

“十三五”普通高等教育规划教材

# 数控技术

刘伟 主编



提供电子课件

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”普通高等教育规划教材

# 数 控 技 术

主 编 刘 伟

副主编 雷保珍

参 编 田宏宇 刘冰冰 张建成

机械工业出版社

本书是“数控原理”“数控机床”和“数控编程”三门课程主要内容的有机结合,内容包括绪论、数控编程基础、数控车削编程、数控铣削编程、数控插补原理、伺服驱动系统、检测系统、数控机床的主传动系统、数控机床的进给传动系统、数控机床的典型结构。本书以对数控机床的应用为主线,以数控工艺的制订到数控程序的编制为重点,从易到难,由浅至深,循序渐进。通过对实际应用的介绍,加深学生对理论知识的理解和掌握,从而培养学生的实践能力、系统思维、工程意识、质量与标准意识以及创新意识。本书内容丰富,图文并茂,逻辑性强,便于学生自主学习。

本书可作为工科院校的机械、机电、数控相关专业的教材,也可供从事机床数控行业的工程技术人员、研究人员参考使用。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 308596956, 电话: 010-88379753)。

## 图书在版编目(CIP)数据

数控技术/刘伟主编. —北京:机械工业出版社, 2019. 6

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-62560-5

I. ①数… II. ①刘… III. ①数控技术-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第076897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:时静 责任编辑:汤枫

责任校对:张薇 责任印制:郜敏

河北宝昌佳彩印刷有限公司印刷

2019年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18印张·437千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-62560-5

定价:59.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

机工教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

进入 21 世纪以来，传统制造业面临着全球产业结构调整带来的机遇和挑战。特别是 2008 年金融危机之后，世界各国为了寻找促进经济增长的新出路，开始重新重视制造业。美国于 2011 年提出“先进制造业伙伴计划”，旨在增加就业机会，实现美国经济的持续强劲增长。美国国家科学技术委员会于 2012 年 2 月正式发布了“先进制造业国家战略计划”。欧盟整体上也开始加大制造业科技创新扶持力度，德国于 2013 年 4 月推出了“工业 4.0”战略，意图奠定德国在关键工业技术上的国际领先地位。我国在 2015 年发布了《中国制造 2025》，明确提出，“要加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，把智能制造作为两化深度融合的主攻方向，着力发展智能装备和智能产品，全面提升企业研发、生产、管理和服务的智能化水平”。新一轮工业革命的核心是智能制造。德国工业 4.0、美国工业互联网和中国制造 2025 这三大国家战略虽在表述上不一样，但本质上异曲同工，主攻方向都是智能制造。新一轮工业革命的本质是未来全球新工业革命的标准之争，各个国家都在构建自己的智能制造体系，而其背后是技术体系、标准体系和产业体系。

在现代制造系统中，数控技术是关键技术，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。它是关系到国家战略地位和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。机械制造的竞争，其实质是数控技术的竞争。现代数控技术集传统的机械制造技术、计算机技术、成组技术与现代控制技术、传感检测技术、信息处理技术、网络通信技术、液压气动技术、光机电技术于一体，是制造业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础，CAD/CAM、FMS、CIMS 等技术都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。目前，数控技术正由专用型封闭式开环控制模式向通用型开放式实时动态全闭环控制模式发展。

数控技术的发展离不开人才的培养，本科教育阶段，与数控技术相关的主要有数控机床、数控编程和数控原理三门课程。但应用型大学为提高学生的实践能力，强化了第二课堂和课外科技活动，压缩了课内学时。因此，许多学校将三门数控课程合并成了一门课，这就需要已有的教材进行整合和内容的更新。本书将数控技术相关知识分为三个单元，通过原

理—机床—应用将一个较为完整的知识体系传授给学生，然后通过实际的案例和项目加深学生对知识点的理解及应用，着重培养学生的动手能力、应用能力，以及系统思维、工程意识、质量与标准意识。

本书在编写形式上，将理论融于应用，突出实践；在编写风格上，力求图文并茂，便于学生自学，提升自主学习意识和能力；在编写内容上，注重先进性、科学性、系统完整性和实用性，以数控编程作为重点，培养学生对数控机床的应用能力。

本书由北京联合大学的刘伟任主编，雷保珍任副主编，田宏宇、刘冰冰、张建成参加编写。具体分工如下：第1、2、4、10章由刘伟编写，第3章由雷保珍编写，第5、6、7章由田宏宇编写，第8章由刘冰冰编写，第9章由张建成编写。全书由刘伟、刘冰冰统稿。

本书得到北京联合大学规划教材建设项目资助。

由于编者水平有限，书中不足和错误之处在所难免。希望广大读者批评指正，提出宝贵意见。编者联系邮箱：[liuw0616@163.com](mailto:liuw0616@163.com)。

编 者

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 数控机床的产生与发展	1
1.1.1 数控机床的产生	1
1.1.2 我国数控机床的现状	2
1.1.3 数控机床的发展趋势	3
1.2 数控机床的组成及工作过程	6
1.2.1 CNC 机床的组成	6
1.2.2 数控机床的工作过程	8
1.3 数控机床的特点	9
1.4 数控机床的分类	10

1.4.1 按工艺用途分类	10
1.4.2 按运动方式分类	12
1.4.3 按控制方式分类	14
1.4.4 按功能水平分类	15
1.5 数控机床的主要性能指标	16
1.5.1 运动性能指标	16
1.5.2 精度指标	17
1.5.3 可控轴数与联动轴数	17
本章小结	18
练习题	18

