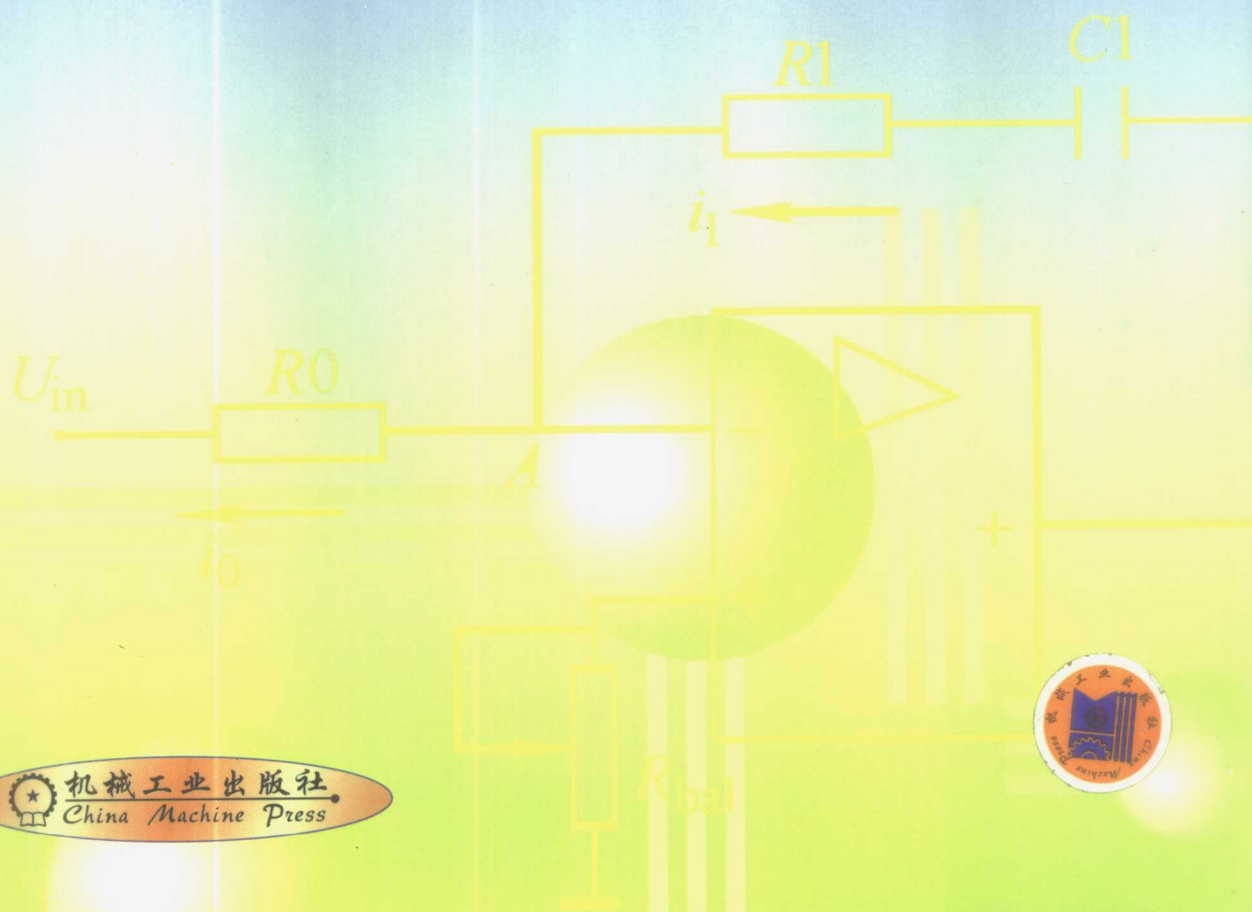


B 高等学校教材

# 数控与电控技术

孙志永 赵砚江 主编



机械工业出版社  
China Machine Press



高等学校教材

# 数 控 与 电 控 技 术

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 孙志永 | 赵砚江 |     |
| 副主编 | 傅卫平 |     |     |
| 参 编 | 李启光 | 高 峰 | 祁志生 |
|     | 梁福平 | 朱 涛 | 原大宁 |
| 主 审 | 焦振学 |     |     |



机械工业出版社

本书系统地介绍了数控技术的概念、数控编程、CNC 装置及系统,继电器—接触器和 PLC 控制系统、交直流电动机的调速及伺服系统。

本书共九章,内容含概了原有“数控技术”和“机床电气控制技术”的内容,但不是简单的内容搬家、合并。在编写时,既注意反映我国数控技术和电气控制技术的现状,也注意世界上在此领域中新技术和新发展,使教材具有一定的先进性;既注意基础理论,更注意实用技术和实用技能的培养。

本书以机械设计制造及其自动化专业的本科生为对象编写,也可作为其他相近专业的大学生的教材,同时也可以作为从事数控技术、数控机床、机电一体化技术、机电控制等工作的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数控与电控技术/孙志永,赵砚江主编. —北京:机械工业出版社, 2002. 8  
高等学校教材  
ISBN 7-111-10004-2

I. 数… II. ①孙…②赵… III. ①数控机床-高等学校-教材②电气控制-高等学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 044107 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑:高文龙 版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧  
封面设计:陈 沛 责任印制:闫 焱  
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
2002 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·17.75 印张 437 千字  
0 001—4 000 册  
定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527  
封面无防伪标均为盗版

## 前 言

在当前高校教改中, 为了加强基础, 拓宽专业面, 将相近的专业技术基础课、专业课合并, 去掉旧内容、重复内容, 加入现代技术的新内容, 使之减少学时数, 达到高效率学习的效果, 采取的措施之一是合并旧课, 开设新课。本书就是在这一背景下将原“数控技术”和“机床电气控制技术”合并而产生。

