

数控加工 编程技术

第2版

陈为国 主编



赠PPT课件

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数控加工编程技术

第2版

主编 陈为国

参编 姚坤弟 陈昊 杨红飞

机械工业出版社

本书立足数控加工实用技术,以理论知识做引导,以实际应用为目标,融基础知识、工艺知识、编程原理与方法等为一体,力求体现先进性与实用性,基础理论以必须、实用、够用为度,应用知识紧密结合生产实际,注重与其他相关知识的联系与区别。

全书共7章,主要内容包括绪论、数控加工工艺基础、数控加工编程基础、数控车床编程、数控铣床与加工中心编程、数控电火花线切割机床编程和数控加工自动编程等。主要章节配有大量的例题及分析,每章末均配有思考与练习,便于检验与扩充读者的学习范围。自动编程部分以Mastercam X6版软件为对象,在简介了编程原理与步骤的基础上,主要通过实例进行讲解。

本书可作为普通高等学校机械设计制造及其自动化、机械电子工程、机械工程自动化等机械类专业的教材,也可作为数控加工技术人员和数控加工编程爱好者与自学者的自学或培训教学用书,对从事数控加工技术应用的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工编程技术/陈为国主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2016.3

ISBN 978-7-111-52702-2

I. ①数… II. ①陈… III. ①数控机床-程序设计-高等学校-教材
IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第011876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:周国萍 责任编辑:周国萍 责任校对:杜雨霏

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京富生印刷厂印刷

2016年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·413千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-52702-2

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

本书经过3年多的教学应用,获得了广大授课教师与学生的良好评价,应用效果较好,许多教师与学生在使用的过程中提出了一些学习的体会与建议,促使编者有意进行第2版修订。

本书在保持原有结构体系的基础上,对原书的第2~6章进行了部分修订。

第2章,基于最新的国家标准,修订了部分内容,如基于GB/T 24740—2009修订了数控加工常用定位支承与夹紧符号以及常见装置符号、数控车削和铣削加工部分常见装夹方案示例与分析;基于GB/T 25668—2010和GB/T 25669—2010更新了TSG镗铣类整体式工具系统的型式组成和TMG21镗铣类模块式工具系统模块形式插图示例。为了读者更好地掌握与应用数控刀具知识,修订和加强了数控刀具、刀柄和常用装夹装置的内容。

第3章,修订了书中不足部分,进一步完善了教学内容,增加了子程序调用例题以及机床参考点相关指令G27与G29。

第4、5章,总体内容变化不大,增加了切削进给移动速度方式控制指令以及部分例题,对有关程序增强了刀具轨迹插图内容,使其程序的可读性更强。对某些叙述不足部分增加了学习内容,如数控车削编程部分的刀尖圆弧半径补偿、简单固定循环指令的应用拓展、螺纹车削方式等;数控铣削编程部分基于三维铣削的特点,加强了三维刀具轨迹的表达,使得程序的阅读更加直观具体。增加了应用广泛的螺旋插补指令应用示例,强化了孔加工固定循环指令中程序段重复执行次数K的应用示例与讨论等。

第6章,根据CAXA线切割软件的发展实际,基于CAXA线切割2013r1版软件,对原章节6.4数控电火花线切割机床的自动编程的内容进行了修订,克服了原XP版对新操作系统的兼容性问题,使其更好地适应当前主流的操作系统环境。

关于未修订的第1章和第7章,编者的思路是,第1章绪论的教学本身就与教师的知识结构与发展现状关系密切,有较大的发挥空间,因此教材内容仅起到教学思路的目的。而第7章的内容,现有Mastercam X6版本的内容基本紧跟该软件的发展,虽然已推出了X8甚至X9版,但其对计算机配置要求更高,从实际应用角度看,X6版本能够较好地适应版本更新与计算机配置环境的需要。

此次修订,虽然编者认真努力,但限于水平,书中仍然不可避免地存在错误和不足之处,敬请读者和同仁提出宝贵意见。

编者

2016年1月

第1版前言

随着现代制造业的不断发展以及数控机床与数控加工技术的不断普及，现代企业对掌握数控技术、数控编程和数控机床操作的技术人才需求越来越大，了解和掌握数控技术相关知识与技能，是企业对工程技术人员的基本要求。为适应这种人才需求的变化和要求，高等学校工科机械类学生的培养体系也应有所创新与发展，可喜的是，近年来，大部分高校机械类专业均开设了这类课程。

