

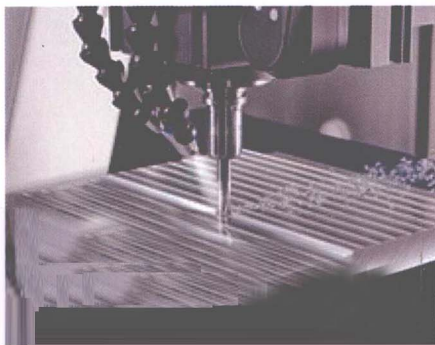
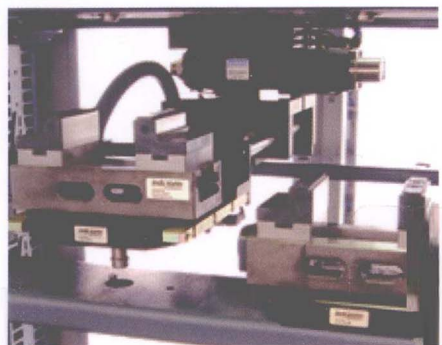
# 数控机床 系统设计

文怀兴 夏田 编著



第二版

The Second Edition



SHUKONG JCCHUANG  
XITONG SHEJI



化学工业出版社

# 数控机床 系统设计



第二版

The Second Edition

文怀兴 夏田 编著

SHUKONG JIACHUANG  
XITONG SHEJI



化学工业出版社

· 北京 ·

### 图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床系统设计/文怀兴, 夏田编著. —2 版. —北京:  
化学工业出版社, 2011. 3  
ISBN 978-7-122-10445-8

I. 数… II. ①文…②夏… III. 数控机床-系统设计  
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 011317 号

---

责任编辑: 张兴辉  
责任校对: 周梦华

文字编辑: 项 激  
装帧设计: 王晓宇

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 423 千字 2011 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

数控机床集计算机技术、电子技术、自动控制、传感测量、机械制造、网络通信技术于一体，是典型的机电一体化产品，它的发展和运用，开创了制造业的新时代，改变了制造业的生产方式、产业结构、管理方式，使世界制造业的格局发生了巨大变化。现代的 CAD/CAM、FMS、CIMS 等，都是建立在数控技术之上。数控技术水平已成为衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志，实现加工机床及生产过程数控化，已经成为当今制造业的发展方向。“中国制造”竞争力的提高，急需培养一批能够掌握数控机床设计理论和方法的工程技术人才，满足制造业发展和新产品开发对人才的需求。

为了适应数控技术的快速发展，尽可能反映数控机床的新成就，加强机床控制系统设计等内容，适应高等院校机械类专业教学的需要，特对《数控机床系统设计》一书进行修订。

本书将原书第 9 章、第 10 章删除，增加了第 9 章计算机数控系统，每章后增添了习题和思考题。本书在保持原来风格和特点的基础上，作了必要的增减和修改，更新了部分内容。第 1 章更新了数控机床的工作原理，增加了数控系统的主要工作过程。第 2 章删除了数控机床设计的基本要求和系列化、通用化、模块化设计等内容，增加了数控机床的设计内容和设计特点以及数控机床总体布局等内容。第 3 章删除了主传动的开停、制动装置等内容，增加了主轴转速的自动变换以及主轴旋转与进给轴的同步控制等内容。第 4 章删除了主轴的技术要求和动压滑动轴承等内容。其他章节也作了少量的修改和调整。

本书第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 8 章由陕西科技大学文怀兴教授编写，第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 9 章由陕西科技大学夏田教授编写。本书编写过程中，得到了许多专家的支持和帮助，在此谨致谢意。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化、数控技术以及模具设计与制造等专业的教学用书，也可供从事机械设计制造和研究的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中的不妥之处恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 数控机床概述</b> .....	1
1.1 数控机床的特点 .....	1
1.1.1 数控机床的优点 .....	1
1.1.2 数控机床加工零件的特点 .....	2
1.2 数控机床的组成和工作原理 .....	3
1.2.1 数控机床的组成 .....	3
1.2.2 数控机床的工作原理 .....	4
1.2.3 数控系统的主要工作过程 .....	5
1.3 数控机床的分类 .....	5
1.3.1 按运动方式分类 .....	6
1.3.2 按控制方式分类 .....	6
1.3.3 按数控系统的功能水平分类 .....	7
1.4 控制轴数与联动轴数 .....	8
1.5 数控机床性能、结构及应用 .....	8
1.5.1 数控机床的精度指标 .....	8
1.5.2 典型数控机床结构及应用 .....	9
1.6 数控机床的发展趋势 .....	14
1.6.1 数控机床的产生和发展 .....	14
1.6.2 数控机床的发展趋势 .....	14
<b>第 2 章 数控机床的总体设计</b> .....	18
2.1 数控机床设计方法和理论 .....	18
2.1.1 设计类型 .....	18
2.1.2 设计方法的特点 .....	19
2.1.3 数控机床的设计步骤 .....	20
2.1.4 数控机床设计的基本理论 .....	21
2.1.5 并联机床设计创新 .....	25
2.2 数控机床总体方案设计 .....	26
2.2.1 运动设计及表面形成方法 .....	26
2.2.2 机床总体结构方案设计 .....	28
2.3 机床主要参数的设计 .....	36
2.3.1 主参数和尺寸参数 .....	36
2.3.2 运动参数 .....	36
2.3.3 动力参数 .....	39
<b>第 3 章 数控机床主传动系统设计</b> .....	44
3.1 概述 .....	44
3.1.1 数控机床主传动系统的特点 .....	44
3.1.2 主传动系统的设计要求 .....	44