合并不是将原有的内容简单搬家。考虑到原有的“数控技术”教材中, 涉及到交直流电动机的特性、调速及控制, 但由于篇幅限制, 叙述简单, 讲授效果受到限制, 而电气控制技术主要讨论电动机的性能、调速及控制, 包含了数控技术中所需要的内容, 而且全面, 现把两门课的内容有机地结合起来, 减少了重复, 缩短了课时, 又能系统地介绍这部分内容。从组成上讲, 数控设备离不了电动机的驱动, 因此电气控制技术应该是数控技术的一部分内容, 而数控设备也应是电控技术的应用对象, 所以两者合并起来符合科学规律。但数控技术偏重于伺服电动机的控制, 而电气控制含有普通电动机的控制, 因此, 编写时又考虑到它们的独立性。本书在编写时既注意反映我国机床数控和电气控制技术的现状, 也注意世界上在此领域中的新技术和新发展, 使教材具有一定的先进性; 既注意基础理论, 更注意应用技术和技能的培养, 使两者有机地结合起来, 以适应现代经济所需人才的培养。

本教材融合了编写者多年来科研和教学的成果, 如伺服系统设计、PLC 控制等, 也介绍了一些新的技术和产品, 如运动控制技术、英国 REN/SHAW 高精度光栅编码器系统等。这些都对读者的实际应用有所帮助。

本书由孙志永、赵砚江统稿和定稿, 由北京理工大学焦振学教授主审。参加编写的人员有: 孙志永编写第一、九章, 赵砚江编写第二章, 傅卫平、高峰编写第三章, 李启光、祁志生编写第四章, 李启光编写第五章, 梁福平编写第六章, 朱涛编写第七章, 原大宁编写第八章。

本书在内容上力求机与电、弱电与强电、模拟与数字、理论与实际、基础与专业相结合。由于编者的水平有限, 书中定有缺点和错误, 恳请读者批评、指正!

编者

2002 年 5 月

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第一章 概述</b> .....          | 1   |
| 第一节 数控技术的基本概念 .....          | 1   |
| 第二节 数控技术的发展历史及趋势 .....       | 3   |
| 第三节 电控技术 .....               | 6   |
| 习题与思考题 .....                 | 6   |
| <b>第二章 数控加工程序编制</b> .....    | 7   |
| 第一节 程序编制的基本概念 .....          | 7   |
| 第二节 常用准备功能指令的编程方法 .....      | 17  |
| 第三节 数控车床的程序编制 .....          | 25  |
| 第四节 数控铣床的程序编制 .....          | 32  |
| 第五节 计算机辅助编程(自动编程) .....      | 35  |
| 第六节 程序编制的数学处理 .....          | 41  |
| 习题与思考题 .....                 | 46  |
| <b>第三章 数控装置及系统</b> .....     | 48  |
| 第一节 CNC 系统的组成 .....          | 48  |
| 第二节 CNC 装置的硬件结构 .....        | 50  |
| 第三节 CNC 装置的软件结构 .....        | 52  |
| 第四节 CNC 的体系结构 .....          | 60  |
| 第五节 CNC 系统中的插补 .....         | 63  |
| 第六节 CNC 系统中的刀具半径补偿 .....     | 75  |
| 第七节 典型 CNC 系统介绍 .....        | 81  |
| 习题与思考题 .....                 | 92  |
| <b>第四章 继电器—接触器控制系统</b> ..... | 94  |
| 第一节 电器基础知识 .....             | 94  |
| 第二节 电气控制线路基本环节 .....         | 99  |
| 第三节 电动机的保护环节 .....           | 104 |
| 第四节 电气控制线路设计的常见问题 .....      | 106 |
| 第五节 电气控制线路的一般设计方法 .....      | 112 |
| 习题与思考题 .....                 | 116 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第五章 可编程序控制器(PLC)</b> .....   | 117 |
| 第一节 综述 .....                    | 117 |
| 第二节 西门子 S7—200 系列 PLC 概述 .....  | 123 |
| 第三节 S7—200 编程指令简介 .....         | 130 |
| 第四节 PLC 编程举例 .....              | 140 |
| 习题与思考题 .....                    | 151 |
| <b>第六章 直流自动调速系统</b> .....       | 152 |
| 第一节 直流电动机的一般调速方法 .....          | 152 |
| 第二节 电力电子学初步 .....               | 156 |
| 第三节 晶闸管—电动机直流自动调速系统 .....       | 172 |
| 第四节 晶体管—电动机直流脉宽调制自动调速系统 .....   | 189 |
| 第五节 集成电路—微机在电动机调速控制系统中的应用 ..... | 193 |
| 习题与思考题 .....                    | 202 |
| <b>第七章 交流调速系统</b> .....         | 203 |
| 第一节 交流异步电动机的一般调速方法 .....        | 203 |
| 第二节 异步交流电动机变频调速系统 .....         | 210 |
| 第三节 变频调速器的应用 .....              | 224 |
| 习题与思考题 .....                    | 232 |
| <b>第八章 数控机床的位置检测元件</b> .....    | 234 |
| 第一节 概述 .....                    | 234 |
| 第二节 旋转变压器 .....                 | 235 |
| 第三节 光栅测量装置 .....                | 236 |
| 第四节 脉冲编码器 .....                 | 241 |
| 习题与思考题 .....                    | 243 |
| <b>第九章 数控机床伺服系统</b> .....       | 244 |
| 第一节 概述 .....                    | 244 |
| 第二节 开环伺服驱动系统 .....              | 247 |

|     |                 |     |              |     |
|-----|-----------------|-----|--------------|-----|
| 第三节 | 闭环伺服驱动系统 .....  | 256 | 习题与思考题 ..... | 272 |
| 第四节 | 位置控制 .....      | 262 | 附录 .....     | 273 |
| 第五节 | 进给伺服系统的性能 ..... | 270 | 参考文献 .....   | 276 |

# 第一章 概 述

## 第一节 数控技术的基本概念

### 一、数控技术

数控技术是采用数字代码形式的信息，按给定的工作程序、运动速度和轨迹，对被控对象进行自动操作的一种技术。如果一种设备的控制过程是以数字形式来描绘的，其工作过程是可编程的，并能在程序控制下自动地进行，那么这种设备就称为数控设备。换句话说，采用了数控技术的控制系统称之为数控系统，采用了数控系统的设备称之为数控设备。数控机床是一种典型的数控设备。由于数控技术是与机床控制密切结合而发展起来的，因此，以往讲数控即指机床数控。本书数控设备均以数控机床为例。随着数控技术的发展，它的应用范围不仅限于机械加工行业中，在仪器仪表、纺织、印刷、包装等众多行业中，都出现了许多数控设备。新近推出的数控设备，在结构上、功能上以及实现的技术手段上都与传统的数控设备有很大的差异，性能指标也有很大的提高。

