻辑上是等价的, 所以在 CNC 装置中, 由硬件完成的工作原则上也可以由软件来完成。但是硬件和软件各有不同的特点。硬件处理速度较快, 但造价较高, 软件设计灵活, 适应性强, 但处理速度较慢。因此 CNC 装置中, 软件和硬件的分配比例是由性能价格比决定的。实际上, 现代 CNC 装置中, 软件和硬件的界面关系是不固定的。在早期的 NC 装置中, 数控系统的全部工作都由硬件来完成, 随着计算机技术的发展, 特别是硬件成本的下降, 计算机参与了数控系统的工作, 构成了所谓的计算机数控(CNC)系统。但是这种参与的程度在不同的年代和不同的产品中是不一样的。图 2-27 说明了三种典型 CNC 装置的软件硬件界面关系。

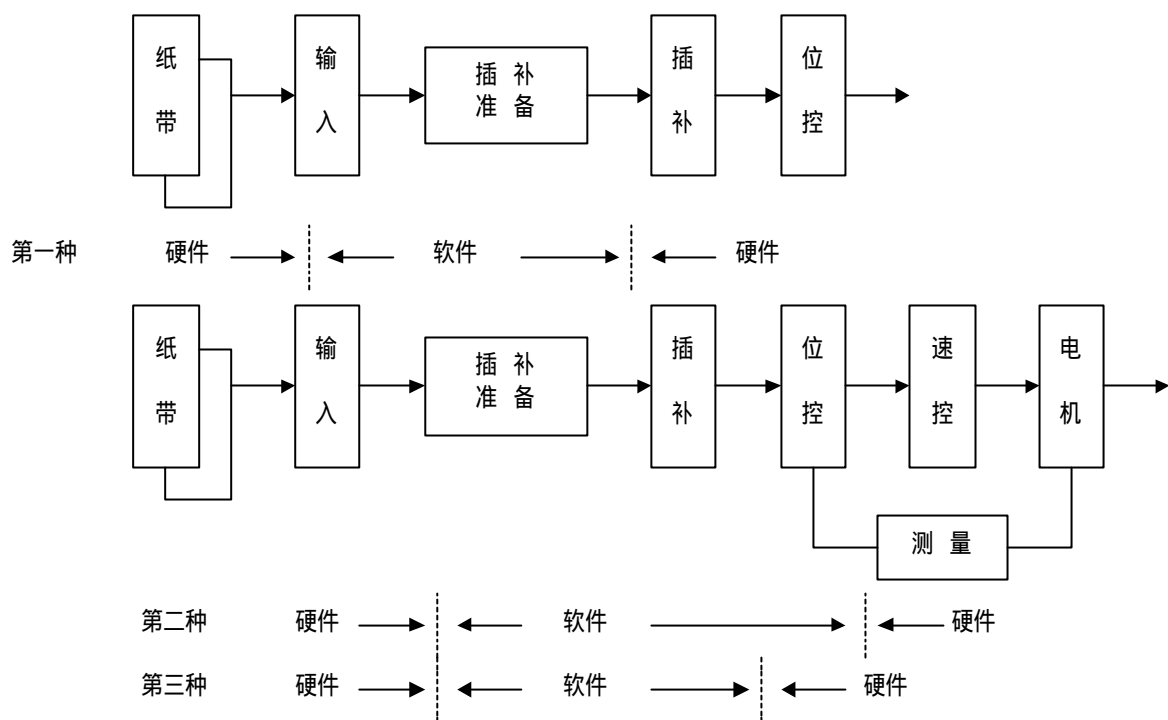


图 2-27 三种典型软硬件界面

(2) 软件总体结构 如图 2-28 是 CNC 装置软件的组成。

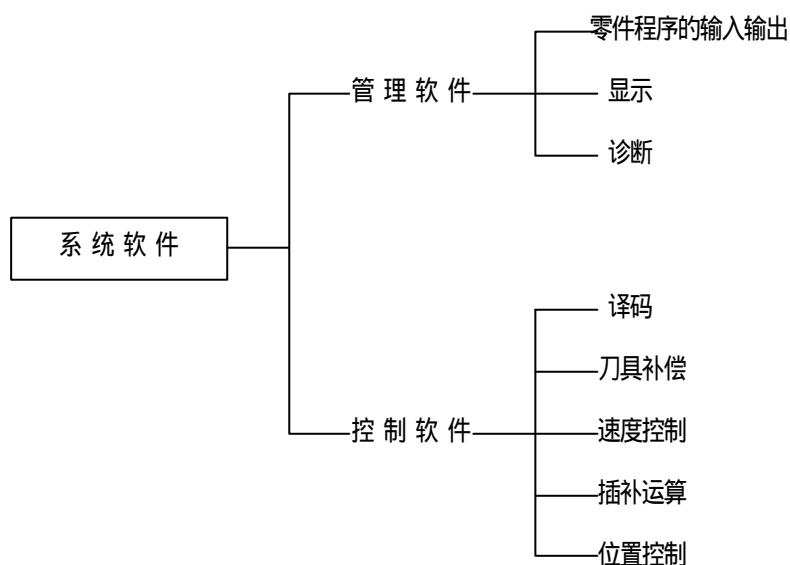


图 2-28 CNC 装置软件的组成

软件的结构取决于装置中软件和硬件的分工，也取决于软件本身的工作性质。我们以一个单 CPU 的 CNC 装置为例，介绍一种软件结构

该系统采用中断型结构模式。其中断优先级关系如图 2-29 所示。该中断优先级共八级，其中 0 级为最低优先级。实际上是初始化程序，七级为最高级。除了第四级为硬件中断完成报警功能之外，其余均为软件中断。各级的功能如表 2-4 所示

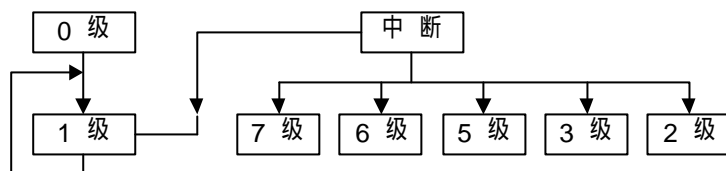


图 2-29 中断优先级结构

表 2-4 各级中断的主要功能

优先级	主要功能	中断源	优先级	主要功能	中断源
0	初始化	开机后进入	4	报警	硬件
1	CRT 显示, ROM 校验	硬件, 主程序	5	插补运算	8ms
2	各种工作方式插补准备	16ms	6	软件定时	2ms
3	键盘, I/O 处理, MST 控制	16ms	7	纸带阅读机	硬件随机

注: MST 是指机床的辅助功能(M)、主轴转速功能(S)、刀具功能(T)。

5. CNC 装置插补原理简介 直线和圆弧是构成工件轮廓的基本线条, 因此大多数 CNC 装置一般都具有直线和圆弧的插补功能, 只有在某种较高档次的 CNC 装置中才具有抛物线、螺旋线插补功能, 因此在这里也只限于讨论直线和圆弧的插补算法。

零件程序员编制的程序, 一般都提供直线的起点和终点、圆弧的起点和终点, 逆圆还是顺圆及圆心相对于起点的偏移量或圆弧半径。程序员还要给出要求的轮廓进给速度和刀具参数。插补的任务就是要根据进给速度的要求, 在轮廓起点和终点之间计算出若干个中间点的坐标值。由于每个中间点计算所需的时间直接影响系统的控制速度, 而插补中间点的计算精度又影响到整个 CNC 系统的精度, 所以插补算法对整个 CNC 系统的性能指标至关重要, 可以说插补是整个 CNC 系统控制软件的核心。人们一直在努力探求一种简单而有效的插补算法。目前应用的插补算法分为两类:

(1) 脉冲增量插补 这类插补算法的特点是每次插补的结束仅产生一个行程增量, 以一个个脉冲的方式输出给步进电机。脉冲增量插补的实现方法较简单, 通常仅用加法和移位就可完成插补。因此它比较容易用硬件来实现, 而且, 用硬件实现这类运算的速度很快。但是目前也有用软件来完成这类算法的, 但它仅适于一些中等精度(0.01mm)或中等速度(1~3m/min)要求的 CNC 系统。因为这类算法通常需约 20 多条执行指令, 如果 CPU 时钟为 5MHz, 那么计算一个脉冲当量所需的时间大约是 40us, 当脉冲当量为 1um 时, 可以达到的极限速度为 1.5m/min, 如果要控制两个或两个以上坐标时, 速度将进一步降低。当然也可以用损失精度的条件来提高速度, 如精度为 0.01mm 时, 单坐标控制速度为 15m/min。

(2) 数字增量插补 这类插补算法的特点是插补运算分两步完成。第一步为粗插补, 它是在给定起点和终点的曲线之间插入若干个, 即用若干条微小直线段来逼近给定曲线, 每一微小直线段的长度 $\Delta l$ 相等, 且与给定给速度有关。粗插补在每个插补运算周期中计算一次, 因此, 每一微小直线段的长度 $\Delta l$ 与进给速度  $F$  和插补周期  $T$  有关, 即 $\Delta l=FT$ 。粗插补的特点是把给定的一条曲线用一组直线段来逼近。第二步为

精插补，它是粗插补算出的每一条微小直线段上再做“数据点的密化”工作，这一步相当于对直线的脉冲增量插补。二次插补的方法适用于闭环和半闭环以直流或交流伺服电机为驱动装置的位置采样控制系统；粗插补在每个插补周期内计算出坐标位置增量值，而精插补则在每个采样周期内采样闭环或半闭环反馈位置增量值及插补输出的指令位置增量值。然后算出各坐标轴相应的插补指令位置 and 实际反馈位置。并将二者相比较，求得跟随误差。根据所求得的跟随误差算出相应轴的进给速度指令，并输给驱动装置。在实用中，粗插补运算一般称为插补，通常用软件实现。而精插补可以用软件也可以用硬件来实现。插补周期与采样周期可以相等，也可以不等，通常插补周期可以是采样周期的整倍数。

#### 2.1.3.4 数控机床的程序编制

##### 1. 数控编程的步骤

一般来说，数控机床程序编制过程主要包括：分析零件图样、工艺处理、数学处理、编写程序单、制作控制介质及程序检验。所谓“数控机床的程序编制”指由分析零件图样到程序检验的全部过程(如图 2-30)所示。

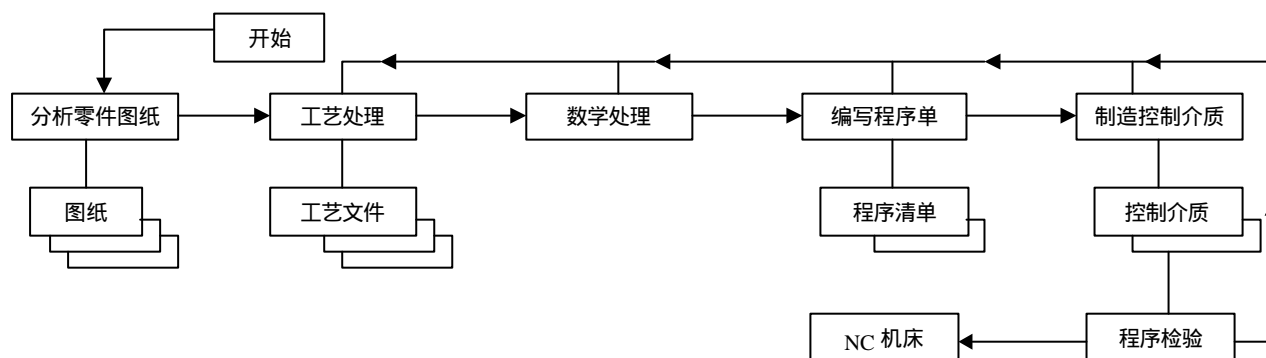


图 2-30 NC 编程步骤

数控机床程序编制的具体步骤与要求如下：

(1) 分析零件图样和工艺处理 这一步骤的内容包括：对零件图样进行分析以明确加工的内容及要求，确定加工方案、选择适合的数控机床、设计夹具、选择刀具、确定合理的走刀路线及选择合理的切削用量等。工艺处理涉及问题很多，编程人员需要注意以下几点：

1) 确定加工方案 此时应考虑数控机床使用的合理性及经济性。并充分发挥数控机床的功能。

2) 工夹具的设计和选择 应特别注意要迅速完成工件的定位和夹紧过程，以减少辅助时间。使用组合夹具，生产准备周期短，夹具零件可以反复使用，经济效果好。此外，所用夹具应便于安装，便于协调工件和机床坐标系的尺寸关系。

3) 正确地选择对刀点 对于数控机床来说，程序编制时正确地选择对刀点是很重要的。“对刀点”是指在数控加工时，刀具相对于工件运动的起点。“对刀点”也是程序执行的起点，故也称为“程序原点”。对刀点的选择原则如下：

- ① 所选的对刀点(即程序起点)应使程序编制简单。
- ② 对刀点应选在容易找正、并在加工过程中便于检查的位置。
- ③ 引起的加工误差小。



对刀点可以设置在加工零件上，刀可以设置在夹具上或机床上。为了提高零件的加工精度，对刀点应尽量设置在零件的设计基准或工艺基准上。对于以孔定位的零件，可以取孔的中心作为对刀点。

对刀点常常既是程序起点，又是程序终点。因此在生产中，要考虑一次加工循环后对刀的重复精度。

所谓“对刀”是指使“刀位点”与“对刀点”重合的操作。所谓“刀位点”，是指刀具的定位基准点。立铣刀的刀位点是刀具轴线与刀具底面的交点；球头铣刀是球头的球心；车刀是刀尖或刀尖圆弧中心；钻头是钻尖。为保证对刀精度常有采用千分表或对刀仪进行找正对刀。

4) 选择合理的走刀路线 合理地选择走刀路线对于数控加工是很重要的。走刀路线的选择应从下面几个方面考虑。

- ① 尽量缩短走刀路线，减少空走刀行程，提高生产效率。
- ② 保证加工零件的精度和表面粗糙度的要求。
- ③ 有利于简化数值计算，减少程序段数目和编制程序工作量。

5) 合理选择刀具 应根据工件材料的性能，机床的加工能力，加工工序的类型，切削用量以及其它与加工有关的因素来正确地选择刀具。对刀具总的要求是：安装调整方便、刚性好、精度高、使用寿命长等。

6) 确定合理的切削用量 在工艺处理中必须正确确定切削用量，即切削深度和宽度、主轴转速及进给速度等。切削用量的具体数值应根据数控机床使用说明书的规定，被加工工件材料类型(如铸铁、钢材、铝材等)、加工工序(如车、铣、钻等、粗加工、半精加工、精加工等)以及其它工艺要求，并结合实际经验来确定。

(2) 数学处理 在完成了工艺的工作后，下一步需根据零件的几何尺寸、加工路线，计算刀具中心运动轨迹，以获得刀位数据。一般的数控系统均具有直线插补与圆弧插补的功能。对于加工由圆弧与直线组成的较简单的平面零件，只需计算出零件轮廓的相邻几何元素的交点或切点的坐标值，得出各几何元素的起点、终点，圆弧的圆心坐标值。如果数控系统无刀具补偿功能，还应计算刀具运动的中心轨迹。对于较复杂的零件或零件的几何形状与控制系统的插补功能不一致时，就需要进行较复杂的数值计算。例如对非圆曲线(如渐开线、阿基米德螺旋线等)，需要用直线段圆弧段来逼近，在满足加工精度的条件下，计算出曲线各节点的坐标值。对于自由曲线、自由曲面、组合曲面的程序编制，其数学处理更为复杂，一般需使用计算机辅助计算，否则难以完成。

(3) 编写零件加工程序单、制作控制介质及程序检验 在完成上述工艺处理及数值计算工作后，即可编写零件加工程序单。程序编制人员使用数控系统的程序指令，按照规定的程序格式，逐段编写零件加工程序单。程序编制人员应对数控机的性能、程序指令及代码非常熟悉，才能编写出正确的加工程序。

程序编写好之后，需制作控制介质。控制介质单台数控机床现大多采用穿孔纸带。将程序单上的程序按 ISO 标准代码或 EIA 代码穿孔制成数控纸带。穿孔纸带上的程序代码通过光电阅读机被输入数控系统，控制数控机床工作。

穿好孔的纸带通常需要经过校验和试切检查后，才用于正式加工。一般来说，先

利用穿孔纸带上的信息输入数控系统进行空走刀检验。对于平面零件可用以笔代替刀具，以坐标纸代替工件进行空运转画图，通过检查机床动作和运动轨迹的正确性检验程序。在具有图形显示功能的数控机床上，可通过显示走刀轨迹或模拟刀具对工件的切削过程，对程序进行检查。对于复杂的零件，需采用铝件、塑料或石蜡等易切材料进行试切。通过检查试件，不仅可确认程序是否正确，还可知道加工精度是否符合要求。当发现工件不符合要求时，可修改程序或采取尺寸补偿等措施。

2. 数控编程的方法 数控机床程序编制(简称程编)的方法有两种：手工程序编制与自动程序编制。

(1)手工编制程序 编制零件加工程序的各个步骤，即从零件图样分析及工艺处理、数值计算、书写程序单、穿孔纸带直至程序的检验，均由人工完成的，即为手工编制程序的过程，亦称为“手工程序编制”。

对于点位加工或几何形状不太复杂的零件，程序编制计算较简单，程序段不多，穿孔纸带也不长，手工程序编制即可实现。但对轮廓形状不是由简单的直线、圆弧组成的复杂零件，特别是空间曲面零件，以及几何元素虽并不复杂，但程序量很大的零件，计算则相当繁琐，工作量大，易出错，难校对，采用手工程序编制是难以完成的。据统计采用手工程序编制，一个零件的编程时间与机床加工时间之比，平均约为 30:1。因此，为了缩短生产周期，提高数控机床的利用率，有效地解决各种模具及复杂零件的加工问题，采用手工编制程序已不能满足要求，而必须采用“自动程序编制”的方法。

(2)自动程序编制 使用计算机(或程编机)进行数控机床程序编制工作，即由计算机(程编机)自动地进行数值计算，编写零件加工程序单，自动地输出打印加工程序单并将程序记录到穿孔纸带上或其它的控制介质上。数控机床程序编制工作的大部分或全部由计算机完成的过程，即为自动程序编制。

程序编制人员只需根据零件图样和工艺要求，使用规定的数控语言编出一个较短的零件加工源程序，并将其输入到计算机(程编)，计算机(或程编机)自动地进行处理，计算出刀具中心运动轨迹。因此程序编制人员可及时检查程序是否正确，需要时可及时修改，以获得正确的程序。由于计算机自动编程代替程序编制人员完成了繁琐的数值计算工作，并省去了书写程序单及制作穿孔纸带的工作量。因而可将编程效率提高几十倍乃至上百倍，同时解决了手工程序编制无法解决的许多复杂零件的编程难题。

按输入方式的不同，自动程序编制有语言输入方式、图形输入方式和语音输入方式三种。语言输入方式指加工零件的几何尺寸、工艺要求、切削参数及辅助信息等是用数控语言编写成源程序后，输入到计算机中，再由计算机进一步处理得到零件加工程序单及穿孔纸带。图形输入方式指用图形输入设备(如数字化仪)及图形菜单将零件图形直接输入计算机并在荧光屏上显示出来，再进一步处理，最终得到加工程序及控制介质。语音输入方式又称语音编程。它是采用语音识别器，将操作员发出的加工指令声音转变为加工程序。

按程序编制系统(程编机)与数控系统紧密性的不同，自动编程又可分为离线程序编制和在线程序编制。与数控系统相脱离，单独的程序编制系统为离线程序编制系统。该种程编系统可为多台数控机床编制程序，其功能往往多而强。程序编制时不占用机

床工作时间。随着数控技术的不断发展，数控系统不仅可用于控制机床，还可用于自动程序编制。这种使自动程编与数控系统连在一起的方法，称为在线程编。有的数控装置具有会话型程编功能，就是将离线程编机的许多功能移植到了数控系统，如 FANUC 3TF 和 FANUC 11MF 系统就是具有人机会话型程编功能的 CNC 系统。

3. 常用的程序编制指令 在数控编程中，使用 G 指令、M 指令及 F、S、T 指令代码描述数控机床的运行方式，加工种类，主轴的启、停，冷却液开、关辅助功能以及规定进给速度，主轴转速，选择刀具等。各指令功能字如表 2-5。下面介绍常用指令。

表 2-5 数控编程指令功能字

N	G	X, Y, Z, U, V, W, P, Q, R, I, J, K, A, B, C, D	F	S	T	M	LF
语句 号字	辅助 功能 字	位置功能字	进给 功能 字	主轴 转速 功能 字	刀具 功能 字	辅助 功能 字	程序 段结 束功 能字

(1) 准备功能指令，亦称“G”指令 准备功能指令字母“G”和其后的 2 位数字组成。从 G00 至 G99 可有 100 种。该指令的作用，主要是指定数控机床运动方式，为数控系统的插补运算作好准备，所以在程序段中 G 指令一般位于坐标指令的前面。常用的 G 指令有：

1) G01 直线插补 用于产生直线或斜线运动。可使机床沿 X、Y、Z 方向执行单轴运动，或在各坐标平面内执行具有任意斜率的直线运动，也可使机床三轴联动，沿任意空间直线运动。

2) G02, G03 圆弧插补 使机床在各坐标平面内执行圆弧运动，切削出圆弧轮廓。G02 为顺时针圆弧插补指令，G03 为逆时针圆弧插补指令。圆弧的顺、逆方向可按图 2-31 中给出的方向判断。使用圆弧插补指令之前必须应用平面选择指令，指定圆弧插补的平面。

3) G00 快速点定位 它命令刀具以点位控制方式从刀具所在点快速移动到一个目标位置。它只是快速定位，而无运动轨迹要求。

4) G17、G18、G19 坐标平面选择 G17 指定零件进行 XY 平面上的加工，G18、G19 分别为 ZX、YZ 平面上的加工。这些指令在进行圆弧插补、刀具补偿时必须使用。

5) G40、G41、G42 刀具半径补偿 数控装置大都具有刀具半径补偿功能，为程序编制提供了方便。当编制零件加工程序时，不需要计算刀具中心运动轨迹，而只需按零件轮廓编程，使用刀具半径补偿指令，并在控制面板上利用刀具拨码盘或键盘(CRT/MDI)，人工输入刀具半径，数控装置便能自动地计算出刀具中心轨迹，并按刀具中心轨迹运动。

当刀具磨损或刀具重磨后，刀具半径变小，只需手工输入改变后的刀具半径，而不必修改已编好的程序或纸带。在用同一把刀具进行粗、精加工时，设精加工余量为  $\Delta$ ，则粗加工的补偿量为  $r + \Delta$ ，而精加工的补偿量改为  $r$  即可。

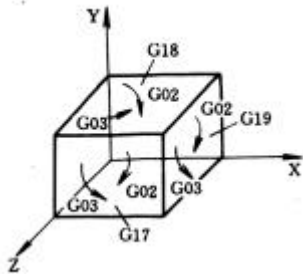


图 2-31 顺逆圆的区分

G41 左偏刀具半径补偿 沿刀具运动方向看(假设工件不动), 刀具位于零件左侧时的刀具半径补偿。

G42 右偏刀具半径补偿 沿着刀具运动方向看(假设工件不动), 刀具位于零件右侧时的刀具半径补偿。

G40 刀具半径补偿撤消 使用该指令后使 G41、G42 指令无效。

6) G92 预置寄存 按照程序规定的尺寸字修改或设置坐标位置, 不产生运动。通过该指令设定对刀点(即程序的原点), 从而建立一个坐标系, 通常称为工件坐标系。该指令只是设定坐标系, 刀具(或机床)并未运动。

7) G90、G91 绝对尺寸及增量尺寸程编指令 G90 表示程序段的坐标字按绝对坐标程编; G91 表示程序段的坐标字按增量坐标程编。

## (2) 辅助功能指令

辅助功能指令亦称“M”指令。它是由字母 M 和其后的两位数字组成, 从 M00 至 M99 共 100 种。这类指令主要是用于机床操作时的工艺性指令。常用的辅助功能 M 指令说明如下:

1) M00 程序停止 在完成编有 M00 指令的程序段中的其它指令后, 主轴停转、进给停止、冷却液关断, 程序停止。当重新按下控制面板上的循环启动按钮, 继续执行下一程序段。

2) M01 计划停止 该指令的作用与 M00 相似。所不同的是, 必须在操作面板上, 预先按下“任选停止”按钮, 当执行完编有 M01 指令的程序段的其它指令后, 程序即停止。如果不按下“任选停止”开关, 则 M01 指令不起作用, 程序继续执行。

3) M02 程序结束 该指令用于程序全部结束。此时主轴进给及冷却液供给全部停下。常用以机床复位及卷回纸带到“程序开始”字符。

4) M03、M04、M05 分别为主轴顺时针旋转、主轴逆时针旋转及主轴停止。

5) M06 换刀 用于具有刀库的数控机床(如加工中心)的换刀功能。

6) M07 2 号冷却液开 用于雾状冷却液开。

7) M08 1 号冷却液开 用于液状冷却液开。

8) M09 冷却液关 注销 M07、M08、M50 及 M51。

9) M10、M11 夹紧、松开 适用于机床滑座、工件、夹具、主轴等的夹紧或松开。

10) M30 纸带结束 在完成程序段的所有指令后, 使主轴、进给和冷却液停止。常用以使控制和(或)机床复位, 包括将纸带倒回到“程序开始”字符, 或使环形纸带越过接头, 或转换到第二台输入机。

## 4. 程序结构与格式

### (1) 程序结构

程序是由若干个段组成。程序的开头写有程序号(程序编号), 程序结束时, 写有程

序结束指令。举例如下：

```
00600
N1      G92      X0      Y0      Z1.0;
N2      S300     M03;
N3      G90      G00     X-5.5    Y-6;
N1      Z-1.2    M08;
N5      G41      G01     X-5.5    Y-5.    D03    F2.4;
N6      Y0;
N7      G02      X2.     Y3.5    R3.5;
N8      G01      X2.     Y3.5;
N9      G02      X2.     Y-3.5;   R3.5;
N10     G01      X-2.    Y-3.5;
N11     G02      X-5.5    Y0      R3.5;
N12     G01      X5.5    Y5;
N13     G40      G00     X-5.5    Y6.    M09
N14     Z1.     M05;
N15     X0      Y0;
N16     M30
```

该程序由 16 个程序段组成。程序的开头 00600 是程序编号，程序的结束写有 M30，是程序终了指令。

(2) 程序段格式 程序段格式有字地址可变程序段格式，分隔符固定顺序程序段格式等。

1) 字地址程序段格式 目前国内外都广泛采用字地址可变程序段格式。所谓可变程序段即程序段的长度是可变的。

字地址程序段的特点是每个程序段由若干个字组成。每个字由英文字母开头，其后紧随数字(有的数字前面有符号)构成的。它代表控制系统的一个具体指令。字母代表字的地址，因此，该种程序段格式称为字地址程序段，其一般格式为：

程序段序号字 字…字 程序段结束符号

例：N3 G90G00 X-5.5 Y-6.0;

该例中程序段是由五个字组成的。字 N3 为程序段的顺序号，G90 表示绝对尺寸编程，G00 为快速移动点定位，X-5.5 及 Y-6.0 表示 X、Y 轴移动方向及移动量。程序段的结束必须写有程序段结束符号。由此可见，字地址格式，直观明瞭易写易检查修改。

2) 分隔符固定顺序格式 该程序段格式的特点是用分隔符将字分开，每个字的顺序及代表的功能是固定不变的。例如 “3B”(或 4B)指令，其一般表示为：

B X B Y B J G Z

其中 B 为分隔符，每个字代表的功能是固定的，其意义如下：

B	X	B	Y	B	J	G	Z
分隔符号	X 坐标值	分隔符号	Y 坐标值	分隔符号	计数长度	计数方向	加工指令

该种程序段格式可使数控装置的设计与制造简化，不需地址判断电路。常用于功

能不多且较固定的数控装置中，如我国数控线切割机床的数控装置大多采用“3B”(或4B)指令。

5. 数控语言及其应用

(1) 数控语言的发展概况 50 年代初，美国麻省理工学院研制成功了第一台数控铣床。为了充分发挥数控铣床的加工能力，解决复杂零件的加工问题，麻省理工学院借鉴了当时研制计算机通用算法语言的经验，设计了一种专门用于机械零件数控加工的自动编程语言 APT(Automatically Programmed Tools)。在随后的生产应用中，APT 语言被逐步更新和扩充，形成了 APTⅡ、APTⅢ、APTⅣ等不同版本。

APT 语言词汇丰富，定义的几何类型多，并配有 1000 多种后置处理，在各国工业界得到广泛应用。但是 APT 系统庞大,占用内存大，需使用大型计算机，费用昂贵。根据加工零件的不同特点和用户的不同需要，参考 APT 语言的思想，各国先后研究了许多各具特点的编程系统。如美国的 ADAPT、AUTOSPOT；英国的 2C, 2CL, 2PC；德国的 EXAPT-1(点位)、EXAPT-2(车削)、EXAPT-3(铣削)；法国的 IFAPT-P(点位), IFAPT-C(轮廓), EFAPT-CP(点位、轮廓)；日本的 FAPT, HAPT 等数控自动编程语言系统。国外有代表性的数控语言系统见表 2-6。