3.1.3	数控机床主传动系统配置方式	44
3.1.4	主传动系统的类型	45
3.2	分级变速主传动系统设计	46
3.2.1	转速图的概念	46
3.2.2	变速规律	47
3.2.3	结构网及结构式	48
3.2.4	拟定转速图的方法	49
3.2.5	齿轮齿数的确定	50
3.2.6	主传动系统计算转速	50
3.3	无级变速传动链的设计	53
3.3.1	无级变速装置的分类	53
3.3.2	机械无级变速与分级变速机构的串联	53
3.3.3	采用直流或交流电动机无级调速	54
3.3.4	主轴转速的自动变换	58
3.3.5	主轴旋转与进给轴的同步控制	60
3.4	现代数控机床主传动系统	61
3.4.1	高速主传动设计	61
3.4.2	柔性化、复合化设计	61
3.5	主传动系统结构设计	62
3.5.1	变速机构	63
3.5.2	齿轮在轴上的布置	63
3.5.3	立式加工中心主轴箱的构造	65
3.5.4	数控车床主轴箱构造	66
<b>第4章</b>	<b>主轴组件设计</b>	<b>69</b>
4.1	主轴组件的基本要求	69
4.2	主轴	70
4.2.1	主轴的构造	70
4.2.2	主轴的材料和热处理	71
4.3	主轴滚动支承	71
4.3.1	主轴常用滚动轴承的类型	72
4.3.2	主轴滚动轴承的选择	74
4.3.3	主轴轴承的配置方式	75
4.3.4	滚动轴承精度等级的选择	77
4.3.5	主轴滚动轴承的预紧	78
4.4	静压轴承	79
4.4.1	液体静压轴承	79
4.4.2	气体静压轴承	80
4.5	主轴组件的设计计算	81
4.5.1	初选主轴直径	81
4.5.2	主轴悬伸量的确定	82
4.5.3	主轴最佳跨距的选择	82
4.6	数控机床主轴组件的结构形式	85
4.6.1	主轴的支承与润滑	85

4.6.2	刀具自动装卸及切屑清除装置	86
4.6.3	主轴准停装置	87
4.7	高速主轴单元	87
4.7.1	高速电主轴的结构	88
4.7.2	高性能的 CNC 控制系统	89
4.7.3	冷却润滑技术的研究	89
4.7.4	高速精密轴承	89
4.7.5	电主轴的动平衡	90
4.7.6	刀具的夹紧	90
4.7.7	轴上零件的连接	91
4.8	提高主轴组件性能的措施	91
4.8.1	提高旋转精度	91
4.8.2	改善动态特性	92
4.8.3	控制主轴组件温升	93
<b>第 5 章</b>	<b>伺服进给传动系统设计</b>	<b>94</b>
5.1	伺服进给传动系统概述	94
5.1.1	伺服进给系统分类	94
5.1.2	伺服进给系统的基本要求	95
5.2	直线运动机构——滚珠丝杠螺母机构	95
5.2.1	工作原理及其特点	95
5.2.2	结构类型	96
5.2.3	滚珠丝杠的安装	98
5.2.4	滚珠丝杠螺母副的计算和选用	99
5.3	数控机床消隙机构及其常用的连接方式	101
5.3.1	进给系统传动齿轮间隙消除	101
5.3.2	数控机床常用的连接方式	103
5.4	伺服电动机及其调速	107
5.4.1	步进电动机	107
5.4.2	直流伺服电动机及其调速系统	112
5.4.3	交流伺服电动机及其调速	115
5.4.4	直线电动机	117
5.5	典型进给系统结构	119
5.6	伺服进给系统设计的基本要求	120
5.7	伺服进给系统机械传动装置的设计步骤及计算	122
5.7.1	负载转矩的计算	122
5.7.2	负载惯量的计算	123
5.7.3	伺服电动机的选择	124
5.7.4	电动机惯量与负载惯量的匹配	125
5.8	伺服进给系统的动态响应、稳定性及精度	127
5.8.1	动态性能指标	127
5.8.2	系统的稳定性	128
5.8.3	开环、半闭环伺服进给系统的死区误差及定位精度	129
5.8.4	静态误差与伺服刚度	131



