



中等职业学校机电类专业规划教材
根据教育部最新教学指导方案编写

数控系统

SHUKONG XITONG

主 编 王显涛 郑 理

主 审 邱士安



电子科技大学出版社

中等职业学校机电类专业规划教材

数 控 系 统

主 编 王显涛 郑 理

主 审 邱士安

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是根据机械类中等职业技术学校《数控系统》课程的教学大纲编写的。全书共六章，内容包括数控系统概述、数控系统的基本结构、位置检测装置、伺服系统、数控系统的使用、数控系统的调试与维护。每章均附有习题。

本书可作为中等职业技术学校数控加工专业、模具加工技术专业，机电一体化专业，机械制造专业等专业的教材，亦可作为从事数控编程、数控机床应用与维护的工程技术人员参考书。

图书在版编目（CIP）数据

数控系统/王显涛，郑理主编．—成都：电子科技大学出版社，2007.6
ISBN 978-7-81114-540-3

I. 数… II. ①王…②郑… III. 数控机床—数控系统—专业学校—教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 092513 号

数 控 系 统

主 编 王显涛 郑 理

主 审 邱士安

出 版：电子科技大学出版社（成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编：610051）

责任编辑：辜守义 张 鹏

发 行：新华书店经销

印 刷：四川墨池印务有限公司

成品尺寸：185mm×260mm 印张 7.5 字数 190 千字

版 次：2007 年 6 月第一版

印 次：2007 年 6 月第一次印刷

书 号：ISBN 978-7-81114-540-3

定 价：15.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话：（028）83202323，83256027

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误，请寄回印刷厂调换。

◆ 课件下载在我社主页 www.uestcp.com.cn “下载专区” 电子邮箱：uestcp@uestcp.com.cn

前 言

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设计划，我们组织本专业领域的骨干教师精心编写了本教材。

数控技术及数控机床在当今机械制造业中的重要地位和巨大效益，显示了其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。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。掌握现代数控技术知识是现代机电类专业学生必不可少的。本书根据国内数控技术及数控机床的应用情况，针对中等职业学校机电类专业的教学特点，突出数控技术的实用性和数控机床的操作性，力求做到理论与实践的最佳结合。

本书共有六章。第一章、二章、五章由成都电子机械高等专科学校郑理编写，第三章、四章、六章由成都电子机械高等专科学校王显涛编写。全书由成都电子机械高等专科学校邱士安教授审定。

本书贯彻了中等职业技术学校“以技能为目的，突出动手能力”的培养思想，参考了高职高专的能力教育模式，取材适当，内容丰富，理论联系实际。书中配有大量编程实例及习题，图文并茂，直观易懂，便于学生自主学习。同时，该教材吸取了该专业应用的最新成果，兼顾了数控设备的知识和编程方法的先进性和实用性。

为了方便教师教学，我们免费为使用本套教材的师生提供电子教学参考资料包：

- ◆ PowerPoint 多媒体课件
- ◆ 习题参考答案
- ◆ 教材中的程序源代码
- ◆ 教材中涉及的实例制作的各类素材

有需要的教师可以登录教学支持网站免费下载。在教材使用中有什么意见或建议也可以直接和我们联系，电子邮件地址：scqcmh@163.com。

由于时间仓促和编者水平有限，书中疏漏和谬误在所难免，恳请读者不吝指教，以便进一步修改。

编 者

目 录

第 1 章 数控系统概述	1
1.1 数控技术的基本概念	1
1.2 数控系统的基本组成及工作过程	1
1.2.1 数控系统的基本组成及作用	2
1.2.2 数控系统的工作过程	3
1.3 数控系统的分类及应用特点	5
1.3.1 按控制的运动轨迹分类	5
1.3.2 按伺服系统的控制方式分类	6
1.3.3 按数控系统功能水平分	8
1.4 数控技术的发展及应用现状	9
1.4.1 数控技术的发展简史	9
1.4.2 数控系统应用现状	10
【本章小结】	11
【习题】	11
第 2 章 数控系统的基本结构	12
2.1 数控系统的硬件结构	12
2.1.1 单微处理器结构的 CNC 装置	12
2.1.2 多微处理器结构的 CNC 装置	13
2.2 数控系统实例——SINUMERK 840D 数控系统	14
2.2.1 功能模块式结构介绍	15
2.2.2 德国西门子公司 SINUMERK 840D 数控系统	15
2.3 数控系统的软件结构	22
2.4 数控系统的信息处理	24
【本章小结】	26
【习题】	27
第 3 章 位置检测装置	28
3.1 旋转变压器	28
3.1.1 旋转变压器的工作原理	29
3.1.2 旋转变压器的应用	30
3.2 感应同步器	30
3.2.1 感应同步器的结构与工作原理	31



