

数控加工工艺 及实例详解

李体仁 等编著

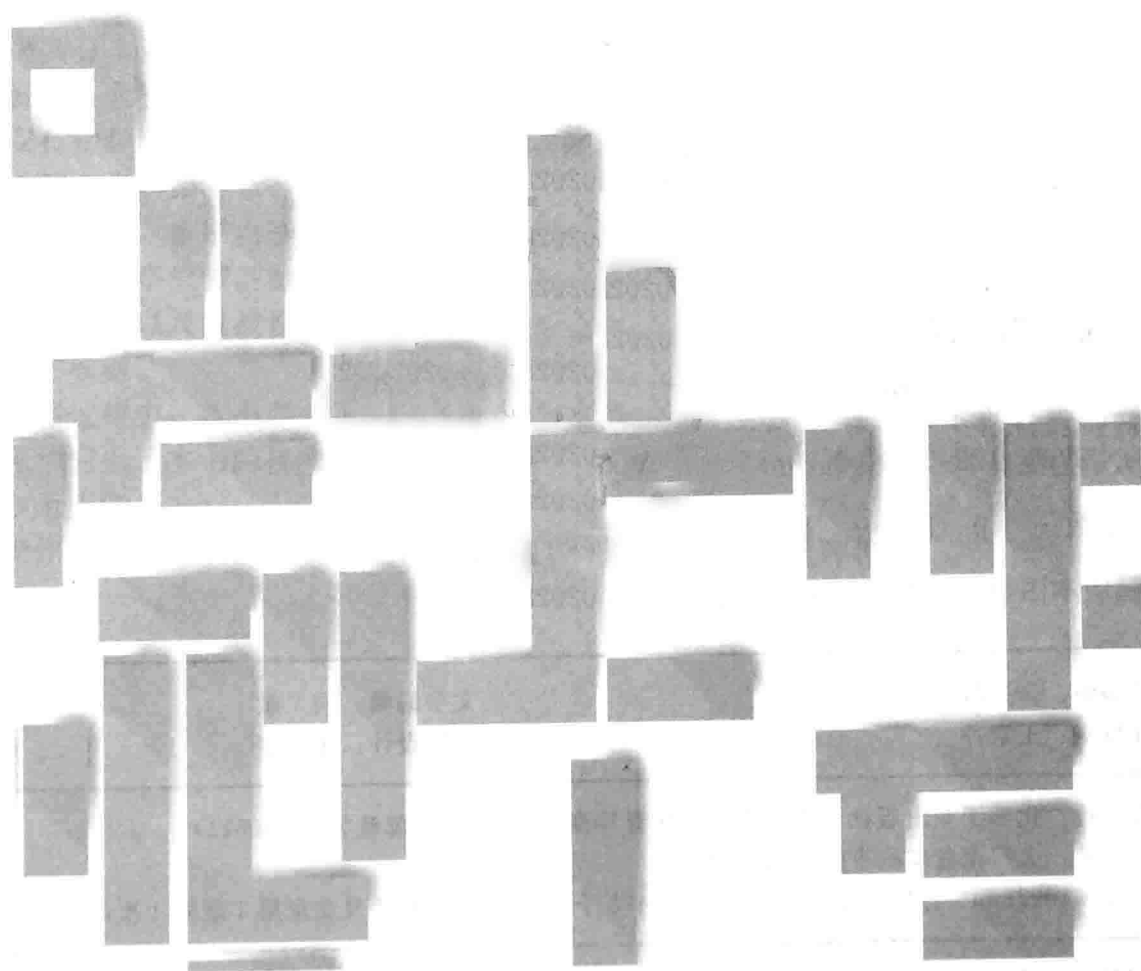
SHUKONG JIAGONG GONGYI
JI SHILI XIANGJIE



化学工业出版社

数控加工工艺 及实例详解

李体仁 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书围绕数控加工所涉及的机床、刀具、夹具、量具、工艺设计、工艺文件、数控车削、铣削、加工中心、高速切削工艺以及典型零件的数控加工工艺等内容,由浅入深,通过实例分析详细讲解,实用性强。书中融入了德国数控职业教育的经验和典型实例分析,有较强的先进性和实用性。本书收集、制作了国内外知名刀具、机床制造厂家的典型加工视频,方便读者学习。

本书可供数控加工技术人员学习和参考,也可作为机械设计制造及自动化专业本科生的教材,以及机械设计制造及自动化专业高职、电大、自考、网教学生的教材和其他机械类专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工工艺及实例详解/李体仁等编著. —北京:化学工业出版社, 2014. 3
ISBN 978-7-122-19691-0

I. ①数… II. ①李… III. ①数控机床-加工 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 020285 号

责任编辑:张兴辉
责任校对:王素芹

文字编辑:闫敏
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 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张19¼ 字数478千字 2014年7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: 69.00 元

版权所有 违者必究

前言

为适应数字化制造发展的要求，我们编写了数控加工技术应用实例详解系列教材，本书是继《数控手工编程技术实例详解——FANUC 系统》、《数控手工编程技术实例详解——西门子系统》之后的数控加工工艺部分，继承了前两本书的特点。

本书作者常年从事数控加工和教学工作，具有多年的企业数控加工实践经验，多次在德国进修，并作为访问学者在德国的西门子公司、二元制学校学习、交流。

本书依托陕西科技大学与德国乌泊塔尔工商会实训中心、德国凯勒数控软件公司共同构建的中德工程教育培训平台，依托陕西科技大学数控技术应用专业国家级职业学校骨干教师培训基地，依托陕西科技大学数控加工与编程技术省级精品课程，从培养数控加工的专业基础知识和专业技术实际应用能力出发编写而成。

本书收集、制作了国内外知名刀具、机床制造厂家的典型加工视频，以期体现现代数控加工的新技术、新工艺、新方法，供读者下载学习使用。<http://pan.baidu.com/s/1pJLkYy3> 发送邮件至 zxh@cip.com.cn 索取。

本书共分 7 章，内容包括数控技术及数控加工、数控加工切削基础、工件的装夹、数控加工工艺设计、数控车削加工工艺、数控铣削加工工艺、高速切削工艺。

西安技师学院李佳、王永强编著第 1 章，陕西科技大学丁萍编著第 2 章，陕西科技大学李体仁编著第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章，陕西省机电工程学校岳魏、陕西航空工业学校郝芬芬编著第 7 章，本书由李体仁负责统稿。

本书可供从事机械制造的工程技术人员学习和参考，也可作为机械设计制造及自动化专业本科生的教材，以及机械设计制造及自动化专业高职、电大、自考、网教学生的教材和其他机械类专业的教材。