我国自 50 年代末开始研制数控机床，60 年代中期开始了数控自动编程方面的研究工作。70 年代已研制了 SKC、ZCX、ZBC-1、CKY 等具有平面轮廓铣削加工、车削加工等功能的数控自动编程系统。后又研制出具有解决复杂曲面编程功能的数控编程系统 CAM-251 等多功能的语言系统。随着计算机技术的发展，微机数控自动编程系统以其较高的性能价格比迅速发展起来。近年来推出了 HZAPT、EAPT、SAPT 等微机数控自动编程系统。

(2) APT 语言简介 APT 语言的零件程序由 APT 处理系统能识别的语句和数据组成。APT 系统以及与它连用的后置处理程序，就是利用这种信息来完成必要的计算，再产生控制数控机床的指令。

下面用一个 APT 语言编程实例来简介 APT 语言。图 2-32 是待加工的零件，表 2-7 是加工零件的 APT 语言源程序清单。

表 2-6 国外有代表性的数控语言

名称	研制者	所用计算机	适用范围	
			数控装置	坐标数
APTⅡ	MIT (美)	IBM7090 (256K)	通用	3-6
APTⅣ	IITRI (美)	多种	通用	3-6
APT <sub>AC</sub>	美国	IBM370	连续	4-5
ADAPT	IBM (美国)	IBMS/360F	连续	2
AUTOSPOT	美国	IBMS/360E	点位直线	3
AUTOMAP-1	美国	IBM1620	连续	2
EXAPT1	EXAPT 协会 (德)	多种	点位	3
EXAPT2	EXAPT 协会 (德)	多种	车床, 连续	3
EXAPT2	EXAPT 协会 (德)	多种	连续, 二坐标	3
2C	NEL (英)	多种	车床, 连续	2
2CL	NEL (英)	多种	连续	3
2PC	NEL (英)	多种	点位	2
LFAPT-P	ADEPA (法)	56K 计算机	点位	3
LFAPT-C	ADEPA (法)	56K 计算机	连续	3
LFAPT-F	ADEPA (法)	56K 计算机	点位, 连续	3
FAPT	富士通 (日)	FAOOM270-10	连续	2, 5
HAPT	日立 (日)	HIT-AC5020	连续	2

对各条语句加以说明如下：

PARTNO N/C 360 APT SAMPLE PART PROGRAM (1)

识别零件，并作为程序单的标题，以及用来识别控制带。

SP=POINT/0, 0, 0 (2)

对坐标值  $X=0, Y=0, Z=0$  的点赋予 SP 的名字。

L1=LINE/4, 0, 0, 4, 8, 0 (3)

定义一条过两点的直线。点的坐标为  $X=4, Y=0, Z=0$  和  $X=4, Y=8, Z=0$

PT=POINT/4.0, 8.0, 0 (4)

定义一个点，其坐标为  $X=4, Y=8, Z=0$ (此例小数点可有可无)。

L2=LINE/PT, ATANGL, 45 (5)

定义一条过 PT 点的直线，该直线与 X 轴成  $45^\circ$  角。

L3=LINE/8, 12, 0, 12, 12, 0 (6)

定义一条过两点的直线，点的坐标为  $X=8, Y=12, Z=0$  和  $X=12, Y=12, Z=0$ 。

L4=LINE/14, 5, 0, 14, 10, 0 (7)

定义一条过两点的直线，点的坐标为  $X=14, Y=5, Z=0$  和  $X=14, Y=10, Z=0$ 。

L5=LINE/0, 2, 0, 11, 2, 0 (8)

定义一条过两点的直线，点的坐标为  $X=0, Y=2, Z=0$  和  $X=11, Y=2, Z=0$

C1=CIRCLE/12, 10, 0, 2.0 (9)

定义一个圆，圆心坐标为  $X=12, Y=10, Z=0$ ，其半径为 2。

C2=CIRCLE/14, 2, 0, 3.0 (10)

定义一个圆，圆心坐标为  $X=14, Y=2, Z=0$ ，其半径为 3。

INTOL/0 (11)

规定零件内容差为 0。此容差表示零件加工后的尺寸比理论尺寸小的最大允许量。

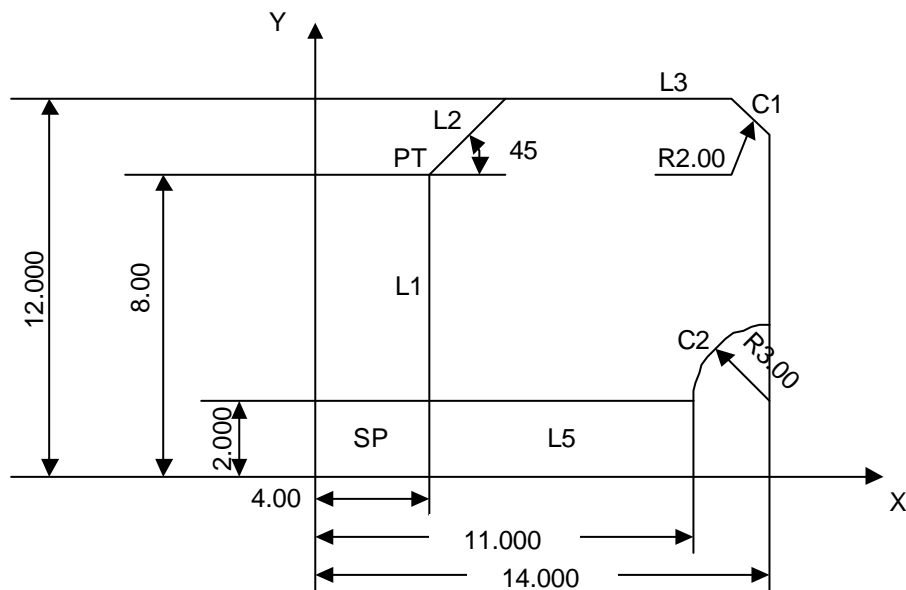


图 2-32 典型零件定义

表 2-7 源程序单

PARTN ON/C 360 APT SAMPLE PART PROGRAM	1	FEDRAT/20.0	16
SP=POINT/0.,0.,0.	2	FROM/SP	17
L1=line/4.0,0,4,8,0	3	GO/TO,L1	18
PT=POINT/4.0,8.0,0	4	TLLFE.GOLFT/L1,PAST,L2	19
L2=LINE/PT,ATANGL,45	5	GORGT/L2,PAST,L3	20
L3=LINE/8,12,0,12,12,0	6	GORGT/L3,TANTO,C1	21
L4=LINE/14,5,0,14,10,0	7	GOFWD/C1,TANTO,L4	22
L5=LINE/0,2,0,11,2,0	8	GOFWD/L4,PAST,C2	23
C1=CIRCLE/12,10,0,2,0	9	GORGT/C2,PAST,L5	24
C2=CIRCLE/14,2,0,3,0	10	GORGT/L5,PAST,L1	25
INTOL/0	11	GOTO/SP	26
OUTTOL/005	12	COOLNT/OFF	27
CUTTER/.25	13	SPINDL/OFF	28
SPINDL/2000,CLW	14	FINI	29
COOLNT/ON	15		

OUTTOL/.005 (12)

规定零件外容差为 0.005，这表示加工后最大允许余量。

CUTTER/.25 (13)

规定所采用的刀具直径为 0.25(英寸)

SPINDL/2000,CLW (14)

规定机床主轴转速为 2000R/MIN，转动方向为顺时针。

COOLNT/ON (15)

规定接通冷却液.

FEDRAT/20.0 (16)

表示进给速度为 20.0

FROM/SP (17)

规定加工起始基准点是 SP 点

GO/TO,L1 (18)

规定刀具从当前位置(SP 点)开始运动直到 L1 为止

TLLFT,GOLFT/L1,PAST,L2 (19)

规定刀具在零件的左边(TLLFT),到 L1 时转向左(GOLFT)。(这个方向总是顺着当时走刀方向来看的)。刀具继续沿 L1 运动，直到走过 L2 线止。

GORGT/L2, PAST,L3 (20)

规定刀具向右(GORGT)，沿 L2 继续移动，直到刀具走过 L3 为止

GORGT/L3, TANTO,C1 (21)

规定刀具向右(GORGT)，沿 L3 继续移动，直到刀具与圆 C1 相切(TANTO)为止。

GOFWD/C1, TANTO,L4 (22)



- 规定刀具向前(GOFWD), 沿 C1 圆继续移动, 直到刀具与 L4 线相切为止。  
GOFWD/L4, PAST, C2 (23)
- 规定刀具向前, 沿 L4 继续移动, 直到刀具走过 C2 圆为止  
GORGL/C2, PAST, L5 (24)
- 表示刀具向右沿 C2 继续移动,直到刀具走过 L5 为止  
GORT/L5,PAST,L1 (25)
- 表示刀具向右沿 L5 继续移动,直到刀具走过 L1 为止  
GOTO/SP (26)
- 规定刀具直接走到 SP 点, (这就使刀具回到原始起点)。  
COOLNT/OFF (27)
- 规定断开冷却液。  
SPINDL/OFF (28)
- 规定主轴停车。  
FINI (29)
- 表示此零件程序结束。

## 2.1.4 加工中心

### 2.1.4.1 加工中心的概念

1. 数控加工中心(MC) 数控加工中心是带有刀库和自动换刀装置(ATC)的一种多功能数控机床。由于工件经一次装夹后, 能对两个以上的表面自动完成铣、镗、钻、铰等多种工序的加工, 并且有多种换刀或选刀功能, 从而使生产效率和自动化程序大大提高。这类加工中心一般是在镗、铣床的基础上发展起来的, 因此也称为镗铣类加工中心。为了加工出零件所需的形状, 这类机床至少有三个坐标运动, 即由三个直线运动坐标 X, Y, Z 和三个转动坐标 A, B, C 的适当组合而成。按控制轴数的多少可以对镗铣加工中心(通常简称为加工中心)分为三类:

- (1) 三坐标加工中心: X, Y, Z 轴同时控制。
- (2) 四坐标加工中心: 可以同时控制 X, Y, Z 轴和工作台旋转(B 轴)
- (3) 五坐标加工中心: 在四坐标加工中心的基础上, 附加 A 轴或 C 轴的功能

若按主轴的位置分, 则有卧式加工中心、立式加工中心和立卧两用加工中心(又称五面加工中心)等。图 2-33a 是济南第一机床厂的 BZ20 加工中心, 图 2-33b 和图 2-33c 是北京机床研究所生产的 THM6350 精密卧式加工中心和 XH715A 立式加工中心。

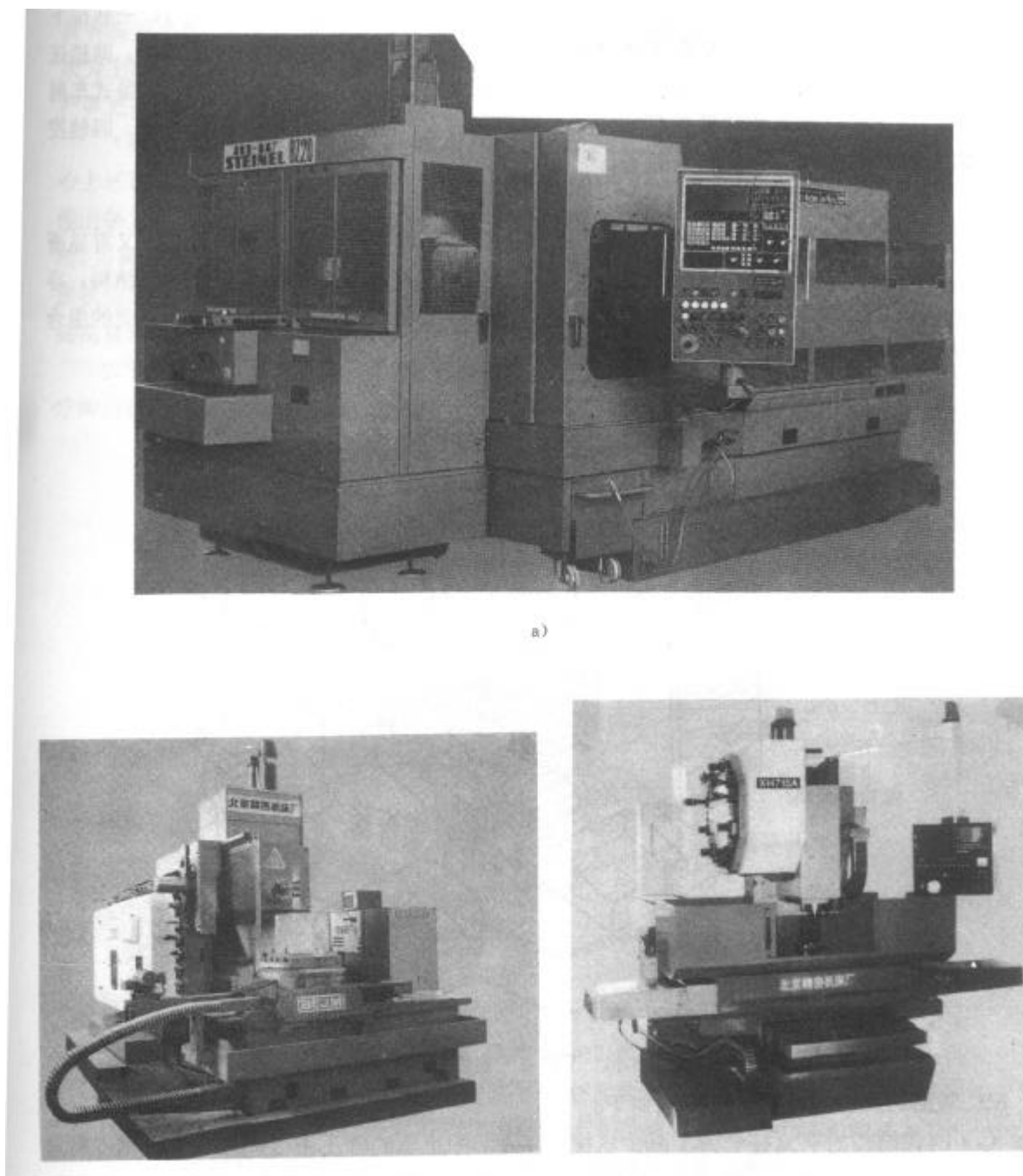


图 2-33 加工中心

a) 数控加工中心 b) THM6350 精密卧式加工中心 c) XH715A 立式加工中心

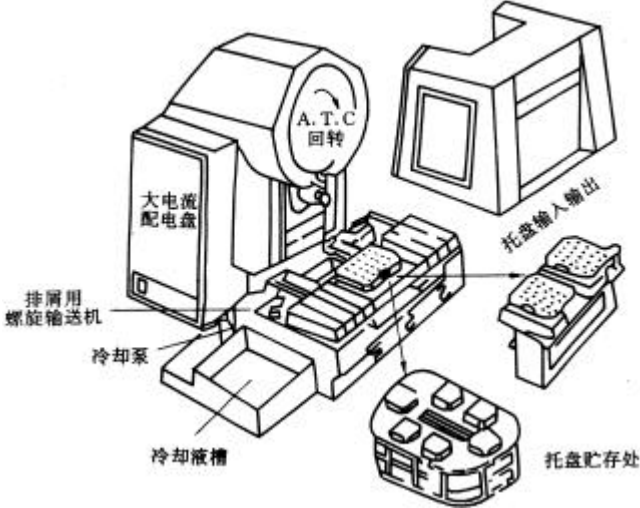
2. 车削加工中心(TC) 对于常用的数控车床, 一般具有如下运动功能: 主轴的旋转运动(C 轴), 转塔刀架的纵向和横向运动(Z 和 X 轴), 刀架的纵向运动(Z 轴)。当给数控车床上附设自动换刀装置后, 它便具有复合加工的功能, 构成了车削加工中心(TC)。图 2-10 给出了一种车削加工中心的外形图。

车削加工中心按主轴的方向是水平或垂直分为卧式和立式两大类。但与 MC 相比较, 目前运行中的 TC 种类并不多, 这是由于 X, Z 和 C 轴的配置几乎固定之故。卧式 TC 一般按下述三条原则来进行分类: (1) 有无 Y 轴功能 (2) 实现 Y 轴和 Z 轴运动功能的方法, 即把这此功能分配给主轴和大拖板的方法; (3) 有无转台结构和自动换刀装置(ATC)。例如卧式车削加工中心分为三轴控制式和四轴控制式。而三轴控制式又分为主

轴固定式和移动式。四轴控制式分为主轴移动式 and 刀类移动式等等。

2.1.4.2 MC 及 TC 的结构特点

1. MC 的结构特点 数控加工中心在其结构上既与一般数控机床有相似之处，又有显著的特点。如主轴常使用在卧式镗铣床上的“双列滚柱轴承和锥面止推轴承”的组合结构；导轨面上也普遍采用低摩擦特性的氟化乙烯树脂、滚柱导轨和经淬火磨削加工的导轨面的组合等。在加工中心上，常将处理切屑的螺旋输送机装在底座上，参



见图 2-34 所示。

图 2-34 工作台的模块结构

MC 常见的几种结构形式与特点如下：

(1) 门式结构的双立柱：为了减少机械热变形，中小型的加工中心外形通常采用左右对称的门式结构立柱，如图 2-35 所示。这种立柱大多采用双壁结构，主轴头在立柱内上下运动。

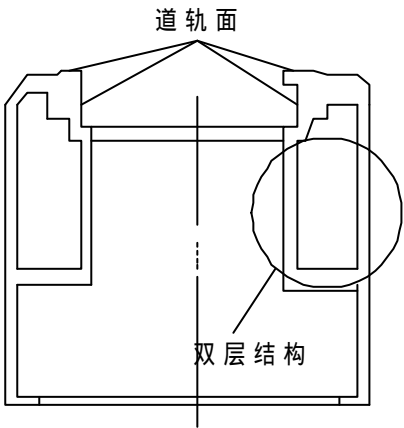


图 2-35 门式结构立柱(双立柱的断面形状)

(2) 立柱移动型加工中心：这种数控加工中心，由立柱来完成零件形状加工所需要的 X, Y, Z 轴移动。其优点是工作台无外伸、刚性强、稳定。但必须注意与工件的接近性，要具有良好的与输送系统的连接性。

(3) 带回转头的加工中心：这种形式的加工中心是以回转头的分度取代换刀动作，

能迅速适应后续加工的要求,如图 2-36 所示。这种机床是处于主轴头更换型加工中心与单轴加工中心之间的加工机种。因此,它既保持了加工中心所具有的柔性刀具系统,同时又具有高生产率。若将多轴刀具的刀具箱设置在回转头上,便成为主轴头旋转型加工中心,它比带回转头的加工中心生产率更高。

(4) 其它装置结构:为了提高生产率,在数控加工中心上还设置有缩短非切削时间的自动定位、消除间隙等功能的装置,以及切削异常检测装置、刀具损伤检测和故障诊断、刀具位置和尺寸自动补偿、刀具寿命监测等各种识别切削状态的装置。此外,还有预备换刀装置等支持设备,以期提高自动化程度,适应在 MAS 中的无人运行。

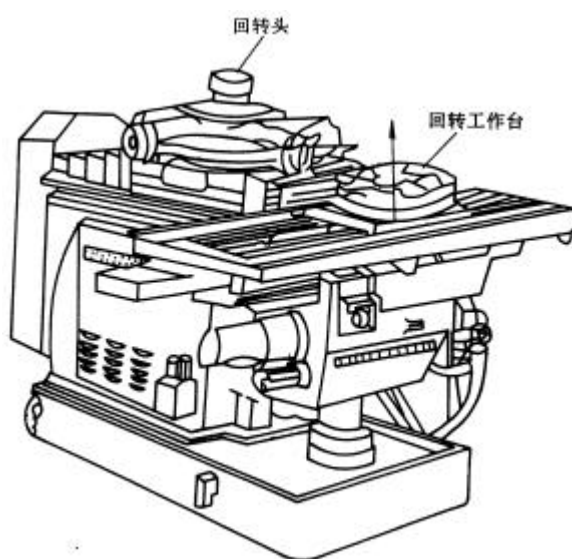


图 2-36 带回转头的卧式加工中心

2. TC 的结构及特点 车削加工中心保留有数控车床的很多特色,并具有和车床相似的结构设计特点。这里提出 TC 结构设备中特别应注意的若干问题如下:

- (1) 导轨面的配置和结构要能适应实现多种复合加工的运动功能;
- (2) 要具有良好的切屑排出和处理功能,即要采用切屑流形式结构和挡板;
- (3) 刀具应容易接近工件及采用刀具相互干扰很少的转台结构。

现举若干典型结构的实例如下:

(1) 主轴系统结构:图 2-37 是主轴系统结构。在 TC 机床的主轴上,除连续旋转运动之外,附加了固定和分度功能。为了实现这一功能,设置了主轴固定用的压板,主轴分度用的脉冲电机以及主轴连续旋转和分度动作交换用的电磁离合器。

(2) 回转立柱结构:图 2-38 是回转立柱结构的示意图。动力通过回转床身下部的液压马达传到刀具主轴上。同时,在回转立柱的侧面左右对称配置车削用和回转刀具用的六角转台。回转立柱和这些六角转台依靠液压分度,用高精度的联轴节(转位精度不超过  $1\mu\text{m}$ )来定位。

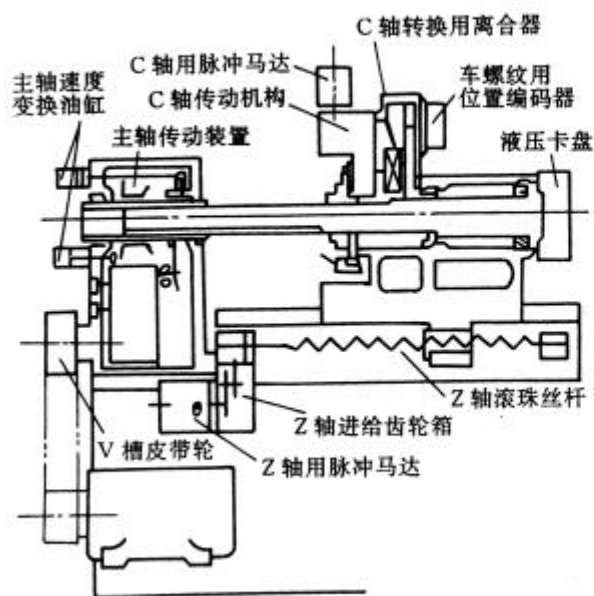


图 2-37 TC 主轴系统的结构

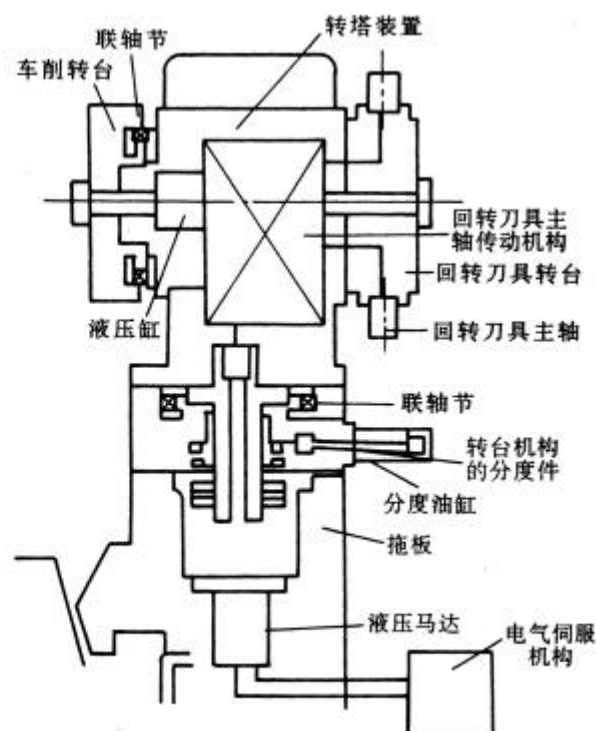


图 2-38 回转立柱结构

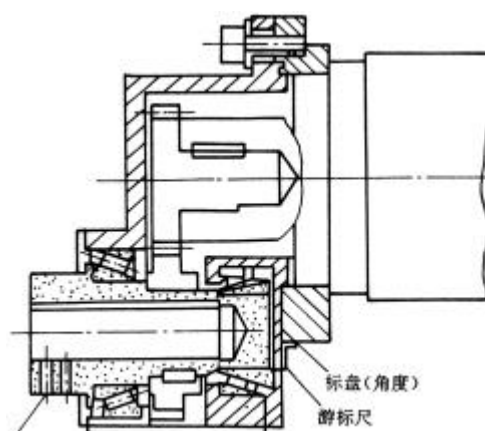


图 2-39 回转刀具用偏心辅助装置

(3) 回转刀具的偏心装置: 图 2-39 表示回转刀具的偏心装置。使用该装置弥补了只能完成正对工件轴线加工的缺陷。

#### 2.1.4.3 MC 的主传动系统

加工中心的主传动系统, 是指将主轴电动机的原动力通过该传动系统变成可供切削加工用的切削力矩和切削速度。为适应各种不同材料的加工及各种不同的加工方法, 要求加工中心的主传动系统要有较宽的转速范围及相应的输出力矩。此外, 由于主轴部件将直接装夹刀具对工件进行切削, 因而对加工质量 (包括加工粗糙度) 及刀具寿命有很大的影响, 所以对它的要求是很高的。希望加工中心能高效率地加工出高精度、

低粗糙度的工件，必须要有一个具有良好的运动学及动力学参数的主传动系统和一个具有高精度、高刚度、振动小、热变形及噪声均能满足需要的主轴部件。

由于加工中心带有 ATC，要求主传动系统具有可靠的自动定向装置、刀柄孔的清洁装置及刀具的锁紧、松开装置。

为了适应不同的加工需要，目前主传动系统大致可以分为三类：一是由电机直接带动主轴旋转，其优点是结构紧凑，占用空间少，转换效率高，但主轴转速的变化及扭矩的输出和电机的输出特性完全一致，因而在使用上受到一定限制(如图 2-40)。二是经过一级变速，目前多用皮带(同步带)来完成,其优点是结构简单，安装调试方便，且在一定程度上能满足转速与扭矩的输出要求；但其调速范围比仍与电机一样受电机调速范围比的约束。三是经过二级以上的变速，目前多采用齿轮来完成，其优点是能够满足各种切削运动的转矩输出，且具有大范围的速度变化能力。但由于结构复杂、需增加润滑及温度控制系统，成本较高。此外制造与维修也较困难。

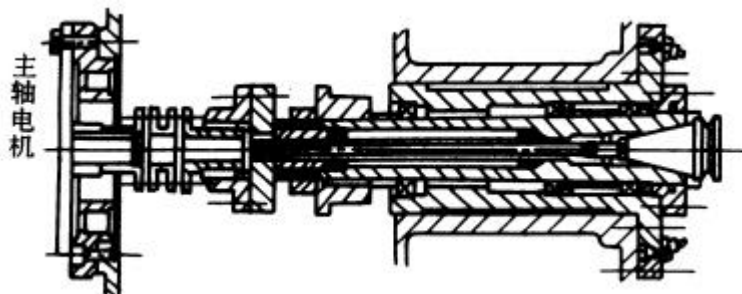


图 2-40 直接传动主轴

近年来，由于出现了一种新式的内装电机主轴，即主轴与电机转子合为一体。其优点是主轴部件结构紧凑，重量轻，惯量小，可提高启动、停止的响应特性，并利于控制振动和噪声。缺点是电机运转产生的热量易使主轴产生热变形，因此温度的控制和冷却是使用内装电机主轴的关键问题。

#### 1. 主传动系统的运动学参数

(1) 转速 加工中心在工作中对工件要进行钻、镗、铣、攻螺纹和铰孔等加工，有时甚至要进行磨削加工，因此要求主轴具有较宽的转速范围。如果对各种加工工序进行主传动系统的转速—功率分析，就会发现，在较低转速下经常使用的是攻螺纹、铰孔或部分精加工工序，这些工序相对来说需要的输出功率较小，因此主轴在低速区需要较大的恒转矩输出。主轴自某一转速起至最高转速止则为恒功率输出，在这个工作区内，任何转速都能传递全部功率，而转矩的输出则随转速的增加而减少。恒转矩输出与恒功率输出的交界点的转速称为计算转速（图 2-41 中  $n_j$  点的转速），也就是说计算转速是传动系统传递全部主轴电机功率时的最低转速。

