

机械工业全国数控培训网络系列教材

数控原理与系统

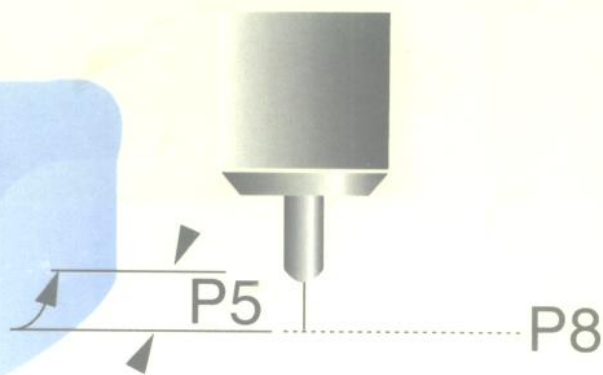
# 数控原理与系统

机械工业全国数控培训网络 组编

李宏胜 主编

# CNC

机



机械工业出版社

本书较为详细地介绍了机床数控系统的工作原理及其应用,并在此基础上从经济型数控系统与中高档数控系统两个方面介绍了其在数控机床应用中的若干主要问题,本书主要内容包括机床数字控制的基本原理、加工程序的预处理、辅助功能的处理,各种插补算法以及步进电动机的控制、经济型数控系统的机床改造等。本书还详细介绍了中高档数控系统进给与主轴控制以及开关量控制的主要技术问题。

本书主要供数控机床制造和使用行业的工程技术人员使用,也可供高等院校机械制造与机电一体化专业的师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

数控原理与系统/李宏胜主编. —北京:机械工业出版社,1997.5

机械工业全国数控培训网络系列教材

ISBN 7-111-05636-1

I. 数… I. 李… III. 数控机床-控制系统-技术培训-教材  
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 09426 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:常燕宾 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>·9印张·218千字

0 001—6 000册

定价:12.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 前 言

自本世纪 70 年代以来, 机床数控 (CNC) 技术取得了飞速发展。机床数控技术综合了现代微电子与计算机技术、自动测量与控制技术、功率半导体与电气传动技术以及先进的机床制造技术, 成为机电一体化主要方面。它已经而且还在继续改变人们传统的机械制造技术的概念。

本书较为详细地介绍了机床数控系统的工作原理及其应用, 并在此基础上着重介绍了经济型数控系统和高档数控系统应用中的若干主要问题。本书主要内容包括机床数字控制的基本原理、加工程序的预处理、辅助功能的处理、各种插补算法以及步进电动机的控制、经济型数控系统的机床改造等。本书还详细介绍了高档数控系统进给与主轴控制以及开关量控制中的主要技术问题。

本书是由机械工业全国数控培训网络组织编写的系列教材之一。本书由李宏胜主编, 高秦生主审。第一、二章由郭文成编写, 第三章由丑幸荣编写, 第四章由李宏胜编写。本书在编写过程中参阅了国内外同行的教材、资料与文献, 在此谨致谢意。

数控技术发展日新月异, 限于编者的水平, 书中定有不少缺点, 恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 数控系统概述</b> .....	1
第一节 机床数字控制的基本原理.....	1
第二节 数控系统的分类.....	4
第三节 数控机床的有关功能规定.....	7
第四节 机床数控技术的发展 .....	10
<b>第二章 数据处理与插补原理</b> .....	14
第一节 加工程序预处理.....	14
第二节 刀具补偿原理 .....	17
第三节 逐点比较插补法 .....	25
第四节 数字积分插补法 .....	38
第五节 数据采样插补法 .....	46
<b>第三章 经济型数控系统及其应用</b> .....	53
第一节 经济型数控系统概述 .....	53
第二节 经济型数控系统的构成 .....	55
第三节 普通机床的数控改造 .....	80
第四节 经济型数控系统的安装.....	89
<b>第四章 中高档数控系统及其应用</b> .....	95
第一节 数控系统的基本硬软件结构 .....	95
第二节 进给运动及其控制.....	108
第三节 主轴驱动及其控制.....	124
第四节 辅助功能与可编程控制器.....	136
参考文献.....	140

# 第一章 数控系统概述

随着科学技术的飞速发展，机械制造技术发生了深刻的变化。传统的普通加工设备已难以适应市场对产品多样化的要求，难以适应市场竞争的高效率、高质量的要求。而以数控技术为核心的现代制造技术，以微电子技术为基础，将传统的机械制造技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术以及网络通信技术有机地结合在一起，构成高度信息化、高度柔性、高度自动化的制造系统。

随着现代微电子技术的飞速发展，微电子器件集成度和信息处理功能不断提高，而价格不断降低。这使得微电子技术、特别是微型计算机在机械制造领域得以广泛应用。微机的信息处理功能与机械装置的动力学功能相结合而构成的机电一体化系统，正在使机械制造产业发生一场革命。微机控制的数控机床的应用与日俱增，柔性加工中心、柔性制造单元及柔性制造系统不断投入使用，使生产面貌发生了根本的变化。

近年来，由于市场竞争日趋激烈，为在竞争中求得生存与发展，各生产企业不仅要提高产品质量，而且必须频繁地改型，缩短生产周期，以满足市场上不断变化的需要。微机控制的数控机床、数控加工中心的高精度、高度柔性及适合加工复杂零件的性能，正好满足当今市场竞争和工艺发展的需要。可以说，微机数字控制技术的应用是机械制造行业现代化的标志，它在很大程度上决定企业在市场竞争中的成败。

