



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程教材  
北京高等教育精品教材



# 城市轨道交通规划与设计

Planning and Design for Urban Rail Transit

(第二版)

主 编 毛保华  
副主编 陈绍宽 刘智丽  
主 审 刘 迁 秦国栋



人民交通出版社  
China Communications Press

从校园到职场——数控机床维修入门与精通

# 数控机床入门技术基础

严 峻 编著

机械工业出版社

本书共分 12 章,重点介绍了现代数控机床的相关知识,数控机床的选用,典型数控机床,如数控车床、数控铣床、加工中心、数控磨床、数控线切割加工机床等的结构特点、性能、应用要求等,并配以大量的结构图;还介绍了数控机床的控制系统和辅助系统、数控机床的加工工艺等有关知识和基本理论,以及数控机床故障诊断技术和检测仪器的使用方法。

本书内容丰富,详略得当,实用性强,既有理论又有实例,内容由浅入深,循序渐进,图文并茂,实例丰富,着重于应用;理论部分突出简明性、系统性、实用性和先进性。

本书可作为高等职业技术学院、专科学校、电视大学等数控专业的教材,也可作为企业数控维修职业技能的培训用书,同时可供从事数控机床应用的工程技术人员使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床入门技术基础 / 严峻编著. —北京: 机械工业出版社, 2011. 3  
(从校园到职场. 数控机床维修入门与精通)  
ISBN 978-7-111-33293-0

I. ①数… II. ①严… III. ①数控机床 - 基本知识 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 017580 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: 周国萍 责任编辑: 周国萍 李建秀 曾 红

版式设计: 张世琴 责任校对: 姜 婷

封面设计: 路恩中 责任印制: 李 妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20 印张 · 491 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-33293-0

定价: 49.00 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

策划编辑: (010) 88379733

社服务中心: (010) 88361066

网络服务

销售一部: (010) 68326294

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着我国工业技术的飞速发展，产品形状越来越复杂，精度要求越来越高，产品换代越来越快，对传统加工手段提出了挑战。数控加工以其高精度、高效率、高柔性成为制造行业不可缺少的先进加工手段，倍受行业欢迎，因而导致数控加工技术人才需求的急剧增长。作为数控专业的应用型人才，必须懂得数控机床的结构、特点、工艺范围、工作原理等，才能更好地使用和维护数控加工设备。

本书系统、全面地介绍了数控技术、数控装备、数控加工工艺、数控机床故障诊断与维修等方面的基础技术。

本书立足于满足刚毕业的大学生适应企业机床维修工作，掌握数控机床维修工程师理论知识的要求而写的。全书始终以实用作为主线，坚持理论与实际相结合的原则，在进行基本理论阐述后，都有典型结构示例分析；充分体现数控加工行业的“最新热门”和“最新发展”；制造业广泛应用的数控车床、数控铣床、加工中心机床，模具行业广泛应用的数控磨床、数控线切割加工机床等，在本书中都有完整的结构和加工工艺方法介绍；最后还介绍了数控机床常用故障诊断方法和检测仪器的使用。

由于数控技术的飞速发展，加上编著者认识的局限性，书中难免存在不足之处，恳请同仁及读者批评指正。

**编著者**

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 数控机床相关知识</b> .....	1
1.1 数控机床的产生及现状 .....	1
1.1.1 数控技术的产生 .....	1
1.1.2 数控机床的现状 .....	2
1.2 数控机床及数控部件的发展 状态 .....	2
1.2.1 数控机床的发展趋势 .....	2
1.2.2 数控系统及数控部件的发展 趋势 .....	5
1.3 中国数控机床的发展 .....	7
1.3.1 中国数控机床的发展状况 .....	7
1.3.2 中国数控系统的技术水平 .....	7
1.4 数控技术在先进制造技术中的 作用 .....	8
<b>第 2 章 数控机床的组成和工作原理</b> .....	9
2.1 数控机床的组成 .....	9
2.1.1 数控机床的整体结构 .....	9
2.1.2 主机的组成 .....	11
2.2 数控机床的基本工作原理 .....	18
2.2.1 数控机床的加工过程 .....	18
2.2.2 轮廓加工控制 .....	19
2.2.3 数控机床的基本控制要求 .....	20
2.3 数控机床的基本类型 .....	20
2.3.1 按工艺用途分类 .....	20
2.3.2 按运动轨迹分类 .....	21
2.3.3 按伺服系统的控制方式分类 .....	23
2.3.4 按数控装置的类别分类 .....	25
2.3.5 按功能水平分类 .....	25
2.4 数控机床的坐标系和自由度 .....	26
2.4.1 数控机床的坐标系和运动 方向的规定 .....	26
2.4.2 数控机床的坐标系与工件 坐标系 .....	28
2.4.3 数控机床的自由度 .....	31
2.5 数控功能的基本术语 .....	32
2.5.1 数控系统的术语 .....	32
2.5.2 数控机床的术语 .....	34
2.6 数控机床的主要性能指标 .....	35
<b>第 3 章 数控机床的选用</b> .....	38
3.1 数控机床的选型 .....	38
3.1.1 数控系统的选择 .....	38
3.1.2 CNC 系统的选型优化 .....	39
3.2 数控机床主机在选型中的 重要性 .....	39
3.2.1 对数控机床主机的要求 .....	39
3.2.2 对数控机床坐标伺服系统机械与 电气接口的要求 .....	40
3.3 数控机床的选用依据 .....	42
3.3.1 确定典型加工工件 .....	42
3.3.2 数控机床规格的选择 .....	43
3.3.3 机床精度的选择 .....	44
3.3.4 数控机床位置精度的评定方法 .....	46
3.3.5 数控机床的精度储备 .....	47
3.3.6 生产能力 .....	48
3.3.7 数控机床功能和附件的选择 .....	49
3.3.8 自动换刀装置、刀库容量及刀柄的 选择 .....	51
3.4 数控机床的选购 .....	53
3.4.1 市场占有率与售后服务 .....	53
3.4.2 市场调研 .....	55
3.4.3 数控机床性价比的市场规律 .....	55
3.4.4 数控机床性价比的发展趋势 .....	56
3.4.5 购置订货时应注意的问题 .....	57
<b>第 4 章 机床数控系统</b> .....	58
4.1 计算机数控系统的组成和工作 过程 .....	58
4.1.1 数控系统的组成 .....	58

