



高职高专“十一五”规划教材

数控加工工艺与编程

SHUKONG JIAGONG GONGYI YU BIANCHENG

熊显文 主 编

涂家海 李焱岚 副主编



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

数控加工工艺与编程

熊显文 主编

涂家海 李炽岚 副主编



化学工业出版社

·北京·

本教材从数控技术应用的角度,介绍了金属切削基础、数控刀具、数控加工工艺及机床夹具设计基础、数控车削加工工艺及编程、数控铣削加工工艺及编程、加工中心加工工艺及编程、数控电火花和数控线切割加工工艺等内容。本书进行了精心编排,内容丰富,理论联系实际,通俗易懂,实用性强。

本书可作为高等职业院校数控技术应用、机械制造及自动化等相关专业的专业课程教材,也可作为普通大专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院的选用教材,还可供相近专业师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工工艺与编程/熊显文主编. —北京:化学工业出版社, 2008.7

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-03238-6

I. 数… II. 熊… III. ①数控机床-加工工艺-高等学校:技术学院-教材②数控机床-程序设计-高等学校:技术学院-教材 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第099721号

责任编辑:高钰

文字编辑:李娜

责任校对:宋夏

装帧设计:史利平

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)

印装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张17 $\frac{3}{4}$ 字数462千字 2008年9月北京第1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: 29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

现代机械制造业正朝着以数控设备为主的生产方式转变，社会上急需具有数控加工工艺相关知识、又熟练掌握数控机床编程的应用型人才。

数控加工工艺是数控编程的基础，合理的工艺是保证数控加工质量、发挥数控机床效能的前提条件。本书从数控加工的实用角度出发，以机械制造中的工艺理论为基础，以掌握数控加工工艺及编程为目标，科学、优化的设计加工工艺和加工程序，充分发挥数控机床的特点，实现在数控加工中的优质、高产和低耗。

数控加工工艺与编程是数控技术应用专业和机电类专业的主要专业课之一。本书充分体现了应用型技术人才工程素质的培养要求，突出了职业教育的特点，着重工艺知识的讲授，培养学生从事数控加工的实际工作能力。本书介绍了金属切削基础、数控刀具、数控加工工艺、机床夹具设计、数控车削加工工艺及编程、数控铣削加工工艺及编程、加工中心加工工艺及编程、数控电火花和数控线切割加工工艺等内容。

本书的内容进行了精心编排，通俗易懂，内容丰富，理论联系实际，实用性强。本书可作为高职高专、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院数控技术应用专业、机电一体化专业的专业课程教材，或作为数控加工职业技能培训教材，也可供相近专业师生及有关工程技术人员参考。

全书由熊显文主编，涂家海、李炽岚任副主编。全文共分九章，第一章由熊显文、张柱银编写，第二章由廖翠姣、熊显文编写，第三章由李炽岚、涂家海、黎楠编写，第四章、第五章由熊显文、涂家海、李炽岚编写，第六章由雷波、熊宏编写，第七章由熊显文、姚建民、李兵华编写，第八章、第九章由周静、卢定军编写。

本书承湖南工业大学机械工程学院明兴祖教授主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中难免存在一些缺点和疏漏，恳请读者批评指正。

编者
2008年6月

目 录

第一章 数控加工技术基础	1	四、切削力	42
第一节 数控机床简介	1	五、切削热与切削温度	43
一、数控机床的产生与发展	1	第五节 刀具材料	44
二、数控机床的组成	2	一、刀具材料的基本要求	44
三、数控机床的分类	4	二、常用的刀具材料	45
四、数控机床的坐标系	6	三、数控刀具的特点	48
第二节 数控机床的指标和功能	9	第六节 刀具的磨损和耐用度	49
一、数控机床的指标	9	一、刀具磨损形态	49
二、数控机床的功能	11	二、刀具磨损的原因	50
第三节 数控加工原理、特点及应用范围 ..	12	三、刀具磨损过程	51
一、数控加工原理	12	四、刀具磨钝标准	51
二、数控加工的特点	14	五、刀具耐用度	52
三、数控加工的应用范围	14	第七节 切削用量与切削液的合理选择	52
第四节 数控加工程序编制基础	15	一、切削用量的选择原则	52
一、数控加工程序编制的内容与方法	15	二、切削用量的选择方法	53
二、程序编制的代码标准	16	三、冷却液的选择	54
三、NC程序的结构及格式	17	习题二	56
四、NC程序的常用功能字	20	第三章 数控加工工艺基础	57
第五节 数控加工技术的发展趋势	23	第一节 机械加工工艺规程概述	57
一、数控系统体系结构的发展趋势	23	一、生产过程与工艺过程	57
二、数控机床的发展趋势	24	二、机械加工工艺过程的组成	57
习题一	26	三、生产纲领和生产类型及其工艺特征 ..	59
第二章 金属切削知识	27	四、机械工艺规程制订的步骤及方法	61
第一节 金属切削概述	27	第二节 机械加工工艺规程的制订	62
一、金属切削运动	27	一、零件的工艺分析	62
二、加工过程形成的工件表面	28	二、零件毛坯的选择	63
第二节 金属切削要素	28	三、工艺路线设计	66
一、切削用量要素	28	四、工件定位基准的选择	71
二、切削层参数	30	五、机床设备和工艺装备的选择	77
第三节 金属切削刀具几何参数	32	六、时间定额的确定	78
一、切削部分的组成	32	七、切削用量的确定	79
二、刀具角度标注平面参考系	32	八、填写工艺文件	79
三、刀具的主要标注角度	33	第三节 加工余量的确定	80
四、典型车刀的刀具角度标注	34	一、加工余量的概念	80
五、刀具的工作角度	35	二、影响加工余量的因素	82
六、刀具角度的选择	36	三、加工余量的确定方法	83
七、其他几何参数的选择	38	第四节 工序尺寸及公差确定	84
第四节 金属切削过程及规律	39	一、基准重合时工序尺寸及公差的计算 ..	84
一、金属切削过程的变形区	39	二、基准不重合时工序尺寸及公差的	85
二、切屑的形成和种类	40	计算	85
三、积屑瘤	41	第五节 机械加工精度及表面质量	91