3.2.2	感应同步器的应用	32
3.2.3	感应同步器的特点	33
3.3	光栅	34
3.3.1	光栅的种类	34
3.3.2	光栅传感器的工作原理	35
3.3.3	光栅传感器的应用	36
3.4	磁栅	38
3.4.1	磁栅的结构和种类	39
3.4.2	磁头的结构和种类	40
3.4.3	磁栅传感器的应用	41
3.5	编码器	42
3.5.1	增量式编码器	43
3.5.2	绝对值式编码器	44
3.5.3	绝对式脉冲编码器的特点及应用	46
	【本章小结】	46
	【习题】	46
第 4 章	伺服系统	47
4.1	概述	47
4.1.1	伺服系统的基本组成	47
4.1.2	伺服系统分类	48
4.1.3	伺服系统的发展趋势	48
4.2	步进电动机	50
4.2.1	步进电动机的分类	50
4.2.2	步进电动机的结构及工作原理	50
4.2.3	步进电动机的通电方式及其特点	52
4.2.4	步进电动机的主要特性	52
4.2.5	步进电机的驱动控制系统	54
4.2.6	步进电机的开环进给系统	59
4.3	直流伺服系统	60
4.4	交流伺服电动机	64
4.5	进给伺服系统	68
4.5.1	进给伺服系统的要求	69
4.5.2	典型进给伺服系统	70
4.6	主轴伺服系统	72
4.6.1	主轴伺服系统的要求	72
4.6.2	典型主轴伺服系统	73
4.6.3	主轴的换挡及控制	77

【本章小结】	78
【习题】	79
第 5 章 数控系统的使用	80
5.1 数控系统中的 PLC	80
5.1.1 数控机床的 PLC	80
5.1.2 数控机床 M、S、T 功能的实现	82
5.2 通信接口与网络	86
5.2.1 数据通信基本要求	86
5.2.2 数据通信系统的组成	86
5.2.3 数控系统的数据通信接口要求	87
5.2.4 串行通信接口的连接	88
5.2.5 数控设备的网络通信	90
5.3 经济型数控系统	91
5.3.1 经济型数控系统的类型	91
5.3.2 经济型数控系统的技术参数	91
5.3.3 经济型数控系统的组成与连接	92
5.4 数控系统的抗干扰	95
5.4.1 数控系统的环境条件	95
5.4.2 数控系统抗干扰措施	96
5.4.3 数控系统安装和接线技术规范	97
【本章小结】	99
【习题】	99
第 6 章 数控系统的调试与维护	100
6.1 数控系统的调试	100
6.2 数控系统的维护	102
6.3 数控系统的故障诊断	104
6.3.1 数控机床故障诊断	104
6.3.2 数控机床的故障诊断技术	105
6.3.3 数控机床的常见故障排除方法	106
6.3.4 数控机床维修后的开机调试	109
6.3.5 维修调试后的技术处理	110
【本章小结】	110
【习题】	110
参考文献	111

第 1 章 数控系统概述

【学习目标】

1. 掌握数控技术的基本概念。
2. 掌握数控系统的组成及工作过程。
3. 了解数控系统的发展概况。

1.1 数控技术的基本概念

数字控制技术，简称数控（Numerical Control 缩写为 NC）技术，是以数字或数字代码的形式来实现控制的一门技术。根据不同的被控对象，有各种数控系统存在，如果一种设备的操作命令是以数字或数字代码的形式来描述，工作过程是按照指定的程序自动地进行，那么这种加工设备就称之为数控设备。其中最早产生的、目前应用最为广泛的是机械加工行业中的各种机床数控系统，即以加工机床为被控对象的数字控制系统，例如：数控车床、数控铣床、数控线切割机、数控加工中心、数控雕刻机、电脑绣花机、衣料开片机等等。