4.1.2 数控系统的工作过程 .....	60	5.3.5 制动装置 .....	102
4.2 机床 CNC 硬件 .....	62	5.4 数控机床的自动换刀装置 .....	102
4.2.1 CNC 装置硬件构成的特点 .....	62	5.4.1 回转刀架换刀 .....	103
4.2.2 CNC 装置的微处理器系统 结构 .....	63	5.4.2 更换主轴换刀 .....	104
4.3 机床 CNC 软件 .....	65	5.4.3 更换主轴箱换刀 .....	105
4.3.1 CNC 装置中软件的结构特点 .....	65	5.4.4 带刀库的自动换刀系统 .....	105
4.3.2 CNC 装置中的控制软件及其 工作过程 .....	67	5.4.5 刀库 .....	106
4.4 常用数控系统 .....	68	5.4.6 刀库及换刀机械手的维护 .....	111
4.4.1 FANUC 公司的 CNC 装置 .....	69	<b>第 6 章 数控机床刀具和常用工具、夹具、 量具 .....</b>	<b>114</b>
4.4.2 SIEMENS 公司的 CNC 装置 .....	71	6.1 数控机床刀具 .....	114
4.4.3 华中“世纪星”数控系统 .....	73	6.1.1 数控机床刀具的基本要求、种类及 材料 .....	114
4.4.4 航天数控系统 .....	74	6.1.2 数控机床刀具系统 .....	117
4.5 数控机床的可编程序控制器 (PLC) .....	75	6.1.3 数控机床刀具的选择 .....	130
4.5.1 PLC 的组成与分类 .....	75	6.2 数控机床常用工具、夹具、 量具 .....	133
4.5.2 PLC 的接口 .....	78	6.2.1 数控机床常用工具 .....	133
4.5.3 PLC 的几种控制功能 .....	80	6.2.2 数控机床常用夹具 .....	134
4.5.4 PLC 的数据处理功能 .....	80	6.2.3 数控机床常用量具 .....	136
<b>第 5 章 数控机床的机械结构 .....</b>	<b>82</b>	<b>第 7 章 数控车床 .....</b>	<b>142</b>
5.1 数控机床的主传动系统和主轴 部件 .....	82	7.1 概述 .....	142
5.1.1 数控机床主传动系统的参数 .....	82	7.1.1 数控车床的适用范围 .....	142
5.1.2 主传动系统的配置 .....	82	7.1.2 数控车床的布局形式 .....	143
5.1.3 主轴部件 .....	86	7.1.3 数控车床的组成 .....	144
5.2 主轴的拆卸与调整 .....	88	7.1.4 数控车床的分类 .....	145
5.2.1 数控车床主轴部件的拆卸与 调整 .....	88	7.2 数控车床的传动与结构特点 .....	148
5.2.2 加工中心主轴部件的拆卸与 调整 .....	90	7.2.1 主传动系统与结构特点 .....	148
5.2.3 数控铣床主轴部件的拆卸与 调整 .....	94	7.2.2 床鞍和横向进给装置 .....	150
5.3 数控机床进给传动部件的 调整 .....	95	7.2.3 纵向驱动装置 .....	151
5.3.1 电动机与丝杠间的连接 .....	96	7.2.4 尾座 .....	152
5.3.2 传动间隙补偿机构的调整 .....	96	7.3 数控车床加工工艺 .....	153
5.3.3 滚珠丝杠螺母副的间隙消除 .....	98	7.3.1 数控车床加工工艺分析 .....	153
5.3.4 滚珠丝杠的支承 .....	101	7.3.2 定位基准的选择 .....	156
		7.3.3 数控车削加工工艺路线的 拟定 .....	158
		7.4 数控车床工件的装夹与刀具的 安装 .....	166
		7.4.1 工件的装夹 .....	166

