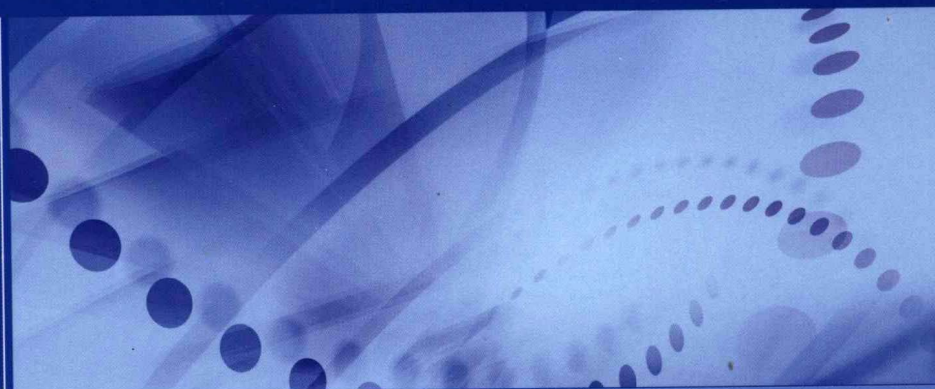




高等院校机电类精品教材

数控机床

SHUKONG JICHUANG



杨贺来 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>



◇高等院校机电类精品教材

数 控 机 床

杨贺来 编著

清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了数控技术的基本内容：现代 CNC 系统的硬件、软件结构，数控编程，插补控制原理，现代机床检测技术，伺服驱动控制，现代机床结构设计和先进数控加工装备等。又对前沿数控技术做了介绍，如开放式数控系统的研究进展以及基于网络和动态监测模式下的层次化开放嵌入式数控系统、Step-NC 数据结构及其技术应用、复杂参数曲线/曲面高精度插补控制算法、5-6 联动加工机床、数控激光加工机床等。

本书可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业本科生的技术基础课教材，也可作为工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床/杨贺来编著. —北京：清华大学出版社；北京交通大学出版社，2009.1
(高等院校机电类精品教材)

ISBN 978-7-81123-469-5

I. 数… II. 杨… 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 (2008) 第 188176 号

责任编辑：赵彩云 特邀编辑：宋望溪

出版发行：清华大学出版社 邮编：100084 电话：010-62776969

北京交通大学出版社 邮编：100044 电话：010-51686414

印刷者：北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印张：20.25 字数：506 千字

版 次：2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-81123-469-5/TG·5

印 数：1~4 000 册 定价：32.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。

投诉电话：010-51686043, 51686008；传真：010-62225406；E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前言

我国的制造业发展很快,现在继美国、日本、德国之后,生产规模已跃居世界第四位,成为世界上的制造大国。

但世界制造大国并不就是世界制造强国。我国虽名列世界第四位,但总体规模较低,技术创新能力落后,有自主知识产权的产品少,低水平生产能力过剩,高水平生产能力不足。为了使我国尽快地成为世界制造强国,就要加快发展先进制造技术,改造制造工业。数控技术是先进制造技术的基础技术和共性技术,是衡量一个国家制造业水平的重要标志。

在大力研究开发数控装备制造业的同时,还需要培养知识先进、专业基础扎实的高素质数控技术人才。

本书着眼于国内外最新科技成果并结合编者自身的科研实践,力求做到先进性和实用性相统一。全书主要从现代 CNC 系统的硬件、软件结构,数控编程,插补控制原理,现代机床检测技术,伺服驱动控制,现代机床结构设计和先进数控加工装备等重要方面内容,进行了集中、深入的论述。力求使学生在掌握基本数控知识的基础上,对前沿数控技术有所了解,如开放式数控系统的研究进展和基于网络和动态监测模式下的层次化开放嵌入式数控系统、Step-NC 数据结构及其技术应用、复杂参数曲线/曲面高精度插补控制算法、五轴-六轴联动机床、数控激光加工机床等。

本书内容翔实、新颖,基本能反映近年来国内外数控技术发展的最新成果。论述深入浅出,图文并茂。本书可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化高年级学生、研究生的教材,也可作为工程技术人员更新知识的自学用书,还可作为数控机床编程、工艺、操作及维修人员的理论指导和技术参考书。

本书由北京航空航天大学 and 天津城市建设学院两校教授杨贺来担任主编并编写了第 8 章第 3 节;天津城市建设学院汪文津博士编写了第 1、2、3、4、5、6 章和第 8 章的 1、2、4、5 节,张志强博士编写了第 7 章。

本书在编写过程中得到了天津大学王太勇教授的支持和帮助,参阅了有关院校、工厂、科研院所的一些教材、资料和文献,反映了济南铸锻所、意大利沈阳普瑞玛公司、上海百超数控激光设备有限公司、天津市帅超激光工程技术有限公司等与编者合作单位的科技成果,并在编写出版过程中得到了北京交通大学出版社赵彩云编辑的大力协助,在此一并向他们表示衷心的感谢!