机床数控技术的控制对象是具体的加工设备，也就是把加工产品的整个过程的全部内容（如几何尺寸、加工顺序、运动规律、加工容量、辅助功能等）进行代码化的数字处理，并把它记录在控制介质中（如：穿孔带、磁带、磁盘、存储器等），加工时，将它输入到专用的计算装置或计算机中，经过运算与处理，发出各种控制信号，控制数控设备自动进行加工。当被加工的产品变更时，只要改用另一种描写该产品的控制介质即可，而不需要对加工设备作复杂的调整工作，从而可使生产过程能在个人干预或少干预的情况下自动进行，实现生产过程的自动化。因此数控技术是一种灵活的，高效性的控制技术。

本书主要以机床数控系统为对象，讨论数控系统的工作原理。因此，本书中的数控系统具体指机床数控系统。

1.2 数控系统的基本组成及工作过程

机床依靠各个部件的相对运动实现各种零件的加工。在普通机床上按手动和机动两种方式进行控制：手动时，靠手工摇动手把带动机床部件进行运动和停止；机动时，用按钮接通动力源（电动机）经机械传动系统使机床部件运动，运动的停止也是靠按钮或行程开关碰到档铁后切断电路而实现。数字控制机床则是以数字指令方式控制机床各部件的相对运动和动作。

数控系统与被控机床本体的结合称为数控机床。数控机床是具有高附加值的技术密集性



产品，实现了高度的机电一体化。它集机械制造、计算机、微电子、现代控制及精密测量等多种技术为一体、使传统的机械加工工艺发生了质的变化。这个变化的本质就在于用数控系统实现了加工过程的自动化操作。

1.2.1 数控系统的基本组成及作用

数控系统是现代机械制造系统的基础设备之一——数控机床的控制系统。数控系统一般由输入/输出装置、数控装置、伺服驱动装置和辅助控制装置四部分组成。有些数控系统还配有位置检测装置，如图 1-1 所示。

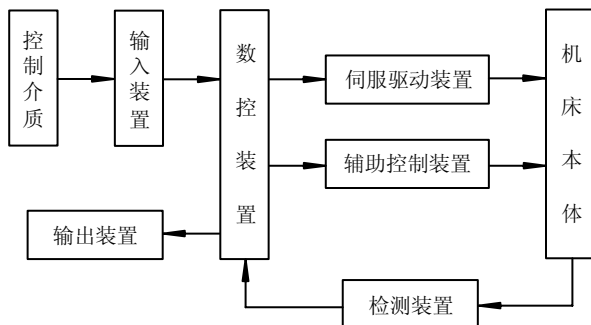


图 1-1 数控系统组成框图

1. 输入/输出装置

CNC 机床在进行加工前，必须接受由操作人员输入的零件加工程序，然后才能根据输入的加工程序进行加工控制，从而加工出所需的零件。在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置要为操作人员显示必要的信息，如坐标值、报警信号等。此外，输入的程序并非全部正确，有时需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员进行信息交流的过程，要进行信息交流，CNC 系统中必须具备必要的交互设备，即输入/输出装置。

键盘和显示器是数控系统不可缺少的人机交互设备，操作人员可通过键盘和显示器输入程序、编辑修改程序和发送操作命令，即进行手动数据输入（MDI, Manual Data Input），因而键盘是 MDI 中最主要的输入设备。数控系统通过显示器为操作人员提供必要的信息，根据系统所处的状态和操作命令的不同，显示的信息可以是正在编辑的程序，或是机床的加工信息。较简单的显示器只有若干个数码管，显示的信息也很有限；较高级的系统一般配有 CRT 显示器或点阵式液晶显示器，显示的信息较丰富；低档的显示器或液晶显示器只能显示字符，中、高档的显示系统能显示图形。

数控加工程序编制好后，一般存放于便于输入到数控装置的一种控制介质上。传统的方式是将编制好的程序记录在穿孔纸带或磁带上，然后由纸带阅读机或磁带机输入数控系统，因此纸带阅读机和磁带机是数控机床的典型输入设备。

数控机床程序输入的方法除上述的键盘、磁盘、磁带和穿孔纸带外，还可以用串行通信的方式输入。随着 CAD、CAM、CIMS 技术的发展，机床数控系统和计算机的通信显得越来越重要。

2. 数控装置

数控装置是数控系统的核心。它的主要功能是将输入装置传送的数控加工程序，经数控装置系统软件进行译码、插补运算和速度预处理等。系统进行数控加工程序译码时，将其区分成几何数据、工艺数据和开关功能。几何数据是刀具相对于工件运动路径的数据，利用这些数据可加工出要求的工件几何形状；工艺数据是主轴转速 S 和进给速度 F 等功能的数据；开关功能是对机床电器的开关命令，如主轴启/停、刀具选择和交换、切削液的开/关、润滑油的启/停等。

