

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化专业）

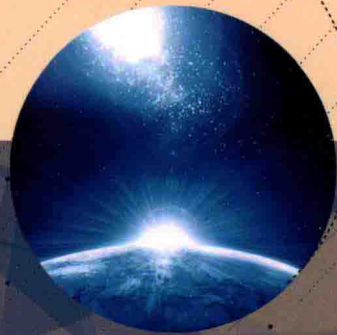
普通高等教育 电气工程
自动化 系列规划教材

计算机数控系统

第2版

黄家善 陈兴武 主编

Computerized
Numerical Control System



国家重点出版物出版规划项目

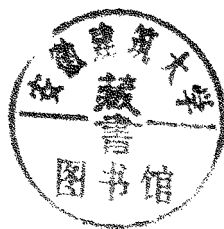
卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材 (电气工程及其自动化、自动化专业)

普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

计算机数控系统

第2版

主 编	黄家善	陈兴武
参 编	雷 伍	王侃夫
主 审	陈 冲	



机械工业出版社

本书共八章,根据计算机数控技术的发展状况,对数控机床中的电气控制系统进行重点分析。内容包括计算机数控系统的基本概念,数控系统的硬件、软件组成,可编程序控制器在数控机床中的应用,位置检测,进给及主轴驱动控制方式及插补原理及其实现方法等。在上述内容基础上,介绍三种典型数控系统实例,突出数控机床控制技术及系统的综合应用,分析数控设备中常见的一些故障及其诊断维护方法,并介绍检修实例。本书注意理论联系实际,兼顾新技术、新知识的应用,具有良好的实践性和可操作性。

本书可作为高等工科电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等专业的教材,也可作为从事数控机床的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机数控系统/黄家善,陈兴武主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2018.7

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业

ISBN 978-7-111-60593-5

I. ①计… II. ①黄… ②陈… III. ①数控机床-数控系统-高等学校-教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第171136号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王康 责任编辑:王康

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:鞠扬

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·357千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60593-5

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

数控技术及数控机床的广泛应用,给机械制造业的产业结构、产品种类和档次以及生产方式带来了革命性的变化,极大推动了国民经济和社会的发展。数控技术及数控机床在机械制造业中的重要地位显示了它在国家基础工业现代化中的战略性作用,并已成为传统机械制造业提升改造和实现自动化、柔性化、集成化生产的重要手段和标志。根据国内数控技术及数控机床的应用情况,现代数控系统知识是电类专业学生知识结构中必不可少的。本书偏重于电气技术,考虑与其他课程的衔接,兼顾新技术和新知识在机床数控技术中的应用,突出数控系统技术的实用性、基础性和数控机床的操作性,力求做到理论与实践的最佳结合。

通过本课程的(理论与实践)学习,学生可以获取计算机、自动控制、电气传动及精密检测等多学科知识与技术互相渗透、综合应用的基本知识及基本技能,掌握计算机数控设备的实现方法和基本控制原理,具有安装、调试和维护数控设备电气系统的能力,以适应电气自动化技术的迅速发展。

本书共有八章,每章后面有本章小结、思考题与习题。第一章介绍计算机数控系统的基本概念、数控机床控制系统的基本组成及分类;第二章介绍计算机数控系统的硬件、软件基本组成,可编程控制器(PLC)在数控机床中的应用;第三章介绍数控机床常用位置检测装置的种类、作用、安装及信号形式;第四章、第五章介绍数控机床中进给及主轴驱动装置中的伺服电动机种类及相应驱动控制方式;第六章介绍常用的插补原理及其实现方法;第七章在上述内容基础上,介绍了三种典型数控系统实例,突出数控机床控制技术及其系统的综合应用;第八章分析了数控设备中常见的一些故障及其诊断维护方法,并介绍检修实例,具有良好的实践性和可操作性。

本书参考学时为48课时,有关章节内容可根据专业要求及学时情况酌情调整。

本书可作为高等工科电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等专业的教材,也可作为从事数控机床的工程技术人员参考书。