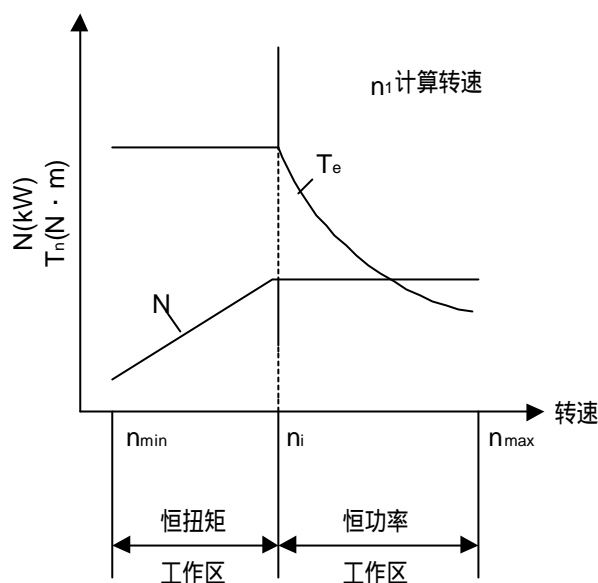


图 2-41 计算转速

图 2-41 所示的是直接传动型或一级变速时的主轴输出特性，图  $T_n$  为输出转矩曲线，它在小于计算转速  $n_j$  的转速内是一条水平线，为恒转矩输出；图中  $N$  是功率输出曲线，它在大于计算转速  $n_j$  的转速时是一条水平线，为恒功率输出。对于多级变速的主轴结构，其每一级速度都有自己的计算转速，其主轴的功率输出特性图中将由若干个类似的曲线叠加组成。所以对于加工中心的设计者来说，要将加工中心的加工能力(输出转矩及功率曲线形式的覆盖面)划定一定的范围，然后依据所需要的功率-转矩-转速曲线复盖范围决定采用何种主传动系统结构。对加工中心的用户来说，是要根据所要加工的工件类型选择能满足功率-转矩输出要求的机床。由于电子技术的发展，目前所用的主轴电机的调速比都达到或超过 1:100，所以目前多数加工中心的主传动变速不超过二级，与过去复杂的主传动系统相比，机械结构大大简化，制造与维修更方便，使机床在机械结构上朝着优化的方向前进了一步，在一定程度上也使机床进入了一个新的阶段。

(2) 回转精度 当主轴作回转运动时，线速度为零的点的连线称为主轴的回转中心线，回转中心线的空间位置，在理想的情况下应是固定不变的。实际上，由于各种因素的影响，回转中心线的空间位置每一瞬间都是变化的，这些瞬时回转中心线的平均空间位置称为理想回转中心线。瞬时回转中心线相对于理想回转中心线在空间的位置距离，就是主轴的回转误差，而回转误差的范围，就是主轴的回转精度。回转误差的基本形式为：纯径向误差、角度误差和轴向误差，它们很少单独存在。当纯径向误差和角度误差同时存在时，构成径向跳动，而轴向误差和角度误差同时存在时构成端面跳动。这两种误差出现的频率(周期)可分为周期性和随机性两种。周期性误差指那些误差出现的频率为主轴旋转频率的整数倍；随机误差，是指包括由随机性因素引起的误差和其出现频率不为主轴旋转频率的整数倍的误差。由于主轴的回转误差一般是一个空间的旋转矢量，这不是在所有的情况下都表示为被加工件所得到的加工形状。例如，在主轴有周期性纯径向误差幅值为  $A$  的加工中心上镗孔，当频率比为 1 时，加工出来的孔为椭圆形，其长轴方向与径向误差方向差一个  $\theta$  角，其直径差  $\delta = A \cos \theta$ ；当

频率比为 2 时,则加工出来的孔呈“鸡心形”,当频率比为  $n$  时,加工出来的孔是具有  $n-1$  个波峰的摆线形孔。主轴回转误差对被加工工件的影响大致是这样:周期性误差主要造成被加工工件的形状误差和波纹度,其值大约为空载测得值 70%~80%;而随机误差则主要影响被加工工件的表面精糙度。

2. 主传动系统的动力学参数

(1) 静刚度 静刚度是指主轴抵抗静态外力引起变形的能力。在主传动系统中,主轴及主轴轴承的综合静刚度对加工中心的性能及加工精度都有影响,如刚度不足会造成加工工件的尺寸误差和形状误差,影响齿轮及轴承的工作性能及寿命,引起切削过程不稳,发生振颤,降低加工质量,限制了机床功率的充分利用,从而影响切削生产率。

(2) 抗振性 加工中心在工作时,通过主传动系统的运动,在切削过程中,不仅有静态力的作用,同时还受到由于断续切削、加工余量变化、运动部件的不平衡,零件在加工或装配时的缺陷及在切削过程中的再生自振等原因引起的冲击力或交变力的干扰,从而使主轴产生振动,降低加工精度,影响表面精糙度。因此主传动系统中的各个主要零部件不但要具有一定的静刚度,而且要求具有足够的抑制各种干扰力引起振动的能力 抗振力。抗振力用动刚度或动柔度来衡量。

2.1.4.4 MC 的进给系统

加工中心的进给系统一般即为进给驱动装置,该系统承担了加工中心各直线坐标轴的定位和切削进给,因此将直接影响整机的运行状态和精度指标。进给系统机电关系如图 2-42 所示。

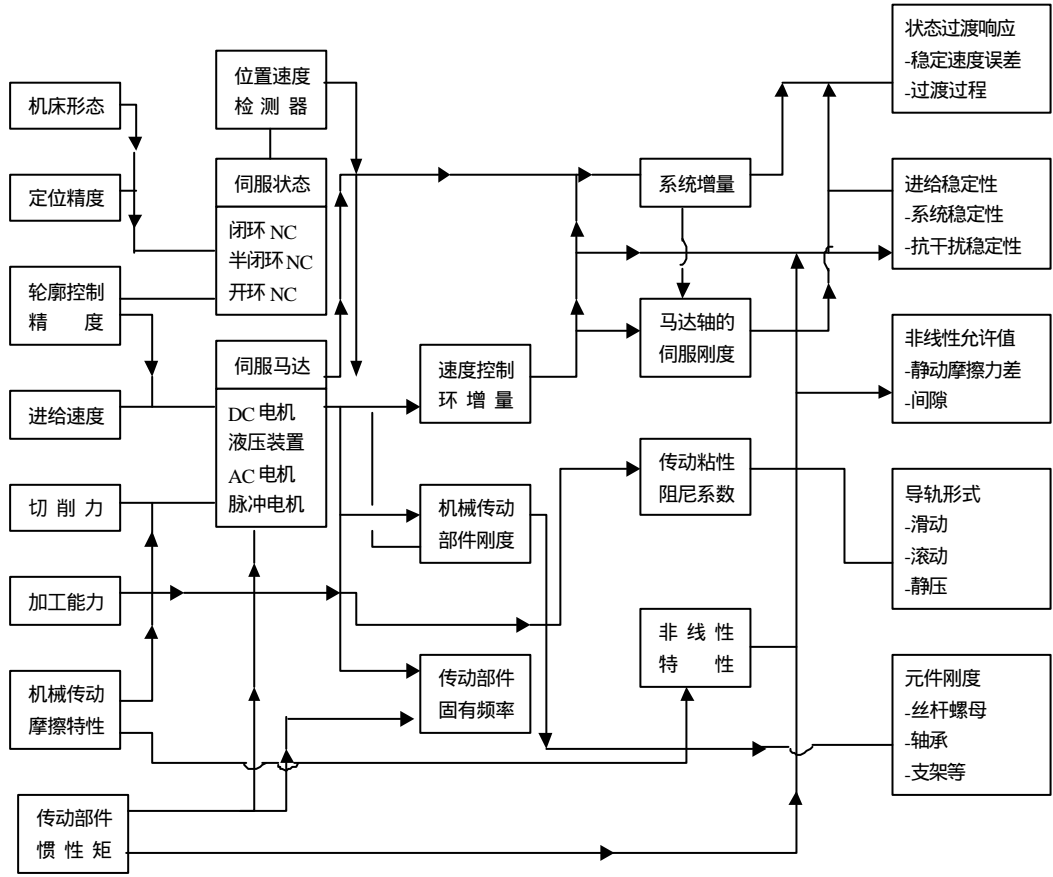


图 2-42 进给系统机电关系图



一般来说，进给系统应该在三个方面满足整机的要求：稳定性方面，对于全闭环系统尤为重要，其中包括绝对稳定和相对稳定，即整个系统在启动状态或外界干扰作用下，经过几次衰减振荡后，能迅速地稳定在新的或原有的平衡状态下。精度要求，这里包括动态误差、稳态误差和静态误差，也就是伺服系统的输入量与最终运行部件的运动量的精确程度。快速响应特性方面，即伺服系统的响应时间以及传动装置的加速能力。一台加工中心的进给系统不仅要求有合理的控制系统，而且要求对驱动元件和机械传动装置的参数进行合理的选择，这样才能使整个进给系统工作时的动态特性相匹配。图 2-43 是反馈方式的进给系统。

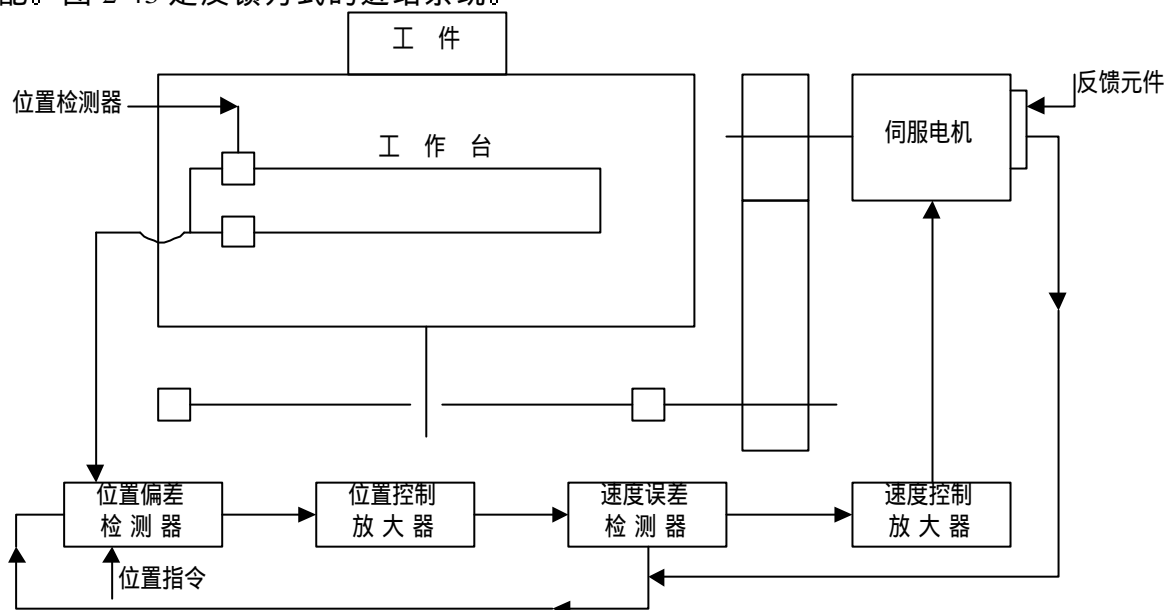


图 2-43 按反馈方式分类的进给系统

#### 2.1.4.5 MC 的自动换刀系统

加工中心要完成对工件的多工序加工，必须要在加工过程中自动更换刀具，为完成这项工作而设置的存储及更换刀具的系统称为自动换刀系统。自动换刀系统中的刀库容量、换刀可靠性及换刀速度直接影响到加工中心的工作效率。因此，上述三项是自动换刀系统在设计、选用及评价上的主要指标。

1. 自动换刀系统的结构 在加工中心上，常用的换刀系统多采用刀库-机械手系统，但也有一些无刀库的加工中心，即采用转塔头式的换刀方式(见图 2-44)，其转塔头与电机和变速箱可以做成一个整体部件，共同沿着机床导轨运动。这样结构较紧凑，但移动部件较重。也有的设计把电机和变速箱固定在机床上，只有转塔头沿机床导轨运动，这样运动部件较轻，而且电机及变速箱工作时的振动及热量也不会传到转塔头中。同时转塔头的结构可以少受限制，刚度得到提高，以利于切削。但是转塔头式的换刀毕竟受尺寸与结构的约束较多，并且由于每把刀都对应一个主轴位置，刀具的数量也受到很大限制此类加工中心的刀具数一般不超过 8 把，往往在加工较复杂的工件时显得刀具不够，因此这种结构使用的不多。

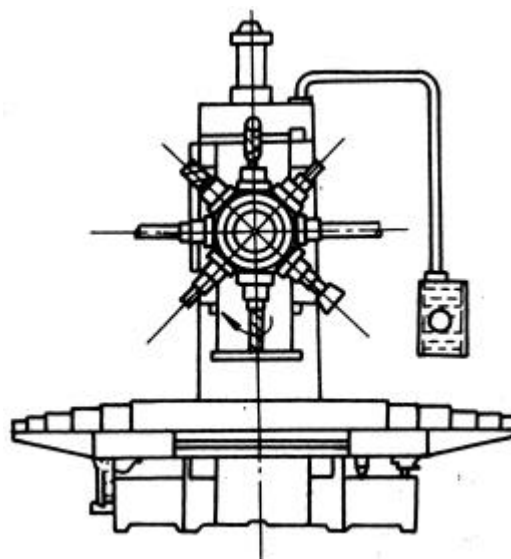


图 2-44 转塔头式换刀加工中心

目前大量使用的是带有刀库的自动换刀系统，与转塔头式换刀装置不同。由于有了刀库，加工中心只需一个夹持刀具进行切削的主轴，当需要某一刀具进行切削加工时，将该刀具自动地从刀库交换到主轴上，切削完以后又将用过的刀具自动地从主轴下放回刀库。由于换刀过程是在各个部件之间进行的，所以要求各参与换刀的部件的动作必须准确协调。这种换刀方式由于主轴不象转塔头式换刀机构那样受限制，因此主轴刚度可以提高，还有利于提高加工精度和加工效率。由于有了单独存储刀具的刀库，使刀具的存储容量增多，有利于加工复杂零件。而且刀库可离开加工区，消除很多不必要的干扰。

采用这种换刀机构，需要在主轴系统中增加刀具的自动夹紧-松开装置及主轴定向装置。

在采用刀库的加工中心中，按换刀方法的不同又分为有机手换刀和无机手换刀两类，按刀库的类型又分为盘式刀库、链式刀库等，每一种刀库又以在机床的位置不同分为顶置、侧置、悬挂、落地等多种类型。具体的形式是由设计者根据结构、工艺、刀具数量，总体布局等多种因素综合考虑决定。因此，由于各种使用条件的需要，目前加工中心的换刀系统，采用的组合类型也十分繁多，这里只能介绍几种最常用的结构类型。

无机手的换刀系统，一般是采用把刀库放在主轴箱可以运动到的位置，或整个刀库或某一刀位能移动到主轴箱可以到达的位置。同时，刀库中刀具的存放方向一般与主轴上装刀方向一致。换刀时，由主轴运动到刀库上的换刀位置，利用主轴直接取走或放回刀具。优点是结构简单、成本低、缺点是刀库容量不多，换刀时间较长。

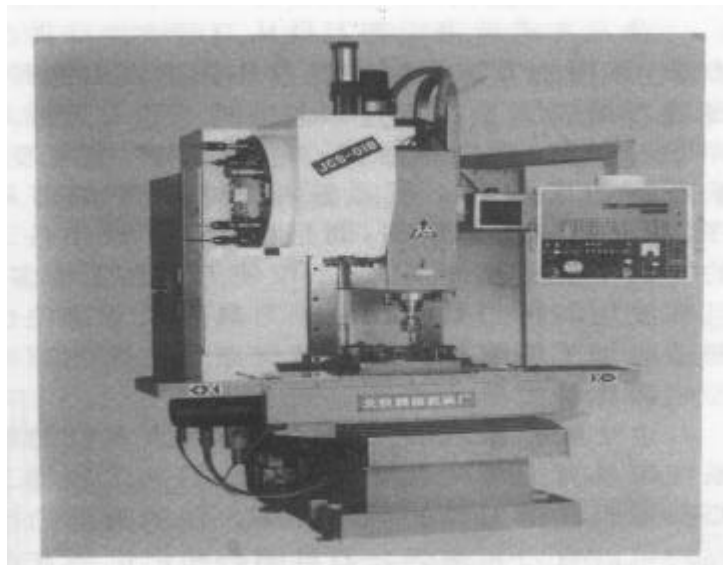


图 2-45 JCS-018 立式加工中心

在有机机械手的换刀系统中，刀库的配置、位置及数量的选用要比无机机械手的换刀系统灵活得多。

它可以根据不同的要求配置不同形式的机械手。可以是单臂的、双臂的，甚至配置一个主机械手和一个辅助机械手的形式。它能够配备多至数百把刀具的刀库。换刀时间可缩短到几秒甚至零点几秒。因此目前多数加工中心都配有机机械手的换刀系统。如图 2-45 就是一种有机机械手的换刀系统外形。

2. 刀库的结构 加工中心上普遍采用的刀库有盘式刀库和链式刀库。密集型的鼓轮式刀库或格子式刀库虽然占地面积小，可是由于结构的限制，已很少用于单机加工中心。密集型的固定刀库目前多用于 FMS 中的集中供刀系统。

(1) 盘式刀库(图 2-46) 此刀库结构简单，应用较多，但由于刀具环形排列，空间利用率低，因此出现将刀具在盘中采用双环或多环排列，以增加空间利用率。但这样一来使刀库的外径过大，转动惯量也很大，选刀时间也较长。因此，盘式刀库一般用于刀具容量较少的刀库。

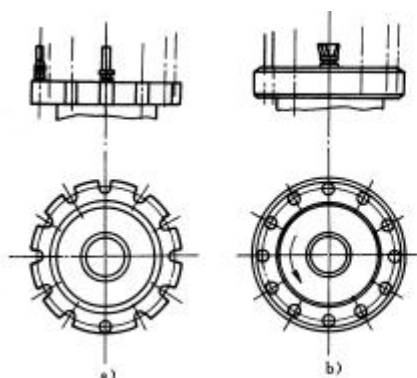


图 2-46 盘式刀库

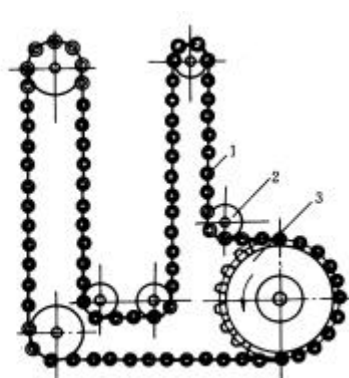


图 2-47 链式刀库

a) 径向取刀形式 b) 轴向取刀形式 1— 刀座 2— 滚轮 3— 主动链轮

(2) 链式刀库(图 2-47) 它结构紧凑，刀库容量较大，链环的形状可以根据机床的布局配置成各种形状，也可将刀位突出以利换刀。当链式刀库需增加刀具容量时，只需

增加链条的长度，在一定范围内，无需变更线速度及惯量。

这样对系列刀库的设计与制造带来了很大的方便，可以满足不同使用条件。一般刀具数量在 30~120 把时，多采用链式刀库。

3. 刀库的容量及选刀方式 刀库的容量首先要考虑加工工艺的需要。一般的小型立式加工中心配有 14~30 把刀具的刀库就能够满足 70%~95% 的工件加工需要。加工工件与刀具数的关系如图 2-48 所示

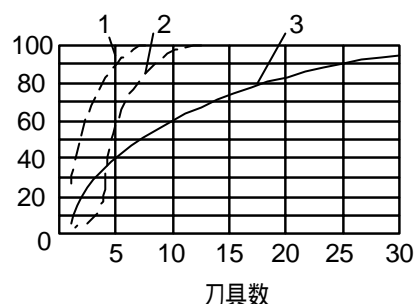


图 2-48 加工工件与刀具数的关系

1-铣削 2-车削 3-钻削

选刀方式是将所需刀具从刀库中准确调出的方法，常用的方法有顺序选刀和任意选刀两种。顺序选刀是按照工艺要求依次将所用的刀具插入刀库的刀套中，顺序不能错。加工时按顺序调刀。更换不同的工件时必须重新排列刀库中的刀具顺序，因而操作十分繁琐，而且在同一工件中各工序的刀具不能重复使用。这不仅使刀具数量增多，而且在使用同种刀具时，由于刀具的尺寸误差也容易造成加工精度不稳定。其优点是刀库的驱动及控制都比较简单。

由于数控系统的发展，目前绝大多数的数控系统都具有刀具任选功能，因此，目前多数加工中心都采用任选刀具的换刀方法。任选刀具的换刀方式可以有刀套编码、刀具编码和记忆等方式，刀具编码或刀套编码都需要在刀具或刀套上安装用于识别的编码条，一般都是根据二进制编码原理进行编码。对于刀套编码的方式，一把刀具只对应一个刀套，从一个刀套取出的刀具必须放回同一刀套，取送刀具十分麻烦，换刀时间很长。对于刀具编码的方式，由于要求每把刀具上必须带有专用的编码系统，使得刀具长度增加，制造困难，刚度降低，同时使机械手和刀库的结构也复杂化。因此，无论是刀套编码还是刀具编码都给换刀系统带来很多不便，所以近年来在加工中心中应用的很少。目前在加工中心上绝大多数都使用记忆式的任选换刀方式。这种方式能将刀具号和刀库中的刀套位置(地址)对应地记忆在数控系统的 PC 中，不论刀具放在哪个刀套，PC 中内部始终记忆着它的踪迹。刀库上装有位置检测装置(一般与电机装在一起)。可以检测出每个刀套的位置。这样刀具就可以任意取出并送回，刀库上还设有机械原点，使每次选刀时，就近选取，如对于盘式刀库来说，每次选刀运动或正转或反转都不会超过 180°角。

#### 2.1.4.6 TC 的刀架系统

车削加工中心(TC)的刀架系统是机床的主要组成部分。刀架用于支持切削用的刀具，因此其结构直接影响机床的切削性能和切削效率，在一定程度上，刀架的结构和性能体现了机床的设计和制造技术水平。总的说来，TC 刀架系统可以分为两大类，即

排刀式(GANG TYPE)刀架和转塔式(TURRET TYPE)刀架。

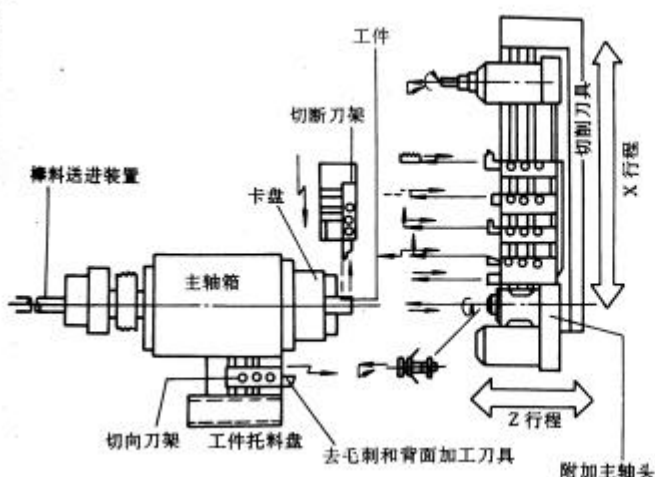


图 2-49 排刀式刀架布置图

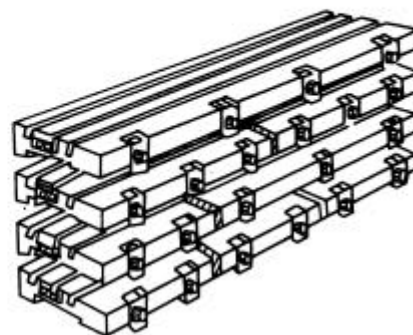


图 2-50 快换台板

### 1. 排刀式刀架

排刀式刀架一般用于小规格数控车床，以棒料为主的机床较为常见。它的结构形式为夹持着各种不同用途刀具的刀夹沿着机床的 X 坐标轴方向排列在横向滑板或称之为快换台板(QUICK-CHANGE PLATEN)上。刀具典型布置方式如图 2-49 所示。这种刀架的特点之一是在使用上刀具布置和机床调整都较方便。可以根据具体工件的车削工艺要求，任意组合各种不同用途的刀具，一把刀完成车削任务后，横向滑板只要按程序沿 X 轴向移动预先设定的距离后，第二把刀就到达加工位置，这样就完成了机床的换刀动作。这种换刀方式迅速省时，有利于提高机床的生产效率。特点之二是使用如图 2-50 所示的快换台板，可以实现成组刀具的机外预调，即当机床在加工某一工件的同时，可以利用快换台板在机外组成加工同一种零件或不同零件的排刀组，利用对刀装置进行预调。当刀具磨损或需要更换加工零件品种时，可以通过更换台板来成组地更换刀具，从而使换刀的辅助时间大为缩短。特点之三是还可以安装各种不同用途的动力刀具(如图 2-49 中刀架两端的动力刀具)来完成一些简单的钻、铣、攻螺纹等二次加工工序。以使机床可在一次装夹中完成工件的全部或大部分加工工序。特点之四是排刀式刀架结构简单，可在一定程序上降低机床的制造成本。然而，采用排刀式刀架只适合加工旋转直径比较小的工件，只适合较小规格的机床配置。不适用于加工较大规格的工件或细长的轴类零件，一般来说旋转直径超过 100mm 的机床大都不用排刀式刀架，而采用转塔式刀架。

### 2. 转塔式刀架(或称回转刀架)

转塔式刀架是用转塔头各刀座来安装或夹持各种不同用途的刀具，通过转塔头的旋转分度定位来实现机床的自动换刀动作。一般来说，转塔刀架应分度准确，定位可靠、重复定位精度高，转位速度快，夹紧刚性好，以保证数控车床的高精度和高效率。

转塔刀架按外形可分为圆鼓形、星形和伞形(冕形)三种，以前两种应用较多。三种型式都可在其径向和轴向安装刀具。一般来说，圆鼓形转塔刀架上沿径向安装的刀具适于作圆柱面加工，沿轴向安装的刀具可用于工件的孔和圆柱面加工；一般星形转塔刀架的回转轴与主轴轴线成垂直布置，也可用于工件的孔和圆柱面加工，但以加工圆柱面为主，可安装受力较大的刀具。

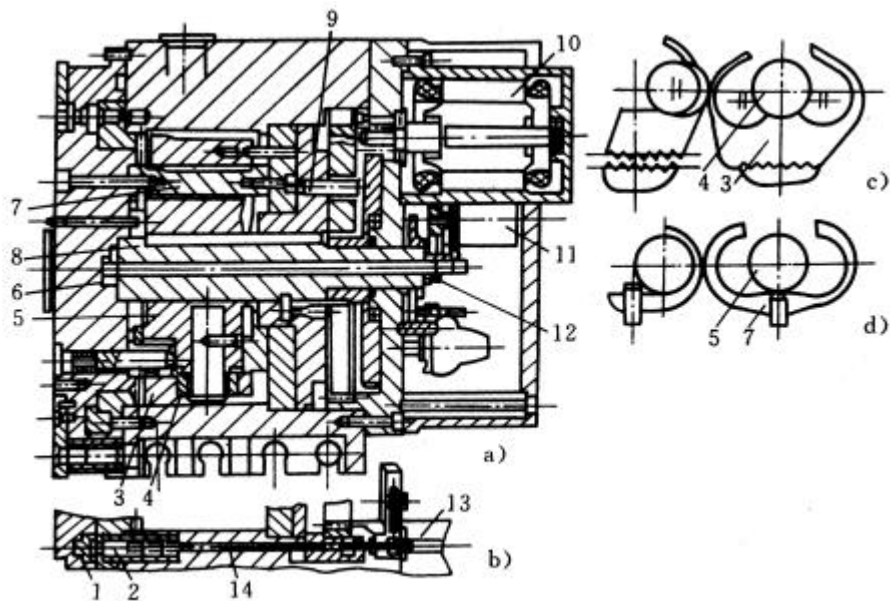


图 2-51 SAUTER 公司生产的电动转塔刀架结构图

a)刀架剖面图 b)预定位机构 c)上、下端齿盘松开啮合位置 d)转塔转位示意

1-预定位套 2-预定位销 3-下定位端齿盘 4-夹紧轮 5-套 6-杆 7-转塔头套 8-中央支承轴 9-系杆 10-电动机 11-编码器 12-齿形带轮 13-电磁铁 14-预定位杆