数控装置的插补器根据曲线段已知的几何数据以及相应工艺数据中的速度信息，计算出曲线段起点、终点之间的一系列中间点，分别向机床各个坐标轴发出速度和位移信号，通过各个轴运动的合成，形成符合数控加工程序要求的工件轮廓的刀具运动轨迹。

由数控装置发出的开关命令在系统程序的控制下，输出给机床控制器。在机床控制器中，开关命令和机床反馈信号一起被处理和转换为对机床开关设备的控制命令。现代数据系统中，绝大多数机床控制器都采用可编程逻辑控制器（PLC——Programmable Logical Control）实现开关控制。

3. 伺服驱动装置

伺服驱动装置接受数控装置的指令，驱动机床执行机构运动的驱动部件（如主轴驱动、进给驱动）。它包括伺服控制电路、功率放大线路和伺服电机等，并与机床上的机械传动部件组成数控机床的进给系统。每个进给运动的执行部件都配有一套伺服驱动装置，伺服驱动装置有开环、半闭环和闭环之分。伺服电机常用的有步进电动机、电液马达、直流伺服电动机和交流伺服电机。一般来说，数控机床的伺服驱动，要求有好的快速响应性能，能够灵敏而准确地跟踪由数控装置发出的指令信号。

4. 辅助控制装置

辅助控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制装置，通过可编程逻辑控制器（PLC）来实现对机床辅助功能 M 、主轴速度功能 S 和换刀功能 T 的逻辑控制。

5. 测量反馈装置

该装置由测量部件和响应的测量电路组成，其作用是检测速度和位移，并将信息反馈给数控装置，构成闭环控制系统。没有测量反馈装置的系统称为开环控制系统。常用的测量部件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

位置检测装置通过直接或间接测量将执行部件的实际进给位移检测出来，并反馈到数控装置并与指令位移进行比较，将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动，以提高系统精度。

1.2.2 数控系统的工作过程

1. 输入

将零件加工程序、控制参数和补偿数据等输入给数控系统。输入方式有早期穿孔纸带阅读输入、磁盘输入、光盘输入、手动键盘输入、通信接口输入及连接上级计算机的 DNC 接



口输入。CNC 装置在输入过程中还要进行输入代码的校验和代码的转换工作。输入的全部数据信息都存放到 CNC 装置内部的存储器中。

2. 译码

输入的程序段含有零件的轮廓信息（起点、终点、直线还是圆弧等）、要求的加工速度以及其他的辅助信息（换刀、换挡、冷却液开关等）。计算机依靠译码程序来识别这些符号，将加工程序翻译成计算机内部能识别的语言。

3. 数据处理

数据处理程序有三个任务，即刀具半径补偿、速度计算和辅助功能的处理。

刀具半径补偿是把零件轮廓轨迹转化为刀具中心轨迹；速度计算是确定该加工数据段以什么样的速度运动，加工速度的确定是一个工艺问题，数控系统仅仅是保证这个编程速度的可靠实现；辅助功能处理是指换刀、主轴启动/停止、冷却液开/停等辅助功能的处理（即 M、S、T 功能的传送及其先后顺序的处理）。

4. 插补

即根据给定的曲线类型（如直线、圆弧或高次曲线）、起点、终点以及速度，在起点和终点之间进行数据点的密化。

插补的任务是通过插补计算程序在一条曲线的已知起点和终点之间进行“数据点的密化工作”。插补程序在每个插补周期运行一次，在每个插补周期内，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。通常，经过若干个插补周期后，插补加工完一个程序段，即完成从程序段起点到终点的“数据密化”工作。具体方法是：在一个插补周期内，计算出一个微小数据段的每个坐标分量（如 Δx 、 Δy ），经过若干个插补周期，可以计算出从起点到终点之间的若干个微小直线数据段。每个插补周期所计算出的微小直线段都应足够小，以保证轨迹精度。

数控系统的插补功能主要由软件来实现，目前主要有两类插补方法：一是脉冲增量插补，它的特点是每次插补运算结束产生一个进给脉冲；二是数字增量插补，它的特点是插补运算在每个插补周期进行一次，根据指令进给速度计算出一个微小的直线数据段。