本书在黄家善、王侃夫及雷伍老师编写的第1版基础上修订完善,福建工程学院陈兴武教授针对本书的第二章、第六章及第七章相关内容进行了更新和补充。

本书编写中参考了一些兄弟院校的教材和一些作者的相关专业论文资料;教材的出版得到了机械工业出版社以及相关领导的大力支持与帮助,在此一并表示衷心感谢。

信息技术发展迅速且应用广泛,由于编者水平有限,书中定有许多疏漏与不妥之处,恳请读者不吝指教,以便进一步修订完善。

编 者

目 录

前 言

第一章 概 述	1	第二节 步进电动机伺服系统	95
第一节 计算机数控技术的概念	1	第三节 直流伺服电动机调速系统	99
第二节 计算机数控系统的分类	3	第四节 交流伺服电动机调速系统	107
第三节 数控系统的特点与发展趋势	6	第五节 交流伺服电动机的矢量控制	112
本章小结	10	第六节 主轴驱动控制及全数字式伺服系统	117
习题与思考题	10	第七节 进给伺服系统的性能分析	121
第二章 计算机数控 (CNC) 系统	11	本章小结	126
第一节 CNC 系统的组成	11	习题与思考题	127
第二节 CNC 系统的硬件结构	14	第六章 插补算法	129
第三节 PLC 在 CNC 系统中的应用	25	第一节 逐点比较法插补原理与实现	129
第四节 CNC 系统的软件结构	33	第二节 数字积分法插补原理与实现	136
第五节 CNC 系统的应用软件	39	第三节 数据采样 (数字增量) 插补原理与实现	142
本章小结	44	第四节 参数插补算法原理与实现	147
习题与思考题	45	本章小结	152
第三章 位置检测及控制	46	习题与思考题	152
第一节 简介	46	第七章 典型数控系统的分析	154
第二节 角编码器	47	第一节 经济型数控系统的设计与分析	154
第三节 光栅	54	第二节 FANUC 数控系统介绍	167
第四节 感应同步器和旋转变压器	59	第三节 SIEMENS 数控系统介绍	178
第五节 磁栅	62	本章小结	196
第六节 位置控制原理	65	习题与思考题	197
本章小结	70	第八章 数控机床故障诊断及维护	198
习题与思考题	71	第一节 简介	198
第四章 伺服电动机	72	第二节 数控机床维护及故障处理	200
第一节 步进电动机	72	第三节 数控机床故障诊断的方法	204
第二节 直流伺服电动机	76	第四节 故障诊断实例	211
第三节 交流伺服电动机	82	本章小结	217
第四节 直线电动机	86	习题与思考题	217
本章小结	89	附录 典型 PLC 的指令系统	219
习题与思考题	90	参考文献	228
第五章 伺服控制系统	91		
第一节 进给伺服系统	91		



第一章 概 述

随着电力电子技术的迅速发展和计算机技术的普及与应用,计算机信息处理功能与传统机械装置的动力学功能相互结合与渗透,产生出一批功能强、性能好的机械产品和系统。数控机床是计算机数控技术在机械制造领域中应用的典型产物,它是一种技术密集型的产品,正在使机械制造产业发生着变革。

计算机数控设备的应用与日俱增,机械产品更新换代日趋频繁,并且越来越复杂。计算机数控技术是综合运用自动控制理论、电子技术、计算机技术、精密测量技术和机械机构知识等方面的最新成就,根据不同机械加工工艺的要求,运用计算机对整个加工过程进行信息处理与控制,实现生产过程自动化。计算机数控设备较好地解决了复杂、精密、多品种、中小批量机械零件加工问题,是一种通用、灵活、高效能的自动化设备。同时,数控系统又是柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)的技术基础之一,是机电一体化技术的重要组成部分。

第一节 计算机数控技术的概念

一、数字控制技术

数字控制(Numerical Control, NC)简称为数控,是正在蓬勃发展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。

数字控制系统中使用了以数字化信息为代表的控制信息,这些信息具有以下特点:

- 1) 可用不同字长的数字表示不同精度的信息,表达信息准确。
- 2) 可进行逻辑运算、算术运算及复杂的信息处理。
- 3) 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,从而可用软件改变信息处理的方式或过程,而不用改动电路或机械机构,因而具有功能的柔性化。

以上信息可用数字、字符、代码、逻辑变量及程序等来表示,这些信息统称为数字化信息。由于数控技术源于机床控制,目前已经大量地应用于机械加工行业,所以简单地说,数字控制就是利用数字化信息,对机械装备进行控制的一种自动控制技术。

由于数字控制系统具有上述特点,故而被广泛应用于机械运动的轨迹控制。轨迹运动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逻辑电路构成的,因而被称为硬件数控系统。随着微型计算机的发展,硬件数控系统已逐渐被淘汰,取而代之的是计算机数控系统(Computer Numerical Control, CNC)。由于计算机可以完成由软件来确定数字信息的处理过程,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。目前,已有许多用数控系统装备的加工设备,如:数控机床、数控线切割、数控电火花加工、数控绘图仪、数控割字机及工业机器人等,其中数控机床的发展最为突出。为此,本书将侧重于讨论数控机床中的计算机数控技术。

二、数控技术与数控机床

数控技术不依附于数控机床,但它却是随数控机床发展起来的。因此,数控技术多指机床数控技术。

数控机床一般由编程系统、计算机数控系统、伺服系统和机床本体组成,其基本结构框图如图 1-1 所示。

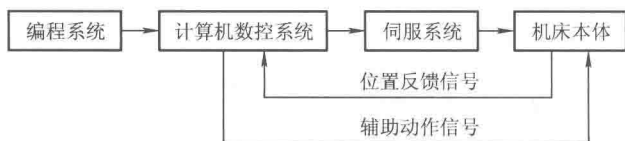


图 1-1 数控机床的组成

1. 编程系统

编程系统由程序开发计算机、信息载体、自动编程机或计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) / 计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 等构成。编程系统既能为数控系统设计系统程序,又能把加工零件从设计图样或样品到获得数控机床所需的控制介质的全过程,即完成零件程序的设计工作。有些高级的数控系统还包含一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。由这些设备实现编制程序、输入程序、输入数据以及显示存储和打印等功能。

信息载体又称为控制介质,用于记载各种加工信息,如零件加工的工艺过程、工艺参数和位移数据等,以控制机床的运动,实现零件的机械加工。常用的信息载体有穿孔纸带、磁带、磁盘或光盘等,并通过纸带、磁带、磁盘或光盘读入机将信息载体上记载的加工信息输入到数控系统中。数控机床也可采用操作面板上的按钮和键盘将加工程序直接输入,或通过通信接口将计算机上编写的加工程序输入到数控系统中。

2. 计算机数控系统

计算机数控系统是数控机床的核心,其功能是接收输入装置输入的加工信息,完成数控运算、逻辑判断、输入输出控制等功能。计算机数控系统一般由专用 (或通用) 的计算机、输入输出接口、可编程序控制器 (Programmable Logic Controller, PLC) 等部分组成。PLC 主要用于实现机床辅助功能、主轴选速功能及换刀功能。