一、机械加工精度概念	91	习题五	161
二、影响加工精度的因素	92	第六章 数控铣床加工工艺及编程	163
三、机械加工表面质量	99	第一节 数控铣床概述	163
习题三	100	一、分类与结构特点	163
第四章 机床夹具设计基础	104	二、数控铣床的主要功能与加工范围	164
第一节 机床夹具概述	104	第二节 数控铣床的工艺分析与工艺	
一、机床夹具的定义	104	装备	167
二、机床夹具的组成	104	一、选择并确定数控铣削的加工部位及	
三、机床夹具的作用与分类	105	内容	167
四、数控加工夹具的特点	106	二、加工工序的划分	167
第二节 工件的定位方法与定位原理	107	三、选择走刀路线	168
一、工件获得定位的方法	107	四、对刀点和换刀点的选择	171
二、工件定位的基本原理	108	五、切削参数	172
第三节 常用定位方式和定位元件	111	六、数控铣床的工艺装备	172
一、常见定位方式	111	七、回转工作台和数控分度头	175
二、常见定位方案	113	八、量具	175
第四节 定位误差的分析和计算	117	第三节 数控铣床编程指令	175
一、定位误差的概念与类型	117	一、华中数控系统简述	175
二、定位误差的计算方法	118	二、华中数控 HNC-21M 的基本编程	
三、常见定位方式的定位误差	118	指令	176
第五节 工件的夹紧	120	第四节 简化编程指令	185
一、对夹紧装置的基本要求	120	一、镜像功能 G24、G25	185
二、对夹紧力方向和作用点的选择	121	二、缩放功能 G50、G51	186
三、常用夹紧方式	121	三、旋转变换 G68、G69	187
习题四	123	第五节 用户宏程序	189
第五章 数控车削工艺及编程	125	一、宏变量	189
第一节 数控车床简介	125	二、常量	190
一、概述	125	三、运算符	190
二、数控车削的主要加工对象	127	四、语句表达式	190
第二节 数控车削的加工工艺与工装	128	五、调用方式	190
一、选择并确定进行数控加工的内容	128	六、用户宏程序编制举例	191
二、确定加工方案	129	第六节 数控铣床编程实例	192
三、数控车床夹具的选择及常用装夹		一、平面样板零件的数控铣削编程	192
方式	130	二、槽形零件的数控铣削编程	192
四、切削用量的确定	131	三、平面凸轮的数控铣削编程	195
五、刀具的选择	133	习题六	197
第三节 数控车削的程序编制	137	第七章 加工中心加工工艺与编程	201
一、数控车床的编程特点	137	第一节 加工中心简介	201
二、车削数控系统功能	138	一、加工中心的分类与结构特点	201
三、数控车床坐标系及对刀	139	二、加工中心的主要功能	203
四、数控车削常用的指令	142	三、加工中心的主要加工对象	203
五、刀具补偿功能	145	第二节 加工中心的加工工艺与工装	204
六、数控车削循环指令	147	一、加工中心的工艺特点	205
七、螺纹车削编程	153	二、加工中心的工艺路线设计	205
八、子程序	157	三、加工中心的工步设计	206
第四节 数控车削加工实例	158	四、工件的定位与装夹	207

五、数控刀具系统·····	208	第一节 数控线切割机床加工原理、特点及 应用·····	249
六、加工中心的对刀与换刀·····	213	一、数控线切割机床加工的原理·····	249
第三节 加工中心的程序编制·····	215	二、数控线切割机床加工的特点·····	249
一、加工中心的编程要求·····	215	三、数控线切割机床加工的应用·····	250
二、换刀程序的编制·····	215	四、数控电火花线切割机床的分类和基本 结构·····	250
三、加工中心刀具长度补偿的方法·····	216	五、主要工艺指标·····	252
四、固定循环功能·····	217	第二节 影响数控线切割加工工艺指标的 主要因素·····	252
五、子程序的格式·····	224	一、电参数对工艺指标的影响·····	252
习题七·····	226	二、电极丝及其走丝速度对工艺指标 的影响·····	255
第八章 数控电火花加工工艺 ·····	229	三、零件厚度及材料对工艺指标的 影响·····	256
第一节 数控电火花加工的原理、特点和 适用范围·····	229	四、其他因素对工艺指标的影响·····	256
一、数控电火花加工原理·····	229	第三节 数控线切割加工工艺与工装·····	256
二、数控电火花加工特点·····	230	一、零件图纸的工艺分析·····	256
三、数控电火花的适用范围·····	231	二、编制和调试加工程序·····	258
第二节 数控电火花加工机床的组成 部分·····	231	三、电极丝的准备·····	259
一、主机及附件·····	231	四、零件的准备·····	260
二、脉冲电源·····	234	五、零件的装夹和位置校正·····	262
三、数控系统·····	235	六、加工前的准备·····	265
四、工作液循环过滤系统·····	236	七、切割加工·····	266
第三节 数控电火花加工的一般工艺 规律·····	237	八、零件的检验·····	266
一、影响加工速度的主要因素·····	237	第四节 数控线切割机床的基本编程 方法·····	267
二、影响加工精度的主要因素·····	240	一、ISO 格式编程·····	267
三、影响电火花加工表面质量的工艺 因素·····	241	二、3B 格式编程·····	269
四、影响电极损耗的主要因素·····	242	第五节 数控电火花线切割加工实例·····	271
第四节 数控电火花成形机床的加工工艺 及实例·····	243	习题九·····	274
一、数控电火花成形机床加工的工艺·····	243	参考文献 ·····	275
二、数控电火花成形加工实例·····	247		
习题八·····	247		
第九章 数控线切割加工工艺 ·····	249		

