

高等院校精品课程系列教材·省级

数控技术

卢红 王三武 黄继雄 ◎主编 吴飞 徐瑾 ◎副主编



*Numerical Control
Technology*

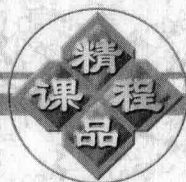


机械工业出版社
China Machine Press

高等院校精品课程系列教材·省级

数控技术

卢红 王三武 黄继雄◎主编 吴飞 徐瑾◎副主编



*Numerical Control
Technology*



机械工业出版社
China Machine Press

本书是根据普通高等学校应用型本科数控应用技术规划教材的要求,按照普通高等学校机电类专业教学的基本要求,结合理论及实践教学中的经验编写的。

本书以数控加工技术为主线,主要介绍了数控技术的概述及发展、数控加工程序的编制、数控技术中的轨迹控制原理、计算机数控(CNC)装置、进给伺服系统、数控机床总体结构及典型部件、网络数控技术等。本书在内容编排上力求全面系统,突出重点,并增加了一些较新的数控技术方面的内容。每章均附有习题,有助于学生理解和巩固所学知识。全书注重理论联系实际,尽量采用工程实际作为应用实例。

本书可作为机电类专业本科生的教材,还可作为教师及从事数控技术开发与应用的工程技术人员参考用书。

封底无防伪标均为盗版

版权所有,侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

数控技术/卢红,王三武,黄继雄主编. —北京:机械工业出版社,2010.6
(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-30443-2

I. 数… II. ①卢… ②王… ③黄… III. 数控机床—高等学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第070801号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:张少波

北京瑞德印刷有限公司印刷

2010年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张

标准书号:ISBN 978-7-111-30443-2

定价:29.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

客服热线:(010) 88378991; 88361066

购书热线:(010) 68326294; 88379649; 68995259

投稿热线:(010) 88379604

读者信箱:hzjsj@hzbook.com

前言

随着计算机技术的发展,数控技术已经广泛应用于工业控制的各个领域,尤其是机械制造业,普通机械正逐渐被高效率、高精度、高自动化的数控机械所代替。数控技术的应用,不但给传统制造业带来了革命性的变化,使制造业成为工业化的象征,而且随着它的不断发展和应用领域的扩大,它对国民经济中一些重要行业的发展起着越来越重要的作用。

本书是根据普通高等学校应用型本科数控应用技术规划教材的要求,按照普通高等学校机电类专业教学的基本要求,结合实践教学中的经验编写的。

本书以数控加工技术为主线组织内容,主要介绍数控技术的概述及发展、数控加工程序的编制、数控技术中的轨迹控制原理、计算机数控(CNC)装置、进给伺服系统、数控机床总体结构及典型部件、网络数控技术等。本书在内容编排上力求全面系统,重点突出,并增加了较新的数控技术方面的内容。每章均附有习题,可以帮助学生理解和巩固所学知识。全书注重理论联系实际,尽量采用工程实际作为应用实例。