## 第一节 机床数字控制的基本原理

### 一、数字控制技术

数字控制 (Numerical Control)，简称 NC，是近代发展起来的一种自动控制技术。数字控制是相对于模拟控制而言的，数字控制系统中的控制信息是数字量，而模拟控制系统中的控制信息是模拟量。

数字控制系统有如下特点：

- 1) 可用不同的字长表示不同精度的信息，表达信息准确。
- 2) 可进行逻辑运算、数学运算，可进行复杂的信息处理。
- 3) 由于有逻辑处理功能，可根据不同的指令进行不同方式的信息处理，从而可用软件来改变信息处理的方式或过程，而不用改动电路或机械机构，从而使机械设备具有“柔性”。

由于数字控制系统具有上述优点，已被广泛应用于机械运动的轨迹控制。轨迹控制是机床数控系统和工业机器人的主要控制内容。此外，数字控制系统的逻辑处理功能可方便地用于机械系统的开关量控制。

数字控制系统的硬件基础是数字逻辑电路。最初的数控系统是由数字逻辑电路构成的，因而被称之为硬件数控系统。随着微型计算机的发展，硬件数控系统已逐渐被淘汰，取而代之的计算机数控系统 (Computer Numerical Control) 简称 CNC。由于计算机可完全由软件来确定数字信息的处理过程，从而具有真正的“柔性”，并可以处理硬件逻辑电路难以处理的复杂

信息，使数字控制系统的性能大大提高。当前微机技术发展很快，性能提高，价格降低，所以微机在数字控制系统中得到广泛应用。

简而言之，用数字化信息进行控制的自动控制技术称为数字控制技术。采用数控技术控制的机床，或者说装备了数控系统的机床称之为数控机床。数控技术是典型的机电一体化技术，它将微电子设备（主要是微机）的信息处理功能和机械的几何运动结合于一体，微机通过数字量去控制机械运动。

## 二、数控机床加工特点

用数控机床进行加工，首先必须将被加工零件的几何信息和工艺信息数字化，按规定的代码和格式编制数控加工程序。然后用适当的方式将此加工程序输入数控系统。数控系统根据输入的加工程序进行信息处理，计算出理想轨迹和运动速度，计算轨迹的过程称为插补。然后将处理的结果输出到机床的执行部件，控制机床运动部件按预定的轨迹和速度运动。

数控机床的加工过程如图 1-1 所示。其中信息输入、信息处理和伺服执行是数控系统的三个基本工作过程，也是数控系统的三个基本组成部分。加上机床本体，数控机床必须具备信息输入、信息处理、伺服执行及机床本体四个基本组成部分。



图 1-1 数控机床加工过程

加工一个零件所需的数据及操作命令构成零件加工程序。加工程序可以用符号或数字形式记录在输入介质上，输入数控系统；也可以通过键盘或通信接口输入数控系统。输入介质（有形的信息载体）一般是穿孔纸带、磁带、磁盘等。输入介质上的数据以程序段形式编排。每一程序段都包含有加工零件某一部分所需的全部信息：加工段长度、形状、切削速度、进给速度以及进刀量等。零件程序编程时所需的尺寸信息（长度、宽度及圆弧半径）和外形（圆弧、直线或其它）取自零件图，尺寸按每一个运动轴，如 X、Y 等，分别给出。切削速度、进给速度及冷却液通断、主轴回转方向、齿轮变速等其它辅助功能均可编程输入。这样，在加工过程中，每执行一个程序段，刀具便完成一部分切削。

信息处理是数控装置的核心任务，由计算机来完成。它的作用是识别输入介质中每个程序段的加工数据和操作命令，并对其进行换算和插补计算。所谓插补，即根据程序信息计算出运动轨迹上的许多中间点的坐标。这些中间点坐标以前一中间点到后一中间点的位移量形式输出，经接口电路向各坐标轴执行部件送出控制信号，控制机床按规定的速度和方向移动，以完成零件的成形加工。

伺服执行部分的作用是将插补输出的位移信息转换成机床的进给运动。数控系统要求伺服执行部件准确、快速地跟随插补输出信息执行机械运动。这样数控机床才能加工出高精度的工件。数控机床常用的伺服驱动元件有功率步进电动机、宽调速直流伺服电动机和交流伺服电动机等。

从上面可以看出，与传统的机床相比，数控系统取代了操作人员的手工操作。传统的机加工中，操作者通过操纵手轮使切削刀具沿着工件移动进行零件加工，加工精度完全由操作者的视力及熟练程度决定，加工精度难以保证。对于外形简单且精度要求较低的零件可用手工操作方式完成，若是二维轮廓或三维轮廓加工，手工操作的普通机床就无能为力了。采用

了数控机床后，原来操作者手工完成的工作都包含在零件程序中了，所以他们只需编制简单的程序，监视机床工作，并作通常的零件更换即可，从而实现了工件的自动加工。

与其它加工方法相比数控机床有以下优点：

- 1) 具有充分的柔性，只需编制零件程序就能加工零件。
- 2) 在切削速度和进给行程的全范围内均可保持精度，且一致性好。
- 3) 生产周期较短。
- 4) 可以加工复杂形状的零件。
- 5) 易于调整机床，与其它制造方法（如自动机床、自动生产线）相比，所需调整时间较少。
- 6) 操作者有空闲时间，可照料其它加工。

