

数控机床控制机 (讲座)

前 言

航空的工业特点是产品的批量小，品种变化快，零件结构形状比较复杂，这样给生产带来许多问题。为了提高产品质量，提高生产效率，缩短生产周期以适应我国政治外交经济急条战线发展的需要，采用数控技术是解决航空工业生产问题的一个很好途径。

为了在航空工业中推广数控技术，今年二月曾在沈阳地区，厂校结合举办过一期“数控机床控制机普及讲座”，由几个同志参加了这项工作并分头执笔编写了讲义。由于我们水平不高，经验不足，特别是这份讲义是分头执笔，在语调和叙述方法上都存在一定缺点。出版时又因时间短促来不及作较大修改和补充，差错一定不少，热忱欢迎同志们批评指正。

	控制的基本概念	- <1>
	控制系统有关的一些基本逻辑电路简介	- <17>
第三讲	运算电路简介	- <43>
第四讲	数控车床的点位控制系统	- <67>
第五讲	反馈检测元件介绍	- <93>
第六讲	连续轮廓数控系统	- <107>
第七讲	数控系统中的伺服机构简介	- <129>
第八讲	程序编制	- <141>

第一讲 机床数字程序控制的基本概念

§ 1-1 为什么要发展数控机床

一、什么是数控机床

数控机床与大家熟悉的C620普通车床和X52普通铣床不同，这些普通机床都需要人直接操纵（所谓操纵是指开车、停车、改变主轴转速、改变走刀速度以及开关冷却液……），而数控机床在加工产品时不需要人对它进行操纵。

数控机床与一般的自动车床、靠模铣床等也不一样，自动车床和靠模铣床在加工时虽然不需要人对它进行操纵，但是这些机床的动作（走刀量、行程、刀具运动轨迹……）是受凸轮靠模挡块等装置控制的！我们把凸轮、靠模、挡块等称为程序装置），当更换加工对象时，就需要重新设计制造凸轮、靠模、并重新调整机床，而数控机床上没有采用凸轮，也不用靠模。

数控机床的外形在下面图中可以看到，图1-1是数控车床。图1-2为数控铣床。

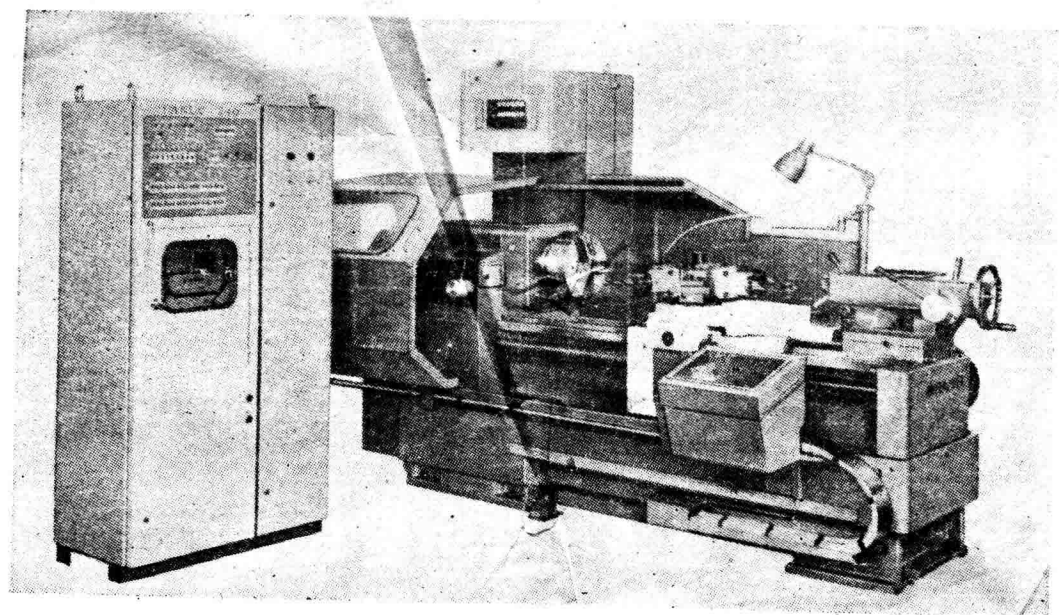


图 1-1

从外观上看，数控机床与其它机床有一个显著的不同点：即除机床外还有一个通常称之为控制机的控制柜。若控制机坏了，机床就开不动了，可见控制机是数控机床的一个重要的组成部分。