本书可作为机电类专业本科生的教材,还可作为从事数控技术开发与应用的工程技术人员的参考书。

本书由卢红、王三武、黄继雄主编,吴飞、徐瑾、冯四平、郑银环参与编写。

由于编者的水平有限,经验不足,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编 者
2010年5月

目 录

机械工业出版社

前言

第1章 绪论 1

1.1 数控技术概述 1

1.1.1 数控技术的产生 1

1.1.2 数控技术的基本概念 2

1.1.3 我国数控机床的现状 和特点 3

1.2 数控机床的组成和工作原理 4

1.2.1 数控机床的组成 4

1.2.2 数控加工的工作过程和 基本原理 5

1.2.3 运动轨迹的离散与拟合 7

1.3 数控机床的分类 8

1.3.1 按加工方式分类 8

1.3.2 按伺服控制方式分类 8

1.3.3 按轨迹运动方式分类 10

1.4 数控技术的发展 10

1.4.1 数控机床的发展趋势 10

1.4.2 先进制造技术简介 13

习 题 16

第2章 数控加工程序的编制 17

2.1 数控加工程序编制的 基本概念 17

2.1.1 数控加工程序编制的 一般步骤 17

2.1.2 数控加工程序编制方法 18

2.1.3 数控机床的坐标系 19

2.1.4 数控程序结构 22

2.1.5 数控程序编制的 有关标准 24

2.2 数控加工程序编制的 基本指令 24

2.2.1 准备功能 G 指令 28

2.2.2 辅助功能 M 指令 37

2.2.3 其他功能字 38

2.3 数控加工程序编制中的 数学处理 38

2.3.1 数学处理的主要内容 38

2.3.2 由直线和圆弧组成的轮廓的 基点计算 39

2.3.3 非圆曲线的节点计算 40

2.4 数控加工程序编制实例 42

2.4.1 数控车床加工的 程序编制 42

2.4.2 数控铣床加工的 程序编制 58

2.4.3 加工中心的程序编制 71

习 题 77

第3章 数控技术中的轨迹控制原理 79

3.1 插补原理 79

3.1.1 概述 79

3.1.2 脉冲增量插补 81

3.1.3 数字增量插补 92

3.2 刀具半径补偿原理 97

3.2.1 刀具半径补偿的 基本概念 97

3.2.2 刀具半径补偿方法与补偿的 工作过程 98

3.2.3 C 机能刀具半径补偿的转接 方式与轨迹计算 99

3.2.4 刀具长度补偿的计算 107

3.3 进给速度和加减速控制 107

3.3.1 进给速度控制 107

3.3.2 自动升降速控制 108

习 题	116	5.1.3 数控机床伺服驱动系统的 分类	164
第4章 计算机数控 (CNC) 装置 ...	117	5.2 位置检测装置	166
4.1 概述	117	5.2.1 位置检测装置的方式	166
4.1.1 数控系统的组成	117	5.2.2 位置检测装置的要求和 分类	167
4.1.2 CNC 装置的组成	117	5.2.3 旋转变压器	168
4.1.3 CNC 装置的功能	118	5.2.4 感应同步器	171
4.1.4 CNC 装置的特点	121	5.2.5 光栅	174
4.2 CNC 装置的硬件结构	122	5.2.6 磁栅	178
4.2.1 概述	122	5.2.7 脉冲编码器	180
4.2.2 单微处理器结构的 CNC 装置	123	5.3 伺服驱动装置	183
4.2.3 多微处理器结构的 CNC 装置	130	5.3.1 开环伺服系统	183
4.2.4 开放式 CNC 装置	134	5.3.2 闭环伺服系统	189
4.3 CNC 装置的软件结构	137	5.3.3 鉴相式伺服系统	195
4.3.1 CNC 装置软件和硬件的 功能界面	137	5.3.4 鉴幅式伺服系统	199
4.3.2 CNC 装置的数据转换 流程	138	5.3.5 数字脉冲比较式伺服 系统	201
4.3.3 CNC 装置的软件工作 特点	140	习 题	203
4.3.4 常用的软件设计方法	142	第6章 数控机床总体结构及 典型部件	204
4.3.5 CNC 装置软件结构 模式	145	6.1 数控机床总体布局	204
4.4 CNC 装置的数据预处理	151	6.1.1 数控机床总体布局的 要求	204
4.4.1 零件加工程序的输入	152	6.1.2 影响数控机床总体布局的 因素	206
4.4.2 译码	154	6.1.3 数控机床的布局特点	207
4.5 典型的 CNC 装置简介	156	6.2 主传动系统及主轴部件	210
4.5.1 SIEMENS 公司 CNC 装置	156	6.2.1 对主传动系统的基本 要求	210
4.5.2 FANUC 公司 CNC 装置	159	6.2.2 数控机床的主传动系统 ...	211
习 题	161	6.2.3 数控机床主轴部件	212
第5章 进给伺服系统	162	6.2.4 电主轴	215
5.1 概述	162	6.3 进给传动机械部件	216
5.1.1 数控机床对伺服系统的 要求	162	6.3.1 数控机床进给传动的 特点	216
5.1.2 进给伺服驱动系统的基本 组成	163	6.3.2 对进给系统的要求	216
		6.3.3 数控机床进给传动系统的 基本形式	217

6.3.4 进给系统传动部件	217	7.2.2 网络数控技术的软件 集成方法	248
6.4 数控机床的自动换刀装置	227	7.3 网络数控实现技术	251
6.4.1 回转刀架换刀	228	7.3.1 远程传输技术	251
6.4.2 更换主轴头换刀	229	7.3.2 数控加工前置及后置 处理	253
6.4.3 带刀库的自动换刀系统 ...	230	7.4 网络数控加工的应用	256
习 题	235	7.4.1 计算机辅助制造与数控加工 一体化的网络制造平台 ...	256
第7章 网络数控技术	236	7.4.2 基于网络的减速器典型轴类 零件的数控加工	257
7.1 网络数控技术概述	236	习 题	260
7.1.1 网络数控技术的 基本概念	237	参 考 文 献	261
7.1.2 网络数控技术的组成	238		
7.2 网络数控技术的软件集成	241		
7.2.1 网络数控技术的软件 关键技术	241		

第 1 章

绪 论

1.1 数控技术概述

制造业是所有与制造有关的行业的总称，是一个国家国民经济的支柱产业。随着社会发展对制造业的要求不断提高，以及科学技术特别是计算机技术的高速发展，传统的制造业已发生了根本性的变革，以数控技术为主的现代控制技术被广泛采用。