5.8.5	传动链的自然频率 .....	132
5.8.6	刚度计算 .....	132
<b>第6章</b>	<b>数控机床检测装置 .....</b>	<b>135</b>
6.1	数控机床测量系统分类与特点 .....	135
6.1.1	检测装置的分类 .....	135
6.1.2	数控测量装置的性能指标及要求 .....	136
6.2	常用测量元件的工作原理及应用 .....	136
6.2.1	旋转变压器 .....	136
6.2.2	感应同步器 .....	138
6.2.3	光栅 .....	141
6.2.4	磁栅 .....	144
6.2.5	脉冲编码器 .....	147
<b>第7章</b>	<b>数控机床本体设计 .....</b>	<b>152</b>
7.1	支承件设计 .....	152
7.1.1	数控机床支承件的功用和应满足的要求 .....	152
7.1.2	支承件的静刚度 .....	153
7.1.3	支承件的动态特性 .....	160
7.1.4	支承件的结构设计 .....	165
7.1.5	支承件的有限元计算简介 .....	167
7.2	导轨设计 .....	169
7.2.1	导轨的分类 .....	169
7.2.2	对导轨的基本要求 .....	172
7.2.3	滑动导轨 .....	173
7.2.4	滚动导轨 .....	180
7.2.5	提高导轨耐磨性的措施 .....	186
<b>第8章</b>	<b>自动换刀和自动交换工件系统 .....</b>	<b>191</b>
8.1	自动换刀装置 .....	191
8.1.1	回转刀架换刀 .....	191
8.1.2	更换主轴换刀 .....	193
8.1.3	带刀库的自动换刀系统 .....	194
8.2	工件自动交换系统 .....	200
8.2.1	托盘交换装置 .....	200
8.2.2	装卸料机器人 .....	201
8.2.3	有轨小车 .....	202
8.2.4	无轨小车 .....	202
8.3	数控机床的回转工作台 .....	203
8.3.1	数控回转工作台 .....	203
8.3.2	分度工作台 .....	204
<b>第9章</b>	<b>计算机数控系统 .....</b>	<b>208</b>
9.1	概述 .....	208



9.1.1	CNC 系统组成 .....	208
9.1.2	计算机数控装置的组成 .....	208
9.1.3	CNC 系统功能 .....	210
9.1.4	计算机数控装置的工作原理 .....	213
9.2	数控系统的硬件结构 .....	215
9.2.1	CNC 系统的硬件构成特点 .....	215
9.2.2	单 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构 .....	216
9.2.3	多 CPU 结构 CNC 系统的硬件结构 .....	217
9.3	CNC 系统的软件结构 .....	218
9.3.1	CNC 装置软硬件的界面 .....	218
9.3.2	CNC 系统控制软件的结构特点 .....	219
9.3.3	常规 CNC 系统的软件结构 .....	221
9.4	数控系统的 I/O 接口 .....	226
9.4.1	CNC 装置的输入/输出和通信要求 .....	226
9.4.2	数控系统的 I/O 接口电路的作用和要求 .....	226
9.4.3	机床 I/O 接口 .....	227
9.4.4	通用 I/O 接口 .....	228
9.5	数控机床用可编程序控制器 .....	229
9.5.1	可编程序控制器的组成 .....	229
9.5.2	可编程序控制器的工作过程 .....	230
9.5.3	可编程序控制器的特点 .....	232
9.5.4	数控系统 PLC 的类型 .....	232
9.5.5	数控机床中 PLC 控制功能的实现 .....	234
9.5.6	PLC 在数控机床上的应用举例 .....	237
9.6	FANUC0i 数控系统 .....	238
9.6.1	控制单元 .....	238
9.6.2	电源模块 .....	240
9.6.3	伺服模块 .....	241
9.6.4	主轴模块 .....	243
9.6.5	综合连接图 .....	244
<b>参考文献</b> .....		246

# 第 1 章 数控机床概述

随着科学技术的飞速发展和经济竞争的日趋激烈，产品更新速度越来越快，复杂形状的零件越来越多，精度要求越来越高，多品种、中小批量生产的比重明显增加。激烈的市场竞争使产品研制生产周期越来越短。传统的加工设备和制造方法已难于适应这种多样化、柔性化与复杂形状零件的高效高质量加工要求。因此近几十年来，世界各国十分重视发展能有效解决复杂、精密、小批多变零件的数控加工技术，在加工设备中大量采用以微电子技术和计算机技术为基础的数控技术。目前，数控技术正在发生根本性变革，它集成了微电子、计算机、信息处理、自动检测、自动控制等高新技术于一体，具有高精度、高效率、柔性自动化等特点，对制造业实现柔性自动化、集成化、智能化起着举足轻重的作用。

汽车、拖拉机和家用电器等行业的产品零件，为了解决高产优质的问题，多采用专用的工艺装备、专用自动化机床或专用的自动生产线和自动化车间进行生产。但是应用这些专用生产设备，生产准备周期长，产品改型不易，因而使新产品的开发周期增长。在机械产品中，单件与小批量产品占到 70%~80%，这类产品一般都采用通用机床加工，当产品改变时，机床与工艺装备均需作相应的变换和调整，而且通用机床的自动化程度不高，基本上由人工操作，难于提高生产效率和保证产品质量。特别是一些由曲线、曲面轮廓组成的复杂零件，只能借助靠模和仿形机床，或者借助划线和样板用手工操作的方法来加工，加工精度和生产效率受到很大的限制。数字控制机床，就是为了解决单件、小批量、特别是复杂型面零件加工的自动化并保证质量要求而产生的，为单件、小批生产的精密复杂零件提供了自动化加工手段。