3. 伺服系统

伺服系统是数控系统的执行系统,包括电动机、速度控制单元、检测反馈单元及位置控制等部分,它接收由计算机数控系统发来的各种动作命令,驱动受控设备运动。伺服电动机可以是步进电动机、液压马达、直流伺服电动机、交流伺服电动机或直线电动机等。其性能的好坏将直接影响数控机床加工精度和生产效率。

4. 机床本体

机床本体是用于完成各种切削加工的机械部分。根据不同零件加工的要求,可以是车床、铣床、镗床、磨床、重型机床、电加工机床或测量机以及复合加工装备等。普通机床在机械传动结构及功能部件方面,主要有以下几个方面形成数控机床本体结构的特征:

- 1) 采用了高性能主传动及主轴部件,具有传递功率大、刚度高、阻尼精度及耐磨性好、抗振性好及热变形小等优点。
- 2) 进给传动为数字式伺服传动系统,传动结构得到简化,传动链较短,传动精度高。
- 3) 在加工中心类机床上有较完善的刀具自动交换和管理系统,工件一次安装后,能自



动地完成或者接近完成工件各面所有加工工序。

4) 更多地采用了高效传动部件, 如滚珠丝杠副、直线滚动导轨等。

第二节 计算机数控系统的分类

在使用数控系统时, 其控制对象不尽相同, 为此, 数控系统的种类很多。但在原理上万变不离其宗。为了进一步地研究数控系统, 根据数控系统的基本原理和主要性能, 可从以下不同的角度进行分类。

一、按控制的运动轨迹划分

1. 点位控制系统

点位控制系统主要用在孔加工机床, 如数控钻床、数控镗床、数控冲床等。这类控制系统只控制工具相对工件从某一加工点到另一加工点之间的精确坐标位置, 如图 1-2a 所示。而对于点与点之间移动的轨迹不进行控制, 且在移动过程中不做任何加工。为了提高生产效率, 空行程要快速移动。

点位控制系统对定位精度和定位时间要求较高, 定位精度关系到工件的加工质量, 定位时间关系到生产率。这两者往往是矛盾的, 一般处理的原则是: 在满足定位精度的条件下尽量缩短定位时间。为此, 通常采用快速趋近、减速定位的方法兼顾二者要求。

2. 点位直线控制系统

点位直线控制系统既要控制点与点的精确位置, 还得控制两点之间工具移动的轨迹为一条直线, 并且在移动中工具能以给定的进给速度进行加工, 其运动轨迹一般说是平行于坐标轴的直线, 如图 1-2b 所示。在特殊情况下, 如果同时驱动两套运动部件, 其合成运动所获得的轨迹是与坐标轴成一定夹角的斜线。此类控制方式的设备有数控车床、数控铣床、数控钻加工中心及数控磨床等。

3. 轮廓控制系统

轮廓控制系统又称为连续控制系统或轨迹控制系统。这类系统能够对两个或两个以上坐标方向进行严格控制, 即不仅控制每个坐标的行程的位置, 同时还控制每个坐标的运动速度, 如图 1-2c 所示。这样, 各坐标的运动按规定的比例关系相互配合, 精确地协调起来连续进行加工, 使刀具相对工件的运动轨迹成为一种确定的复合运动轨迹, 以形成所需的直线、斜线或曲线、曲面。采用此类控制方式的设备有数控车床、数控铣床、电加工机床及特种加工机床等。

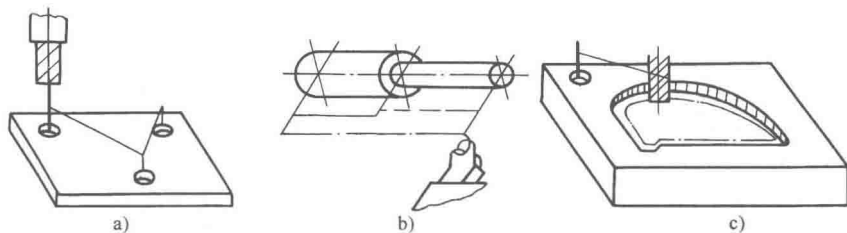


图 1-2 不同运动轨迹的数控系统

a) 点位数控系统 b) 直线控制系统 c) 轮廓控制系统



二、按伺服系统类型划分

1. 开环伺服系统

这种系统不带有位置检测装置，控制信号的流程为单向，如图 1-3 所示。数控系统将加工零件的程序处理后，输出数据指令给伺服系统，驱动加工设备运动。其典型系统就是采用步进电动机的伺服系统，如图 1-3 所示的开环控制系统的示意图。控制主机根据输入的程序及指令，经过运算并发出指令脉冲，送到步进电动机，使其转动一定的角度，再经传动齿轮或丝杠螺母副带动工作台移动一定的距离。采用此类控制系统的精度主要取决于控制主机的运算精度、伺服驱动机构和设备机械传动的精度。开环数控系统的精度一般可达 $\pm 0.02\text{mm}$ ，少数可达 $\pm 0.01\text{mm}$ 。这类伺服系统的优点是：结构较简单、调试和维修比较方便、成本较低。此类伺服系统在一些精度和速度要求不高的数控设备中应用十分广泛。