由于编者学识水平有限,成书时间仓促,书中错误与不妥之处在所难免,敬请读者予以批评指正。

编 者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数控机床简介	1
1.1.1 数控机床的定义	1
1.1.2 数控机床的特点	2
1.2 数控机床的组成及工作原理	3
1.3 数控机床的分类	5
1.3.1 按加工方式和工艺用途分类	5
1.3.2 按运动轨迹分类	6
1.3.3 按伺服控制系统分类	7
1.3.4 按数控系统的功能水平分类	8
1.4 现代数控机床的发展	9
1.4.1 数控技术的产生与发展	9
1.4.2 数控机床的发展动向	9
1.4.3 我国数控机床的发展情况	10
◇ 思考题	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 单微处理器的 CNC 装置基本结构	12
2.1.2 多微处理器的 CNC 装置基本结构	14
2.1.3 专用型和个人计算机式结构的 CNC 装置	19
2.1.4 开放式 CNC 装置	21
2.2 数控系统的软件结构	27
2.2.1 软件结构特点	27
2.2.2 输入和数据处理	32
2.2.3 速度处理和加减速控制	38
2.2.4 插补计算	47
2.2.5 位置控制	48
2.2.6 故障诊断与状态监测	48
2.2.7 系统二次开发控制	51
2.3 数控系统中的 PLC	53
2.3.1 数控机床上的两类控制信息	53

2.3.2 可编程控制器及其工作过程	54
2.4 数控系统的常用接口	59
2.4.1 数控系统的常用接口概述	59
2.4.2 键盘输入/输出接口	59
2.4.3 显示器及其接口	61
2.4.4 机床开关量及其接口	66
2.4.5 串行通信及其接口	69
2.4.6 网络通信及其接口	70
◇ 思考题	72
第3章 数控插补原理	74
3.1 数控插补原理概述	74
3.2 基准脉冲插补	75
3.2.1 逐点比较法	75
3.2.2 数字积分法	79
3.3 数据采样插补	84
3.3.1 数据采样插补原理及精度分析	84
3.3.2 直线函数法插补	86
3.3.3 扩展 DDA 数据采样插补	87
3.4 空间参数曲线/曲面高精度实时插补算法原理介绍	90
3.4.1 参数曲线插补原理	90
3.4.2 参数曲面插补原理	93
3.4.3 机床加减速控制	95
◇ 思考题	96
第4章 数控加工编程	97
4.1 数控加工编程的基础知识	97
4.1.1 数控加工编程的基本概念	97
4.1.2 数控编程方法介绍	98
4.1.3 数控加工的工艺分析	98
4.1.4 数控加工的数学处理	100
4.2 数控程序的编制	102
4.2.1 数控程序编制的国际标准和国家标准	102
4.2.2 机床的坐标系	103
4.2.3 数控加工程序段格式和程序结构	106
4.2.4 编写数控加工技术文件和加工程序	106
4.3 手工编程	107
4.3.1 数控车削编程知识	107
4.3.2 加工中心编程知识	123
4.4 自动编程	141
4.4.1 自动编程特点	141

4.4.2	APT 自动编程简介	142
4.4.3	参数化图形交互自动编程系统	144
4.5	STEP-NC 介绍	149
4.5.1	STEP-NC 的概念及研究进展	149
4.5.2	STEP-NC 数据结构	151
4.5.3	STEP-NC 与 G 代码程序的对比	153
4.5.4	基于 STEP-NC 的数控加工应用	154
◇	思考题	162
第 5 章	伺服控制系统	163
5.1	数控机床伺服系统的组成和分类	163
5.1.1	伺服系统的组成	163
5.1.2	伺服系统的分类	164
5.1.3	伺服系统的发展	166
5.1.4	数控机床对伺服驱动系统的要求	167
5.2	伺服系统的伺服驱动装置	169
5.2.1	步进电机	169
5.2.2	直流伺服电机	172
5.2.3	交流伺服电机	179
5.2.4	直线电机	181
5.3	速度控制	183
5.3.1	直流进给运动的速度控制	183
5.3.2	直流主轴驱动的速度控制	191
5.3.3	交流进给运动的速度控制	192
5.3.4	交流进给驱动的速度控制	195
5.3.5	交流主轴驱动的速度控制	195
5.3.6	交流伺服电机的矢量控制	197
5.4	位置控制	201
5.4.1	位置控制的基本原理	201
5.4.2	前馈控制介绍	201
5.4.3	全数字伺服系统	203
◇	思考题	203
第 6 章	数控机床位置检测系统	205
6.1	位置检测系统的主要要求和分类	205
6.1.1	位置检测系统的主要要求	205
6.1.2	位置检测装置的分类	205
6.2	旋转变压器	207
6.2.1	旋转变压器结构	207
6.2.2	旋转变压器工作原理	207
6.2.3	旋转变压器的应用	208