在编写过程中，本书参考了大量国内、外公司的资料，编者在此表示衷心的感谢。吴怡秀、任振华完成了本书的视频和动画模拟制作，在此表示衷心的感谢，对本书提供帮助的同仁也一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 数控技术及数控加工

1.1 计算机数控技术	1	1.5 数控机床坐标系	8
1.2 数控加工技术	2	1.5.1 数控机床坐标系的规定	8
1.2.1 数控加工	2	1.5.2 机床原点与参考点	9
1.2.2 数控编程技术	2	1.5.3 工件坐标系	10
1.3 数控机床的组成与工作原理	2	1.6 加工中心	10
1.3.1 数控机床的组成	2	1.6.1 加工中心的分类	10
1.3.2 数控机床的工作原理	4	1.6.2 车削加工中心	12
1.3.3 数控机床的分类	4	1.6.3 复合加工中心	13
1.4 数控机床的主要性能指标	6	1.6.4 五轴联动加工中心	13
1.4.1 精度性能指标	6	1.6.5 加工中心特点	13
1.4.2 运动性能指标	7	1.7 数控加工编程	17
1.4.3 功能指标	7	1.7.1 程序的构成	17
1.4.4 其他性能指标	7	1.7.2 刀具补偿	20

第 2 章 数控加工切削基础

2.1 切削运动和切削用量	22	2.6.2 刀具的破损	39
2.1.1 主运动和进给运动	22	2.6.3 刀具耐用度和刀具寿命	39
2.1.2 加工表面	22	2.7 数控刀具材料和标准	40
2.1.3 切削用量	22	2.7.1 数控刀具材料	40
2.1.4 切削层参数	23	2.7.2 涂层刀具材料	43
2.2 刀具的几何角度	24	2.7.3 硬切削材料分类代号	45
2.2.1 车刀的组成	24	2.7.4 主要制造商硬切削材料对照	46
2.2.2 刀具静止参考系及其坐标平面	24	2.8 机夹可转位刀具	49
2.2.3 刀具静止角度的标注	24	2.8.1 可转位刀片的代码及其标记方法	49
2.2.4 刀具的工作角度	27	2.8.2 可转位刀片的夹紧方式	49
2.3 金属切削过程的基本规律	28	2.9 数控刀具系统	53
2.3.1 切削过程的金属变形	28	2.9.1 数控刀具系统分类	53
2.3.2 切屑的类型	29	2.9.2 刀柄系统组成	54
2.3.3 切屑控制	31	2.9.3 Coromant Capto 模块化快速换刀系统	57
2.4 切削力与切削功率	33	2.10 常用工件材料加工性能	60
2.4.1 切削力的来源	33	2.10.1 可加工性的衡量指标	60
2.4.2 切削合力及其分解	33	2.10.2 影响材料的切削加工性的主要因素	60
2.4.3 切削功率	34	2.10.3 常用工件材料	61
2.5 切削热与切削温度	34	2.11 切削液	64
2.5.1 切削热	34	2.11.1 切削液的作用	64
2.5.2 切削温度	35	2.11.2 切削液的种类	64
2.6 切削过程中的刀具磨损和破损	35		
2.6.1 刀具磨损	35		

2.11.3 切削液的选择	64	2.12.1 切削振动分类	66
2.11.4 切削液的加注方法	65	2.12.2 切削振动的原因和条件	66
2.12 切削振动	66	2.12.3 消除刀具振动的途径和方法	67

第3章 工件的装夹

3.1 机床夹具的组成、功能和分类	73	3.4.3 欠定位、过定位	83
3.1.1 机床夹具的组成	73	3.4.4 常见定位元件与定位方法	86
3.1.2 机床夹具的主要功能	73	3.4.5 定位误差的分析计算	87
3.1.3 机床夹具的分类	74	3.5 工件的夹紧	92
3.1.4 数控加工夹具特点	76	3.5.1 夹紧装置的组成及其基本要求	92
3.2 组合夹具	76	3.5.2 夹紧装置的设计原则	93
3.2.1 组合夹具的分类	76	3.5.3 确定夹紧力的基本原则	93
3.2.2 槽系组合夹具	77	3.5.4 夹紧机构的设计要求	95
3.2.3 孔系组合夹具	80	3.5.5 常用的夹紧机构	97
3.2.4 光面夹具	80	3.5.6 夹紧动力源装置	103
3.2.5 组合夹具元件的技术要求	81	3.6 铣床、车床夹具	105
3.2.6 组合夹具的组装	81	3.7 数控机床夹具设计	106
3.2.7 组合夹具特点	81	3.7.1 数控机床夹具设计的原则	106
3.3 现代机床夹具的发展方向	82	3.7.2 常用数控铣床夹具种类	106
3.4 工件定位的基本原理	82	3.7.3 机床夹具的基本要求	107
3.4.1 六点定位原理	82	3.7.4 专用夹具的设计步骤	107
3.4.2 完全定位与不完全定位	83	3.8 定位符号和夹紧符号的标注	113

第4章 数控加工工艺设计

4.1 数控加工工艺概念	124	4.3.3 粗基准的选择原则	140
4.1.1 数控加工工艺特点	124	4.3.4 加工方法的选择	142
4.1.2 适合数控机床加工的零件	125	4.3.5 加工工序划分的原则	144
4.1.3 数控加工工艺过程的组成	125	4.3.6 工序集中与工序分散原则	145
4.2 数控加工工艺设计的主要内容	126	4.3.7 数控加工工序划分的特点	145
4.2.1 零件的分析	126	4.4 加工余量	150
4.2.2 数控加工的工艺路线设计	127	4.4.1 加工余量的概念	150
4.2.3 数控加工工序设计	127	4.4.2 影响最小加工余量的因素	150
4.2.4 数控加工工作流程图	138	4.4.3 误差复映	151
4.3 数控加工工艺路线的设计	139	4.4.4 粗、精加工时选用切削用量的原则 和方法	154
4.3.1 定位基准的选择	139		
4.3.2 精基准的选择原则	139		

第5章 数控车削加工工艺

5.1 概述	156	5.3.3 中心孔定位夹具	165
5.2 数控车床	156	5.3.4 其他车削夹具	167
5.2.1 数控车床的种类	156	5.4 车削刀具	169
5.2.2 数控车床的参数	157	5.4.1 车削刀具的发展	169
5.3 数控车削加工工件的装夹	159	5.4.2 车削刀具基本概念	170
5.3.1 通用夹具	159	5.4.3 车削基本刀具	172
5.3.2 心轴类车床夹具	162	5.5 数控车床加工工艺	178