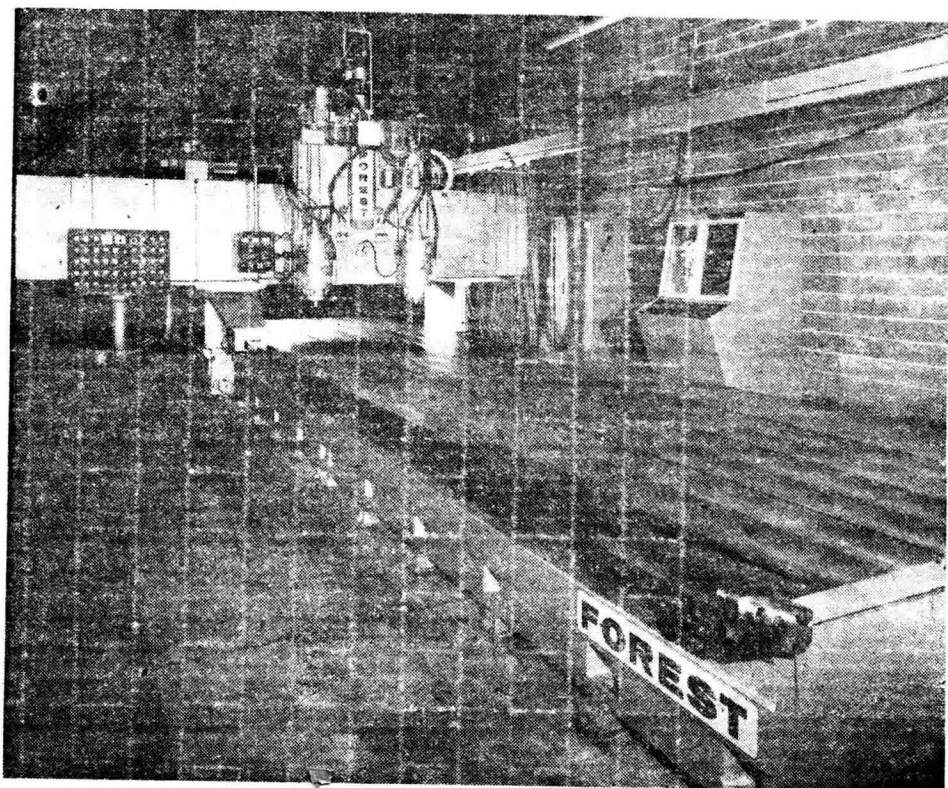


图 1-2

控制机是数字程序控制计标机的简称。它是数控机床的核心部分。加工时，机床的各种运动（工作台的纵向、横向移动，主轴头的上、下移动，工作台绕某一轴的转动，改变进给速度，开车、停车……）都是由数字程序控制计标机控制的。

下面我们从理解数字程序控制计标机字面的含义开始，看看控制机究竟有那些功能。

大家都知道数字计标机（也称为电子数字计标机或电子计标机）有两个特征：一是它有“计标能力”，能完成各种复杂的算术运算，所以叫计标机；另一个它只能对数字量进行运算，计标

的结果也是数字量。

而数字量又是什么意思呢？数字量是相对模拟量而言的。模拟量是指连续变化的物理量，如温度、压力、电压、位移等等。生产中遇到的物理量大多是模拟量。模拟量的特点是具有连续性，不但随时间的变化是连续的，而且它的数值的变化也是连续的。数字量的特点是不连续，它只能增加一个单位或减少一个单位。