第一章 数控加工技术基础

第一节 数控机床简介

一、数控机床的产生与发展

1. 数控机床的产生背景

随着科学技术和社会生产的不断发展，人们对机械产品的质量和生产率提出了越来越高的要求，而机械加工过程的自动化是实现上述要求的有效途径。

从工业革命以来人们实现机械加工自动化的手段有：自动机床、组合机床和专用自动生产线。这些设备的使用大大地提高了机械加工自动化的程度，提高了劳动生产率，促进了制造业的发展。但它也存在着初始投资大、准备周期长和柔性差等固有缺点。因此，上述方法仅适用于批量较大的零件生产。然而，随着市场竞争的日趋激烈，产品更新换代周期缩短，批量大的产品越来越少，而小批量产品所占的比重越来越大，约占总加工量的 80% 以上，在航空、航天、重型机床以及国防部门尤其如此。因此，迫切需要一种精度高、柔性好的加工设备来满足这种需求，这是机床数控技术产生和发展的内在动力。另一方面，电子技术、计算机技术以及控制技术等的飞速发展则为数控机床的进步提供了坚实的技术基础，这使机床数控技术的产生和发展成为可能。数控技术正是在这种背景下诞生和发展起来的。它为小批量、精密复杂的零件生产提供了极其有效的自动化加工手段。它的产生给自动化技术带来了新的概念，推动了加工自动化技术的发展，是机械制造业一个划时代的里程碑。

2. 数控加工技术发展历程

数控加工技术是 20 世纪 40 年代后期为适应加工复杂外形零件而发展起来的一种自动化加工技术，其研究起源于飞机制造业。1947 年，美国帕森斯 (Parsons) 公司为了精确地制作直升机机翼、桨叶和飞机框架，提出了用数字信息来控制机床自动加工外形复杂零件的想法，他们利用电子计算机对机翼加工路径进行数据处理，并考虑到刀具直径对加工路径的影响，使加工精度达到 $\pm 0.0015\text{in}$ (0.0381mm)，这在当时的水平来看是相当高的。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，与美国帕森斯 (Parsons) 公司和麻省理工学院 (MIT) 合作，于 1952 年研制出了世界上第一台三坐标数控机床，可控制铣刀进行连续空间曲面的加工，揭开了数控加工技术的序幕。1955 年，在 Parsons 专利的基础上，第一台工业用 NC 机床由美国 Bendix 公司生产出来，这是一台实用性的 NC 机床。

为了便于后面的讨论，下面给出数控技术 (Numerical Control Technology)、数控系统 (Numerical Control System)、计算机数控系统 (Computer Numerical Control, 简称 CNC) 和数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 几个概念的定义：数控技术是指用数字、字母和符号对某一工作过程进行可编程自动控制的技术；数控系统是指实现数控技术相关功能的软硬件模块的有机集成系统，它是数控技术的载体；计算机数控系统是指以计算机为核心的数控系统；数控机床是指应用数控技术对加工过程进行控制的机床。

从 1952 年至今，NC 机床按 NC 系统的发展经历了如下五代。

第一代 1955 年，NC 系统以电子管组成，体积大，功耗大。

第二代 1959 年，NC 系统以晶体管组成，广泛采用印刷电路板。

第三代 1965 年，NC 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，性能进一步提高。

第四代 1970 年，NC 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，首次出现在 1970 年美国芝加哥国际机床展览会上。它具有价格低、可靠性高和功能多等特点。

第五代 1974 年，NC 系统以微处理器为核心，不仅价格进一步降低，而且体积进一步缩小，使实现真正意义上的机电一体化成为可能。现在市场上 NC 系统都是以微处理器为核心的系统，但 NC 系统的性能随着 CPU 的不断升级而不断提高。这一代又可细分为六个发展阶段。

① 1974 年系统以位片式微处理器为核心，有字符显示，有自诊断功能。

② 1979 年系统采用显示器显示，超大规模集成电路（VLIC），大容量磁泡存储器，可编程接口和遥控接口等。

③ 1981 年具有人机对话功能，动态图形显示，实时精度补偿。

④ 1986 年数字伺服控制诞生，交、直流电机进入实用阶段。

⑤ 1988 年采用高性能的 32 位机作为主机的主从结构系统。

⑥ 1994 年基于 PC 的 NC 系统诞生，使 NC 系统的研究开发进入了开放型、柔性化的新时代，新型 NC 系统的开发周期日益缩短。可以说它是数控技术发展的又一个里程碑。

二、数控机床的组成

数控机床主要由以下几个部分组成，如图 1-1 所示。

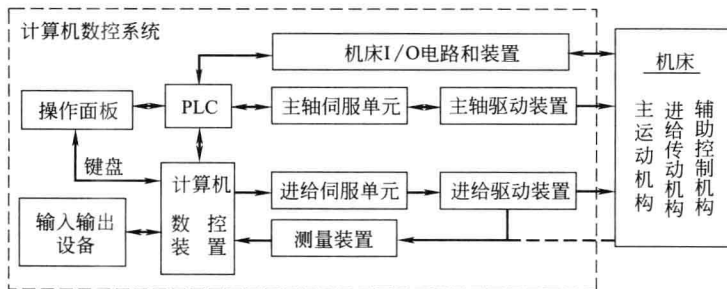


图 1-1 数控机床的组成

1. 控制面板

控制面板又称操作面板，是操作人员与数控机床（系统）进行信息交互的工具，操作人员可以通过它对数控机床（系统）进行操作、编程、调试或对机床参数进行设定和修改，也可通过它了解或查询数控机床（系统）的运行状态。它是数控机床的一个输入输出部件，主要由按钮站、状态灯、按键阵列（功能与计算机键盘一样）和显示器等部分组成，如图 1-2 所示。