### 二、数控设备的组成

数控设备是由数控系统和被控对象组成，其框图如图 1-1 所示。

数控系统的硬件包括以下几个部分。

#### 1. 信息载体

信息载体又称为控制介质，是人与被控对象之间建立联系的媒介。在信息载体上存储着数控设备的全部操作信息。信息载体有多种形式，常用的有穿孔带、穿孔卡、磁带、磁盘或拨码开关等。作为人机对话终端设备的操作键盘，也可以视为信息载体。由于目前一般都采用微机数控系统，系统内存容量大大增加，数控系统内存 ROM 中有系统软件，零件程序也能较多地直接保存在数控系统内存 RAM 中。因此对于控制介质，只起到外存储器的作用，它与以前硬件连接的 NC 机床对控制介质的要求是有本质的不同，以前要求数控机床与控制介质同步运行来加工零件。

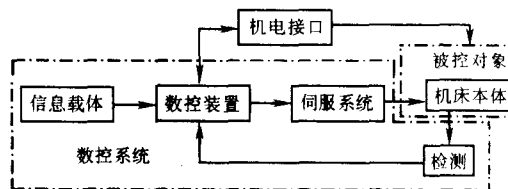


图 1-1 数控设备组成

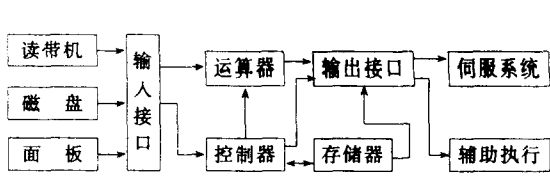


图 1-2 数控装置

#### 2. 数控装置

数控装置接受来自信息载体的控制信息并转换成数控设备的操作（指令）信号。数控装置由输入接口、控制器、运算器、存储器和输出接口等五大部分组成，如图 1-2 所示。

输入接口接受由读带机或操作键盘输出的代码，经译码后分别送往各存储器。控制器从

输入接口接受指令并控制运算器与输出接口。运算器接受控制器的指令和输入接口送来的数据进行插补运算后,将结果送给输出接口。输出接口根据控制器的指令,将运算器送来的运算结果,输送给伺服系统和辅助执行机构。目前数控设备用的数控装置是计算机数控装置,即 CNC 装置。数控装置是数控设备获得高精度的关键设备。

### 3. 伺服系统

伺服系统是数控设备位置控制的执行机构。它的作用是将数控装置输出的位移指令经功率放大后,迅速、准确地控制被控对象的位移量或转角。

### 4. 检测装置

检测装置用来检测数控设备工作机构的位置或者驱动电动机的顺序动作和用作闭环、半闭环系统位置反馈。

### 5. 机电接口电路

机电接口电路通常由 PLC 控制器组成。它执行数控设备上的各种装置(如辅助电动机、电磁铁、离合器、电磁阀等)的开、停、连锁、互锁;数控设备的急停、循环起动、进给保持、行程超限、报警、程序停止、复位、冷却泵起停,强电与弱电的相互转换。这部分是电气传动控制技术的内容。

被控制对象一般是机械装置。根据实现功能的不同,机械装置由各种不同机构和零部件组成。很多零部件已标准化,如滚珠丝杠副、滚动导轨副,同步齿型带传动副等,为机械装置的设计和制造带来方便。

## 三、数控系统的分类

### 1. 按被控对象运动轨迹分

数控系统按被控对象运动轨迹分可分点位控制系统和连续控制系统。

(1) 点位控制系统 被控对象只能由一个点到另一个点作精确定位。定位精度和定位速度是该类系统的两个基本要求。这类被控对象在移动时并不进行加工,而达到定位点后才进行各种加工,故移动的路径并不重要。使用这类系统的数控设备有坐标镗床、数控钻床和数控冲床等。

(2) 连续控制系统或称轮廓控制系统 该类系统能对两个或两个以上的坐标轴同时进行控制,实现任意坐标平面内的曲线或空间曲线的加工,它不仅能控制数控设备移动部件的起点与终点坐标,而且能控制整个加工过程每一点的速度和位移量,即能控制加工轨迹。这种系统在加工过程中需要不断地进行插补运算,并进行相应的速度与位移控制。这类数控设备有数控铣床、数控磨床等。

### 2. 按伺服工作原理分

按伺服系统工作原理可分为开环控制系统、半闭环控制系统和闭环控制系统等。

(1) 开环控制系统 是不带反馈的控制系统,通常用功率步进电动机作为驱动元件。开环系统具有结构简单、成本低廉、调整维护方便等优点,但开环控制系统由于不能对传动误差进行补偿而精度比较低。

(2) 半闭环控制系统 是带有反馈装置的控制系统。常用的结构是由厂家将角位移传感器安装在驱动电动机轴上整体供货,也可在丝杠轴上装角位移传感器,通过检测驱动电动机或丝杠的转角间接测量移动部件的直线位移,并反馈至数控装置中。由于角位移传感器的结构比较简单,安装调整方便,稳定性好,能够达到一定的精度,实用性强,正在广泛应用。与

闭环系统比较不易产生振荡，但精度不如闭环控制系统。

(3) 闭环控制系统 是在数控机床工作台上直接安装位置检测装置，并将检测到的实际位移值反馈到数控装置中，与输入的指令位移值进行比较，用偏差值对伺服系统进行控制。闭环系统能够补偿各种误差，有高的精度。但是由于检测装置的引入，增加了复杂性，且对传动系统的刚性及间隙等因素也提出了较高的要求，以保证系统的稳定性。

#### 四、数控设备的工作原理

数控机床加工过程可以分为以下几个步骤。

##### 1. 程序编制

程序编制是将零件的加工工艺、工艺参数、刀具位移量及位移方向和有关辅助操作，按指令代码及程序格式编制加工程序单，然后，将加工程序单以代码形式记录在信息载体上。程序编制可以是手工编制，也可以是自动编制。对于自动编程，目前已较多的采用了计算机CAD/CAM图形交互式自动编程，通过计算机有关处理后，自动生成的数控程序，可通过接口直接输入数控系统内。