本书参考国内外数控机床的发展，参照国内兄弟院校数控加工编程教学的经验，数控车削与数控铣削部分选择以 FANUC Oi 系列数控系统的编程指令集为主，线切割部分定位于国内应用广泛的 3B 格式基础性指令，自动编程部分选择了在中小型企业应用较广泛的 Mastercam 软件进行编写，满足了通用性和知识基础性的需要。

全书共 7 章。第 1 章主要介绍数控机床、数控技术、数控编程方面的概念、组成、原理、分类与发展趋势。第 2 章介绍数控加工工艺基础知识，包括工艺分析，常见装夹方案及其描述，常用刀具及其切削用量的选用原则。第 3 章介绍数控加工编程基础，将数控车削和数控铣削编程中基础和共性问题集中讨论。第 4 章介绍数控车床编程知识，包括数控车床编程特点、数控车床的位置偏置与刀尖圆弧半径补偿知识、车削固定循环指令及其应用等。第 5 章介绍数控铣床与加工中心编程知识，在介绍铣削编程基本知识的基础上，着重介绍了刀具半径补偿和长度补偿的原理、方法与应用，孔加工固定循环指令及其应用，加工中心程序结构的特点、分析及编程。第 6 章介绍数控线切割 3B 格式指令及其编程，并借助 CAXA 线切割编程软件介绍线切割编程的应用问题。第 7 章以 Mastercam X6 编程软件为载体，在简单介绍自动编程原理和方法的基础上，通过实例教学介绍数控车削与数控铣削自动编程方法，力争为学习自动编程技术奠定基础。

本书可作为普通高等学校机械设计制造及其自动化、机械工程自动化、机械电子工程、模具设计与制造、数控技术等机械类专业的教材，也可作为数控技术爱好者和工程技术人员自学和培训教材，对从事数控技术应用研究的科技工作者也有一定的参考价值。

全书由南昌航空大学陈为国教授担任主编并负责全书的统稿工作，参加编写的人员有姚坤弟、陈昊、杨红飞。本书为南昌航空大学教材建设基金资助项目。

本书在编写过程中参阅了同行专家学者及兄弟院校的教材、资料和文献，在此谨致谢意。由于编者的水平所限，书中难免存在错误与不足之处，敬请读者和同仁提出宝贵意见，以便进一步修改与完善。编者联系方式：wgchen0113@sina.com。读者可通过 QQ：296447532 获得免费电子教案。

编者

2012 年 7 月

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 数控机床概述	1
1.1.1 数控技术的概念与发展	1
1.1.2 数控机床的产生与发展	2
1.2 数控加工技术	3
1.2.1 数控机床的工作过程	3
1.2.2 数控机床的组成与工作原理	4
1.2.3 数控机床的分类	8
1.3 数控加工技术的应用与数控机床的发展趋势	11
1.3.1 数控加工技术的应用	11
1.3.2 数控机床的发展趋势	12
思考与练习	17
第 2 章 数控加工工艺基础	18
2.1 数控加工工艺分析	18
2.2 数控加工工艺规划	18
2.2.1 数控加工工艺规划的概念	18
2.2.2 数控加工与编程前期准备	20
2.2.3 数控加工常见装夹方案的确定	20
2.2.4 数控切削刀具的确定	24
2.2.5 切削用量的确定	24
2.3 数控加工常见的装夹装置	27
2.3.1 数控车削加工常见的装夹装置	27
2.3.2 数控铣削加工常见的装夹装置	29
2.4 数控加工常用刀具	31
2.4.1 数控刀具材料	31
2.4.2 数控车削加工刀具	31
2.4.3 数控铣削加工刀具	35
思考与练习	46
第 3 章 数控加工编程基础	48
3.1 概述	48
3.1.1 数控加工编程的概念	48
3.1.2 数控编程的步骤	48
3.1.3 数控编程的方法	49
3.2 坐标系	50
3.2.1 机床坐标系 (含机床参考点的概念)	50
3.2.2 工件坐标系	51
3.2.3 绝对坐标、增量坐标与相对坐标	52
3.2.4 工作坐标平面	53
3.3 数控程序的结构分析	54
3.3.1 字与字符	54
3.3.2 程序段的格式	57
3.3.3 数控程序的一般格式	58
3.3.4 子程序及其调用 (M98/M99)	58
3.4 数控编程中的数值处理	60
3.5 基本编程指令与概念	61
3.5.1 寸制/米制转换指令 G20/G21	61
3.5.2 基本插补功能指令 G00/G01/G02/G03	61
3.5.3 暂停指令 G04	73
3.5.4 机床参考点及其相关指令	73
思考与练习	76
第 4 章 数控车床编程	77
4.1 概述	77
4.1.1 数控车削加工特点	77
4.1.2 数控车床的编程特点	77
4.1.3 数控车床的刀具指令及刀具位置偏置	82
4.2 数控车床编程指令	83
4.2.1 数控车床的准备功能指令	83
4.2.2 数控车床的主轴速度与进给速度控制	83
4.2.3 数控车床工件坐标系的建立	85
4.2.4 数控车床的基本编程指令与分析	90
4.2.5 数控车削加工的刀尖圆弧半径补偿	94
4.3 倒角与倒圆角简化编程	99
4.3.1 倒角编程	99
4.3.2 倒圆角编程	100