5.5.1 数控车床加工工艺的主要内容	178	5.6.2 轴加工的工艺过程	193
5.5.2 外圆车削	182	5.6.3 轴类零件中心孔加工的方法	193
5.5.3 车内孔	183	5.6.4 一夹一顶车削	196
5.5.4 切断和切槽	184	5.7 套类零件加工工艺	198
5.5.5 螺纹加工	188	5.7.1 套类零件的技术要求	198
5.6 轴类零件加工工艺	193	5.7.2 套类零件的主要工艺方法	198
5.6.1 轴的技术要求	193		

第 6 章 数控铣削加工工艺

6.1 数控铣削的基本概念	201	6.4.5 扩型腔	234
6.1.1 数控铣削特点	201	6.4.6 内圆角铣削	235
6.1.2 数控铣削机床	201	6.5 平面轮廓铣削	238
6.1.3 数控铣削刀具	202	6.5.1 轮廓顺、逆铣	238
6.2 平面铣削	207	6.5.2 切向切入和切出	238
6.2.1 面铣刀的分类	207	6.6 型腔铣削	239
6.2.2 面铣刀的几何角度和功能	207	6.6.1 型腔粗加工	239
6.2.3 常用面铣刀	209	6.6.2 型腔的半精、精铣加工	239
6.2.4 薄径向切屑厚度铣削	210	6.6.3 实例	241
6.2.5 薄切屑高进给铣削技术	211	6.7 孔加工	241
6.2.6 顺铣、逆铣的特点	212	6.7.1 钻孔	241
6.2.7 铣刀的位置	213	6.7.2 镗削加工	245
6.2.8 切削中应注意的几个问题	215	6.7.3 铰削加工	248
6.2.9 平面的铣削走刀路线	216	6.7.4 铣削加工	249
6.2.10 综合实例	218	6.7.5 螺纹铣削	249
6.3 几种常用刀具	221	6.7.6 倒角	252
6.3.1 立铣刀	221	6.7.7 内孔表面加工方法的选择	253
6.3.2 波形立铣刀	225	6.8 孔系零件加工	254
6.3.3 键槽铣刀	226	6.8.1 孔系零件的主要技术要求、材料 和毛坯	255
6.3.4 球头刀	226	6.8.2 孔系零件的工艺过程原则	256
6.3.5 圆鼻刀	227	6.8.3 孔系加工的尺寸计算	257
6.3.6 玉米铣刀	228	6.8.4 实例	259
6.4 常用铣削方法	228	6.9 综合实例	260
6.4.1 开槽	228	6.9.1 槽类变形件加工	260
6.4.2 开孔或铣型腔	230	6.9.2 薄板加工	264
6.4.3 扩孔	232		
6.4.4 方肩铣削	233		

第 7 章 高速切削工艺

7.1 高速切削原理	270	7.4.1 高速切削刀具的材料	277
7.1.1 萨洛蒙曲线	270	7.4.2 高速铣削刀具的几何结构	278
7.1.2 高速切削的概念	270	7.4.3 高速铣削刀具的选择	279
7.1.3 高速切削的特点	271	7.4.4 高速铣削刀具的刀柄结构	281
7.1.4 高速切削的应用	273	7.4.5 刀杆夹紧刀具的方式	281
7.2 高速切削冷却方式	275	7.4.6 刀具的动平衡	281
7.3 高速加工的相关技术介绍	277	7.5 高速切削机床	282
7.4 高性能刀具材料及刀具技术	277	7.5.1 基本结构	282

7.5.2 电主轴	283	7.7.1 CAD/CAM 编程策略	286
7.5.3 混合陶瓷轴承	284	7.7.2 高速切削的路径规划	287
7.5.4 高速伺服系统	285	7.7.3 高速铣削的工艺要求	291
7.5.5 高速 CNC 系统	286	7.8 高速加工方式	293
7.5.6 高速切削机床安全防护与实时 监控系统	286	7.8.1 插铣	293
7.6 高速切削机理	286	7.8.2 切片铣	296
7.7 高速铣削加工工艺	286	7.8.3 摆线铣削	297

第 1 章 数控技术及数控加工

1.1 计算机数控技术

数控 (Numerical Control, 简称 NC) 技术是指用数字、文字和符号组成的数字指令来实现一台或多台机械设备动作控制的技术, 是 20 世纪中期发展起来的机床控制技术。现在, 数控技术也叫计算机数控 (CNC, Computerized Numerical Control) 技术, 一般是采用通用或专用计算机实现数字程序控制的技术。

计算机数控技术发展相当迅速, 这大大提高了数控加工的生产率, 其中运算速度更快捷的 CPU 是 CNC 技术发展的核心。高速度 CPU 应用到高度集成化的 CNC 系统中, 程序块处理速度的提高, 能够以相当高的速度处理零件加工程序, CNC 的性能有了显著的改善, 反应速度更快、更灵敏。以前只有高档 CNC 才具备的功能, 如今也被用在中档产品上。

在制造业中, 使用五轴加工可以减少加工一个零件所需的工装或/和机床的数量, 加工过程所需的设备数量将被减至最低, 与此同时也降低了总的加工时间。CNC 的功能越来越强, 这使得 CNC 制造商能够提供更多的五轴特性。这些特性的应用使得五轴加工变得更简单。

【例】高速机床具有预处理 (Look-ahead) 功能, 要求 CPU 具有大容量缓冲寄存器, 高性能的计算功能, 可预先阅读和检查多个程序段 (如德国的 DMG 机床可多达 500 个程序段, 西门子系统可达 1000~2000 个程序段), 以便在被加工表面形状 (曲率) 发生变化时可及时采取改变进给速度等措施以避免过切等。

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是技术密集度及自动化程度很高的机电一体化设备, 也就是采用了数控技术的机床, 或者说是装备了数控系统的机床。

国际信息处理联盟第五技术委员会对数控机床作了如下定义: 数控机床是一种装有程序控制系统的机床, 该系统能逻辑地处理具有特定代码和其他符合编码指令规定的程序。

计算机数控系统 (Computerized Numerical Control System, CNC 系统) 是采用通用计算机元件与结构, 并配备必要的输入/输出部件构成的, 它采用控制软件来实现加工程序的存储、译码、插补运算、辅助动作逻辑联锁以及其他复杂功能。计算机数控系统由装有数控系统程序的专用计算机、输入/输出设备、可编程序控制器 (PLC)、存储器、主轴驱动及进给驱动装置等部分组成, 习惯上称为 CNC 系统, 其原理如图 1-1 所示。

NC 与 CNC 的区别: CNC 系统是在硬线数控 (NC) 系统的基础上发展起来的, 由一台计算机完成早期 NC 机床数控装置的所有功能, 并用存储器实现了零件加工程序的存储。CNC 系统采用软件来实现数控系统的绝大部分功能, 增加或更新系统功能时,