数控技术是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础，现代的 CAD/CAM、FMS、CIMS 等，都是建立在数控技术之上，离开了数控技术，先进制造技术就成了无本之木。同时，数控技术关系到国家战略地位，是体现国家综合国力水平的重要基础性产业，其水平高低是衡量一个国家制造业现代化程度的核心标志，实现加工机床及生产过程数控化，已经成为当今制造业的发展方向。

## 1.1 数控机床的特点

### 1.1.1 数控机床的优点

#### (1) 加工对象改型的适应性强

利用数控机床加工改型零件，只需要重新编制程序就能实现对零件的加工，它不同于传统的机床，不需要制造、更换许多工具、夹具和检具，更不需要重新调整机床。因此，数控机床可以快速地从加工一种零件转变为加工另一种零件，这就为单件、小批以及试制新产品提供了极大的便利。它不仅缩短了生产准备周期，而且节省了大量工艺装备费用。

#### (2) 加工精度高

数控机床是以数字形式给出的指令进行加工的，由于目前数控装置的脉冲当量（即每输出一个脉冲后数控机床移动部件相应的移动量）一般达到了 0.001mm，而且进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿，因此，数控机床能达到比较高的加工

精度和质量稳定性。这是由数控机床结构设计采用了必要的措施以及机电结合的特点决定的。首先是在结构上引入了滚珠丝杠螺母机构、各种消除间隙结构等,使机械传动的误差尽可能小;其次是采用了软件精度补偿技术,使机械误差进一步减小;第三是用程序控制加工,减少了人为因素对加工精度的影响。这些措施不仅保证了较高的加工精度,同时还保持了较高的质量稳定性。

在采用点位控制系统的钻孔加工中,由于不需要使用钻模板与钻套,钻模板的坐标误差造成的影响也不复存在。又由于加工中排除切屑的条件得以改善,可以进行有效冷却,被加工孔的精度及表面质量都有所提高。对于复杂零件的轮廓加工,在编制程序时已考虑到对进给速度的控制,可以做到在曲率变化时,刀具沿轮廓的切向进给速度基本不变,被加工表面就可获得较高的精度和表面质量。

### (3) 生产效率高

零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。数控机床能够有效地减少这两部分时间,因而加工生产率比一般机床高得多。数控机床主轴转速和进给量的范围比普通机床的范围大,每一道工序都能选用最有利的切削用量,良好的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削,有效地节省了机动时间。数控机床移动部件的快速移动和定位均采用了加速与减速措施,因而选用了很高的空行程运动速度,消耗在快进、快退和定位的时间要比一般机床少得多。

数控机床在更换被加工零件时几乎不需要重新调整机床,而零件又都安装在简单的定位夹紧装置中,可以节省用于停机进行零件安装调整的时间。

数控机床的加工精度比较稳定,一般只做首件检验或工序间关键尺寸的抽样检验,因而可以减少停机检验的时间。在使用带有刀库和自动换刀装置的数控加工中心机床时,在一台机床上实现了多道工序的连续加工,减少了半成品的周转时间,生产效率的提高就更为明显。

### (4) 自动化程度高

数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的,操作者除了操作面板、装卸零件、进行关键工序的中间测量以及观察机床的运行之外,其他的机床动作直至加工完毕,都是自动连续完成,不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度均可大为减轻,劳动条件也得到相应的改善。

### (5) 良好的经济效益

使用数控机床加工零件时,分摊在每个零件上的设备费用是较昂贵的。但在单件、小批生产情况下,可以节省工艺装备费用、辅助生产工时、生产管理费用及降低废品率等,因此能够获得良好的经济效益。

### (6) 有利于生产管理的现代化

用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工工时,并有效地简化检验和工夹具、半成品的管理工作。这些特点都有利于使生产管理现代化。

数控机床在应用中也有不利的一面,如提高了起始阶段的投资,对设备维护的要求较高,对操作人员的技术水平要求较高等。

## 1.1.2 数控机床加工零件的特点

数控机床确实存在一般机床所不具备的许多优点,但是这些优点都是以一定条件为前提的。数控机床的应用范围正在不断扩大,但它并不能完全代替其他类型的机床,也还不能以最经济的方式解决机械加工中的所有问题。数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件:

① 多品种小批量生产的零件。图 1-1 表示了不同种类机床的零件加工批量数与综合费用的关系。从图中看出零件加工批量数的增大对于选用数控机床是不利的。原因在于数控机