4.3.3 倒角和倒圆角编程的注意事项	101	5.5.3 加工中心编程的方法和特点	200
4.4 固定循环指令	102	思考与练习	204
4.4.1 单一形固定循环指令	102	第6章 数控电火花线切割机编程	207
4.4.2 复合形固定循环指令	111	6.1 数控电火花线切割机的工作原理、 分类与结构组成	207
4.5 螺纹切削指令	122	6.1.1 数控电火花线切割机的工作 原理	207
4.5.1 螺纹切削基本指令 G32	123	6.1.2 数控电火花线切割机的分类与 结构组成	208
4.5.2 单刀切削螺纹固定循环指令 G92	125	6.2 数控电火花线切割机的工艺特点	209
4.5.3 多刀复合切削螺纹固定循环 指令 G76	128	6.2.1 电极丝材料与直径	209
4.6 数控车床的多刀加工问题	130	6.2.2 偏移量	209
4.6.1 问题的引出	130	6.2.3 加工工艺规划	210
4.6.2 刀具偏置及应用分析	130	6.3 数控电火花线切割编程基础	212
4.6.3 多刀加工时的对刀问题	132	6.3.1 数控电火花线切割机程序 格式	212
4.6.4 加工尺寸的控制问题	133	6.3.2 无间隙补偿 3B 格式编程	212
4.7 数控车削编程综合举例	135	6.4 数控电火花线切割机的自动编程	216
思考与练习	137	6.4.1 CAXA 线切割编程软件简介	216
第5章 数控铣床与加工中心编程	139	6.4.2 CAXA 线切割软件编程实例	220
5.1 概述	139	思考与练习	224
5.1.1 数控铣削与加工中心的加工 特点	139	第7章 数控加工自动编程	225
5.1.2 数控铣床与加工中心的编程 特点	139	7.1 概述	225
5.2 数控铣床编程指令	142	7.1.1 自动编程的概念	225
5.2.1 数控铣削的准备功能指令	142	7.1.2 自动编程的特点与发展	225
5.2.2 数控铣床的坐标系指令	142	7.1.3 自动编程技术的发展趋势	226
5.2.3 数控铣床的基本编程指令与 分析	147	7.1.4 数控加工自动编程常用软件 简介	226
5.2.4 刀具半径补偿	151	7.1.5 数控加工自动编程的一般操作 流程	227
5.2.5 刀具长度补偿	164	7.2 Mastercam X6 软件自动编程	232
5.3 孔加工固定循环指令及其应用	170	7.2.1 Mastercam X6 编程软件简介	232
5.3.1 孔加工固定循环问题的引出	170	7.2.2 Mastercam X6 编程举例	243
5.3.2 孔加工循环指令详述	174	思考与练习	250
5.3.3 使用孔加工固定循环指令时的 注意事项	184	附录	252
5.3.4 孔固定循环指令应用综合举例	185	附录 A 数控车削加工切削用量参考表	252
5.4 坐标变换指令	188	附录 B 数控铣削加工切削用量参考表	255
5.4.1 比例缩放指令 G50/G51	188	附录 C FANUC Oi Mate-TC 数控车削 系统的 G 指令表	257
5.4.2 坐标系旋转指令 G68/G69	191	附录 D FANUC Oi MC 数控铣削系统的 G 指令表	259
5.4.3 镜像编程	195	参考文献	263
5.5 加工中心编程	198		
5.5.1 加工中心简介	198		
5.5.2 加工中心的特点	199		