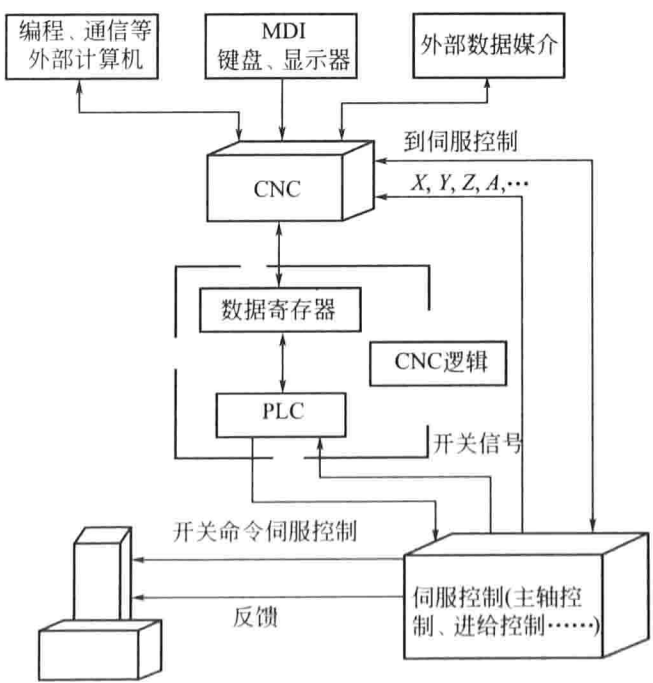


图 1-1 CNC 系统原理

则只需要更换控制软件即可，故 CNC 系统较之 NC 系统具有更好的通用性和灵活性。

1.2 数控加工技术

现代数控加工技术是指高效、优质地实现零件特别是复杂形状零件加工的有关理论、方法与实现技术，是自动化、柔性化、敏捷化和数字化制造的基础与关键技术。数控加工过程包括按给定的零件加工要求（零件图纸、CAD 数据或实物模型）进行加工的全过程，一般来说，数控加工技术涉及数控机床加工工艺和数控编程技术两方面。

1.2.1 数控加工

数控加工就是根据被加工零件和工艺要求编制成以数码表示的程序，输入到数控机床的数控装置或控制计算机中，以控制工件和刀具的相对运动，使之加工出合格零件的方法。使用数控机床加工时，必须编制零件的加工程序，理想的加工程序不仅应保证加工出符合设计要求的零件，同时应能使数控机床功能得到合理的应用和充分的发挥，且能安全可靠和高效地工作。数控加工中的工艺问题的处理与普通机械加工基本相同，但又有其特点，因此在设计零件的数控加工工艺时，既要遵循普通加工工艺的基本原则和方法，又要考虑数控加工本身的特点和零件编程要求。

数控加工的最大特征有两点：一是可以极大地提高精度，包括加工质量精度及加工时间误差精度；二是具有加工质量的重复性，可以稳定加工质量，保持加工零件质量的一致。也就是说，加工零件的质量及加工时间是由数控程序决定而不是由机床操作人员决定的。

1.2.2 数控编程技术

数控编程技术是数控加工技术应用中的关键技术之一，也是目前 CAD/CAPP/CAM 系统中最能明显发挥效益的环节之一。数控编程技术在实现设计加工自动化、提高加工精度和加工质量、缩短产品研制周期等方面发挥着重要作用，在机械制造工业、航空工业、汽车工业等领域有着广泛的应用。

数控编程通常分为手工编程和计算机辅助编程两类，而计算机辅助编程又以 CAD/CAM 集成系统编程为主。目前比较优秀的 CAD/CAM 功能集成型支撑软件，如 UG、Pro/E、CATIA 等，均提供较强的数控编程能力。这些软件不仅可以通过交互编辑方式进行复杂三维型面的加工编程，还具有较强的后置处理环境。此外还有一些以数控编程为主要应用的 CAD/CAM 支撑软件，如美国的 Master CAM、SurfCAM 以及英国的 DelCAM 等。

1.3 数控机床的组成与工作原理

1.3.1 数控机床的组成

数控机床是由程序载体、输入装置、数控装置（CNC 单元）、伺服系统、位置反馈系统和机床机械部件构成的，如图 1-2 所示。

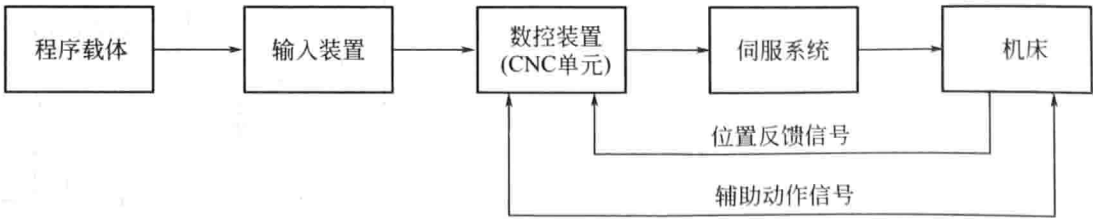


图 1-2 数控机床的组成

(1) 程序载体

数控机床是按照输入的零件加工程序运行的。零件加工程序包括机床上刀具和工件的相对

运动轨迹、工艺参数（走刀量、主轴转速等）和辅助运动等内容。一般将零件加工规定的格式和代码，储存在一种载体上，如纯文本文件（txt），通过数控机床的输入装置，将程序信息输入到数控装置内。

（2）输入装置

输入装置的作用是将程序载体内有关加工的信息读入数控装置。根据程序载体的不同，有不同的输入装置。有时为了方便用户，数控机床可以同时具备两种输入装置。

现代数控机床的数控装置一般用一台或多台微型计算机构成，这样加工程序还可以通过手动方式（MDI方式），用数控系统的操作面板上的按键直接键入CNC单元；或者用与上级机通信的方式直接将其输入CNC单元。

（3）数控装置（CNC单元）

CNC单元由信息的输入、处理和输出三个部分组成。程序载体通过输入装置将加工信息传给CNC单元，编译成计算机能识别的信息，由信息处理部分按照控制程序的规定逐步存储并进行处理后，通过输出单元发出位置和速度指令给伺服系统和主运动控制部分。

在数控系统中，位置信息是作为数值，亦即数字量来处理的。例如，10.20mm这个数值，就是根据它有多少个最小设定系统值（0.01mm）来表示的，可表示为1020个最小设定单位。