目前，在一般 CNC 装置中，仅能对直线、圆弧和螺旋线进行插补计算。在一些专用的或较高档的 CNC 装置中还能完成椭圆、抛物线、正弦线和一些专用的插补计算。插补计算的实时性很强，要尽量缩短一次插补运算的时间，以便更好地处理其他工作，并使进给最大速度得以提高。

5. 位置控制

位置控制可以由软件来实现，也可以由硬件来完成。它的主要任务是在每个采样周期内，将插补计算出的理论位置与实际反馈位置相比较，用其差值去控制进给伺服电机。在位置控制中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，以提高机床的定位精度。

6. I/O 处理

I/O 处理主要是处理 CNC 装置与机床之间的强电信号输入、输出和控制。

7. 显示

CNC 装置的显示主要是为操作者提供方便, 通常有: 零件程序的显示、参数显示、刀具位置显示、机床状态显示等。高档 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静、动态图形显示, 以及在线编程时的图形显示等。

8. 诊断

现代 CNC 装置都具有联机 and 脱机诊断能力。联机诊断是指 CNC 装置中的自诊断程序(这种自诊断程序融合在各个部分)随时检查不正常的事件。脱机诊断是指系统不工作, 但在运转条件下的诊断。一般 CNC 装置配备有各种诊断纸带, 以检查存储器、外围设备、I/O 接口等。脱机诊断还可以采用远程通信方式进行, 即把用户的 CNC 装置通过电话线与远程诊断中心的计算机相连, 由诊断中心计算机对 CNC 装置进行诊断、故障定位和修复工作。

1.3 数控系统的分类及应用特点

1.3.1 按控制的运动轨迹分类

1. 点位控制数控系统

点位控制是指刀具在从某一位置移到下一个位置的过程中, 不考虑其运动轨迹, 只要求刀具能最终准确到达目标位置。刀具在移动过程中不切削, 一般采用快速运动。其移动过程可以是先沿一个坐标方向移动, 再沿另一个坐标方向移动到目标位置, 也可沿两个坐标同时移动。为保证定位精度和减少移动时间, 一般采用先高速运行, 当接近目标位置时, 再分级减速慢速趋近目标位置。

具有点位控制数控系统的机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。如点位控制数控钻床的加工示意图如图 1-2 所示。



图 1-2 点位控制数控钻床加工示意图

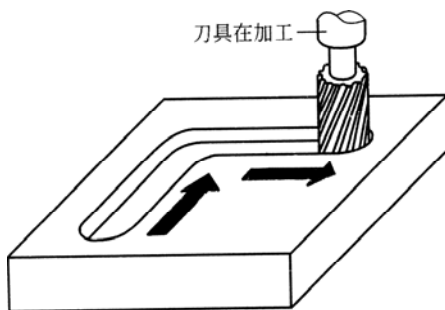


图 1-3 点位直线控制数控镗铣床加工示意图

2. 点位直线控制数控系统

这类数控系统不仅要保证点与点之间的准确定位, 而且要控制两相关点之间的位移速度和路线。其路线一般由与各坐标轴平行的线段或与坐标轴成 45° 的斜线组成。由于刀具在移动过程中要切削, 所以对于不同的刀具和工件, 需要选用不同的切削用量和进给量。这类数



控系统通常具备刀具半径和长度补偿功能以及主轴转速控制功能，以便在刀具磨损或换刀具后能得到合格的零件。

具有点位直线控制数控系统的机床主要有简易数控车床、数控镗铣床、数控磨床等，点位直线控制数控镗铣床的加工示意图，如图 1-3 所示。在一般情况下这些数控机床有两到三个可控轴，但同时可控制的只有一个轴。

3. 轮廓控制数控系统

轮廓控制数控系统（也称连续控制数控系统），其控制特点是能够对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度同时进行插补控制。为了满足刀具沿工件轮廓的相对运动轨迹符合工件加工轮廓的要求，必须将各坐标运动的位移控制和速度控制按照规定的比例关系精确地协调起来。因此在这类控制方式中，就要求数控装置具有插补运算功能。

轮廓控制数控系统具有直线和圆弧插补功能、刀具补偿功能、机床轴向运动误差补偿、丝杠的螺距误差和齿轮的反向间隙误差补偿等功能。该类机床可加工曲面、叶轮等复杂形状的零件。具有轮廓控制数控系统的机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机床、加工中心等，轮廓控制数控铣床的加工示意图如图 1-4 所示。