6.3 感应同步检测单元	209
6.3.1 感应同步检测单元结构	209
6.3.2 感应同步检测单元工作原理	209
6.3.3 感应同步检测单元应用	210
6.4 光栅检测单元	212
6.4.1 光栅检测单元的结构	212
6.4.2 光栅检测单元的工作原理	213
6.4.3 光栅检测单元应用	214
6.5 磁栅检测单元	215
6.5.1 磁栅检测单元结构	215
6.5.2 磁栅检测单元工作原理	216
6.6 脉冲编码器	218
6.6.1 脉冲编码器结构	218
6.6.2 脉冲编码器工作原理	219
6.6.3 脉冲编码器应用	220
◇ 思考题	222
第7章 现代数控机床的设计	223
7.1 数控机床的总体结构设计	223
7.1.1 数控机床的结构设计要求	223
7.1.2 数控机床的总体布局	226
7.1.3 机床总体布局的计算机辅助设计	227
7.2 数控机床主传动设计	229
7.2.1 主传动系统的设计要求	229
7.2.2 主传动变速系统的设计	230
7.2.3 主轴部件设计	233
7.2.4 主传动系统的计算机辅助设计	237
7.3 进给传动系统	240
7.3.1 进给传动系统的组成和设计要求	240
7.3.2 电气驱动部件的设计	241
7.3.3 机械传动部件的设计	247
7.3.4 进给传动系统的计算机辅助设计	250
7.4 床身和导轨	252
7.4.1 床身	252
7.4.2 导轨	256
7.5 自动换刀系统	257
7.5.1 自动换刀装置	257
7.5.2 刀库	262
◇ 思考题	264
第8章 数控加工装备	265

8.1 加工中心	265
8.1.1 机床的组成结构	265
8.1.2 加工中心传动系统	267
8.1.3 自动换刀装置	268
8.2 数控五轴-六轴联动机床	269
8.2.1 复杂曲面加工原理	269
8.2.2 机床的组成结构	272
8.2.3 数控系统	278
8.3 数控激光加工机床	279
8.3.1 数控激光加工机床现状	279
8.3.2 数控激光加工机床的组成及工作原理	282
8.3.3 典型数控激光切缝机床分析	291
8.3.4 国内激光切割技术的发展趋势	296
8.4 高速切削机床	298
8.4.1 高速切削原理	298
8.4.2 机床的结构	299
8.4.3 高速切削的特点	301
8.4.4 高速切削机床的关键技术	302
8.5 并联机床	306
8.5.1 机床运动原理	306
8.5.2 机床的组成结构	306
◇ 思考题	309
参考文献	310

第 1 章

绪 论

1.1 数控机床简介

1.1.1 数控机床的定义

科学技术和社会生产力的迅速发展,对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求。机械加工工艺过程的自动化成为实现上述要求的最重要措施之一。它不仅能够提高产品质量、提高生产率、降低生产成本,还能够极大地改善劳动者的生产条件。

目前很多制造企业已经广泛采用了以自动机床、组合机床和专用机床为主体的“刚性”自动生产线,采用多刀、多工位和多面同时加工方法,常年进行着单一产品的高效和高度自动化的生产。尽管这种生产方式需要巨大的初始投资和很长的生产准备周期,但在大批量的生产条件下,由于分摊在每一个加工零件上的费用很少,因此,经济效益仍然是十分显著的。

不过,在制造业中并不是所有的产品都具有很大的需求量,单件与小批生产的零件一般占机械加工总量的 80%左右。尤其是航空、航天、船舶、机床、重型机械、食品加工机械、包装机械和军工等产品,不仅加工批量小,而且加工零件形状比较复杂,精度要求也很高,还需要经常改型。如果仍然采用专用化程度很高的自动化机床加工这类产品的零件就显得不尽合理。而经常改装和调整设备,对于专用生产线来讲,不仅会提高产品的生产成本,有时甚至是无法实现的。因此,这种“刚性”的自动化生产方式已逐渐显现出了对现代制造业的不适应性。