##### 2. 数控代码与译码

数控代码是用来表示数控系统中的符号、字母和数字的专用代码，并组成数控指令。对数控代码进行识别，并翻译成数控系统，能用于运算控制的信号形式称为译码。在计算机数控中，译码之前，先将零件程序存放在缓冲器里。译码时，译码程序依次将一个个字符和相应的数码与缓冲器中零件程序进行比较，若两者相等，说明输入了该字符。译码程序是串行工作的，它较高的译码速度。

##### 3. 刀具轨迹计算

刀具轨迹计算是根据输入译码后的数据段参数，进行刀具补偿计算、绝对值与相对值的换算等，把零件程序提供的工件轮廓信息转换为系统认定的轨迹。

##### 4. 插补运算

插补运算是根据刀具中心点沿各坐标轴移动的指令信息，以适当的函数关系进行各坐标轴脉冲分配的计算。只有通过插补运算，使两个或两个以上坐标轴协调的工作，才能合成所需要的目标位置的几何轨迹，或加工出需要的零件形状。

## 第二节 数控技术的发展历史及趋势

### 一、数控技术的发展历史

由于计算机的诞生，在1952年产生了世界上第一台3坐标立式数控铣床，标志着数控技术发展的开始。因此，数控技术的发展历史，同计算机的发展历史息息相关，也同数控机床的发展历史息息相关。

#### 1. 从数控系统的发展考察数控技术的发展，粗略分为以下几个阶段

第一阶段，1952年至1970年，这一阶段的数控系统采用由硬件电路组成的专用计算机装置，这种数控系统经历了三个时代，即电子管、晶体管和小规模集成电路时代。所采用的器件经过电子管、晶体管和小规模集成电路等几次变革，但各种控制功能，如输入装置、插补运算、控制器等，都是由硬件逻辑电路来实现。控制功能比较简单，使用灵活性较差。

第二阶段，1970年至1974年，由于计算机的迅速发展，性能价格比不断提高，小型计算

机代替了数控系统中硬件构成的专用计算装置。这即是第四代数控系统，即计算机数控系统（CNC）。计算机数控用软件实现了许多数控功能，使数控系统具有更大的适应性、柔性好，计算机的优势在数控系统中得到充分发挥。

第三阶段，1974 年开始，随着采用超大规模集成电路的微处理器迅速发展，数控系统开始采用微型计算机，数控系统发展到第五代。由于微处理器的集成度不断提高，运算速度越来越快，功能越来越丰富。今后微处理器的速度还会提高，数控的功能会有更大的提高，因此除了有特殊要求的系统外，中小型计算机数控均可用微型计算机数控来代替。

微机数控系统的发展，使得数控技术在整个 20 世纪 80 年代得到大规模的发展和应用，但是这种数控系统一直由系统制造厂家进行封闭垄断性生产，使得这类数控产品专用性强，与标准计算机不兼容，通用性、软件移植性和组网通讯能力较差。尤其从 20 世纪 90 年代开始，个人计算机即 PC 机的发展迅猛，它带来的众多成果不能被第五代数控系统及时采用。为了摆脱数控系统的这种局面，现正在向开放式数控系统方向发展，目前朝该方向发展的一个具体表现是基于 PC 的开放式数控系统，即第六代数控系统。这种系统从 20 世纪 80 年代初开始提出研制，直到 20 世纪 90 年代初才得以实现。这类系统结合了 PC 的分析运算能力、大容量存储功能、图文显示优势及组网的灵活性，使得数控系统的使用，具备了较为开放的模式。但是由于 PC 计算机能力的限制，阻碍了这类数控系统朝高速和高精度方向的发展步伐。

20 世纪 80 年代末基于 DSP（Digital Signal Processor）的运动控制技术的突破，为开放式数控系统的发展创造了新的条件。基于 DSP 的运动控制器为核心，融合 PLC 的功能，与标准 PC 机集成的新一代开放式数控系统有可能成为第六代数控系统的主导产品。

## 2. 从数控机床的发展考查数控技术的发展

1) 数控技术是与机床控制紧密结合发展起来的。1952 年在美国产生的三轴铣床就是由世界上第一台计算机控制的数控机床。此后，数控机床就在各国慢慢发展起来。除了数控铣床，也出现了数控车床等。

2) 由于数控技术的发展极大的推进了数控机床的发展，在所有品种的机床单机数控化的同时，出现了一次装夹可完成多道工序加工的数控加工中心（Machining Center，简称 MC）。加工中心是在数控机床基础上增加刀库和自动交换刀具装置（ATC）而构成，自动交换刀具靠机械手完成。加工中心的出现极大地提高了加工效率。如钻、镗、铣复合加工中心，工件一次装夹后可以完成铣、钻、镗、攻螺纹等多道工序加工。在数控车床上增加刀库，增加 C 轴控制就构成车削中心。它除能车、镗外，还能进行端面 and 圆周面上任意部位的钻、铣、攻螺纹。

3) 在加工中心上增加交换工作台或随行托盘或用机器人实现工件物料的自动装卸，便形成柔性制造单元（FMC）。FMC 是在一台加工中心或车削中心的基础上，加上工件的自动存储和交换功能，配装适当的传感器，具有一定监控功能，由计算机数控装置统一控制机床的运行。

4) 在 FMC 上增加自动化仓库和物料的自动传输、必要的工件清洗和尺寸检查，并由高一级的计算机对整个系统进行控制和管理，这样便形成柔性制造系统（FMS）。FMS 是以多台数控机床或 FMC 为核心，通过自动化物流系统将其联接，并统一由计算机和相关软件对其进行控制和管理。一般认为 FMS 应由加工、物流、信息流三个子系统组成，每个子系统可以有分系统。

5) 目前自动化制造技术的发展,不仅需要发展车间制造过程自动化,而且要实现从生产决策、产品设计、市场预测,直到销售的整个生产活动的自动化,这样一个全面完整功能的生产制造系统就是计算机集成制造系统(CIMS),它将一个制造工厂的生产活动进行有机的集成,以实现更高效益、更高柔性的智能化生产。