第 1 章 绪 论

1.1 数控机床概述

数控机床 (Numerical Control Machine Tools) 是指采用数字控制技术对机床加工过程进行自动控制的一类机床。国际信息处理联盟第五次技术委员会对数控机床做的定义是: 数控机床是一个装有程序控制系统的机床, 该系统能够逻辑地处理具有使用代码或其他编码指令规定的程序。它是集现代机械制造技术、自动控制技术及计算机信息技术于一体, 采用数控装置或计算机来部分或全部地取代一般通用机床在加工零件时的各种动作 (如启动、加工顺序、改变切削用量、主轴变速、选择刀具、切削液开停以及停车等) 的人工控制, 是高效率、高精度、高柔性和高自动化的光、机、电一体化的数控设备。

1.1.1 数控技术的概念与发展

1. 数控技术的概念

数控技术, 简称数控 (NC, Numerical Control), 是以数字控制的方法对某一工作过程实现自动控制的技术。它所控制的参数通常是位置、角度、速度等机械量和与机械能量流向有关的开关量。数控技术产生的初期, 由于受技术的限制, 其数控系统不得不采用数字逻辑电路“搭”接数控机床的控制系统, 这种数控系统被称为硬件连接的数控系统, 也就是简称为 NC 的数控系统。NC 的数控系统可细分为电子管、晶体管和小规模集成电路三个阶段。

随着时代的发展, 20 世纪 70 年代以后, 计算机技术和微处理器的发展和普及, 为现代计算机数控技术的出现和发展奠定了基础。由于小型计算机技术和微处理器的功能强大, 控制能力极强, 人们考虑用计算机软件程序控制部分或全部替代 NC 时代的硬件逻辑电路, 基于这种思想和技术的数控技术就称为计算机数控技术 (CNC, Computer Numerical Control)。CNC 数控系统的初期, 使用计算机软件程序控制部分地取代 NC 时代的硬件逻辑电路。随着微处理器功能的不断强大, 开始出现了专用的 CNC 数控系统, 这种数控系统是以功能强大的微处理器 (Microprocessor), 也称为中央处理单元 (CPU) 为基础构建的专用数控系统, 其实质是一台专用的小型计算机。目前这种结构的数控系统应用广泛。近年来, CNC 系统朝着基于 PC 方向发展, 这种数控系统具有开放性、低成本、高可靠性、软硬件资源丰富等特点, 是未来数控系统的发展趋势。

2. 数控技术的发展

数控技术自其产生至今, 大致经历两个阶段 6 个时代的发展。

第一阶段: 硬件数控 (NC) 阶段。在这个阶段, 受技术发展的限制, 数控系统的数字逻辑控制主要是靠硬件连接而成, 即常说的硬件连线系统 (Hard-Wired NC), 简称为数控 (NC)。随着电子元器件的发展, 这个阶段大约历经了 3 个时代发展, 即 1952 年的第一代——电子管; 1959 年的第二代——晶体管; 1965 年的第三代——小规模集成电路。第 1

阶段硬件连线的硬逻辑数控系统目前基本淘汰。

第二阶段：计算机数控（CNC）阶段。随着计算机技术的发展及其向数控领域的渗透，在 20 世纪 60 年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（简称 DNC），又称群控系统；以及采用计算机软件程序代替硬件连线逻辑电路的计算机数控系统（简称 CNC）。这个阶段的发展目前认为大致经历了 3 个时代的发展，即 1970 年开始的小型计算机为特征的第四代；1974 年开始的以微处理器为核心的第五代；1990 年开始的基于 PC（PC-Based）的第六代。