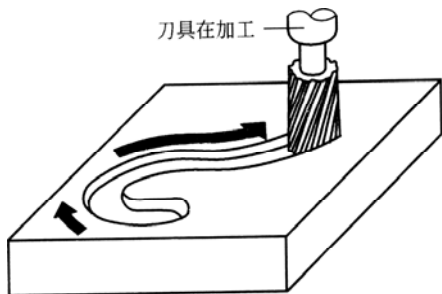


图 1-4 轮廓控制数控铣床加工示意图

1.3.2 按伺服系统的控制方式分类

1. 开环控制数控系统

这类数控机床不带有位置检测装置，数控装置将零件程序处理后，输出数字指令信号给伺服系统，驱动机床运动，其控制系统的工作原理如图 1-5 所示。

这类数控机床的伺服驱动系统一般与脉冲增量插补算法相配合，目前均选用功率型步进电动机作为驱动组件。步进电动机的主要特征是控制电路每变换一次指令脉冲信号，电动机就转动一个步距角，并且电动机本身就有自锁能力。

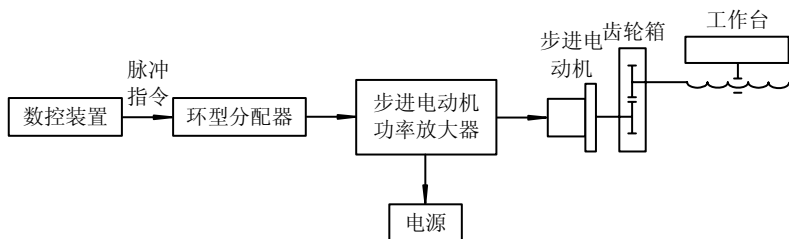


图 1-5 开环控制数控系统的工作原理图

数控装置输出的进给指令脉冲信号通过环形分配器来控制驱动电路，通过改换脉冲的个数来控制坐标位移量，改换脉冲的频率来控制位移速度，改变脉冲的分配顺序来控制位移的方向。因此这种控制方式的最大特点是控制方便、结构简单、价格便宜。数控装置发出的指

令信号流向是单向的，所以不存在控制系统的稳定性问题，但是，由于机械驱动的误差不经过反馈校正，位移精度不高。早期的数控机床均采用这种控制方式，但故障率比较高，随着驱动电路的改进，它仍有较多的应用，尤其是在我国，一般经济型数控系统和旧设备的数控改造多采用这种控制方式。

2. 闭环控制数控系统

这类数控机床的进给伺服驱动是按闭环反馈控制方式工作的，其驱动电动机可采用直流或交流两种伺服电机，并需要配置位置反馈和速度反馈装置，在加工中随时检测移动部件的实际位移量，并及时反馈给数控系统中的比较器，将它与插补运算所得到的指令信号进行比较，其差值又作为伺服驱动的控制信号，进而带动位移部件以消除位移误差，直到差值为零时，进给轴停止运动。

按位置反馈检测组件的安装部位和所使用的反馈装置的不同，这种控制方式又分为全闭环控制和半闭环控制。

(1) 全闭环控制

如图 1-6 所示，其位置反馈装置采用直线位移检测组件（目前一般采用光栅尺），安装在机床的床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量，通过反馈可以消除从电动机到机床工作台的整个机械传动链中的传动误差，得到很高的机床静态定位精度。但是，由于在整个控制环内的许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙等的影响均为非线性，并且整个机械传动链的动态响应时间与电气响应时间相比又非常大，这给整个闭环系统的稳定性校正带来很大困难，系统的设计和调整也都相当复杂。因此，这种全闭环控制方式主要用于精度要求很高的数控坐标镗床、数控精密磨床等。