CIMS 虽然还处在初级阶段,但随着数控技术的不断发展,以及其他科学技术在数控机床中的应用,CIMS 会进一步发展。当然实现 CIMS 的技术关键仍然是人。

## 二、数控技术的发展趋势

随着生产技术的发展,对产品的性能要求越来越高,产品改型频繁,采用多品种小批量生产方式的企业越来越多,这就要求数控机床向着高速化、高精度化、复合化、系统化、智能化、环保化方向发展。要求数控技术满足这些要求,数控技术正向以下方面发展。

### 1. 高速化和高精度化

目前数控机床正向着高速化和高精度化方向发展,主轴转速可达  $10000\sim 40000\text{r/min}$ ,进给速度可达  $30\text{m/min}$ ,快速移动可达  $100\text{m/min}$ ,加速度可达  $1g$ ,换刀时间可达  $1.5\text{s}$ ,加工中心的定位精度约为  $\pm 5\mu\text{m}$ ,有的可达到  $\pm 1\mu\text{m}$ 。

日本开发的超精密非球面加工机砂轮轴转速为  $40000\text{r/min}$ ,采用系统控制,C轴分度为  $0.0001^\circ$ ,X、Y、Z轴控制分辨率达  $1\text{nm}$ 。

北京机床研究所研制的纳米超精车床,采用气浮主轴轴承,加工最大直径为  $\phi 800\text{mm}$ ,长度为  $400\text{mm}$ ,采用纳米级光栅尺全闭环控制,分辨率为  $5\text{nm}$ ,加工零件的圆度为  $0.1\mu\text{m}$ ,面形精度为  $0.2\mu\text{m}/\phi 50\text{mm}$ ,表面粗糙度为  $R_{\text{a}}0.008\mu\text{m}$ (铅材、无氧铜)。

达到这样的速度和精度,数控系统、伺服系统必须采取措施使其有相适应的速度和控制精度。

### 2. 数控系统智能化、信息化

由于微电子技术、超大规模集成电路等各种技术的发展,使数控系统实现智能化变为可能。智能化的数控系统可以解决数控机床的故障诊断和提出排除的方法,也可以更广泛的深入的解决加工中的技术问题。

IT(信息技术)将成为 21 世纪的重要发展潮流,数控机床将会广泛的应用 IT 技术实现控制、监视、诊断、补偿、调整等功能,提高机床无人化、智能化、集成化之水平,利用 IT 网络将机床与工段、车间、工厂、外界数据库等进行联系,进一步实现制造、管理、经营、销售、服务等各方面之间的网络化,也即向计算机集成制造系统方向发展。

数控技术是 CIMS 的重要技术基础。今后要开发面向 CIMS 的新一代 CNC 系统,要研究面向 CIMS 的数控工作站。

### 3. 数控系统开放化

以往的市售数控系统是由生产厂商独自开发,自成一体,是通用性很差的产品。用户处于被动地位,不能根据生产的实际添加或改变系统功能,更不能适应信息技术发展的需要。开放式数控系统正是适应这一要求提出,并在 20 世纪 90 年代初得以实现。这种开放式数控系统以 PC 为核心,系统的所有元件对用户完全开放,用户可以在世界范围内选购自己所需要的 PC 组件,灵活自主地构成自己的系统。PC 技术的应用,使得利用硬盘作为 NC 内存成为可能,同时,从简单的串行口通信到复杂的网络,不同的信息都能得到很好的应用。开放式数控系统已成为数控系统发展的一种趋势,欧、美、日等发达国家都提出了开放式数控系统的开发计划。

### 第三节 电控技术

电控技术就是电气传动控制技术,现在也叫机电传动控制。它的主要内容就是研究各类电动机及其控制。电动机通常分两类,通用电动机和特殊用途的电动机。通用电动机将电能转换成机械能,向被驱动的机械提供动力来源,在应用时,还需要对其进行起停、正反转、制动以及速度控制和保护控制。特殊用途的电动机中,控制电动机是一重要分支,它是在自动控制装置或系统中使用的各种电动机,包括各种交直流伺服电动机、力矩电动机、无刷直流电动机、步进电动机等执行电动机,以及各种信号类电动机如测速发电机等。

电气传动控制系统主要有以下分类方法。

按传动电动机分类为:直流电气传动和交流电气传动。

直流电气传动电动机为直流电动机,交流电气传动电动机为交流异步电动机和同步电动机。

按控制装置分类为:电气控制、磁放大器控制、模拟电子控制和数字控制。

按调速方式分为:有级调速和无级调速。

电气传动技术直接影响工作机械的性能,因此它的发展也受到人们的重视。随着各种科学技术的进步与发展,电气传动技术也得到相应的发展。

由于大功率电力电子器件的发展和矢量控制系统的出现,传统上直流电动机调速传动为主导地位变为交流电动机调速传动为主导地位,这将使交流电动机的优点得到充分的发挥,克服了直流电动机调速使用中的一些不足。

由于计算机技术和数据通讯技术的发展,使电气传动实现了由模拟控制向数字控制的过渡。数字控制系统可以采用最少量的硬件标准单元,不同的软件满足各种控制要求,使电气传动系统的整体性能显著提高。

可编程序控制器(PLC),由于硬件结构简单、安装维修方便、编程容易、工作可靠,既可取代继电器—接触器控制系统实现逻辑顺序控制,又使电气传动向大型多功能方向延伸。

电气传动向着集成化方向发展。电动机的控制部分由于功率半导体器件集成电路的出现而集成化,而最近10多年电气传动控制发展成了运动控制技术。这种技术能将预定的控制方案、规化指令转变成期望的机械运动。运动控制系统使被控机械运动实现精确的位置控制、速度控制、加速度控制、转矩或力的控制,以及这些被控机械量的综合控制。实现这一运动控制功能的电路就在一块运动控制卡或单片集成块上。

电气控制主要研究电动机的控制,电动机包括普通电动机和控制电动机,控制方法有继电器—接触器控制、交直流调速控制、PLC控制,随着电力电子技术的发展,会出现各种各样新的控制方法,这些方法将是数控技术的基础。

#### 习题与思考题

- 1-1 什么叫数控技术?
- 1-2 数控设备由哪几部分组成?数控装置一般由哪几部分组成?
- 1-3 伺服系统的作用是什么?
- 1-4 数控系统按被控对象运动轨迹分为哪几类?各有什么特点?
- 1-5 电气传动控制系统如何分类?