什么是“程序”？所谓“程序”在我们这里指的就是机床各部分动作的先后次序。因此所谓“程序控制”就是指对机床各部分动作的先后次序进行控制。

由此可以知道数字程序控制计算机（简称控制机）就是对机床各部分动作进行控制的专用计算机。

有了控制机就能让机床动作了吗？不能。要想使数控机床工作还必须给它输入信号（数字量），也就是说要把控制程序“告诉”给控制机。怎么“告诉”呢？直接对控制机讲“工作台X方向先走100毫米，Y方向再走200毫米”行不行？当然不行，控制机听不懂我们的话。必须使用控制机“能听懂的语言”把我们对机床各部分动作的要求“告诉”给控制机。（具体地讲，是将机床各运动部件的移动量、速度以及动作的先后次序等等，以一定的数码形式，预先打在穿孔带上，控制机借助读数机来了解我们对机床各种动作的要求。

把加工图纸上图形的几何形状、尺寸以及加工的顺序，变成控制机所能“听得懂”、“看得懂”的穿孔带，这一过程就是程序编制。

有了穿孔带，控制机是否就能控制机床按照穿孔带上规定的要求动作了呢？还不行。因为控制机输出的是脉冲（数字量），而机床工作台的位移是模拟量，为此还需要一个中间环节，其任务是把数字量转换成模拟量，然后经过功率放大，再传给丝杠驱动工作台或刀架按予定的程序动作。这个中间环节通常称为伺服机构。伺服机构是用来控制机床运动的速度和位置的机构。

综上所述，可以画出数控系统的一般结构方框图，见图1-3。

采用数控机床加工产品，从图纸到零件大体上需经过下列几个环节：



图 1-3

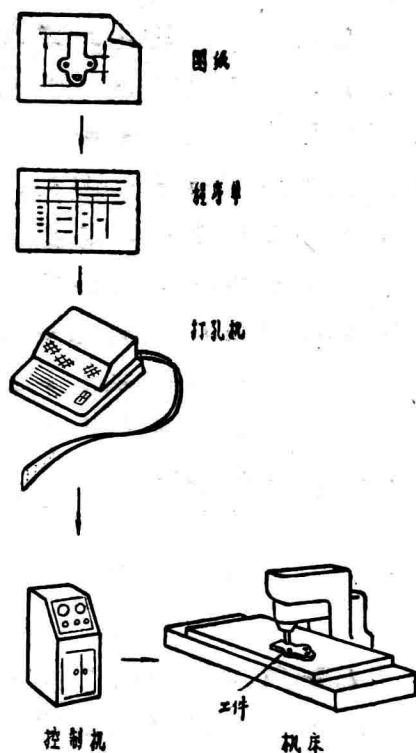


图 1-4

(一) 根据零件图纸, 编写程序单;

(二) 根据编好的程序单, 打出穿孔带;

(三) 将穿孔带的数, 输给控制机;

(四) 控制机输出的脉冲, 给步进电机, 再通过液压放大器带动丝杠旋转。

图 1-4 形象地表明了这几个环节的关系。

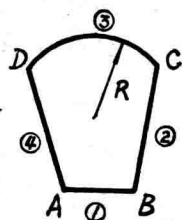


图 1-5

初接触数控的读者往往这样认为:“纸带往前走, 机床就运动; 纸带不走了, 机床就停了。纸带往前走每经过一个孔, 控制机就发出一个脉冲, 让步进电机走一步(转一角度), 机床工作台(或刀架)就移动一下”。这是不对的。这主要是由于对控制机的功能(记忆、计算、控制)缺乏了解的缘故。

譬如我们在数控机床上加工如图 1-5 所示零件的圆弧段③, 其实在穿孔带上打的编码只有圆弧的半径 R , 及圆弧的起点 C 和终点

D 的坐标；当控制机接受这些数据后，控制机自己会把 C、D 之间圆弧段上的其他点计算（即插补）出来，根据计算的结果控制机输出若干个脉冲，通过伺服机构去控制机床使它按一定的规律运动，从而能把圆弧段③加工出来。而绝不是穿孔带走一下，发一个脉冲，机床动一下。