以上 6 代数控机床的发展具体表述是：

1952 年，采用电子管元件连线构成数控系统逻辑元件。

1959 年，采用了晶体管元件和印制电路板，出现带自动换刀装置的数控机床，称为加工中心（MC, Machining Center），使数控装置进入了第二代。

1965 年，出现了第三代的集成电路数控装置，不仅体积小，功率消耗少，且可靠性提高，价格进一步下降，促进了数控机床品种和产量的发展。

20 世纪 60 年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（简称 DNC），又称群控系统；采用小型计算机控制的计算机数控系统（简称 CNC），使数控装置进入了以小型计算机化为特征的第四代。

1974 年，研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置（简称 MNC），这是第五代数控系统。

20 世纪 80 年代初，随着计算机软、硬件技术的发展，出现了能进行人机对话式自动编制程序的数控装置；数控装置愈趋小型化，可以直接安装在机床上；数控机床的自动化程度进一步提高，具有自动监控刀具破损和自动检测工件等功能。

20 世纪 90 年代后期，出现了 PC + CNC（国外称为 PC-Based）智能数控系统，即以 PC 为控制系统的硬件部分，在 PC 上安装 NC 软件系统，此种方式系统维护方便，易于实现网络化制造。

注意，虽然国外早已改称为计算机数控（CNC），而我国仍习惯称数控（NC）。所以若粗略地理解，NC 和 CNC 的含义基本相同。

1.1.2 数控机床的产生与发展

采用数字技术进行机械加工，可追溯到 20 世纪 40 年代，由美国北密支安的一个小型飞机工业承包商帕森斯公司（Parsons Corporation）实现的。他们在制造飞机的框架及直升机的旋翼时，利用全数字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线的影响，使得加工精度达到 $\pm 0.0381\text{mm}$ （ $\pm 0.0015\text{in}$ ），是当时的最高水平。1949 年，该公司与美国麻省理工学院（MIT）开始共同研究，并于 1952 年试制成功第一台三坐标数控铣床，这是目前公认的数控机床产生的标志。这台机床是一台试验性机床，到 1954 年 11 月，在帕森斯专利的基础上，第一台工业用的数控机床由美国本迪克斯公司（Bendix-Cooperation）正式生产出来。

从 1960 年开始，其他一些工业国家，如德国、日本都陆续开发、生产及使用了数控机床。最早出现并使用的数控机床是数控铣床，因为它能够解决普通机床难于胜任的、需要进行轮廓加工的曲线或曲面零件。早期的数控系统由于采用的是电子管，体积庞大，功耗高，

因此除了在军事部门使用外，在其他行业没有得到推广使用。

1960年以后，点位控制的数控机床得到了迅速的发展。因为点位控制的数控系统比起轮廓控制的数控系统要简单得多，因此数控铣床、冲床、坐标镗床大量发展。据统计资料表明，到1966年实际使用的约6000台数控机床中，85%是点位控制的机床。

加工中心是数控机床中的亮点之一，它具有自动换刀装置，能实现工件一次装夹多工序的加工。它最初是在1959年3月，由美国卡耐 & 特雷克公司（Keaney&TreckerCorp.）开发出来的。这种机床在刀库中装有丝锥、钻头、铰刀、铣刀等刀具，根据穿孔纸带的指令自动选择刀具，并通过机械手将刀具装在主轴上对工件进行加工。它可缩短机床上零件的装卸时间和更换刀具的时间。如今，加工中心已经成为数控机床中一种非常重要的品种，不仅有立式、卧式等用于箱体零件加工的镗、铣类加工中心，还有用于回转整体零件加工的车削中心、磨削中心等。

早期的数控系统是硬件连线的数控系统，其对应的机床称为NC机床。20世纪70年代数控系统进入了CNC时代，这之后的数控机床可以称为CNC机床。

1967年，英国首先把几台数控机床连接成具有柔性的加工系统，这就是所谓的柔性制造系统（FMS，Flexible Manufacturing Systems）。之后，美国、欧洲、日本等也相继进行开发及应用。