为了解决上述问题,从而实现多品种、小批量产品零件的自动化生产,一种称之为数控机床(Numerical Control Machine Tools)的现代机床应运而生。数控机床是数字控制机床的简称,是一种装有程序控制系统的自动化机床。该控制系统能够逻辑地处理具有控制编码或其他符号指令规定的程序,并将其译码,从而驱动机床动作并加工零件。它很好地解决了刚性自动生产线难以经常改型和调整设备的问题,显示出了适应多品种、小批量产品零件生产的“柔性”。自从 1952 年美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)伺服机构实验室研制出世界上第一台数控机床以来,数控机床在制造业,特别是在汽车、航空航天及军事工业中被广泛地应用,数控技术无论在硬件还是软件方面,都有了飞速发展。现代数控机床更是集机械制造技术、液压气动技术、计算机技术、成组技术与现代控

制技术、传感器检测技术、信息处理技术、网络通信技术等于一体，因此，数控机床技术的提高是提高整个制造业水平发展的重要基础。

数控技术及装备是发展新兴高新技术产业和尖端工业（如信息技术及其产业、生物技术及其产业、航空、航天等国防工业产业）的使能技术和最基本的装备。在提高生产率、降低生产成本、提高加工质量及改善工人劳动强度等方面，都有着突出的优点。而以现代数控机床为代表的先进制造技术成为当前急需加快发展的突破性技术，其新突破将成为整个制造业全面发展的关键。

1.1.2 数控机床的特点

数控机床对零件的加工过程，是严格按照加工程序所规定的参数及动作执行的。它是一种高效能自动或半自动机床，与普通机床相比，具有以下明显特点。

1) 适合于复杂异形零件的加工

数控机床可以完成普通机床难以完成或根本不能制造的复杂零件的加工，因此在航空、造船、汽车、模具等加工业中得到广泛应用。

2) 加工精度高，稳定产品质量

数控机床的加工精度，一般可达到 $0.001 \sim 0.1 \text{ mm}$ ，数控机床是按数字信号形式控制的，数控装置每输出一个脉冲信号，则机床移动部件移动一个脉冲当量（一般为 0.001 mm ），加工过程不需要人工干预，而且机床进给传动链的反向间隙与丝杠螺距平均误差可由数控装置（CNC 装置）进行校正及补偿，所以，数控机床定位精度比较高。故可以获得比机床本身精度还要高的加工精度和重复精度。

3) 加工稳定可靠

实现计算机控制，排除人为误差，零件的加工一致性好，质量稳定可靠。

4) 高柔性

在数控机床上加工零件，主要取决于数控加工程序（NC 程序），它与普通机床不同，不必制造、更换许多工具、夹具，不需要经常调整机床。当加工对象改变时，一般只需要更改数控加工程序，体现出很好的适应性，可大大节省生产准备时间。在数控机床的基础上，可以组成具有更高柔性的自动化制造系统——柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）。

5) 高生产率

数控机床可有效地减少零件的切削时间和辅助时间，数控机床的主轴转速和进给量的范围大，允许机床进行大切削量的强力切削。数控机床目前正进入高速加工时代，数控机床移动部件的快速移动和定位及高速切削加工，减少了半成品的工序间周转时间，提高了生产效率。

6) 劳动条件好

数控机床是具有广泛的通用性而且具有很高自动化程度的机床。它的控制系统不仅能控制机床各种动作的先后顺序，还能控制机床运动部件的运动速度，以及刀具相对工件的运动轨迹。操作者除了操作面板、装卸零件、关键工序的中间测量及观察机床运行之外，其他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，劳动强度和紧张程度均可大大减轻，劳动条件也得到了相应的改善。而且，数控机床还是计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）、柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（Computer Inte-

grated Manufacturing System, CIMS) 等柔性加工和柔性制造系统的基础。

7) 有利于管理现代化

用数控机床加工零件, 能精确地计算零件的加工工时, 并有效地简化了检验和工装夹具、半成品的管理工作, 这些特点都有利于向计算机控制与管理生产方面发展, 为实现生产过程自动化创造了条件。

8) 投资大, 维修困难, 使用费用高

数控机床的初期投资及技术维修等费用较高, 而且, 数控机床作为典型的光机电一体化产品, 技术含量高, 对管理及操作人员的素质要求也较高。合理地选择和使用数控机床, 可以降低企业的生产成本, 提高经济效益和竞争能力。