数控机床也存在以下问题：

- 1) 造价相对高。
- 2) 维护比较复杂，需要专门的维护人员。
- 3) 需要高度熟练和经过培训的零件编程人员。

### 三、数控系统中轨迹控制的基本原理

数控系统信息处理的主要任务之一是进行轨迹控制。一般情况，用户程序给出了轨迹的起点和终点，以及轨迹的类型（即是直线、圆弧或是其它曲线），并规定其走向（如圆弧是顺时针还是逆时针）。由数控系统在控制过程中计算出轨迹运动的各个中间点，这个计算过程称之为插补。即“插入”、“补上”轨迹运动的各个中间点。插补的概念与常用的“插值法”类似，只是插值法一般只求一个中间点，而插补求的是很多个中间点，而这些中间点的坐标值与理想轨迹的误差应不超过机床的分辨率。插补结果输出运动轨迹的中间点坐标值，机床伺服系统根据此坐标值控制各坐标轴协调运动，走出预定轨迹。

插补工作可用硬件或软件来完成。早期的硬件数控系统（NC）中，都采用硬件的数字逻辑电路来完成插补工作。以硬件为基础的NC系统中，数控装置采用了电压脉冲作为插补点坐标增量输出，其中每一脉冲都在相应的坐标轴上产生一个基本长度单位的运动，在这种系统中，一个脉冲（P）对应着一个基本长度单位（BLU），可表示为

$$P = \text{BLU}$$

这些脉冲可用以驱动开环控制系统中的步进电动机，也可驱动闭环控制系统中的直流伺服电动机。每发送一个脉冲，工作台相对刀具移动一个基本长度单位，我们称之为脉冲当量。脉冲当量的大小决定了加工精度，发送给每一坐标轴的脉冲数目决定了相对运动距离，而脉冲的频率代表了坐标轴速度。

在计算机数控系统（CNC）中，插补工作一般由软件完成。也有用软件进行粗插补，用硬件进行细插补的CNC系统。在CNC系统中，信息以二进制形式编排、处理和存储。二进制的每一位（Bit）代表一个基本长度单位（BLU），表示为

$$\text{Bit} = \text{BLU}$$

比如16位字可表达65536个不同的坐标轴位置。如果系统的分辨率为基本长度单位0.01mm，则这个数字表示的最大运动距离可以达到655.36mm。沿用NC系统脉冲当量的概念，一个脉冲当量与二进制的Bit等价，所以

$$\text{Bit} = P = \text{BLU}$$

即在所有 CNC 系统中，术语位、脉冲及基本长度单位实际上是等效的。

软件插补方法可分为基准脉冲插补和数据采样插补两类。基准脉冲插补法是模拟硬件插补的原理，它把每次插补运算产生的指令脉冲输出到伺服系统，驱动工作台运动。每插补一次，发出一个脉冲，工作台移动一个基本长度单位，即脉冲当量。输出脉冲的最大速度取决于执行一次插补运算所需的时间。该方法虽然插补程序比较简单，但进给速率受到一定的限制，所以常用在进给速度不很高的数控系统或开环数控系统中。基准脉冲插补有多种方法，最常用的是逐点比较插补法、数字积分插补法等。

软件插补的第二类方法是数据采样插补法。使用数据采样插补法的数控系统，其位置伺服通过计算机及测量装置构成闭环，插补结果输出的不是脉冲，而是数据。计算机定时地对反馈回路采样，得到的采样数据与插补程序所产生的指令数据相比较后，输出用误差信号去驱动伺服电动机。采样周期各系统不尽相同，一般取 10ms 左右。采样周期太短计算机来不及处理，太长则会损失信息从而影响伺服精度。

另外还有一种硬件和软件相结合的插补方法。把插补功能分别分配给软件和硬件插补器，前者完成粗插补，即把加工轨迹分为大的段，而硬件插补器完成精插补，进一步密化数据点，完成程序段的加工。该法对计算机的运算速度要求不高，并可余出更多的存储空间以存储零件程序，而且响应速度和分辨率都比较高。

#### 四、数控系统中的辅助功能及实现

用户输入的加工程序代码必须经过译码、刀具补偿、速度处理和辅助功能处理等一系列的数据处理过程，才能得出插补所需的数据。在控制机床运动的过程中，还需对传动系统的间隙和丝杠的螺距误差进行补偿，才能最终控制机床加工出合格的零件。

除轨迹控制外，在加工过程中还需执行一些辅助控制，如主轴的停、开、正转、反转，主轴的转速控制，切削液的开、关，换刀控制等。这些辅助功能有的在一个程序段的插补运动开始之前执行，有的在插补之后执行。主轴的转速控制一般由专门的主轴系统来控制，数控系统只需输出一个转速给定量。这个给定量可以是模拟量，也可以是数字量，视主轴系统而定。其他的辅助功能主要是开关量控制。在简单的系统中，这些开关量的控制逻辑较简单，花费处理时间短，因而由数控系统的微机或继电器逻辑电路来执行。在较复杂的系统中，这些辅助功能的控制较复杂，要花费大量的时间来处理，有的功能还需要与轨迹控制同时执行，因此复杂系统的开关量控制通常由一个可编程控制器来执行。如加工中心、柔性制造单元等，由于刀库、工作台控制较为复杂，所以一般都由专门的一个可编程控制器来进行控制。