图 2-51 是 SAUTER 公司生产的电动转塔刀架的结构图。刀架的动作过程如下：

图示位置是转塔刀架的夹紧位置。当转塔刀架接到转位指令后，电动机 10 开始旋转，运动通过齿轮减速系统后带动行星轮的系杆 9 旋转，再通过键带动中央支承轴 8 旋转，从而又带动装有沿圆周方向均布的 3 个夹紧轮 4 的套 5 转动，此时夹紧轮沿着下定位齿盘 3 上的凸轮槽移动，当夹紧轮进入槽中凹部时将使下齿盘向右移动，从而使上下定位齿盘脱离啮合，完成转塔头松开动作(如图 2-51c 所示)。接着夹紧轮套 4、5 继续旋转，推动与转塔头连为一体的套 7 同步转动(如图 2-51d 所示)，此时开始分度转位动作。与转塔头相连作同步运动的杆 6 带动齿形皮带轮 12 并通过齿形皮带带动编码器 11 同步旋转，将位置信号不断反馈给机床控制系统。当达到预选工位时，电磁铁 13 动作，将预定位杆 14 向左推出，使预定位销 2 进入转塔头中的预定位套 1 中，如图 2-51b)所示。预定位销入位后，接近开关发出信号使电机停止转动，然后立即反向旋转，通过传动系统使夹紧套带动夹紧轮反向转动，从而将下端定位齿盘 3 向右移动，上下齿盘啮合，依靠下齿盘上凸轮槽的作用将转塔头夹紧。整个转位动作连贯迅速，动作可靠，无机械冲击。转塔可根据相应的逻辑控制电路自动选择回转方向，进行双向自动分度旋转。该转塔结构的一个特点是松开转塔头时，转塔头无抬起动作，而是靠移动下端齿盘来完成松开动作。精定位用的端面齿盘副中的上齿盘是由二个同心齿盘圈合成，外圈固定在刀架体上，而内圈安装在转塔头上。

## 2.1.5 DNC 系统

### 2.1.5.1 DNC 的概念及发展

DNC(Direct Numerical Control, 或 Distributed Numerical Control)俗称群控，是用一台或多台计算机对多台数控机床实施综合数字控制。DNC 属于自动化制造系统(DNC, FMS, CIMS 等)的一种模式，与单机数控相比，DNC 避免了纸带穿孔和阅读这个薄弱环

节,增加了控制功能,改善了管理; DNC 视需要很容易成为 FMS 或 CIMS 的一种基本组成部分。DNC 这些特点,对于那些资金和技术力量尚不足的许多中小企业来说,是很有吸引力的。随着计算机技术的发展和数控机床的普遍使用,国内许多企业在所用数控技术比较成熟的情况下,纷纷提出改造生产线建立 DNC 系统的要求。如何将计算机与数控机床联接起来实现可靠的 DNC,是个值得探讨的问题。

制造业从单机自动化发展到 DNC 在技术上首先要解决数控机床与计算机之间的信息交换和互联问题,这也是实现 DNC 的核心问题。这里因为 DNC 的正常运行和控制功能的强弱在很大程度上取决于系统的通信结构,而通信结构方案的选择离不开对 DNC 结构的论证。虽然在 1965 年就出现了第一个 DNC 系统,至今已发展了近 30 年,实际应用的各种 DNC 系统名目繁多、形态各异,但从结构和通信结构方面来看,它们又有许多共同之处。

如何将计算机与数控机床实现 DNC 控制已是实现 CAD/CAM 一体化技术之间最关键的细节,也是向更高一级 FMS 或 CIMS 发展需要解决的第一步关键性难题。

如果不解决 DNC 联网,就无从谈起 CAD/CAM 一体化。人们在长期 DNC 研究中,解决了计算机与 FANUC 等数控系统的 DNC 联网技术,开发了相应的通讯系统与接口技术。

FMS 是自动化机械加工车间的重要组成形式之一,在过去的十几年中,人们在对自动化机械加工车间的研究中,将大量的精力投向柔性制造系统(简称 FMS)。因其特殊的历史原因,FMS 的研制不仅注意信息流的集成,控制流的集成,更强调物料流的集成与自动化。物料流的自动化设备投资在整个 FMS 的投资中占有相当大的比重,且 FMS 的运行可靠性在很大程度上依赖于物流自动化设备的正常运行情况。十几年的实践证明,FMS 的这种过份强调自动化的研制思路,投资风险大,见效慢,可靠性较差。DNC 是实现 CAD/CAM 和计算机辅助生产管理系统(简称 CAPMS)集成的纽带(或称“瓶颈”),是机械加工车间自动化的另一种方式,相对 FMS 来说,它是投资小,见效快可大量介入人机交互,并具有较好柔性的多数控加工设备的集成控制系统。

为了拓宽“瓶颈”,目前世界各国数控系统制造商已在积极寻找一条解决通信协议标准化问题的途径。在通信协议标准化之前,很多的机械加工车间数控机床集成控制的问题都可能靠研制专门的“DNC 装置”来实现。诸如 Fanuc 和 Siemens 等异构系统的通信。从可查得的资料上表明现阶段 DNC 装置的研制重点是开发硬件设备及接口标准,在软件研制方面注意力还不够。

今天微型计算机硬件性能越来越好,接口扩展方便,价格越来越低。对于异构数控系统只需选用不同联接标准(如 RS232C, RS-485, RS-422, RS511 等)以软插件技术为基础,集中精力研究异构数控系统的集成软件。这一新型 DNC 软插件系统的研究及应用必将大大推动我国 CAD/CAM 和 CAPMS 的集成化发展,对机械加工车间的自动化及集成方面有重要的理论意义和实用价值。因此作者认为新型 DNC 软插件系统的研究是今后几年值得探讨的课题。

#### 2.1.5.2 DNC 系统的结构

DNC 系统的结构主要以实际需要而选定,需考虑的因素主要有:工厂所需自动化的程度、信息流分配计算机控制结构层次及加工零件的工艺要求等内容。

设计 DNC 时有许多方案可供选择，不同的研制者对他的系统应达到的目标、功能有各种各样的理解。一般来说，DNC 系统最重要的组成部分有：(1)中央计算机，(2) 外设，(3) 通信接口，(4) 机床控制器，(5) 机床。外围存贮设备的规模由实时执行程序所需存贮的用户数据量决定。数据管理由计算机管理系统执行。中央计算机的选型可以采用具有多任务处理能力的高性能小型机或配有实时多任务操作系统的高档微机。通信接口的通信能力可用一些性能指标来描述，主要有：通信标准，协议规程，报文格式，数据类型和通信速率等。

构成的 DNC 系统，它的根本任务是在多台机床间分配信息，使机床控制器能完成各自的操作。在我国、美国、欧洲和日本，有大量各不相同的 DNC 系统，从结构上说可分为 DNC 一般结构，读带机旁路式结构和混合型 DNC 结构三种类型。

1. DNC 的一般结构

DNC 系统的一般结构如图 2-52 所示。中央计算机执行直接数控有关的三项任务：它从大容量的存贮器中取回零件程序并把这个信息传递给机床；然后在这两个方向上控制信息的流动，以便使数控指令的请求立即得到满足；最后由计算机监视并处理机床反馈。

这种 DNC 结构有两种模式，分别如图 2-53a 和图 2-53b 所示。第一种(图 2-53a)是一台计算机通过多路通信转换器对多台 NC 系统进行分时控制，实现 NC 程序的装卸；第二种(图 2-53b)是一台计算机通过多个串口，分别联结多台 DNC 系统实现 NC 程序的装卸、刀具数据的传递、操作命令的下达和状态信息的反馈。这两种结构的差别在于：第一种结构复杂，成本高；而第二种结构联结简单，但对软件要求较高。

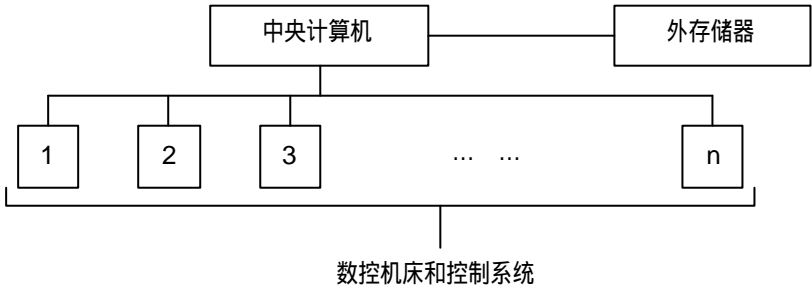


图 2-52 DNC 系统的一般结构

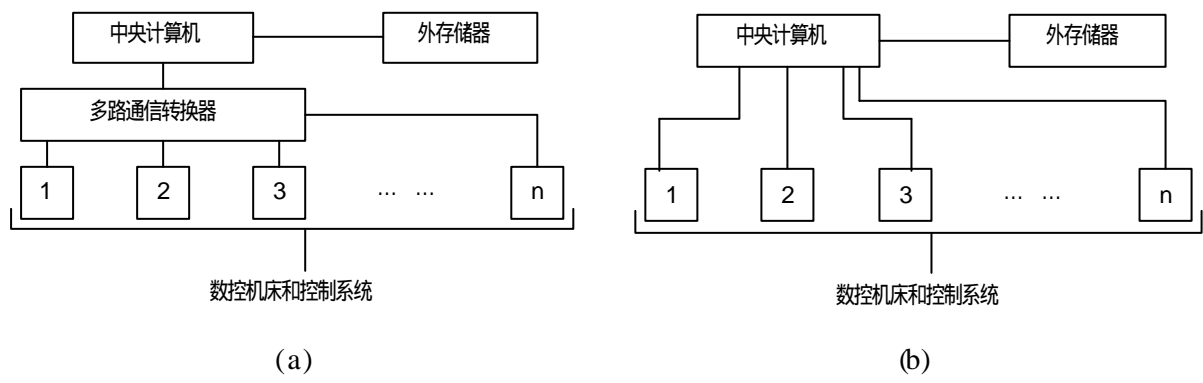


图 2-53 DNC 一般结构的两种模式

2. 读带机旁路式结构

读带机是普通数控装置的一个组成部分。在穿孔带上编码的所有机床指令都是通



过该读带机到达机床控制装置的。在读带机旁路的 BTR(behind the tape reader)系统中,对数控机床所做的唯一改变,就是用将直接数控计算机(或称之为中央计算机)的远程通信线与读带机并联接于机床控制器。它的结构如图 2-54 所示。

BTR 式结构灵活,可靠性高,当中央计算机发生故障后各数控装置仍可独立使用,缺点是设备多,费用较大。

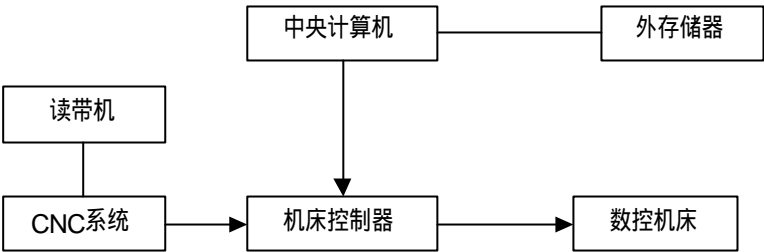


图 2-54 读带机旁路式结构

3. 混合型 DNC 结构

在一个系统中,可同时采用两种方式,即一部分机床采用 BTR 方式,而另一部分机应则只带机床控制器,由计算机进行直接数控,这样的 DNC 系统称为混合型。图 2-55 表示为北京机床研究所最近开发的一种混合型 DNC 系统,其中的 DNC 装置该所命名为“插座”,是为单机集成于 DNC 系统而开发的。

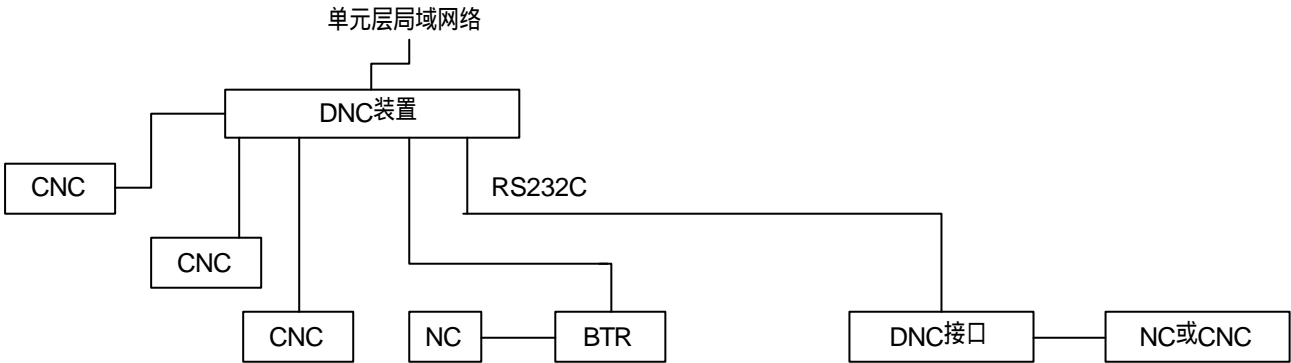


图 2-55 混合型 DNC 结构

BTR 式结构与 DNC 的一般结构的根本差别在于 BTR 式系统使用了现有的机床控制装置,而 DNC 的一般结构则使用机床控制系统(包括 CNC 的软硬件系统)。因此 BTR 方式只是从单机向多机控制迈出了试探性的一小步,而 DNC 的一般结构才具有比较明显的“群控”概念,是机械加工向更大范围自动化发展的基础。

2.1.5.3 DNC 系统的组成

DNC 系统的组成包括硬件部分和软件部分,其中 DNC 系统的软件部分已涉及通信、生产管理、零件加工程序自动编制等多方面,该部分内容在本书的其它章节中介绍。在此仅给出 DNC 系统的硬件组成。

- 1. 计算机部分 目前一般的微机均具有 1~2 个 RS232C 通讯能力,但要开发通讯软件。
- 2. 数控机床部分 最新 FAUNC 数控系统采用 8086CPU,并提供了一个通用异步

收发器 8251 和一个标准的 EIA-RS232C 串行接口, 这些接口设施为计算机直接控制数控机床提供了必要的硬件环境。此外, 机床内部还设有固化的接收数控程序编辑译码软件, 用来判断接收的数控程序结构是否符合机床指令要求以及机床内部参数设定。

3. 通信线路 正确的通讯连线非常重要, 如果连线错误很可能会烧坏芯片或损坏机床, 所以在连线时必须细心并有充分的把握。通常计算机控制数控机床的联接分两种情况: 第一种是不加调制解调器 Modem 的通讯方法, 一般传输距离在 50m 以内, 不同的数控系统的传输距离不完全一样, 要根据实际情况而定, 目前采用此种方式的较多。第二种是加 Modem 的通讯方法, 这种方式适合于长距离的数据通讯。

在将 Modem 与计算机连接时要特别注意, 并非所有 RS232C 接口都是相同的。另外, 独立装置 Modem 与计算机的 RS232C 接口之间的电缆必须不差一丝一毫。使用错误的电缆, 在严重情况下甚至会损坏计算机或 Modem。图 2-56 为 DNC 网络连接示意图。



图 2-56 DNC 网络控制示意图

#### 2.1.5.4 DNC 通讯软件的功能和结构

DNC 通讯软件的功能

##### (1) 数据的发送

- 1) 长程序(大于 3000 条): 边加工边送程序
- 2) 短程序: 一次送完

##### (2) 数据接收

##### (3) 对程序进行编辑

##### (4) 针对不同机床的相应数控程序进行后置处理

DNC 通讯软件包含的模块有: 数据发送模块、数据接收模块、延时模块、重编码模块、数据程序头模块、主菜单模块、显示器屏幕范围设定模块、数据程序名通用键入模块、通讯规程设定模块、发送接收方向判别及发送条数显示的监视模块、编辑模块等。

图 2-57 给出了一种 DNC 通讯软件的组成结构。

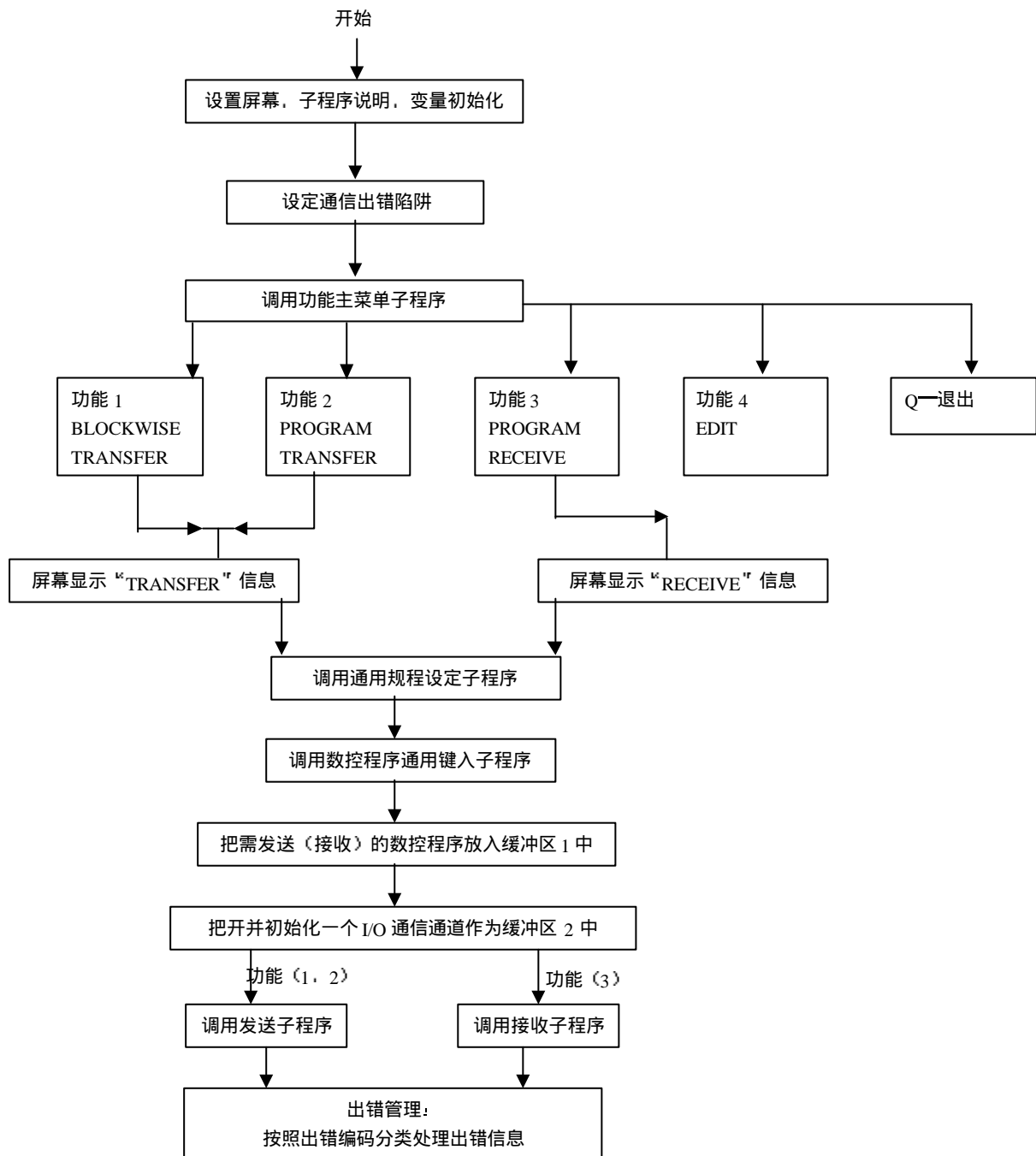


图 2-57 一种 DNC 通讯软件的组成结构

## 2.1.6 柔性制造单元 FMC 及柔性制造系统 FMS

### 2.1.6.1 FMC 的结构及效益

在数控技术发展总的历程中，技术的特征总是简单到复杂，由特殊到一般地螺旋式上升。许多企业在开发 FMS 技术之前，经历了 FMC 和 DNC 的过程。也有一些企业，在它掌握了 FMS 技术以后，用户仍然需要 FMC 和 DNC。有些用户承受不了 FMS 的巨额投资，而认为 FMC 或 DNC 更符合他们的实际。因此，在研究 FMS 的同时，仍然要研究 FMC。

#### 1. 柔性制造单元的结构

柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell)是在制造单元的基础上发展起来的, 又具有柔性制造系统的部分特点的一种单元。FMC 具有独立自动加工的功能, 部分具有自动传送和监控管理的功能, 可实现某些零件的多品种小批量的加工, 部分 FMC 还可以实现 24 小时无人运转, 投资没有 FMS 大, 技术上容易实现, 因而深受用户欢迎。图 2-58, 图 2-59 给出了两个实际的 FMC。

FMC 可以作为 FMS 中的基本单元, 若干个 FMC 可以发展组成 FMS, 因此 FMC 可以看作是企业发展 FMS 历程中的一个阶段。

FMC 的构成有两大类: 一类是加工中心配上托盘交换系统(Automatic Pallet Changer, APC)。另一类是数控机床配工业机器人(Robot)。

(1) 加工中心配托盘交换系统的 FMC 这类 FMC, 以托盘交换系统为特征, 一般具备 5 个以上的托盘, 组成环形回转式托盘库。

图 2-60 是具有托盘交换系统 FMC 的构成图。托盘支承在圆柱环形导轨上, 由内侧的环链拖动而回转, 链轮由电机驱动。托盘的选定和停位, 是由可编程控制器(PLC)进行控制, 借助终端开关, 光电识码器来实现的。一般人认为, 只有具备 5 个以上托盘的加工中心, 才能称之为 FMC。这样的托盘系统具有存储、运送功能, 具有自动检测功能、工件和刀具的归类功能、切削状态监视功能等。这种 FMC, 实现连续 24 小时自动加工是非常有效的。托盘的交换由设在环形交换系统中的液压或电动推拉机构来实现。这种交换首先指的是在加工中心上加工的托盘与托盘系统中备用托盘的交换。如果在托盘系统的另一端, 再设置一个托具工作站, 则这种托盘系统可以通过托具工作站与其它系统发生联系, 若干个 FMC 通过这种方式, 可以组成一条 FMS 线。



图 2-58 JCS-FMC1 柔性加工单元



图 2-59 JCS-FMC2 柔性加工单元

还有一种 FMC, 以日本大孤机工生产的 FMC 为代表, 其托盘交换装置只有 2 个工位, 而将托盘交换系统设计成立体仓库, 从而使得这种 FMC 减少占地面积, 工作面宽敞, 便于操作。

(2) 数控机床配工业机器人(robot)的 FMC 这种 FMC 的最一般形式, 是由二

台数控车床配上 Robot， 加上工件传输系统组成。图 2-61 是其一般结构图。

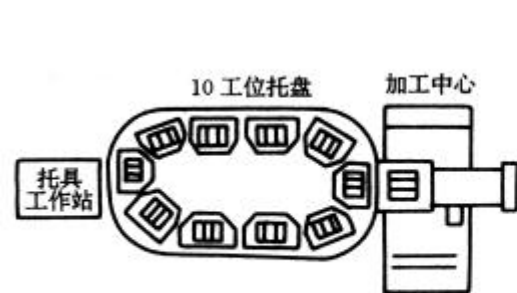


图 2-60 具有托盘交换系统的 FMC

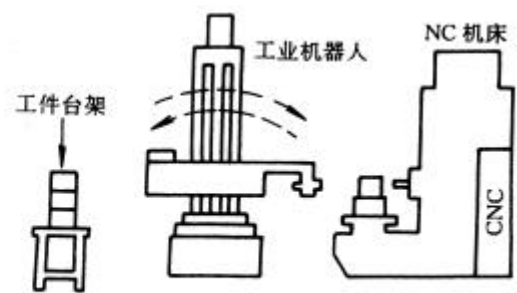


图 2-61 由 NC 机床和 ROBOT 组成的 FMC

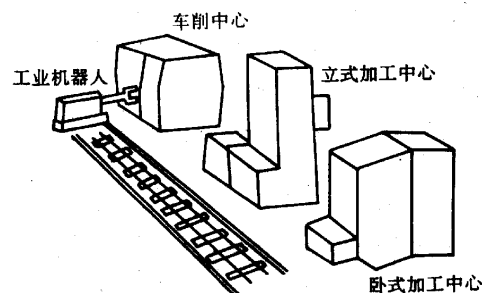


图 2-62 三台加工中心与 ROBOT 组成的 FMC

这种 FMC， 在实际方案上还有多种组合形式。如图 2-62 是由美国 CINCINNATI MILACRON 公司生产的三台机床与 Robot 构成的 FMC， 这是由一台车削中心、一台立式加工中心和一台卧式加工中心， 加上一台工业机器人组成。Robot 安装在一台传输小车上， 小车安装在固定轨道上， Robot 实现机床至机床之间的工件传送。

图 2-63 是由二台 NC 磨床与 Robot 组成的 FMC， 同时附加一个工件传输系统， Robot 安装在中央位置， 它负责二台 NC 磨床与工件传输系统的上下料工作。

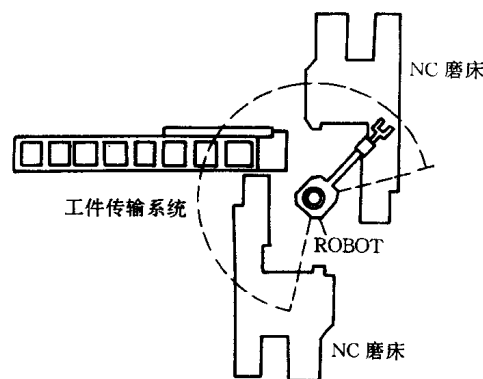


图 2-63 NC 磨床与 ROBOT 组成的 FMC

## 2. FMC 的效益

采用柔性制造单元 FMC 比采用若干单台的数控机床， 有更显著的技术经济效益， 体现在：

(1) 增加了柔性： FMC 比单台加工中心(MC)， 可以实现多品种配套加工。据日本山崎铁工所的统计资料称， 一般 FMC， 每台一天可以进行 21.3 种工件的加工， 50 种工件只要 2.34 天即可完成一套。而加工中心一天只能加工 2.09 种， 50 种工件要加工 23.9 天， NC 的库存在制品积压数量是 FMC 的 10 倍。

(2) 可实现 24h 连续运转： FMC 由于可以 24h 连续运转， 一个月 25 天就是 600 工时， 而加工中心最多每天工作 18h， 一个月 25 天则是 400 工时。

(3) 生产利润高： FMC 由于提高了机床利用的优化率，因此生产利润远比 MC 高。

(4) 便于实现计算机集成生产系统： 应用 FMC，可积累物料传输系统， 自动化仓库和自动检测方面的经验，使得容易朝着 FMS 或 CIMS 发展。

表 2-8 和表 2-9 是由山崎铁工所对 FMC 和 MC 两种加工方案比较的结果。当然，这里选出了一些数据，显然各国企业状况不一，比较结果可能不一样，但是对该公司而言，可以作为一个例子借鉴。

表 2-8 FMC 与 MC 费用比较 (单位：日元)

项目	MC 单元/单价		FMC		MC	
设备投资	H15	3000 万	4 台	1.2 亿	7 台	2.1 亿
	10P/C	800 万	4 台	0.32 亿		
	80/00/S	220 万	4 台	0.088 亿		
	监控装置	170 万	4 台	0.068 亿		
	大容量存储器	150 万	4 台	0.06 亿		
工人工资	小计			1.736 亿	2.1 亿	
	一人一年	400 万	2 人 第一年	800 万	6 人	2400 万
	每年递增	7%	第二年	856 万		2568 万
	三年合计			0.272 亿		0.771 亿

表 2-9 FMC 与 MC 三年利润表

项目	FMC	MC	项目	FMC	MC
设备投资	1.736	2.1	三年工人工资 B	0.257	0.771
月 产 值	0.08	0.08	三年折旧 C	1.736	2.1
三年产值 A	2.88	2.88	三年利润 A-B-C	0.887	0.009

2.1.6.2 FMS 的概念

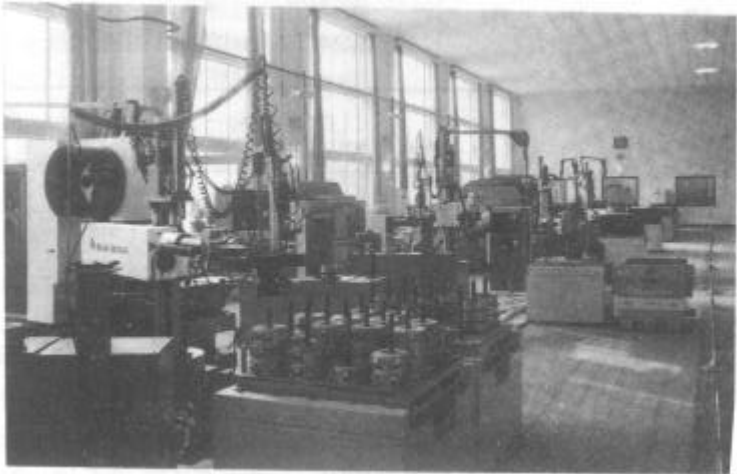


图 2-64 JCS-FMS-1 柔性制造系统



图 2-65 JCS-FMS-2 柔性制造系统

1. 概述 柔性制造系统 FMS (Flexible Manufacturing Systems) 是一个由计算机集中管理和控制的制造系统，具有多个独立或半独立工位的一套物料储存运输系统，加工设备主要由数控机床及加工中心等组成，用于高效率地制造中小批量多品种零部件的自动化生产系统。