在机床加工时，数控装置中的运算器主要根据设定的数学模型进行运算。运算器一面运算，一面向输出回路发送进给指令。伺服线路的形式不同时，进给指令的形式也不同，最一般的是以进给脉冲列形式给出，即一个进给脉冲所对应的机床位移量就是一个脉冲当量，因此进给脉冲列的个数即为位移量，其重复频率即为进给速度。运算器依照输入回路指令，把适当的进给脉冲分配给多个输出端（如 $+\lambda$ ， $-\lambda$ ， $+\mu$ ， $-\mu$ 等）。从这个意义上来说，运算器就是一个脉冲分配器。但是，在轮廓控制系统中，通常称这种能正确地产生分配到各坐标的脉冲序列的线路为“插补器”，而进行这种脉冲分配所需的运算称为插补运算。沿直线分配脉冲序列的称为直线插补，又称一次插补；沿圆弧分配脉冲序列的称为圆弧插补；沿抛物线分配脉冲序列的称为抛物线插补。圆弧插补和抛物线插补总称为二次插补。各轴向伺服机构通过输出回路接收运算器送来的进给脉冲后，驱动机床的刀具相对工件在相应的轴向移动。各轴向移动的合成即形成了插补器（即运算器）所要求的刀具相对工件的运动轨迹。当然，运算器向输出回路发送进给指令的形式是多种多样的，除上述的脉冲形式外，还可以是一组数据，也可以是模拟电压信号，或者是继电器等开关信号。

数控机床的辅助动作，如刀具的选择与更换、切削液的启停等能够用可程序控制器（PLC）进行控制。现代数控系统中，一般备有PLC附加电路板，形成内嵌式PLC。这种结构形式可省去CNC与PLC之间的连线，结构紧凑，可靠性好，操作方便，无论技术上还是经济上都是有利的。

（4）伺服系统

伺服系统由伺服电动机以及驱动装置和伺服控制软件组成。伺服系统与数控机床的进给运动部件构成进给伺服系统。伺服系统根据CNC单元来的速度及位置指令驱动机床的进给运动部件，完成指令规定的运动。每一坐标方向的运动部分配备有一套伺服系统。

伺服电动机的驱动控制装置一般仅用于电动机的速度控制（包括速度反馈），而电动机的角位移控制一般由CNC单元实现。

（5）位置反馈系统

位置反馈分为伺服电动机的转角位移反馈和数控机床执行机构（工作台）的位移反馈两种。运动部分通过传感器将上述角位移或直线位移转换成电信号，输送给CNC单元，与指令位置进行比较，并由CNC单元发出指令，纠正所产生的误差。

（6）机床的机械部件

数控机床的机械结构除了主运动系统、进给系统以及辅助部分，如液压、气动、冷却和润滑部分等一般部件外，尚有些特殊部件，如储备刀具的刀库、自动换刀装置（ATC）、自动托盘交换装置（APC）等。与普通机床相比，数控机床的传动系统更为简单，但机床的静态和动态刚度要求更高，传动装置的间隙要尽可能小，滑动面的摩擦系数要小，并要有恰当的阻尼，以适应对数控机床高定位精度和良好的控制性能的要求。

1.3.2 数控机床的工作原理

数控机床的工作原理如图 1-3 所示。

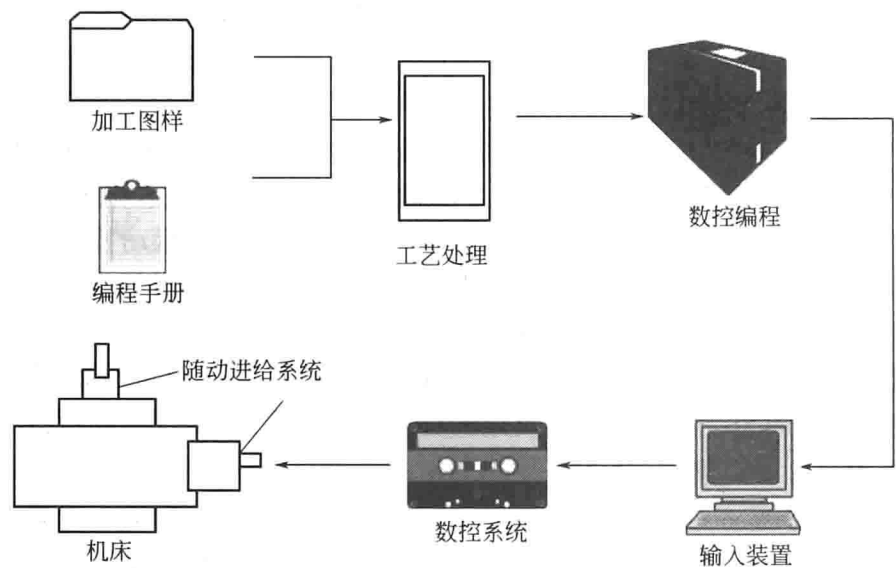


图 1-3 数控机床的工作原理

在数控机床上加工零件通常要经过以下步骤：

- ① 根据加工零件的图样与工艺方案，用规定的代码和程序格式编写程序单，并把它记录在载体上；
- ② 把程序载体上的程序输入到 CNC 单元中；
- ③ CNC 单元将输入的程序处理后，向机床各个坐标的伺服系统发出信号；
- ④ 伺服系统根据 CNC 单元发出的信号，驱动机床的运动部件，并控制必要的辅助操作；
- ⑤ 通过机床机械部件带动刀具与工件的相对运动，加工出符合要求的工件；
- ⑥ 检测机床的运动，并将其通过反馈装置反馈给 CNC 单元，以减小加工误差。

1.3.3 数控机床的分类

(1) 按工艺用途划分

按工艺用途可将数控机床分为：

- ① 金属切削类数控机床，如数控车床、加工中心、数控钻床、数控镗床等；
- ② 金属成形类数控机床，如数控折弯机、数控弯管机、数控回转头压力机等；
- ③ 数控特种加工机床，如数控线切割机床、数控激光加工机床；
- ④ 其他类型的数控机床，如火焰切割机、数控三坐标测量机等。

(2) 按运动方式划分

按运动轨迹方式，即刀具与工件的相对运动方式，可将数控机床分为点位控制系统数控机床、直线控制系统数控机床和轮廓控制系统数控机床，如图 1-4 所示。

- ① 点位控制系统 这类控制系统的特点是要求保证点与点之间的准确定位，它只控制行程的终点坐标值，至于点与点之间所经过的轨迹，则不加控制。采用这类系统的机床有钻床、坐标镗床、冲床等。