床设备费用高昂，与大批量生产采用的专用机床相比其效率还不够高。通常，采用数控机床加工的合理生产批量在10~200件之间。目前有向中批量发展的趋势。

② 结构比较复杂的零件。图1-2表示了不同种类机床的被加工零件复杂程度与零件加工批量数的关系。通常数控机床适宜于加工结构比较复杂，在非数控机床上加工时需要昂贵的工艺装备的零件。

- ③ 需要频繁改型的零件。它节省了大量的工艺装备费用，使综合费用下降。
- ④ 价格昂贵、不允许报废的关键零件。
- ⑤ 需要最短生产周期的急需零件。

广泛推广数控机床的最大障碍是设备的初始投资大，由于系统本身的复杂性，又增加了维修费用。如果缺少完善的售后服务，往往不能及时排除设备故障，将会在一定程度上影响机床的利用率，这些因素都会增加综合生产费用。

考虑到以上所述的种种原因，在决定选用数控机床加工时，需要进行反复对比和仔细的经济分析，以发挥数控机床最好的经济效益。

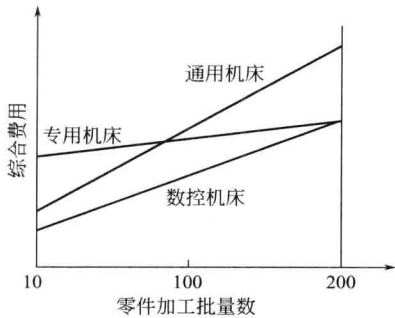


图 1-1 不同种类机床的零件加工批量数与综合费用的关系

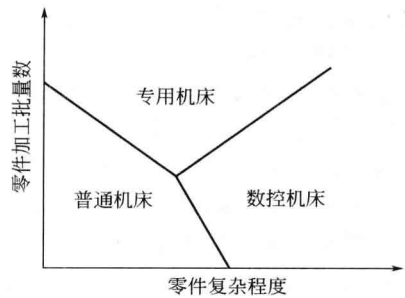


图 1-2 不同种类机床的初加工零件复杂程度与零件加工批量数的关系

## 1.2 数控机床的组成和工作原理

### 1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由控制介质、数控装置、伺服机构和机床本体（机械部件）组成，如图1-3所示，其中实线部分表示开环系统。为了提高加工精度，再加入测量装置，由虚线构成反馈，称为闭环系统。

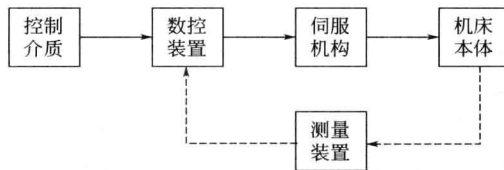


图 1-3 数控机床的组成

#### 1.2.1.1 控制介质

控制介质又称信息载体。数控机床加工时，所需的各种控制信息要靠某种中间载体携带和传输，这种载体称为“控制介质”。控制介质是存储数控加工所需要的全部动作和刀具相

对于工件位置信息的媒介物，它记载着零件的加工程序。

控制介质有多种，如穿孔带、穿孔卡、磁带及磁盘等，也可通过通信接口直接输入所需各种信息，采用何种控制介质则取决于数控装置的类型。高级的数控系统可能还包含一套自动编程机或者 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、模拟仿真、存储和打印等功能。

### 1.2.1.2 数控装置

数控装置可分为普通数控系统（NC）和计算机数控系统（CNC）两大类。前者利用专用的控制计算机，又称硬件数控；后者利用通用的小型计算机或微型计算机加软件，又称软件数控。数控装置是数控机床的核心，一般由输入装置、控制器、运算器和输出装置等组成。它根据输入的程序和数据，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后，输出各种信号和指令控制机床的各个部分，进行规定的、有序的动作。这些控制信号中最基本的信号是：经插补运算决定的各坐标轴（即作进给运动的各执行部件）的进给速度、进给方向和位移量指令，送伺服驱动系统驱动执行部件做进给运动；主运动部件的变速、换向和启停信号；选择和交换刀具的刀具指令信号；控制冷却、润滑的启停，工件和机床部件松开、夹紧，分度工作台转位等的辅助指令信号等。

### 1.2.1.3 伺服系统

伺服系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置组成，并与机床上的执行部件和机械部件组成数控机床的进给系统。它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个做进给运动的执行部件，都配有一套伺服系统。伺服系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服系统中，使用了位置检测装置，间接或直接测量执行部件的实际进给位移，与指令位移进行比较，按闭环原理，将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动。

### 1.2.1.4 机械部件

数控机床的机械部件包括：主运动部件，进给运动执行部件如工作台，拖板及其传动部件，床身、立柱等支承部件，此外，还有冷却、润滑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床，还有存放刀具的刀库，交换刀具的机械手等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动结构要求更为简单，在精度、刚度、抗振性等方面要求更高，而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

## 1.2.2 数控机床的工作原理

用数控机床加工零件时，首先应将加工零件的几何信息和工艺信息编制成加工程序，由输入部分送入数控装置，经过数控装置的处理、运算，按各坐标轴的分量送到各轴的驱动电路，经过转换、放大进行伺服电动机的驱动，带动各轴运动，并进行反馈控制，使刀具与工件及其他辅助装置严格地按照加工程序规定的顺序、轨迹和参数有条不紊地工作，从而加工出零件的全部轮廓。