20世纪80年代，国际上出现了以1~4台加工中心或车削中心为主体，再配上工件自动装卸和监控检验装置的柔性制造单元（FMC，Flexible Manufacturing Cell）。这种单元投资少，见效快，既可以单独长时间无人看管运行，也可以集成到FMS或更高级的集成制造系统中使用。

20世纪90年代，出现了包括市场预测、生产决策、产品设计与制造和销售全过程均由计算机集成管理和控制的计算机集成制造系统（CIMS，Computer Integrated Manufacturing System），它是在信息技术、自动化技术与制造技术的基础上，通过计算机技术把分散在产品设计与制造过程中各种孤立的自动化子系统有机地集成起来，形成适用于多品种、小批量生产，实现整体效益的集成化和智能化制造系统。

综上所述可见，数控机床已成为现代制造生产系统中重要的组成部分之一，也是实现计算机辅助设计（CAD，Computer Aided Design）、计算机辅助制造（CAM，Computer Aided Manufacturing）等现代制造技术的基础。

1.2 数控加工技术

1.2.1 数控机床的工作过程

数控机床的工作过程如图1-1所示，首先数控系统读入数控加工程序，并对其进行译码等处理，然后分别驱动主轴旋转、进给轴协调移动以及切削液的开关等动作，对零件进行预定的加工。

数控机床的工作过程具体表述如下：

（1）加工程序输入 将零件加工程序以及补偿数据等通过键盘、存储卡、通信传输和在线加工等方式输入机床的数控系统中。

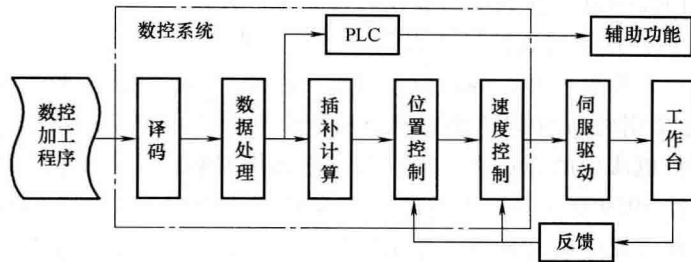


图 1-1 数控机床的工作过程

(2) 译码 数控系统通过译码程序来识别输入的内容，将加工程序翻译成计算机内部能够识别的信息。

(3) 数据处理 数据处理就是处理译码信息。数控系统的数据处理部分一般设置有若干缓冲区，每读入一个程序段，并对其进行译码处理，将译码处理的数据存入一个缓冲区，同时继续读入下一个程序段，以此类推。译码数据处理包括刀具补偿处理、速度预处理、控制机床顺序逻辑动作的开关量信号等。

(4) PLC 控制 接收数据处理后控制机床顺序逻辑动作开关量信号部分信息，并用于控制各种辅助控制功能（M 功能）、主轴速度控制（S 功能）、选刀功能（T 功能，主要用于加工中心和数控车床）等。

(5) 插补计算 接收数据处理后控制机床切削运动的信息，并进行插补处理。插补处理就是依据插补原理，在给定的走刀轨迹类型（如直线、圆弧）及其特征参数，如直线的起点和终点，圆弧的起点、终点及半径，在起点和终点之间进行数据点的密化处理，并给相应坐标轴的伺服系统进行脉冲分配。密化处理的实质就是采用一小段直线或圆弧去对实际的轮廓曲线进行拟合，以满足加工精度的要求。

(6) 位置控制 对于闭环或半闭环控制系统，需要通过位置控制处理程序来计算理论指令坐标位置与工作台实际坐标位置的偏差，通过偏差信号来对伺服驱动系统进行控制。

(7) 速度控制 同位置控制，对于闭环或半闭环控制系统，需要通过速度控制来控制工作台实际的移动速度。

(8) 伺服驱动 伺服驱动是由伺服驱动电动机和伺服驱动装置组成，它能对数控系统输出的位置和控制信号进行放大处理，并驱动工作台运动，它是数控机床的执行部分。

(9) 反馈 是闭环或半闭环控制所必需的一部分，它能将数控机床工作台的实际位置和移动速度反馈给数控系统，对工作台的位置误差和移动速度的误差进行修正，实现高精度的控制。