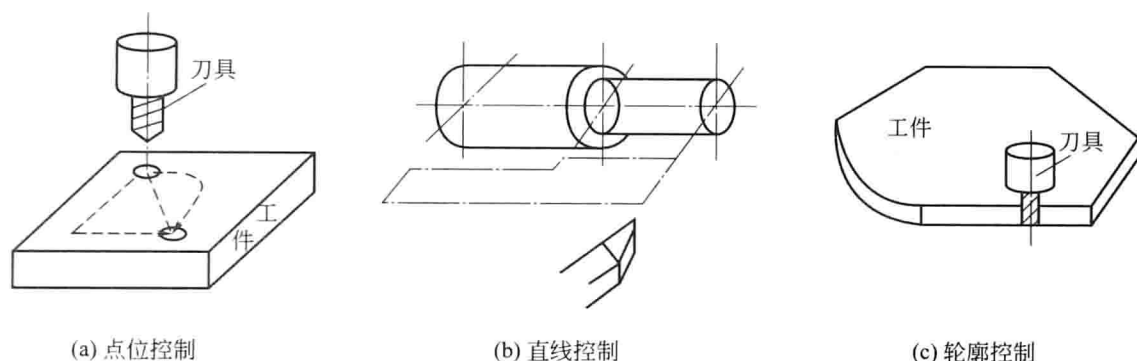


图 1-4 数控机床分类

② 直线控制系统 这类控制系统的特点是不但要控制行程的终点坐标值，还要保证被控制的两坐标间的轨迹是一条直线。采用这类控制系统的机床有加工中心、车床、铣床、磨床等。

③ 轮廓控制系统（连续控制系统） 这类控制系统的特点是能够对两个或两个以上坐标方向的同时运动进行严格的连续控制，不仅要控制加工的轮廓，而且要将每个坐标的行程控制与速度控制联系起来。较高性能的数控机床，如车床、铣床、磨床、加工中心等均采用此类控制系统。

（3）按伺服系统类型划分

按伺服系统类型不同，数控机床可以分为开环控制系统数控机床、闭环控制系统数控机床和半闭环控制系统数控机床三类。

① 开环控制系统 数控装置根据输入的数据和指令值，经过运算发出输出脉冲列，送到步进电动机，使其转过一定的角度，带动丝杠螺母使工作台（或刀具）移动一定的距离。这种没有信号反馈和位置检测，也不将被控制量的实际值和指令值进行比较的系统叫开环控制系统，如图 1-5 所示。

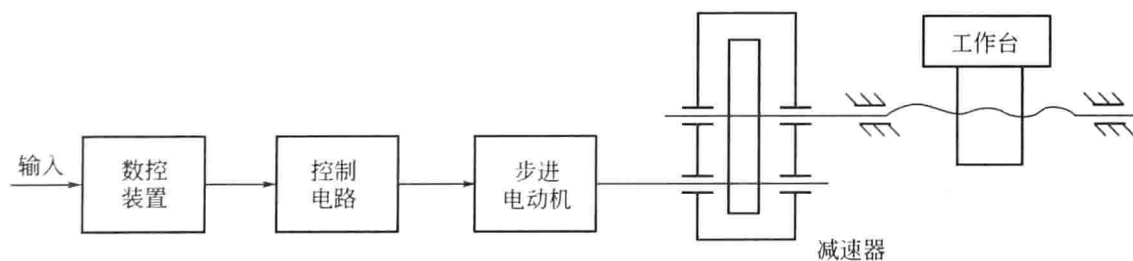


图 1-5 开环控制系统

② 闭环控制系统 此类数控系统不仅根据输入的指令要求，发出指令值使机床运动，而且通过测量装置检测出工作台与刀具之间的相应位移的实际值，将实际值与指令值进行比较，用差值进行控制，直到差值等于零为止。闭环控制系统如图 1-6 所示。

③ 半闭环控制系统 这种控制系统也是有差控制系统的一种，它的特点是对齿轮或丝杠旋转的转角进行测量，然后推算出线性位移量，再将此实际值与指令值进行比较，用差值进行控制。由于机床不完全包括在内，因而叫半闭环控制系统，如图 1-7 所示。

对定位精度要求较高的机床，必须关注它的进给伺服系统是采用半闭环方式，还是全闭环方式，必须关注使用检测元件的精度及稳定性。

【例】 机床采用半闭环伺服驱动方式时，传动链中因工作温度变化引起滚珠丝杠长度变化，使工作台实际定位位置产生漂移影响，进而影响加工件的加工精度。因此，在开环、半闭环控制系统中，机床精度稳定性受到外界因素影响比较大。

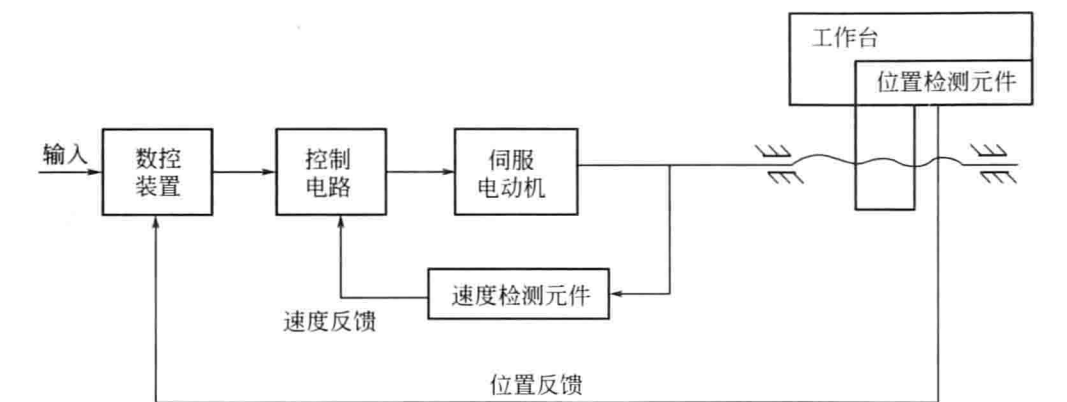


图 1-6 闭环控制系统

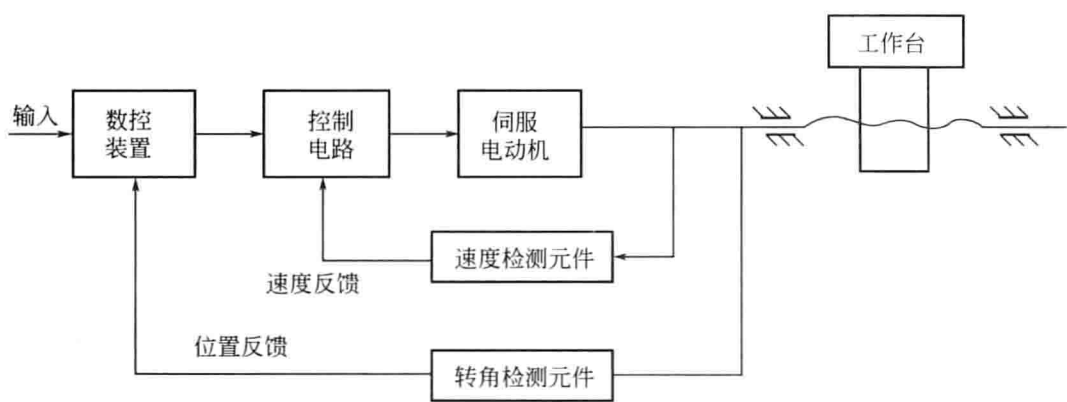


图 1-7 半闭环控制系统

1.4 数控机床的主要性能指标

这里所说的数控机床主要指标以数控切削机床为主，其他类型机床因与具体工艺关系不密切在此不作说明。数控机床的主要性能指标一般有精度性能指标、运动性能指标及功能指标等；还有其他性能指标。