## 单元 1 数控编程篇

第 2 章 数控编程基础	21
2.1 概述	21
2.2 数控机床的坐标系	22
2.2.1 机床坐标系	22
2.2.2 工件坐标系 (WCS) 的设定	25
2.3 手工零件编程的基础知识	26
2.3.1 加工程序的编制	26
2.3.2 手工编程的方法及步骤	28
2.3.3 加工程序的结构与格式	29
2.3.4 加工程序指令代码	33
2.4 数控加工工艺设计	38
2.4.1 数控加工工艺的分析	39
2.4.2 数控加工工艺的设计	43
2.5 手工编程中的数值计算	50
2.5.1 基点与节点坐标的计算	51
2.5.2 刀具中心轨迹的计算	51
2.5.3 手工编程的辅助计算	52
2.5.4 平面轮廓基点坐标计算	52
2.6 数控加工工艺文件的编写	54
2.6.1 数控加工工艺文件的格式	54
2.6.2 数控加工工艺文件的编写要求	60
2.6.3 典型零件数控铣床加工工艺分析实例	60

本章小结	62
练习题	63
第 3 章 数控车削编程	64
3.1 数控车削编程特点及坐标系	64
3.1.1 数控车削编程特点	64
3.1.2 数控车床的坐标系与对刀操作	64
3.2 数控车削工艺	69
3.2.1 车削加工方案的确定	69
3.2.2 工序的确定	70
3.2.3 加工顺序的确定	70
3.2.4 走刀路线的确定	71
3.2.5 数控车床的装夹和定位	73
3.2.6 数控车床刀具	78
3.2.7 切削用量的选择	88
3.3 数控车削编程指令	90
3.3.1 基本编程指令	91
3.3.2 固定循环功能	96
3.3.3 螺纹加工	101
3.3.4 刀具补偿功能与编程	105
3.3.5 子程序	109
3.4 数控车削编程综合实例	111
本章小结	113
练习题	113

<b>第4章 数控铣削编程</b> .....	116	4.2.4 铣削刀具 .....	129
4.1 数控铣削编程特点及坐标系 .....	116	4.2.5 切削用量的选择 .....	135
4.1.1 数控铣削编程特点 .....	116	4.3 数控铣削编程指令 .....	136
4.1.2 数控铣床的坐标系与对刀操作 .....	118	4.3.1 基本编程指令 .....	137
4.2 数控铣削工艺 .....	124	4.3.2 固定循环功能 .....	151
4.2.1 选择并确定数控铣削部位及工序 内容 .....	124	4.3.3 子程序 .....	161
4.2.2 零件图及零件毛坯的工艺性 分析 .....	125	4.3.4 可编程镜像指令 .....	163
4.2.3 走刀路线的确定 .....	126	4.4 数控铣削编程综合实例 .....	164
		本章小结 .....	166
		练习题 .....	166

## 单元2 数控原理篇

<b>第5章 数控插补原理</b> .....	175	6.3.4 交流驱动装置 .....	199
5.1 插补的基本概念 .....	175	本章小结 .....	201
5.1.1 插补的概念 .....	175	练习题 .....	201
5.1.2 插补的分类 .....	176	<b>第7章 检测系统</b> .....	202
5.2 逐点比较插补法 .....	177	7.1 检测系统概述 .....	202
5.3 数字积分插补法 .....	181	7.2 脉冲编码器 .....	202
5.4 数据采样插补法 .....	184	7.2.1 增量式脉冲编码器 .....	203
本章小结 .....	187	7.2.2 绝对式脉冲编码器 .....	204
练习题 .....	187	7.3 光栅 .....	205
<b>第6章 伺服驱动系统</b> .....	188	7.3.1 光栅的种类 .....	205
6.1 伺服驱动系统概述 .....	188	7.3.2 直线透射光栅的组成及工作 原理 .....	206
6.2 开环伺服驱动系统 .....	188	7.3.3 直线光栅检测装置的辨向 .....	207
6.2.1 步进电动机的工作原理 .....	188	7.3.4 提高光栅分辨精度的措施 .....	207
6.2.2 步进电动机的主要工作特性 .....	191	7.3.5 光栅检测装置的特点 .....	208
6.2.3 步进电动机的选用 .....	192	7.4 旋转变压器和感应同步器 .....	208
6.2.4 步进电动机驱动装置 .....	193	7.4.1 旋转变压器 .....	208
6.3 闭环伺服驱动系统 .....	196	7.4.2 感应同步器 .....	211
6.3.1 直流伺服电动机 .....	196	本章小结 .....	212
6.3.2 交流伺服电动机 .....	198	练习题 .....	212
6.3.3 直流驱动装置 .....	199		

## 单元3 数控机床篇

<b>第8章 数控机床的主传动 系统</b> .....	215	8.2.2 主轴轴承 .....	221
8.1 对主传动系统的基本要求和变速 方式 .....	215	8.2.3 主轴准停装置 .....	224
8.1.1 对主传动系统的基本要求 .....	215	8.3 典型数控机床的主轴部件 .....	225
8.1.2 主传动的变速方式 .....	216	8.3.1 数控车床的主轴部件 .....	225
8.2 数控机床的主轴部件 .....	220	8.3.2 数控铣床的主轴部件 .....	228
8.2.1 主轴端部结构 .....	220	8.3.3 加工中心的主轴部件 .....	229
		本章小结 .....	230
		练习题 .....	231