## 第二节 数控系统的分类

机床数控系统可按以下几种方式来划分：

- 1) 按机床类型来划分，有点位控制、直线控制与轮廓切削（连续轨迹）控制。
- 2) 按控制器的结构来划分，有硬件数控和计算机数控；计算机数控（当前主要是微机数控），可分为单处理器系统和多处理器系统。
- 3) 按伺服系统控制环路来划分，可分为开环、闭环和半闭环系统。
- 4) 按功能水平来划分，可分为高、中、低（经济型）三类。

### 一、点位、直线与轮廓切削控制



### （一）点位控制系统

点位(PTP)控制系统中工件相对于刀具快速运动,直到加工程序规定的位置后停止运动,运动过程中不进行任何加工。点位数控系统只准确控制坐标运动的最终位置,而运动轨迹不做控制要求。为了精确定位和提高生产率,系统首先高速运行,然后进行减速,使之慢速趋近定位点以减少定位误差。点位控制系统常用于数控钻床、数控镗床、数控冲床和数控测量机等机床中。

### （二）直线控制系统

这类数控系统可以控制若干个轴,但每个轴单独控制,不联动,一般只能同时控制一个轴,不仅控制其定位精度,而且控制其运动速度。这类数控机床只能沿平行于坐标轴直线进行切削加工。

### （三）轮廓切削控制系统

在轮廓切削(连续轨迹)系统中,数控系统控制几个坐标轴同时协调运动(称之为坐标联动),使工件相对于刀具按程序规定的轨迹和速度运动,在运动过程中进行连续切削加工。数控车床、数控铣床和加工中心等用于加工曲线和曲面的机床都必须装备轮廓切削控制系统。

按同时控制的轴数(即联动轴数)分,可分为2轴联动、2.5轴联动、3轴联动、4轴联动、5轴联动等数控机床。2.5轴联动是指三个坐标轴(X, Y, Z)中,任一时刻只能控制任意二轴联动,另一轴则是点位或直线控制。轮廓控制系统一般都有点位和直线控制功能。

## 二、硬件数控和计算机数控

早期的数控系统是由数字逻辑电路来处理数字信息的,也就是硬件数控,习惯上称之为NC系统,于60年代投入使用。计算机数控系统是由计算机来处理数字信息的,通常称之为CNC,于70年代初期引入。随着微电子技术的发展,微处理器的功能越来越强,价格越来越低,所以现代数控系统一般都用微机进行控制,因而有人称这类数控系统为微机数控系统(MNC)。

硬件数控因其功能少,线路复杂,可靠性低等缺点,早已被淘汰。在一些特别老的设备上,可能还能见到硬件数控系统。用小型计算机控制的数控系统也已经过时,在我国很少能见到。现代数控系统的主流是微机数控系统。

随着机械制造技术的发展,机械制造业要求数控系统具有复杂功能、高进给速度和高加工精度。随着微处理器的价格降低,多个微处理器在一个数控系统中,可以并行完成单微处理器难以完成的复杂功能,而且速度快,有较高的性能价格比。基于功能、价格等因素权衡,多微处理器的数控系统得到了迅速发展。微机数控系统根据一个系统中微处理器的多少,可分为单处理器系统和多处理器系统。

## 三、开环数控系统和闭环数控系统

### （一）开环数控系统

这类数控系统的伺服系统是开环的,没有检测反馈装置,数控装置发出的指令信号流是单向的,所以不存在稳定性问题。因为无位置反馈,所以精度不高。这种系统一般用功率步进电动机做伺服驱动元件。当插补结果需要某个轴运动一个单位长度时,向该轴伺服系统输出一个脉冲,经环形分配和功率放大后驱动步进电动机转动一步,通过丝杠转动使机床运动部件运动一个单位长度。这个单位长度通常称之为脉冲当量。开环数控系统结构如图1-2所示。

开环数控系统具有工作稳定、调试方便、维修简单、价格低廉等优点，在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用。在我国，经济型数控机床一般都采用开环数控系统。

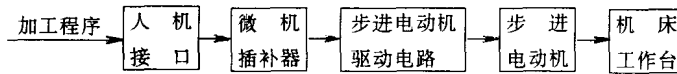


图 1-2 开环数控系统结构

## (二) 闭环数控系统

闭环数控系统框图如图 1-3 所示。闭环数控系统装有反馈检测装置，在加工中随时检测移动部件的实际位置。插补得出的指令位置值与反馈的实际位置相比较，根据其差值控制电动机的转速，进行误差修正，直到位置误差消除为止。采用闭环系统可以消除由于机械传动部件的精度误差给加工精度带来的影响，所以可以得到很高的精度。但是，由于许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙都是非线性的，它们包含在位置环内，很容易造成系统的不稳定，使闭环系统设计和调整都相当困难。这种全闭环系统主要用于精度要求很高的镗铣加工中心、超精车床、超精磨床等。

