

%00098

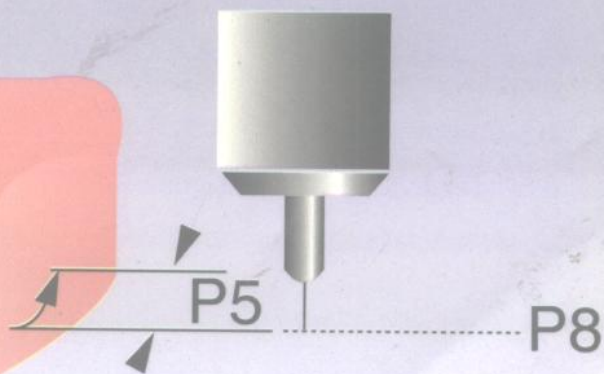
N0 G76 N98765  
N10 (Digitizing of profile)  
N20 (Machining conditions)  
N70 P4=K360 (Initial angle)  
N80 P5=K1 (Angle pitch)  
N90 P6=K600 (Regular movement feed rate)  
N100 P11=P4F4P5 P12=F12P11 P11=F11P12  
N110 G26 N130  
N120 P11 P12F11 P13 P14F11  
N130 P11 P12F11 P13 P14F11  
N140 G90 J  
N150 GXP2  
N160 G76 G G90 X Y  
N170 G1 ZP8 F500  
N180 G76 G1 Z FP6  
N190 G5 G75 X Y (Digit)  
N200 G76 X Y  
N204 P4=P4F1P5  
N210 G90 AP4  
N220 P10=P4F1P4 P10=F11  
N230 G29 N250  
N240 G25 N190  
N250 G Z0  
N260 G76 G Z0 M30  
N270 M30

# 数控机床结构与编程

机械工业全国数控培训网络 组编

董献坤 主编

# CNC



机械工业出版社



数控机床的使用越来越广泛,数控技术培训工作正在蓬勃发展。本书是机械工业部全国数控培训网络组织编写的机床数控技术培训系列教材。全书共分四章,分别介绍了数控机床的组成与工作原理机械结构、加工工艺、及数控机床的编程。全书突出实用,通俗易懂。本书用作数控技术的初级培训教材,也可供数控机床的使用、维护和维修人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床结构与编程/董献坤主编. —北京:机械工业出版社, 1997. 8

机械工业全国数控培训网络系列教材

ISBN 7-111-05609-4

I. 数… II. 董… III. ①数控机床-构造-技术培训-教材  
②数控机床-程序设计-技术培训-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 06598 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)  
责任编辑: 孙祥根 版式设计: 张世琴 责任校对: 罗莉华  
封面设计: 姚毅 责任印制: 卢子祥  
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1997 年 8 月第 1 版第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·10.5 印张·253 千字  
0 001—7 000 册  
定价: 15.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

## 前 言

本书是机械工业全国数控培训网络组织编写的机床数控技术培训系列教材，主要用作初级培训教材。全书从实用角度出发，以期读者通过本书能初步了解数控机床的基本组成和工作原理；了解数控机床的机械结构；掌握数控机床加工程序的编制方法。

全书共分四章。第一章介绍数控机床的一般组成和工作原理；第二章介绍数控机床的机械结构；第三章介绍机械加工工艺基础和数控机床的工艺特点；第四章介绍数控加工程序的编制方法。其中第三章的主要对象是技术工人和非机制专业的技术人员，机制专业的技术人员可以只参考后两节，即数控机床的工艺特点、平面及曲面的数控加工。

本书由机械工业全国数控培训网络洛阳分中心董献坤同志主编。第一章主要由丹东分中心鲍海龙同志编写，唐晓华同志参加了部分编写工作。第二章主要由西安分中心李长江同志编写，段冰驰同志参加了部分编写工作。第三章由董献坤同志编写。第四章主要由威海分中心韩鸿鸾同志编写，董献坤同志做了修改和整理，荣维之、何全民同志参加了部分编写工作。

全书由洛阳工学院张洛平副教授主审，中国第一拖拉机工程机械公司拖拉机学院的邓启辉副教授参加了审稿。本书在编写过程中得到了机械工业全国数控培训网络南京培训中心的施复同志、高秦生同志和周明虎同志的指导和帮助。中国第一拖拉机工程机械公司的程闻馨、张阳同志帮助绘制了部分插图。编者在此向上述同志表示感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处望读者批评指正。

编 者

1996年11月

# 目 录

前言

<b>第一章 数控机床的组成与基本工作原理</b> .....	1
第一节 概述.....	1
第二节 数控机床的数控系统.....	6
第三节 数控机床的伺服系统 .....	13
第四节 机床电器与可编程控制器 .....	17
第五节 数控机床加工零件的过程 .....	26
<b>第二章 数控机床结构</b> .....	30
第一节 典型数控机床 .....	30
第二节 数控机床的典型结构 .....	38
第三节 数控机床的液压与气压传动系统 .....	63
<b>第三章 数控机床的加工工艺</b> .....	67
第一节 机械加工工艺基础 .....	67
第二节 零件表面的加工方法综述 .....	80
第三节 零件加工工艺的制定 .....	93
第四节 数控机床的工艺特点 .....	98
第五节 平面和曲面的数控加工.....	101
<b>第四章 数控机床编程</b> .....	104
第一节 数控机床编程的基础知识.....	104
第二节 数控车床编程.....	116
第三节 数控铣床编程.....	130
第四节 加工中心编程.....	144
<b>参考文献</b> .....	162

# 第一章 数控机床的组成与基本工作原理

## 第一节 概 述

随着社会生产和科学技术的发展，机械产品日趋精密复杂，且需频繁改型。特别是在宇航、造船、军事等领域所需的零件，精度要求高，形状复杂，批量小。普通机床已不能适应这些需求。为了满足上述要求，一种新型的机床——数字程序控制机床（简称数控机床）应运而生。