<b>第 9 章 数控机床的进给传动系统</b> .....	232	10.2 数控机床的整体布局 .....	252
9.1 对进给传动系统的基本要求 .....	232	10.2.1 数控车床常见布局型式 .....	252
9.2 数控机床进给传动系统的基本型式 ..	233	10.2.2 加工中心常见布局型式 .....	253
9.2.1 滚珠丝杠副 .....	233	10.2.3 高速数控机床的布局型式 .....	254
9.2.2 静压丝杠副 .....	239	10.2.4 并联运动机床的布局型式 .....	255
9.2.3 静压蜗杆-蜗轮条副 .....	241	10.3 数控机床的导轨 .....	256
9.2.4 双齿轮-齿条副 .....	242	10.3.1 数控机床对导轨的基本要求 .....	256
9.2.5 直线电动机直接驱动 .....	243	10.3.2 数控机床导轨的种类与特点 .....	257
9.3 进给传动系统齿轮传动间隙消除		10.3.3 塑料滑动导轨 .....	259
方法 .....	244	10.3.4 滚动导轨 .....	261
9.3.1 刚性调整法 .....	244	10.3.5 静压导轨 .....	263
9.3.2 柔性调整法 .....	245	10.3.6 导轨的润滑与防护 .....	264
本章小结 .....	247	10.4 数控机床的自动换刀装置 .....	264
练习题 .....	248	10.4.1 数控机床对自动换刀装置的	
<b>第 10 章 数控机床的典型结构</b> .....	249	基本要求 .....	265
10.1 数控机床机械结构的组成、特点及		10.4.2 数控车床刀架 .....	265
要求 .....	249	10.4.3 加工中心的自动换刀装置 .....	267
10.1.1 数控机床机械结构的主要		10.5 数控机床的回转工作台 .....	272
组成 .....	249	10.5.1 分度工作台 .....	273
10.1.2 数控机床机械结构的主要		10.5.2 数控回转工作台 .....	276
特点 .....	249	本章小结 .....	277
10.1.3 数控机床机械结构的基本		练习题 .....	277
要求 .....	251	<b>参考文献</b> .....	279

# 第1章 绪 论

本章介绍数控机床的产生与发展、数控机床的组成及工作过程、数控机床的特点、数控机床的分类以及数控机床的主要性能指标，旨在给出关于数控机床整体的宏观概念。

## 1.1 数控机床的产生与发展

新的机械加工装备都是应更高的制造工艺需求而产生的，或者说机械加工装备对促进制造技术的发展起着重要的作用。数控机床就是为了实现复杂零件的自动化加工而产生的，同时数控机床也随着制造技术的发展而发展。

### 1.1.1 数控机床的产生

1948年美国帕森（Parsons Company）公司接受美国空军委托，研制直升机螺旋桨叶片轮廓样板的加工设备。由于样板形状复杂多样，精度要求高，一般加工设备难以适应，于是提出计算机控制机床的设想。1949年，该公司与美国麻省理工学院（MIT）伺服机构研究所合作，开始数控机床的研究，并于1952年试制成功世界上第一台由大型立式仿形铣床改装而成的、用专用电子计算机控制的三坐标立式数控铣床。研制过程中采用了自动控制、伺服驱动、精密测量和新型机械结构等方面的技术成果。后来又经过改进，于1955年实现了产业化，并批量投放市场，但由于技术上和价格上的原因，只局限在航空工业中应用。数控机床的诞生，对复杂曲线、形面的加工起到了非常重要的作用，同时也推动了美国航空工业和军事工业的发展。

数控机床的产生，不仅为复杂零件的加工提供了方便，而且加工精度高，尺寸一致性好，生产率高，能够大大减轻工人的劳动强度，使机械制造业从刚性自动化时代进入了柔性自动化时代，因而很快受到了人们的关注。世界各国竞相投入大量的人力、物力进行研究，使数控机床得到了迅速的发展。继数控铣床、数控车床、数控钻床等单工序加工类机床之后，1959年，克耐-杜列克公司（Keaney & Trecker Company）开发出了装有自动换刀装置、能够一次装夹、多工序加工的加工中心。1967年，英国首先把几台数控机床连接成具有一定柔性的加工系统，即柔性制造系统（Flexible Manufacture System, FMS）。20世纪80年代初，国际上又出现了以数台加工中心为主体，再配上工件自动装卸和监控检验装置而构成的柔性制造单元（Flexible Manufacture Cell, FMC）。20世纪80年代末90年代初，计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacture System, CIMS）逐渐投入使用，并呈现出迅猛发展的态势。几十年来，数控机床无论在品种、数量还是在功能上都取得了长足的进展，为机械制造业注入了新的生机和活力。

数控系统发展到今天，经历了两个阶段和六代的发展。

#### 1. 数控（NC）阶段（1952—1970年）

早期计算机的运算速度低，这对当时的科学计算和数据处理影响还不大，但不能实应机

床实时控制的要求。人们不得不采用数字逻辑电路“搭”成一台机床专用计算机作为数控系统，被称为硬件连接数控（HARD-WIRED NC），简称数控（NC）。随着元器件的发展，这个阶段经历了三代，即