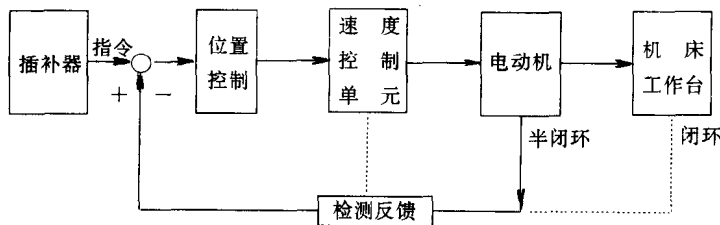


图 1-3 闭环数控系统结构

## (三) 半闭环数控系统

为了排除机械传动环节的非线性对系统稳定性的影响，大多数数控机床采用半闭环系统。半闭环系统的检测元件安装在伺服电动机或丝杠的端部，也就是说，反馈信号取自电动机轴而不是机床的最终运动部件。半闭环数控系统的框图如图 1-3 所示。这种系统闭环环路内不包括机械传动环节，因此可获得稳定的控制特性。而机械传动环节带来的误差，可用补偿的办法消除，因此仍可获得满意的精度。

## 四、按功能的水平分类

按功能水平可以把数控系统分为高、中、低三档。这种分法没有明确的定义和确切的界限。数控系统（或数控机床）的水平高低由主要技术参数、功能指标和关键部件的功能水平来确定。通常可用以下几方面做为评价数控系统档次的参考条件。

### (一) 分辨率和进给速度

分辨率为  $10\mu\text{m}$ ，进给速度为  $8\sim 15\text{m}/\text{min}$  为低档；分辨率为  $1\mu\text{m}$ ，进给速度为  $15\sim 20\text{m}/\text{min}$  为中档；分辨率为  $0.1\mu\text{m}$ ，进给速度为  $15\sim 20\text{m}/\text{min}$  为高档。

### (二) 坐标联动功能

低档最多 2~3 轴联动，中、高档联动轴为 3~5 轴以上。

### (三) 显示功能

低档一般只有数码管显示或简单的 CRT 字符显示。中档的 CRT 显示有图形功能。高档

的一般有三维动态图形显示功能。

#### (四) 通信功能

低档数控系统一般无通讯功能；中档系统有 RS232 或 DNC（直接数控）通信接口；高档系统有 MAP（制造自动化协议）等高性能通信接口，具有联网功能。

#### (五) 主 CPU 档次

低档数控系统一般采用 8 位 CPU，中、高档系统采用 16 位以上的微处理器为主 CPU。

此外，进给伺服系统水平也是衡量数控系统档次的条件之一。

经济型数控系统是相对于标准型数控系统而言的，不同时期，不同国家含义是不一样的。根据实际使用要求，合理简化系统，降低成本，即为经济。我国现阶段所谓的经济型数控系统，大多指开环数控系统而言。为区别于经济型数控，把功能较齐全的数控系统称为全功能数控系统，或称标准型数控系统。

### 第三节 数控机床的有关功能规定

数控机床的核心是数控系统，而数控系统的核心是执行信息处理功能的计算机（通常是微机），它是指挥机床进行自动加工的司令部。反过来，数控系统的控制功能又是为机床加工过程服务的。研究数控系统，首先应该清楚系统的控制要求是什么，也就是要清楚系统要实现什么功能，这就必须弄清数控机床的有关规定。

#### 一、数控机床程序编制的有关规定

数控机床进行切削加工，其根据是数控加工程序。人们根据零件图样，编制出正确的零件加工程序输入数控系统，数控系统才能控制机床加工出符合图样要求的零件。零件加工程序正确性有两个方面：一是语法正确，即数控系统能识别；二是语义正确，即程序准确表达零件加工要求。输入正确的程序，数控机床才能加工出符合零件图样要求的零件来。

##### 程序信息载体和代码

数控机床的程序输入可分为手动和自动输入两种方式。手动输入一般是通过键盘输入。自动输入可用纸带、磁带、磁盘等信息载体输入，也可以用通信方式输入。当前纸带输入方式用得较多。随着微机及 CAD/CAM 技术的发展，越来越多地使用通信输入方式。

一篇文章由若干句子组成，句子由单词组成，单词又由字组成。零件加工程序就是一篇用数控语言描述零件加工过程的文章。它由若干个程序段（句子）组成，程序段由若干指令代码（单词）组成，指令代码又是由字母和数字组成，这些字母和数字相当于文章中的字。即字母和数字组成指令代码，指令代码组成程序段，程序段组成程序。一般程序段的格式为：

N\_\_ G\_\_ X\_\_ Y\_\_ Z\_\_ F\_\_ S\_\_ T\_\_ M\_\_

程序号 准备功能 坐标值 进给速度 主轴 刀具 辅助功能

数控机床常用的功能指令代码可以分为两大类。一类是准备功能代码，即 G 代码。另一类是辅助功能代码，即 M 代码。G 代码和 M 代码是数控加工程序中，描述零件加工工艺过程的各种操作和运行特征的基本单元，是程序的基础。我国机械工业部根据 ISO 标准制定了 JB3208-83《数控机床穿孔带程序段格式中的准备功能 G 代码和辅助功能 M 代码》标准，如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 G 功能代码