2. 控制介质与程序输入输出设备

控制介质是记录零件加工程序的媒介，是人与机床建立联系的介质。程序输入输出设备是 CNC 系统与外部设备进行信息交互的装置，其作用是将记录在控制介质上的零件加工程序输入 CNC 系统，或将已调试好的零件加工程序通过输出设备存放或记录在相应的介质上。早期的数控系统使用穿孔纸带、磁带作为控制介质，现代数控系统已基本不使用，现代数控系统常用的控制介质和程序输入输出设备是磁盘和磁盘驱动器。

除此之外，还可采用通讯方式进行信息交换，现代数控系统一般都具有利用通信方式进

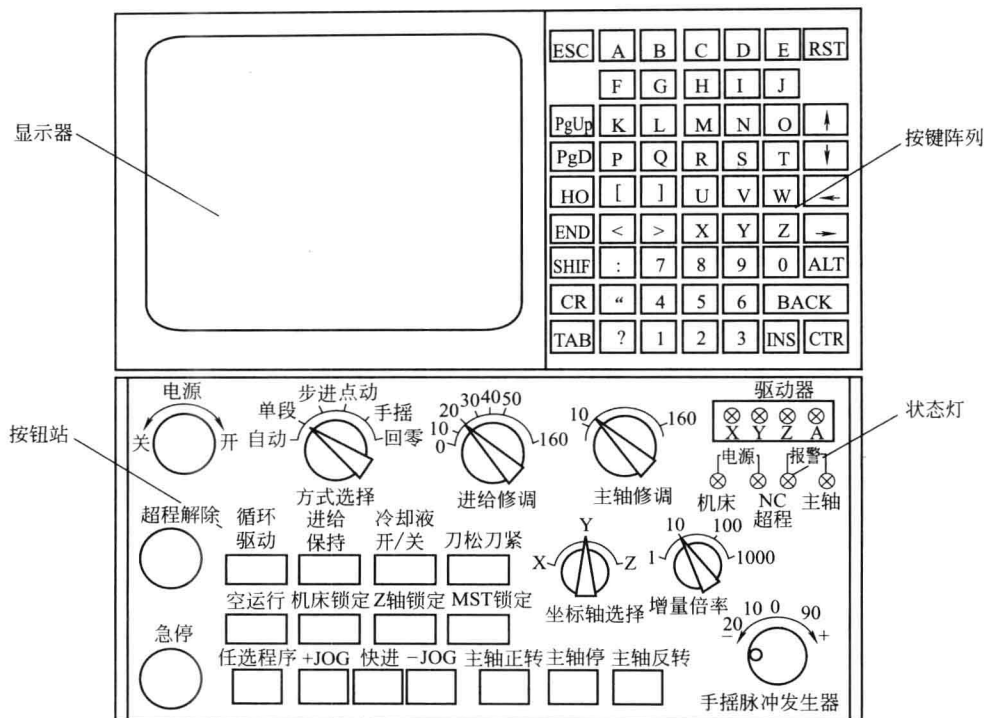


图 1-2 操作面板

行信息交换的能力。这种方式是实现 CAD（计算机辅助设计）/CAM（计算机辅助制造）的集成、FMS（柔性制造系统）和 CIMS（计算机集成制造系统）的基本技术。目前在数控机床上常用的通信方式有：

- ① 串行通信（RS232 等串口）；
- ② 自动控制专用接口和规范（直接数字控制 DNC 方式、制造自动化协议 MAP 等）；
- ③ 网络技术（Internet、局域网 LAN 等）。

3. 计算机数控装置（或 CNC 单元）

计算机数控装置是计算机数控系统的核心。其主要作用是根据输入的零件加工程序或操作命令进行相应的处理（如运动轨迹处理、机床输入输出处理等），然后输出控制命令到相应的执行部件（伺服单元、驱动装置和 PLC 等），完成零件加工程序或操作者所要求的操作。所有这些都是 CNC 装置协调控制、合理组织下，使整个系统有条不紊地工作。它主要由计算机系统、位置控制板、PLC 接口板、通信接口板、扩展功能模块以及相应的控制软件等模块组成。

4. 伺服单元、驱动装置和测量装置

伺服单元和驱动装置包括主轴伺服驱动装置、主轴电动机、进给伺服驱动装置及进给电动机。测量装置是指位置和速度测量装置，它是实现速度闭环控制（主轴、进给）和位置闭环控制（进给）的必要装置。主轴伺服系统的主要作用是实现零件加工的切削运动，其控制量为速度。进给伺服系统的主要作用是实现零件加工的成形运动，其控制量为速度和位置。能灵敏、准确地跟踪 CNC 装置的位置和速度指令是它们的共同特点。

* 5. PLC、机床 I/O（输入/输出）电路和装置

PLC 是用于完成与逻辑运算、顺序动作有关的 I/O 控制，它由硬件和软件组成。机床 I/O 电路和装置是用于实现 I/O 控制的执行部件，是由继电器、电磁阀、行程开关、接触器

等组成的逻辑电路。它们共同完成以下任务：

① 接受 CNC 的 M、S、T 指令，对其进行译码并转换成对应的控制信号，控制辅助装置完成机床相应的开关动作；

② 接受操作面板和机床的 I/O 信号，送给 CNC 装置，经其处理后，输出指令控制 CNC 系统的工作状态和机床的动作。

6. 机床本体

机床本体是数控系统的控制对象，是实现加工零件的执行部件。它主要由主运动部件（主轴、主运动传动机构）、进给运动部件（工作台、拖板及相应的传动机构）、支承件（立柱、床身等）以及特殊装置、自动工件交换（APC）系统、自动刀具交换（ATC）系统和辅助装置（如冷却、润滑、排屑、转位和夹紧装置等）组成。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动结构和变速系统较为简单，在精度、刚度、抗振性等方面则要求较高。