- 第一代数控：1952—1959年采用电子管元件构成的专用NC装置。
- 第二代数控：1959—1964年采用晶体管电路的NC装置。
- 第三代数控：1965—1970年采用小、中规模集成电路的NC装置。

## 2. 计算机数控（CNC）阶段（1970年至今）

到1970年，通用小型计算机业已出现成批生产。其运算速度比20世纪五六十年代有了大幅度的提高，这比专门“搭”成的专用计算机成本低、可靠性高。于是将它移植过来作为数控系统的核心部件，从此进入了计算机数控（CNC）阶段。随着计算机技术的发展，这个阶段也经历了三代，即

- 第四代数控：1970—1974年采用大规模集成电路的小型通用计算机控制系统。
- 第五代数控：1974—1990年微处理器应用于数控系统。
- 第六代数控：1990年以后PC（个人计算机，国内习惯称微机）的性能已发展到很高的阶段，可满足作为数控系统核心部件的要求，数控系统从此进入了基于PC（PC-BASED）的时代。

### 1.1.2 我国数控机床的现状

我国从1958年开始研究数控机床，于1966年研制成功晶体管数控系统，并生产出了数控线切割机、数控铣床等产品。由于受当时条件的限制，数控系统的稳定性及可靠性较差，数控机床品种不全，数量较少，数控机床的发展处于初步阶段。

20世纪80年代初期，我国先后从德国、日本、美国等国家引进了一些数控系统和伺服技术，在一定程度上促进了数控机床的发展。改革开放为数控机床的发展奠定了物质基础。此时我国研制的数控机床性能逐步提高，品种和数量不断增加。到1985年，我国已经拥有加工中心、数控铣床、数控磨床等80多个品种的数控机床，数控机床的发展进入了实用阶段。

20世纪90年代以后，我国逐渐由计划经济转向市场经济，国民经济进入高速发展阶段，研究开发数控系统、应用数控机床已经成了各企业的自发行为，数控机床的发展速度逐年加快，多轴、全功能中高档数控系统及交、直流伺服系统相继研制成功，FMS和CIMS也先后投入使用，数控机床的发展进入了快速阶段。

“九五”起，我国形成了数控车床和加工中心（包括数控铣床）的产业化生产基地。从产量来看，2010年我国机床产值和数控机床产量均列世界第一位。从技术发展水平来看，我国所生产的中档普及型数控机床的功能、性能和可靠性方面已具有较强的市场竞争力。随着“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项陆续完成，我国国产机床数控化率由“十五”末的35.5%提高到“十一五”末的51.9%。我国在数控系统方面已经开发出多轴多通道、总线式高档数控装置产品。武汉华中数控股份有限公司、沈阳高精数控智能技术股份有限公司等已完成开放式全数字高档数控装置的生产。国产数控机床产品覆盖超重型机床、高精度机床、特种加工机床、锻压设备、前沿高技术机床等领域。特别是在五轴联动数控机床、数控超重型机床、立式卧式加工中心、数控车床、数控齿轮加工机床等领域，部分技术

已经达到世界先进水平。国产五轴联动数控机床品种日趋增多，改变了国际强手对数控机床产业的垄断局面，我国已进入世界高速数控机床和高精度数控机床生产国的行列，因而加速了我国从机床生产大国走向机床制造强国的进程。

尽管已经取得了巨大进步，我国数控机床产业仍然存在着主机大而不强、数控系统和功能部件发展滞后、高档数控机床关键技术差距大、产品质量稳定性不高、行业整体经济效益差、高档数控机床产品仍需大量从国外进口等问题。特别是在中、高档数控机床方面，与国外一些先进产品相比，仍存在比较大的差距。这是由于欧美日等先进工业国家于 20 世纪 80 年代先后完成了数控机床产业进程，其中一些著名机床公司一直致力于科技创新和新产品的研发，引导着数控机床技术发展，如美国英格索尔公司和德国惠勒喜乐公司对用于汽车工业和航空工业高速数控铣床的发展，日本牧野公司对高效精密加工中心所做的贡献，德国瓦德里希公司在重型龙门五面加工铣床方面的开发，以及日本马扎克公司研发的车铣中心对高效复合加工的推进等。相比之下，我国大部分数控机床产品在技术上还处于跟踪阶段。表 1-1 以 40 号刀柄的中型加工中心为例，列出了国内外先进产品的主要技术指标，由此可以看到效率、精度和可靠性等方面均有明显差距。

表 1-1 中型加工中心主要技术指标对比

主要技术指标	国内	国外
主轴最高转速/(r/min)	6000~40000	15000~100000
快移速度/(m/min)	24~60	60~120
金属切除率(45 钢)/(cm <sup>3</sup> /min)	200~300	400~600
定位精度/mm(全行程)	0.01~0.016	0.004~0.006
重复定位精度/mm	0.005~0.008	0.002~0.003
平均无故障运行时间 MTBF/h	500~600	>1000

### 1.1.3 数控机床的发展趋势

以数字化为特征的数控机床是柔性化制造系统和敏捷化制造系统的基础装备，其总的发展趋势是高精化、高速化、高效化、柔性化、智能化和集成化，并注重工艺适用性和经济性。具体可归纳为下列方面：

#### 1. 持续地提高经济加工精度

1950—2000 年的 50 年内加工精度提升了 100 倍左右，即加工精度平均每 8 年提高 1 倍，当前的普通加工精度已达到 20 世纪五六十年代的精密加工水平。