代码 (1)	模态代码组别 (2)	功 能 (3)	代码 (1)	模态代码组别 (2)	功 能 (3)
G00	a	点定位	G50	(d)	刀具偏置 0/-
G01	a	直线插补	G51	(d)	刀具偏置 +/0
G02	a	顺时针圆弧插补	G52	(d)	刀具偏置 -/0
G03	a	逆时针圆弧插补	G53	f	直线偏移, 注销
G04		暂停	G54	f	直线偏移 X
G05		不指定	G55	f	直线偏移 Y
G06	a	抛物线插补	G56	f	直线偏移 Z
G07		不指定	G57	f	直线偏移 XY
G08		加速	G58	f	直线偏移 XZ
G09		减速	G59	f	直线偏移 YZ
G10~G16		不指定	G60	h	准确定位 1 (精)
G17	c	XY 平面选择	G61	h	准确定位 2 (中)
G18	c	ZX 平面选择	G62	h	快速定位 (粗)
G19	c	YZ 平面选择	G63		攻螺纹
G20~G32		不指定	G64~67		不指定
G33	a	螺纹切削, 等螺距	G68	(d)	刀具偏移, 内角
G34	a	螺纹切削, 增螺距	G69	(d)	刀具偏移, 外角
G35	a	螺纹切削, 减螺距	G70~G79		不指定
G36~G39		永不指定	G80	e	固定循环注销
G40	d	刀具补偿/偏置注销	G81~G89	e	固定循环
G41	d	刀具左补偿	G90	j	绝对尺寸
G42	d	刀具右补偿	G91	j	增量尺寸
G43	(d)	刀具正偏置	G92		预置寄存
G44	(d)	刀具负偏置	G93	k	时间倒数, 进给率
G45	(d)	刀具偏置 +/+	G94	k	每分钟进给
G46	(d)	刀具偏置 +/-	G95	k	主轴每转进给
G47	(d)	刀具偏置 -/-	G96	i	恒线速度
G48	(d)	刀具偏置 -/+	G97	i	每分钟转数 (主轴)
G49	(d)	刀具偏置 0/+	G98~G99		不指定

G 代码是使数控机床准备好某种运动方式的指令。如快速定位、直线插补、圆弧插补、刀具补偿、固定循环等。G 代码由地址 G 及其后的两位数字所组成, 从 G00 到 G99 共 100 种。G 代码分模态代码和非模态代码。表 1-1 中序号 (2) 中的 a、c、d、e、h、k、i 各字母所对应的为模态代码。它表示在程序中一经被应用 (如 a 组的 G01), 直到出现同组 (a 组) 的任一 G 代码 (如 G02) 时才失效。否则该指令继续有效。模态代码可以在其后的程序段中省略不写。非模态代码只在本程序段中有效。表中“不指定”代码, 在未指定新的定义之前, 由

数控系统设计者根据需要定义新的功能。

表 1-2 M 功能代码

代 码	功能与程序段运动同时开始	功能在程序段运动完后开始	功 能	代 码	功能与程序段运动同时开始	功能在程序段运动完后开始	功 能
(1)	(2)	(3)	(3)	(1)	(2)	(3)	(4)
M00		#	程序停止	M32~M35	#	#	不指定
M01		#	计划停止	M36	#		进给范围 1
M02		#	程序结束	M37	#		进给范围 2
M03	#		主轴顺时针方向	M38	#		主轴速度范围 1
M04	#		主轴逆时针方向	M39	#		主轴速度范围 2
M05		#	主轴停止	M40~M45	#	#	不指定或齿轮换挡
M06	#	#	换刀	M46~M47	#	#	不指定
M07	#		2 号切削液开	M48		#	注销 M49
M08	#		1 号切削液开	M49	#		进给率修正旁路
M09		#	切削液关	M50	#		3 号切削液开
M10	#	#	夹紧	M51	#		4 号切削液开
M11	#	#	松开	M52~M54	#	#	不指定
M12	#	#	不指定	M55	#		刀具直线位移, 位置 1
M13	#		主轴顺时针方向切削液开	M56	#		刀具直线位移, 位置 2
M14	#		主轴逆时针方向切削液开	M57~M59	#	#	不指定
M15	#		正运动	M60		#	更换工件
M16	#		负运动	M61	#		工件直线位移, 位置 1
M17~M18	#	#	不指定	M62	#		工件直线位移, 位置 1
M19		#	主轴定向停止	M63~M70	#	#	不指定
M20~M29	#	#	永不指定	M71	#		工件角度位移位置 1
M30		#	纸带结束	M72	#		工件角度位移位置 1
M31	#	#	互锁旁路	M73~M89	#	#	不指定
				M90~M99	#	#	永不指定

M 代码主要用于数控机床的开关量控制。如主轴的正、反转，切削液开、关，工件的夹紧、松开，程序结束等。M 代码从 M00 到 M99 共 100 种。

指令代码中的字母和数字在程序载体上和计算机中用二进制编码表示。纸带上的有孔的地方表示“1”，没孔的地方表示“0”，一排孔表示一个字母或数字。ISO 代码的二进制编码方式与美国标准信息交换码（ASCII 码）编码方式一致。

## 二、数控机床的坐标系和运动方向的规定

在数控机床中，机床直线运动的坐标轴 X、Y、Z 按照 ISO 和我国的 JB3051—82 标准，规定为右手笛卡尔坐标系。三个回转运动 A、B、C 相应的表示其轴线平行于 X、Y、Z 的旋转运动，如图 1-4 所示。X、Y、Z 的正方向是使工件尺寸增加的方向，即增大工件和刀具距离