1.1.1 数控技术的产生

社会需求是推动生产力发展最有力的因素。随着科学技术和社会生产力的不断发展，人们对各种产品的质量和生产效率提出了越来越高的要求。随着航空航天、造船、军工、汽车、农业机械等行业对产品性能的要求不断提高，产品中形状复杂的零件越来越多，加工质量要求也不断提高。采用传统的普通加工设备和工艺方法已难以适应产品多样化、柔性化及复杂形状零件的高效率、高质量加工的生产要求。为了解决这些问题，数控技术应运而生。数控技术集微电子、计算机、信息处理、自动检测及自动控制等高新技术于一体，是制造业实现柔性化、自动化、集成化及智能化的重要基础，在制造领域得到了广泛的应用。数控机床是数控技术在机械行业中的应用，是机电一体化的典型产品。

为了解决机械零件中复杂形状表面的加工问题，1952 年，美国帕森斯公司（Parsons）和麻省理工学院（MIT）在美国空军的委托下，合作研制出了世界上第一台三坐标数控铣床，完成了直升机叶片轮廓检查用样板的加工。从此，数控技术在全世界得到了广泛的应用，至今已经历了两个阶段，有六代产品。

1. 第一阶段——硬件数控（NC）阶段

为了满足机床实时控制的要求，人们采用由数字逻辑电路组成的专用计算装置作为数控系统，这就是硬件连接数控，简称数控（NC）。这个阶段经历了三代。

第一代：1952 年的电子管数控机床；

第二代：1959 年的晶体管数控机床；

第三代：1965 年的小规模集成电路数控机床。

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。

2. 第二阶段——计算机数控 (CNC) 阶段

1970 年至 1974 年,由于计算机的迅速发展,性价比不断提高,小型计算机代替了数控系统中硬件构成的专用计算装置,成为数控系统的核心部件,从此数控系统进入计算机数控阶段。这个阶段也经历了三代。

第四代:1970 年的小型计算机数控机床;

第五代:1974 年的微型计算机数控机床;

第六代:1990 年的基于 PC 的数控机床。

计算机数控软件实现了许多数控功能,使数控系统具有更大的灵活性、更好的柔性,计算机的优势在数控系统中得到了充分发挥。随着超大规模集成电路的迅速发展,数控系统开始采用微型计算机,带动微型数控系统的发展,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数控系统制造商进行封闭的垄断性生产,使得这类数控产品专用性很强,与标准计算机不兼容,通用性、软件可移植性和组网通信能力较差。尤其从 20 世纪 90 年代开始,个人计算机即 PC 机发展迅猛,它带来的很多成果不能被第五代数控系统及时采用。为了摆脱这种局面,数控系统开始向开放式数控系统发展。第六代数控系统即基于 PC 的开放式数控系统,这类系统结合了 PC 机的分析运算能力、大容量存储功能、图形交互优势及组网的灵活性,使得数控系统的应用具备了较为开放的模式。但是 PC 计算能力的受限阻碍了这类数控系统朝高速和高精度方向的发展。20 世纪 80 年代末基于 DSP (Digital Signal Processing) 的运动控制技术的发展,为开放式数控系统的发展创造了新的条件。以基于 DSP 的运动控制器为核心,融合 PLC 的功能,与标准 PC 集成的新一代开放式数控系统将成为第六代数控系统的主导产品。

其系统优点主要有:

- 元器件集成度高、可靠性好、性能高。
- 基于 PC 平台,技术进步快,升级换代容易。
- 提供了开放式基础,可供利用的软、硬件资源丰富,使数控功能扩展到更宽的领域(如 CAD、CAM、CAPP,连接网卡、声卡、打印机、摄影机等)。
- 为数控系统生产厂家提供了优良的开发环境,简化了硬件。

1.1.2 数控技术的基本概念

1. 数字控制 (Numerical Control, NC)

数字控制,简称数控,是利用数字化信息对机械运动及加工过程进行控制的一种方法。由于现代数字控制都采用计算机来实现,因此也称为计算机数字控制 (Computer Numerical Control, CNC)。

2. 数控机床 (Numerical Control Machine Tool)

数控机床是指采用了数控技术进行控制的机床,也称 CNC 机床。它采用数字代码形式的信息(程序指令)控制刀具按给定的工作程序、运动速度和轨迹来实现零件的自动加工,是一种综合应用了计算机技术、自动控制技术、精密测量技术和伺服驱动技术等先进技术的