随着高新技术的发展和对机电产品性能与质量要求的提高，机床用户对机床加工精度的要求也越来越高。为了满足用户的需要，近十多年来，普通级数控机床的加工精度已由  $\pm 10\mu\text{m}$  提高到  $\pm 5\mu\text{m}$ 。

#### 2. 推进全面高速化，实现高效制造

高速化机床向高速化方向发展，可充分发挥现代刀具材料的性能，不但可大幅度提高加工效率、降低加工成本，而且可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。20 世纪 90 年代以来，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

动进给部件以及高性能控制系统和防护装置等一系列领域中关键技术的解决，新一代高速数控机床加快了高速化发展的步伐。高速主轴单元（电主轴，转速为 15000~100000r/min）、高速且高加/减速度的进给运动部件（快移速度为 60~200m/min，切削进给速度高于 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。高速化加工的另一个特点是大多从单一的高速切削发展至全面高速化，不仅要缩短切削时间，也要力求降低辅助时间和技术准备时间。

### 3. 复合加工机床促进新一代高效机床的形成

复合加工机床的含义是实现或尽可能实现工件在一台机床上一次装夹完成大部分或全部加工工序，从而达到减少机床和夹具、免去工序间的搬运和储存、提高工件加工精度、缩短加工周期和节约作业面积的目的。复合加工机床根据其结构特点，分为工艺复合型和工序复合型两类。

工艺复合型为跨加工类别的复合加工机床，包括不同加工方法和工艺的复合，如车铣中心、铣车中心、激光铣削加工机床、冲压与激光切割复合、金属烧结与镜面切削复合等。

工序复合型应用刀具（铣头）自动交换装置、主轴立卧转换头、双摆铣头、多主轴头和多回转刀架等配置，增加工件在一次安装下的加工工序数，如多面多轴联动加工的复合加工机床和主副双主轴车削中心等。

### 4. 工艺适用性的专门化数控机床正不断涌现

通过对机床布局和创新，使其对不同类型的零件加工具有最佳的适用性，避免一方面出现不能发挥最佳性能，另一方面又存在功能冗余的现象。

要解决品种多样化与经济性的矛盾，就要对机床的模块化设计提出更高的要求。近年来，对并联机构机床和混联机构机床的研究以及对可重构机床（Reconfigurable Machine Tools, RMT）技术的探索，反映了对制造装备能更方便地实现个性化、多样化发展的追求。

### 5. 智能化和集成化成为数字化制造的重要支撑技术

信息技术的发展及其与传统机床的相融合，使机床朝着数字化、集成化和智能化的方向发展。数字化制造装备、数字化生产线、数字化工厂的应用空间将越来越大；而采用智能技术来实现多信息融合下的重构优化的智能决策、过程适应控制、误差补偿智能控制、复杂曲面加工运动轨迹优化控制、故障自诊断和智能维护以及信息集成等功能，将大大提升成形和加工精度、提高制造效率。

### 6. 发展适应敏捷制造和网络化分布式的制造系统

回顾制造系统的发展历程，基本上遵循以下两个方向：①增强制造系统的智能化和自治管理功能，以提高 FMC/FMS 的快速响应能力；②发展兼顾柔性、高效、低成本和高质量且便于重构的新型制造系统，以适应不确定性的市场环境。

这类制造系统称为快速重构制造系统（Rapidly Reconfigurable Manufacturing System, RRMS）或可重构制造系统（Reconfigurable Manufacturing System, RMS）。其原理为通过对制造系统中的设备配置的调整或更换设备上的功能模块来迅速构成适应新产品生产的制造系统。这就要求设备和系统不仅软件具有开放性，而且硬件也要有开放性，成为功能可重构的机床，即前面提到的可重构机床。

### 7. 向大型化和微小化两极发展

能源装备的大型化及航空航天事业等的发展，需要重型立式卧式加工中心和铣车中心。

从精密加工发展到超精密加工，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（ $<10\text{nm}$ ），应用范围日趋广泛。超精密加工技术和微纳米技术是 21 世纪的战略高技术，正在形成一个产业。因此，需要发展能适应微小型尺寸结构和微纳米加工精度的新型制造工艺和装备。微型机床同时具有高速和精密的特点，最小的微型机床可以放在掌心之中，一个微型工厂可以放在手提箱中。操作者通过手柄和监视屏幕控制整个工厂的运作。

航空航天、信息技术和国防高新技术的需求推进了超精加工技术及设备的发展。20 世纪 60 年代，美国开发出第一台商品化超精密机床，其加工尺寸精度为  $\pm 0.8\mu\text{m}$ ，20 世纪 70 年代英国克兰菲尔德精密工程研究所批量生产的超精密车床加工的平面精度优于  $0.1\mu\text{m}$ ，20 世纪 80 年代美国 LLL 实验室和 Y-12 工厂合作生产的大型超精密金刚石车床加工的平面精度达  $0.0125\mu\text{m}$ ，最大加工直径为  $2100\text{mm}$ 。由于晶片和光学镜片等硬脆材料加工的需要，超精密磨削和研抛以及采用光、电、化学等能源的非机械能的特种加工方法使加工精度可达到纳米级（ $0.001\mu\text{m}$ ）。通过机床结构设计优化，机床零部件的超精加工和精密装配，采用高精度的全闭环控制及温度、振动等动态误差补偿技术，提高了机床加工的几何精度，降低了几何误差和表面粗糙度值等，从而进入亚微米、纳米级超精加工时代。