一般 FMS 应包含以下要素：

(1) 标准的数控机床或制造单元。我们把具有自动上下料功能或具有多个工位，既能加工又能作一些装配工作的数控机床，称之为“制造单元”，它们是 FMS 中的基本制造“细胞”。

(2) 一个在机床的装卡工位之间运送零件和刀具的传送系统。

(3) 一个发布指令，协调机床工件和刀具传送装置的生产调度及监控系统

(4) 中央刀具库及其管理系统

(5) 自动化仓库及其管理系统

在当前 FMS 发展的进程中，组合方案是多种多样的。简单小型的 FMS，只具备前三个要素；复杂的功能强的 FMS，除具备上述五个要素外，还可能有一些附属设备。

国外技术进步的浪潮同样席卷我国。国内机械制造业多品种中小批量生产的中小企业如汪洋大海遍及全国，一人一机的普遍万能机床虽然灵活，但自动化程度和生产效率很低，少品种大批量生产的重点骨干企业，其后方车间和新产品试制车间仍是分散式的万能机床为主；生产一线多采用专用机床、组合机床和自动线，生产率虽较高，但缺乏灵活性。

要打破这种劳动密集型和刚性自动化混杂的生产模式，采用柔性自动化生产系统，以增强企业对市场的响应能力，存在着不少关键问题。如我国微电子技术和计算机技术开发应用起步晚，柔性化产品研制和应用经验不足；机械产品数控化率目前只有 6% 左右(日本 1987 年已达到 70%)某些高档数控系统关键元器件尚需进口，故高技术产品生产系统的开发和应用方面存在着“三大”问题，即：难度大，耗资大，风险大。

柔性制造系统的何种结构模式能回避或减少这三大忧虑，并能得到高柔性和高生产率的合理统一？这是我国机床行家们的课题，也是国外近年来进一步研究的动向。

国家采取了引进和开发相结合的方针，引进了箱体件，旋转体件及板金件加工 FMS 的全部或部分硬件技术，图 2-64 是我国 1985 年引进的第一条用于旋转体件加工的 FMS(安装在北京机床研究所)，同时通过“七五”计划，安排了柔性技术设备重点科技攻关项目，本文将结合作者参与研制的 JCS-FMS-2(图 2-65)研究成果和国内外有关发展动向简介 FMS 在机械加工系统中的作用及设计原则。

2. FMS 的定义 根据“中华人民共和国国家军用标准”有关“武器装备柔性制造

系统术语”的定义，柔性制造系统(简称 FMS)是由数控加工设备，物料运储装置的计算机控制系统等组成的自动化制造系统，它包括多个柔性制造单元，能根据制造任务或生产的变化迅速进行调整，适用于多品种中、小批生产。

该标准还对与 FMS 密切相关的术语作了定义。

美国制造工程师协会的计算机辅助系统和应用协会把柔性制造系统定义为“使用计算机、柔性加工单元和集成物料运贮装置来完成零件族某一工序或一系列工序的一种集成制造系统”。

还有一种更直观的定义是：“柔性制造系统，至少由两台数控机床，一套物料运输系统(从装载到卸载具有高度的自动化)和一套计算机控制系统所组成的制造自动化系统，它采用简单地改变软件的方法便能制造出某些部件中的任何零件”。

综上所述，各种定义的描述方法虽然不同，但它们都反映了 FMS 应具备下面这些特点：

(1) 从硬件的形式看，它有三部分：

1)两台以上的数控机床或加工中心以及其它的加工设备，包括测量机，清洗机，动平衡机，各种特种加工设备等。

2)一套能自动装卸的运输系统，包括刀具的运储和工件及原材料的运储。具体结构可采用传送带、有轨小车、无轨小车、搬运机器人、上下料托盘站等等。

3)一套计算机控制系统及信息通信网络。

(2) 从软件内容看主要有：

1)FMS 的运行控制系统；

2)FMS 的质量保证系统；

3)FMS 的数据管理和通讯网络系统

(3) 从 FMS 的功能看它必须是：

1)能自动管理零件的生产过程，自动控制制造质量，自动故障诊断及处理，自动信息收集及传输；

2)简单地改变软件或系统参数，便能制造出某一零件族的多种零件；

3)物料的运输和储存必须是自动的(包括刀具等工装和工件的自动运输)；

4)能解决多机床条件下零件的混流加工，且无须额外增加费用。

5)具有优化调度管理功能，能实现无人化或少人化加工。

根据实际情况，某些企业实施的 FMS 与上述 FMS 的特征有些差别，因此人们称之为准 FMS，也有些人称之为 DNC 系统。作者认为：缺少自动物流系统的 MAS 可以认为是 DNC 系统，否则，可称之为准 FMS。因为 DNC 系统与 FMS 之间较大的区别在于是否有自动物流系统，因此，对于系统的调度与管理存在一些差别。DNC 与 FMS 的计划调度将在第四章中作专门介绍。

#### 2.1.6.3 FMS 的硬件组成及实例简介

1.FMS 的硬件组成 FMS 的硬件一般由以下部分组成：

(1) 中央管理和控制计算机 它接收来自工厂主计算机的指令对整个 FMS 实行监控，对每一个标准的数控机床或制造单元的加工数据实行控制，对夹具等实行集中管理和控制，协调各控制装置之间的动作。

(2) 物流控制系统 对自动化仓库、无人运输小车、加工毛坯和成品、加工用刀具、夹具等进行协调管理和控制。

(3) 自动化仓库系统 将毛坯、半成品或成品等自动地进行调度搬运或储存。

(4) 无人输送小车 行走于机床之间、机床与自动化仓库之间、机床与中央刀库之间的一种自动化小车。它可以是有轨的，也可以是无轨的。

(5) 制造单元 它是 FMS 的基本单元，由 CNC 机床、工业机器人等组成。一般 CNC



机床均需安装自动托盘交换器，机器人则按实际需要而选择。

(6) 刀具库系统 刀具的存储及管理，包括存储装置、刀具搬运装置及计算机控制系统。

(7) 夹具系统 实现对夹具的实时调整、维护和管理。

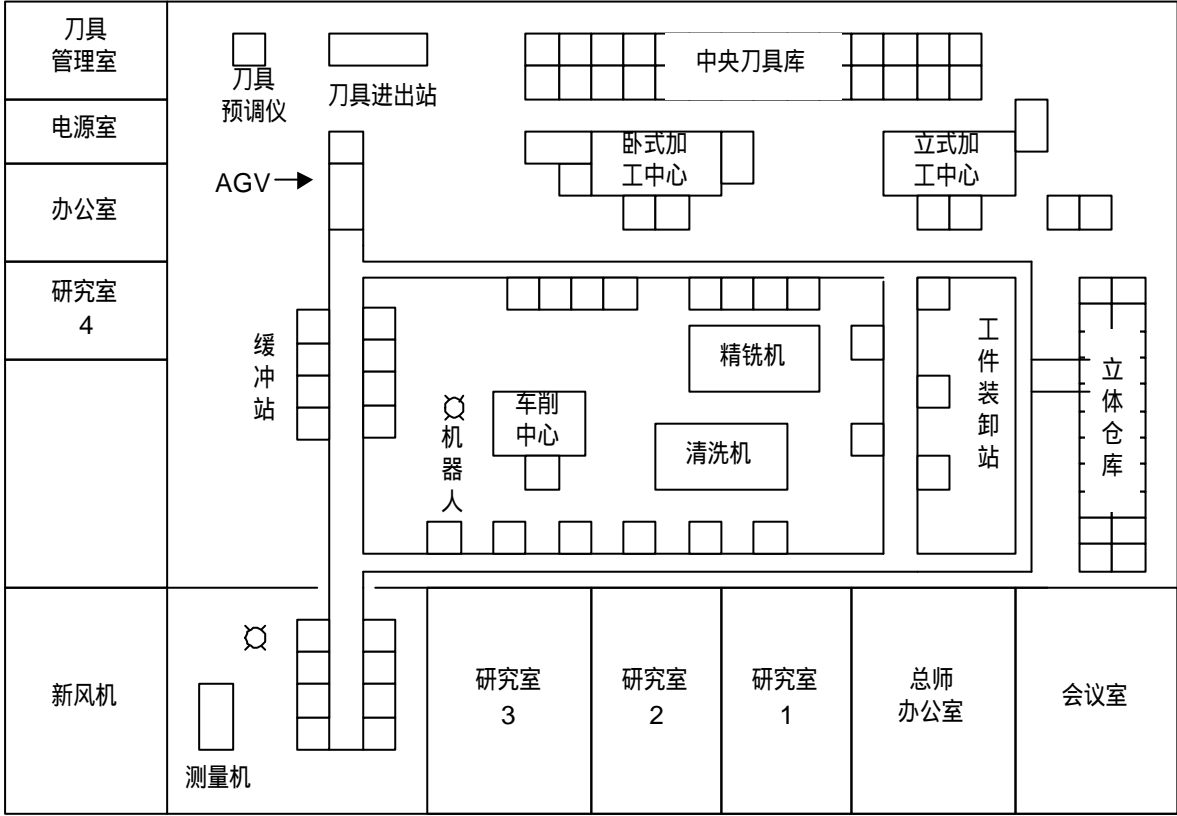
(8) 信息传输网络 FMS 中的信息通讯系统。

(9) 随行工作台 是从自动化小车到制造单元之间传送零件的载体。

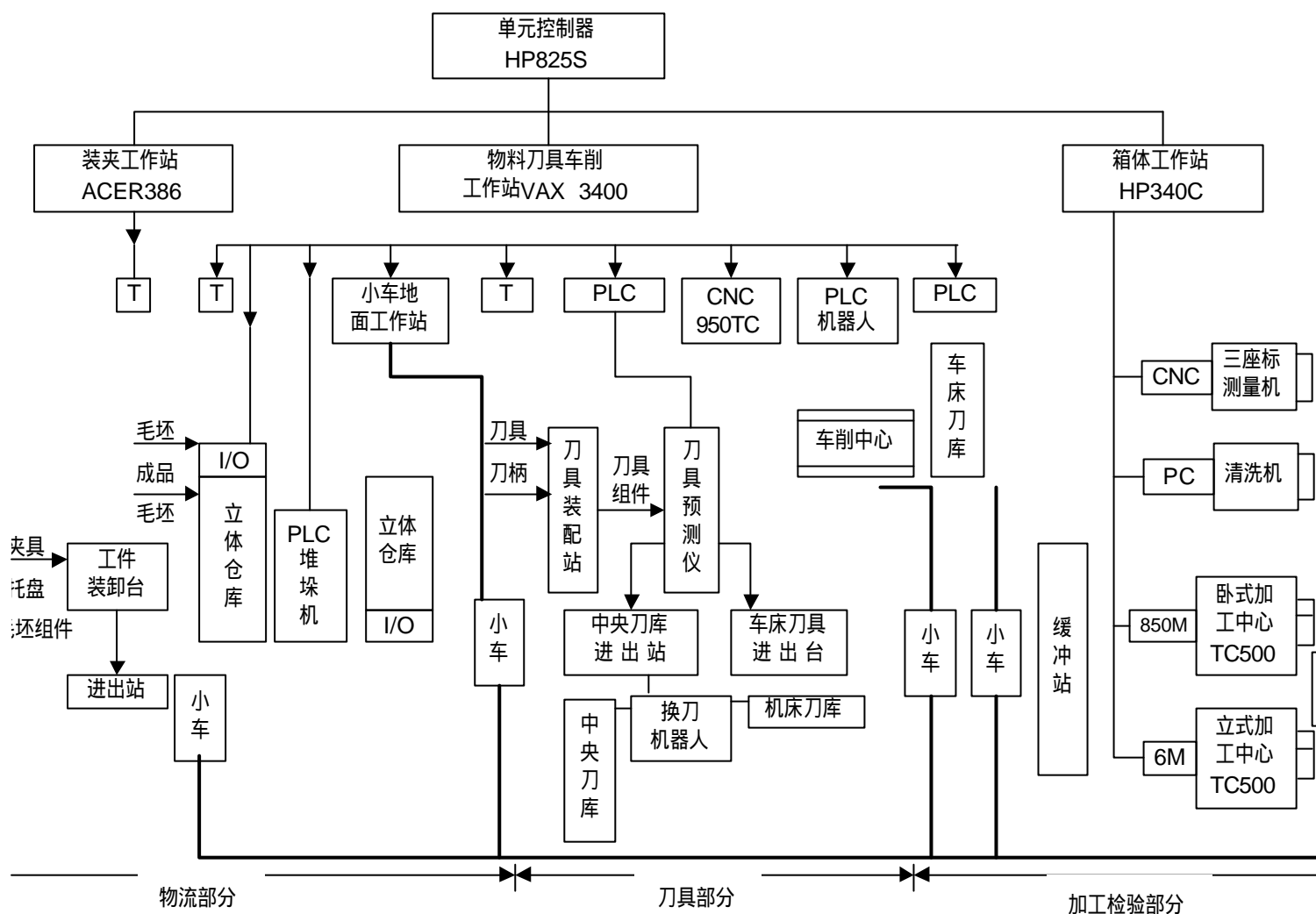
(10) 质量检验系统 实现在线和离线质量检测 and 监控。

为了说明 FMS 的硬件组成情况，这里简单介绍两种实例：

2. CIMS-ERC 实验工程 CIMS 实验工程(CIMS-ERC, Engineering Research Center) 是国家 863 高技术计划在“七五”期间的重点建设项目。1988 年 5 月立项至 1992 年底完成实验工程的总体集成运行，通过了国家科委主持的鉴定，后来获得美国制造工程师协会 SME 的“大学领先”奖。其中 FMS(对 FMS 的工件流、信息流、控制流、刀具流进行调度管理和监控的硬软件系统称之为单元控制系统 Cell Controlling System)控制系统的组成如图 2-66a 所示，其设备配置及流程如图 2-66b。



a) CIMS-ERC 的 FMS 组成及平面布局



b) CIMS-ERC 制造系统设备配置及流程

图 2-66

其中单元控制器(FMS 的最高层计算机控制系统)采用两台 HP825S 计算机实现，并使用了 HP-UX 软件开发平台及 ORACLE 数据库。按美国 NBS 提出的 CIMS 五层递阶控制结构（见第一章），工作站控制器（倒数第二层控制系统）由 Acer 386、Micro VAX 3400、HP340C+环境使用 X-WINDOWS 及 MONITROL 软件实现。底层设备有 TC500 卧式加工中心，XH714A 立式加工中心，自动导引小车(AGV)，测量机及立体仓库，中央刀库等。

3. 天津减速机厂机座加工柔性制造系统 JCS-FMS-2 天津减速机厂生产行星摆线针减速机。其产品类型单一、结构简单、零件典型、系列产品的零件相似性好，以至标准化、系列化和通用化程度高，制造工艺具有明显的成组性，13 种基型可组成 3600 多种规格的产品，每种产品的相关零件主要有机座，输出轴针齿壳体，摆线轮等 4 种。该厂经过多年的努力，建立了 GT 基础，成为机电部骨干企业，国家二级企业，机电部“机加工工艺样板厂”，为应用 MAS 新技术打下了良好的基础。为了企业的发展大力实施技改，该厂以成组技术为基础，应用数控技术和计算机技术相结合的柔性制造技术，以提高质量和劳动生产率，缩短生产周期和增强更新换代的应变能力。

该厂实施技术改造的思路:主要依靠国内相关技术的发展，获得国家 863/CIMS 科研成果的支持，尽可能吸收国产化成果，为国家 863 计划 CIMS/FME(柔性制造工程)

单元技术提供工程需求目标和试验验证基地。

按照 CIMS 的五层体系结构,其制造环境包含单元层、工作站层、设备层三个层次。设计的 FMS 在单元层计算机的控制管理下,完成静态调度动态调度等十几项功能(其它章节专门介绍),实现制造过程的自动化和集成化,充分发挥系统资源的功能,不过份强调物料流的全盘自动化,允许人工介入人机结合,充分实现工厂环境的 CAM。

该 FMS 以集成技术基础把单元控制器、工作站控制器和设备控制器综合成一个有机的整体,形成制造单元管理和控制的集成系统,命名为单元控制系统。1990 年重庆大学与北京机床研究所联合研制了 JCS-FMS-2 实用型单元控制系统,通过了机电部与 863/CIMS 专家组联合组织的鉴定。图 2-65。

尽管由于种种原因,该 FMS 还有待进一步完善之处,但它是我国科技人员自行设计和开发的第一条全部国产化 FMS,为我国在柔性制造工程的进一步研究取得了可贵的经验,锻炼了一支 FMS 的科研队伍。

(1)控制对象 JCS-FMS-2 加工 3 号-7 号五个基型的不同规格的减速机机座,生产纲领为 1500 件/年。

工件的典型加工工艺路线和平均加工工时为:

1)在立式加工中心以外型定位加工底面及相应孔,单件工时为 10 分钟。

2)在卧式加工中心上以底面和两孔定位,加工四周,按粗、精两道工序加工。粗精加工工序之间需在机外冷却 60 分钟,两工序机加工时间平均 40 分钟。

3)在立式加工中心上以底面两孔定位,加工顶面及螺孔,加工平均时间 9 分钟。加工工件所需的夹具分两档,3-5 号机座工件使用一类夹具,在更换不同机座工件时,夹具需按不同基型调整,加工 6-7 号机座工件时,要更换另一类夹具,6-7 号机座夹具在线使用率为 30%。每一工件在系统中加工时,需使用两种夹具:即底面加工夹具和侧、顶面加工夹具,本系统的毛坯入线,工序与工序间重新调整,成品出线,均由人工介入,需要配置好的人机接口,生产调度也应考虑合理安排工人的劳动频度和劳动量。

工件加工所需刀具品种有限,加工中心刀库容量可以满足生产用刀具需要,刀具管理的需求较简单。JCS-FMS-2 按生产纲领要求和设备生产能力及资金情况,以全部国产化的设备和计算机软件硬件来组织系统:采用北京机床研究所生产的带有托盘交换器的 XH714A 立式加工中心一台,TH6350 卧式加工中心两台(配 BESK-6M CNC),北京起重机械研究所的无轨自动导引小车(AGV),太极计算机公司的 TJ-2220 和 IC-011 计算机,软件控制系统由重庆大学与北京机床研究所联合研制。系统配置见图 2-67。

## (2)系统组成

### 1)单元控制器

硬件环境:

- TJ2220 计算机          内存 9MB, 硬盘 86MB, 软盘 400KB×2
- 主控台西文终端      1 台
- 用户中西文终端      1 台
- 彩色图形终端        1 台
- 打印机(AR3240)      1 台

软件环境:

- CVMS4.4 操作系统
- C 语言编辑软件
- GKS 图形软件

### 2)工作站控制器

选用工业型微型计算机太极 IC-011。该计算机相当于 IBM5531 档次。

基本配置为：

- IC —011 主机：CPU8088 II，工业键盘、640KB 内存。20MB 硬盘。
- 工业型彩色显示器 (IBM7534)。
- DOS3.30 操作系统、C 编译器。
- 用于物流工作站的控制器加配：RS —232 —C2 个信道；  
40 点输入/40 点输出的开关量插件。
- 用于加工工作站的控制器加配：SECOM2/44 路智能通信插件。

3)DNC 接口用于 STD 总线计算机搭配。

4)AGV 控制器采用 STD 总线计算机。

5)机床控制器为 BEEK 6M 内装 PC-B。

(3)系统结构

系统配置如图 2-67，控制系统结构如图 2-68 所示。

本系统以单元控制器为系统管理核心，根据制造单元的资源，接受车间输入的生产任务，以交货期指标和最大设备利用率安排调度计划，按关键制造单元满负荷的目标作为动态调度的依据，分别向加工和物流两个工作站下达任务。工作站控制器在本系统中的功能作了简化，本身不做调度和排序工作，仅完成生产指令，承上启下的工作，简化后的工作站级主要承担面向操作人员的人机接口和对下通信的管理和适配，此外也对下一级有一定的控制和信息采集功能。

由于本 FMS 仅是研制目标产品的雏型，其主要目的是验证单元控制器的初步成果，在形成系统的其它环节中,目前只做针对需求的最小功能范围的工作，工作站控制器采用 PC/XT 级工业微机，在扩充功能上有较大的局限性，较为理想的设备是 AT 级工业微机，采用 XENIX 操作系统。

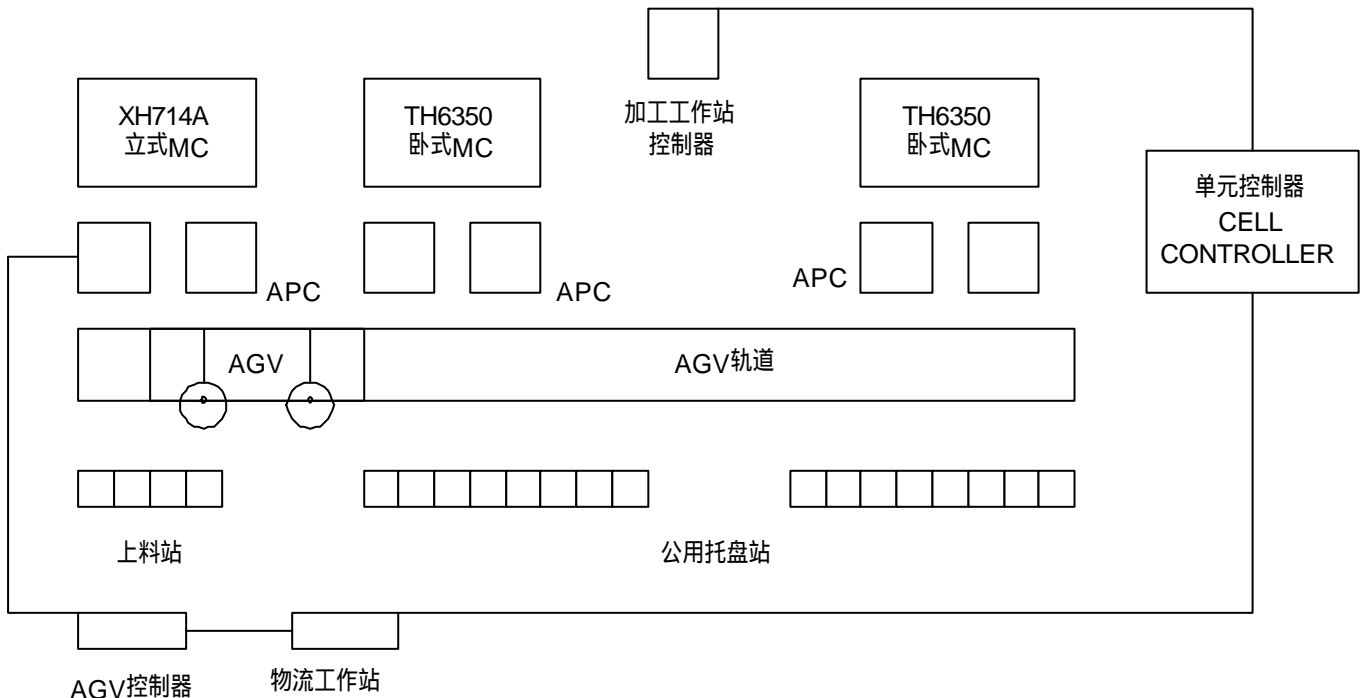


图 2-67 系统配置图

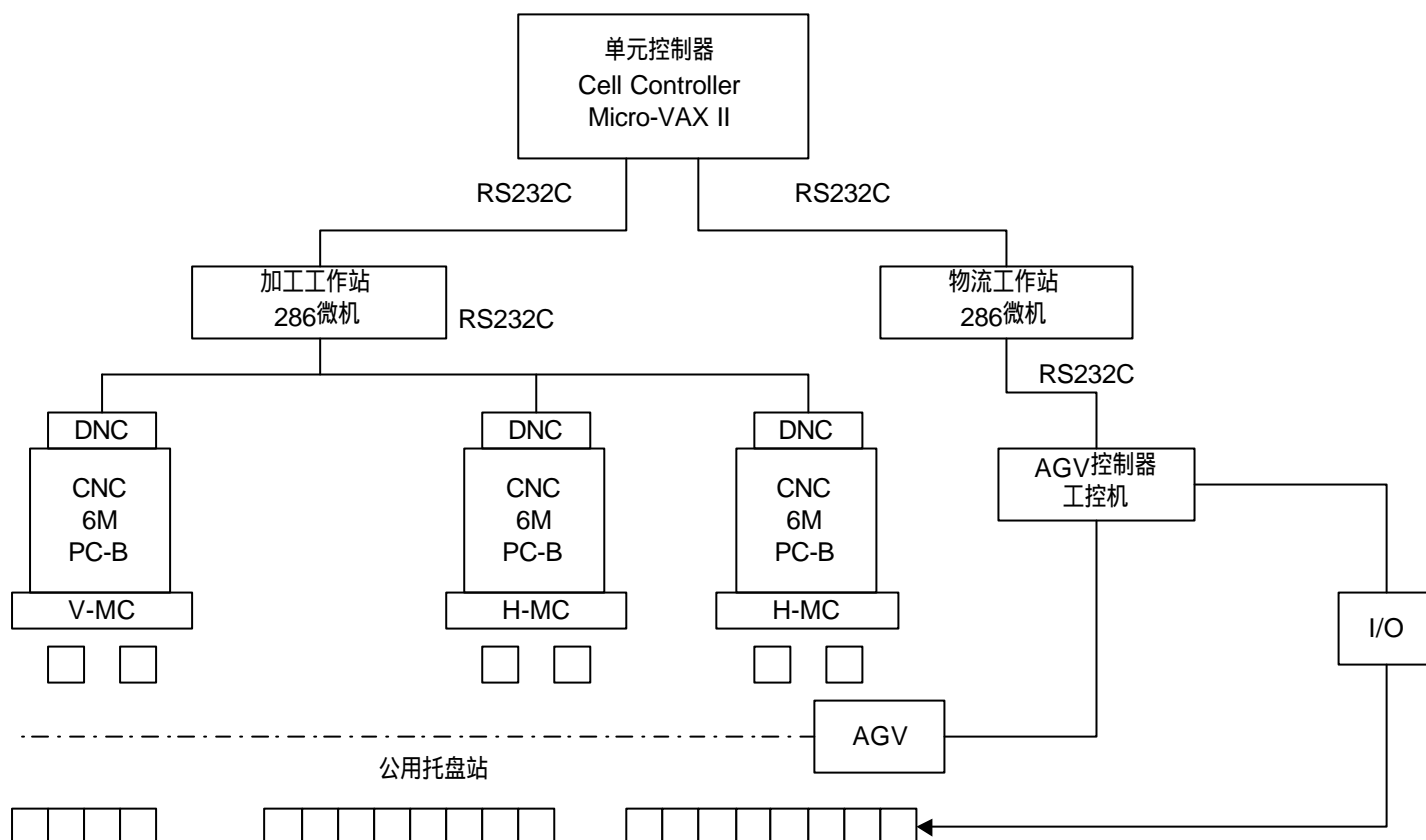


图 2-68 控制系统结构

设备控制级的加工中心机床所用的 CNC 不具有 DNC 功能，为此组织了 DNC 研制组，采用总线计算机结构，编制通信软件，对上以 RS-232-C 通信，对下则联结了 CNC 的接口，传送加工程序，刀具补偿值，工件坐标系等文件；通过 PC-B 的 I/O 输出位状态和指令信号。本阶段工作为以后扩充 CNC 软件，自行设计 DNC 接口插件及使 BEEK-6ME 国产化时增加 DNC 功能打下基础。

#### 2.1.6.4 FMS 的设计原则

设计一套柔性制造系统，涉及的技术很多，设计和开发的周期也很长。而且，随着加工对象的不同，不同的配置、设计方案可能有多种。因而，要设计出技术上既要先进、功能上又实用的 FMS，不是一件容易的事情。由于篇幅的限制，这里不能全面叙述，而是通过介绍 FMS 的初步设计和 FMS 的关键技术，说明设计 FMS 的原则。

FMS 是一项工程，不同于单机自动化产品。因而对于 FMS 的设计，必须作为用户与承制者双方共同的任务，才能较好地完成这一复杂的工程。因此设计和开发周期也较长，从 FMS 的初步设计到建成一个能完全运转的 FMS，可能需要 2-5 年的时间，前半年至头两年的时间可能花费在选择机床设备、选择系统类型和工程项目的初步规划上，在这个阶段，用户与承制厂之间的密切合作，至关重要，这一阶段的工作也务必谨慎。

FMS 设计需要大量早期工程方面的准备工作和管理方面的支持。对于那些已拥有 CAD/CAM 和大量 CNC 机床的企业来说，这种准备工作周期可能较短，而对于那些只拥有不太复杂的系统和设备的企业来说，必须留有足够的时间来进行 FMS 的预先规划和初步设计。