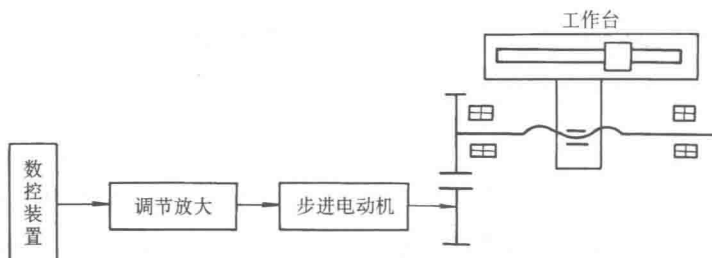


图 1-3 开环控制系统的示意图

2. 闭环控制系统

闭环控制系统带有工作台位置检测装置，它将位移的实际值反馈回输入端与输入指令比较，用比较后的差值去控制，直至差值消除时才停止修正动作。图 1-4 所示为闭环控制系统的示意图。安装在工作台上的位置检测装置把工作台的实际位移量转变为控制量，反馈到输入端的控制器与指令信号相比较，得到的差值经过放大和变换，最后驱动工作台向减少误差的方向移动，直到差值为零，工作台才静止。在闭环系统中还装有速度检测元件，组成速度闭环控制，对电动机运转速度随时进行校正，从而减少因负载等因素变动而引起的进给速度波动，提高位置控制的质量。因为机床工作台也被纳入了控制环，所以称此类控制系统为闭环控制系统。

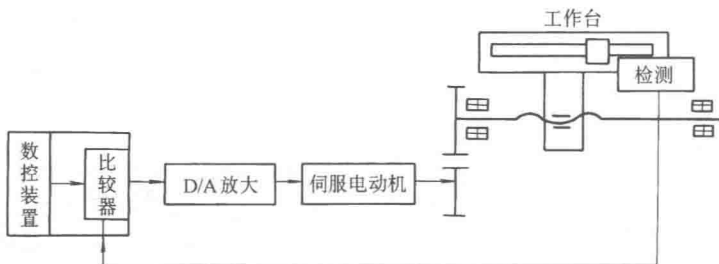


图 1-4 闭环控制系统的示意图

闭环控制系统的精度高，定位精度可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ，速度调节快，但是，由于工作台惯量大，给系统的设计和调整带来一定的困难，主要是系统的稳定性受到不利影响。为此，闭环系统主要是用于一些精度要求很高的数控镗铣床、超精车床和超精铣床等。



3. 半闭环控制系统

半闭环控制系统与闭环系统的区别在于检测反馈信号不是来自工作台，而是来自于安装在电动机轴端或丝杠轴端的角位移测量元件（如旋转变压器、脉冲编码器、圆光栅等）。这种系统的闭环回路中不包括工作台传动链，故称之为半闭环系统，如图 1-5 所示。实际位置的反馈值是通过间接测得的伺服电动机的转角推算出来的，因而控制精度没有位移实际值直接测量反馈闭环系统高，但系统的稳定性却由于大惯量工作台被排除在控制环之外而提高，同时也使得调试较为方便，所以应用较为普遍。

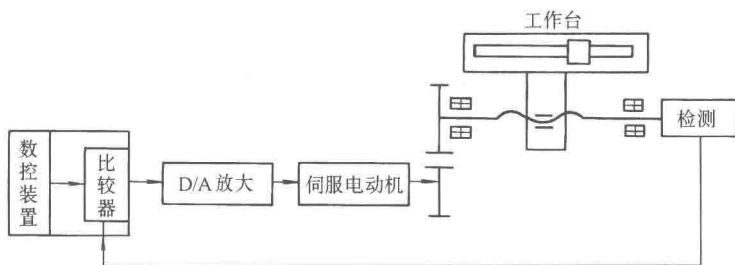


图 1-5 半闭环控制系统的示意图

三、按数控功能水平划分

一方面，因产品生产的不同要求而选择不同档次数控加工设备；另一方面，随科学技术的不断进步，数控机床更新换代，其数控功能和水平在不断完善与提高。为此，按数控功能及水平的完善程度可分如下几类。

1. 经济型数控机床系统

经济型数控机床是指具有针对性加工功能，功能水平较低，但价格较低廉的数控机床。这类数控系统的特点是：分辨率为 $10\mu\text{m}$ ，进给速度为 $4 \sim 15\text{m/min}$ ，伺服进给采用开环控制方式、步进电动机进给系统，联动轴数不超过三轴，无通信功能，只有简单的数码管显示或 CRT 显示字符，无内装可编程控制器，数控装置采用 8 位 CPU 作为中央处理单元。经济型数控机床系统主要用于车床、线切割机床及传统机床的数控化改造上。

2. 普及型数控机床系统

普及型数控机床是指具有自动加工所需的各种功能，但辅助功能不完善，功能水平不够高的数控机床。这类数控系统的特点是：分辨率为 $1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15 \sim 24\text{m/min}$ ，伺服进给采用半闭环控制方式，联动轴数可达四轴，可以具有串口 RS-232 或分布式数控（Distributed Numerical Control, DNC）通信接口，内装 PLC，具有较齐全的显示终端 CRT 显示，有图形、有字符、有人机对话与自诊断功能，数控装置采用 16 位或 32 位 CPU 作为中央处理单元。

3. 全能型数控机床系统

全能型数控机床是指具有功能完善、且功能水平高的数控机床。这类数控系统的特点是：分辨率为 $0.1\mu\text{m}$ ，进给速度为 $15 \sim 100\text{m/min}$ ，伺服进给采用闭环控制方式，能达到五轴以上的联动轴数，具有制造自动化协议（MAP）通信接口或其他接口，并具有通信联网功能，具有三维图形显示，有较强功能的内装 PLC，并具有轴控制的扩展功能，选用 64 位 CPU 或具有精简指令集的高速中央处理单元，以提高运算速度。