的方向。通常以平行于主轴的轴线为 Z 轴（即 Z 坐标运动由传递切削动力的主轴所规定），而 X 轴是水平的，并平行于工件的装卡面，最后 Y 坐标就可按右手笛卡尔坐标系来确定。旋转运动 A、B、C 的正向，相应地为在 X、Y、Z 坐标正方向上按右螺纹前进的方向。上述规定是工件固定、刀具移动的情况。反之若工件移动，则其正方向分别用 X'、Y'、Z' 表示。通常以刀具移动时的正方向作为编程的正方向。

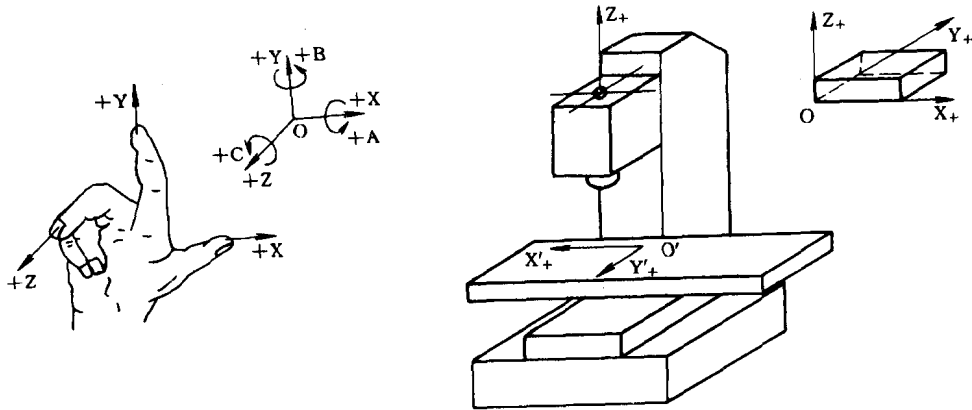


图 1-4 数控机床坐标系

## 第四节 机床数控技术的发展

### 一、数控机床的产生和数控技术的发展过程

采用数字控制技术进行机械加工的思想，最早是 40 年代初提出的。当时，美国北密执安的一个小型飞机承包商派尔逊斯公司 (Parsons Corporation) 在制造飞机框架和直升飞机的机翼叶片时，利用全数字电子计算机对叶片轮廓的加工路径进行了数据处理，并考虑了刀具半径对加工路径的影响，使得加工精度达到  $\pm 0.0015\text{in}$ 。在当时的水平来看，是相当高的。

1952 年，美国麻省理工学院成功的研制出一台三坐标联动的试验形数控铣床，这是公认的世界第一台数控机床，当时的电子元件是电子管。

1959 年，开始采用晶体管元件和印刷电路板。出现了带自动换刀装置的数控机床，称为“加工中心”。从 1960 年开始，其它一些工业国家，如德国、日本也陆续开发生产出了数控机床。

1965 年，数控装置开始采用小规模集成电路，使数控装置的体积减小，功耗降低，可靠性提高。但仍然是硬件逻辑数控系统 (NC)。

1967 年，英国首先把几台数控机床联接成具有柔性的加工系统，这就是最初的 FMS (Flexible Manufacturing System 柔性制造系统)。

1970 年，在美国芝加哥国际机床展览会上，首次展出了用小型计算机控制的数控机床，这是第一台计算机控制的数控机床 (CNC)。

1974 年，微处理器直接用于数控系统，促进了数控机床的普及应用和数控技术的发展。

80 年代初，国际上出现了以加工中心为主体，再配上工件自动装卸和监控检测装置的

FMC (Flexible Manufacturing Cell 柔性制造单元)。FMC 和 FMS 被认为是实现计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System) 的必经阶段和基础。

## 二、我国数控机床发展情况

我国从 1958 年开始研究数控技术,一直到 60 年代中期处于研制、开发阶段。

1965 年,国内开始研制晶体管数控系统。60 年代末至 70 年代初研制成功 X53K-1G 数控铣床、CJK-18 数控系统和数控非圆齿轮插齿机。

从 70 年代开始,数控技术在车、铣、钻、镗、磨、齿轮加工、电加工等领域全面展开,数控加工中心在上海、北京研制成功。但由于电子元器件的质量和制造工艺水平低,致使数控系统的可靠性、稳定性问题没有得到解决,因此未能广泛推广。这一时期,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。

80 年代我国先后从日本、美国等国家引进了部分数控装置和伺服系统技术,并于 1981 年在我国开始批量生产。

在此期间,我国在引进、消化吸收的基础上,跟踪国外先进技术的发展,开发出了一些高档的数控系统,如多轴联动数控系统、分辨率为  $0.02\mu\text{m}$  的高精度数控系统、数字仿形系统、为柔性单元配套的数控系统等。为了适应机械工业生产不同层次的需要,我国开发出了多种经济型数控系统,并得到了广泛应用。现在,我国已经建立了中、低档数控机床为主的产业体系。

## 三、机床数控技术的发展趋势

### (一) 数控装置

数控技术的关键因素是数控装置,即数控系统信息处理部分的功能、速度和可靠性。数控装置随微机技术和相应软件技术的发展,也得到了很快发展。

#### 1. 数控系统中的微机的发展

目前,许多数控系统采用多个 CPU 结构,因此,高性能的计算机数控系统可以同时控制十几个轴,甚至几十个轴(包括坐标轴、主轴与辅助轴),并且前台的加工控制和后台的程序编辑可以同时进行。有的数控系统采用交互图形编程,可利用数控系统的人机对话功能,直接将零件图上的几何参数输入数控系统,而不需用功能代码进行编程。有的系统还有三维图形模拟和加工轨迹图形跟踪功能,可使操作者及早发现刀具干涉等错误。