## 第二章 数控加工程序编制

### 第一节 程序编制的基本概念

数控机床是按照事先编制好的加工程序自动地对工件进行加工的高效自动化设备。在数控机床上加工零件，要把被加工零件的全部工艺参数、工艺过程和刀具位移数据编制成零件的加工程序，以一定的代码形式记录在控制介质上，然后用控制介质上的信息控制数控机床的加工。

所谓程序编制，就是将零件的工艺参数、工艺过程、刀具位置移动量与方向以及其他辅助动作（如换刀、切削液、夹紧等），按运动顺序和所用数控机床规定的指令代码及程序格式编成加工程序单（对数控机床的一系列运动或状态指令），再将程序单中的全部内容记录在控制介质上（如穿孔纸带、磁带、磁盘等），然后输入到数控装置中，从而指挥数控机床加工。这种从零件图样到制成控制介质的过程称为数控程序编制。

以下首先讨论数控程序编制的步骤与方法、代码及程序结构。

#### 一、程序编制的一般步骤与方法

图 2-1 表示从零件图样到加工的一般过程：

##### 1. 分析零件图样

首先要分析零件图样，根据零件的材料、形状、尺寸、加工精度、毛坯形状和热处理要求等确定加工方案，选择合适的数控机床。

##### 2. 确定工艺过程

选择适合数控加工的工件和选择合理的加工工艺是提高数控加工技术经济效果的首要因素。那些属于中、小批量，特别是重复轮番投产、表面复杂、加工中需要测量、需要精密钻镗的夹具等类零件，是数控加工最合适的加工对象。在制定零件工艺时，应根据图样对工件的形状、技术条件、毛坯及工艺方案等进行详细分析，从而确定加工方法、定位夹紧及工步顺序，并合理选用机床种类、刀具及切削用量。制订数控加工工艺除考虑通常的一般工艺原则外，还应考虑充分发挥所用数控机床的指令功能，要求走刀路线要短、走刀次数和换刀次数尽可能少、加工安全可靠等。由于零件加工程序是事先编制好的，每次走刀尺寸固定，因此，对零件毛坯的基准面和余量应有一定的要求。

3. 运动轨迹的坐标计算

根据零件图样的几何尺寸、走刀路径以及设定的坐标系计算粗、精加工各运动轨迹关键点的坐标值，诸如运动轨迹的起点与终点、圆弧的圆心坐标尺寸；对圆形刀具，有时还要计算刀心运动轨迹的坐标；对非圆曲线，还要计算逼近线段的交点（也称节点）坐标值，并限制逼近线段在允许误差范围以内。

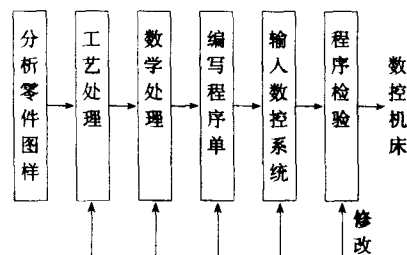


图2-1 程序编制的一般过程

#### 4. 编写加工程序单

根据计算出的运动轨迹坐标值和已确定的运动顺序、刀号、切削参数以及辅助动作,按照数控装置规定使用的功能指令代码及程序段格式,逐段编写加工程序单。在每个程序段之前加上程序段的顺序号,在其后加上程序段结束符号。此外,还应附上必要的加工示意图、刀具布置图、机床调整卡、工序卡以及必要的说明(如:零件名称与图号、零件程序号、加工所用机床型号以及日期等等)。

#### 5. 制备控制介质和输入数控系统

程序单只是程序设计完后的文字记录,还必须将程序单的内容记录在控制数控机床的控制介质上作为数控装置的输入信息。控制介质多为穿孔纸带、磁带、磁盘等。也可将程序单的内容直接用数控装置的键盘键入存储,现在大多数情况是通过网络直接传输到数控系统中。

#### 6. 程序校验和首件试切

程序单和所制备的控制介质必须经过校验和试切削才能正式使用。一般的方法是将控制介质上的内容直接输入到 CNC 装置进行机床的空运转检查。也即在机床上用笔代替刀具,坐标纸代替工件进行空运转画图,检查机床运动轨迹的正确性。在具有屏幕(CRT)的数控机床上进行图形显示,用图形仿真刀具相对工件的运动,则更为直观、方便。这些方法只能检查运动是否正确,不能查出由于刀具调整不当或编程计算不准确而造成加工工件误差的大小。因此,必须用首件试切的方法进行实际切削检查。这不仅可查出程序单和控制介质的错误,还可知加工精度是否符合要求。当发现尺寸有误差时,应分析错误的性质,找到错误原因及时修改程序,或者进行刀具尺寸误差补偿。

以上是数控机床零件加工程序编制的一般内容和步骤。

根据零件几何形状的复杂程度、程序的长短以及编程精度要求的不同,可采用不同的编程方法,主要有手工编程和计算机辅助编程(即自动编程)。

手工编制程序就是如图 2-1 的编程全过程,全部或大部分由人工进行。对于几何形状不太复杂的简单零件,所需的加工程序段不多,坐标计算也简单,程序段长度不太长,出错的概率小时,用手工编程就显得经济而且及时。因此,手工编程至今仍广泛地应用于简单的点位加工及简单的直线与圆弧组成的轮廓加工中。但对于一些复杂零件,特别是具有非圆曲线、曲面的表面(如叶片、复杂模具),或者零件的几何元素并不复杂,但程序编排量很大的零件(如复杂的箱体或一个零件上有几百个矩阵钻孔),或者是需要进行复杂的工步与工艺处理的零件(如数控车削中心和加工中心机床的多工序集中加工),由于这些零件的编程计算相当繁琐,程序量大,手工编程很难以胜任,即使能够编出,往往耗用时间过长,效率低,而且出错概率高。据国外统计,用手工编制这些零件的程序,其编程时间与在机床上实际加工时间之比平均约 30:1,甚至由于加工程序一时编不出来而影响数控机床的开动率。因此,必须解决程序编制的自动化问题,即利用计算机进行辅助编程。