数控机床的品种和规格繁多，分类方法不一。根据不完全统计，目前已有近 500 种数控



机床。根据数控机床的功能和组成，一般可归纳为如表 1-1 所示的几类。

表 1-1 数控机床分类归纳

分类方法	机床类型		
按坐标轴数分类	一般数控机床	数控加工中心机床	多坐标数控机床
按系统控制特点分类	点位控制数控机床	直线控制数控机床	轮廓控制数控机床
按有无测量装置分类	开环数控系统	半闭环数控系统	闭环数控系统
按功能水平分类	经济型	普及型	全功能型（高级型）

第三节 数控系统的特点与发展趋势

一、计算机数控系统的特点

机械加工自动化是体现机械制造业中技术进步的一个方面。在大批量生产条件下，采用机械加工自动化可取得较好的经济效益。大批量生产中加工自动化的基础是工艺过程严格的流水性，因而可以建立自动线。对于小批量的产品生产，由于生产过程中产品品种的变换频繁、批量小、加工方法的区别大，因此给加工自动化带来相当的难度，难以采用大批量生产的刚性自动化方式。因此，大力发展柔性制造技术成为必然。

柔性制造技术实际上是由计算机控制的自动化制造技术，其中也包含计算机数控的单台加工设备和各种规模的自动化制造系统。

数控机床是实现柔性自动化的最重要的设备，也是发展柔性生产的基础。它具有如下特点：

1. 加工零件的适应性强，灵活性好

数控机床能完成普通机床难以胜任或者根本不可能完成的复杂型面的零件加工。这是由于数控机床具有多坐标联动功能，并按零件加工的要求变换加工程序。因此，数控机床首先在航天航空等领域得到应用，在复杂型面的模具加工、螺旋桨及蜗轮叶片的加工中也都得到了广泛的应用。

2. 能获得较高的加工精度

机床加工精度在很大程度上取决于进给传动的位置精度。数控机床的进给传动为数字式伺服传动，它能保证运动参数，如位移、速度的准确性。此外，传动链短、传动机构精密、高效，也极大地提高了传动的精度。因此，数控机床具有较高的加工精度。

3. 产品质量稳定，生产效率高

由于数控机床是按照预定的程序自动加工，不受人为因素的影响，其加工精度由机床来保证，还可以利用软件来校正和补偿误差。因此，能获得比机床本身精度还高的加工精度及重复精度。

数控机床由于能合理选用切削用量，加工时间短；定位精度高，停机检测次数少；采用通用工夹具而缩短加工准备时间等多方面因素，使数控机床的生产率较普通机床的生产率高 2~3 倍，在某些复杂零件的加工中，其生产率可提高十几倍甚至几十倍。

4. 减轻操作者的劳动强度，利于生产管理的现代化

数控机床的操作者一般只需装卸零件和更换刀具及监督机床的运动，因为数控机床动作



是由控制信息（程序）直接控制的。所以大大地减轻了操作者的劳动强度，降低了对熟练技术工人的要求。

用数控机床加工零件，能准确计算加工工时，有效地简化了检验、工装和半成品的管理工作，有利于生产管理的现代化。

5. 监控功能强，有故障诊断能力

CNC 的计算机一直在控制着机床，各项数据立取可得，并且极容易对机床实现全面监视。许多 CNC 系统具有软件查寻故障的功能，如 SEMENS802 等数控系统，计算机本身或外围设备的故障通过 CRT 上显示的操作界面自动地查找出来。可诊断出有无故障或故障的类型，极大地提高了检修的效率，对于一些引起故障的因素，计算机可提前报警，从而可有效地防止一些故障的发生。

6. 机床的使用、维护技术要求高

数控机床是多学科、新技术的产物，相应地，这就对机床的操作和维护提出了较高的要求。此外，机床价格高，设备一次性投资大，为保证数控加工的综合技术经济效益，同样要求机床的使用者和维修人员应具有较高的专业素质。

按照以上特点，数控机床最适合在单件、小批量生产条件下，加工下列类型的零件，如：需要复杂、昂贵的工艺装备的加工件；材料昂贵、不允许报废的零件；结构复杂、需要多工序加工的零件；生产周期要求短的急缺零件等。

二、数控系统的发展趋势

数控机床首先是由美国发展起来的。1952 年在美国研制成功了世界第一台数控机床——三坐标立式铣床，其数控系统采用电子管；1960 年开始，其他一些工业国家，如德国、日本都陆续地开发、生产及使用数控机床；1974 年微处理器直接用于数控机床，进一步促进了数控机床的普及应用和飞速发展。

由于微电子和计算机技术的不断发展，数控机床的数控系统也随着不断更新，从第一代数控机床诞生起，已经历过以下几代变化：

第一代：1952 ~ 1959 年采用电子管构成的专用数控系统；

第二代：1959 ~ 1965 年采用晶体管电路为主的 NC 系统；

第三代：1965 年开始采用小、中规模集成电路的 NC 系统；

第四代：1970 年开始采用大规模集成电路的小型通用电子计算机控制系统（CNC）；

第五代：1974 年开始采用的微型电子计算机控制的系统；

第六代：1990 年开始，基于工控 PC 机的 CNC 系统。

数控机床是关系到国家战略地位和体现国家综合国力水平的重要基础性产业，其水平高低和拥有量多少是衡量一个国家工业现代化的重要标志，在国防建设上更是具有战略意义的重要基础性产业。实现加工机床及生产过程数控化是当今制造业的发展方向，机械制造的竞争其实就是数控行业的竞争。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将“高档数控机床与机床制造装备”确定为 16 大科技专项之一。