数控系统中微处理器的字长不断提高,由最早的 8 位机,经 16 位机,到目前广泛采用的 32 位机,换代很快。

就数控系统的微机来说,有采用专用微机和通用微机两种发展趋势。前者是采用生产厂家自行开发的专用微机、专用芯片,这是生产厂家保持其数控技术的优势所采取的策略。因为是专有技术,其硬件和软件技术为厂家所专有,这些技术是经多年的积累和发展起来的,别的厂家很难掌握和模仿,即使是其子公司或合资厂,也必须受其专有技术的制约。后者采用通用微机和通用芯片,这是近年来某些数控系统生产厂家所采用的策略。微机技术发展很快,用通用微机技术开发数控系统可以得到强有力的硬件和软件的支持,而这些软件、硬件技术是通用的、可得到的,这样可以避开专有技术的制约,在较短时间内达到较高水平。

为了适应 FMC (柔性制造单元)、FMS (柔性制造系统) 以及进一步联网组成 CIMS (计算机集成制造系统) 的通信要求,现代数控系统的微机都具有 RS232 或 RS422 串行通信接口。高档数控系统具有 DNC 或 MAP 接口,可以实现上级计算机对多台数控系统的直接控制。

为了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系统的联网需要,数控系统的各生产厂家纷纷采用 MAP 工业控制网络,为数控系统进入 FMS 及 CIMS 创造条件。

## 2. 数控伺服系统的发展

伺服系统是数控系统的重要组成部分。伺服系统的静态和动态性能直接影响数控机床的定位精度、加工精度和位移速度。当前伺服系统的发展趋势是,直流伺服系统将被交流数字伺服系统所代替。伺服系统的速度环、位置环及电流环都已实现了数字化。并采用了新的控制理论,实现了不受机械负荷变动影响的高速响应系统。其技术发展如下。

(1) 前馈控制技术 过去的伺服系统将指令位置 and 实际位置的偏差乘以位置环增益作为速度指令,去控制电动机的速度。这种方式总是存在着位置跟踪滞后误差,使得在加工拐角及圆弧时加工情况恶化。所谓前馈控制就是在原来的控制系统上加上速度指令的控制,这样使跟踪滞后误差大大减小。

(2) 机械静、动摩擦的非线性补偿控制技术 机床的动、静摩擦的非线性会导致爬行现象。除采取措施降低静摩擦外,新型的数控伺服系统具有自动补偿机械系统静、动摩擦非线性的控制功能。

(3) 伺服系统的速度环和位置环都采用软件控制 采用软件控制,更具有柔性,能适应不同类型的机床,并能实现复杂的控制算法,以适应高性能控制的要求。

(4) 采用高分辨率的位置检测装置 如采用高分辨率的脉冲编码器,内装微处理器组成的细分电路,使得分辨率大大提高。

(5) 补偿技术得到发展和广泛应用 现代数控机床利用 CNC 数控系统的补偿功能,对伺服系统进行了多种补偿,如轴向运动误差补偿、丝杠螺距误差补偿、齿轮间隙补偿、热补偿和空间误差补偿等。

就伺服系统方面来看,老牌的数控系统厂家都用自己开发的专用大规模集成芯片来控制。但随着伺服技术的发展,采用通用的高速数字信号处理机实现的全数字伺服系统将成为主流。此外,伺服系统用的各种芯片也随着伺服技术的发展被开发出来,成为市面上可以买到的商品,供数控伺服系统制造厂家选用。

## 3. 程序编制方面的发展

编程方面的发展有以下几个特点:

(1) 脱机编程发展到在线编程 传统的编程是脱机进行的。可以用手工编程,也可用计算机辅助编程或自动编程,编制完的程序再输入给数控系统。现代的数控系统一般是多 CPU 的,它将自动编程、程序编辑修改、图形模拟等一系列的编程功能置入数控系统,由数控系统中的一个 CPU 来处理。这样,可以作到前台加工、后台编程同时进行。

(2) 具有机械加工技术中的特殊工艺方法和组合工艺方法的程序编制功能 除了具有圆弧切削、固定循环和仿形循环外,还有宏程序设计功能、会话式自动编程、蓝图编程和实物编程等。

(3) 可以同时处理几何信息和工艺信息 新型的 CNC 数控系统中装有小型的工艺数据库,使得在线编程的过程中,可以自动选择最佳刀具和切削用量。

## 4. 数控机床的检测和监督

数控机床加工过程中进行检测和监督越来越普遍。如采用红外、超声、激光检测装置,对



刀具和工件进行在线检测。若发现工件超差、刀具磨损、破损及时报警等。

#### 5. 自适应控制的应用

自适应控制的目的是要求在随机变化的加工过程中，按照给定的评价指标自动校正自身的工作参数，以达到或接近最佳工作状态。自适应控制的数控机床，能随着加工过程中的条件变化，自动调节工作参数，如伺服系统的参数、切削用量等，使加工过程达到或接近最佳状态。