三、数控机床的分类

数控机床经过四十多年的发展，规格、型号繁多，其品种已达数千种，结构和功能也各具特色。从不同的技术或经济指标出发，可以对数控机床进行各种不同的分类。由于国内、外还无统一的分类方法，以下仅根据国内常用的几种方法对数控机床进行分类。

（一）按机床的工艺用途分类

1. 切削加工类

具有切削加工功能的数控机床。如数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心、数控齿轮加工机床、柔性制造单元（FMC）等。

2. 成型加工类

具有通过物理方法改变工件形状功能的数控机床。如数控折弯机、弯管机等。

3. 特种加工类

具有特种加工功能的数控机床。如数控线切割机床、电火花加工机床、激光加工机床等。

4. 其他类型

一些广义上的数控装备。如数控装配机、数控测量机、机器人等。

（二）按控制功能分类

1. 点位控制数控机床

这类数控机床仅能控制两个坐标轴带动刀具相对于工件运动，从一个坐标位置快速移动到下一个坐标位置，然后控制第三个坐标轴进行钻、镗切削加工。它具有较高的位置定位精度，为了提高生产效率，定位运动采用数控系统设定的最高进给速度，在移动过程中不进行切削加工，因此对运动轨迹没有要求。点位控制的数控机床用于加工平面内的孔系，这类机床主要有数控钻床、印刷电路板钻孔机、数控镗床、数控冲床、三坐标测量机等。现在仅仅具有点位控制功能的数控机床已不多见。

2. 直线控制数控机床

这类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调节。如：早期简易的两坐标轴数控车床，可用于加工台阶轴；简易的二坐标轴数控铣床，可用于平面的铣削加工；现代组合机床采用数控进给伺服系统，驱动动力头带着多轴箱轴向进给进行钻、镗削加工，它也可以算作一种直线控制的数控机床。现在仅仅具有直线控制功能的数控机床也已不多见。

3. 轮廓控制数控机床

这类数控机床具有控制几个坐标轴同时协调运动，即多坐标轴联动的能力，使刀具相对

于工件按程序规定的轨迹和速度运动。能在运动过程中进行连续切削加工，可实现联动加工是这类数控机床的本质特征，这类数控机床有用于加工曲线和曲面形状零件的数控车床、数控铣床、加工中心等。现代的数控机床基本上都是这种类型。若根据其联动轴数还可细分为二轴、三轴、四轴、五轴联动数控机床，联动坐标轴数越多，加工程序的编制就越难，通常三轴联动以上的零件加工程序只能采用自动编程系统编制。

（三）按进给伺服系统类型分类

按进给伺服系统有无位置测量装置可分为开环数控机床和闭环数控机床，在闭环数控系统中根据位置测量装置安装的位置不同又可分为全闭环和半闭环两种。

1. 开环数控机床

开环数控机床采用开环进给伺服系统。图 1-3 所示为开环进给伺服系统简图。由图可知，开环进给伺服系统没有位置测量装置，信号流是单向的（数控装置—进给系统），故系统稳定性好。但由于无位置反馈，精度相对闭环系统来讲要低，其精度主要取决于伺服驱动系统和机械传动机构的性能和精度。该系统一般以步进电机作为伺服驱动元件。它具有结构简单、工作稳定、调试方便、维修简单、价格低廉等优点，在精度和速度要求不高、驱动力矩不大的场合得到广泛应用。一般用于经济型数控机床和旧机床的数控化改造。

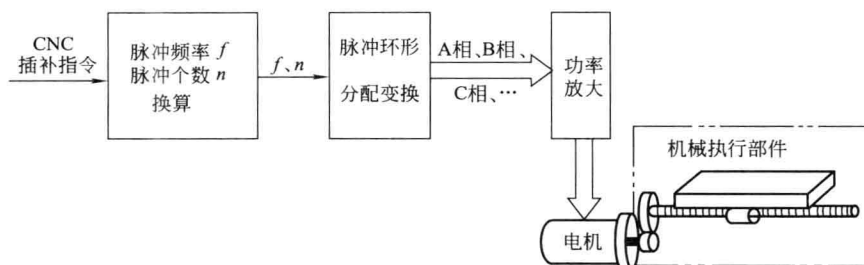


图 1-3 开环进给伺服系统

2. 半闭环数控机床

半闭环数控机床的进给伺服系统如图 1-4 所示，半闭环数控系统的位置检测点是从驱动电机（常用交、直流伺服电机）或丝杠端引出，通过检测电机和丝杠转角来间接检测工作台的位移量，而不是直接检测工作台的实际位置。由于在半闭环环路内不包括或只包括少量机械传动环节，因此可获得较稳定的控制性能，其系统稳定性虽不如开环系统，但比闭环系统好。在位置环内各组成环节的误差可得到某种程序的纠正，但不能消除位置环外的各环节误差（如丝杠的螺距误差、齿轮间隙引起的运动误差）。可通过软件补偿这类误差来提高运动精度。总之，它的精度比开环好，比闭环差，还具有结构简单、调试方便等特点，因而在现代 CNC 机床中得到了广泛应用。