随着科学技术不断发展，数控机床的发展也越来越快，在向经济、适用、廉价方向发展的同时，在性能和技术特点上的主要发展趋势是高性能、高精度、高速度、高柔性化和模块化，以及可靠性及开放性。

（1）高性能 随着数控系统集成度的增强，数控机床实现了多台集中控制，甚至远距



离遥控。高柔性高效率合二为一，向高速高效发展。广泛采用新型功能部件（如电主轴、直线电动机、高速滚珠丝杠等），实现超高速加工。采用软件补偿技术提高精度，CNC 系统的软件技术不断升级，软件技术在产品的技术含量中占有更大的比重，向智能化方向发展，加快发展开放式结构的 CNC 系统和智能型 CNC 系统。

(2) 高精度 数控机床本身的精度和加工件的精度以及精度的稳定性越来越高。提高数控机床的加工精度，通过减少数控系统的误差和采用补偿技术来达到。在减少系统控制误差方面，采取提高数控系统的分辨率、提高位置检测精度、位置伺服系统采用前馈控制与非线性控制的方法；在采用补偿技术方面，除采用间隙补偿、丝杠螺距补偿和刀具补偿等技术外，也注意热变形补偿。

从精密加工发展到超精密加工，是各工业强国致力发展的方向。其精度从微米级到亚微米级，乃至纳米级（ $<10\text{nm}$ ），其应用范围日趋广泛。

(3) 高速度 数控机床各轴运行的速度将大大加快。机床向高速化方向发展，可充分发挥现代刀具材料的性能，不但可以大幅度提高加工效率、降低加工成本，而且还可以使零件的加工表面质量和精度提高。超高速加工技术对制造业实现高效、优质、低成本生产有广泛的适用性，应加快机床高速化发展步伐。选用高速 CPU，配置高速、高强功能的内装式可编程控制器，使 CNC 与 PLC 有机地结合起来，大大地提高了系统速度。

随着超高速切削机理、超硬耐磨长寿命刀具材料和磨料磨具、大功率高速电主轴、高加减速直线电动机驱动进给部件以及高性能控制系统（含监控系统）和防护装置等一系列技术领域关键技术的解决，不失时机地开发应用新一代高速数控机床，是我国数控机床产业面临的新挑战。

(4) 提高集成性、系统柔性和开放性 在结构上，新一代数控系统广泛采用多微处理机系统。大量采用大规模集成电路和三维高密度焊接的印制电路板，使系统小型化且经济、可靠。软件方面，PC 软件功能强，且容易接受和推广，例如：有功能很强的各种标准操作系统、图形工具、编辑器、实时数据库以及像 TCP/IP 那样的通信协议。数控系统中集成数据库，可以方便地实现工艺、校正、诊断和刀具等数据的存储。

为减少数控系统的开发时间，适应用户不断变化的需求，新一代数控系统应是开放式数控系统。开放式数控系统要求引用标准组件（如 PC 卡、标准的元器件、标准启动系统和数据库等），应用开放的模块化结构来构成系统的硬、软件，使系统便于组合、扩展和升级，并且应使系统的硬件和软件相互分离，系统能提供柔性的、自适应控制功能。

引进自适应控制技术，数控系统能检测对自己有影响的信息，自动连续调整有关系统参数，对变化了的加工环境及时作出反应。一些新型的数控装置还具有进行故障诊断的人工智能功能（专家诊断系统），在系统中存储一些引起各种系统故障原因的信息，以及如何消除这些故障的知识，从而形成专家系统知识库。利用这些知识库经过推理可以进行故障定位或排除故障。

在 CNC 核心功能领域中，现代数控系统能与 CAD/CAM 系统连接，并将发展三维刀具补偿、超前数控加工程序段预处理及新的插补方式（如样条插补）处理使系统进行各种复杂几何形状的加工控制，能在高精度下实现高速进给。

编程系统都采用彩色显示器与手动数据输入键盘配合，能实现各种数控语言程序和宏程序的编制、输入和编辑，具有二维图形模拟功能，可以描述任意位置的零件断面及三个平面



示图,使加工操作者对零件的形状及加工状态能很清楚的了解;它们还具有复杂曲面数控加工程序编制功能,能进行几何图形处理,并具有工艺处理能力,可自动确定工艺参数;它们可采用数控语言输入方式,也可采用图形输入方式(如 WOP),还可以与 CAD 系统直接通信。

伺服系统趋向于用交流进给伺服驱动与主轴驱动逐步代替直流进给伺服驱动与主轴驱动,其中主轴驱动为实现 C 轴控制也兼备了主轴伺服驱动功能。在伺服系统中,把微电子技术和计算机技术引入电动机控制,使伺服电动机的位置、速度及电流调节实现数字化,从而使伺服系统的精度和速度都进一步提高,并可使伺服系统具有一些新的功能,如前馈控制功能和学习控制功能。

现代数控机床都具有很强的通信功能,可以与其他 CNC 系统、上位机、编程机及各种外设进行通信,实现数控机床连网和进线的要求。它们除了有 RS-232C 串行接口外,还有 RS-422、DNC 等多种通信接口,最新的数控系统采纳了符合 ISO 的开放系统互联(OSI)参考模型的有关协议进行网络连接(如:MAP/MMS,现场总线等)。