1.4.1 精度性能指标

- 精度性能指标包括定位精度和重复定位精度、分辨率和脉冲当量等。
- ① 定位精度 定位精度是指机床各轴在数控系统控制下的移动部件在确定的终点所达到的实际位置精度，移动部件实际位置与理想位置之间的误差等，它直接影响零件加工的位置精度。
 - ② 重复定位精度 重复定位精度是反映轴运动稳定性的基本指标，是指在同一数控机床上，应用相同程序代码到达某同一位置所得连续结果的一致程度。一般情况下，重复定位精度是呈正态分布的偶然误差，它主要受伺服系统特征、进给系统的间隙与刚性及摩擦特征等因素的影响。重复定位精度影响一批零件的加工一致性、质量稳定性。
 - ③ 分辨率与脉冲当量 分辨率是指可以分辨的最小位移间隔。对测量系统而言，分辨率是可以测量的最小位移；对控制系统而言，分辨率是可以控制的最小位移增量，即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，一般称为脉冲当量。脉冲当量是设计隔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。
 - ④ 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角

度值的差值。分度精度影响零件加工部位的空间位置及孔系加工的同轴度等。

1.4.2 运动性能指标

运动性能指标包括主轴系统、伺服驱动系统、坐标行程的技术指标等。

① 主轴系统 主轴系统的指标主要有主轴转速、扭矩与功率。目前机械主轴的转速一般在 8000r/min 以下，扭矩较大；高速主轴转速在 10000r/min 以上，但扭矩要低于机械主轴。

② 伺服驱动系统 伺服驱动系统直接控制着机床的进给速度。进给速度是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素，它受数控装置的运算速度、机床动态特性以及工艺系统刚性等因素的影响。

③ 坐标行程 数控机床各坐标（直线轴、旋转轴）行程的大小构成机床的空间加工范围和曲面加工能达到的状态，是直接体现机床加工能力的指标参数。

进给运动的位移速度和定位精度两个技术指标又是相互制约的，位移速度要求越高，定位精度就越难提高。

④ 刀库容量和换刀时间 刀库容量是指刀库能存放加工所需要刀具的数量。目前常见的中小型加工中心多为 16~60 把，大型加工中心达 100 把以上。

换刀时间指有自动换刀系统的数控机床，将主轴上使用的刀具与装在刀库上的下一工序需要的刀具进行交换所需要的时间。刀库容量和换刀时间对数控机床的生产率有直接影响。

1.4.3 功能指标

功能指标主要包括可控轴数和联动轴数、插补功能、刀具参数补偿功能、监测功能等。

① 可控轴数和联动轴数 可控轴数是指数控装置能够控制的坐标数；联动轴数是指数控装置控制的坐标轴同时到达空间某一点的坐标数，表示数控装置可同时控制按一定规律完成一定轨迹插补的协调运动控制能力。联动轴数越多，说明数控机床可以加工越复杂的空间线型或型面，编程难度也越大。

目前数控机床有两轴联动、三轴联动、四轴联动、五轴联动等机床，高档数控系统的可控轴数已多达 24 轴。三轴联动数控机床可以加工空间复杂曲面；四轴联动、五轴联动数控机床可以加工宇航叶轮、螺旋桨等零件。

② 插补功能 插补是数控机床实现各种运动轨迹的基础，一般是以一个脉冲当量为插补单位，根据给定的信息，在理想轮廓（或轨迹上）的已知两点之间，确定一组中间点的过程，或者说是将已知数据密化的过程。插补方式主要有直线插补、圆弧插补、螺旋插补、样条插补、NURBS 插补等。

③ 刀具参数补偿功能 刀具参数补偿是指数控装置进行刀具偏置计算的能力。具有刀具补偿功能的数控机床，在数控编程时只要给出零件轮廓上的数据点（基点或节点）坐标、给出刀具补偿指令数据即可，不必关心刀具的具体尺寸和长度。刀具补偿功能有刀具半径补偿、刀具长度补偿，有些五轴联动控制的机床具有空间刀具轴向长度补偿能力（RTCP 功能），使多坐标程序编制更为便捷。

④ 监测功能 监测功能主要是指基于传感器对机床运行状态的信息采集和控制，如主轴温度、高速铣床的主轴不平衡、瞬时功率等，实现运动部件保护、参数调整等。

1.4.4 其他性能指标

其他性能指标是指主要规格尺寸、冷却系统指标等。

① 主要规格尺寸 数控车床主要规格尺寸有床身与刀架最大回转直径、最大车削长度、最大车削直径、外形尺寸等规格尺寸；数控铣床规格尺寸主要有工作台、工作台 T 形槽等规格尺寸、外形尺寸等规格尺寸。