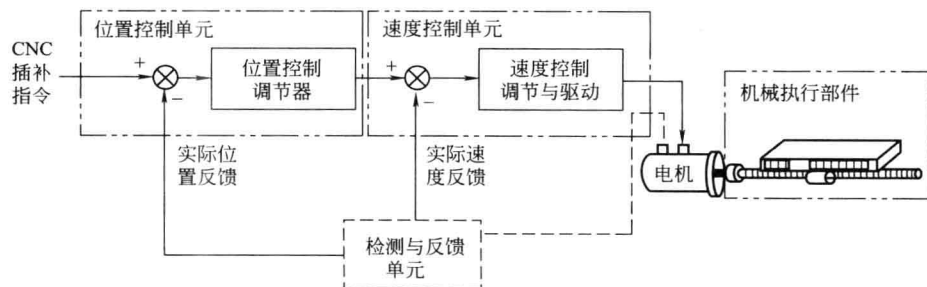


图 1-4 半闭环进给伺服系统

3. 闭环数控机床

闭环进给伺服系统的位置检测点如图 1-5 所示，它直接对工作台的实际位置进行检测。从理论上讲，可以消除整个驱动和传动环节的误差、间隙和失动量，具有很高的位置控制精度。但由于位置环内的许多机械传动环节的摩擦特性、刚性和间隙都是非线性的，很容易造成系统不稳定。因此，闭环系统的设计、安装和调试都有相当的难度，故该系统对其组成环节的精度、刚性和动态特性等都有较高的要求，且价格昂贵。这类系统主要用于精度要求很高的镗铣床、超精车床、超精磨床以及较大型的数控机床等。

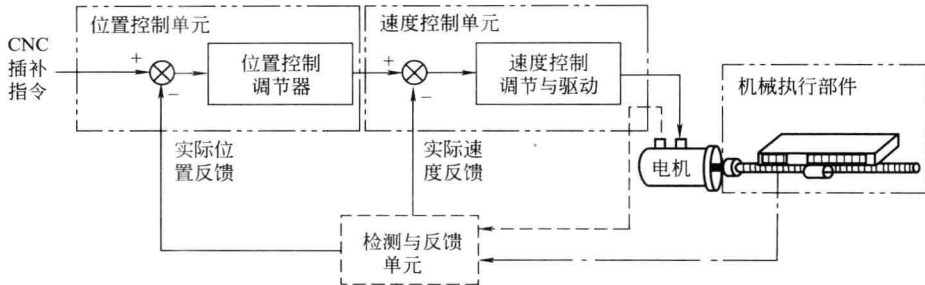


图 1-5 闭环进给伺服系统

四、数控机床的坐标系统

数控机床的坐标系统，包括所有实际存在的机床轴。机床上的参考点、刀具和托盘的交换点（机床上的固定点）都是由机床坐标系确定的。为了使数控系统规范化、标准化、开放化及简化数控编程，国际标准化组织 ISO 对数控机床的坐标系统做了统一规定，即 ISO 841 标准。我国于 1982 年颁布了 JB 3051—1982《数控机床的坐标系和运动方向的命名》标准，对数控机床的坐标和运动方向作了明确规定，该标准与 ISO 841 标准等效。

（一）标准坐标系和运动方向

标准坐标系采用右手直角笛卡儿定则。基本坐标轴为 X 、 Y 、 Z 直角坐标系，相应每个坐标轴的旋转坐标分别为 A 、 B 、 C ，如图 1-6 所示。

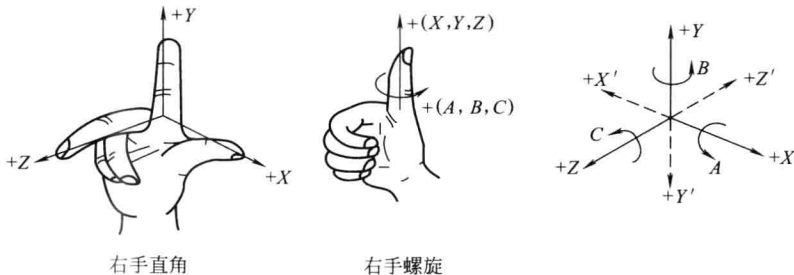


图 1-6 右手直角笛卡儿坐标系

机床坐标系的基本坐标轴 X 、 Y 、 Z 的关系及其正方向用右手直角定则判定，围绕 X 、 Y 、 Z 各轴的回转运动及其正方向 $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$ 也分别用右手螺旋定则判定。与 $+X$ 、 $+Y$ 、 $+Z$ 、 $+A$ 、 $+B$ 、 $+C$ 相反的方向相应用带“'”的 $+X'$ 、 $+Y'$ 、 $+Z'$ 、 $+A'$ 、 $+B'$ 、 $+C'$ 表示。

由于数控机床的各坐标轴既可以是刀具相对于工件运动，也可以是工件相对于刀具运动，所以 ISO 标准规定：

① 不论机床的具体结构是工件静止、刀具运动，或是工件运动、刀具静止，在确定坐标系时，一律看作是刀具相对静止的工件运动；

② 机床的直线坐标轴 X、Y、Z 的判定顺序是先 Z 轴，再 X 轴，最后按右手定则判定 Y 轴；

③ 坐标轴名 (X、Y、Z、A、B、C) 不带 “'” 的表示刀具运动，带 “'” 的表示工件运动，如图 1-6 所示；

④ 增大工件与刀具之间距离的方向为坐标轴正方向。

(二) 坐标轴的判定方法和步骤

1. Z 轴的定义

Z 坐标的运动由传递切削力的主轴决定，与主轴轴线平行的坐标轴即为 Z 轴。如图 1-7~图 1-12 所示。如果机床有一系列主轴，则选垂直于工件装夹面的主要轴为 Z 轴，没有主轴（如牛头刨床），Z 轴垂直于工件装夹面。

Z 轴的正方向为刀具远离工件的方向。如在钻床加工中，钻入工件的方向为 Z 坐标的负方向，退出方向为正方向。

2. X 轴的定义

X 轴是水平的，平行于工件的装夹面，且垂直于 Z 轴。

对于工件旋转的机床（如车床、磨床或车削加工中心），垂直于工件旋转轴线的方向为 X 轴，而主刀架上刀具离开工件旋转中心的方向为 X 坐标正方向，如图 1-7、图 1-8 所示。