再有必要说明的一点是加工时穿孔带是一段程序一段程序地向控制机输入的。穿孔带每走一段程序（几排孔或十几排孔）就“告诉”控制机让它控制机床去加工直线段①，还是加工②，或③，或④（见图 1-5），控制机接受了穿孔带的指令，首先是把它记住，然后是该运动的运动，该让机床怎么动作就给机床发什么信号。此后机床就按输入程序的要求运动。由于控制机运动的速度很快，机床加工所需要的时间较长；在机床加工过程中，纸带又输入下一段程序。控制机先将穿孔带来的指令记忆住，然后运动，当机床完成了前一程序段所要求的动作后，就接着完成下一程序段所要求的动作。由此可以知道：机床的运动基本上是不停顿地进行着，而穿孔带的移动是间断的。穿孔带只是记录了规定机床运动的程序，而不是直接向伺服机构发脉冲。

二、为什么要发展数控机床

采用数控机床加工，可以有以下几方面的优点：

1. 改善劳动条件，减轻劳动强度。

例如：在飞机工厂里，采用数控压铆机可以钻铆钉孔、总孔及压铆钉等操作全部自动化。从而工人无需再执铆枪去操作了。劳动条件改善了，劳动强度减轻了，劳动生产率提高了。

2. 为新产品的研究试制提供了有利条件。

在采用通用机床生产的条件下，从设计图纸到新产品试制出来，生产周期往往是比较长的，因为需要设计、制造数量相当多的工夹具，才能把新产品制造出来。一旦需要修改设计图纸，就得重新制做相当数量的工夹具。

使用数控机床加工试制件时，用极少量的工夹具便可以直接从毛坯加工出零件来，从而使新产品试制的周期大大缩短，而且精度也容易得到保证。

3. 能很快适应产品的改变。

如果产品经常改变，零件形状复杂，而且要求生产准备周期缩短，那么采用数控机床更为合适。当从加工一种零件转变到加工另一种零件时，通常只需要更换穿孔带和少量的工夹具即可。在某些情况下，只要更换一条穿孔带就行了。

4. 加工精度高，质量稳定。

数控机床加工完全是自动控制的，所以加工的精度与质量就比较稳定。例如对于数控点位机床来说，孔的定位精度、孔的大小、深度、角度都能准确地保持。而且由于去掉了钻套，排屑条件好了，可以直接进行冷却。对采用数控的曲线轮廓加工来说，零件的几何形状可以用数学方法确定，省去了成本高的靠模。由于在编程序时，已经考虑到进给量、主轴转速和其他切削条件的控制，能做到当率变化时，刀具相对于零件的进给速度一致，故精度和光度比较容易得到保证。

5. 对工夹具的要求降低了，生产准备时间大大缩短了。

数控机床加工时，一般只使用简单的夹具、定位装置就够了，不需要结构复杂的专用夹具。例如，在点位数控机床上用不着钻套。用于加工曲面的数控车床或数控铣床同仿形车床或仿形铣床相比较，前者只需要做穿孔带，而后者需要制作靠模或样板。编制程序和制造穿孔带比制造样板或靠模所需的劳动量要少得多。靠模及样板需要定期检验和更换。而穿孔带只要经过试验证明合格就可以一直用下去。如果穿孔带坏了，再复制一条也比较方便。

6. 减少了零件的检验时间

由于数控机床的加工精度高而且稳定可靠，所以检验时间可以减少。只要穿孔带经过试验能保证零件精度达到要求，工件的材料合格，刀具锐利，一般只要检验第一个零件，并在加工中抽查某些临界尺寸就可以了。这样，对于复杂形状的零件来说，就大大节约了检验时间。