7.4.2 数控车床刀具的安装 .....	167	<b>第9章 加工中心</b> .....	206
7.5 切削用量的选择与数控车床的 对刀 .....	169	9.1 概述 .....	206
7.5.1 切削用量的选择 .....	169	9.1.1 加工中心的特点 .....	206
7.5.2 数控车床的对刀 .....	171	9.1.2 加工中心的基本组成及系列 .....	206
7.5.3 刀补的测量 .....	172	9.1.3 加工中心的分类 .....	208
7.5.4 工件坐标系建立的步骤 .....	174	9.1.4 加工中心的发展 .....	210
<b>第8章 数控铣床</b> .....	175	9.2 JCS-018A型加工中心 .....	211
8.1 概述 .....	175	9.2.1 JCS-018A型加工中心的用途、 特点及技术参数 .....	211
8.1.1 数控铣床的主要加工对象 .....	175	9.2.2 JCS-018A型加工中心的传动 系统 .....	214
8.1.2 数控铣床的主要功能 .....	176	9.3 加工中心的刀库及自动换刀 装置 .....	216
8.1.3 数控铣床的分类 .....	176	9.3.1 加工中心的刀库形式 .....	216
8.1.4 数控铣床的机械结构组成及 主要特点 .....	178	9.3.2 加工中心的刀库换刀 .....	217
8.2 数控铣床的总体布局与结构 性能 .....	180	9.4 加工中心的主要加工对象 .....	218
8.2.1 工件形状、尺寸和质量与总 布局的关系 .....	180	9.5 加工中心的加工工艺 .....	219
8.2.2 运动分配与部件的布局 .....	181	9.5.1 零件的工艺分析 .....	219
8.2.3 总布局与铣床的结构性能 .....	182	9.5.2 加工中心的选择 .....	223
8.3 数控铣床的基本组成与传动 系统 .....	183	9.5.3 工序和装夹方式的确定 .....	229
8.3.1 数控铣床的基本组成及主要技术 参数 .....	183	9.5.4 走刀路线的确定 .....	232
8.3.2 数控铣床的传动系统 .....	185	<b>第10章 数控磨床</b> .....	237
8.4 数控铣床加工工艺 .....	186	10.1 概述 .....	237
8.4.1 数控铣床加工工艺的基本特点及 内容 .....	186	10.1.1 数控磨床的工艺用途及 分类 .....	237
8.4.2 工件的加工工艺性分析 .....	187	10.1.2 数控磨床的工作原理及 结构特点 .....	237
8.4.3 工艺路线的制定 .....	188	10.2 MK1320型数控外圆磨床 .....	240
8.4.4 铣削刀具的选择 .....	192	10.2.1 MK1320型数控外圆磨床的主要 技术参数与数控系统 .....	240
8.4.5 铣削用量的选择 .....	195	10.2.2 MK1320机床本体的总体结构及 运动 .....	241
8.4.6 数控铣削加工工艺文件 .....	196	10.2.3 机床的主要部件结构 .....	242
8.5 工件在数控铣床上的定位与 装夹 .....	198	10.3 数控坐标磨床 .....	244
8.5.1 工件定位的基本原理与基准的选择 原则 .....	198	10.3.1 数控坐标磨床的主要构成与主要 运动 .....	244
8.5.2 工件在数控铣床上的夹紧 .....	201	10.3.2 数控坐标磨床的技术参数 .....	246
8.5.3 数控铣床夹具 .....	202	10.4 MK6030数控工具磨床 .....	247
		10.4.1 加工工艺范围 .....	247

10.4.2	机床的主要构成	247	11.4.2	影响工艺指标的主要因素	276
10.4.3	机床存在的运动及机床坐标系的建立	249	11.5	数控线切割加工工艺的制订与应用	279
10.4.4	机床的主要技术参数	250	11.5.1	加工工艺的制订	279
10.5	数控磨削加工工艺	251	11.5.2	加工工艺的应用	283
10.5.1	数控外圆磨削工艺	251	<b>第12章</b>	<b>数控机床常用故障诊断方法和检测仪器的使用</b>	<b>289</b>
10.5.2	数控坐标磨削工艺	257	12.1	数控机床的故障诊断方法	289
<b>第11章</b>	<b>数控线切割加工机床</b>	<b>263</b>	12.1.1	数控系统的故障诊断技术	289
11.1	概述	263	12.1.2	数控机床的故障分析与诊断	290
11.1.1	电火花线切割加工的基本原理、特点及应用范围	263	12.1.3	数控机床维修所需的技术资料和技术准备	292
11.1.2	电火花线切割加工机床的基本组成	264	12.1.4	数控机床常用的故障检修方法	293
11.1.3	电火花线切割加工的分类	268	12.2	数控机床故障检测仪器的使用	294
11.2	线切割加工机床的型号及主要技术参数	269	12.2.1	示波器	294
11.2.1	线切割加工机床的型号	269	12.2.2	逻辑测试笔	296
11.2.2	线切割加工机床的主要技术参数	270	12.2.3	逻辑分析仪	297
11.3	数控线切割加工机床的运动分析与数控系统控制	272	12.2.4	集成电路测试仪	300
11.3.1	数控线切割加工机床的运动分析	272	12.2.5	短路故障追踪仪	301
11.3.2	数控线切割加工机床的数控系统控制	275	12.2.6	特征代码分析仪	304
11.4	影响数控线切割加工工艺指标的主要因素	276	12.2.7	存储器测试仪	306
11.4.1	主要工艺指标	276	12.2.8	激光干涉仪	307
			12.2.9	球杆仪	308