典型机电一体化产品。在制造过程中,对于不同的加工对象只需改变输入的程序指令,因而数控机床具有广泛的适应性;又因为其加工性能比一般自动机床高,可以精密加工复杂型面,所以数控机床适合于加工中小批量、改型频繁、精度要求高、形状较复杂的零件,并能获得较好的经济效益。随着数控技术的进步,采用数控系统的机床品种日益增多,有车床、铣床、镗床、钻床、磨床、齿轮加工机床和电火花加工机床等。此外还有能自动换刀、一次装夹进行多工序加工的加工中心、车削中心等。其中,带有刀具库和自动换刀装置的数控机床即加工中心(Machining Center),已成为当今数控机床发展的主流。

3. 数控系统(Numerical Control System)

为了实现机械运动及加工过程的数字化信息控制,必须具备相应的硬件和软件。这些硬件和软件的整体称为数控系统,其核心是数控装置。

由于数控技术、数控系统、数控装置的英文缩写均可以采用NC(或CNC),因此,在实际应用中,不同场合NC(或CNC)具有三种不同的含义:既可以在广义上代表一种控制技术,又可以在狭义上代表一种控制系统的实体,还可以代表一种具体的控制装置——数控装置。

4. 数控加工(Numerical Control Manufacturing)

数控加工是指采用数字化信息对零件加工过程进行定义,并控制机床进行自动运行的一种自动化加工方法。数控加工的特点是高效率、高精度、高柔性,可以有效地解决复杂、精密、小批量改型频繁零件的加工问题,充分满足现代化生产的需要。数控加工必须由数控机床来完成。

1.1.3 我国数控机床的现状和特点

数控机床产业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,其制造水平高低和拥有数量是衡量一个国家工业现代化程度的重要标志。

近年来,我国企业的数控机床占有率逐年上升,在大中企业已有较多的使用,在中小企业甚至个体企业中也普遍开始使用。但由于国产数控机床不能满足市场的需求,我国机床的进口额呈逐年上升趋势。我国出口额增幅较大的数控机床有数控车床、数控磨床、数控特种加工机床、数控剪板机、数控成形折弯机、数控压铸机等。

数控机床在机械制造领域中得到了日益广泛的应用,是因为它具有以下特点:

1. 自动化程度高

在数控机床加工零件时,除了手工装卸工件以外,全部过程都可由数控机床自动完成。在柔性制造系统中,上下料、检测、诊断、对刀、传输、调度、管理也都可由机床自动完成,这样大大降低了操作者的劳动强度,改善了劳动条件。

2. 具有加工复杂型面的能力

复杂零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防事业等部门的产品制造中具有十分重要的地位,其加工质量直接影响整机产品的质量及性能。数控加工的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法完成的复杂型面的加工。

3. 高柔性

数控机床是按照被加工零件的数控程序来进行自动加工的,不需要准备专用的靠模、样板、钻镗模等工艺装备,只需改变程序即可适应不同品种的零件加工,加工柔性好,有利于缩短产品的研制和生产周期。

4. 加工精度高，加工质量稳定可靠

数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性，而且具有很高的制造精度。数控机床是通过预先编写好的加工程序进行工作的，加工过程中无需人为的参与和调整，避免了操作者的人为操作误差，同一批零件的尺寸一致性好，产品合格率高，加工质量稳定。数控机床可以通过数控装置进行补偿，来消除或减少热变形、力变形、传动误差和刀具磨损的影响，这在传统机床上是无法做到的。因此，采用数控加工技术可以提高零件的加工精度和产品质量。

5. 生产效率高

一方面是数控机床自动化程度高，具有自动换刀和其他辅助操作自动化功能，而且工序集中，在一次安装中能完成较多表面的加工，省去了划线、多次装夹、检测等工序，有效地缩短了辅助时间；另一方面数控机床具有良好的结构刚性，主轴转速和进给量的范围比普通机床大，可以采用较大的切削用量，有效地减少了加工切削时间。数控机床的加工效率一般是普通机床的2~3倍，尤其在加工复杂零件时，生产效率可以提高十几倍甚至几十倍。

6. 易于建立计算机通信网络

由于数控机床是使用数字信息，易于与计算机辅助设计和制造系统连接，形成计算机辅助设计和制造紧密结合的一体化系统，数控机床还可以与远程网络进行调度和控制，进行异地管理。数控机床及其加工技术是计算机辅助制造系统的基础。

1.2 数控机床的组成和工作原理

1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由输入/输出设备、计算机数控装置（简称CNC装置）、伺服单元、驱动装置（或称执行机构）、测量反馈装置及机床本体组成。

1. 数控装置

数控装置是数控系统的核心，主要包括微处理器、存储器、局部总线、外围逻辑电路以及与数控系统的其他组成部分联系的接口等。它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的控制软件和逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理，然后将各种信息指令输出给伺服系统，使设备各部分进行规范有序的动作。数控机床的数控系统完全由软件处理数字信息，因而具有真正的柔性化，可处理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。