计算机零件辅助编程常称为自动编程。它是使用一台大型或通用计算机配上自动编程相关程序,通过特殊的编程语言,编写零件的源程序,再经过编译和后置处理,即可得到所需的零件加工程序单。编程人员只需根据零件图样要求,用一种直观易懂的编程语言编写一个简短的零件源程序,然后输入到计算机,其余的工作让计算机去自动完成。所编出的程序还可以通过计算机屏幕或自动绘图仪进行刀具轨迹的图形检查。计算机辅助编程可显著减少编

程计算工作量和缩短编程时间,使用也十分方便,零件表面越是复杂,工艺过程越是多样繁琐,其技术经济效益和加工精度就越高,因此,计算机辅助自动编程技术已被广泛应用。

## 二、程序编制有关指令代码

不论何种数控机床的加工,都是将代表各种不同功能的指令代码输入数控装置,经过转换与处理,以控制机床的各种操作。因此,编程人员应熟悉有关指令代码的基本知识。

数控机床经过 50 多年的不断实践与发展,在代码形式、机床坐标系的规定、准备功能和辅助功能的代码以及程序格式等方面已逐步趋向统一。目前,国际标准化组织 (ISO) 已在这方面制订了一系列的标准草案供各成员国或成员集团使用。这对数控机床的设计、使用 (特别是程序编制) 以及产品进入国际市场都会带来方便。我国在标准的制定方面基本沿用 ISO 标准,也制订了相应的数控标准。但必须注意:目前国内外各式各样的数控机床所使用的标准尚未完全统一,有关指令代码及其含义不尽完全相同,编程时务必严格遵守具体机床使用说明书中的规定。

### 1. 穿孔纸带及其代码

数控机床加工程序的输入可以是穿孔纸带、磁带、磁盘、手动数据输入 (MDI) 和通过网络之间传输到数控装置中。

数控机床采用八单位纸带,其标准尺寸可见图 2-2。根据纸带上孔的有、无状态的不同组合,可表示各种不同的信息代码。国际上通用的八单位数控带有 EIA (美国电子工业协会) 代码和 ISO 代码,见附录表 1 (ISO 及 EIA 穿孔带编码表)。

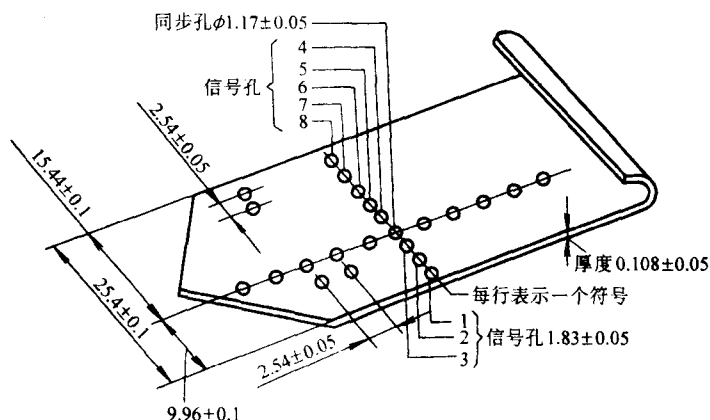


图 2-2 穿孔纸带

编码表中有数字字符 0~9、字母字符 A~Z 及其他符号字符。这些字符根据每排孔的个数及其位置的不同予以区别。在附录表 1 中,“1”表示有孔,“0”表示无孔,从而形成二进制码位,第 3 列和第 4 列之间的连续小孔称中导孔 (或同步孔),用作每排大孔的定位基准,并产生同步信号。

EIA 编码与 ISO 编码的区别之一是: EIA 每行为奇数孔,其第 5 列为补奇列。例如数字 5 按二进制应在第 1 列和第 3 列有孔,但孔为偶数,故在第 5 列补上一只孔成为奇数,若已为奇数,则第 5 列不再补孔;而 ISO 编码则为偶数孔,其第 8 列为补偶列。补奇或补偶的作用是可以检验纸带的孔是否少穿、孔道是否被弄脏、弄坏、堵塞、断裂以及阅读装置线路、元件是否完好。而这些因素影响一只孔信息通过的概率最大。正由于补奇列或补偶列是用作奇

偶校验用的，它并不构成信息代码的组成部分，故通常称的八单位孔带又称为《七单位编码字符》。

字符码孔有一定的规律性。例如在 ISO 编码中（附录表 1），所有数字字符占 5 列和 6 列有孔；字母字符 A~O 则在 7 列有孔，则 P~Z 在 7 列和 5 列都有孔。

考虑到国际上趋向于采用 ISO 编码，我国根据 ISO-840 编码标准制定了 JB3050-82《数控机床用七单位编码字符集》部颁标准，并规定新设计的产品一律采用 JB3050-82 编码标准。

## 2. 数控机床坐标系和运动方向的规定

为使编程方便，使编出的程序对同类型的机床具有通用性，统一规定数控机床坐标轴名称及其运动的正、负方向，可使编程简便，使所编程序对同类型机床有通用性。目前国际上已统一了标准的坐标系。我国也制订了 JB3051-82《数控机床坐标和运动方向的命名》数控标准，它与 ISO-841 等效。

标准的坐标系采用右手直角笛卡儿坐标系（图 2-3）。它规定直角坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三者的关系及其正方向用右手定则判定，围绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各轴的回转运动及其正方向  $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$  分别用右手螺旋法则判定。