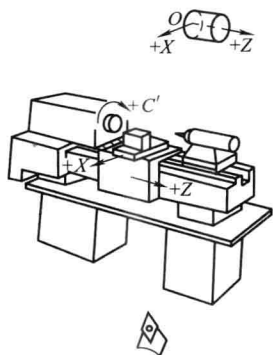


图 1-7 卧式车床坐标系（前刀架）

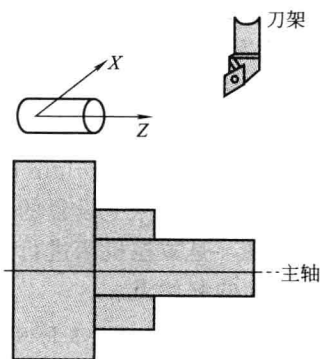


图 1-8 卧式车床坐标系（后刀架）

对于刀具旋转的机床（如铣床、钻床、镗床或镗铣加工中心），若 Z 轴为垂直的（立式机床），则由主轴向立柱方向看，X 轴正方向向右，如图 1-9 所示；若 Z 轴为水平的（卧式机床），则由主轴向工件方向看，X 轴正方向向右，如图 1-10 所示。

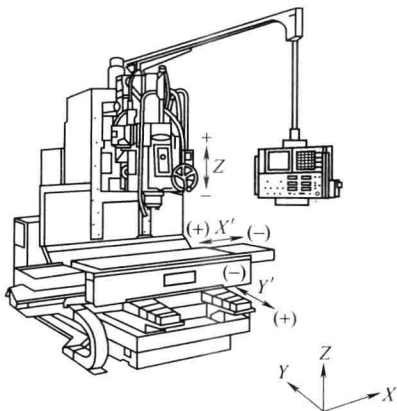


图 1-9 数控立式铣床坐标系

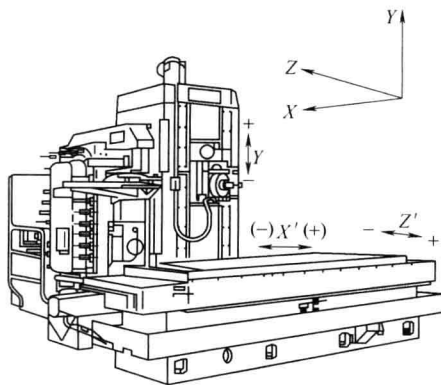


图 1-10 立柱移动式数控铣削中心

3. Y 轴的定义

Y 轴及其正方向应根据已经确定的 X 轴和 Z 轴，按右手直角笛卡儿定则进行判断。

4. 旋转轴的定义

机床绕坐标轴 X、Y、Z 旋转的运动，分别用 A、B、C 表示，它们的正方向按右手螺旋定则确定。判别实例如图 1-11、图 1-12 所示。

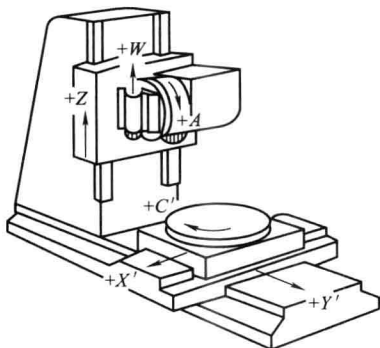


图 1-11 立式五轴数控铣床的坐标轴

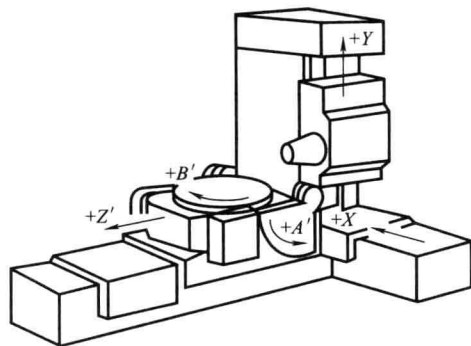


图 1-12 卧式五轴数控铣床的坐标轴

5. 附加坐标轴定义

X、Y、Z 为主坐标系或称为第一坐标系，如果还有平行于它们的第二坐标系和第三坐标系，可分别指定为 U、V、W 和 P、Q、R。

(三) 机床原点、机床参考点与机床坐标系

1. 机床原点 (machine origin 或 home position)

机床原点是数控机床上设置的一个固定点，即机床坐标系的原点。它在机床装配、调试时就已确定下来，是数控机床进行加工运动的基准参考点，使机床与控制系统同步，建立测量机床运动坐标的起始点。

2. 机床参考点 (reference point)

机床参考点是机床制造商在机床上用行程开关设置的一个物理位置，与机床原点的相对位置是固定的，机床参考点的位置是在机床出厂之前由机床制造商在每个进给轴上用限位开关精确测量调整好的，参考点相对于机床原点的坐标值已输入数控系统中记忆。参考点一般设定在各坐标轴的正方向最大极限位置处。特别要注意的是，是先设定了参考点，然后才定义了机床原点，故机床参考点是用于对机床运动进行检测和控制的基准点。

数控机床开机后，首先要进行返回参考点的操作，以此来建立机床坐标系。参考点可以与机床零点重合，也可以不重合。

(四) 工件坐标系与加工坐标系

工件坐标系是编程人员在编程时相对工件建立的坐标系，它只与工件有关，而与机床坐标系无关。但考虑到编程的方便性，工件坐标系中各轴的方向应该与所使用的数控机床的坐标轴方向一致。通常编程人员会选择某一满足编程要求，且使编程简单、尺寸换算少和引起的加工误差小的已知点为原点，即编程原点（或称工件原点）。编程原点应尽量选择在零件的设计基准或工艺基准上。