综上所述，可以看出数控机床为机械加工的自动化开辟了一条新的途径，它改善了劳动条件，提高了产品质量，提高了劳动生产率和降低了产品成本。

三、数控机床的适用范围

数控机床适用于生产批量小的，结构形状比较复杂，加工精

度高的零件，或在试制中需要多次修改设计的零件。在这种情况下，如果采用通用机床来加工就需要使用复杂的专用夹具或花费很长的调整时间，废品率也高。

航空工厂的许多产品特点 是批量不大、结构形状复杂；精度要求高，因此，采用数控机床加工，对提高航空工业产品质量、加速国防建设，具有重大意义。

但目前数控机床的主要缺点是设备成本高。

§ 1-2 几个常用术语的含义

当了解数控机床的技术性能时，往往要碰到下列一些术语：两坐标、三坐标、开环、闭环、点位、连续轮廓系统，内插补、外插补、相对坐标、绝对坐标、刀具半径补偿等等。本节就简单地介绍一下这些术语的含义。

一、两坐标、三坐标

在数控机床中，要进行位移量控制的部件较多，故要建立坐标系统，以便分别进行控制。目前大多采用直角坐标系。一台数控机床，所谓几坐标，即是有几个运动采用了数字控制。有些机床的运动部件较多，在同一个坐标轴方向上，会有二个或更多的运动。

在图 1-6 中，如果 X、Y、Z 三个方向的运动都能进行数控，则它就是一台三坐标的数控机床。

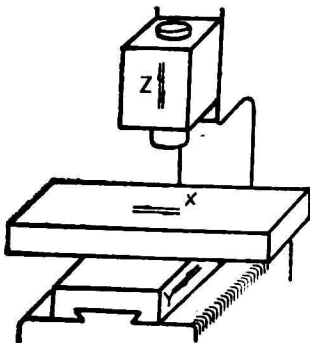


图 1-6

图 1-7，图 1-8，图 1-9 所示的零件需要两个坐标的数控机床才能加工出来。



图 1-7

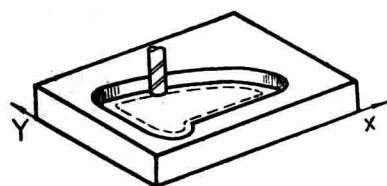


图 1-9 所示的零件需要三坐标数控机床才能加工出来。

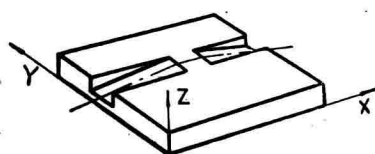


图 1-9

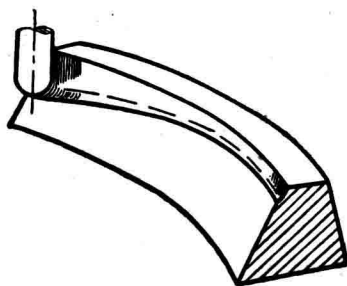


图 1-10

二、开环、闭环

数控机床的刀具、工作台的运动都是根据控制机传来的命令动作的。当数控机床在加工时，人们对机床的每一个动作都可以发出疑问：

马达是不是按照规定的要求转动？

刀具是不是按照规定的轨迹运动？

工作台是否停止在要求定位的位置上？

数控的设计者对这类疑问采取两种态度。

一种是完全信赖机器，相信那些马达能“逐字逐句”地遵从控制系统传来的命令。以这种指导思想设计出来的伺服机构称为开环系统。

另一种是持怀疑态度，在伺服机构中加了检查措施（位置反馈元件），使伺服机构跟踪机床的动作，保持联系，这种伺服机构就是闭环系统。

1. 开环系统

开环系统没有位置反馈元件，而采用步进电机（也称电脉冲马达）或者是电液脉冲马达驱动机床的丝杠从而使工作台运动。所以开环系统有时称为步进系统。开环系统示意图见图 1-11。步进电机具有这样特性：每输入一个电脉冲，步进电机的转子就转

过一个固定的角度，通常称为步距角 α 。在没有脉冲信号输入时，步进电机的转子就保持原来的位置不动。如果连续不断地向步进电机输入脉冲，步进电机就不停地旋转，它总的转角与输入脉冲的数量成正比关系。例如某步进电机 $\alpha = 3^\circ$ ，给它输入30个脉冲，步进电机转 90° ；输入120个脉冲，步进电机转 360° ；输入240个脉冲，步进电机恰好转两圈。