另一方面注意应用性及其经济性,数控机床要缩短周期和降低成本,就必然向模块化方向发展,这既有利于制造商又有利于客户。

三、国内外常见数控系统概况

国内外主要数控系统产品如下。

1) 我国的数控机床无论从产品种类、技术水平、质量和产量上都取得高速发展,在一些关键技术方面也取得了重大突破。2010 年中国数控机床产量达到 23.6 万台,中国可供市场的数控机床有 1500 种,几乎覆盖了整个金属切削机床的品种类别和主要的锻压机械。2014 年中国数控机床产量达到 39.1 万台。

我国数控机床生产厂家包括:航天数控集团、机电集团、华中数控、蓝田数控等以生产普及型数控系统为主的国有企业;北京—法那科、西门子数控(南京)有限公司等合资企业;威海华东数控有限公司先进的 HD 系列五轴联动数控系统技术;北京凯恩帝、广州数控、上海开通、大连大森、南京大地以及成都广泰等合营或私营企业。

2) 日本 FANUC 公司的 CNC 产品,其功能特点较为突出。FANUC 公司为了使 CNC 的功能在更高层次上满足机械加工的高精度、高速度和高效率的要求,在插补、加减速、补偿、自动编程、图形显示、通控制和诊断方面不断增加新的功能。如插补,除了直线、圆弧及螺旋插补外,还有假想轴插补、极坐标插补、圆柱面插补、指数函数插补、渐开线插补和样条插补等。切削进给的自动加减功能,除了插补后直线加减速之外还有插补前加减速。补偿功能,除了螺距误差补偿、丝杠杆反向间隙补偿之外,还有坡度补偿、线性度补偿及各种新的刀具补偿功能。在故障诊断方面采用了人工智能(专家系统),系统所具有的推理软件以知识库作为根据,分析查找故障原因。

3) 德国 SIEMENS 公司的 CNC 产品,其功能特点有:SIEMENS 公司的 CNC 系统在功能上,特别是在多轴控制、通信、PLC 及编程方面具有特色。SIEMENS 公司为了适应柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的需要,在 810/820、850/880 系列产品中采用了通道结构,使控制轴数可达 20~30 个,其中包括多主轴控制,并可实现 12 个工位的联动控制。850/880 系统具有机器人的功能,适合功能强、性能复杂的机车的需要,适合 FMS 和 CIMS 的需要,是一种过微机轮廓轨迹控制的系统。SIEMENS 公司的 CNC 系统产品



采用模块化结构，在一种 CNC 系列中采用标准硬件模块，用户可根据需要配置系统的结构，满足生产加工的要求。

4) 我国引进的其他数控系统。西班牙 FAGOR 公司的 CNC 产品，以 8025 系列的数控系统，在我国的销量最大。它是 FAGOR 公司中档数控系统，分为车床、铣床（加工中心）、冲床及磨床系统等，可控制 2~5 轴不等。

继 20 世纪 80 年代以来，我国还引进了如美国 ACRAMATIC 数控系统、美国 Allen-Bradley (A-B) 公司及法国 NUM 公司的数控系统等。

此外，在我国的机械加工行业中还进口了许多国外知名品牌的数控系统及其数控机床，如：日本的三菱 (MITSUBISHI) 数控、马扎克 (MAZAK) 数控、安川数控及大隈 (OKUMA) 数控，德国的海德汉 (HEIDENHAIN) 数控等。

本章小结

本章简要介绍了计算机数控机床及数控技术的基本概念、分类以及数控技术的发展状况。

数控系统一般包括数控装置、可编程序控制器 (PLC)、主轴驱动装置、进给驱动装置、程序输入/输出装置、通信装置及机械结构等部分。数控系统在制造工业，特别是在航空航天工业中被广泛地应用。数控技术无论在硬件或软件方面，进展速度都很快。当今，在市场上已见不到硬件数控机床，取而代之的是以计算机数控系统为核心的计算机数控机床。在此系统中采用存储程序的专用计算机实现部分或全部基本数控功能。目前所说的数控，均指计算机数控。

习题与思考题

- 1-1 什么是数字化信息？什么是数控技术？
- 1-2 数控机床有哪些组成部分？各有何功用？
- 1-3 机床数控系统有哪些类型？主要区别在哪里？
- 1-4 计算机数控有哪些特点？半闭环控制系统与闭环控制系统相比，有什么不同？
- 1-5 经济型数控系统适合于什么应用场合？
- 1-6 现代数控机床与技术的发展方向是什么？



第二章 计算机数控(CNC)系统

20 世纪 70 年代初微型计算机问世以来,发展迅猛,同时也有力地推动了数控系统的发展。近年来,以微处理器为基础的微型计算机数控(MNC)系统几乎完全取代了小型计算机数控系统。目前研制和生产的数控机床大都采用微型计算机数控系统,所谓 CNC 系统实际就是 MNC 系统。CNC 系统按功能、性能水平衡量可以分为低、中、高三类,按价格、功能、使用等综合指标考虑可以分为经济型数控系统和标准型数控系统。

标准型数控系统也称为全功能数控系统,这是相对于经济型数控系统而言的。经济型数控系统功能比较简单、精度和速度都较低,一般用于对功能和性能要求不高的数控机床;而标准型数控系统功能比较齐全,能适用于多种数控机床。在我国,经济型数控系统通常是指开环数控系统。标准型数控系统精度和速度都比较高,通常都是闭环数控系统。