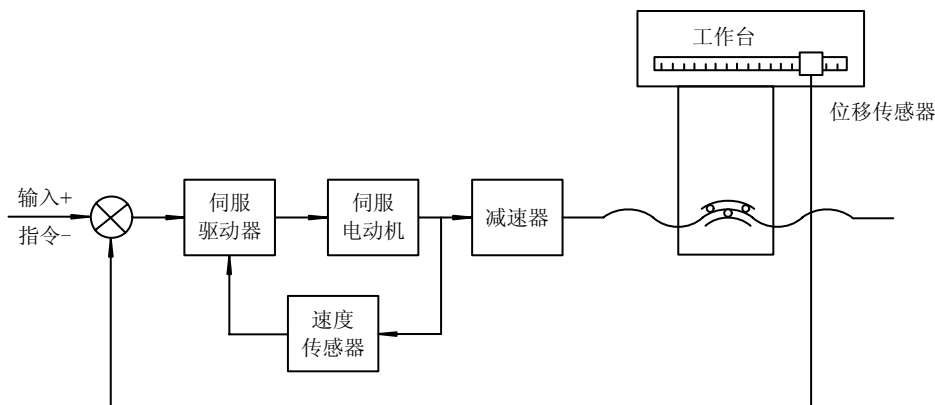


图 1-6 全闭环控制方式数控系统的工作原理图

(2) 半闭环控制

如图 1-7 所示，这种系统是闭环系统的一种派生。它与闭环系统的不同之处仅在将检测组件装在传动链的旋转部位，它所检测得到的不是工作台的实际位移量，而是与位移量有关的旋转轴的转角量（即角位移）。因此，其精度比闭环系统稍差，但是这种系统结构简单，便于调整，检测组件价格也较低，因而，也是广泛使用的一种数控系统。

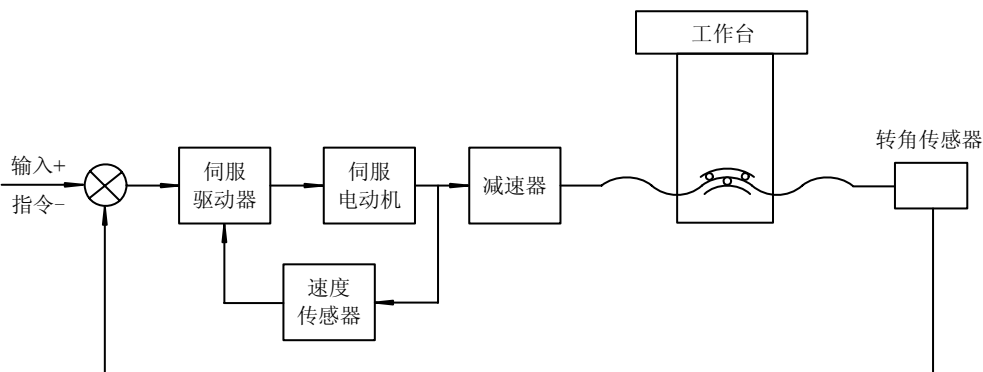


图 1-7 半闭环控制方式数控系统的工作原理图

3. 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。

1.3.3 按数控系统功能水平分

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作为评价数控系统档次的参考条件。

1. 分辨率和进给速度

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

2. 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。

3. 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。

4. 通信功能

低档数控系统一般无通信功能；中档系统有 RS-232 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。

5. 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的 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。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。

1.4 数控技术的发展及应用现状

1.4.1 数控技术的发展简史

随着电子技术的发展，1946 年世界上第一台电子计算机问世，由此掀开了信息自动化的新篇章。1948 年美国北密支安的一个小型飞机工业承包商帕森斯公司（Parsons Co.）在制造飞机的框架及直刀飞机的转动机翼时，提出了采用电子计算机对加工轨迹进行控制和数据处理的设想，后来得到美国空军的支持，并与美国麻省理工学院（MIT）合作，于 1952 年研制出第一台三坐标数控铣床。帕森斯的设想，本身就考虑到刀具直径对加工路径的影响，使得加工精度达到 $\pm 0.0015\text{in}$ （这在当时，水平是相当高的），因而帕森斯获得了专利。1954 年底，美国本迪克斯公司（Bendix Co.）在帕森斯专利的基础上生产出了第一台工业用的数控机床。这时数控机床的控制系统（专用电子计算机）采用的是电子管，其体积庞大，功耗高，仅在一些军事部门中承担普通机床难于加工的形状复杂零件，这是第一代数控系统。

1959 年电子计算机应用晶体管组件和印刷电路板，从而使机床数控系统跨入了第二代。而且 1959 年克耐社列克公司（Kearney & Trecker Co. 简称 K & T 公司）在数控机床设置刀库，并在刀库中装有丝锥、钻头、铰刀等刀具，根据穿孔带的指令自动选择刀具，并通过机械手将刀具装在主轴上，以缩短刀具的装卸时间和减少零件的定位装卡时间。人们把这种带自动交换刀具的数控机床称为加工中心（Machining Center 简称 MC）。加工中心的出现，把数控机床的应用推上了一个更高的层次，它一般都集铣、钻、镗于一身。为以后立式、卧式加工中心、车削中心、磨削中心、五面体加工中心、板材加工中心等的发展打下基础。今天，加工中心已成为市场上非常畅销的一个数控机床品种。目前，美、日、德等工业发达国家加工中心产量几乎占数控机床产量的 25% 以上。