2. 输入/输出设备

输入设备的作用是将程序代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置。现在数控设备通常是直接通过数控装置上的键盘将数控加工程序单上的内容输入给数控装置，称为手动数据输入（MDI）方式。数控系统一般配有CRT显示器或点阵式液晶显示器作为输出设备，显示的信息较丰富，并能显示图形。操作人员可通过显示器获得必要的信息。

3. 伺服单元

伺服单元是数控装置和机床本体的联系环节，它把来自数控装置的指令信号放大成控制驱动装置的大功率信号。根据接收指令的不同，伺服单元有脉冲式和模拟式之分，而模拟式

伺服单元按电源种类又可分为直流伺服单元和交流伺服单元。

4. 驱动装置

驱动装置把放大的指令信号变为机械运动，通过简单的机械连接部件驱动机床，使工作台精确定位或按规定的轨迹做严格的相对运动，最后加工出图纸所要求的零件。驱动装置与伺服单元相对应，有步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机等。

伺服单元和驱动装置可合称为伺服驱动系统，它是机床工作的动力装置，数控装置的指令要靠伺服驱动系统来实施。数控装置可以采用很高的精度和速度进行计算并发出脉冲信号，关键在于伺服系统能以多高的速度和精度去响应执行。所以从某种意义上说，数控机床的功能强弱主要取决于数控装置，而数控机床性能的好坏主要取决于伺服驱动系统。

5. 测量反馈装置

测量反馈装置是将运动部件的实际位移、速度及当前的环境（如温度、振动、摩擦和切削力等因素的变化）参数加以检测，转变为电信号后反馈给数控装置，通过比较，得出实际运动与指令运动的误差，并发出误差指令，纠正所产生的误差。

6. 机床本体

数控机床在加工过程中一般具有切削用量大、连续加工发热量大等特点，因而对加工精度有一定影响；且在加工中是自动控制，没法像普通机床一样由人工进行调整、补偿，所以数控机床本体的设计要求比普通机床更严格，制造要求更精密，需要采取加强刚性、减小热变形、提高精度等方面的措施。

1.2.2 数控加工的工作过程和基本原理

1. 数控加工的工作过程

数控机床加工零件是按照事先编写好的加工程序单来进行的。

首先，对产品零件图进行工艺分析，根据图样中对材料和尺寸、形状、加工精度及热处理等的要求来确定加工方案，进行工艺处理和数值计算，确定合理的程序原点（对刀点）、走刀路线及切削用量。在此基础上，根据数控系统规定的功能指令代码和程序段格式编写数控加工程序单。编程中的数学处理包括：按零件几何尺寸、加工路线，计算刀具中心运动轨迹取得刀位数据；根据机床插补功能及被加工零件轮廓的复杂程度决定计算工作量，计算量小可手工计算完成，若计算量大则要依靠自动编程系统进行计算。目的是获得零件轮廓相邻几何元素交点或切点的坐标值，得出几何要素的起点、终点、圆弧的圆心坐标值等。

然后，编写好的加工程序单，可以制成输入纸带、磁带或磁卡。其中所包含的加工数据可通过光电阅读机、键盘或计算机接口三种方式输入给数控机床的数控装置。数控装置将输入指令进行译码、寄存和运算后，向系统各个坐标的伺服系统发出指令信号，经驱动电路的放大处理，驱动伺服电动机输出角位移和角速度，并通过执行部件的传动系统转换为工作台的直线位移，实现进给运动。计算机数控的控制功能很强，可以同时控制多根轴。

2. 数控加工的基本原理

数控加工时以程序段为单位，由系统程序逐段进行处理，不仅将刀位数据还将加工速度F代码及其他辅助代码（S代码表示主轴转速，T代码表示刀具号，M代码表示辅助功能指令）均按语法规则解释成计算机所能认可的数据形式，并以一定的格式存放在内存专用区

间。此外，对刀具补偿（长度与半径补偿）作处理，对进给速度（合成速度分解成沿各坐标的分速度以及自动增减速等）做处理，完成加工中的插补运算（由主 CPU 担任），数据由存储区间调入时，依靠控制总线通过地址总线取址并将数据沿数据总线输入 CPU 运算，结果仍沿总线返回，分别送至相关输出接口。输出信号也要通过一系列电路处理（分配、中断和缓冲），才能使伺服电机进给，使主轴按转速回转或停止。CRT 显示出程序执行过程，并输出位置环与速度环的反馈信号经总线往返后由 CPU 进一步随机处理的结果。全部过程均在时钟频率的统一控制下，有条不紊地进行工作。