最早进行数控机床研制的是美国人。1952年，美国麻省理工学院成功地研制出世界上第一台数控机床。但这台数控机床仅是一台试验性的机床，直到1954年11月，第一台工业用的数控机床才生产出来。

从此以后，世界上其他一些工业国家也都开始开发、生产及应用数控机床。我国数控机床的研制是从1958年起步的。

早期的数控机床控制系统采用电子管，体积大、功耗高，只在军事部门应用。只有在微处理机用于数控机床后，才真正使数控机床得到了普及。

### 一、基本概念

数字控制（Numerical Control）是20世纪中期发展起来的一种自动控制技术，是用数字化信号进行控制的一种方法，简称数控（NC）。采用了数控技术的机床，或者说是装备了数控系统的机床，称为数控机床。

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的定义：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使用号码或其他符号编码指令规定的程序，定义中的控制系统就是数控系统。

数控系统能自动阅读输入载体上事先给定的数字值，并将其译码，用来控制机床动作和加工零件。数控系统包括控制介质、数控装置和伺服系统。

### 二、数控机床的组成与分类

#### （一）数控机床的组成

数控机床的种类繁多，但从组成一台完整的数控机床上讲，它由控制介质、数控装置、伺服系统和机床本体四大部分以及辅助设备组成。如图1-1所示。

#### 1. 控制介质

控制介质是指将零件加工信息传送到数控装置去的信息载体。控制介质有多种形式，它随着数控装置的

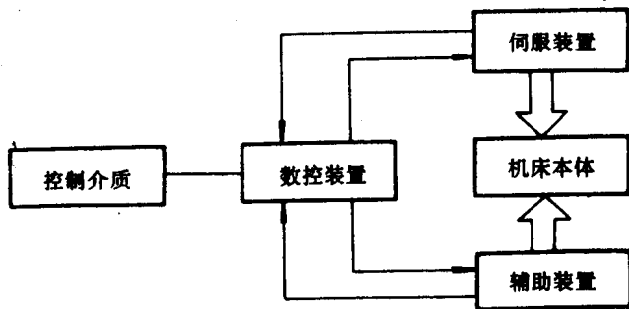


图 1-1 数控机床组成示意图

类型不同而不同，常用的有穿孔纸带、穿孔卡、磁带、磁盘等。

除上述几种控制介质外，还有一部分数控机床采用数码拨盘、数码插销或利用键盘直接将程序及数据输入。另外，随着 CAD/CAM 技术的发展，有些数控设备利用 CAD/CAM 软件在其它计算机上编程，然后通过计算机与数控系统通信，将程序和数据直接传送给数控装置。

## 2. 数控装置

数控装置是数控机床的控制中心。现在的数控装置通常由一台通用或专用微型计算机构成。它由输入装置、控制运算器和输出装置等构成。如图 1-2 所示，点划线框内为数控装置。

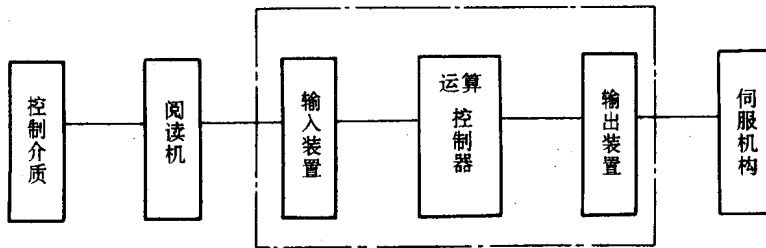


图 1-2 数控装置组成示意图

输入装置接受控制介质上的信息，经过识别与译码之后，送到控制运算器。这些信息将作为控制与运算的原始依据。

控制运算器根据输入装置送来的信息进行运算，并将控制命令送往输出装置。

输出装置将控制运算器发出的控制命令送到伺服系统，经功率放大，驱动机床完成相应的动作。

## 3. 伺服系统

伺服系统是数控机床的执行机构，包括驱动和执行两大部分。伺服系统接受数控系统的指令信息，并按照指令信息的要求带动机床的移动部件运动或使执行部分动作，以加工出符合要求的零件。指令信息是以脉冲信息体现的，每一脉冲使机床移动部件产生的位移量叫脉冲当量（常用的脉冲当量为 0.001mm~0.01mm）。

目前数控机床的伺服系统中，常用的位移执行机构有功率步进电动机、直流伺服电动机和交流伺服电动机，后两者都带有光电编码器等位置测量元件。

## 4. 机床本体

机床本体是数控机床的主体，是用于完成各种切削加工的机械部分，它是在原普通机床的基础上改进而得到的，具有以下特点：

- 1) 数控机床采用了高性能的主轴及伺服传动系统，机械传动结构简化，传动链较短。
- 2) 数控机床机械结构具有较高的刚度，阻尼精度及耐磨性，热变形小。
- 3) 更多地采用高效传动部件，如滚珠丝杠副，直线滚动导轨等。

除上述四个主要部分外，数控机床还有一些辅助装置和附属设备，如电器、液压、气动系统与冷却、排屑、润滑、照明、储运等装置以及编程机、对刀仪等。

## (二) 数控机床的分类

### 1. 按控制系统的特点分类

- (1) 点位控制数控机床 点位控制机床的特点是只控制移动部件的终点位置，即控制移

动部件由一个位置到另一个位置的精确定位，而对它们运动过程中的轨迹没有严格要求，在移动和定位过程中不进行任何加工。因此，为了尽可能减少移动部件的运动时间和定位时间，通常先以快速移动到接近终点坐标，然后以低速准确移动到定位点，以保证良好的定位精度。例如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机、数控折弯机等都是点位数控机床。如图 1-3 所示。