9) 生产准备工作复杂

由于整个加工过程采用程序控制, 数控加工的前期准备工作较为复杂, 包含工艺方案确定、数控程序编制等工作。

1.2 数控机床的组成及工作原理

数控机床一般由输入装置、数控装置、驱动装置和检测装置、辅助控制装置和机床本体及附件组成。数控机床的基本结构如图 1-1 所示, 下面对其各组成部分加以介绍。

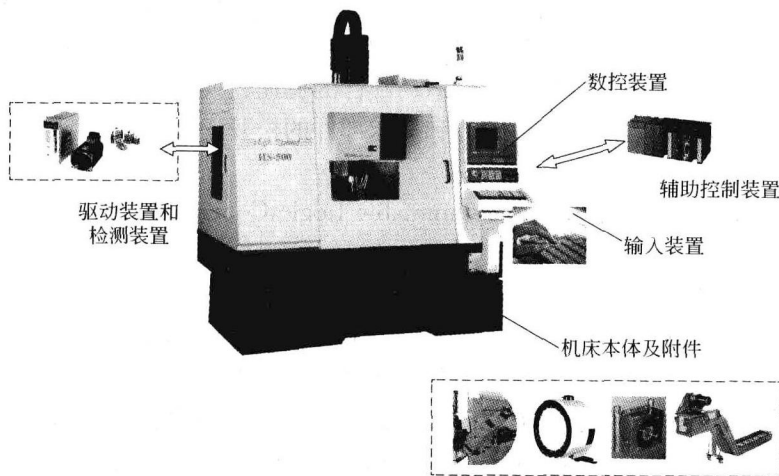


图 1-1 数控机床的基本结构

1. 输入装置

数控加工程序可通过键盘, 用手工方式直接输入数控系统。还可由编程计算机用 RS-232 串口通信、USB 接口或采用网络通信方式传送到数控系统中。

零件加工程序输入过程有两种不同的方式: 一种是边读入边加工, 另一种是一次性将零件加工程序全部读入数控装置内部的存储器, 加工时再从存储器中逐段调出进行加工。

2. 数控装置

数控装置是数控机床的控制中枢。数控装置从内部存储器中取出或接受输入装置送来的

一段或几段数控加工程序，经过数控装置中的逻辑电路或系统软件进行编译、运算和逻辑处理后，输出各种控制信息和指令，控制机床各部分的工作，使其完成规定的有序运动和动作。

零件的轮廓图形往往由直线、圆弧或其他非圆弧曲线组成，刀具在加工过程中必须按零件形状和尺寸的要求进行运动，即按图形轨迹移动。但输入的零件加工程序只能是各线段轨迹的起点和终点坐标值等数据，不能满足要求。因此需要进行轨迹插补（Interpolation），也就是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，并向相应坐标输出脉冲信号，控制各坐标轴（即进给运动各执行部件）的进给速度、进给方向和进给位移量等。

3. 驱动装置和检测装置

驱动装置接收来自数控装置的指令信息，经功率放大后，严格按照指令信息的要求驱动机床的移动部件，以加工出符合图纸要求的零件。驱动装置包括控制器（含功率放大器）和执行机构两大部分。目前大都采用直流或交流伺服电动机作为执行机构。由于伺服控制装置是数控机床的最后控制环节，因此，其伺服精度和动态响应特性将直接影响数控机床的生产率、加工精度和表面加工质量。

检测装置将数控机床各坐标轴的实际位移量检测出来，经反馈系统输入到机床的数控装置中。数控装置将反馈回来的实际位移量值与设定值进行比较，控制驱动装置按指令设定值运动。

4. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要作用是接收数控装置输出的开关量指令信号，经过编译、逻辑判别和运算，再经功率放大后驱动相应的电器，带动机床的机械、液压、气动等辅助装置完成指令规定的开关量动作。这些控制包括主轴运动部件的变速、换向和启停指令，刀具的选择和交换指令，冷却、润滑装置的启停，工件和机床部件的松开、夹紧，分度工作台转位分度等开关辅助动作。

目前广泛采用可编程控制器（Programmable Logic Controller, PLC）作数控机床的辅助控制装置。

5. 机床本体及附件

与传统的普通机床相比，数控机床在整体布局、外部造型、主传动系统、进给传动系统、刀具系统、支承系统和排屑系统等方面有着很大的差异。这些差异是为了更好地满足现代数控技术的要求，并充分适应数控加工的特点。因此，需要建立一种全新数控机床设计概念，即在机床的精度、静刚度、动刚度和热刚度等方面提出更高的要求，尽可能简化传动链。

为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套部件，如冷却装置、排屑装置、防护装置、润滑装置、照明装置、加工中心中配置的刀库和自动换刀的机械手和对刀仪等。