FMS 应成为企业策略的一部分。FMS 要涉及每一个部门，特别是设计工程部门。他们的决心和态度关系着 FMS 计划的成败。FMS 并不是那种可供选购，插上插头就可以开的系统。它必须得到企业内每一个相关人员的支持。

1. 开始规划阶段---认识 FMS 的复杂性 FMS 是一项多学科多专业综合的先进技术工程，设计实施得好，会为企业带来效益。因而，80 年代末 90 年代初国内外许多企业争先恐后地热衷于设计 FMS，将大量的资金投在这个工程上。可是，很少有人去想，这里存在较大的风险，搞得不好，可能失败。然而，当时有很多决策者不愿听这种意见。忽略了开始规划阶段应该重视的问题。本文把 FMS 规划设计时应着重关心的问题列出来与读者一起探讨。

下列因素是在规划阶段要重点考虑的：

(1)要有管理部门的保证，他们对 FMS 的内容要有所了解。让他们认识到 FMS 投资大见效慢、技术含量高、成功的风险大。

(2)要建立一支负责设备选型、软件开发、零件 NC 编程、工夹具设计、刀具管理和计划调度方面的科研队伍。要有坚强的技术支撑及技术咨询队伍，最好吸收有实际经验的科技人员直接参加设计和实施。

(3)研究哪些零件可由 FMS 生产，制定可行方案，应进行全面仿真，并给予必要的人力物力保证。

(4)FMS 从初步设计到实施，从投入运行到全负荷生产，需要一段很长的时间。初始成本高是可以预料的。坚持实施到发挥效益是关键。

(5)FMS 是一项高新技术项目，是计算机应用和集成技术的综合体现。因此，要把系统集成和软件开发，作为一项重点来抓。FMS 的效益来自精心的设计与管理，因此，FMS 的成功与否在很大程度上取决于人。所以要对技术人员和管理干部进行较深入的培训。

(6)对加工零件，在设计及制造两个方面都需要从一开始就正确选择，或选择或修改零件的工艺特性以适宜于 FMS 的加工。

(7)FMS 可带来柔性和自动化，如果设计不当，则 FMS 的许多特点反而会妨碍其柔性、造成麻烦，因此，硬件设备的可靠性应是 FMS 设备选择重点关心的对象。

英国 INGERSOLL 工程公司 1981 年对美国 33 个 FMS 进行了调查。令人惊奇的是许多问题都产生于经理和工程师们的天真。他们认为 FMS 很简单，只要有钱，有硬件供应厂和要制造的零件就可以办成。对这些调查出的问题，分析表明，责任在三个方面，如表 2-10 所示。

表 2-10 对美国 33 家 FMS 用户调查问题的分析

责任分类	用户及制造厂的责任	用户的责任	制造厂的责任
存在的问题	一软件的研制及系统集成 一机床 一质量 一搬运 一编程 一作业计划	一预计计划 一产品设计 一预计的生产工程 一产量 一夹具 一零件 一刀具	一机床 一刀具 一搬运设备
占总责任的百分比	20%	40%	40%

调查的问题表明，许多 FMS 在工程项目开始阶段，没有预先详细的规划；没有充分掌握准备制造的产品品种和复杂程度；没有认真分析系统中哪些方面应该是柔性的，哪些方面应该是专用的；缺乏资源的保证；缺乏管理上和技术上的保证等。结果造成 FMS 的柔性相当低，或只有少量零件才可加工，经济效益低。另外，影响 FMS 整体性能发挥的很多原因是硬件设备可靠性差、稳定性不足。作者认为：如果因资金等原因需选用廉价而可靠性低的设备，建议不急于研制 FMS。

2. FMS 的初步设计

(1) 选择加工零件和选择数控机床 选择适合的零件和机床，这是 FMS 初步设计要考虑的最基本问题。并不是所有的零件在 FMS 中加工都可以获得好的效益，而是要

通过分析比较，找出所选择的加工对象。

选择零件应考虑的问题：

- 1)需要加工零件的体积。
- 2)零件的材料。
- 3)零件的基本形状(如箱体，轴类，盘类等)。
- 4)加工工序及类型(铣，车，钻，镗，攻丝等)。
- 5)在 FMS 中预计装卡的次数，现在装卡次数。
- 6)刀具磨损情况和换刀次数。
- 7)公差。
- 8)月产量，年产量。
- 9)单件加工时间。

根据上述准则，可以大致地挑选一些使用 FMS 加工的零件。最好是通过成组技术的方法，用计算机软件处理，这样就可以在很短的时间内，找出全部候选零件。

对 NC 机床的选择，首先是受已选定的零件种类约束。其次才是其它约束条件。如零件的尺寸将影响 NC 机床行程的选择；工件的重量是设计或选择机床工作台的重要因素；工件材料将影响主轴功率和冷却方式与切屑排除方法；加工的工艺将决定对机床类型的选择。绝大多数 FMS 的年产量为 5000-75000 件零件。如果产量低于此数，则 FMS 的运行，可能使生产零件的成本较高。

在 FMS 中，一般不配置专用机床，因为专用机床集中了特殊加工方法的功能，它在一定的特殊加工范围内是高效率的，但超出这些范围就不适用了。除非这个工序中非它不可。加工中心和车削中心具有柔性，应作为选择 NC 机床的主要品种。如果配置一台专用机床不能代替两台加工中心的话，则要坚持配置加工中心，这样配置机床的目的，在于使 FMS 在尽可能长的时期内，能获得尽可能大的柔性，达到较高的经济效益。

选择机床的方法，本章最后将作专门讨论。

(2) 柔性制造系统的总体设计 在选择好机床类型和工件种类以后，即可进行系统的总体设计，包括以下方面：

- 1)要在设计中确定系统柔性的能力。一般有以下几种情况。

系统要具有同时加工一种以上工件的能力，即随机加工能力。通常可通过安排各种工件之间的比例来满足生产要求。系统不受产品设计和刀具变化的影响。

故障旁路的能力。当系统中某一机床发生故障时，可用其它机床替代故障机床，从而使系统接近于正常运行的生产能力。

具备部分实现无人照管的能力。当系统在白天完成维护和工件装卡的情况下，在第二和第三班可实现无人看管生产。这种能力就要求系统具备自动检测、联机监控功能和物流运输系统自动化程度较高等。

系统的扩展性。在总体设计中，应考虑到本系统将来还要扩大能力，或与其它生产线联接的能力。这需进行总体布局 and 物流系统的选择，还应考虑信息交换及通讯功能等。

- 2)确定切削用量和加工工艺 不合理的切削速度和进给量，将导致加工表面不光洁和刀具磨损加剧，最终导致生产能力下降。确定合理的切削用量，可根据加工手册上刀具的最佳进给量、切削速度及工件的刚度、夹具的情况、机床的性能等因素来选择。切削用量决定后，需核算加工时间，以便于编制生产计划。

制定加工工艺需考虑下述二个因素：一是刀具的选用，刀具的数量将影响刀具库容量设计。一般情况下，选用标准化刀具；二是每种工件采用的装卡方法。主要目标是减少工件的装卸和搬运。

根据 FMS 的装卡方案、限定的刀具容量和使用不同机床对加工精度和工件通过时间(MAKESPAN)的影响,制定每种工件的详细加工工艺计划。

3)确定系统的加工精度 当工件的要求是在一般精度时,这个问题不突出。当需要高精度加工时,则在总体方案设计中,需对高精度加工过程是在 FMS 内进行,还是离线加工作出决策。

若决定高精度加工在系统内进行。则要考虑购置高精度机床的费用以及在系统内能否得到充分利用的问题。如果高精度机床只承担高精加工部分,这将造成开工不足,加工工件费用增加。如果让高精度机床承担普通加工任务,则可能影响机床的基本精度,有时会超负荷。如果高精度机床在系统内还需一个恒温控制的条件,必须由系统提供。

若决定高精度加工离线进行,则要考虑工件离开和重返系统所引起的控制问题,工件从夹具及随行托盘上装卸的问题。

4) 确定系统的利用率 系统的利用率是 FMS 所有组成部分发生故障,全部机床、主计算机、CNC 和物料输送系统、刀具、夹具等均在运行时,它们的运行时间与生产计划时间的百分比。如果要求 FMS 的系统利用率高,则要求系统的所有组成部分的平均利用率更高。

系统的利用率与系统各组成部分的可靠性有关,与总体设计的要求有关。在系统复杂性、系统冗余度、系统部件可靠性、投资和生产损失费用之间,均要加以权衡考虑,综合各方面因素而确定一个合理的利用率。

5) 确定每台机床刀具库容量和中央刀具库容量 根据被加工工件的工序和每台机床的加工能力,可以确定每台机床刀具库的容量。根据 FMS 的最大批量来确定是否需要设立中央刀具库和刀具存储的设备。当设立中央刀库时,可考虑三种换刀策略:

① 在一组工件加工的周期内,不进行刀具的批交换,而在这组工件加工完成后的换批阶段,进行刀具的批交换。批交换的调度方法又分,固定常用刀具法和全部刀具交换法。前者刀具管理软件复杂,机床刀库容量相对较大,但换刀效率高;后者刀具管理软件简单,但刀具交换频繁,换刀工作量要大些。

② 在每一工序加工完成之后加工下一个工件之前,进行刀具的批交换,要求在加工该工序的过程中不进行刀具的交换。采用这种策略,机床刀具库可以设计得小一些,但刀具管理软件更为复杂。

③ 只要每一工序所需的前几把刀具在机床刀具库之中,机床就可以加工了,其它后需刀具在机床的加工过程中,由刀具搬运装置从中央刀具库中取出,提供该机床使用。采用这种策略,系统必须装备中央刀具库及刀具运输装置,刀具管理算法也非常复杂。

刀具管理算法及软件设计,本文第四章将作专门介绍。

6) 辅助工序的确定 在 FMS 的总体设计中必须考虑哪些辅助工序需进线,如清洗、检验、去毛刺、热处理、光整加工、打标记、去应力、冷却等。如全部进线,系统的控制软件会很复杂,也会增加制造成本,但自动化程度提高了。

7) 物料运输系统的选择 小型的和简单的 FMS,物流系统可以很简单,而且允许人工介入。具有一定规模的 FMS,则一般采用自动化物流系统。这种系统可以由无轨小车(AGV)、搬运机器人、自动化仓库、托盘缓冲站等构成。采用简单的物流系统,尤其是允许大量人工介入的物流系统,投资少见效快,可靠性还较高,在我国现阶段还比较合适。

下面,以无人运输小车为基础,介绍几种物流系统方案:

有轨式无人运输小车,这种物流方案多数为直线式导轨,机床和加工设备在导轨



的一侧。随行工作台或随行托盘在导轨的另一侧。特点是，物流控制方法简单，成本低。但要求加工工序变化不太频繁(见图 2-69)

无轨式物流系统，这种物流方案多用于机床品种和台数较多，加工工序较复杂，要求系统的柔性较大的情形，用这种无轨式物流系统如采用无轨小车(AGV)。AGV 行走的路线，在总体设计阶段要进行多方案比较和论证，AGV 行走路线设计以后，必须在车间埋设地下感应电缆或其它导向设施，这种物流有多种布局。

图 2-70 是一种外封闭型。一般情况下，有较多的机床品种，如加工中心、NC 车床、NC 磨床、测量机等，机床和随行工作台等工件放在中间，AGV 路线从外围封闭一圈。其优点是，占地面积小，机床和随行工作台工件等工件均在同一侧。

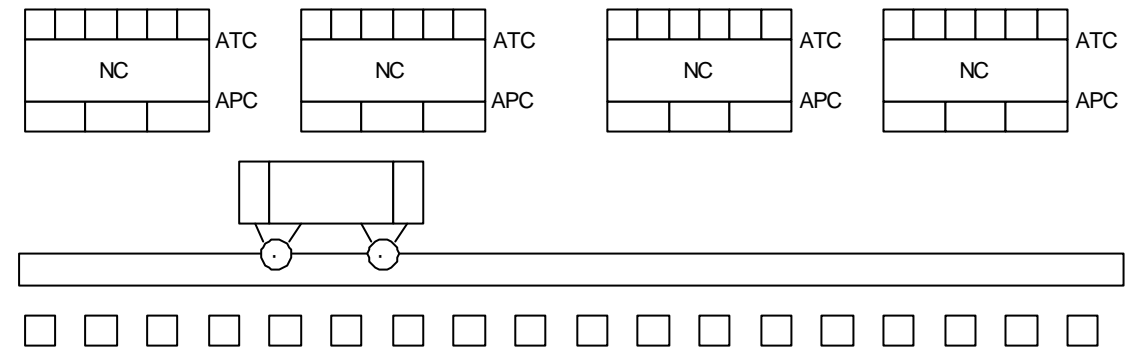


图 2-69 有轨式物流系统

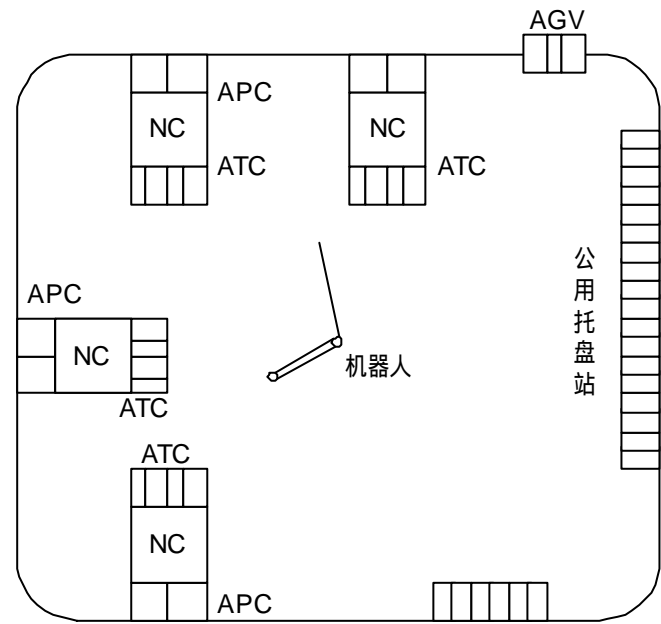


图 2-70 外环封闭型物流

FMS 的总体设计需有一个设计、评审、修改设计的反复过程。只有这样，才能获得一个满意的总体方案。在总体设计完成以后，就要进行每一个部分的详细设计。要在详细设计中按照总体方案的要求：根据下面介绍的关键技术及工厂的具体情况分步骤开展设计工作。

#### 2.1.6.5 FMS 的关键技术

完成 FMS 的初步设计后，即进入 FMS 详细设计阶段。在详细设计中，主要围绕以下几个关键技术进行，包括 FMS 的监控和管理系统、FMS 的物流系统、FMS 的刀

具传送和管理系统、FMS 的联网、FMS 的辅助系统等。详细设计是初步设计的具体化，它将影响 FMS 的使用性能，决定 FMS 的运行和效益的发挥。必须十分重视设计的每一个细节，并在设计完成后，组织严格的技术审定工作，复审每一张设计图样。

1. FMS 的监控和管理系统（或称单元控制系统） 监控和管理系统是整个 FMS 的控制中心。它要组织 NC 机床、物流系统等各类设备协调工作，执行优化调度及监控工作，完成加工测量等。

(1)FMS 监控和管理系统的组成 监控和管理系统由以下三部分组成。

1) 中央处理装置（单元控制器） 一台计算机及其配套的外部设备。根据 FMS 的规模和总体设计的要求来选择计算机的容量、机型等。一般来说，大型的 FMS 可以选择类似 MICRO VAX-II 计算机，小型的 FMS 可以选择高档微机等。在中央处理装置内，需开发各类软件功能模块，如调度模块，计划模块，监控模块，仿真模块，零件程序管理模块和接口模块等。显示监控装置，要有一个专用显示器，能直观的显示整个 FMS 的当前状况，和预报几小时后的运转，显示报警和故障状况。因此，一般需配置工业电视监视装置。零件程序程序管理模块，相当于一套小型的 CAD/CAM 系统，用来处理各类 NC 加工数据，构成数控程序，以便中央处理装置调用和修改。

2) 工作站控制系统 它们分为加工工作站、物流工作站和刀具工作站等。完成单元层（中央处理装置）下达的各种指令及反馈所管理的加工、物流或刀具的设备信息。它们一般也有一定的优化管理和调度的功能。工作站硬件一般选用微机。

3) 设备控制系统 本章前面所述的 NC, CNC 及 DNC 系统均属于设备控制系统。

(2)FMS 监控和管理系统的功能模块 所谓功能模块，就是为系统开发的软件集合，装在 FMS 的中央处理装置中，使系统能发挥相应的功能。一个 FMS 的监控管理系统一般配置以下 14 个功能模块。如图 2-71

- 1)单元控制系统通信管理
- 2)系统运行历史资料管理
- 3)单元控制系统总控管理
- 4)生产运行仿真与评价
- 5)单元控制系统启停控制
- 6)生产运行监控
- 7)静态作业计划调度
- 8)系统工件动态作业调度
- 9)系统资源实时动态调度
- 10)系统刀具在线动态调度
- 11)系统故障诊断及处理
- 12)系统状态维护
- 13)系统刀具配置管理
- 14)NC 程序管理及传递

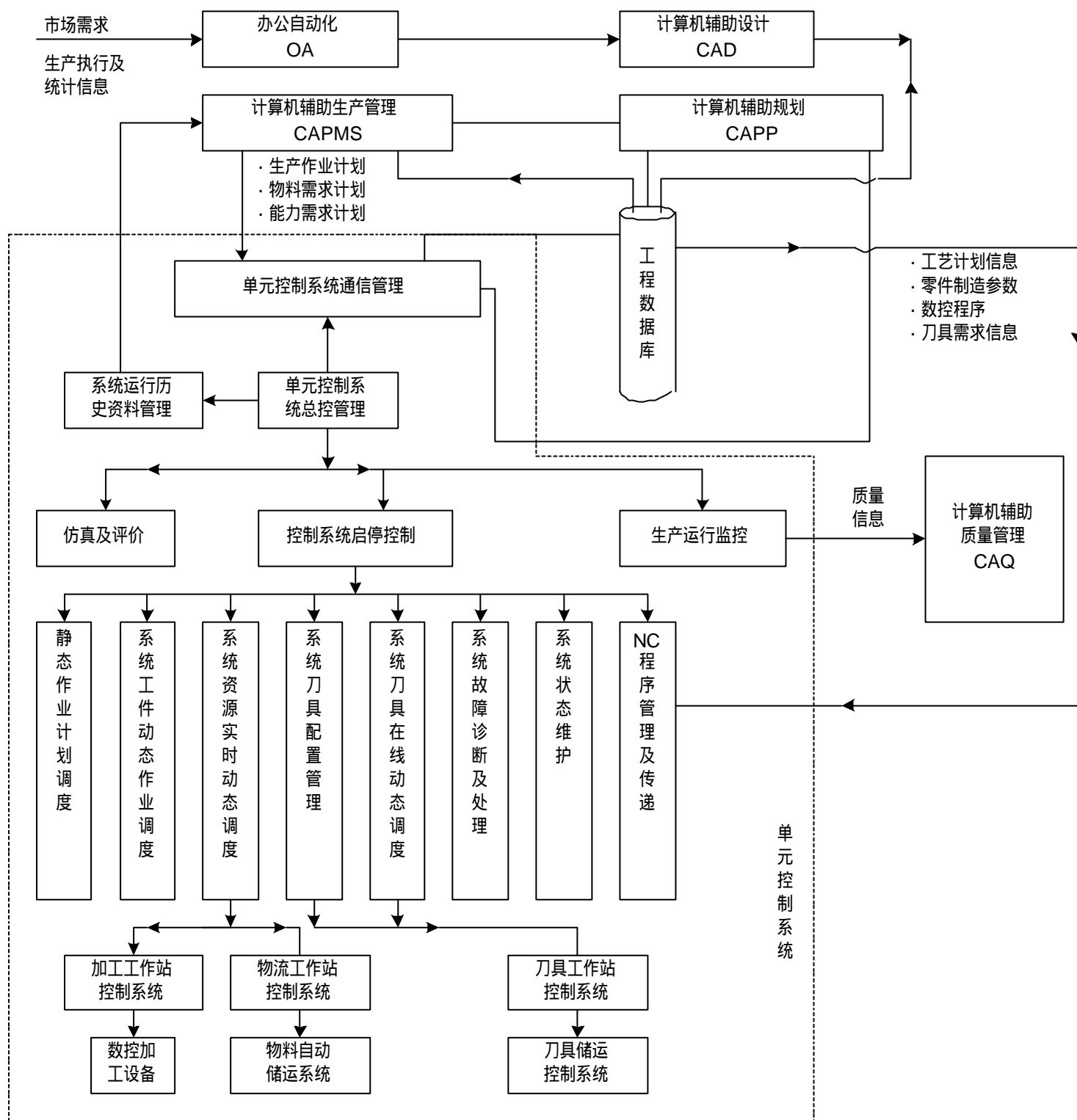


图 2-71 单元控制系统在 CIMS 中的地位及功能划分

2. FMS 的物流系统，参见第三章。
3. FMS 的刀具管理系统，参见 2.3.1。
4. FMS 的通信，参见第五章。

## 2.2 测量设备

在零件的加工制造时，对零件加工精度的检测是保证加工质量的重要手段。测量零件可以使用传统的工具如卡尺、千分尺、百分表等，也可以使用现代的自动测量装置，如三坐标测量机。零件精度检测过程可分为工序间循环内检测和最终工序检测；采用的测量方法也分为接触式和非接触式测量。循环内检测可实现加工精度的在线实时补偿；最终工序检测实现对产品质量的最终检验与统计分析。

为了得到高精度读数，一般采用接触测量法。大多数现有非接触遥测设备准确度低，且结构十分复杂。现在科技人员采用的非接触遥测技术一般有两种：一是先进的激光技术，可用于测量尺寸并探查零件的表面完整性。另一种是采用线性光敏二极管阵列。另外现正处于研制过程的图像处理与测量相结合的技术，也有成果报导。

1. 三坐标测量机 三坐标测量机是制造自动化系统中使用最为普遍的测量设备，因此本节主要简介这种设备。三坐标测量机是一种高精度、高效率、多功能的测量仪器，它几乎可以测量任何尺寸的形位误差。快速地完成复杂零件的三维空间尺寸的测量。如图 2-72 所示是一种数控三坐标测量机系统。

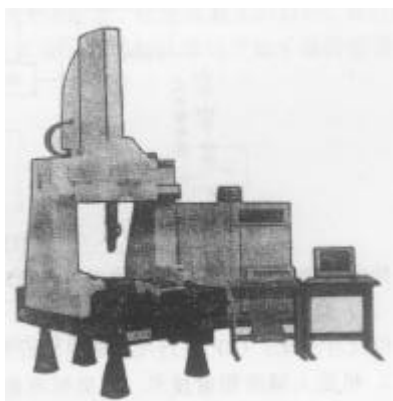


图 2-72 三坐标测量机系统

三坐标测量机的 X、Y、Z 三个坐标可以灵活地移动，三维测头对被测零件采样，显示装置显示测量结果，并可进行数据处理，结构上一般采用花岗石固定龙门式结构，其尺寸稳定性好。三坐标测量机特别适合测量零件的形位误差，测量过程可进行数控编程。测量机能够按程序自动工作，检测效率比人工高几十倍，而且可测量具有复杂曲面的零件加工精度。

采用坐标测量机很容易测量不规则平面。使被测物体沿着一根轴转动，按不同的角度增量取测量值，再将测量值与描绘被测物件轮廓的数学曲线或者与标准圆柱体的曲线相比较。

例如 Ferranti International 公司推出的 Ferranti Midns 是全新水平臂摇控坐标测量机。X、Y、Z 三个方向的测量长度为 750mm×650mm×900mm，它是采用群联计算机处理器系统来实现快速测量的，并且具有很高的精度。该机的速度测量为 400mm/s，最大加速度为 6000mm/s<sup>2</sup>，接触速度为 50mm/s，空间精度达 3μm。测头有较宽的选择范围：接触式的，自动变换的，光学的，激光的等测头。

2. 循环内检测 在制造自动化系统的测量设备除了有可编程的数控三坐标测量机以外，还可以利用数控机床和加工中心上的位置检测系统实现循环内检测。其基本原理如图 2-73 所示。

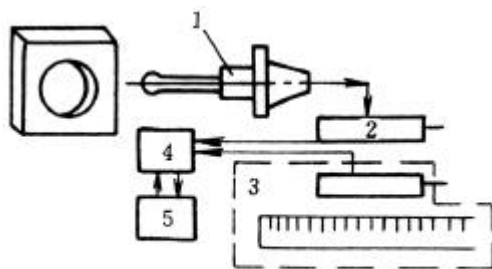


图 2-73 检测原理框图

测头 1 为一个三维触觉传感器，它的柄部结构与刀杆一样，可以装入机床主轴中，也可由换刀机械手放入刀库。测量时其运动由程序控制。测头与工件表面刚一接触就发出信号给接收器 2，控制测量模块 4 开始记录该机床坐标位置(起点坐标)。当测头与另一侧表面接触时，发出记录终点坐标信号。通过两次接触之间机床坐标位置的差值，即可测出被测表面尺寸。这样，数控加工中心实质上成了一台临时三坐标测量机。整个系统通过测量模块与机床数控系统进行通讯。为了方便测头的装卸，测头与接收器之间采用无线通讯较为理想。这种测头称为“雷里肖”测头，一些较为高级的数控机床和加工中心已配有这种测头及相应的控制软件。

测头信号的无线传输方式有电磁波发送和红外线等传递方式，但在工业环境中，多选用抗干扰强的红外线传递方式。采用无线信号传递的传感器内部应是有源的，同时有相应的控制电路(如图 2-74 所示)，因此，电池选配，信号发送，接收方式的合理选择是其重要内容。传感器内部工作原理如图 2-74 所示，6 个发光管均布在测头上，信号由它们向 360°全方位传递。

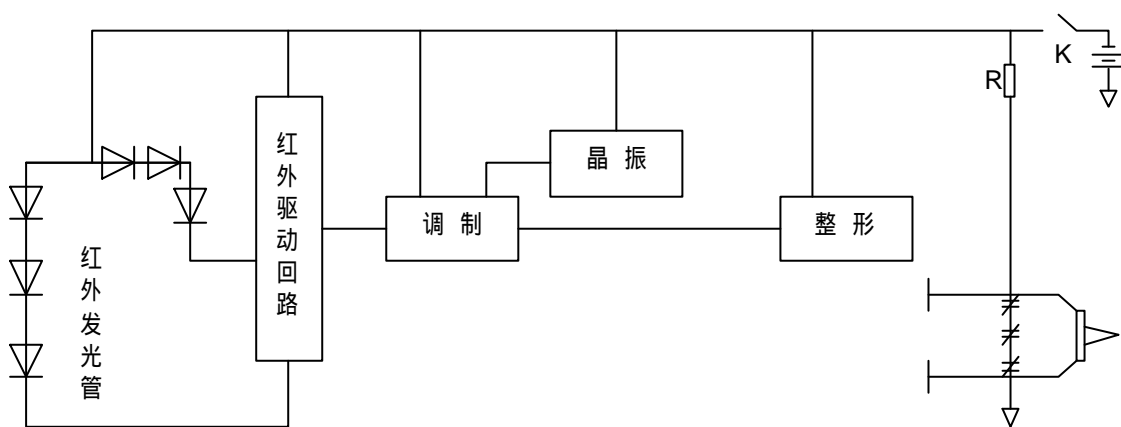


图 2-74 无线测头的内部工作电路框图

使用自动定位装置结合二级或三级测头进行尺寸循环检测，具有如下功能：(1) 监测加工极限情况；(2) 磨损补偿；(3) 根据基准而确定工件位置；(4) 根据基准点补偿尺寸变化；(5) 进行尺寸的自动检测。

### 3. 机器人辅助测量技术

三坐标测量机作为系统中的主要检测设备可以实现产品的下线终检，尽管测量机功能强、精度高，但各种测量都在其上进行是不经济的，它会增加生产的辅助时间，降低生产效率，特别是下线终检产品不合格会造成产品的报废。因此希望每个加工单元(设备)都配备相应的检测装置和系统，并能够实现工序间和循环内在线尺寸检验。在镗铣类加工中心上高级数控系统都配备高精度测量头，测头可根据需要从刀库调到主轴上形成简易三坐标测量机，且有配套软件支持测量。可以完成尺寸测量，

找中心，及确定定位销孔及定位面的坐标位置等。在普通车床及 CNC 车床上，尺寸在线测量还没有很好的解决办法。在车削加工中心上，除通用的游标卡尺，千分尺等测量工具外，车削加工中心上还配有对刀装置，但由于刀具磨损，刀具及被加工工件受力变形和热效应的影响，对刀结果不能代替尺寸测量。除较大批量生产时配制的定尺寸测量(专用)传感器外，目前对于小批量，变尺寸自动在线尺寸测量还比较困难，主要是由于车削加工中心内部空间狭小，工作环境较差，内部不宜放置测量仪器和装置。为了解决测量中必须有人的干预问题，实现生产过程的自动化，利用在线机器人进行辅助测量是较好的方法。