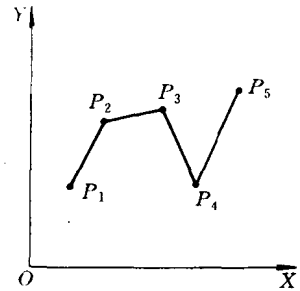


图 1-3 点位数控机床加工示意图

(2) 直线控制数控机床 直线控制数控机床的特点是刀具相对于工件的运动不仅要控制两点之间的准确位置（距离），还要控制两点之间移动的速度和轨迹。在刀具相对于工件移动时进行切削加工，其轨迹是平行机床各坐标轴的直线。一些数控车床、数控磨床和数控镗铣床等都属于直线控制系统，这类机床的数控装置的控制功能比点位系统复杂，不仅控制直线运动轨迹，还要控制进给速度以适应不同材质的工件。图 1-4 所示为直线数控机床加工示意图。

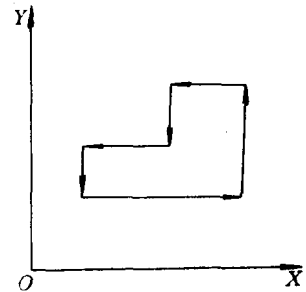


图 1-4 直线数控机床加工示意图

(3) 轮廓控制数控机床 轮廓控制又称连续控制，大多数数控机床具有轮廓控制功能。其特点是能同时控制两个以上的轴，具有插补功能。它不仅要控制起点和终点位置，而且要控制加工过程中每一点的位置和速度，加工出任意形状的曲线或曲面组成的复杂零件。图 1-5 为轮廓控制数控机床加工示意图。属于这类机床的有数控车床、数控铣床、加工中心等。

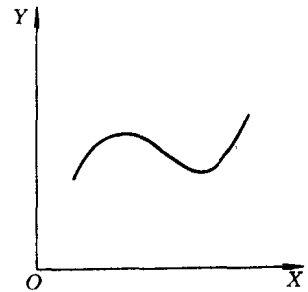


图 1-5 轮廓数控机床加工示意图

## 2. 按执行机构的控制方式分类

(1) 开环控制系统 开环控制系统是指不带反馈装置的控制系统，如图 1-6 实线部分所示。其执行机构通常采用功率步进电动机或电液脉冲马达。数控装置发出的脉冲指令通过环形分配器和驱动电路，使步进电动机转过相应的步距角，再经过传动系统，带动工作台或刀架移动。移动部件的速度与位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数决定，位移精度主要决定于该系统各有关零部件的制造精度。

开环控制具有结构简单、系统稳定、容易调试、成本低等优点。但是系统对移动部件的误差没有补偿和校正，所以精度低。一般适用于经济型数控机床和旧机床数控化改造。

(2) 闭环控制系统 闭环控制系统是指在机床的运动部件上安装位移测量装置，如图 1-6 所示。加工中将测量到的实际位置值反馈到数控装置中，与输入的指令位移相比较，用比较的差值控制移动部件，直到差值为零，即实现移动部件的最终精确定位。从理论上讲，闭环控制系统的控制精度主要取决于检测装置的精度，它完全可以消除由于传动部件制造中存在的误差给工件加工带来的影响。所以这种控制系统可以得到很高的加工精度。闭环系统的设计和调整都有较大的难度，主要用于一些精度要求较高的镗铣床、超精车床和加工中心等。

(3) 半闭环控制系统 半闭环控制系统是在开环系统的丝杠上或进给电动机的轴上装有

角位移检测装置，如圆光栅、光电编码器及旋转式感应同步器等。该系统不是直接测量工作台位移量，而是通过检测丝杠转角间接地测量工作台位移量，然后反馈给数控装置，如图 1-6 所示。这种控制系统实际控制的是丝杠的转动，而丝杠螺母副的传动误差无法测量，只能靠制造保证。因而半闭环控制系统的精度低于闭环系统。但由于角位移检测装置比直线位移检测装置结构简单，安装调试方便，因此配有精密滚珠丝杠和齿轮的半闭环系统正在被广泛地采用。目前已逐步将角位移检测装置和伺服电动机设计成一个部件，使系统变得更加简单，安装调试都比较方便，中档数控机床广泛采用半闭环控制系统。

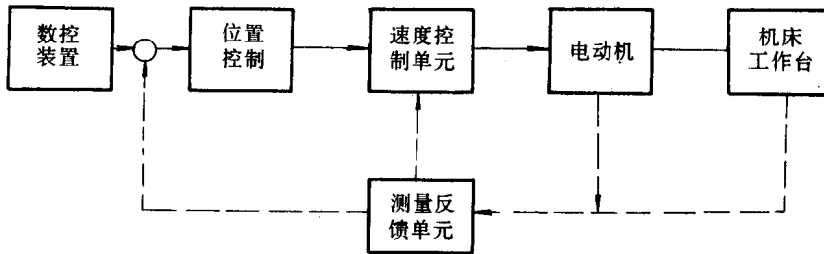


图 1-6 按执行机构控制方式分类示意图

### 3. 按工艺用途分类

(1) 金属切削类数控机床 这类数控机床包括数控车床、数控钻床、数控铣床、数控磨床、数控镗床以及加工中心。切削类数控机床发展最早，目前种类繁多，功能差异也较大。这里需特别强调的是加工中心，也称为可自动换刀的数控机床。这类数控机床都带有一个刀库，可容纳 10~100 多把刀具。其特点是：工件一次装夹可完成多道工序。为进一步提高生产率，有的加工中心使用双工作台，一面加工，一面装卸，工作台可自动交换等。

(2) 金属成型类数控机床 这类数控机床包括数控折弯机、数控组合冲床、数控弯管机、数控回转头压力机等。这类机床起步晚，但目前发展很快。

(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、火焰切割机、数控激光切割机床等。

(4) 其它类型的数控机床 如数控三坐标测量机等。

### 4. 按数控机床的性能分类

(1) 低档数控机床 也称经济型数控机床。其特点是根据实际的使用要求，合理地简化系统，以降低产品价格。目前，我国把由单片机或单板机与步进电动机组成的数控系统和功能简单、价格低的系统称为经济型数控系统。主要用于车床、线切割机床以及旧机床的数控化改造等。在我国，这类数控机床有一定的生产批量。