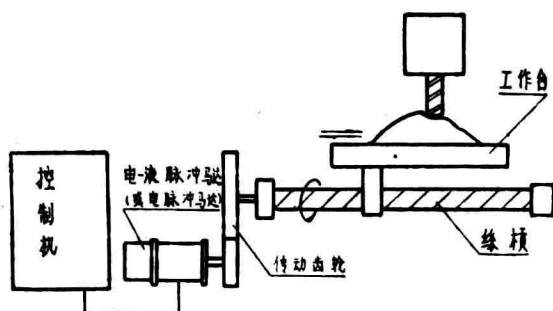


图 1-11

如果丝杠的螺距为6毫米，传动齿轮的传动比为1:1，则每当步进电机转一圈，工作台就会移动6毫米。因此只要我们控制输入脉冲的数目，就可以达到控制工作台移动的目的。

在开环系统中，当所需功率较小时（如绘图机、线切割机 etc）大都用步进电机驱动。当需要功率较大可采用电—液脉冲马达。电—液脉冲马达是将步进电机、伺服阀、液压缸用反馈方式联结起来的组合体。

2. 闭环系统

闭环系统示意图1-12。闭环系统与开环步进系统不同，它的特点是在工作台上装有位位置反馈检测元件。其工作原理如下：计算机给出的数据与位置反馈回路回来的信号相比较，伺服机构根据比较的结果，来控制工作台运动的位置和速度。

闭环系统中所用的反馈检测元件有许多种，如光栅、感应同步器、磁尺、旋转变压器等。

闭环系统环节多，线路复杂，调试较难，工作台的位置精度

主要取决于位置反馈检测回路的精度，因此闭环点位系统的定位精度较高，目前可达 ± 0.003 毫米，甚至可达 ± 0.001 毫米。

有一些系统，位置检测元件装在丝杠上（如旋转变压器），不直接检测工作台的位移，它是通过丝杠的转角间接地测量工作台的位移的，有人称它为半闭环系统。

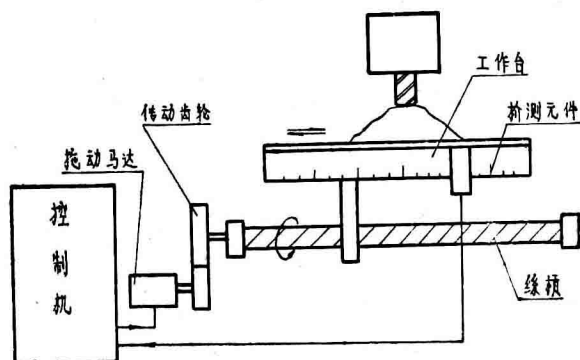


图 1-12

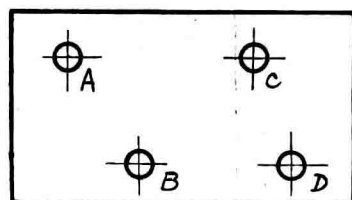


图 1-13

三、“点位”、“直线”、“连续轮廓”系统

按照加工方式，数控系统可以分成点位系统、直线系统和连续轮廓系统三种。

1. 点位的数控系统

点位数控系统是指工作台从某一点到另一点的移动是数控的。

例如要求依次在A、B、C、D位置，钻削直径为 d 的孔（如图1-13所示）。孔的直径 d 用钻头保证。点位数控系统能够控制机床这样运动：先让A点（待加工第一个孔的中心位置）对准主轴，钻出孔A；再让B点对准主轴、钻出孔B；让C点对准主轴、钻出孔C；最后让D点对准主轴，钻出孔D。