# 第 1 章 数控机床相关知识

## 1.1 数控机床的产生及现状

### 1.1.1 数控技术的产生

数控机床是新型自动化机床，它是具有广泛的通用性和很高自动化的全新型机床，是用数字代码形式的信息来控制机床按给定的动作顺序进行加工的自动化机床。

采用数字控制技术进行机械加工的思想最早来源于 20 世纪 40 年代，数控机床最早产生于美国。

1947 年，为精确制作直升机叶片的样板，美国帕森斯（PARSONS）公司设想并利用全数字计算机对叶片轮廓的加工路径进行了数据处理，使得加工精度达到 0.0381mm，这是最早地将数字控制技术运用到机械加工中的实例。

1949 年，美国空军为了能在短时间内制造出经常变更设计的火箭零件，委托帕森斯公司并通过该公司与麻省理工学院伺服机构研究所协作，开始了数控机床的研制工作。经过三年的研制，于 1952 年研制成功了世界上第一台数控铣床，当时所用的电子元件是电子管。

从 1952 年至今，数控机床按数控系统的发展经历了五代。

第一代：1955 年，数控系统以电子管组成，体积大，功耗大。

第二代：1959 年，数控系统以晶体管组成，广泛采用印制电路板。

第三代：1965 年，数控系统采用小规模集成电路作为硬件，其特点是体积小，功耗低，可靠性进一步提高。

以上三代数控系统，由于其数控功能均由硬件实现，故历史上又称其为“硬件数控”。

第四代：1970 年，数控系统采用小型计算机取代专用计算机，其部分功能由软件实现，它具有价格低、可靠性高和功能多等特点。

第五代：1974 年，数控系统以微处理器为核心，不仅价格进一步降低，体积也进一步缩小，使实现真正意义上的机电一体化成为可能。这一代又可分为六个发展阶段。

1974 年，系统以位片微处理器为核心，有字符显示和自诊断功能。

1979 年，系统采用 CRT 显示、VLIC（大规模和超大规模集成电路）、大容量磁泡存储器、可编程接口和遥控接口等。

1981 年，具有人机对话、动态图形显示、实时精度补偿功能。

1986 年，数字伺服控制诞生，大惯量的交直流电动机进入实用阶段。

1988 年，采用高性能 32 位机为主机的的主从结构系统。

1994 年，基于 PC 的数控系统诞生，使数控系统的研发进入了开放型、柔性化的新时代，新型数控系统的开发周期日益缩短。它是数控技术发展的又一个里程碑。

综上所述，由于微电子技术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, 发展非常迅速, 几乎五年左右时间就更新换代一次。

### 1.1.2 数控机床的现状

当今, 着重研究高档数控设备。

近年来, 世界上许多数控系统生产厂家利用微型计算机 (Person Computer) 丰富的软、硬件资源, 开发开放式体系结构的新一代数控系统。其硬件、软件和总线规范都是对外开放的, 由于有充足的软、硬件资源可以利用, 不仅使数控系统制造商和用户的系统集成得到有力的支持, 而且也针对用户的二次开发带来极大的方便, 促进了数控系统多档次、多品种的开发和广泛应用。既可通过升档或剪裁制成各种档次的数控系统, 又可以通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统, 开发生产周期大大缩短, 并可随 CPU 升级而升级。随着人工智能在计算机领域的渗透和发展, 数控系统引入了自适应控制、模糊系统和神经网络的控制机理, 不但具有自动编程、前馈控制、模糊控制、学习控制、自适应控制、工艺参数自动生成、三维刀具补偿、运动参数动态补偿、温差刚性变形补偿等功能, 而且人机界面极为友好, 故障诊断专家系统使自诊断和故障监控功能更趋完善。

当前, 制造业对一次装夹、多种工序加工的复合化要求的程度更高, 国外已经出现了加工中心与车削中心复合机床; 加工中心与激光加工复合机床; 集车、磨、铣、钻、铰、滚齿等工序于一身的车磨复合机床; 集平磨、内圈磨、外圈磨于一身的磨削中心; 集各种机床及测量机于一身的虚拟轴机床; 五轴联动激光切割机等。

## 1.2 数控机床及数控部件的发展状态

### 1.2.1 数控机床的发展趋势

数控机床总的发展趋势是工序集中、高速、高效、高精度以及方便使用, 提高可靠性。

当前, 世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

#### 1. 高速、高效、高精度、高可靠性

要提高加工效率, 首先必须提高切削和进给速度, 同时, 还要缩短加工时间; 要确保加工质量, 必须提高机床部件运动轨迹的精度, 而可靠性则是上述目标的基本保证。为此, 必须要有高性能的数控装置作保证。

1) 高速、高效。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, 而且还可以提高零件的表面加工质量和精度。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。

新一代数控机床 (含加工中心) 只有通过高速化大幅度缩短切削工时才可能进一步提高其生产率。超高速加工如超高速铣削和新一代高速数控机床 (如高速加工中心) 的开发应用紧密相关。20 世纪 90 年代以来, 美国、日本及欧洲各国争相开发应用新一代高速数控机床, 加快机床高速化发展步伐。高速主轴单元 (电主轴, 转速 15000 ~ 100000r/min)、高速且高加/减速度的进给运动部件 (快移速度 60 ~ 120m/min, 切削进给速度高达 60m/min)、高性能数控和伺服系统, 以及数控工具系统都出现了新的突破, 达到了新的技术水平。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/减速度