低档数控机床的技术指标通常为：脉冲当量 0.01mm~0.005mm，快进速度 4~10m/min，开环步进电动机驱动，用数码管或简单 CRT 显示，主 CPU 一般为 8 位或 16 位。

(2) 中档数控机床 中档数控机床的技术指标通常为：脉冲当量 0.005mm~0.001mm，快进速度 15~24m/min，伺服系统为半闭环直流或交流伺服系统，有较齐全的 CRT 显示；可以显示字符和图形，人机对话，自诊断等，主 CPU 一般为 16 位或 32 位。

(3) 高档数控机床 高档数控机床技术指标为：脉冲当量 0.001mm~0.0001mm，快进速度 15~100m/min，伺服系统为闭环的直流或交流伺服系统，CRT 显示除具备中档的功能



外，还具有三维图形显示等，主 CPU 一般为 32 位或 64 位。

### 三、数控机床的特点和应用范围

#### (一) 数控机床的特点

##### 1. 加工精度高

数控机床是高度综合的机电一体化产品。它由精密机械和自动化控制系统组成。所以，机床的传动系统与机床的结构都有很高的刚度和热稳定性。在设计传动结构时采取了减少误差的措施，并由数控装置进行补偿，所以数控机床有较高的加工精度。数控机床加工零件，不受零件复杂程度的限制，这一点是普通机床无法与之相比的。由于数控机床是按所编程序自动进行加工的，消除了操作者的人为误差，提高了同批零件加工尺寸的一致性，使加工质量稳定，产品合格率高。对于需多道工序完成的零件，特别是箱体类零件，使用加工中心，一次安装能进行多道工序连续加工，减少了安装误差，使零件加工精度提高。

##### 2. 加工生产率高

数控机床具有良好的刚性，可以进行强力切削，而且空行程可采用快速进给，节省了机动和空行程的时间。数控机床进给量和主轴转速范围都较大，可以选择最合理的切削用量。在数控机床上加工零件，对工夹具要求低，机床不需进行复杂的调整，数控机床有较高的重复定位精度，大大地缩短了生产准备周期，节省了测量和检测时间。所以，数控机床比一般普通机床的生产率高得多。如果采用加工中心，实现自动换刀，利用转台自动换位，使一台机床上实现多道工序加工，缩短半成品周转时间，生产效率的提高尤为明显。

##### 3. 减轻劳动强度、改善劳动条件

利用数控机床进行加工，首先，按图样要求编制加工程序，然后输入程序，调试程序，安装零件进行加工，观察监视加工过程并装卸零件。除此而外，不需要进行繁重的重复性手工操作，劳动强度与紧张程度均可大为减轻，劳动条件也因此得到相应的改善。

##### 4. 良好的经济效益

在数控机床上改变加工对象时，只需重新编写加工程序，不需要制造更换许多工具、夹具和模具，更不需要更新机床。节省了大量工艺装备费用，又由于加工精度高，质量稳定，减少了废品率，使生产成本下降，生产率又较高，所以能够获得良好的经济效益。

##### 5. 有利于生产管理的现代化

利用数控机床加工，能准确地计算零件的加工工时，并有效地简化检验、工夹具和半成品的管理工作，易于构成柔性制造系统 (FMS) 和计算机集成制造系统 (CIMS)。

虽然数控机床有上述优点，但初期投资大，维修费用高，要求管理及操作人员的素质也较高，因此，应合理地选择及使用数控机床，提高企业经济效益和竞争力。

#### (二) 数控机床的应用范围

数控机床是一种高度自动化的机床，有一般机床所不具备的许多优点，所以数控机床的应用范围在不断扩大，但数控机床是一种高度机电一体化产品，技术含量高，成本高，使用维修都有一定难度，若从最经济的方面出发，数控机床适用于加工：

- 1) 多品种小批量零件；
- 2) 结构较复杂，精度要求较高的零件；
- 3) 需要频繁改型的零件；
- 4) 价格昂贵，不允许报废的关键零件；

5) 需要最小生产周期的急需零件;

图 1-7 表示了通用机床与数控机床、专用机床加工批量与综合费用的关系。

图 1-8 表示了工件复杂程度及批量大小与机床的选用关系。

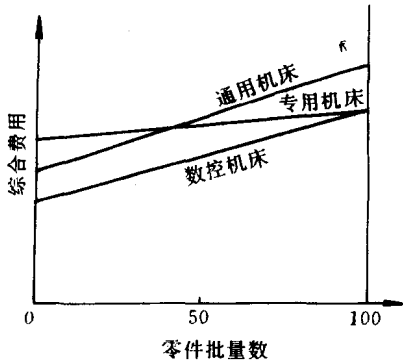


图 1-7 零件加工批量与综合费用的关系

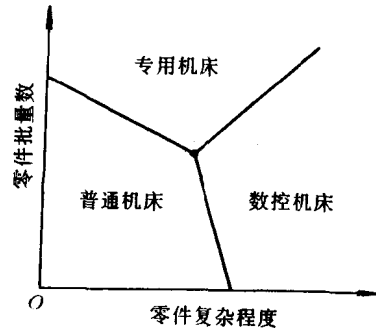


图 1-8 数控机床适用范围示意图

## 第二节 数控机床的数控系统

### 一、数控系统的组成

数控系统是数控机床的控制核心。它通常由一台带有专门系统软件的专用微机构成。即由专用软件与硬件两大部分组成。软件在硬件支持下运行。

#### 1. 数控系统的软件

数控系统的软件一般由六个主要程序构成：①初始化程序；②输入数据处理程序；③插补运算程序；④速度控制程序；⑤系统管理程序。⑥诊断程序。对于不同的数控系统，上述六个程序不一定都具有，或者是由硬件电路来实现。比如，经济型数控系统没有诊断程序或只有简单的诊断程序。