点位数控系统的特点：一是在工作台运动期间，不进行切削加工，在工作台到达规定的位置之后才能进行加工（运动的方式可以是工件和工作台不动，对刀具进行数控，等刀具移到指定位置才进行切削。或者是工件与工作台由数控沿某一坐标轴方向运动，刀具由数控沿另一坐标轴方向运动，到达指定位置后，才

开始切削)。另一个特点是由于在数控运动中刀具与工件不接触，所以运动路线不影响加工。譬如图 1-14，从 A 至 B 允许走①，②，③，④，⑤中任一条路，也允许走过头再回来，只要求最后精确地到达 B 的坐标点，运动就终止。

属于这一类的机床有：数控钻镗床，数控冲床等。这种控制系统用于对孔的中心定位和加工。

2. 直线数控系统

直线数控系统与点位数控系统有许多相似之处，其主要区别在于直线数控系统能控制从 A 点到 B 点走直线，而且应由 A 到 B 时进行加工。用于钻床、镗床、铣床和“加工中心”机床，能进行孔的中心定位和直线切削（如加工台阶轴）。

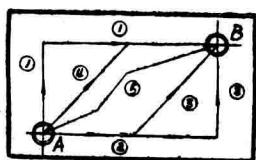


图 1-14

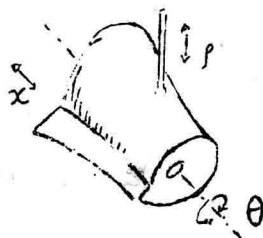


图 1-15

3. 连续轮廓数控系统

过去某厂加工如图 1-15 所示的零件，是先坐标镗床上一个点一个点的加工，然后再用什锦钻和砂纸进行人工修正。加工一个零件需要 50 小时，现在用一台三坐标的曲线数控铣床，仅用 25 小时就可以加工出一个零件。

加工这样的零件，铣床需要有三种动作：

1. 铣刀作径向移动 (p 方向)；
2. 工件以轴为中心作旋转运动 (θ 方向)；
3. 工件沿轴向移动 (x 方向)；

加工的方式可以是：工件绕 x -轴旋转 (θ 方向)；铣刀沿径向移动 (p 方向)；二者互相配合，这样工件每转一圈加工出一圈。

很窄的表面。然后工件停止旋转，而改作轴向（ x 方向）移动。移动一个很小的距离后，再重复上述动作，于是又加工出一个更窄的表面。如此重复，即可加工出整个零件来（加工方式也可以是：铣刀作径向移动，工件作轴向移动；然后工件停止轴向移动而改为旋转一个很小的角度，再重复上述动作，直到将整个零件加工出来）。

通过上例我们可以得知连续轮廓数控系统的特点是能同时控制几个坐标动作，并能使几个坐标方向的运动之间保持预先确定的关系（例如：直线、圆弧、抛物线、空间直线等）。加工一向面实际上是加工许多条曲线。我们能实现曲面加工的数控系统称为连续轮廓数控系统。

连续轮廓数控系统用于铣床、车床、磨床、线切割机等等，它能控制刀具对工件作连续不断地相对运动，可以加工出各种几何形状复杂的型面，如机翼、螺旋桨、凸轮、模具等等。

四、内插补、外插补

一个零件的形状看起来无论如何复杂，但都可以分成许多直线段和圆弧段。

譬如我们要加工一段圆弧，如图 1-16 所示，如果我们知道它是圆弧段起点 A 与终点 B 的坐标（ x_1, y_1 ），（ x_2, y_2 ）；和圆心 O 点的坐标（ x_0, y_0 ），以及半径 R 。要想把圆弧段 AB 光滑地描绘出来，必须把圆弧段 A, B 之间诸点的坐标值计算出来，把这些点填补到 A, B 之间，通常把这种填补空白点的工作叫做插补，把计算插补空白点的坐标称为插补运算，把实现插补运算的装置称为插补器。