零件在数控机床上加工的工作过程可以分以下几个步骤：

- (1) 根据被加工零件的图纸与工艺技术方案，用规定的数控指令代码和程序格式编写程序；
- (2) 所编程序指令通过网络、通信线或人工输入等方式传送到机床数控系统中；
- (3) 数控系统对程序（代码）进行翻译、运算之后，向机床各个坐标的伺服驱动机构和辅助控制装置发出信号，驱动机床的各运动部件，并控制所需要的辅助运动；
- (4) 在机床上加工出合格的零件。

1.3 数控机床的分类

随着数控技术的发展,数控机床出现了许多分类方法,但通常按以下三个最基本的方面进行分类。

1.3.1 按加工方式和工艺用途分类

1. 普通数控机床

普通数控机床一般是指在加工工艺过程中的一个工序上实现数字控制的自动化机床,如数控车床、数控铣床、数控磨床、数控钻床与数控齿轮加工机床等,如图1-2所示。尽管这些机床在加工工艺方面存在着很大差异,具体的控制方式也各不相同,但它们都适用于单件、小批量和多品种的零件加工,具有很好的加工尺寸一致性、很高的生产率和自动化程度。

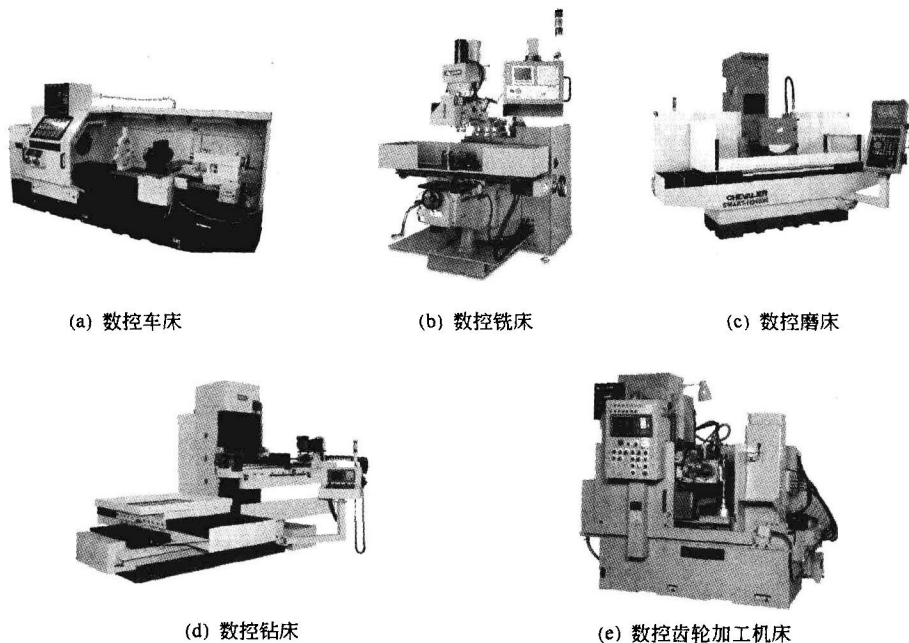


图 1-2 普通数控机床

2. 加工中心

加工中心是带有刀库和自动换刀装置的数控机床,它将数控铣床、数控镗床、数控钻床的功能组合在一起,零件在一次装夹后,可以对其加工面进行铣、镗、钻、扩、铰及攻螺纹等多工序加工,打破了在一台数控机床上只能完成一两种工艺的传统概念。由于加工中心能有效地避免由于多次安装造成的定位误差,所以它适用于产品更换频繁、零件形状复杂、精度要求高、生产批量不大而生产周期短的产品,加工中心如图1-3所示。

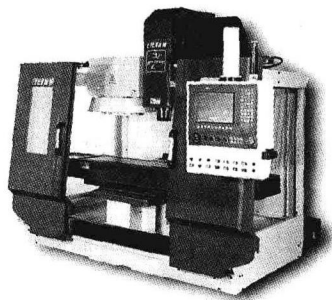


图 1-3 加工中心

1.3.2 按运动轨迹分类

1. 点位控制数控机床

如图 1-4 所示, 点位控制是指数控系统只控制刀具或工作台从一点移至另一点的准确定位, 然后进行定点加工, 而点与点之间的路径不需控制, 因而, 点位控制的几个坐标轴之间的运动不需要保持任何的联系。为了尽可能减少运动部件的运动和定位时间, 并保证稳定的定位精度, 通常先以快速运动至接近终点坐标, 然后再以低速准确运动到终点位置。采用这类控制的有数控钻床、数控镗床和数控坐标镗床、数控点焊机、数控弯管机等。