#### 2. 数控系统的硬件

如图 1-9 所示。数控系统的硬件一般包括：输入接口、CPU、存储器、输出接口。其中，CPU 是运算器和控制器的总称。其功能一方面控制输入/输出接口，另一方面进行运算。存储器是存放程序和数据的部件。输入/输出接口是负责信息交换的通道。

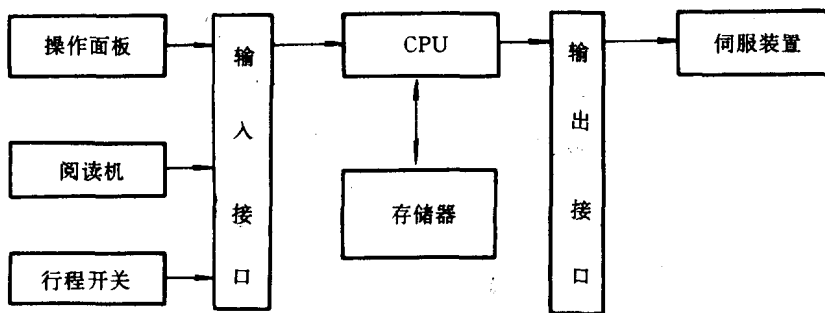


图 1-9 数控系统工作原理框图

## 二、插补原理

在数控机床中，刀具是一步一步移动的。刀具移动一步的距离称为脉冲当量。脉冲当量是刀具所能移动的最小单位。刀具的运动轨迹是折线，而不是光滑的曲线。刀具沿什么样的折线进给，由机床的数控系统确定。数控系统依一定方法确定刀具运动轨迹的过程叫做插补。所依据的方法叫做插补方法。

根据输出信号方式，插补方法可分为脉冲插补法和增量插补法。脉冲插补法输出的是脉冲序列，如逐点比较法和数字积分法。增量插补法输出的是增量。如数字增量法（又称数据采样法）。

### （一）逐点比较插补法

顾名思义，逐点比较法就是每走一步，都要将加工点的坐标与图形轨迹相比较，判断偏差，然后决定下一步的走向，从而缩小偏差。它能实现直线插补和圆弧插补，插补精度较高，最大误差不超过一个脉冲当量。

在逐点比较法中，每进给一步都需要四个节拍：

- （1）偏差判别 确定加工点相对规定图形的位置。
- （2）坐标进给 根据偏差情况，控制 X 坐标或 Y 坐标进给一步，使加工点向图形靠拢，缩小偏差。
- （3）新偏差计算 进给一步后，计算加工点与规定图形的新偏差，作为下一步偏差判别的依据。
- （4）终点判别 根据这一步的进给结果，判断是否到达终点。如果到达终点，就停止插补。如果未到终点，继续插补。逐点比较法的工作循环图如图 1-10 所示。

#### 1. 逐点比较法直线插补

（1）偏差计算 如图 1-11 所示，OA 是在 XY 平面第 I 象限内要插补的直线。A 点的坐标为  $(x_a, y_a)$ ，点 P  $(x, y)$  表示刀具的位置。

若 P 点正好落在直线 OA 上，则下式成立

$$y/x = y_a/x_a$$

$$\text{即 } x y_a - y x_a = 0$$

若 P 点在直线 OA 的上方。则：

$$y/x > y_a/x_a$$

$$\text{即 } x_a y - y_a x > 0$$

若 P 点在直线 OA 的下方。则

$$y/x < y_a/x_a$$

$$\text{即 } y x_a - x y_a < 0$$

由上所述，可以取函数  $F = x_a y - y_a x$  作为偏差判别的一个函数。此函数称为偏差函数。由偏差函数

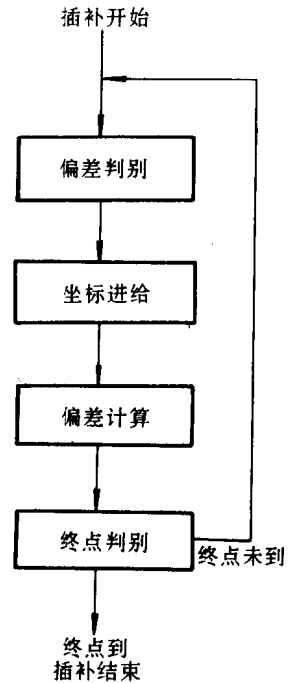


图 1-10 逐点比较法工作循环图

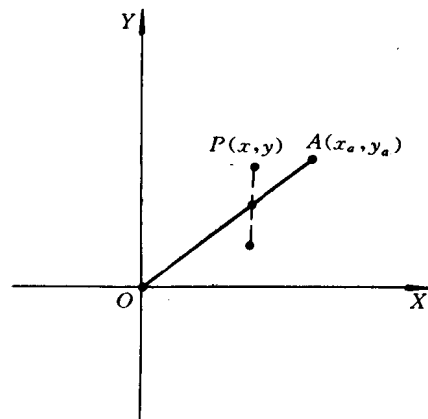


图 1-11 直线插补

$F(x, y)$  的数值就可以判别点与直线的相对位置。

即：当  $F(x, y) = 0$  时，刀具在直线上。

当  $F(x, y) > 0$  时，刀具在直线上方。

当  $F(x, y) < 0$  时，刀具在直线下方。

(2) 坐标进给与新偏差计算 设某时刻刀具运动到  $P_i(x_i, y_i)$  点。若偏差函数  $F_i = x_a y_i - y_a x_i > 0$ ，则刀具在直线上方。如图 1-12a 所示。为使刀具向直线靠近。应向  $+x$  走一步。到达  $P_{i+1}$  点。则  $P_{i+1}$  点的坐标可用下式计算。

$$x_{i+1} = x_i + 1$$

$$y_{i+1} = y_i$$

刀具在  $P_{i+1}$  点的偏差为：

$$\begin{aligned} F_{i+1} &= x_a y_{i+1} - y_a x_{i+1} \\ &= x_a y_i - y_a (x_i + 1) \\ &= (x_a y_i - y_a x_i) - y_a \\ &= F_i - y_a \end{aligned} \quad (1-1)$$