除了上述的基本功能外，规范的数控系统还具有显示和诊断等辅助功能。

(10) 显示 主要为操作者提供方便，通常显示零件的加工程序、参数、刀具位置、机床状态、报警等。有些还具有刀具加工轨迹的静态和动态图形显示。

(11) 诊断 对系统中出现的不正常情况进行检查、定位，包括联机诊断和脱机诊断。

1.2.2 数控机床的组成与工作原理

1. 数控机床的组成

数控机床主要由数控系统与机床本体两大部分组成。数控系统主要由数控装置（大部

分内置了 PLC，具有输入与输出接口)、进给伺服系统、主轴伺服系统以及反馈装置等部分组成。进给伺服系统包括进给驱动单元、进给电动机和位置检测装置。主轴伺服系统包括主轴驱动单元、主轴电动机和主轴准停装置等。数控机床的具体组成如图 1-2 所示。

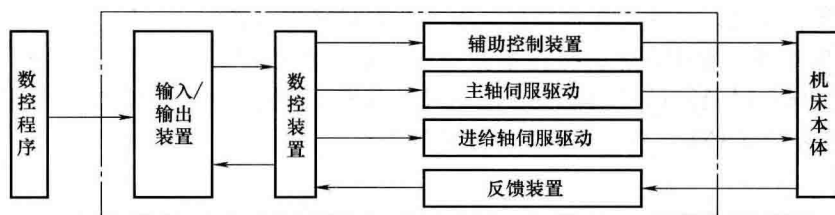


图 1-2 数控机床的组成

数控机床组成详述如下：

(1) 数控程序 数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令，是在零件工艺分析的基础上编制出的描述机床加工过程的程序，是由文字、数字和符号等按一定的规则和格式组成的代码。数控程序可由手工编程或计算机自动编程获得。早期数控程序的载体是程序单或穿孔纸带，现代程序的载体多为电子文档，故程序的载体可以是存储卡、计算机、磁盘等，采用哪一种存储介质取决于数控装置的设计。

(2) 输入/输出装置 输入装置的作用是将系统外部程序载体上的数控代码输入数控系统。输入装置主要有键盘、存储卡和 RS232 接口的传输线等，早期还有光电阅读机、磁带机或软盘驱动器等。对于存储卡或 RS232 接口的传输线等还可以进行在线加工（又称 DNC 加工）或加工程序、系统参数的输出备份。

(3) 数控装置 数控装置是数控系统的核心部件，它的功能是接收输入装置输入的加工信息，经过系统软件或逻辑电路进行译码、运算和逻辑处理后，发出相应的脉冲送给伺服系统，通过伺服系统控制机床的各个运动部件按规定要求动作。数控装置常常集成有可编程序控制器（PMC 或 PLC），数控装置读入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，使其进行规定有序的运动和动作。数控装置还可以进行参数设置、程序的输出、相关参数和数据的输入和输出等。

(4) 驱动装置（主轴伺服驱动和进给轴伺服驱动） 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移动部件，以加工出符合图样要求的零件。因此它的伺服精度和动态响应性能是影响数控机床加工精度、表面质量和生产率的重要因素之一。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。数控机床的驱动装置可分为开环、半闭环和全闭环伺服系统。

主轴伺服系统主要控制机床的主轴转速，目前广泛采用矢量控制变频调速和伺服调速的方法。

(5) 反馈装置（位置检测装置） 反馈装置将数控机床各坐标轴的实际位移量检测出来，经反馈系统输入机床的数控装置后，数控装置将反馈回来的实际位移量值与设定值进行比较，控制驱动装置按照指令设定值运动。

(6) 辅助控制装置 辅助控制装置的主要作用是接收数控装置（内置的 PLC）输出的

开关量指令信号，经过编译、逻辑判别和运动，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、润滑装置的启动、停止，工件和机床部件的松开、夹紧，分度工作台转位分度等开关量辅助动作。