② 冷却系统指标 冷却系统指标是指冷却箱容量、冷却泵输出量等。

1.5 数控机床坐标系

1.5.1 数控机床坐标系的规定

数控机床坐标系一般遵守右手原则，即右手直角笛卡儿坐标的原则和零件固定和刀具运动的原则。

(1) 右手直角笛卡儿坐标的原则

数控机床坐标系位置与机床类型有关。机床坐标轴通常按照右手原则（右手直角笛卡儿坐标系）确定。如图 1-8 所示。

- 大拇指的方向为 X 轴的正方向；
- 食指为 Y 轴的正方向；
- 中指为 Z 轴的正方向。

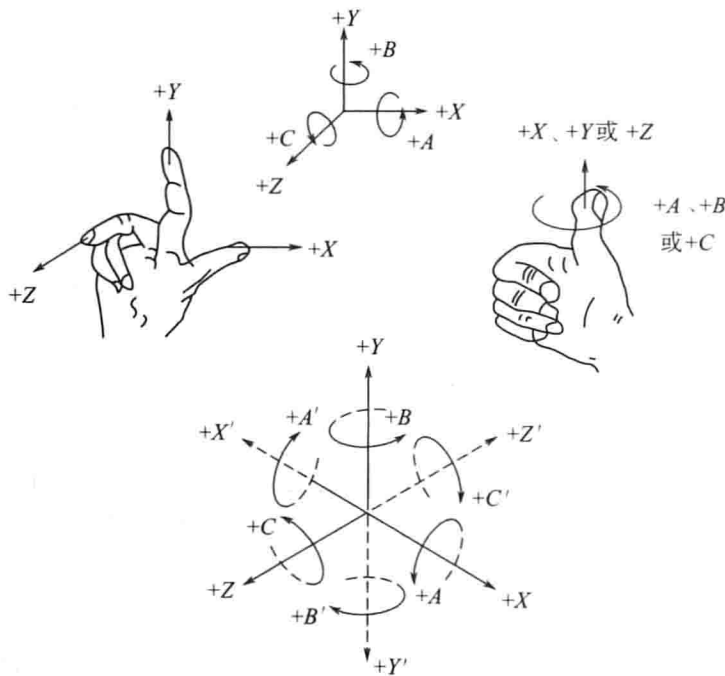


图 1-8 右手直角笛卡儿坐标系

机床绕坐标轴 X、Y、Z 旋转运动的旋转轴，分别用 A、B、C 表示，它们的正方向按右手螺旋定则确定。

数控机床各坐标轴及其正方向的确定顺序是：

- ① 先确定 Z 轴 以平行于机床主轴的运动坐标为 Z 轴，Z 轴正方向是使刀具远离工件的方向。
- ② 再确定 X 轴 X 轴为水平方向且垂直于 Z 轴并平行于工件的装夹面。在工件旋转的机床（如车床、外圆磨床）上，X 轴的运动方向是径向的，刀具离开工件旋转中心的方向是正方向。对于刀具旋转的机床，若 Z 轴为水平（如卧式铣床、镗床），则沿刀具主轴后端向工件方向看，右手平伸出方向为 X 轴正向；若 Z 轴为垂直（如立式铣、镗床，钻床），则从刀具主轴向床身立柱方向看，右手平伸出方向为 X 轴正向。
- ③ 最后确定 Y 轴 在确定了 X、Z 轴的正方向后，即可按右手原则定出 Y 轴正方向。
- ④ 附加坐标轴 如果机床除有 X、Y、Z 主要坐标轴以外，还有平行于它们的坐标轴，可分别指定为 U、V、W。如果还有第三组运动，则分别指定为 P、Q、R。

【例】 双主轴车削中心如图 1-9 所示，纵切车床如图 1-10 所示。

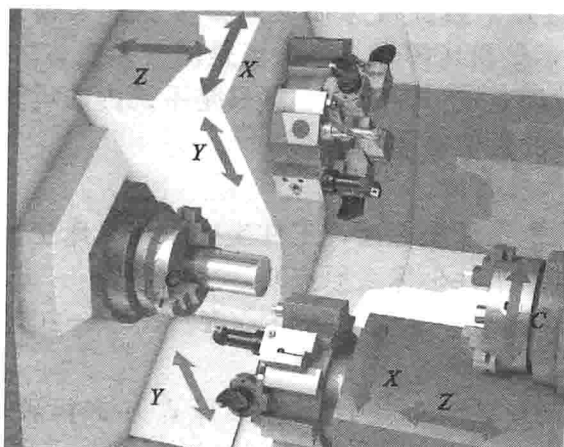


图 1-9 双主轴车削中心

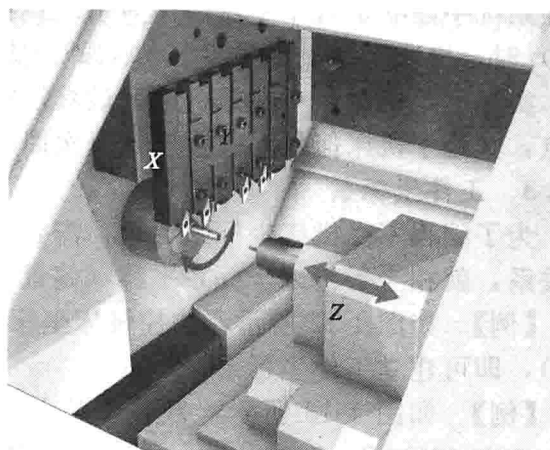


图 1-10 纵切车床

【例】 门式数控铣床的坐标系，如图 1-11 所示。

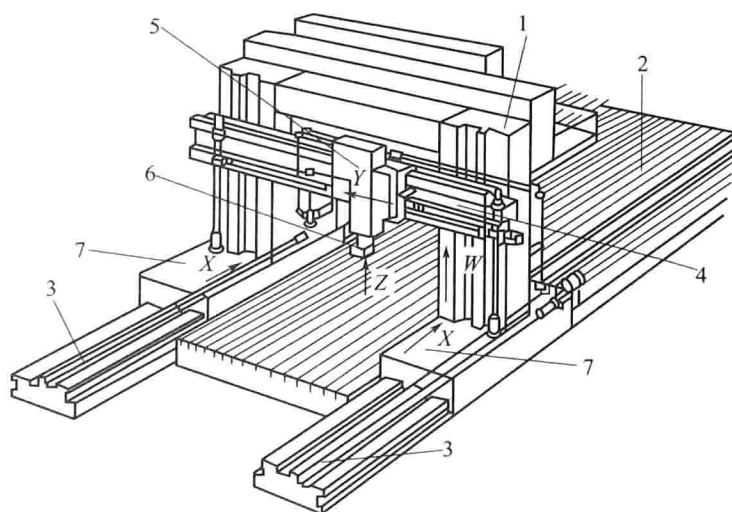


图 1-11 门式数控铣床

1—立柱；2—工作台；3—床身；4—桁架；5—主轴箱；6—主轴；7—导轨

(2) 零件固定和刀具运动的原则

由于机床的结构不同，有的是刀具运动，零件固定；有的是刀具固定，零件运动等。为了编程方便，坐标轴正方向，均是假定工件不动，刀具相对于工件作进给运动而确定的方向。实际机床加工时，如果是刀具相对不动，工件相对于刀具移动实现进给运动的情况，按相对运动关系，工件运动的正方向（机床坐标系的实际正方向）恰好与刀具运动的正方向（工件坐标系的正方向）相反。

1.5.2 机床原点与参考点

(1) 机床原点

机床原点又称为机床零点，该点是机床上一个固定的点，其位置是由机床设计和制造单位确定的，通常不允许用户改变。机床原点是工件坐标系、机床参考点的基准点，也是制造和调整机床的基础。

(2) 机床参考点

机床参考点又称机械原点（R），是机床上一个特殊的固定点。该点一般位于机床原点的位置，它指机床各运动部件在各自的正向自动退至极限的一个固定点（由限位开关准确定位），到达参考点时所显示的数值则表示参考点与机床零点间的距离，该数值即被记忆在数控系统中