直线电动机驱动进给部件、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解决，应不失时机地开发应用新一代高速数控机床。

依靠快速、准确的数字量传递技术对高性能的机床执行部件进行高精密度、高响应速度的实时处理，由于采用了新型刀具，车削和铣削的切削速度已达到 5000 ~ 8000m/min 以上；主轴转数在 30000r/min（有的高达 10 万 r/min）以上；工作台的移动速度（进给速度）在分辨率为 1 $\mu$ m 时为 100m/min（有的达到 200m/min）以上，在分辨率为 0.1 $\mu$ m 时，为 24m/min 以上；自动换刀速度在 1s 以内；小线段插补进给速度达到 12m/min。根据高效率、大批量生产需求和电子驱动技术的飞速发展，高速直线电动机的推广应用，开发出一批高速、高效响应的数控机床以满足汽车、农机等行业的需求。还由于新产品更新换代周期加快，模具、航空、军事等工业的加工零件不但复杂而且品种增多，也需要高效的数控机床实现优质、低成本的生产。

2) 高精度。从精密加工发展到超精密加工（特高精度加工）是世界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（<10nm），其应用范围日趋广泛。超精密加工主要包括超精密切削（车、铣）、超精密磨削、超精密研磨抛光以及超精密特种加工（激光束、电子束和离子束加工及微细电火花加工、微细电解加工和各种复合加工等）。新材料及新零件的出现，更高精度要求的提出等都需要超精密加工工艺，所以发展新型超精密加工机床，完善现代超精密加工技术，以适应现代科技发展的需要。

当前，机械加工高精度的要求是：普通的加工精度提高了一倍，达到 5 $\mu$ m；精密加工精度提高了两个数量级；超精密加工精度进入纳米级（0.001 $\mu$ m）；主轴回转精度要求达到 0.0 ~ 0.05 $\mu$ m；加工圆度为 0.1 $\mu$ m；加工表面粗糙度值  $Ra = 0.003\mu\text{m}$  等。

3) 高可靠性。高可靠性是指数控系统的可靠性要高于被控设备的可靠性在一个数量级以上，但也不是可靠性越高越好，仍然是适度可靠，因为是商品，受性能价格比的约束。对于每天工作两班的无人工厂而言，如果要求在 16h 内连续正常工作，无故障率  $P(t) = 99\%$  以上，则数控机床的平均故障间隔时间（Mean Time Between Failures, MTBF）（当产品的寿命服从指数分布时，其故障率的倒数就叫做平均故障间隔时间）就必须大于 3000h。MTBF 大于 3000h，对于由不同数量的数控机床构成的无人化工厂差别就大多了，只对一台数控机床而言，如主机与数控系统的失效率之比为 10:1（数控的可靠性比主机高一个数量级），则此时数控系统的 MTBF 就要大于 33333.3h，而其中的数控装置、主轴及驱动等的 MTBF 就必须大于 10 万 h。

当前，国外数控装置的 MTBF 值已达 6000h 以上，驱动装置达 30000h 以上。

## 2. 模块化、智能化、柔性化和集成化

(1) 模块化、专门化与个性化 为了适应数控机床多品种、小批量的特点，机床结构模块化，数控功能专门化，机床性能价格比显著提高并加快优化。个性化是近几年来特别明显的发展趋势。

(2) 智能化 智能化的内容包括在数控系统中的各个方面。为追求加工效率和加工质量方面的智能化，如自适应控制、工艺参数自动生成；为提高驱动性能及使用连接方便的智能化，如前馈控制、电动机参数的自适应运算、自动识别负载、自动选定模型、自整定等；简化编程、简化操作方面的智能化，如智能化的自动编程、智能化的人机界面等；智能诊断、智能监控方面的内容，方便系统的诊断及维修等。

(3) 柔性化和集成化 数控机床向柔性自动化系统发展的趋势是：从点（数控单机、加工中心和数控复合加工机床）、线〔柔性制造单元（FMC）、柔性制造系统（FMS）、柔性制造生产线（FML）、专用机床或数控专用机床组成的柔性制造（FML）〕向面〔工段车间独立制造岛、自动化工厂（FA）〕、体〔计算机集成制造（CIMS）、分布式网络集成制造系统〕的方向发展，另一方面注重应用性和经济性方向发展。柔性自动化技术是制造业适应动态市场需求及产品迅速更新的主要手段，是各国制造业发展的主流趋势，是先进制造领域的基础技术。其重点是以提高系统的可靠性、实用化为前提，以易于联网和集成为目标；注重加强单元技术的开拓、完善；CNC 单机向高精度、高速度和高柔性方向发展；数控机床及其构成柔性制造系统能方便地与计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、机床自动编程的编辑程序（CAMP）、信息系统（MIS）连接，向信息集成方向发展；网络系统向开放、集成和智能化方向发展。