20 世纪 60 年代，出现了集成电路，数控系统发展到第三代。以上三代，都属于硬逻辑数控系统（称为 NC）。由于点位控制的数控系统比轮廓控制的数控系统要简单得多，在该阶段，点位控制的数控机床得到大发展。有资料显示：到 1966 年，在实际使用的 6 000 台数控机床中，85% 是点位控制的数控机床。1967 年英国 Mollin Co. 将 7 台机床用 IBM1360 / 140 计算机集中控制，组成 Mollin24 系统。这就是最初的 FMS（Flexible Manufacturing System）柔性制造系统，能执行生产调度程序和数控程序，具有工件储存、传送和检验自动化的功能。能加工小于 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的工件，适合几件到 100 件的小规模生产。

随着计算机技术的发展，小型计算机应用于数控机床中，由此组成的数控系统称为计算机数控（CNC），数控系统进入第四代。

20 世纪 70 年代初，微处理器出现，美、日、德等国都迅速推出了以微处理器为核心的数控系统，这样组成的数控系统，称为第五代数控系统（MNC 通称为 CNC）。自此，开始了数控机床大发展的时代。

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。

1.4.2 数控系统应用现状

从 1952 年世界上第一台数控机床诞生以来，数控技术的发展已日趋完善，已由最初的硬件数控（NC），经过计算机数控（CNC），发展到今天以微型计算机为基础的数控（MNC）、直接数控（DNC）和柔性制造系统（FMS）等，现在正朝着更高的水平发展。

我国从 1958 年开始研制数控机床，一些高等院校、科研单位、企业从采用电子管着手，到 60 年代曾研究出部分样机，1965 年开始研制晶体管数控系统，到 70 年代初曾研究出数控非圆插齿机、数控立铣床、数控车床、数控镗床、数控磨床、加工中心等。

20 世纪 80 年代初随着改革开放政策的实施，我国从国外引进技术，开始了批量生产微处机数控系统，推动了我国数控机床新的发展高潮，我国开发了立式、卧式加工中心，立式、卧式数控车床，数控铣床，数控钻镗床，数控磨床。其中还有直径 4m 的数控立式车床，镗杆直径达 160 mm 的数控落地镗铣床等。

同时，还在立式、卧式加工中心基础上，配置 10 个工件位置的自动交换工作台（托盘）APC（Automatic Pallet Change）组成柔性制造单元。可以获得夜间（二三班）无人（或少人）看管自动加工，可以安装不同工件，实现混流加工，用软件控制工作台的任选交换识别工件，并按工件自动调出相应的加工程序，并相应的建造了规模较大的 FMS。

80 年代末期，国内还在一定范围内探索实施 CIMS，且取得了一些有益的经验 and 教益。我国在 90 年代还加强了自主知识产权数控系统的研制工作，而且取得一定的成效，如在五轴联动数控系统（分辨率为 $0.02\mu\text{m}$ ）、高精度车床数控系统、数字仿形系统、中低档数控系统等方面都取得了较好的成果。

进入 90 年代以来，国内数控系统的各方面研究力量在以集中优势、突破关键、以我为主、发展产业为原则的基础上，逐步形成了以航天数控集团、机电集团、华中数控、蓝天数控等以生产普及型数控系统为主的国有企业，以及北京-法那科、西门子数控（南京）有限公司等合资企业的基本力量。目前，我国数控系统正处在由研究开发阶段向推广应用阶段过渡的关键时期，也是由封闭型向开放型过渡的时期。

国内数控系统在技术上已趋于成熟，在重大关键技术（包括核心技术）已达到国际先进水平。目前，已新开发数控系统 80 多种。自“七五”以来，国家一直把数控系统的发展作为重中之重来支持，现已开发出具有中国版权的数控系统。特别重要的是，国内数控系统的可靠性已有很大提高，现代数控系统的平均无故障时间（MPBF）值可以在 30000h 以上。同时，大部分数控机床配套产品已能国内生产，自我配套已超过 60%。这些成功为中国数控系统的自行开发和生产奠定了基础。

由于计算机技术、信息技术、网络技术的迅速发展，开放式数控系统的优越性已为越来越多的系统制造商、设备制造商和用户所认识和欢迎。开放式结构迅速使数控系统在通用化、