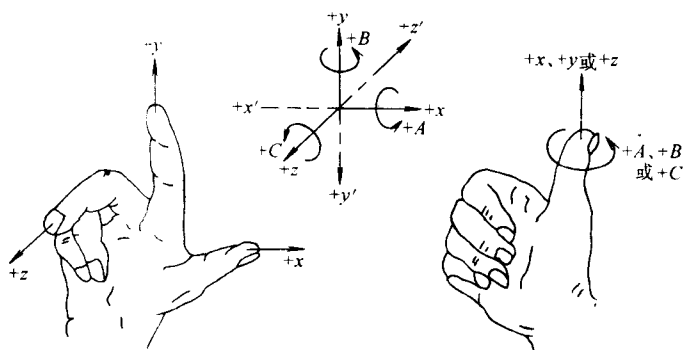


图 2-3 右手直角笛卡儿坐标系

图 2-4、图 2-5、图 2-6 分别示出了数控车床、数控铣床以及数控镗铣床的标准坐标系。其坐标和运动方向是根据以下规则确定的：

(1) 正方向的确定 由于机床的运动可以是刀具相对于工件的运动，也可以是工件相对于刀具的运动，所以统一规定（在图 2-3 中） $+x$ 、 $+y$ 、 $+z$  各个坐标表示为刀具相对于工件的运动，规定增大刀具与工件之间距离的方向为正方向。带“'”的坐标（ $+x'$ 、 $+y'$ 、 $+z'$ ）则表示刀具固定，工件运动。

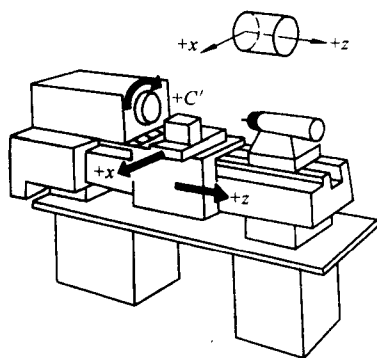


图 2-4 数控车床坐标系

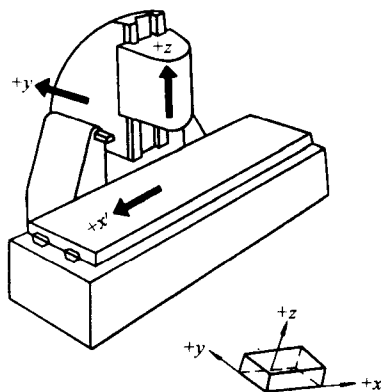


图 2-5 数控铣床坐标系

(2) 机床  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标的确定 规定平行于机床主轴（传递切削力）的刀具运动坐标为  $z$  轴，取刀具远离工件的方向为正方向（ $+z$ ）。当机床有几个主轴时，则选一个垂直于工件装夹面的主轴为  $z$  轴（如龙门铣床）。当机床无主轴时，则选垂直于工件装夹面的方向为  $z$  轴（如线切割机床）。

$x$  轴为水平方向，且垂直于  $z$  轴并平行于工件的装夹平面。对于工件旋转运动的机床（车床、磨床），取平行于横向滑座的方向（工件径向）为刀具运动的  $x$  坐标，同样，取刀具远离工件的方向为  $+x$  方向；对于刀具旋转运动的机床（如铣床、镗床）：当  $z$  轴为水平时，沿刀具主轴后端向工件方向看去，向右方向为  $x$  轴的正向；当为立式主轴时，对单立柱机床，面对刀具主轴向立柱方向看去，向右方向为  $x$  轴的正向。

$y$  坐标轴垂直于  $x$  及  $z$  坐标轴。当  $+z$ 、 $+x$  确定以后，按右手定则判定  $+y$  方向。

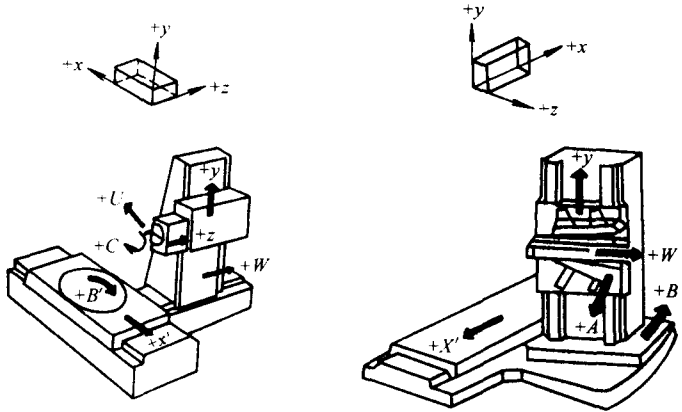


图 2-6 数控镗铣床

(3) 编程坐标系 由于工件与刀具是相对运动的，所以在数控机床

的程序编制中，为使编程方便，一律假定工件固定不动、全部用刀具运动的坐标系编程，亦即用标准坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  在图样上进行编程。这样，即使编程人员在不知刀具移近工件还是工件移近刀具的情况下，也能编出正确的程序。标准坐标系与编程坐标系在位置上是平行的，编程坐标系也称为工件坐标系。注意：实际编程时，正号可省略，负号不可省略且紧跟在字母之后。 $x'$ 、 $y'$ 、 $z'$  表示工件（工作台）运动的坐标系，与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  等效，方向相反。

(4) 附加运动坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为主坐标系和第一坐标系。如有第二组坐标和第三组坐标平行于  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，则分别指定为  $U$ 、 $V$ 、 $W$  和  $P$ 、 $Q$ 、 $R$ 。所谓第一坐标系是指靠近主轴的直线运动，稍远的为第二坐标系。如在镗铣床上（图 2-6），镗杆运动为  $z$  轴，立柱运动为  $W$  轴，而镗刀头径向刀架运动为  $U$  轴（平行于  $x$  轴）。

### 3. 准备功能与辅助功能代码

在数控加工程序中，是用各种准备功能的  $G$  指令和辅助功能的  $M$  指令来描述工艺过程的各种操作和运动特征的。 $G$  指令和  $M$  指令是程序的基础。

国际上广泛应用 ISO 标准制订的  $G$  代码和  $M$  代码标准。我国原机械工业部根据 ISO 标准制订了 JB3208—83《数控机床穿孔带程序段格式中的准备功能  $G$  和辅助功能  $M$  的代码》标准，它与 ISO—1056—1975E 等效。必须注意：有些国家或公司集团（特别是日本）所制定的  $G$ 、 $M$  代码的功能含义与 ISO 标准不完全相同，必须根据使用说明书的规定进行编程。

(1) 准备功能  $G$  代码 它使机床建立起（准备好）某种加工方式的指令，如插补、刀具补偿、固定循环等。

$G$  代码由地址  $G$  及其后的二位数字组成，从  $G00$ ~ $G99$  共 100 种。表 2-1 为我国 JB3208—83 标准规定的  $G$  代码定义。