### 3. 开放性

为适应数控进线、联网、普及型个性化、多品种、小批量、柔性化及数控迅速发展的要求，最重要的发展趋势是体系结构的开放性，设计生产开放式的数控系统，如美国、欧盟及日本发展开放式数控的计划等。

### 4. 出现新一代数控加工工艺与装备

为适应制造自动化的发展，向 FMC、FMS 和 CIMS 提供基础设备，要求数字控制制造系统不仅能完成通常的加工功能，而且还要具备自动测量、自动上下料、自动换刀、自动更换主轴头（有时带坐标变换）、自动误差补偿、自动诊断、进线和联网等功能，广泛地应用机器人、物流系统。围绕数控技术、制造过程技术在快速成形、并联机构机床、机器人化机床、多功能机床等整机方面和高速电主轴、直线电动机、软件补偿精度等单元技术方面先后有所突破。并联杆系结构的新型数控机床实用化，这种虚拟轴数控机床用软件的复杂性代替传统机床机构的复杂性，开拓了数控机床发展的新领域。

以计算机辅助管理和工程数据库、互联网等为主体的制造信息支持技术和智能化决策系统对机械加工中海量信息进行存储和实时处理。应用数字化网络技术使机械加工整个系统趋于资源合理支配并高效地应用。

由于采用了神经网络控制技术、模糊控制技术、数字化网络技术，机械加工向虚拟制造的方向发展。

### 5. 工序集中

加工中心使工序集中在一台机床上完成，减少由于工序分散、工件多次装夹引起的定位误差，提高了加工精度，同时也减少机床的台数与占地面积，压缩工序间的辅助时间，有效地提高数控机床的生产率和数控加工的经济效益。因此，实现工序高度集中是数控机床当今的发展趋势，也是数控机床工业飞速发展、深入普及的根由。

### 6. 方便使用、提高可靠性

建立人机对话界面，方便使用，提高数控机床的可靠性，也是目前数控机床的发展趋势。

1) 加工编程方便。在手工编程方面，开发了许多插补功能。近年来发展起来的图形交互式编程系统（WOP）（又称面向车间编程），很受用户欢迎。这种编程方式不使用 G、M 代码，而是借助图形菜单，输入整个图形块以及相应参数作为加工指令，形成加工程序，与

传统加工时的思维方式类似。这种图形交互编程方法在制定标准后,可能成为将来各种型号的数控机床统一的编程方法。

2) 使用方便。数控机床普遍采用彩色 CRT 进行人机对话、图形显示和图形模拟等。有的数控机床还可以显示使用说明书、编程指南、润滑指南等信息。

3) 诊断功能不断发展完善。一般数控系统开机时有“起始诊断”功能,以确认数控系统各部分能否正常工作;运动时又有“在线诊断”功能。现代数控机床制造厂家已开发出“离线诊断”和“通信诊断”功能,通过通信传递诊断程序,使系统做某种测试运行并将测试的信息通过通信传回信息中心进行分析,再将处理方法告知用户。计算机图形技术引入诊断系统,可使诊断技术更形象、直观和快捷。

4) 可靠性不断提高。为了得到可靠性高的数控机床,生产厂家把可靠性贯穿于整个设计、生产、调试、包装出厂等全过程。目前,数控系统平均无故障时间已达 30000~36000h。

## 1.2.2 数控系统及数控部件的发展趋势

### 1. 数控系统的发展趋势

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。

1) 采用专用微机是指生产厂家采用自行开发的专用微机和专用芯片,其基础技术为厂家所专有,这些技术经多年的积累和发展,别的厂家很难掌握和超越,这是生产厂家保持其数控技术的优势所采取的策略。在国际上有影响的系统有德国的西门子系统(SIEMENS)、日本的发那科系统(FANUC)、美国的 A-B 系统等。

2) 采用通用微机技术开发数控系统,这是生产厂家中的后起之秀所采用的策略。用通用微机开发数控系统可以得到强有力的硬件和软件支持,这些软件、硬件技术是通用的、公开的。这样可以避开专有技术的制约,在短时间内达到较高水平,这是一条发展数控技术的捷径。目前,国内很多中小型数控机床生产厂商正在借助这一捷径,大力开发数控技术,生产适销对路的数控机床。

3) 数控系统的微机字长也在不断提高,由最早的 8 位机,经 16 位机,到目前被广泛采用的 32 位机,现在又有向 64 位机发展的趋势。微机的 CPU 也由单个向多个发展。目前,高性能的 CNC 数控系统可以同时控制几个轴,甚至几十个轴(坐标轴、主轴与辅助轴),并且前台的加工控制和后台的程序辅助可同时进行。另外,数控系统的各厂家纷纷采用 RS-232 和 RS-422 串行通信接口、DNC 和 MAP 接口及 MAP 工业控制网络,为数控系统进入 FMS 及 CIMS 创造了先行条件。

### 2. 数控分度头发展趋势

当前国产数控机床发展迅猛,向高速、高效、高精、柔性化、环保方面发展,与之相应的机床附件也应随之发展。数控分度头未来的发展趋势是:在规格上向两头延伸,既开发小规格,也开发大规格的分度头,同时注意相关技术的开发;在性能方面将向进一步提高刹紧力矩、提高主轴转速及可靠性方面发展;要求采用新材料;产品要价格低、操作方便。