数控机床的加工，是把刀具与工件的运动坐标分割成一些最小的单位量，即最小位移量，由数控系统按照零件程序的要求，使坐标移动若干个最小位移量，从而实现刀具与工件的相对运动，完成对零件的加工。

当走刀轨迹为直线或圆弧时，数控装置则在线段的起点和终点坐标值之间进行“数据点的密化”，求出一系列中间点的坐标值，然后按中间的坐标值，向各坐标输出脉冲数，保证加工出需要的直线或圆弧轮廓。

数控装置进行的这种“数据点的密化”称为插补，一般数控装置都具有对基本函数进行插补的功能。

对任意曲面零件的加工，必须使刀具运动的轨迹与该曲面完全吻合，才能加工出所需的零件。

数控机床具有很好的柔性,当加工对象变换时,只需重新编制加工程序即可,原来的程序可存储备用,不必像组合机床那样需要针对新加工零件重新设计机床,致使生产准备时间过长。

### 1.2.3 数控系统的主要工作过程

数控系统的主要任务是进行刀具和工件之间相对运动的控制。机床接通电源后,微机数控装置和可编程控制器都将对数控系统各组成部分的工作状态进行检查和诊断,并设置初态。当数控系统具备了正常工作的条件时,开始进行加工控制信息的输入。

工件在数控机床上的加工过程由数控加工程序来描述。按管理形式不同,编程工作可以在专门的编程场所进行,也可在机床前进行。对前一种情况,数控加工程序在加工准备阶段利用专门的编程系统产生,保存到控制介质上,再输入数控装置,或者采用通信方式直接传输到数控装置,操作员可按需要通过数控面板对读入的数控加工程序进行修改。对后一种情况,操作员直接利用数控装置本身的编辑器进行数控加工程序的编写和修改。

输入数控装置的加工程序是按工件坐标系来编写的,而机床刀具相对于工件是按机床坐标系运动的,同时加工所使用的刀具参数也各不一样,因此在加工前还要输入使用刀具的刀具参数及工件编程原点相对机床原点的坐标位置。

输入加工控制信息后,可选择一种加工方式(手动方式或自动方式的单段方式和连续方式),启动加工运行,此时,数控装置在系统控制程序的作用下对输入的加工控制信息进行预处理,即进行译码和刀具半径补偿与刀具长度补偿计算。系统进行数控加工程序译码(或解释)时,将其区分成几何的、工艺的数据和开关功能。几何数据是刀具相对工件的运动路径数据,如有关G功能和坐标指定等,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和进给速度等功能,即F功能、S功能和部分G功能;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、冷却液的启/停、润滑液的启/停等辅助M功能指令等。

由于在编写数控加工程序时,一般不考虑刀具的实际几何数据,所以,数控装置根据工件几何数据和在加工前输入的实际刀具参数,要进行相应的刀具补偿计算,简称刀补计算。在数控系统中存在着多种坐标系,根据输入的实际工件原点,加工过程所采用的各种坐标系等几何信息,数控装置还要进行相应的坐标变换。

数控装置对加工控制信息预处理完毕后开始逐段运行数控加工程序。要产生的运动轨迹在几何数据中由各曲线段起、终点及其连接方式(如直线和圆弧)等主要几何数据给出,数控装置中的插补器能根据已知的几何数据计算出刀具一系列的加工点,完成数据“密化”工作,即完成插补处理。插补后的位置信号与检测到的位置信号进行位置处理,处理后的信号控制伺服装置,由伺服装置驱动电动机运动,从而带动机床运动件运动。

由数控装置发出的开关命令在系统程序的控制下,在各加工程序段插补处理开始前或完成后,适时输出给机床控制器。在机床控制器中,开关命令和由机床反馈的回答信号一起被处理和转换为机床开关设备的控制命令。在现代的控制系统中,大多数机床控制电路都用PLC中可靠的开关功能来实现。

在机床的运行过程中,数控系统要随时监视数控机床的工作状态,通过显示部件及时向操作者提供系统的工作状态和故障情况。此外,数控系统还要对机床操作面板进行监控,因为机床操作面板的开关状态可以影响加工状态,需及时处理有关信号。

## 1.3 数控机床的分类

目前数控机床已发展成为品种齐全、规格繁多的大系统,可以从不同的角度进行分类。



### 1.3.1 按运动方式分类

#### (1) 点位控制系统

点位控制系统是指控系统只控制刀具或机床工作台，从一点准确地移动到另一点，而点与点之间运动的轨迹不需要严格控制。为了减少移动部件的运动与定位时间，一般先以快速移动到终点附近位置，然后以低速准确移动到终点定位位置，以保证良好的定位精度。移动过程中刀具不进行切削。使用这类控制系统主要有数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数控弯管机等。图 1-4 所示为数控钻床加工示意图。