2. 点位直线控制数控机床

如图 1-5 所示, 点位直线控制是指数控系统除控制直线轨迹的起点和终点的准确定位外, 还要控制在这两点之间以指定的进给速度进行直线切削。在数控镗床上使用点位直线控制可以扩大镗床的工艺范围, 能够在一次安装中对棱柱形工件的平面与台阶进行镗削加工, 然后再进行点位控制的钻孔、镗孔等加工, 可以有效地提高加工精度和生产率。点位直线控制还可以应用于加工阶梯轴或盘类零件的数控车床上。

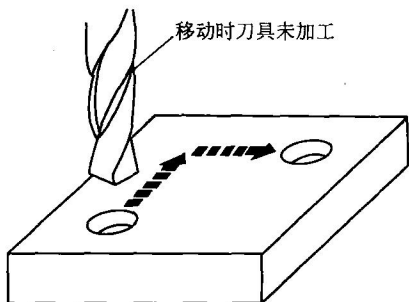


图 1-4 点位控制加工示意图

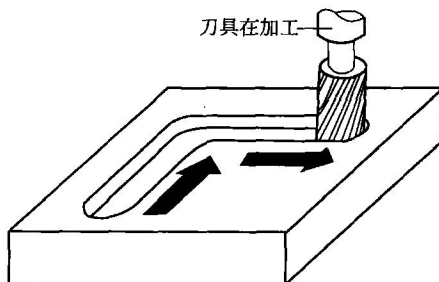


图 1-5 点位直线控制加工示意图

3. 轮廓控制数控机床

轮廓控制亦称连续轨迹控制, 如图 1-6 所示, 能够连续控制两个或两个以上坐标方向的联合运动。为了使刀具按规定的轨迹加工工件的曲线轮廓, 数控装置具有插补运算的功能, 使刀具的运动轨迹以最小的误差逼近规定的轮廓曲线, 并协调各坐标方向的运动速度, 以便在切削过程中始终保持规定的进给速度, 轮廓控制要比点位控制复杂, 需要在加工过程中不断进行多坐标轴之间的插补运算, 实现相应的速度和位移控制。它包含了实现点位控制和点位直线控制。采用这类控制的有数控铣床、数控车床、数控磨床和加工中心等。

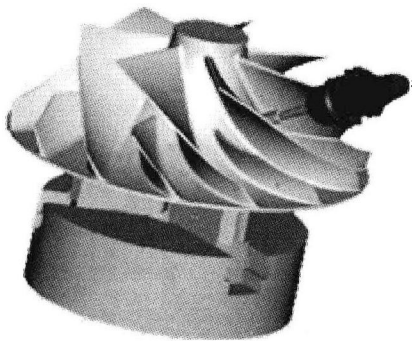


图 1-6 轮廓控制加工示意图

1.3.3 按伺服控制系统分类

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，由步进电机驱动线路和步进电机组成，如图1-7所示。数控装置经过控制运算发出脉冲信号，每一脉冲信号使步进电机转动一定的角度，通过滚珠丝杠推动工作台移动一定的距离。运动部件的速度与位移量是由输入脉冲的频率和脉冲数所决定的。

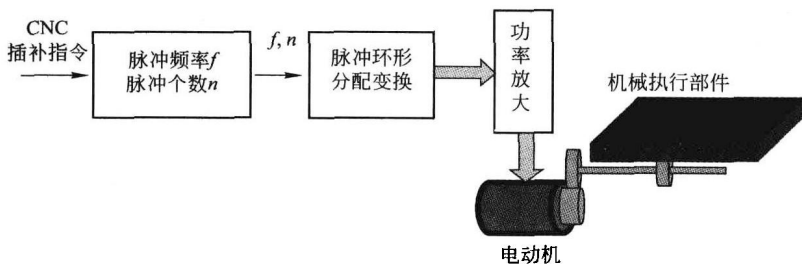


图 1-7 开环控制

开环控制具有结构简单和价格低廉等优点。但通常输出的扭矩值大小受到限制，而且当输入较高的脉冲频率时，容易产生丢步，难以实现运动部件的快速控制。开环控制对运动部件的实际位移量是不进行检测的，因而不能进行运动误差的校正和补偿，步进电动机的步距角误差、齿轮和丝杠组成的传动链误差都将直接影响加工零件的精度。目前，开环控制已不能充分满足数控机床日益提高的对控制功能、运动速度和加工精度的要求。但近年来随着步进电动机的细分技术的发展，出现了专用的细分功率驱动模块，步进电动机在低扭矩、高精度、速度中等的小型设备的驱动控制中仍然有很大的应用空间，特别是在微电子生产设备中充分发挥了它的独特优势。