数控系统的工作原理可以用图 1-1 来表示。

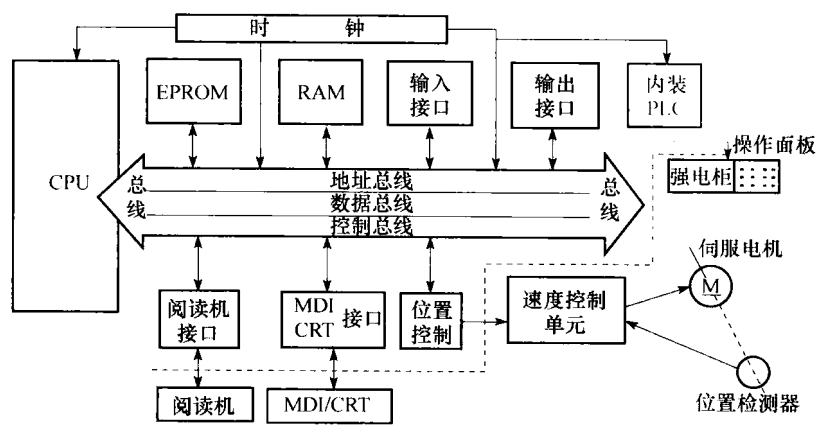


图 1-1 数控系统工作原理示意图

下面对各个加工过程的工作原理进行说明。

(1) 输入

加工零件前，要对数控装置输入零件程序、控制参数以及各种补偿数据。输入方式通常分为：a) MDI 输入方式，也叫做手动数据输入方式；b) 介质输入方式，如纸带通过光电阅读机输入或磁盘、磁卡通过接口输入；c) 计算机输入方式，由上级计算机的 DNC（直接数控）接口输入。

(2) 译码

按语法规则将输入信息以程序段为单位，翻译成计算机所能识别的代码形式，并以一定的数据格式存放在指定的内存专用区间。

(3) 刀具补偿

由于加工零件程序编写是以零件的轮廓轨迹来编程，而加工实际中是以刀具中心点所移动的轨迹为依据。因此，必须在刀具半径和刀具长度上给予补偿，即进行两者之间的转换。

(4) 进给速度处理

它包括将刀具速度由编程中的合成速度转换为各坐标上的分速度的处理以及软件自动增、减速的处理。

(5) 插补

当零件的被加工面含有斜、锥或曲面时，数控机床需要依靠预先编写好的程序指令，以数值计算方法密化起始点至终止点间给出的数学特征方程式或离散点之间的小线段，以插值方法完成刀具应走的轨迹从而达到工艺要求，这个过程叫做“插补”。完成“插补”功能的装

置叫做“插补器”。其本质是在保证零件轮廓精度的要求下，把程序起点至程序终点间分成足够微小的线段进行插补，完成定义域内两点之间线段的密化工作。在车削时，通过两个轴联合行动则可形成斜面或曲面，但在箱体零件加工曲面时，至少要有三个坐标配合运动。由此可见，有些曲面可以用两轴联动由第三轴控制加工出来，有些则要三轴联动或三轴以上联动。

(6) 位置控制

在伺服回路的位置环上控制位置，这种功能可由软件完成，也可由硬件完成。在闭环（或半闭环）控制系统中，在每个采样周期（可以和插补周期相等或为插补周期的若干分之一）内，将插补计算出的理论位置与实际反馈位置进行比较，用差值去控制进给电机。在位置控制中，通常还要完成位置回路的增益调整、各坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿。在开环控制系统中，每进行一次插补运算都产生进给增量，并以脉冲的形式输出。在插补运算过程中，不断向各坐标轴发出互相协调的进给脉冲，控制步进电机运行。如图 1-2 所示。

(7) 输入/输出 (I/O) 处理

机床上的强电信号输入/输出和计算机一侧的弱电信号进行交换与处理，以便控制许多应答式动作，如换刀或润滑启闭、冷却供断等。

(8) 显示

数控机床的显示大多为 CRT（阴极射线管）显示。通常显示零件程序、参数、机床状态、刀具、报警及自诊断等。

(9) 诊断

当故障或不正常情况出现时，系统融合在各部分的自诊断程序会使机床报警，中断运行。同时，各种诊断程序也可以检测各部位的故障所在，以便及时排除故障。

1.2.3 运动轨迹的离散与拟合

数控加工中心刀具或工件的运动轨迹的控制是核心问题，刀具中心轨迹应该准确地依照工件的轮廓形状来生成，以满足几何尺寸精度的要求。对于平面直线和曲线的运动需要两个运动坐标来确定，对于空间曲线或曲面则需要三个或以上的运动坐标来确定。有些曲线或曲面可直接计算出运动轨迹，如 $y=f(x)$ 的运动轨迹。可是有些离散数据表示的曲线或曲面很难直接计算，如列表曲线（曲面）。即使是可直接计算的曲线或曲面，曲线的阶次越高，计算也越难。