#### (2) 点位直线控制系统

点位直线控制系统是指控系统不仅控制刀具或工作台从一个点准确地移动到另一个点，而且保证在两点之间的运动轨迹是一条直线。移动部件在移动过程中进行切削。应用这类控制系统的有数控车床、数控钻床和数控铣床等。图 1-5 所示为数控铣床加工示意图。



图 1-4 数控钻床加工示意图

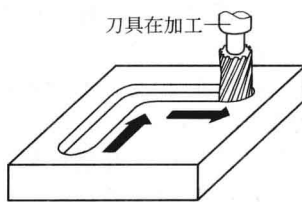


图 1-5 数控铣床加工示意图



图 1-6 轮廓控制系统加工示意图

#### (3) 轮廓控制系统

轮廓控制系统也称连续控制系统，是指控系统能够对两个或两个以上的坐标轴同时进行严格连续控制。它不仅能控制移动部件从一个点准确地移动到另一个点，而且还能控制整个加工过程每一点的速度与位移量，将零件加工成一定的轮廓形状。应用这类控制系统的有数控铣床、数控车床、数控齿轮加工机床和加工中心等。图 1-6 所示为轮廓控制系统加工示意图。

### 1.3.2 按控制方式分类

#### (1) 开环控制系统

开环控制系统是指不带反馈装置的控制系统。它是根据穿孔带上的数据指令，经过控制运算发出脉冲信号，输送到伺服驱动装置（如步进电动机），使伺服驱动装置转过相应的角度，然后经过减速齿轮和丝杠螺母机构，转换为移动部件的直线位移。图 1-7 所示为开环控制系统框图。

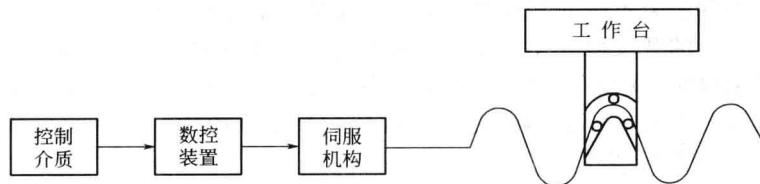


图 1-7 开环控制系统框图

由于开环控制系统不具有反馈装置，不能进行误差校正，因此系统精度较低（ $\pm 0.02\text{mm}$ ）。虽然开环控制系统具有结构简单、工作稳定、使用维修方便及成本低等优点，但它已不能满足数控机床日益提高的精度要求。

#### (2) 半闭环控制系统

半闭环控制系统是在开环控制系统的伺服机构中装有角位移检测装置，通过检测伺服机构的滚珠丝杠转角，间接检测移动部件的位移，然后反馈到数控装置的比较器中，与输入原



指令位移值进行比较,用比较后的差值进行控制,使移动部件补充位移,直到差值消除为止的控制系统。由于半闭环控制系统将移动部件的传动丝杠螺母机构不包括在闭环之内,所以传动丝杠螺母机构的误差仍然会影响移动部件的位移精度。图 1-8 所示为半闭环控制系统框图。

半闭环控制系统调试方便,稳定性好,目前应用比较广泛。

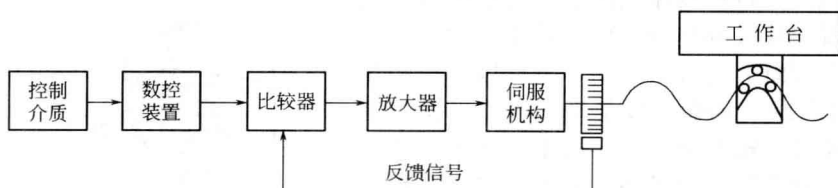


图 1-8 半闭环控制系统框图

### (3) 闭环控制系统

图 1-9 所示为闭环控制系统框图,闭环控制系统是在机床移动部件位置上直接装有直线位置检测装置,将检测到的实际位移反馈到数控装置的比较器中,与输入的原指令位移值进行比较,用比较后的差值控制移动部件作补充位移,直到差值消除时才停止移动,达到精确定位的控制系统。

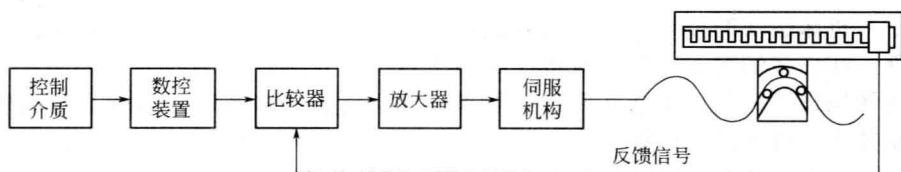


图 1-9 闭环控制系统框图

闭环控制系统定位精度高(一般可达 $\pm 0.01\text{mm}$ ,最高可达 $\pm 0.001\text{mm}$ ),一般应用在高精度数控机床上。由于系统增加了检测、比较和反馈装置,所以结构比较复杂,调试维修比较困难。