2. 半闭环控制系统

半闭环控制系统如图1-8所示，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，与原输入指令位移值进行比较，用比较后的差值进行控制，补偿移动部件位移值，直到差值消除为止的控制系统。但半闭环控制系统并没有将运动部件的机械传动链包括在闭环控制之内，因此无法校正或消除机械传动链的误差。由于目前广泛采用的滚珠丝杠螺母机构具有很好的精度和精度保持性，而且采用了可靠的消除反向运动间隙的结构，完全可以满足绝大多数数控机床用户的需要。所以，在一般情况下，半闭环控制正在成为首选的控制方式被广泛采用。

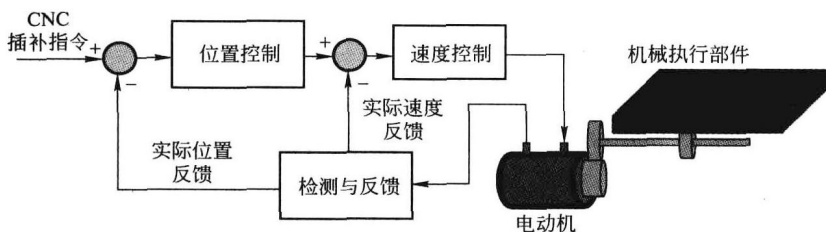


图 1-8 半闭环控制

3. 闭环控制系统

闭环控制系统如图 1-9 所示, 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进行位移补偿, 直到差值消除时才停止移动, 达到精确定位的控制系统。闭环控制的主要优点是将机械传动链的全部环节都纳入了闭环控制范围之内, 因而从理论上讲, 闭环控制的运动精度主要取决于检测装置的精度, 而与机械传动链的误差无关。因此, 其控制精度将超过半闭环系统, 这就为高精度数控机床提供了技术保障。但闭环控制不但价格昂贵, 而且对机床结构及传动链也要求较高, 传动链的刚度、间隙, 导轨的低速运动特性, 以及机床结构的抗振性等因素都会增加系统调试的困难, 甚至使伺服系统产生振荡, 降低其稳定性。

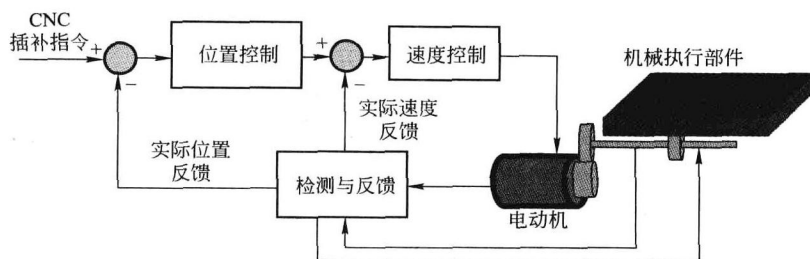


图 1-9 闭环控制

1.3.4 按数控系统的功能水平分类

可将数控机床分为高、中、低三档。这种分类方法尚没有一个确切定义, 但可以给人们一个清晰的概念。数控机床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决定。以下几个方面可作为评价数控机床档次的参考条件。

1) 分辨率和进给速度

分辨率为 $10\ \mu\text{m}$, 进给速度为 $8\sim 15\ \text{m/min}$ 为低档; 分辨率为 $1\ \mu\text{m}$, 进给速度为 $15\sim 24\ \text{m/min}$ 为中档; 分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$, 进给速度为 $15\sim 100\ \text{m/min}$ 为高档。

2) 多坐标联动功能

低档数控机床最多联动轴数为 $2\sim 3$ 轴, 中、高档则为 $3\sim 6$ 轴。

3) 显示功能

低档数控机床一般只有简单的数码管显示或简单的 CRT 字符显示。而中档的有较齐全的 CRT 显示和液晶显示, 不仅有字符, 而且还有图形、人机对话、自诊断等功能, 高档的则还有三维加工仿真显示等。

4) 通信功能

低档数控机床无通信功能, 中档数控机床有 RS-232 或 DNC (Direct Numerical Control, 直接数控或称群控) 接口。高档的有 MAP (Manufacturing Automatically Protocol, 制造自动化协议) 等高性能通信接口, 且具有联网功能。

5) 主 CPU (Control Processing Unit, 中央处理单元)

低档数控机床一般采用 8 位 CPU, 高档的已经由 26 位 CPU 发展到 32 位、64 位 CPU,