#### 8. 配套装置和功能部件的品种质量日臻完善

功能部件不断向高速度、高精度、大功率和智能化方向发展，并取得成熟的应用。不仅数控系统（含数控装置和伺服驱动装置）有专业化生产厂，凡关键的通用性功能部件如高精度主轴单元、电主轴、力矩电动机、直线电动机、刀具自动交换系统、滚动导轨副、直线滚动丝杠驱动副、双摆主轴头、双摆回转台和自动转位刀塔等在国外均有一些著名的专业化生产厂，这对保证产品质量、提高整机的可靠性和降低成本起着重要的作用。

完善的高集成度的专用电路系统的研发，仍是数控系统可靠性继续提高和结构小型化的一项重要措施。

#### 9. 虚拟数控机床技术

虚拟数控机床实际上是虚拟环境中数控机床的模型。与真实机床相比，虚拟数控机床应具有以下功能：①应与真实机床的结构完全相同；②应比真实机床具有可观性；③强大的网络功能，为各种真正的制造资源服务，从而提高其与外界制造资源的相互操作性，快速地、并行地组织各部门、各集团成员将新产品从设计转入生产；④完善的图形和标准数据接口。

虚拟数控机床的应用将给制造业带来革命性的飞跃。由于虚拟数控机床是数字模型，所以容易实现对数字模型进行显示、分析、传递和迭代更新，为设计提供并行作业可能。虚拟数控机床和各设计软件的接口，为建模提供了方便，尤其是在特定的环境下，方便对产品的可靠性、产品的生产全过程、工艺规范以及产品方案的工艺计划进行性能评价。强化创新水平，用经济快捷的方式提高产品设计质量，缩短产品开发周期。虚拟数控机床的强大网络功能为真正实现远程合作提供了保证。

#### 10. 开放式数控系统

为适应数控机床普及、个性化、多品种、小批量、柔性化的要求，最重要的发展趋势是数控系统体系结构的开放性，设计生产出开放式的数控系统。美国、欧盟及日本等在研究开放式数控系统方面具有一定优势。由于个人计算机（Personal Computer, PC）所具有的开放性、低成本、软硬件资源丰富等特点，基于 PC 的开放式数控系统将成为一个主要趋势。

### 11. 向标准化方向发展

数控标准是制造业信息化发展的一种趋势。数控技术诞生后的 50 多年间的信息交换都是基于 ISO 6983 标准，即采用 G、M 代码对加工过程进行描述，显然，这种面向过程的描述方法已越来越不能满足现代数控技术高速发展的需要。为此，国际上正在研究和制定一种新的 CNC 系统标准 ISO 14649 (STEP-NC)，其目的是提供一种不依赖于具体系统的中性机制，能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型，从而实现整个制造过程，乃至各个工业领域产品信息的标准化。

### 12. 向高可靠性方向发展

数控机床的可靠性一直是用户最关心的主要指标，它主要取决于数控系统各伺服驱动单元的可靠性。为提高可靠性，目前主要采取以下措施：①采用更高集成度的电路芯片，采用大规模或超大规模的专用及混合式集成电路，以减少元器件的数量，提高可靠性；②通过硬件功能软件化，以适应各种控制功能的要求，同时通过硬件结构的模块化、标准化、通用化及系列化，提高硬件的生产批量和质量；③增强故障自诊断、自恢复和保护功能，对系统内硬件、软件和各种外部设备进行故障诊断、报警。当发生加工超程、刀损、干扰、断电等各种意外时，自动进行相应的保护。

### 13. 绿色化

为了追求符合环保要求的机床，干式切削和微量润滑剂切削方法因其可大大减少润滑剂的挥发而得到越来越广泛的应用，同时，机床操作者在工作时的环境、位置会被考虑得非常舒适。此外，无污染的清洁加工技术也受到极大重视。

## 1.2 数控机床的组成及工作过程

数控机床已由硬件数控机床（即采用硬件数控系统）发展到了 CNC 机床（Computer Numerical Control Machine Tool），故本节仅介绍 CNC 机床。

### 1.2.1 CNC 机床的组成

CNC 机床是带有嵌入式计算机的数控机床。硬件数控机床的控制功能是由其控制系统内的电气元件功能决定的。而 CNC 机床的控制功能是在制造数控系统时通过程序代码形式存入计算机，在 CNC 机床关机时，存在只读存储器（ROM）中。CNC 机床由信息输入、数控装置、伺服驱动及检测反馈装置、机床本体和机电接口五大部分组成。

图 1-1 所示为三坐标数控铣床的组成，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。

#### 1. 信息输入

这一部分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数控装置。早期的输入方式为穿孔纸带、磁带。目前较多采用软盘；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多用于调整机床和对刀时使用；通过通信接口，可由上位机输入。