进行加工的零件的轮廓形状千差万别，但其轮廓大部分是由直线和圆弧构成的。直线和圆弧是简单基本的曲线。因此，实际应用中常采用一小段直线或圆弧来进行拟合（有时也需要抛物线和高次曲线拟合），这种拟合方法就是“插补”。实际上，插补就是数据密化的过程，即数控装置根据基本的几何数据，按照一定的方法产生直线、圆弧等基本线型，在此基础上拟合所需要的轮廓轨迹。如图 1-3 所示为圆弧插补过程。

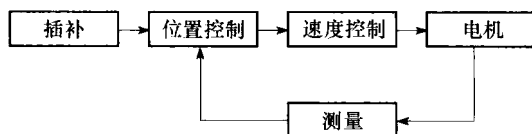


图 1-2 位置控制原理

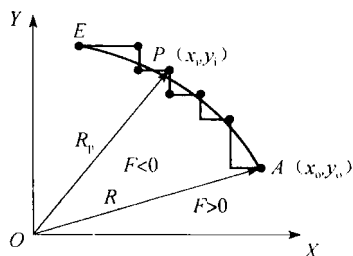


图 1-3 圆弧插补过程

1.3 数控机床的分类

数控机床的品种很多,可根据其加工方式、伺服控制方式和轨迹运动方式等方面进行分类。

1.3.1 按加工方式分类

1. 金属切削类数控机床

与传统的车、铣、钻、磨、齿轮加工相对应的数控机床有数控车床、数控铣床、数控钻床、数控磨床、数控齿轮加工机床等。尽管这些数控机床在加工工艺方法上存在很大差异,具体的控制方式也各不相同,但机床的动作和运动都是数字化控制的,具有较高的生产率和自动化程度。

普通数控机床上加装一个刀库和换刀装置就成为数控加工中心机床。加工中心机床进一步提高了普通数控机床的自动化程度和生产效率。例如,铣、镗、钻加工中心,它是在数控铣床基础上增加了一个容量较大的刀库和自动换刀装置形成的,工件一次装夹后,可以对箱体零件的四面甚至五面进行铣、镗、钻、扩、铰以及攻螺纹等多工序加工,特别适合箱体类零件的加工。加工中心机床可以有效地避免由于工件多次安装造成的定位误差,减少了机床的台数和占地面积,缩短了辅助时间,大大提高了生产效率和加工质量。

2. 特种加工类数控机床

除了切削加工数控机床以外,数控技术也大量用于数控电火花线切割机床、数控电火花成型机床、数控等离子弧切割机床、数控火焰切割机床及数控激光加工机床等特种加工机床。

3. 板材加工类数控机床

常见的应用于金属板材加工的数控机床有数控压力机、数控剪板机和数控折弯机等。

4. 其他类型的数控机床

近年来,其他机械设备中也大量采用了数控技术,如数控多坐标测量机、自动绘图机及工业机器人等。

1.3.2 按伺服控制方式分类

1. 开环控制数控机床

这类数控机床的控制系统没有位置检测元件,伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机。数控系统每发出一个进给指令,经驱动电路功率放大后,驱动步进电机旋转一个角度,再经过齿轮减速装置带动丝杠旋转,通过丝杠螺母机构转换为移动部件的直线位移。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率与脉冲数所决定的。此类数控机床的信息流是单向的,即进给脉冲发出去后,实际移动值不再反馈回来,所以称为开环控制数控机床。

开环控制系统的数控机床结构简单,成本较低。但是,系统对移动部件的实际位移量不进行监测,也不能进行误差校正。因此,步进电动机的失步、步距角误差、齿轮与丝杠等传动误差都将影响被加工零件的精度。开环控制系统仅适用于加工精度要求不高的中小型数控机床,特别是简易经济型数控机床。

2. 闭环控制数控机床

闭环控制数控机床是在机床移动部件上直接安装直线位移检测装置,直接对工作台的实

际位移进行检测，将测量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，用差值对机床进行控制，使移动部件按照实际需要的位移量运动，最终实现移动部件的精确运动和定位。从理论上讲，闭环系统的运动精度主要取决于检测装置的检测精度，与传动链的误差无关，因此其控制精度高。这类数控机床因把机床工作台纳入了控制环节，故称为闭环控制数控机床。

闭环控制数控机床的定位精度高，但调试和维修都较困难，系统复杂，成本高。

3. 半闭环控制数控机床

半闭环控制数控机床是在伺服电动机的轴或数控机床的传动丝杠上装有角位移电流检测装置（如光电编码器等），通过检测丝杠的转角间接地检测移动部件的实际位移，然后反馈到数控装置，并对误差进行修正。由于工作台没有包括在控制回路中，因而称为半闭环控制数控机床。