#### 1.3.3 按数控系统的功能水平分类

按数控系统的功能水平,通常把数控系统分为低、中、高三个档次。低、中、高三个档次的界限是相对的,不同时期,划分标准也会不同。就目前的发展水平来看,可以根据表 1-1 的一些功能与指标来划分。其中,高档一般称为全功能数控或标准型数控,经济型数控属于低档数控,是指由单片机和步进电动机组成的数控系统,或其他功能简单、价格低的数控系统。经济型数控主要用于车床、线切割机床以及旧机床改造等。

表 1-1 数控系统的功能和指标

功 能	低 档	中 档	高 档
系统分辨率	$10\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$0.1\mu\text{m}$
G00 速度	$3\sim 8\text{m}/\text{min}$	$10\sim 24\text{m}/\text{min}$	$24\sim 100\text{m}/\text{min}$
伺服类型	开环及步进电动机	半闭环及直、交流伺服	闭环及直、交流伺服
联动轴数	2~3 轴	2~4 轴	5 轴或 5 轴以上
通信功能	无	RS232C 或 DNC	RS232C、DNC、MAP
显示功能	数码管显示	CRT:图形、人机对话	CRT:三维图形、自诊断
内装 PLC	无	有	强功能内装 PLC
主 CPU	8 位、16 位 CPU	16 位、32 位 CPU	32 位、64 位 CPU
结构	单片机或单板机	单微处理器或多微处理器	分布式多微处理器

## 1.4 控制轴数与联动轴数

数控机床上控制轴的概念与通常所说的主轴、传动轴等轴的概念不同。为了说明这一点, 先来分析一下数控机床上的运动分配情况。图 1-10 为某数控机床及其运动分配, 其中工作台可以做 X、Y 两个方向上的直线运动, 也可以实现转动 C; 主轴箱可以沿 Z 向做直线运动, 也可以实现摆动 B; 当然还有主轴的旋转。在机床能够实现的运动中, 除了主轴旋转运动以外, 其他所有运动都与工件的成形有关, 而且都有自己的伺服驱动。数控系统正是通过确定的伺服驱动单元控制来实现某个具体运动的, 例如工作台沿 X 方向的移动、主轴箱的摆动。这就是控制轴的概念, 即机床数控装置能够控制轴的数目。机床上的运动越多, 控制轴数就越多, 功能就越强, 机床的复杂程度和技术含量也就越高。

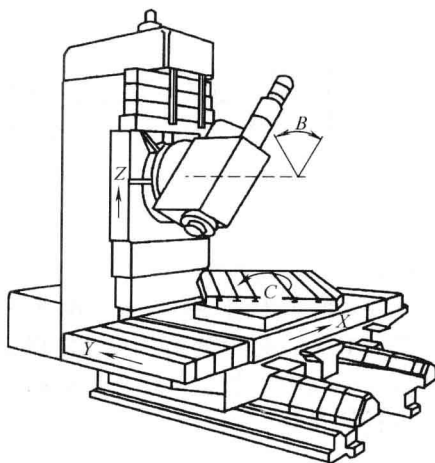


图 1-10 多轴控制数控机床

实现了对机床运动的控制并不意味着就可以加工任何零件。在许多情况下, 需要对机床的多个运动同时、协调地进行控制, 才能达到加工要求, 即同时控制多个轴, 这就是联动轴数。显然, 联动轴数多, 机床控制和编程难度加大。在图 1-10 所示的机床上加工, 有些零件形面需要 X、Y、Z、C、B 五个控制轴联动才能完成, 如叶片表面的加工。

总之, 控制轴数和联动轴数是表达机床加工能力的重要参数。用控制轴数来划分, 数控机床可有二轴数控机床、三轴数控机床等。控制轴数有时也称坐标数, 因此机床可以有三坐标数控机床和五坐标数控机床等。

## 1.5 数控机床性能、结构及应用

### 1.5.1 数控机床的精度指标

#### (1) 定位精度和重复定位精度

定位精度是指数控机床工作台等移动部件在确定的终点所达到的实际位置的精度, 因此移动部件实际位置与理想位置之间的误差称为定位误差。定位误差包括伺服系统、检测系统、进给系统等误差, 还包括移动部件导轨的几何误差等。定位误差将直接影响零件加工的位置精度。

重复定位精度是指在同一台数控机床上, 应用相同程序、相同代码加工一批零件, 所得到的连续结果的一致程度。重复定位精度受伺服系统特性、进给系统的间隙与刚性以及摩擦特性等因素的影响。一般情况下, 重复定位精度是成正态分布的偶然性误差, 它影响一批零件加工的一致性, 是一项非常重要的性能指标。如 TH6350 型数控机床定位精度  $\pm 0.005\text{mm}$ /全程, 重复定位精度  $\pm 0.002\text{mm}$ 。

#### (2) 分度精度

分度精度是指分度工作台在分度时, 理论要求回转的角度值和实际回转的角度值的差值。分度精度既影响零件加工部位在空间的角度位置, 也影响孔系加工的同轴度等。