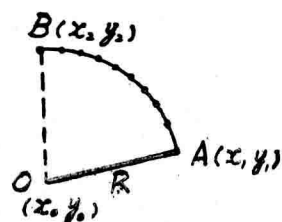


图 1-16
1-16

按照插补的方式数控系统可分为二类：内插补和外插补。

1. 外插补

外插补数控机床的特点是机床本身不带计算机，结构简单。机床只附带磁带机和伺服机构。计算机中心根据要加工的图

序数据进行插补运算，并将计算的结果用信号（脉冲或相位）记录在磁带上。加工时将磁带放到磁带机上，开动磁带机，机床即可自动进行加工了。这种方式的数控系统目前用的不多；原因是多方面的，例如对磁带阅读机要求较高，往往要求工厂自己设有计算中心、复制磁带等等。

2. 内插补

所谓内插补方式的数控系统，其特点是插补运算在控制机内进行（即控制机带有插补器）。这样穿孔带上打的信号孔数很少。控制机能根据穿孔带上记录的信号（直线只需标记起点、终点座标，圆弧只需标记半径、起点和终点座标）进行插补计算，将直线和圆弧的各点数据标出，由控制机发出相应的脉冲通过伺服机构，使刀具相对工件运动，从而把零件加工出来。

五. 绝对座标、相对（增量）座标

1. 绝对座标制是指工作台的位移是从固定的基准点开始计算的。

例如，假使程序规定工作台沿X轴线移动，移动的距离为离固定基准点200毫米，那么不管工作台在接到命令前处于什么位置，它接到命令后总是沿X轴线方向移动到离固定基准点200毫米处上。

2. 相对座标（也称为增量座标）制是指工作台的位移是从工作台现有位置开始计算的。在这里，对每一座标轴线也有一个起始的基准点，但是它只在工作台第一次移动才有意义，以后的移动是以工作台前一次的终点为起始的基准点。

例如：假设第一个程序规定工作台沿X轴线移动，移动距离是离起始点200毫米。那么工作台就移动到200毫米处停止。下一个程序如果是规定在同一方向再移动50毫米，那么机床到达的位置离原来起始点是 $200+50=250$ 毫米。

相对座标的控制系统结构较简单，但若在加工过程中刀具损坏，停机更换刀具，再开机时需先退回到起始点才行，而不能立即从中断点处开始加工。

这两种座标方式都有采用，有些数控系统二者都有，可以任意选择。下面在第四讲中所介绍的点位数控系统采用的是相对座

§ 1-3 数控机床的发展趋势

一、加工中心的出现和迅速发展

所谓加工中心就是一种采用数字控制的多工序加工机床。它的最大特点是机床上有储存各种刀具的刀具库和自动换刀装置，并能自动转换工件的位置。这样就可以使工件在一次装卡条件下完成钻、镗、铰孔、攻丝、铣平面等工作。最适宜加工箱体类外壳零件。

过去这类零件大都在镗床或座标镗床上加工，调正定位要耗费很多时间，而直接用于切削加工的工时不到总工时的20~30%，采用加工中心后切削加工的工时可达到机床工时的70~80%，大大地提高了工效，并保证了加工精度。

1967年以后加工中心有了很大的发展，例如在日本，1970年加工中心的产量占数控机床的总产量的20%。

加工中心的出现对数控机床的结构也起了很大推动作用。

二、数控系统向计算机化数控系统(CNC)和直接数控系统(DNC)发展。

随着生产的发展要求数控系统具有更大的灵活性，有些中小型工厂希望数控系统既能用于车床控制也能用于镗铣床、加工中心等机床的控制，还要求数控系统价格低廉，由于工业的发展，使中小型通用计算机的价格降低，产量也急剧增加，这样就出现了采用通用计算机控制机床的系统，使控制系统具有很大的灵活性。

这种控制系统有两种类型：计算机化数控系统(CNC Computerized numerical Control)和直接数控系统(DNC Direct numerical Control)。

计算机化数控系统的特点是用一台小型通用计算机来控制一台机床。这台小型通用计算机一般带有4K~16K的磁芯存储器，并且还保留常规数控系统的控制特点。

在常规的数控系统中要扩大控制机的功能和应用范围，就必须更换和附加一定数量的插件或修改程序线，也就是说