若  $F_i = x_a y_i - y_a x_i < 0$ ，则刀具在直线下方，如图 1-12b 所示，刀具应向  $+y$  走一步，达到  $P_{i+1}$  点。  $P_{i+1}$  点坐标为

$$x_{i+1} = x_i$$

$$y_{i+1} = y_i + 1$$

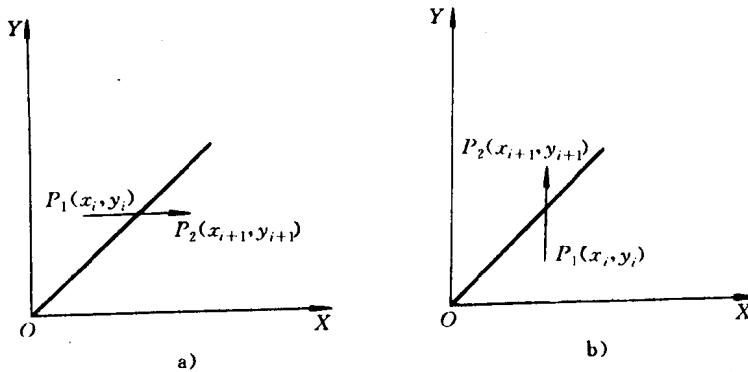


图 1-12 直线插补的进给方向

a) 刀具在直线上方 b) 刀具在直线下方

刀具在  $P_{i+1}$  点的偏差值为

$$\begin{aligned} F_{i+1} &= x_a y_{i+1} - y_a x_{i+1} \\ &= x_a (y_i + 1) - y_a x_i \\ &= (x_a y_i - y_a x_i) + x_a \\ &= F_i + x_a \end{aligned} \quad (1-2)$$

由式 (1-1) 和式 (1-2) 可以看出，新加工点的偏差完全可以用前一点的偏差递推出来。表 1-1 给出了直线插补的进给方向与偏差计算方法。

表 1-1 直线插补的进给方向与偏差计算

偏差情况	进给方向	偏差计算
$F_i \geq 0$	$+x$	$F_{i+1} = F_i - y_a$
$F_i < 0$	$+y$	$F_{i+1} = F_i + x_a$

(3) 终点判别 刀具从起点  $O$ , 移动到终点  $A(x_a, y_a)$ , 沿  $x$  轴和  $y$  轴应走总步数为  $N = x_a + y_a$ 。而刀具每走一步就进行一次插补循环。所以到达终点时, 插补循环数  $i$  应与  $N$  相等。即直线加工完毕的条件为

$$i = N$$

例 1-1 在图 1-13 中,  $OA$  是要插补的直线, 试用逐点比较法进行插补, 并画出轨迹。

解 插补完所走的总步数,  $N = 5 + 3 = 8$ 。插补运算过程如表 1-2 所示。

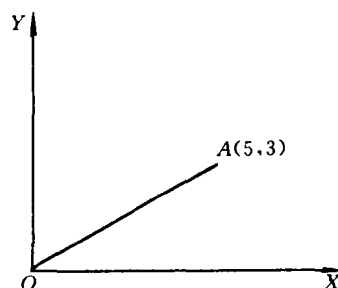


图 1-13 直线插补示例

表 1-2 直线插补计算实例

插补循环	偏差判断	进给方向	偏差计算	终点判断
0			$F_0 = 0$	$i = 0$
1	$F_1 = 0$	$+x$	$F_1 = F_0 - y_a = 0 - 3 = -3$	$i = 0 + 1 = 1 < N$
2	$F_2 = -3 < 0$	$+y$	$F_2 = F_1 + x_a = -3 + 5 = 2$	$i = 1 + 1 = 2 < N$
3	$F_3 = 2 > 0$	$+x$	$F_3 = F_2 - y_a = 2 - 3 = -1$	$i = 2 + 1 = 3 < N$
4	$F_4 = -1 < 0$	$+y$	$F_4 = F_3 + x_a = -1 + 5 = 4$	$i = 3 + 1 = 4 < N$
5	$F_5 = 4 > 0$	$+x$	$F_5 = F_4 - y_a = 4 - 3 = 1$	$i = 4 + 1 = 5 < N$
6	$F_6 = 1 > 0$	$+x$	$F_6 = F_5 - y_a = 1 - 3 = -2$	$i = 5 + 1 = 6 < N$
7	$F_7 = -2 < 0$	$+y$	$F_7 = F_6 + x_a = -2 + 5 = 3$	$i = 6 + 1 = 7 < N$
8	$F_8 = 3 > 0$	$+x$	$F_8 = F_7 - y_a = 3 - 3 = 0$	$i = 7 + 1 = 8 = N$

## 2. 圆弧插补

(1) 偏差计算 加工一个圆弧, 很容易联想到把加工点到圆心的距离和该圆的名义半径相比较来反映加工偏差。圆弧分为顺时针圆弧和逆时针圆弧两种, 这里, 仅以第 I 象限逆圆弧为例, 导出其偏差计算公式。设要加工图 1-14 所示的圆弧  $AE$ , 以原点为圆心, 半径为  $R$ , 起点为  $A(x_a, y_a)$ 。对于圆弧上任一加工点  $P_i(x_i, y_i)$ 。  $P_i$  点与圆心的距离为  $R_p$ ,  $R_p^2 = x_i^2 + y_i^2$ 。现在讨论这一加工点的偏差。