第一节 CNC 系统的组成

现代标准型数控系统功能齐全,一方面表现在它们能适应不同的控制要求,这得益于计算机的“柔性”和丰富的软件支持;另一方面它们通常具有良好的人机界面、较高的智能化程度,能自动地帮助使用者处理大量信息,使编程和操作都变得较为简便;还有就是系统的开放性,通过计算机网络,可以实现信息资源的共享或构建更高级的制造系统。高进给速度、高切削精度体现了现代制造业对数控系统的要求,这也是现代标准型数控系统的主要技术指标。因此,其硬、软件结构必须优化配置。以下首先分析现代标准型数控系统(为叙述方便,简称为数控系统或 CNC 系统)的总体结构。

一、CNC 系统的基本构成

CNC 系统是由程序输入与输出装置、通信装置、计算机数字控制装置、可编程控制器、主轴驱动装置和进给驱动装置等组成。计算机数控系统的基本构成如图 2-1 所示。

二、各组成部分的作用

数控系统的核心是计算机数字控制装置,数控系统主要的信息处理由计算机数控装置实现。

程序输入、输出及通信装置是数控系统和外界交换信息的通道。在现代 CNC 系统中,这部分通常由一个微处理器来管理,从而实现前台加工控制和后台编程同时进行。此外,还可以进行自动编程和动态图形模拟、图形跟踪等。

可编程控制器实际上是一种专用控制微机。在数控系统中可编程控制器主要用来对开关量进行控制,实现辅助功能(M 功能)、主轴功能(S 功能)及刀具功能(T 功能)。

主轴控制装置的作用是控制主轴转速,与可编程控制器配合还可以实现主轴定位。现代数控机床的主轴多采用交流电动机驱动,相应的主轴控制单元采用正弦波脉宽调制(SPWM)变频调速对主轴电动机进行控制。主轴控制单元通常都由一个独立的微处理器控制。

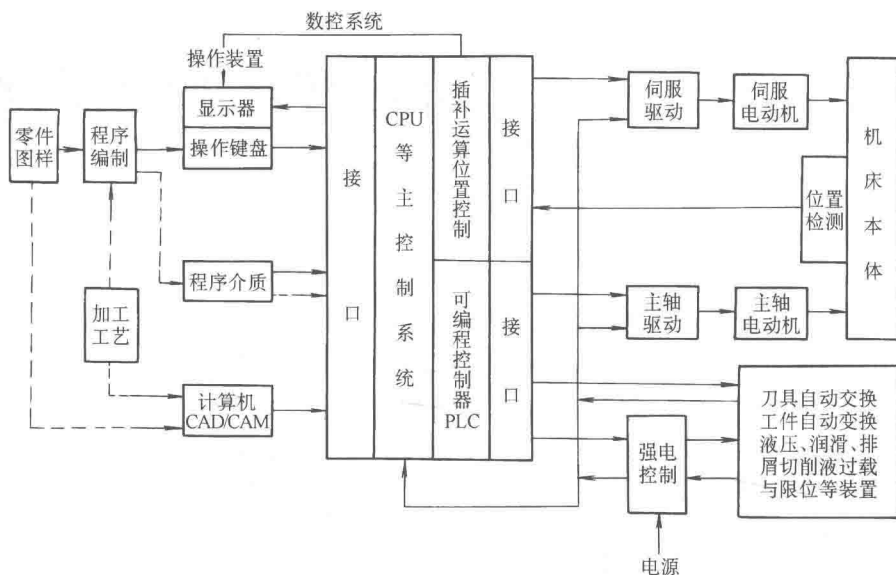


图 2-1 CNC 系统的基本构成

数控系统的进给轴控制要求较高，它直接关系到数控系统的精度和速度。进给驱动装置有速度控制和位置控制两个控制环节，通常由计算机数控装置处理位置控制信息，由速度控制单元进行速度控制。

三、CNC 系统的功能

数控装置有多种系列，可以实现多种功能。数控装置的功能包括基本功能和选择功能。基本功能是数控系统必备的功能，选择功能是供用户根据机床特点和用途进行选择的功能。CNC 装置的功能主要反映在准备功能指令代码和辅助功能上。选用时应根据数控机床的类型、用途和档次来考虑。

1. 基本功能

(1) 控制功能 控制功能指 CNC 装置能够控制机床的轴数以及同时控制（联动）的轴数。控制轴有移动轴和回转轴，有基本轴和附加轴。联动轴可以完成轮廓轨迹加工。控制轴越多，特别是同时控制轴越多，CNC 装置功能就越强，同时装置也就越复杂，控制程序的编制也越困难。

(2) 准备功能 准备功能也称为 G 功能，是用来指令机床控制方式的功能。如：G18。它用指令 G 和它后继的两位数字表示。ISO 标准中准备功能从 G00 ~ G99，共 100 种。

(3) 插补功能 插补功能需要结合尺寸字进行，尺寸字确定出插补轨迹的几何尺寸，CNC 装置通过软件进行插补，插补计算实时性很强，计算速度很难满足数控机床对进给速度和分辨率的要求。因此，实际的 CNC 装置的插补功能被分为粗插补和精插补，软件每次插补一个小线段称为粗插补；根据粗插补结果，将小线段分成单个脉冲输出，称为精插补。一般的 CNC 装置都有直线和圆弧插补，高档 CNC 装置还有抛物线插补、螺旋线插补、极坐标插补、正弦插补和样条插补等。

(4) 进给功能 进给功能也称为 F 功能，进给功能直接指令各轴的进给速度，如：切削进给速度（每分钟进给量）；同步进给速度（每转进给量）；快速进给速度；进给倍率。