在程序开头就要设置工件坐标系，大多数的数控系统可用 G92 指令建立工件坐标系，或用 G54~G59 指令选择工件坐标系。工件坐标系一旦建立便一直有效，直到被新的工件坐标系所取代。

当零件在机床上被装夹好后，相应的编程原点在机床坐标系中的位置就成为加工原点，

也称为程序原点。由程序原点建立起的坐标系就是加工坐标系。

因此,编程人员在编制程序时,只要根据零件图样就可以选定编程原点,建立工件坐标系、计算坐标数值,而不必考虑工件在机床上的实际位置。对加工人员来说,则应在装夹工件、调试程序时,确定加工原点的位置,并在数控系统中给予设定(即给出原点设定值),这样数控机床才能按照准确的加工坐标系位置开始加工。

第二节 数控机床的指标和功能

一、数控机床的指标

(一) 规格指标

规格指标是指数控机床的基本能力指标,主要有以下几方面。

1. 行程范围

坐标轴可控的运动区间,它反映该机床允许的加工空间。一般情况下工件轮廓尺寸应在加工空间的范围之内,个别情况下工件轮廓可大于机床的加工范围,但工件的加工区域必须小于加工空间。

2. 工作台面尺寸

它反映该机床安装工件的最大范围,通常应选择比最大加工工件稍大一点的面积,这是因为要预留夹具所需的空

3. 承载能力

它反映该机床能加工零件的最大重量。

4. 主轴功率和进给轴扭矩

它反映该机床的加工能力,同时也间接反映机床的刚度和强度。

5. 控制轴数和联动轴数

数控机床的控制轴数通常是指机床数控装置能够控制的进给轴数,现在有的数控机床生产厂家也认为控制轴数包括所有的运动轴,即进给轴、主轴、刀库轴等。数控机床控制轴数与数控装置的运算处理能力、运算速度及内存容量等有关。联动轴数是指数控机床同时控制的进给轴数目。它反映数控机床的曲面加工能力。

(二) 精度指标

1. 几何精度

它是综合反映机床的关键零部件及其在总装后的形位误差的指标。该指标可分为两类:第一类是对机床的基础件和运动大件(如床身、立柱、工作台、主轴箱等)的直线度、平面度、垂直度的要求,如工作台的平面度、各坐标轴运动方向的直线度和相互垂直度、相关坐标轴运动时工作台面和T形槽侧面的平行度等;第二类是对机床执行切削运动的主要部件——主轴的要求,如主轴的轴向窜动、主轴孔的径向跳动、主轴箱移动导轨与主轴轴线的平行度、主轴轴线与工作台面的垂直度(立式)或平行度(卧式)等。

2. 位置精度

它是综合反映机床各运动部件在数控系统的控制下空载所能达到的精度。根据各轴能达到的位置精度,就能判断出工件所能达到的精度。这类指标主要有以下几项。

(1) 定位精度 它是指数控机床的移动部件沿某一坐标轴运动时实际位置与指令位置相符合的程度,其误差称为定位误差。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。它将直接影响零件的加工精度。

(2) 重复定位精度 它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, 所得到结果的一致程度。重复定位精度受伺服系统特性、进给传动环节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, 是一项非常重要的精度指标。

(3) 分度精度 它是指分度工作台在分度时指令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。

(4) 回零精度 它是指数控机床各坐标轴达到规定零点的精度, 其误差称为回零误差。同定位误差一样, 回零误差包括整个进给伺服系统的误差。它将直接影响机床坐标系的建立精度。

(三) 性能指标

1. 最高主轴转速和最大加速度

最高主轴转速是指主轴所能达到的最高转速, 它是影响零件表面加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素之一。最大加速度是反映主轴提速能力的性能指标, 也是加工效率的重要指标。

2. 最高快移速度和最高进给速度

最高快移速度是指进给轴在非加工状态下的最高移动速度, 最高进给速度是指进给轴在加工状态下的最高移动速度, 它们也是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。这两个性能指标受数控装置的运算速度、机床动态特性及工艺系统刚度等因素的限制。

3. 分辨率与脉冲当量

对测量系统而言, 分辨率是可以测量的最小增量; 对控制系统而言, 分辨率是可以控制的最小位移增量。数控装置每发出一个脉冲信号, 反映到机床移动部件上的移动量, 通常称为脉冲当量。脉冲当量是设计数控机床的原始数据之一, 其数值的大小决定数控机床的加工精度和表面质量。脉冲当量越小, 数控机床的加工精度和加工表面质量越高。

另外, 还有换刀速度和工作台交换速度, 它们也是影响生产效率的性能指标。

(四) 可靠性指标

1. 平均无故障时间 $MTBF$ (Mean time between failures)

它是指一台数控机床在使用中两次故障间隔的时间, 即数控机床在寿命范围内总工作时间和总故障次数之比, 即

$$MTBF = \frac{\text{总工作时间}}{\text{总故障次数}}$$

很显然, 平均无故障时间越长越好。

2. 平均修复时间 $MTTR$ (Mean time to restore)

它是指一台数控机床从开始出现故障直到能正常工作所用的平均修复时间, 即

$$MTTR = \frac{\text{总故障停机时间}}{\text{总故障次数}}$$

考虑到实际系统出现故障总是难免的, 故对于可维修的系统, 总希望一旦出现故障, 修复的时间越短越好, 即希望 $MTTR$ 越短越好。

3. 平均有效度 A

如果把 $MTBF$ 看作设备正常工作的时间, 把 $MTTR$ 看作设备不能工作的时间, 那么正常工作时间与总时间之比称为设备的平均有效度 A , 即

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

平均有效度反映了设备提供正确使用的能力, 是衡量设备可靠性的一个重要指标。