若点  $P_i$  在圆弧上, 则  $R_p = R$

若点  $P_i$  在圆弧外, 则:  $R_p > R$

若点  $P_i$  在圆弧内, 则:  $R_p < R$

取偏差函数为  $F_i = x_i^2 + y_i^2 - R^2$

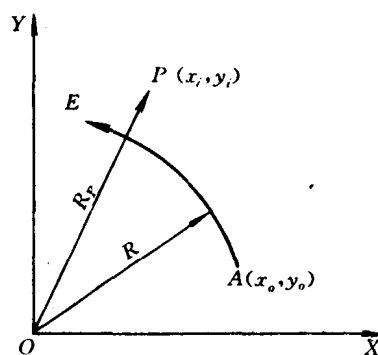


图 1-14 逐点比较法逆圆插补图

(2) 坐标进给与新偏差计算 若  $P_i$  点在圆弧外侧或圆弧上时, 则偏差函数  $F_i \geq 0$ , 应向  $-x$  走一步。若  $P_i$  点在圆弧内侧时, 则偏差函数  $F_i < 0$ 。应向  $+y$  走一步。

用递推法推算下一步新的偏差。若加工点  $P_i(x_i, y_i)$  在圆弧外或圆弧上, 则向  $-x$  走一步, 移到新的加工点  $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ ,

则

$$\begin{aligned}x_{i+1} &= x_i - 1 \\ y_{i+1} &= y_i\end{aligned}$$

新点  $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$  的偏差为

$$F_{i+1} = (x_i - 1)^2 + y_i^2 - R^2$$

整理得  $F_i = F_i - 2x_i + 1$ , 如图 1-15a 所示。

若加工点  $P_i(x_i, y_i)$  在圆弧内, 应向  $+y$  走一步。移到新的加工点  $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ , 则

$$\begin{aligned}x_{i+1} &= x_i \\ y_{i+1} &= y_i + 1\end{aligned}$$

新点的偏差为

$$F_{i+1} = x_i^2 + (y_i + 1)^2 - R^2$$

整理得  $F_{i+1} = F_i + 2y_i + 1$ , 如图 1-15b 所示

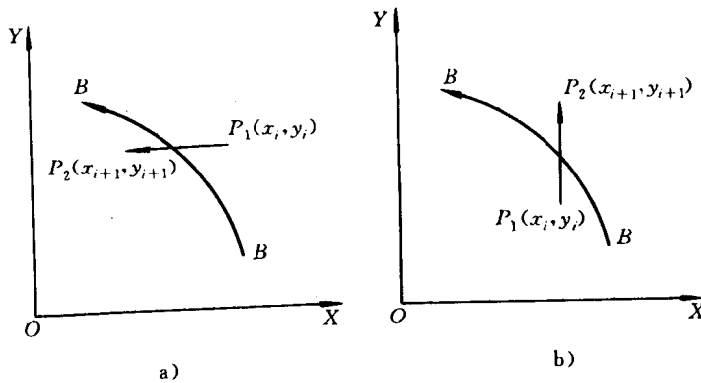


图 1-15 第 I 象限逆圆插补进给方向

a) 刀具在圆弧外侧 b) 刀具在圆弧内侧

(3) 终点判别 与直线插补相同, 总的循环次数应与两个坐标的总行走步数相等。即

$$i = N = x_c^2 - x_s^2 + y_c^2 - y_s^2$$

上面的讨论只限于第 I 象限, 其他三个象限的插补运算可仿照第 I 象限获得。除逐点比较法外, 还有数字积分法同样较为成熟, 并得到广泛应用。在上述两种方法的基础上经改进, 又产生了比较积分法, 矢量判别法和最小偏差法等。

### 三、数控指令

常用的数控指令有准备功能指令 G, 坐标功能指令 X、Y、Z, 辅助功能指令 M, 进给功能指令 F, 主轴转速指令 S 和刀具功能指令 T 等。

#### 1. 准备功能指令

准备功能指令, 又称 G 指令, 是由字母 G 为首, 后跟二位数字 (G00~G99) 组成, 共 100 种, 见表 1-3。

#### 2. 坐标功能指令

坐标功能指令, 又称尺寸指令。用来设定机床各坐标的位移量。它一般使用 X、Y、Z、U、V、W 等为首, 后面跟“+” (正号) 或“-” (负号) 及一串数字。

#### 3. 进给功能指令

表 1-3 部分准备功能指令

代 码	功 能	说 明	
G00	点定位	以最快的速度运动, 原给定 F 不起作用	
G01	直线插补	两个或多个坐标的联动	
G02	顺时针圆弧插补		
G03	逆时针圆弧插补		
G04	暂停		
G06	抛物线插补		
G17	X-Y 平面选择		给圆弧插补、刀补或其他功能规定平面
G18	Z-X 平面选择		
G19	Y-Z 平面选择		
G33	等螺距螺纹切削		
G34	增螺距螺纹切削		
G35	减螺距螺纹切削		
G40	刀补、刀偏注消	中止所有刀补、刀偏指令	
G41	刀具补偿—左	沿刀具运动方向看, 刀具在工件左侧	
G42	刀具补偿—右	沿刀具运动方向看, 刀具在工件右侧	
G43	刀具补偿—正	刀偏是增加坐标尺寸	
G44	刀具补偿—负	刀偏是减小坐标尺寸	
G45	刀具偏置+/+	用于表示刀具偏置的数值(预先在控制机上给定)在相应的一个或几个程序段中为加减或零, 并可用于机床上任意两个预定的坐标	
G46	刀具偏置+/-		
G47	刀具偏置-/-		
G48	刀具偏置-/+		
G49	刀具偏置 0/+		
G50	刀具偏置 0/-		
G51	刀具偏置 +/0		
G52	刀具偏置 -/0		
G60	准确定位 1 (精)		用于一、二个规定的公差范围内定位。
G61	准确定位 2 (中)		若有必要, 也可选择趋近方向
G62	快速定位 (粗)	为了省时, 在较大公差范围内定位	
G63	攻 丝		
G68	内角的刀偏	按工件形状 (内角或外角) 增加或减少坐标尺寸	
G69	外角的刀偏		
G80	固定循环注消		
G81	固定循环开始		
G89	固定循环		
G90	绝对尺寸		
G91	相对尺寸		
G92	预置寄存	修改或设置规定尺寸、坐标位置寄存	
G93	时间倒数、进给率	在地址符 F 后的数值, 等于执行这些程序段时间的倒数	
G94	每分钟进给	进给率单位: mm/min 或 in/min <sup>①</sup>	
G95	主轴每转进给	进给率单位: mm/r 或 in/r <sup>①</sup>	
G96	恒线速度	主轴速度以 m/min、foot/min 表示 <sup>①</sup>	
G97	每分钟转速	注消 G96 指令	