### 3. 数控转台发展趋势

随着我国制造业的发展,加工中心的需求也在增加,特别是四轴、五轴的加工中心。估

计近几年要求配备数控转台的加工中心将会越来越多。

数控转台的发展趋势是：在规格上向两头延伸，既开发小型转台，也开发大型转台，以适应市场需求；在性能上将研制以钢为材料的蜗轮，大幅度提高工作台转速和转台的承载力；在形式上继续研制两轴和多轴并联的数控转台。

#### 4. 数控刀架发展趋势

今后数控刀架将向中高档发展，中档采用普及型数控刀架配套，高档采用动力型数控刀架，兼有液压刀架、伺服刀架、立式刀架等品种，预计近年来对数控刀架需求量将大大增加。

#### 5. 伺服系统的发展趋势

最早的数控机床伺服系统执行机构采用液压转矩放大器。功率步进电动机问世后，开始直接用它来驱动机床的进给运动。20世纪60年代中期，不少新设计制造的数控机床普遍采用了小惯量直流伺服电动机。小惯量直流伺服电动机最大的缺点是转速高，用于机床进给驱动时，必须使用齿轮减速箱。为了省去减速箱，20世纪70年代，美国首先研制了大惯量直流伺服电动机，又称宽调速直流伺服电动机，可以直接与机床的丝杠相连。20世纪80年代初期，美国通用电气公司研制成功交流伺服系统。异步交流伺服电动机的优点是没有电刷，避免了滑动摩擦，运转时无火花，进一步提高了可靠性。近年来，微机处理器已开始应用于伺服系统的驱动装置中。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取代。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，去控制电动机的转速。这种方式总是存在位置跟踪滞后误差，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，这样可使跟踪滞后误差大大减小。

2) 机械动、静摩擦的非线性控制技术。机床的动、静摩擦的非线性会导致爬行现象。除了采取措施降低静摩擦外，新型的数控伺服系统还具有自动补偿机械系统动、静摩擦非线性的控制功能。

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

4) 采用高分辨率的位置测量装置。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。

#### 6. 自适应控制的应用

数控机床增加更完善的自适应控制功能也是数控技术发展的一个重要方向。自20世纪60年代以来，简单的自适应控制机床已进入了实用阶段，而复杂的自适应控制机床，如以最低加工成本和最好的加工质量作为评价指标的机床，由于状态参数连接检测传感器未达到实用化的程度，至今还停留在实验阶段。

## 1.3 中国数控机床的发展

### 1.3.1 中国数控机床的发展状况

我国从1958年开始研究数控技术，一直到20世纪60年代中期仍处于研制、开发时期。1965年，国内开始研制晶体管数控系统。20世纪60年代末至70年代初研制成功X53 K-16立式数控铣床、CJK-18数控系统和数控非圆齿轮插齿机。

从20世纪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。但数控系统的可靠性、稳定性未得到解决，因而没能被广泛推广。在这一时期，数控线切割加工机床由于结构简单、使用方便、价格低廉，在模具加工中得到了应用和推广。20世纪80年代，我国从日本FANUC公司引进了部分系列的数控系统和直流伺服电动机、直流主轴电动机技术，以及从美国、欧洲引进了一些新的技术，并进行了国产商品化生产。这些系统可靠性高、功能齐全，推动了我国数控机床稳定地发展，使我国的数控机床在性能和质量上产生了一个质的飞跃。

1995年以后，我国数控机床的品种有了新的发展。数控机床品种不断增多，规格齐全。许多技术复杂的大型数控机床、重型数控机床都相继研制出来。为了跟踪国外技术的发展，北京机床研究所研制出了JCS-FMS-1.2型的柔性制造系统。这个时期，我国在引进、消化国外技术的基础上，进行了大量开发工作。一些较高档次的数控系统（五轴联动），分辨率为 $0.002\mu\text{m}$ 的高精度数控系统、数字仿形数控系统、为柔性单元配套的数控系统都开发了出来，并制造出样机，开始了专业化的生产和使用。

现在，我国已经建立了以中、低档数控机床为主的产业体系。20世纪90年代开始了高档数控机床的研发和生产。高校和研究所也加入进来，推出了基于PC的CNC系统。

进入21世纪，中国数控机床重点是以提高系统的可靠性、实用化为前提，以易于联网和集成为目标；注重加强单元技术的开拓、完善；CNC单机向高精度、高速度和高柔性方向发展；数控机床及其构成柔性制造系统能方便地与CAD、CAM、CAPP、MTS联接，向信息集成方向发展；网络系统向开放、集成和智能化方向发展。

### 1.3.2 中国数控系统的技术水平

目前，中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。从生产规模上看，已有航天数控集团、华中数控系统有限公司等可实现批量生产的产业化基地。

中国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，掌握了国外一直对中国封锁的一些关键技术。例如，曾长期困扰中国，并受到西方国家封锁的多坐标联动技术已不再是难题， $0.1\mu\text{m}$ 当量的超精密数控系统、数控仿形系统、非圆齿轮加工系统、高速进给数控系统、实时多任务操作系统都已研制成功。尤其是基于PC的开放式智能化数控系统，可实施多轴控制，具备联网进线等功能，既可作为独立产品，又是一代开放式的开发平台，为机