工业机器人自问世以来，发展十分迅速，其应用领域也不断扩大。机器人在测量中的应用也越来越受到重视。机器人测量具有在线、灵活、高效等特点，可以实现对零件 100% 的测量。因此，特别适合 MAS 中的工序间和过程测量，而且同坐标测量机相比造价低，使用灵活，易入线。因此国外如意大利，德国已有测量机器人问世，并已用到 MAS 中。机器人测量分直接和间接测量。直接测量称作绝对测量，它要求机器人具有较高的运动精度和定位精度，因此，造价也较高。间接测量又称辅助测量，特点是在测量过程中机器人坐标运动不参与测量过程，它的任务是模拟人的动作将测量工具或传感器送至测量位置。这种测量方法有如下特点：

(1) 机器人可以是一般的通用工业机器人，如在车削自动线上，机器人可以在完成上下料工作后进行测量，而不必为测量专门设置一个机器人，使机器人在线具有多种用途。

(2) 对传感器和测量装置要求较高。由于允许机器人在测量过程中存在运动或定位误差，因此传感器或测量仪器具有一定的智能和柔性，能进行姿态和位置调整并独立完成测量工作。

图 2-75 为由 MOTMAN K-30(六轴)通用工业机器人、AST-386 计算机、传感器三个主要部分组成的一个机器人辅助测量系统。系统中机器人末端执行器夹持传感器，模拟人的测量动作将传感器送至测量位置。计算机是系统信息转换和控制中心，负责采集传感器的信号并对其进行处理，同时和机器人上的 PLC 接口交换信息，控制机器人的启停、运行路线和工作任务的变换。当机器人运行到确定位置后发出信号，通知计算机开始采集传感器提供的测量信号。完成测量后机器人复位。

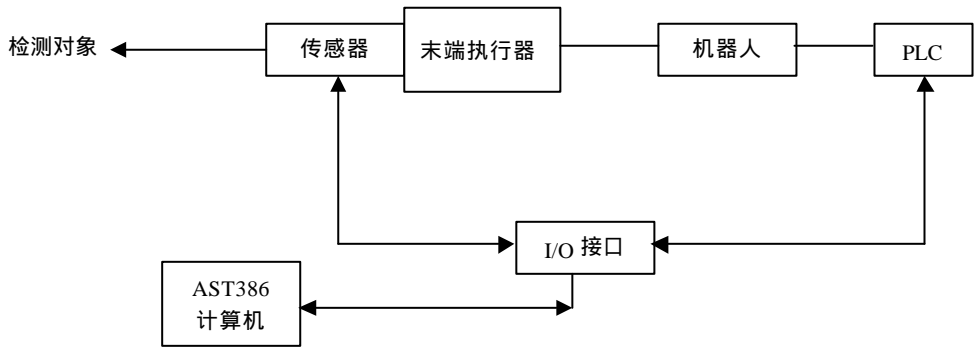


图 2-75 机器人辅助测量系统框图

## 2.3 辅助设备

### 2.3.1 刀具系统

人们一般认为，FMS 加工的零件可以有任意多的种类，但实际上，大多数现有的 FMS 只能加工有限品种的零件。对目前已经使用的 FMS 调查统计表明，66% 以上的 FMS 加工的零件种类少于 10 种，30% 左右的 FMS 加工的零件种数在 10 种

少于 15 种。在大多数情况下，FMS 的应用使中小批量、多品种零件的加工条件转变成中批量、少品种的加工条件，造成这种原因并不说柔性制造系统本身的缺陷，而是由于系统的刀具自动化程度太低。

此外，由于早期开发的 MAS 没有考虑自动刀具系统，随着 MAS 的进一步应用，在刀具系统方面发现了一系列问题：

- 1. 没有对整个 MAS 中的刀具系统进行合理规划设计，使各机床加工站中工件的调度与刀具的供应不一致，影响了工件加工的连续性。
- 2. 刀具监测系统不完善，对破损的刀具难以检测。或检查出破损的刀具时，中央计算机难以作出故障处理。
- 3. 中央计算机没有对整个 MAS 中已经达到寿命的刀具进行统计分析整理，打印出成批更换刀具的报告。只能由各机床的控制器对自己已到寿命的刀具提出更换请求。这样在整个运行过程中频繁中断以便更换新刀具，影响整个系统的使用效率。
- 4. 刀具管理混乱，对刀具信息缺乏统一管理，刀具数据库中的数据不足或数据库功能建立得不完善；对刀具库存量的控制不合理，需要的刀具没有，而不需要的刀具却多余。

通过对各种 MAS 系统的分析，人们发现刀具和工件贮运系统利用率明显低于加工设备的利用率。在传统制造系统中，由于刀具方面投资有限，总投资不高，因而矛盾不突出，但在 MAS 中，以每台加工中心配备 60 把刀具计算，每把刀具平均有 3 把姊妹刀，那么一台加工中心就可能要有 180 把刀具和相应数量的刀柄，再加上刀具准备和交换等费用，刀具系统方面的投资往往接近加工中心费用，因而应该将其利用率与加工中心利用率放在同等地位看待。另外，加工每个零件的每一个工序往往需要 2-15 把不同刀具。对于每道工序，零件调度系统一般只需决策一次，而对刀具管理系统就必须决策 2-15 次，因此最优管理 MAS 中的刀具对提高系统总体效率应该起着不可忽视的重要作用。

刀具系统自动化水平的高低，在很大程度上衡量一个制造自动化系统效率和柔性的高低。

2.3.1.1 刀具系统的组成

一个典型的，具有自动刀具供给系统的 MAS 刀具系统硬设备组成示意图如图 2-76 所示。现分别予以说明：

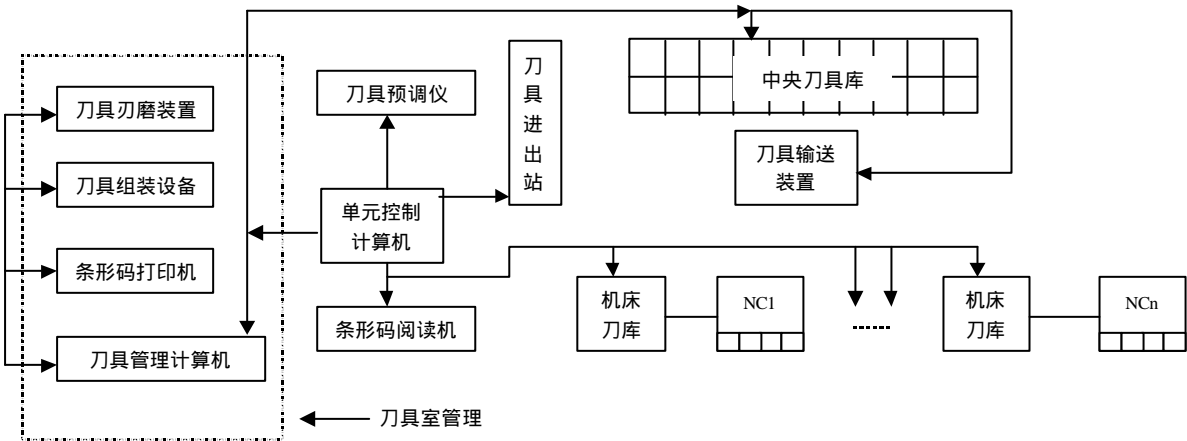


图 2-76 刀具管理系统设备构成

- 1. 系统内(包括刀具室)所有刀具，是被管理的对象。一般来说，一把可直接用于切削加工的刀具由多个刀具构件元素(如刀柄、刀杆、刀片、夹紧元件等)组成。
  - 2. 加工中心上的局部刀库(机床刀库)
- 目前有两种基本形式的机床刀库：

(1) 固定式

(2) 可换式 固定式刀库能够装、卸单把刀具，但是整个刀库不能从机床上移开，这种型式刀库的容量可设计成较大(例如 60 把)。可换式刀库可以从机床上移开，并用另一个装有刀具的刀库替换。这类刀库的容量一般比固定式刀库要小(例如 25 把刀具)。可换式刀库在广泛应用之前还有待克服一些技术障碍。目前最常使用的还是固定式刀库。

在一般情况下，加工中心上的刀具库(这里称为局部刀库或机床刀库)用来装载当前加工所需的刀具。它的刀具配置是根据当前机床的加工零件、加工负荷等状态进行管理调度实现的。机床按被加工工件的要求，可以直接通过刀具输送装置从刀具室、中央刀库或其它加工中心的局部刀库调取所需要的刀具。在实际加工过程中，机床可一边加工，一边往自己的刀库调用要求的刀具。

3. 中央刀库 中央刀库用于贮存 MAS 加工工件所需的各种刀具及备用刀具。将中央刀库通过刀具自动输送装置与机床刀库连接起来，就可形式自动刀具供给系统(或称刀具流系统)。通过建立中央刀库，不但可提供后续零件加工刀具，而且可以周转和协调各机床刀库的刀具，使刀具的使用效率大大提高。当从一个加工任务转换到另一个加工任务时，计算机可以直接在中央刀库中组织新任务加工所用的刀具组，并通过输送装置送到各机床刀库中去，这就极大地加强了系统对多品种零件的应变能力。

4. 刀具进出站 刀具进出站是人与 MAS 自动刀具输送系统之间的界面。刀具进出站有多个存放刀具的刀位，每个刀位设有监控开关。新刀具由此进入系统；磨损、破损的刀具由此输出。

5. 刀具输送装置和刀具交换机构 在整个 MAS 中，各加工中心并不是完全独立的。为了合理地使用与周转刀具，就要在机床的局部刀具库和中央刀具库，机床局部刀具库与其它机床的局部刀具库，中央刀具库和刀具进出站之间进行刀具交换。因此，要实现刀具的交换就必须有相应的刀具输送装置和刀具交换机构。

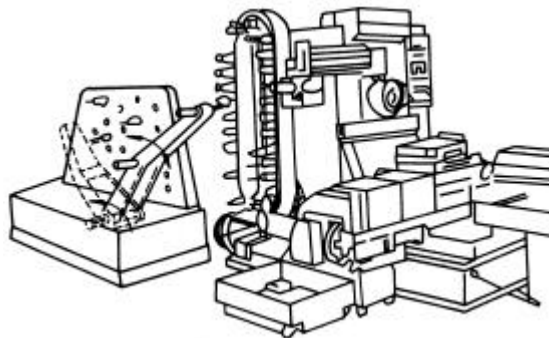


图 2-77 无轨车刀具运送装置

刀具的自动输送，象工件一样可以用带有刀具托架的有轨小车或无轨小车装置来实现。刀具机器人，高架有轨式输送系统也是常见的刀具输送装置。不同的是，刀具小车可装载一组刀具，并需在小车上及每台机床旁设置专门的刀具交换机构实现机床刀库的刀具与小车上刀具的交换。而刀具机器人则每次只运载一把刀具，由刀具机器人实现取刀、运刀、放刀等顺序动作。图 2-77 是一个典型的带有刀具托架的无轨小车输送装置。

在已开发的 MAS 中，有的采用零件搬运与刀具搬运共用运输小车，这样可节省制造费用，但 MAS 调度处理较困难，有时还会降低系统的效率。

刀具的输送路线主要有直线型和环型两种形式，如图 2-78 所示。为了避免与工件的输送路线发生干涉，要求刀具运输路线与工件运输路线分开。



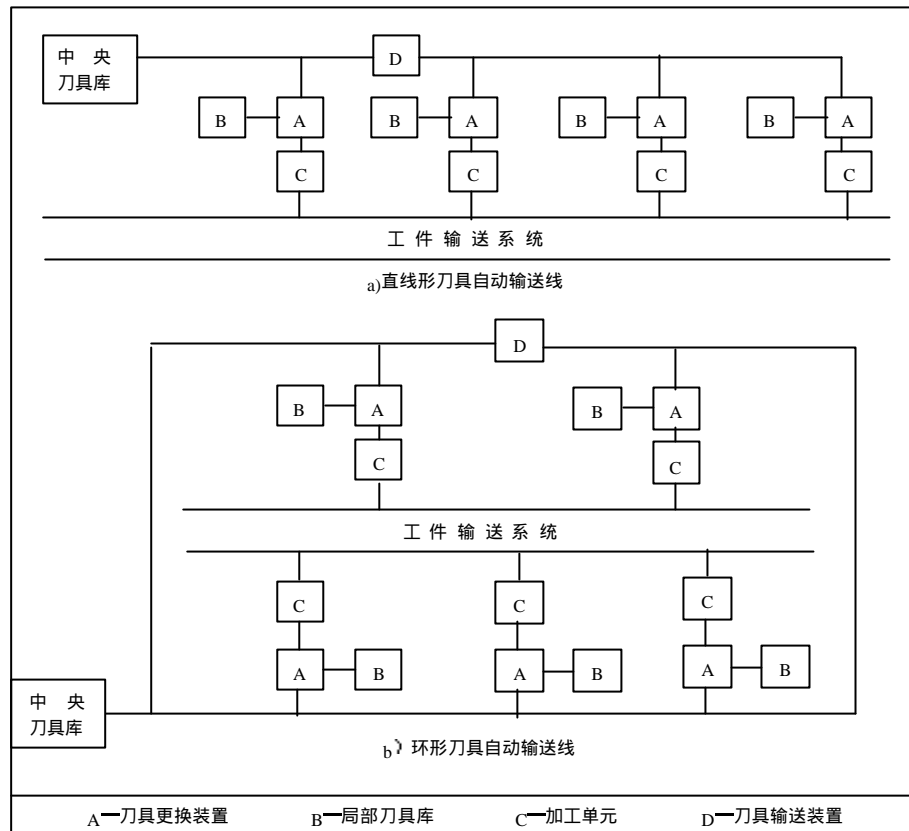


图 2-78 刀具输送线路布局

6. 刀具预调仪(又称对刀仪)是 MAS 刀具管理的重要设备之一。在一批新的零件开始加工之前, 可能需要组装一批新刀具。刀具预调仪用来对组装好的刀具进行预调(对刀), 所测得的刀具尺寸通过通讯接口, 在刀具数据库中记录下来。MAS 运行过程中, 每当机床刀库装上一把刀, 计算机就把相应的刀具补偿程序送至机床控制器。

7. 条形码阅读、打印机 每个组装好的新刀具都可以按照一定的编码系统进行编码。条形码打印机对给定的码打印出条形码标签。条形码标签粘贴在刀柄上便可用于在系统标识刀具。新刀具进入系统前通过条形码阅读机将条形码转化为计算机可识别的刀具 T 代码(即类型码)及刀具识别码, 这样计算机便可通过管理刀具编码来跟踪每把刀具的实际使用情况。由于条形码标签防油污等性能较差, 国外已开始用磁性码代替条形码。磁性芯片镶嵌在刀柄上, 已达 32 字节的存贮量, 可用于贮存刀具 T 代码, 刀具尺寸, 刀具寿命, 刀具推力或功率界限, 刀具补偿值等。通过专用读写装置, 能对刀具信息方便地进行读写。

8. 刀具破损监测系统是整个 MAS 刀具系统的重要组成部分。在金属切削过程中, 由于刀具的磨损和破损未能及时地发现, 将导致切削过程的中断、引起工件的报废、机床损坏、甚至使整个 MAS 停止运行, 造成很大的经济损失。因此, 正确地监测刀具在机床中的实际运行状态, 是使整个 MAS 的生产率提高及 MAS 进行无人化运行的十分重要的技术之一。

在加工中心及柔性制造系统中常见的监测刀具破损的方法有: 声发射监测法、切削力变化监测法(江麓机械厂引进西德 WENER 公司的 FMS 即用此法监测刀具破损)、电机功耗监测法、激光检测法(联邦德国西门子公司研制的 FMS20-32 就是用激光法监测刀具破损)。目前国内外在这方面开展了众多研究, 但由于各刀具破损监测方法都不十分成熟, 因此真正很好地用于生产的还不多。目前国外有些厂家生产的加工中心上已配有一些刀具监测系统。

9. 刀具管理计算机 刀具管理计算机是 MAS 中刀具管理系统的核心, 一个刀具系统要由计算机来全面调度和控制. 根据实际情况, 可选择利用 MAS 主控计算机(单元计算机或称中央计算机)、也可选择利用加工工作站计算机, 还可设立专门的刀具工作站(计算机)。

### 2.3.1.2 刀具系统的设计原则

#### 1. 数控机床对刀具的主要要求

数控机床对所用的刀具有许多性能上的要求, 只有达到这些要求才能使数控机床真正发挥效率。

(1) 刀具的切削性能 为了提高生产率, 现代数控机床正向着高速、高刚性和大功率方向发展。如中等规格的加工中心, 其主轴转达到 5000-10000R/MIN。有人预计到 2000 年硬质合金刀具车削和铣削低碳钢的最高线速度将由现在的 300-400M/MIN, 提高到 500-800M/MIN, 陶瓷刀具切削灰铸铁的切削速度将由现在的 600-800M/MIN 提高到 1000-1500M/MIN。因此, 现代刀具必须具有能够承受高速切削和强力切削的性能。一些工业国家在数控机床上使用涂层硬质合金刀具, 超硬刀具和陶瓷刀具所占的比例不断增加。据报导, 在美国数控机床陶瓷刀具应用的比例已达 20%, 涂层硬质合金刀具已达 80%。除此之外, 在数控机床上为了保证产品质量, 对刀具实行强迫换刀或由数控系统对刀具寿命进行管理。所以, 刀具的工作可靠性已上升为选择刀具的关键指标。所有数控机床上所用的刀具不但其切削性能要好, 而且一定要性能稳定, 同一批刀具在切削性能和刀具寿命方面不得有较大差异。

(2) 要有较高的精度 随着数控机床, 柔性制造系统的发展, 要求刀具能实现快速和自动换刀。所加工的零件日益复杂和精密, 这就要求刀具必须具备高的形状精度。镗铣类加工中心的工具锥柄为 7: 24, 选用 AT<sub>4</sub> 级精度(圆锥角公差 10"~13"),

这实际上已是一般锥度量规的精度了。数控机床上所选用的可转位刀片, 一般要用 M 级精度的刀片。装可转位刀片的刀体加工精度也要相应地提高。国外研制的用于数控车床不需要预调的精化刀具(QUALIFIED TOOL), 其刀尖的位置精度要求很高, 如图 2-79 所示。对数控机床上所用的整体式刀具也提出了较高的精度要求, 有些立铣刀其径向尺寸精度高达  $5\mu\text{m}$ , 以满足精密零件的加工需要。

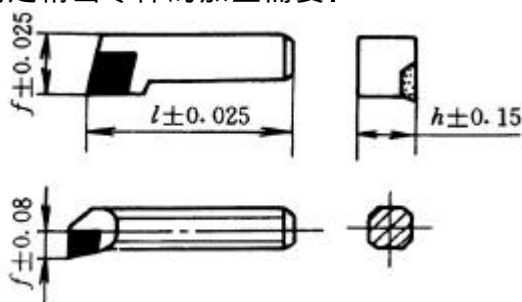


图 2-79 精化刀具

(3) 要求刀具、刀片的品种规格多 由于在数控机床上加工的零件本身就比较复杂, 在自动加工过程中, 对切削控制的要求也比较高, 再加上为了最大限度地发挥这些昂贵设备的利用率, 要求发展多种复合式刀具, 就使得刀具的品种, 规格非常多。据 1988 年 8-10 月进行的一次全国性调查, 国内数控机床上所使用的刀具达 900 多种规格, 可转位刀片达 1500 个规格。原来普通机床的刀具生产、供应体制在短时间之内就无法满足数控机床对刀具品种、规格的要求。

(4) 要求有一个比较完善的工具系统, 以适应多品种工件的加工 近年来发展起来的模块式工具系统能更好地适应多品种零件的生产, 且有利于工具的生产、使用和

管理，能有效地减少使用厂的工具备备。配备完善、先进的工具系统是用好数控机床的重要一环。

2. 镗铣类加工中心用刀具刀柄部件设计原则

MC 用刀具的刀柄由刀具柄部，刀具装夹部和各种刀具等组成。本节重点介绍刀具柄部和刀具装夹部。

(1) 刀具柄部 在 MC 上一般都采用 7：24 刀具圆锥柄。这是因为这种锥柄不自锁，换刀比较方便，并且与直柄相比有高的定心精度和高的刚性。

对于有自动换刀机构的镗铣类加工中心，在整个加工过程中，主轴上的刀具要频繁地更换。为了达到较高的换刀精度，这种刀具柄部必须要有较高的制造精度。锥柄的尺寸精度为 AT4 级。目前，这种刀具的锥柄部分及机械手抓拿部分都已标准化，ISO7388/I 和 GB10944--89《自动换刀机床用 7：24 圆锥柄部 40、45 和 50 号圆锥柄》对此作了统一的规定，见表 2-11。固定在锥柄尾部且与主轴内拉紧机构相适应的拉钉也已标准化，ISO7388 和 GB10945--89《自动换刀机床用 7：24 圆锥工具柄部 40、45 和 50 号圆锥柄用拉钉》对此作了统一的规定。标准中拉钉分为 A 型和 B 型两种，分别见表 2-12 和表 2-13。选用哪种形式的拉钉要依机床主轴的拉紧机构尺寸来确定。

表 2-11 柄部尺寸 (mm)

柄部 型号	锥体			螺纹孔							凸缘			
	D1	11 0 -0.3	R 0 -0.5	12 min	13 min	14 +0.5 0	D1 H7	D2 max	g 6H	R1 0 -0.5	D4 0 -0.5	D5 0 -0.1	X +0.15 0	Y ± 0.1
40	44.45	68.40	1.20	32	43	8.20	17	19.0	M16	1	56.25	63.55		
45	57.15	82.70	2.00	40	53	10.0	21	23.4	M20	1.2	75.25	82.55	3.75	3.20
50	69.85	101.75	2.50	47	62	11.5	25	28.0	M24	1.5	91.25	97.50		
柄部 型号	凸缘													
	f	u 0 -0.1	F ± 0.1	t 0 -0.4	t1 0 -0.4	j 0 -0.4	w	b H12	R2 0 -0.5	D 3 0 -0.5		D6 ± 0.05	e min	
										一般	特殊			
40	15.9	19.1	11.1	22.8	25.0	18.5	0.12	16.1	1	44.7	50	72.30	35	
45				29.1	31.3	24.0	0.12	19.3		57.4	63	91.35		
50				35.5	37.7	30.0	0.20	25.7		70.1	80	107.25		

表 2-12 A 型拉钉尺寸 (mm)

拉钉型号	d1 0 -0.1	d2 0 -0.1	d3 0 -0.2	d4 h6	d5 g6	d6 +0.1 0	11
LDA-40	19	14	23	17	M16	7	54
LDA-45	23	17	30	21	M20	9.5	65
LDA-50	28	21	36	25	M24	11.5	74
拉钉型号	12 ± 0.1	13 ± 0.1	14	15	R	s 0 -0.33	c
LDA-40	26	20	7	4	3	19	2
LDA-45	30	23	8	5	4	24	2.5
LDA-50	34	25	10	5	5	30	3

表 2-13 b 型拉钉尺寸 (mm)

11	d1 0 -0.3	D2 0 -0.3	d3 0 -0.2	d4 h6	d5 g6	d6 +0.1 0	R 0 -0.5	C
----	-----------------	-----------------	-----------------	----------	----------	-----------------	----------------	---

LDA-40	18.95	12.95	23	17	M16	7.35	2.65	2
LDA-45	24.05	16.30	30	21	M20	9.25	2.65	2.5
LDA-50	29.10	19.60	36	25	M24	11.55	2.65	3
拉钉型号	11	12 0 -0.3	13 0 -0.3	14	15 0 -0.5	16 0 -0.5	S 0 -0.33	
LDA-40	44.5	16.40	11.15	7	3.25	1.75	19	
LDA-45	56.0	20.95	14.85	8	4.25	2.25	24	
LDA-50	65.5	25.55	17.95	10	5.25	2.75	30	

(2) 与刀具柄部相连的刀具装夹部分 由于在镗铣加工中心上要适应多种零件不同部位的加工，故刀具装夹部分的结构、形式、尺寸也是多种多样的。把通用性较强的几种刀具装夹刀具(如装夹铣刀、镗刀、扩铰刀、钻头和丝锥等)系列化、标准化就成为通常所说的工具系统。镗铣工具系统可分为整体式结构与模块式结构两大类。整体式结构的镗铣类工具系统(简称 TSG 系统)中每把刀具的柄部与夹持刀具的工作部分连成一体。不同品种和规格的工作部分都必须加工出一个与机床相连接的柄部。这样使刀具的规格、品种繁多，给生产、使用和管理带来诸多不便。属于这种类型的工具系统有日本的 TMT 系统，我国的 TSG82 系统等。

为了克服整体式工具系统的弱点，80 年代以来，国外(主要是德国和瑞典)相继开发了多种多样的模块式工具系统。模块式工具系统就是把工具的柄部和工作部分分割开来制成各种系列化的模块，然后经过不同规格的中间模块，组成一套不同用途、不同规格的模块式工具。这样，既方便了制造，也方便了使用和管理，大大减少了用户的工具储备。目前，世界上出现的工具系统不下几十种。它们之间的区别主要在于模块之间的定心方式和锁紧方式不同。属于这种类型的工具系统主要有：德国 WALTER 公司的 NOVEX 工具系统，KOMET 公司的 ABS 工具系统，HERTEL 公司的 MC 工具系统，KRUPP 公司的 WIDAFLEX 工具系统以及瑞典 SANDVIK 公司的 VARILOCK 工具系统

我国在“七五”期间，参照 NOVEX 工具系统开发了国内的 TMG10 工具系统(国产镗铣类模块式工具系统名称、型号编制规则详见 JB/GQ5065)和参照 ABS 工具系统开发了国内的 TMG21 工具系统以及其它的模块式工具系统，以满足国内数控机床的配套及国产化需要。

国内镗铣类工具系统的生产、开发情况是，国内镗铣类工具系统从 1973 年开始生产，以整体式 TSG 工具系统为主。生产厂有：上海机床附件一厂、广州工具厂、天津机床附件厂、白城机床配件总厂和威海精密机床附件厂等。这几个厂家可以根据用户的要求，按不同的柄部标准为主机配套工具系统。此外，上海机床附件一厂和广州工具厂在“七五”期间还开发了几种模块式工具系统。哈尔滨量具刃具厂和成都量具刃具厂也成功研制了一些模块式工具系统产品。

3. 对刀仪及刀具进出站 将采购来的标准刀具和为某些工序特殊需要而设计制造的专用刀具送入 MAS 之前，要进行一系列的准备工作。其中包括应当先在对刀仪上测出其主要参数，装上刀套，安装好刀具磁卡或贴好条形码标签，然后将预调好的刀具装到刀具进出站的适当位置上，准备进入中央刀库。同时将该刀具的刀号，对刀仪测得各个几何参数、刀套和刀柄有关参数、刀具寿命等输入刀具工作站计算机，以备建立刀具信息库。在选用对刀仪时，一般要考虑所使用的刀具是否与对刀仪相匹配。如某些刀具需要接触式对刀仪，有些刀具则只能采用非接触式对刀仪。另外还需考虑对刀精度和通信接口问题。常见的对刀仪产品有：机械检测对刀仪、光屏检测对刀仪和综合对刀仪。

刀具进出站是刀具进入 MAS 的门户。其结构形式多为框架式，是一个专用的刀具挂架。刀具进出站的设计，应考虑工作人员装卸刀具和换刀机器人的操作方便，还要考虑结构简单、制造容易、维修方便、安全可靠、易于操作和经济实用。通常，工作人员在刀具进出站前一边工作，换刀机器人在另一边进行换刀。为了确保人身安全可采用如下结构：

将刀具挂架设计成整体旋转式。整个刀具挂架可以绕垂直轴按一固定方向旋转 180°。转至面向工作人员时由工人装刀或取刀。旋转至面向换刀机器人时，由换刀机器人换刀。挂刀框架的旋转，可以是自动的，也可以由人工操作完成。

刀具在挂刀框架上多垂直放置，这样方便换刀机器人的换刀。但也有水平置的，这要看总体设计的情况而定。

一般情况还需考虑在刀具进出站上设置两种指示灯和传感器。人工装刀时，将挂刀架转向操作者。操作者将对刀仪上已对刀的刀具放入挂刀架上。传感器接受到刀具进站的信号，经通信线路输入主控机。同时指示“有刀具进站”的指示灯亮。当挂架转至机器人方向，主控计算机下达换刀指令，换刀机器人将刀具放入系统的相应位置。

制造自动化系统使用过的刀具，若寿命没到的刀具一般仍留在系统内，需重磨或报废的刀具由换刀机器人送回刀具装卸站。此时“有刀具出站”的指示灯亮。操作者将框架转动后即可取下相应刀具。