① 1in=0.0254m 1ft=0.3048m

进给功能指令，又称 F 指令，用来指定刀具相对工件运动的速度。是由 F 为首其后跟一串数字代码。可分为三位数代码法，二位数代码法，一位数代码法和直接指定法。

#### 4. 主轴转速指令

主轴转速指令，又称 S 指令，用来指定主轴转速，单位是转/分 (r/min)。它以字母 S 为首，后跟一串数字。它和 F 指令一样，有三位代码法，二位代码法，一位代码法和直接指定法。

#### 5. 刀具功能指令

刀具功能指令，又称 T 指令。在系统具有换刀功能时，T 指令用来选择替换的刀具，它以 T 为首，后跟二位数字。数字代表刀具编号。

#### 6. 辅助功能指令

辅助功能指令，又称 M 指令，是由字母 M 为首，后跟二位数字组成 (M00~M99)，共 100 种，见表 1-4。

表 1-4 部分辅助功能指令

代 码	功 能	说 明
M00	程序停止	完成程序其他指令，停止主轴、切削液
M01	计划停止	由数控柜开关位置确定该指令
M02	程序结束	停止主轴、切削液、进给、机床复位
M03	主轴顺时针方向	启动主轴，按右旋螺纹进入工件方向旋转
M04	主轴逆时针方向	启动主轴，按左旋螺纹进入工件方向旋转
M05	主轴停止	停止主轴并关闭切削液
M06	换刀	手动或自动换刀，不包括刀具选择
M07	2号切削液开	
M08	1号切削液开	
M09	冷却液关	注消 M07、M08、M50、M51
M10	夹紧	
M11	松开	适用于机床滑座、工件、夹具、主轴
M13	主轴顺转、切削液开	
M14	主轴逆转、切削液开	
M19	主轴定向停止	使主轴停止在预定的角度位置上
M60	更换工件	

### 四、典型数控系统介绍

#### 1. 经济型数控系统

经济型数控系统是以 8 位或 16 位 CPU 或者以 8 位或 16 位单片机为主构成的系统。经济型数控系统是根据我国需要自行开发的，主要用于功能简单的车床，冲床等的控制，并大量用于旧机床改造。

#### 2. 中、高档数控系统

(1) 日本 FANUC 数控系统 FANUC 的 CNC 系统有 F0, F10/11/12, F15, F16, F18 等系列，系统特点是：

- 1) 结构上较长时间采用了大板结构，但新产品已采用模块化结构；
- 2) 采用 LSI (大规模集成电路)；



- 3) 高可靠度;
- 4) 性能/价格比高;
- 5) 产品应用范围广;
- 6) CNC 装置的体积越来越小, 采用面板式装配, 内装式 PLC;
- 7) 推进 CNC 装置面向用户开放的功能;
- 8) 各种语言显示;
- 9) 有适应于多种用途的外部设备。

(2) 德国 SIEMENS 的 CNC 系统 SIEMENS 的 CNC 系统有 3、8、810、820、850 及 880 等系列, 系统特点:

- 1) 采用模块化结构, 模块由多层印制电路板制成;
- 2) 在一种 CNC 系统中采用标准硬件模块, 用户可选择不同模块组合来满足各自机床的要求;
- 3) 在硬件上配有多种软件;
- 4) 具有与上级计算机通信功能, 易于进入 FMS;
- 5) 采用 SIMATIC S5 系列可编程控制器, 使用 STEP5 编程语言;
- 6) 有多种语言显示;
- 7) 具有丰富的人机对话功能;
- 8) 具有很强扩展性;
- 9) 电话维修服务, 为用户提供了方便;

### 第三节 数控机床的伺服系统

#### 一、概述

##### 1. 伺服系统的性能要求

伺服系统又称为伺服机构。在机床中, 伺服系统接受来自数控装置插补器的进给脉冲信号, 将它变换、放大、转化为机床工作台的位移。通常对机床伺服系统的性能要求主要有下面四点:

- 1) 进给速度范围要大, 不仅要满足低速切削进给要求, 还要能满足高速进给要求;
- 2) 位移精度要高, 伺服系统的位移精度是指指令脉冲要求机床工作台进给位移量和工作台实际位移量之间的符合程度;
- 3) 工作台跟随指令脉冲移动的跟随误差要小, 即伺服系统的速度响应要快;
- 4) 伺服系统的工作稳定性要好, 要具有较强的抗干扰能力。

##### 2. 伺服系统的分类

伺服系统按有没有测量反馈环节, 可分为开环系统和闭环系统两大类。

(1) 开环控制系统 图 1-16 是开环系统构成图, 由驱动控制环节、执行元件和机床三大部分组成, 其中执行元件对



图 1-16 开环系统构成图

系统的性能有着极大的影响。常用的执行元件是功率步进电动机。我们把以功率步进电动机作为执行元件的开环系统称为步进式伺服系统。而驱动环节主要包括两个电路。一个是环形