床厂及软件开发商二次开发创造了条件。特别重要的是，中国数控系统的可靠性已有很大提高，MTBF 值可以达 15000h 以上。同时大部分数控机床配套产品已能在国内生产，自我配套率超过 60%。这些成功的技术为中国数控系统的自行开发和生产奠定了基础。

## 1.4 数控技术在先进制造技术中的作用

自从 20 世纪中期人们将计算机技术引用到控制机床加工飞机机翼样板的复杂曲线中以来，数控技术在机床控制方面取得了广泛、深入的发展。开始是数控铣床，接着是数控车床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控线切割加工机床，以后是加工中心、车削中心、数控冲床、数控弯管机、数控折弯机、板材加工中心、数控齿轮机床、数控激光加工机床、数控火焰切割机。这些都成为现代制造业的最关键设备，保证了现代制造业向高精度、高速度、高效率、高柔性化的方向发展。

由于数控机床的出现，带动了 CAD、CAM 技术向实用化、工程化发展，特别是计算机技术的迅速发展，推动 CAD、CAM 技术向更高层次和更高水平发展，而且进一步发展了计算机辅助工艺设计（CAPP）数据库、集成制造生产系统相关信息的自动生成、自动处理、自动传输。可以说数控技术既是联系 CAD、CAM 的纽带，也是进一步通向集成化 CAD/CAM 的桥梁。

随着信息技术、网络技术和自动化技术的发展，在数控技术（机械制造业中则体现在数控机床上）的基础上，将以往企业中相互独立的工程设计、生产制造及经营管理等过程，在计算机及其软件的支撑下，构成一个覆盖整个企业的完整而有机的、以实现全局动态最优化、总体高效益、高柔性，并进而赢得竞争全胜的计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing System, CIMS），这一发展趋势至今仍然方兴未艾。



## 第 2 章 数控机床的组成和工作原理

### 2.1 数控机床的组成

#### 2.1.1 数控机床的整体结构

数控机床是由普通机床演变而来的，它的控制采用计算机数字控制方式，各个坐标方向的运动均采用单独的伺服电动机驱动，取代了普通机床上联系各坐标方向运动的复杂齿轮传动链。数控机床的组成如图 2-1 所示，它是由 X、Y、Z 三个坐标来实现刀具和工件间的相对运动的立式数控铣床。数控机床由信息输入、信息运算及控制、伺服驱动系统、主机（机床本体）、机电接口等五大部分组成。

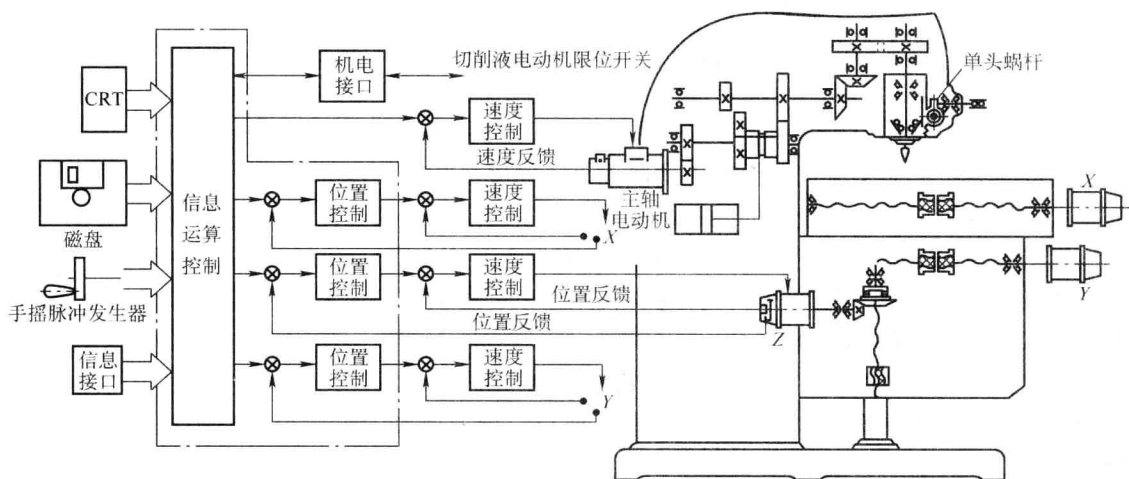


图 2-1 数控机床的组成

#### 1. 信息输入

信息输入是数控机床的信息输入通道，加工零件的程序和各种参数、数据通过输入设备送进计算机系统（数控装置）。早期的输入方式为穿孔纸带和磁带。目前较多采用磁盘。在生产现场，特别是一些简单的零件程序都采用按键、配合显示器（CRT）的手动数据输入（MDI）方式；手摇脉冲发生器输入都是在调整机床和对刀时使用；通过通信接口，可由上位机输入。

#### 2. 信息运算及控制

数控装置是由中央处理单元（CPU）、存储器、总线和相应的软件构成的专用计算机，它接收到输入信息后，经过译码、轨迹计算（速度计算）、插补运算和补偿计算，再给各个坐标的伺服驱动系统分配速度、位移指令。这一部分是数控机床的核心。整个数控机床的功