#### 2. 数控装置

数控装置是由中央处理单元（CPU）、存储器、总线、输入输出接口和相应的软件构成

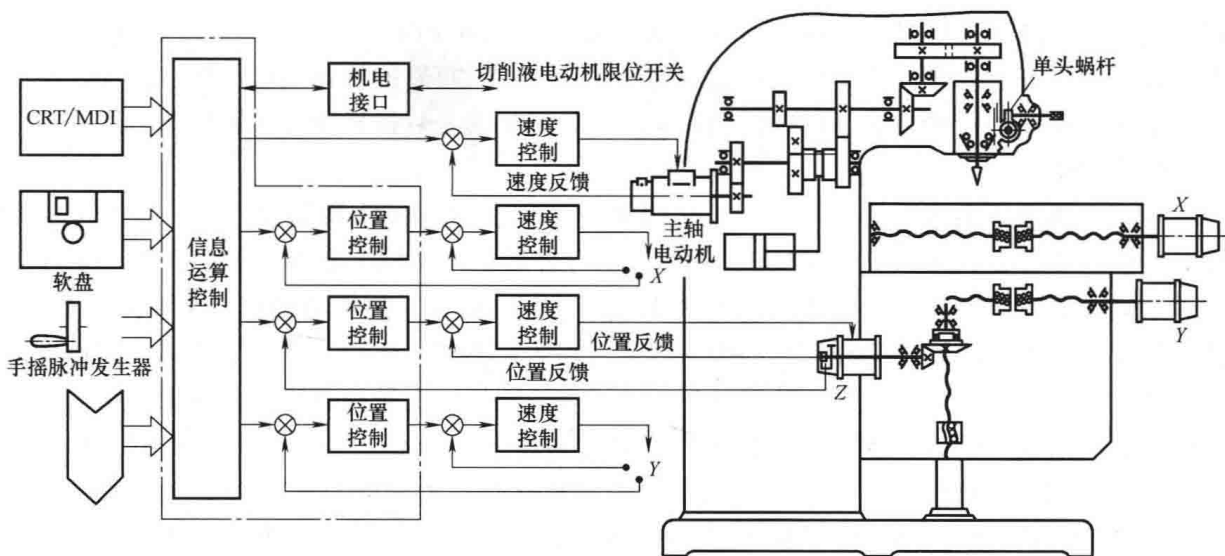


图 1-1 三坐标数控铣床的组成

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。整个数控机床的功能强弱主要由这一部分决定。数控装置具备的主要功能如下：

- 1) 多轴联动、多坐标控制。
- 2) 实现多种函数的插补（直线、圆弧、抛物线、螺旋线、极坐标、样条等）。
- 3) 多种程序输入功能（人机对话、手动数据输入、由上级计算机及其他输入设备的程序输入），以及编辑和修改功能。
- 4) 信息转换功能：包括 EIA/ISO 代码转换、米制/寸制转换、坐标转换、绝对值/增量值转换等。
- 5) 补偿功能：刀具半径补偿、刀具长度补偿、传动间隙补偿、螺距误差补偿等。
- 6) 多种加工方式选择。可以实现各种加工循环、重复加工、凸凹模加工和镜像加工等。
- 7) 具有故障自诊断功能。
- 8) 显示功能。用 CRT 可以显示字符、轨迹、平面图形和动态三维图形。
- 9) 通信和联网功能。

### 3. 伺服驱动及检测反馈装置

伺服驱动装置又称为伺服系统，它接收计算机运算处理后分配来的信号。该信号经过调解、转换、放大以后去驱动伺服电动机，带动机床的执行部件运动；并且随时检测伺服电动机或工作台的实际运动情况，进行严格的速度和位置反馈控制。数控机床的伺服驱动装置分为主轴驱动单元（主要是速度控制）、进给驱动单元（包括速度控制和位置控制）、回转工作台和刀库伺服控制装置以及它们相应的伺服电动机等。伺服系统分为直流伺服系统和交流伺服系统，而交流伺服系统正在取代直流伺服系统；以步进电动机驱动的伺服系统在某些具体场合仍可采用；直线电动机系统是适应高速、高精度的一种伺服机构。在伺服系统中还包括安装在伺服电动机上（或机床的执行部件上）的速度、位移检测元件及相应电路，该部

分能及时将信息反馈回来，构成闭环控制（交流数字闭环控制中还包括电流检测反馈）。常用检测装置有测速发电机、旋转变压器、脉冲编码器、感应同步器、光栅、磁性检测元件、霍尔检测元件等。一般来说，数控机床的伺服系统应具有很好的快速响应性能，以及能够灵敏而准确地跟踪指令的功能。所以，伺服驱动及检测反馈是数控机床的关键环节。

#### 4. 机床本体

机床本体包括机床的主运动部件、进给运动部件、执行部件和基础部件，如底座、立柱、滑鞍、工作台（刀架）、导轨等。数控机床与普通机床不同，它的主运动及各个坐标轴的进给运动都由单独的伺服电动机（无级变速）驱动，所以它的传动链短、结构比较简单。普通机床上各个传动链之间有复杂的齿轮联系，在数控机床上改由计算机来协调控制各个坐标轴之间的运动关系。为了保证数控机床的快速响应特性，在数控机床上普遍采用精密滚珠丝杠、直线滚动导轨副、摩擦特性良好的滑动（贴塑）导轨副。为了保证数控机床的高精度、高效率和高自动化加工，机床的机械结构应具有较高的动态特性、动态刚度、阻尼精度、耐磨性以及抗热变形性能。在加工中心上还具有刀库和自动交换刀具的机械手。同时还有一些良好的配套设施，如冷却装置、自动排屑装置、防护装置、可靠的润滑装置、程编机和对刀仪等，以利于充分发挥数控机床的功能。