刀具进出站在设计时应考虑的指标如下：

- 刀具容量
- 可挂刀具的最大长度
- 可挂刀具的最大直径(考虑是否有占用多挂孔的刀具)
- 可挂刀具的最大重量
- 挂架的垂直度、平行度、旋转精度

4. 刀具输送装置和刀具交换机构 刀具输送装置指换刀机器人或刀具输送小车。按运行方式分为有轨和无轨两种。无轨小车价格昂贵，而有轨小车价格相对较低，且工作可靠性高。因此在实际系统中多采用有轨的换刀装置。有轨换刀机构又分为地面式和空架轨道式两类。空架轨道式结构紧凑、地面利用率高，但技术难度要大一些。日本大阪机工的 FMS 和西德的 Wener-Kolb 公司的 FMS 均采用自动导引刀具输送小车。

空架导轨一般宜采用平行于加工中心和中央刀库的布置，这样便于换刀机器人在加工中心和中央刀库之间移动。为满足换刀机器人能很方便地到达中央刀库的每一个角落，空架导轨一般都比较长。

## 2.3.2 夹具系统

### 2.3.2.1 夹具系统的组成

制造自动化系统的夹具系统主要由三部分组成：

- 机床夹具
- 托盘
- 自动上下料装置

1. 机床夹具 制造自动化系统的机床夹具种类很多。有结构和普通机床相似的可装夹一个零件的夹钳，有复杂的图框式或台架式夹具，可以从几个面让刀具接近零件进行加工。还有可同时装夹两个或多个零件的更大型夹具，这种夹具有利于缩短刀具的更换时间和传送零件的非加工时间。

2. 托盘 在制造自动化系统中，箱体零件通常使用夹具安装。而夹具又安装在托盘上，整个加工过程一般不将零件与托盘分离(即采用“随行夹具”的办法)。托盘的样式多种多样，它是工件与机床的接口。因此同一系统中的所有机床必须接受同一形

式的托盘。若 MAS 中的机床各种各样，那么这些机床就应该适合于相应的合适的标准接口。

3.自动上下料装置 自动上下料装置是完成机床与物料传送设备，物料传送设备与托盘站(或中央立体仓库)之间的工件装卸设备，常见的有托盘交换器(Automatic Pallet Changer，简称 APC)、机器人。机器人的介绍请参阅第三章有关内容。

#### 2.3.2.2 夹具系统的设计原则

##### 1. 机床夹具的设计原则：

(1) 在数控加工中，为了确定加工点的空间位置，必须建立坐标系。工件、机床及位置测量系统都有各自的坐标系，这些坐标系的原点或零点可能是重合的，但一般是不重合的。为实现数控加工必须建立各坐标原点间的坐标联系。

(2) 数控加工批量较小，故应尽可能采用标准化的通用夹具或组合夹具系统

(3) 为满足数控加工精度，要求夹具的定位、夹紧精度高。

(4) 夹具的结构应使工件在一次装夹后，能进行多个表面的多种加工。

(5) 夹紧件应牢靠，其位置应注意防止在进退刀或变换工位时发生碰撞。

(6) 自动让刀夹紧装置的设计，应保证其动作的准确可靠以及与刀具运动轨迹的协调。

夹具的选择取决于 MAS 中的多种因素。首先必须制定基本的加工计划，确定加工工艺，以便估计所需夹具的数量。再根据加工循环时间，模拟作业进度安排，决定每个托盘上的零件数和每次加工安装所需要的接近部位。值得说明的是，为了最好地利用 MAS，要对上述过程反复进行，以确定出最佳的加工方案。另外，还要考虑复式夹具对工件精度的影响。昂贵的图框式夹具允许一个零件上的所有加工在一次装夹后全部完成，这比按顺序在许多廉价夹具上加工要好得多，在后一种情况下，公差可能会累积起来，甚至造成废品。

夹具的类型主要根据零件类型而确定。被加工零件通常分为两类，一是回转形零件，二是棱柱体零件。回转型零件通常由棒料加工而成，而棱形零件的毛坯多为锻件和铸件。棱形零件的安装一般要使用夹具，在设计夹具时就要认真考虑其零件的形状。

为了夹持棱形工件以便加工，通常要使用质量好且坚固的带有直角的夹具。图框式(picture-frame)夹具，常用于对中型尺寸铸件或锻件的定位及夹紧，这些铸锻件沿各个方向都有尺寸要求。工件要与夹具配合安装，通过托盘的分度能够方便地实现工件前后两面的加工，而且工件侧面的轮廓加工也常常可以实现。

另一种常见的直角形夹具可定义为“柱式”夹具(或“墩式”夹具，pillar)。柱式夹具将工件夹在侧面，每次可装夹两个以上的工件，装夹的数量取决于工件尺寸与立柱尺寸的相对比值。在这种情况下，工件所能加工的量的大小仅仅受到刀具可接近的限制。这类夹具都能较长期地安装在其托盘上，以保持其成批零件安装定位的一致性。如果零件较小，一般使用具有正方形截面的柱式夹具，工件可以安装到所有四个面上，有时还可以安装在顶部。

上述这种在单一夹具上安装许多零件的方法具有重要的经济意义。其一就是提高了机床的利用率，这是所有制造效率的基础。它只简单地使机床坐标轴沿横向坐标运动或让托盘分度 90°即可，这比更换托盘所花的时间少得多。研究者们还可通过使换刀数达到最小的办法，来进一步减少这种多工件夹具的空闲时间。

多工件夹具的使用进一步为延长每个夹具的加工循环时间带来了益处，这减少了系统所需的夹具和托盘的数量，节约了大量的成本，夹具搬运的总量以及对于工件搬运系统的要求都减少了，这也使得工件搬运系统的成本和运行成本等都得到了节省。因此，只要有可能，就应当使用多工件夹具。但是，多工件夹具使用所带来的主要问题是增加了机加工编程的复杂性。

MAS 中所需的夹具和托盘的数量取决于许多因素, 诸如工件的循环时间、装/卸料循环时间、工件搬运系统的类型和速度、机床数量以及系统的调度等。在某种意义上来说, 夹具可看作一种昂贵的附加物, 如果可以直接将工件夹紧在托盘上, 必然会节省大量的钱, 但由于这是不可能的, 不实际的, 所以就必须通过仔细的设计和多功能夹具(复合式夹具)的使用来使夹具数目最少。

上述所谈的夹具多是加工箱体形零件采用的夹具。对于回转形零件, 由于中小尺寸的回转体零件常在车床上加工, 因此使用车床所提供的夹具即可。车床上加工时, 常采用卡盘夹具, 或是卡盘与尾顶尖相配合。车床加工零件的上下料, 常常使用工业机器人来直接抓取。

2. 托盘设计的原则 MAS 中用于承载随行夹具的托盘设计时通常遵循如下原则:

- (1) 根据每天的班次及生产能力, 设计足够的托盘数(数量太多占用资金, 太少了又会影响生产率)。
- (2) 要使用稳定的材料和合理的机械结构, 以保证刚度和长期使用。
- (3) 在加工循环中, 必须不因任何理由而要求人工干预。
- (4) 具有最少的零件安装次数, 可靠的零件定位以及快速动作夹紧等特点, 如液压、气动、机械夹紧或应用气动工具、螺母机动拧紧工具等, 这些工具应具有所要求的可靠定扭矩机构。
- (5) 使用过程中, 能与专用托盘输送装置高效连接。
- (6) 当托盘/夹具固定到机床的支承座上时, 精度要满足系统加工过程的要求。
- (7) 在加工中经常出现的各种条件(如切削热、湿气、振动、雾气、灰尘和冷却液等)下, 夹具应能可靠地工作。
- (8) 在零件定位、夹紧、排出切屑和振动时, 零件的精度和已加工表面(包括以前加工的和正在加工的), 不应受到有害的影响。
- (9) 合适的升降装置应是每个托盘/夹具结构整体的一个组成部分。
- (10) 托盘/夹具应进行编码, 以便在零件装夹及加工程序分配时保证不出差错。

托盘一般都是带有大倒角的棱角和 T 型槽以及用于夹具定位和夹紧的凸榫的正方形部件, 通常具有一个相当大的截面, 所以即使较小的托盘也重约 100kg。有的托盘底面为平面, 以便滑入到机床的适当位置。在定位夹紧前, 一般先在锥形(即楔形)定位器上定位, 并用空气流把所有的定位表面吹干净。虽然正方形的托盘最常用, 然而较大型的加工中心(即大于 800mm<sup>3</sup> 的)常常也具有长方形的工作台, 这是因为大型零件往往会沿某一方向具有较大的尺寸。日本和德国都有正方形托盘和长方形托盘的标准, 其中的许多细节内容都是相同的。

Giddings and Lewis 系统的托盘在 1979 年曾是较大的, 为 4267mm×1524mm, 在欧洲, Caterpillar Tractor 曾使用了 3500mm×2500mm 的托盘。Aurora 的托盘重 20t, 该托盘带有轮子, 可直接装在地面上, 并沿着长方形的轨道转动。工作在立柱式加工中心上加工。

有些小系统中也使用带轮的托盘, 这种布置在自动线里最常见。它们可以安装在转轴上, 使托盘绕长方形轨道运动, 而不必使用转台。有个别系统也使用圆形托盘。

3. 自动上下料装置的设计 自动上下料装置常见的有托盘交换器与机器人(见第三章), 是加工设备与物料输送装置的桥梁和接口。其中托盘交换器的形式有回转式托盘交换器和往复式托盘交换器两种。

(1) 回转式托盘交换器 回转式托盘交换器通常与分度工作台相似，有两工位、四工位和多工位。多工位的托盘交换器可以贮存若干个工件，所以也称托盘库。两工位回转式托盘交换器如图 2-80 所示，其上有两条平行的导轨供托盘移动导向用，托盘的移动和交换器的回转通常由液压驱动。托盘交换器有两个工作位置，机床加工完毕后，交换器从机床的工作台上移出装有工件的托盘，然后转过  $180^\circ$ ，将装有工件的托盘再送到机床的加工位置。

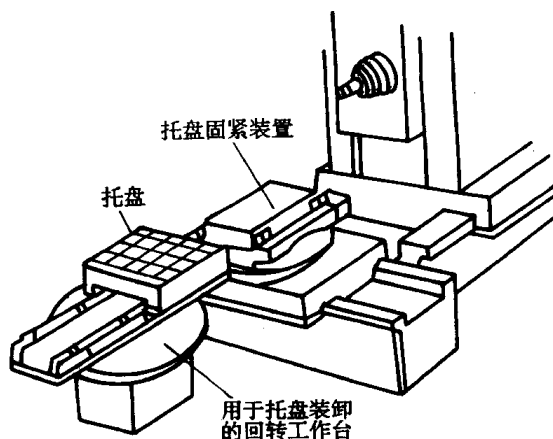


图 2-80 回转式托盘交换器

(2) 往复式托盘交换器 往复式托盘交换器的基本形式是两托盘的交换装置。图 2-81 是多托盘的往复式托盘交换器。机床加工完毕后，工作台横移至卸料位置，将装有加工好工件的托盘移至托盘库的空位上，然后工作台横移至装料位置，托盘交换器再将待加工工件移至工作台上。多托盘位置的交换装置允许在机床前形成不长的排队，起到小型中间贮料库的作用，以补偿随机、非同步生产的节拍差异。图 2-81 所示的交换装置可以贮存五个托盘。由于托盘自动交换器的设置，使工件的装卸时间大幅度缩减。

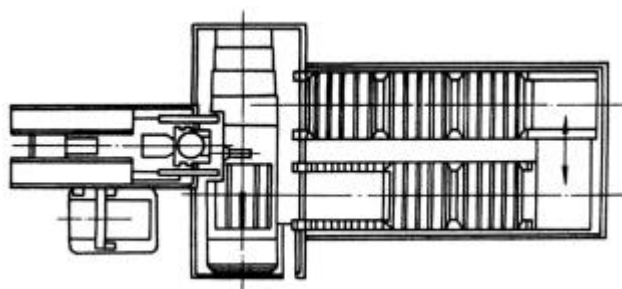


图 2-81 往复式托盘交换器

## 2.4 设备选择与布局

### 2.4.1 设备的选择

制造设备的选择是一个综合决策问题。其制造设备选择的基本思想是质量、时间、柔性和成本作为优化目标统筹兼顾，综合考虑，而将环境性作为约束条件，进行多目标优化。具体考虑如下：

1. 质量 在选择设备时所涉及的质量是一种广义的质量。它包括①制造的产品满足用户期望值的程度，②设备使用者对设备功能的基本要求，可以称这种要求为功能要求。

针对质量的两种含义，选择制造设备时，根据制造自动化系统将制造的主导零件族，找出族内每个零件的可行方案集，制造自动化系统的设备可选方案就是每个零件



可被加工的方案并集。

2. 生产率(时间) 根据制造自动化系统的设计产量、利润、市场等因素可以规定其生产率, 在满足质量约束的方案集内, 找出满足生产率约束的方案集。

如果零件族内各个零件的制造时间有先后顺序的相关要求, 一般在这种情况下零件的数量也有一定的比例关系。采用网络规划的方法可得出该制造系统的生产率; 如果族内的各个零件没有时间上的相关关系, 则以每年或每月的产量来决定生产率, 将每类零件在这段时间内所需的加工时间相加, 就是该制造系统的时间约束条件; 如果族内既有时间相关的零件又有时间不相关的零件, 则可按时间的相关与否将各零件分组, 使时间相关的零件分在一组; 组与组之间在时间上不相关。组内零件按决策网络的方法决定其时间约束。根据各组零件的计划数量和时间约束, 确定该制造系统的时间约束。

3. 柔性 在制造自动化系统决策过程中, 必须以适当的量化形式来描述柔性。描述系统柔性的数量特征有多种数学方法。这里介绍一种用变化惩罚值来度量系统柔性的方法。

当环境条件变化时, 如产品品种改变、技术条件改变、零件制造工艺改变等, 如果系统不需要多大的调整, 不需花费多长时间就可以适应这种变化, 仍然低成本高效率地生产出新的产品, 我们说这种系统柔性好, 反之则柔性差。

柔性差的系统, 在产品或制造工艺稍有变化时, 需要投入大量资金、时间用来调整或改造系统, 为此而付出的代价较大, 甚至投入与产出不平衡。在某种意义上, 可以说系统因此受到了惩罚。可以用变化惩罚值(Penalty of Change 缩写 POC)来度量系统的柔性。系统在适应变化时的 POC 值小, 就表明系统具有较大的柔性; 反之, 这种系统的柔性就较差。

如果我们在规划和设计制造自动化系统时, 赋予该系统适应一系列环境变化的能力, 即系统具有较高级别的柔性, 然而我们设想的一系列环境变化却根本不会发生, 那么, 系统的柔性发挥不了作用, 实际上这是一种极大的浪费。所以, 在作出制造自动化系统的柔性决策时, 不但要考虑变化惩罚, 而且还应该同时考虑变化发生的概率, 这样计算出的量值, 才可能比较真实地反映系统的柔性特征。在此思想的指导下, 我们可以采用下式来广义地定义“变化惩罚值”POC:

$$POC = \text{变化惩罚值} \times \text{变化发生的概率}$$

变化, 是指一种状态向另一种状态的转换。状态的具体内涵取决于所研究的目标。研究产品的柔性时, 状态指的是产品品种; 研究运行柔性时, 状态指的是系统运行状态, 例如, 全部运行状态, 部分运行状态, 连续运行状态, 间断运行状态等; 研究生产能力的柔性时, 状态指的是生产率的高低。

用  $X$  代表可能的变化, 第  $i$  次变化记为  $X_i$ , 假若有三种状态 A,B,C, 变化的可能值就是  $X_1 (A \rightarrow B)$ ,  $X_2 (A \rightarrow C)$ ,  $X_3 (B \rightarrow A)$ ,  $X_4 (B \rightarrow C)$ ,  $X_5 (C \rightarrow A)$ ,  $X_6 (C \rightarrow B)$ 。如果将变化的惩罚和变化发生的概率都看作离散变量  $X$  的函数, 则有:

$$POC = \sum_{i=1}^n P_n(X_i) P_r(X_i)$$

$n$  变化次数;

$X_i$  第  $i$  次变化;

$P_n(X_i)$  第  $i$  次变化的变化惩罚值;

$\Pr(X_i)$  第  $i$  次变化可能发生的概率。

下面举例说明如何利用 POC 估计产品柔性、运行柔性和生产能力柔性。

产品柔性指的是产品转向后，系统利用原有设备，或只变动少量设备就能比较经济和迅速地生产出新产品的能力。现假设两个系统 A 和 B 转向生产产品甲的概率是 70%，生产产品乙的概率是 30%；系统 A 转产甲需投资 200 万元，转产乙需投资 500 万元；而系统 B 需彻底改造才可能适应生产甲和乙，投资均需 800 万元。用离散的 POC 值计算公式可以得到：

$$POC_A = 200 \times 70\% + 500 \times 30\% = 290 \text{ (万元)}$$

$$POC_B = 800 \times 70\% + 800 \times 30\% = 800 \text{ (万元)}$$

$$POC_A < POC_B$$

这说明，系统 A 的产品柔性远比系统 B 的好。

运行柔性反映了系统在不同运行状态下制造产品的能力。运行柔性好的系统在某台机器或辅助设施出现故障时，可以立即改变加工路线，正常生产出产品；而运行柔性差的系统，则会因故障而停止生产，使整个系统停止运行。用系统的平均生产率下降幅度(系统因故障的产生而受到的“惩罚”)和生产率波动发生的概率来衡量运行柔性是比较恰当的。例如，两个制造系统 A 和 B，当有故障产生时，系统 A 的平均生产率下降幅度为 20 件/小时，系统 B 的平均生产率下降幅度为 40 件/小时，不考虑发生这种情况的概率，系统 A 受到的“惩罚”低于系统 B，故系统 A 比系统 B 具有更好的柔性。如果考虑故障发生的概率(即系统运行状态改变的概率)，当 A 系统为 20%，B 系统为 5%时：

$$POC_A = 20 \times 20\% = 4 \text{ (件/小时)}$$

$$POC_B = 40 \times 5\% = 2 \text{ (件/小时)}$$

显然，系统 B 的运行柔性好于系统 A 的。

生产能力柔性反映的是系统适应产品产量变化的能力。例如两个系统 A 和 B 的生产能力变化的概率和受到的惩罚(为适应变化而调整系统所需的投资)为

	100 件/h→115 件/h	100 件/h→150 件/h	100 件/h→200 件/h
	50%	30%	20%
A	0	500 万元	1000 万元
B	50 万元	400 万元	1200 万元

由上表可以计算出

$$POC_A = 0 \times 50\% + 500 \times 30\% + 1000 \times 20\% = 350 \text{ (万元)}$$

$$POC_B = 50 \times 50\% + 400 \times 30\% + 1200 \times 20\% = 385 \text{ (万元)}$$

可以看出，系统 A 的生产能力柔性比系统 B 的略好些。

根据制造自动化系统的实际情况可以选取一种或几种柔性指标作为设备选择的评价参数。综合柔性指标可以采用加权平均方法获得。

#### 4. 成本

在满足以上约束条件的可行方案集内，按成本最低的原则选择设备。

在以下模型中，设

m 工序总数；

n 设备总数；

$X_j$  设备选择变量， $x_j \begin{cases} 1, \text{第} j \text{套设备入选} \\ 0, \text{设备} j \text{被舍去} \end{cases}$

$Y_{ij}$  工序 i 使用设备 j，则  $Y_{ij}=1$ ，否则  $Y_{ij}=0$ ；

$U_j$  设备 j 的总成本(包括购置和使用成本)；

t 设备可利用的最多时间；

$t_j$  在设备 j 上所有工序加工(及运输)时间之和。

不考虑资金的时间价值，有以下数学规划模型。

模型一

该模型使设备购置和使用总费用最小

为确定  $X_j$

$$\textcircled{1} \text{ 设 } X'_j = \sum_{i=1}^m Y_{ij}$$

因不同的工艺方案会获得不同的  $Y_{ij}$  值，所以  $X'_j$  将得到几组变化的值，由：

$$\textcircled{2} \text{ 如果 } X'_j > 0 \text{ 则 } X_j = 1; \text{ 否则 } X_j = 0$$

能得到几组  $X_j$ ，使得：

$$\min f = \sum_{j=1}^n U_j X_j \quad (2-1)$$

约束条件如下：

1) 资源约束

$$\sum_{j=1}^n P_{kj} X_j \leq B_k$$

式中， $P_{kj}$  第 j 种设备耗费 k 种资源的量；

$B_k$  表示第 k 种可用资源的量。

2) 互斥设备约束

$$X_h + X_j \leq 1$$

表示设备 h 和设备 j 只能选一种。

3) 从属设备的约束

$$X_h - X_j \geq 0$$

表示设备 j 只有在设备 h 被接受时才可以入选。

4) 互补约束

$$X_h - X_j = 0$$

表示设备 h 与 j 必须同时入选或同时被舍去，这时可将 h 和 j 看成一个设备。

5) 工作效率约束

$$\sum_{j=1}^m t_j \leq t$$

且  $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m \leq \text{一个常数(生产节拍)}$

即设备负荷尽可能平衡。

6) 其它约束

模型二

考虑收益 费用的关系和资金的时间价值，并使方案在其寿命期内的收益总值最大。

$$\max \left\{ \sum_{t=0}^{J_1} (Z_{t1} - C_{t1})(1+i)^{-t} + \sum_{t=0}^{J_2} (Z_{t2} - C_{t2})(1+i)^{-t} + \Lambda + \sum_{t=0}^{J_n} (Z_{tn} - C_{tn})(1+i)^{-t} \right\} \quad (2-2)$$

$Z_{tn}$  若采用第 n 个设备选择方案在第 t 年所得的总收入；

$C_{tn}$  若采用第 n 个设备选择方案在第 t 年所耗总成本；

i 贴现率；

$J_n$  第 n 个设备选择方案的寿命周期。

模型二仅是从技术经济角度考虑的模型之一，还可以列出其它模型，如最短投资回收期模型，最高效益 费用比模型等。

#### 2.4.2 设备的布局

设备布局可根据主导产品的产量、工艺和车间平面等系统特性来进行。其空间形式有一维和多维布局方式。设备布局优化，除了考虑加快加工运输时间，降低运输成本外，还应考虑有利于信息沟通，平衡设备负荷。这里仅讨论降低运输成本的一种布局模型。

1. 一维布局 假设设备系统由多台设备组成，各设备排列成一条直线，产品为一组零件。定义以下符号：

m 设备种类数；

n 零件个数

j 第 j 台设备的编号；  $j \in (1, 2, \dots, m)$

$C_{ijk}$  零件 i 在设备 j 和 k 之间传送每单位距离的运输成本。

$S(D_j)$  设备 j 的长度；

$d_{kj}$  — 设备 k 和 j 的最小间距；

$X(j)$  — 设备 j 的中心坐标。

单行布局的坐标如图 2-82:

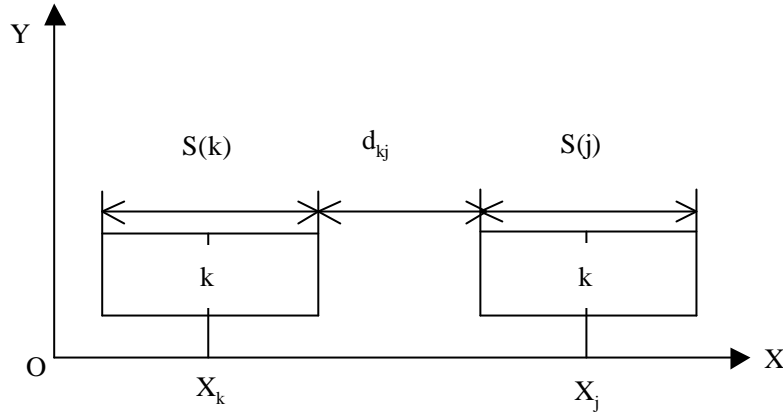


图 2-82 单行布局坐标图

$G_{il}$  — 第  $i$  个零件在第  $l$  个工序的加工设备。如果  $G_{il} = k$ , 即表示第  $i$  个零件的第  $l$  个工序在设备  $k$  上加工; 如果该零件在第  $l$  个工序无操作设备, 令  $q$  为某种工件的最大工序总数, 则  $G_{il} = 0$ 。  $i \in (1, 2, \dots, n)$ ,  $l \in (1, 2, \dots, q)$ 。

零件 工序矩阵

$$[G_{il}] = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \Lambda & G_{1q} \\ G_{21} & G_{22} & \Lambda & G_{2q} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ G_{n1} & G_{n2} & \Lambda & G_{nq} \end{bmatrix}$$

以下模型使运输总成本最低

模型一

令  $G_{il} = Y$ ,  $G_{i(l+1)} = Z$        $Y \in (1, 2, \dots, m)$ ,  $Z \in (1, 2, \dots, m)$

(即第  $i$  工件第  $l$  工序的加工设备选择  $Y$ , 第  $i$  工件第  $l+1$  工序的加工设备选择  $Z$ )  
则:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{q-1} C_{iYZ} |X(Y) - X(Z)| \quad (2-3)$$

$$\text{s.t.} \quad |X(Y) - X(Z)| \geq \frac{(S(Y) + S(Z))}{2} + d_{YZ} \quad (2-4)$$

$$E - X(Z) \geq \frac{S(Z)}{2} \quad (2-5)$$

$$X(Y) \geq \frac{S(Y)}{2} \quad (2-6)$$

式中  $E$  为: 布局允许范围的最大坐标值。

约束(2-4)保证设备有足够的间距, (2-5)、(2-6)是保证设备布置在 0 至  $E$  之间。

## 2. 二维布局

二维空间中设备可以布置成行式排列或非行式排列。以下所用符号的定义同一维排列。二维空间坐标如图 2-83 所示, 其中  $d_{xkj}$ 、 $d_{yjk}$  分别为设备  $k$ 、 $j$  在  $X$  方向和  $Y$  方向的间距,  $S(k)$ 、 $L(k)$  分别为设备  $k$  在  $X$  方向和  $Y$  方向的宽度。

设: 零件  $i$  在第  $l$  个工序和第  $l+1$  个工序之间的运输距离为:  $\eta_{il}$

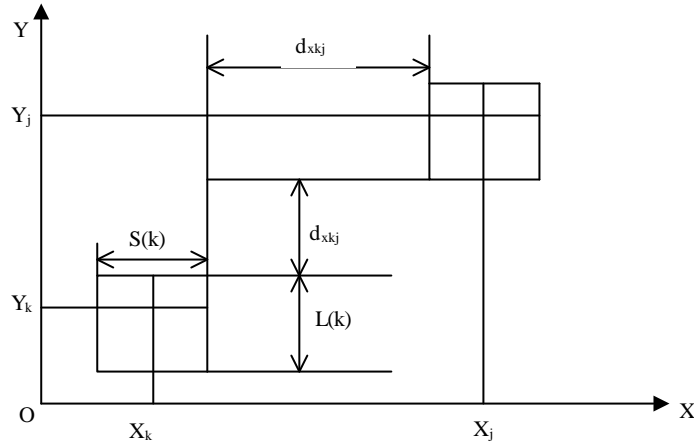


图 2-83 二维空间坐标示意图

于是有模型二

$$\text{令 } G_{il} = F, G_{i(l+1)} = T \quad F \in (1, 2, \dots, m), T \in (1, 2, \dots, m)$$

(即第  $i$  工件第  $l$  工序的加工设备选择  $F$ , 第  $i$  工件第  $l+1$  工序的加工设备选择  $T$ )  
则有:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{q-1} C_{iFT} h_{il} \quad (2-10)$$

约束条件包括:

1) 间距约束

$$\begin{aligned} |X(F) - X(T)| &\geq \frac{(S(F) + S(T))}{2} + d_{xFT} \\ |Y(F) - Y(T)| &\geq \frac{(L(F) + L(T))}{2} + d_{yFT} \end{aligned} \quad (2-11)$$

2) 边界约束

设车间可供布置的平面在  $X$  方向长为  $h$ , 在  $Y$  方向宽为  $v$ , 则有约束:

$$\begin{aligned} |x(F) - x(T)| + \frac{(S(F) + S(T))}{2} &\leq h \\ |y(F) - y(T)| + \frac{(L(F) + L(T))}{2} &\leq v \end{aligned}$$

3) 其他约束

如果要求每行设备的中心点连成直线, 则当

$$|X(F) - X(T)| \leq \Delta - \frac{(S(F) + S(T))}{2} \text{ 时}$$

$\Delta$  为设定的该行的长度。

令:  $y(F) = y(T)$  (按行排列的约束, 如果不需要按行排列, 可以不要此约束条件)

非负约束:  $x(F), y(T) \geq 0$

模型一和二可用非线性规划的方法求解，但对较多设备的布局问题求解时，会遇到占内存过大和计算时间长的问题。另外，所得的解不一定是全局最优解。于是各种各样的算法应运而生，如结构算法、改良算法、混合算法、图论算法等。求解非线性规划问题的方法，请参阅有关文献，本文不作专门讨论。