半闭环控制数控系统的调试比较方便，并且具有很好的稳定性。目前大多将角度检测装置和伺服电动机设计成一体，这样使结构更加紧凑。

4. 混合控制数控机床

将以上三类数控机床的特点结合起来，就形成了混合控制数控机床。混合控制数控机床特别适用于大型或重型数控机床，因为大型或重型数控机床需要较高的进给速度与相当高的精度，其传动链惯量与力矩大，如果只采用全闭环控制，机床传动链和工作台全部置于控制闭环中，闭环调试会比较复杂。混合控制系统又分为两种形式。

(1) 开环补偿型

图 1-4 为开环补偿型控制方式。它的基本控制选用步进电动机的开环伺服机构，另外附加一个校正电路。用装在工作台的直线位移测量元件的反馈信号，校正机械系统的误差。

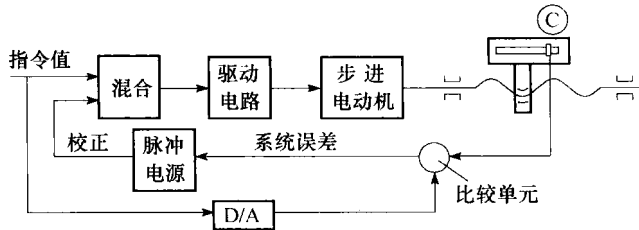


图 1-4 开环补偿型控制方式
C—直线位移测量元件

(2) 半闭环补偿型

图 1-5 为半闭环补偿型控制方式。它是用半闭环控制方式取得高精度控制，再用装在工作台上的直线位移测量元件实现全闭环修正，以获得高速度与高精度的统一。

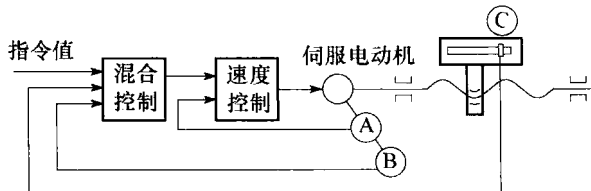


图 1-5 半闭环补偿型控制方式
A—速度测量元件（如测速发电机） B—角度测量元件 C—直线位移测量元件

1.3.3 按轨迹运动方式分类

1. 点位控制数控机床

点位控制数控机床的特点是机床移动部件只能实现由一个位置到另一个位置的精确定位,在移动和定位过程中不进行任何加工。机床数控系统只控制行程终点的坐标值,不控制点与点之间的运动轨迹,因此几个坐标轴之间的运动无任何联系。几个坐标可以同时向目标点运动,也可以单独依次运动。

这类数控机床主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控点焊机等。点位控制数控机床的数控装置称为点位数控装置。

2. 直线控制数控机床

直线控制数控机床可控制刀具或工作台以适当的进给速度,沿着平行于坐标轴的方向进行直线移动和切削加工,进给速度根据切削条件可在一定范围内变化。

直线控制的简易数控车床只有两个坐标轴,可加工阶梯轴。直线控制的数控铣床有三个坐标轴,可用于平面的铣削加工。

数控镗铣床、加工中心等机床的各个坐标方向的进给运动的速度能在一定范围内进行调整,兼有点位和直线控制加工的功能,这类机床应该称为点位/直线控制的数控机床。

3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床能够对两个或两个以上运动的位移及速度进行连续相关的控制,使合成的平面或空间的运动轨迹能满足零件轮廓的要求。它不仅能控制机床移动部件的起点与终点坐标,而且能控制整个加工轮廓每一点的速度和位移,将工件加工成要求的轮廓形状。

常用的数控车床、数控铣床、数控磨床就是典型的轮廓控制数控机床。数控火焰切割机、电火花加工机床及数控绘图机等也采用了轮廓控制系统。轮廓控制系统的结构要比点位/直线控制系统更复杂,在加工过程中需要不断进行插补运算,然后进行相应的速度与位移控制。

1.4 数控技术的发展

1.4.1 数控机床的发展趋势

数控机床的发展是制造技术发展的结果,也是机床自动化技术,特别是以数控系统为代表的新技术对传统机械制造产业的渗透而形成的机电一体化产品的结果。现代数控系统的技术范围覆盖了自动控制技术、电子技术、数字技术、电力电子和电动机技术、精密测量技术、软件技术、通信技术、机械制造技术等。

近年来,由于计算机软硬件技术、微电子技术以及伺服控制技术的迅速发展和以现代控制理论、智能控制技术为基础的高精度、高速响应交流伺服系统的出现,使数控系统性能日臻完善,各项性能指标大为提高。数控机床为适应加工技术发展,其趋势是向高速化、高精度化、高效加工、多功能化、复合化和智能化方向发展。

1. 高速化与高精度化

随着数控机床向高速度、高精度方向发展,它要求数控装置能高速处理输入的指令数据