#### 5. 机电接口

数控机床除了实现加工零件轮廓轨迹的数字控制外，还有许多其他的控制，如主轴的起停，自动换刀，切削液开、关，工件的夹紧、松开，各种辅助交流电动机的起停，电磁铁的吸合、释放，离合器的开、合，电磁铁的通、断，电磁阀的打开与关闭等。这些逻辑开关量的动力来源是由电源变压器、控制变压器、各种断路器、保护开关、接触器及熔断器等组成的强电线路提供的，而这种强电线路不能与低压下工作的控制电路或弱电线路直接连接，只能通过断路器、热动开关、中间继电器等转换成直流低压下工作的触点的开、合（关）工作，成为继电器逻辑电路或可编程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC）可接收的信号。

以上这些都属于数控装置和机床之间的接口问题，统称为机电接口。解决这些问题，首先要知道机床上有哪些动作，其次是这些动作的先后顺序，以及它们之间的逻辑（联锁、互锁等）关系等。

### 1.2.2 数控机床的工作过程

数控机床是用数字信息进行控制的机床。数控机床的工作过程是，将加工零件的几何信息和工艺信息进行数字化处理，即将所有的操作步骤（如机床的起动或停止、主轴的变速、工件的夹紧或松开、刀具的选择和交换、切削液的开或关等）和刀具与工件之间的相对位移以及进给速度等都用数字化的代码表示。在加工前由编程人员按规定的代码将零件的图样编制成程序，然后通过程序载体（如磁带、软盘、光盘和半导体存储器等）或 MDI 方式将数字信息送入数控系统的计算机中进行寄存、运算和处理，最后通过驱动电路由伺服装置控制机床实现自动加工。数控加工过程示意图如图 1-2 所示。

在加工前要分析零件图，拟定零件加工工艺方案，明确加工工艺参数，然后按编程规则编制数控加工程序，通过 MDI 键盘将程序输入机床的数控系统中，经检查无误即可启动机床，运行数控加工程序。数控装置会自动按照数控加工程序发出的各种控制指令进行加工，

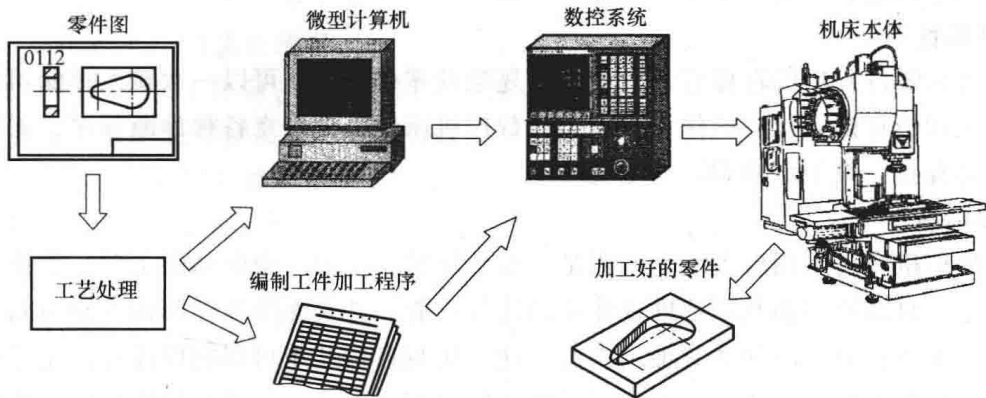


图 1-2 数控加工过程示意图

如果不出现故障，则直到加工程序运行结束，零件加工完毕为止。或者在进行工艺处理后，用 CAM 软件在微型计算机上进行几何造型，并自动生成数控加工程序，通过通信接口输入机床的数控系统中，实现工件的自动化加工。

### 1.3 数控机床的特点

数控机床是由普通机床发展演变而来的，与普通机床相比，数控机床具有鲜明的特点，因此数控机床的普及率越来越高。数控机床的特点主要包括以下方面：

#### 1. 自动化程度高

数控机床集中了机、电、数控、气、液等综合技术，从最初的单台数控机床发展到目前的单机多轴、柔性制造单元、柔性制造系统。自动运行控制形式，从最初单一纸带方式发展到目前的多种方式，包括分布式数字控制（Distributed Numerical Control, DNC）和远程控制方式，并且可以实现多种形式的自动上下料，加工过程能对工件和刀具进行监控和测量，并能有效地补偿和修正，排屑冷却都实现了自动化。

#### 2. 适应性强，柔性好

适应性是指数控机床随生产对象变化而变化的适应能力。由于市场对产品的需求逐渐趋于多样化，实现单件、小批量产品的生产自动化是制造业的当务之急。当产品改变时，对数控机床来说，仅仅需要改变数控机床的输入程序就能适应新产品的生产需要，而不需要改变机械部分和控制部分的硬件，而且生产过程是自动完成的。因此，数控机床的生产准备周期短、灵活性强，为多品种小批量生产和新产品的研制提供了方便条件。

#### 3. 精度高

数控机床是按照预定程序自动工作的，工作过程一般不需要人工干预，这就消除了操作者人为产生的误差。在设计制造设备时，采取了许多措施，从而使数控机床达到较高的精度。数控装置的脉冲当量目前可达  $0.0001 \sim 0.01\text{mm}$ ，同时，可以通过实时检测误差修正或补偿来获得更高的精度。

#### 4. 功能强

数控机床利用计算机的高速计算处理能力，实现了许多复杂的数控功能，如二次曲线插补运算、多轴联动、固定循环加工、坐标偏移、图形显示、刀具补偿等，使刀具在三维空间