(7) 机床本体 数控机床的机床本体与传统机床相近，由主轴传动装置、进给传动装置、床身、工作台以及辅助运动装置、液压气动系统、润滑系统、冷却装置等组成。

图 1-3 所示为 FANUC 系统数控车床组成框图。

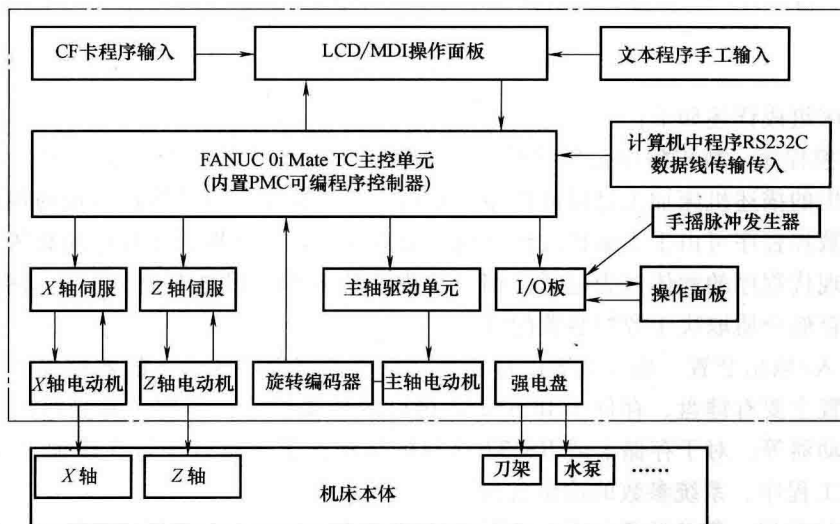


图 1-3 FANUC 系统数控车床组成框图

2. 常用数控系统简介

数控系统 (Numerical Control System) 是根据计算机存储器中存储的控制程序，执行部分或全部数值控制功能，并配有接口电路和伺服驱动装置的专用计算机系统。狭义的理解数控系统是包含其适配的伺服电动机及其驱动器等，否则，仅称为数控装置。但人们常将数控装置也称为数控系统。常用的数控系统有发那科、西门子、三菱、广州数控、华中数控等。

(1) 发那科 (FANUC) 系统 FANUC 系统是日本富士通公司的产品，其中文译名通常为发那科。FANUC 系统进入中国市场有非常悠久的历史，主要为中档产品。目前使用较为广泛的产品有 FANUC 0i、FANUC16、FANUC18、FANUC21 等。

北京发那科机电有限公司是由北京机床研究所与日本 FANUC 公司于 1992 年共同组建的合资公司，专门从事机床数控装置的生产、销售与维修。FANUC 0i 系列产品是其代表作，在我国占有比较大的市场份额。

FANUC 系统在设计中大量采用模块化结构。这种结构易于拆装，便于维修、更换，而且各个控制板高度集成，使可靠性有很大提高。FANUC 系统设计了比较健全的自我保护电路。PMC 信号和 PMC 功能指令极为丰富，便于机床厂商编制 PMC 控制程序，而且增加了编程的灵活性。系统提供串行 RS232C 接口、以太网接口、存储卡接口，能够完成 PC 和机床之间的数据传输。

(2) 西门子 (SINUMERIK) 系统 SINUMERIK 数控系统是德国西门子公司的产品，其

在我国也具有极高的市场占有率，主要型号有 SINUMERIK 801、SINUMERIK 802S/C、SINUMERIK 802D、SINUMERIK 840D/810D 等。

西门子数控（南京）有限公司是西门子公司与中国北方工业集团公司共同出资组建的合资企业，建立于 1996 年。公司按照中国、东南亚地区及世界市场的特殊要求，依照世界级质量标准，研发和制造工厂自动化领域的数控系统、驱动器、人机对话界面及可编程逻辑控制器等产品。

SINUMERIK 系统具有高度的模块化、开放性以及规范化的结构，适于操作、编程和监控。主要包括控制及显示单元、PLC 输入/输出单元、PROFIBUS 总线单元、伺服驱动单元、伺服电动机等部分。

SINUMERIK 系统的主要类型有：

1) SINUMERIK 802S/C 系统，是为低端数控机床市场开发的经济型 CNC 控制系统。802S/C 两个系统具有同样的显示器、操作面板、数控功能、PLC 编程方法等。所不同的是 802S 为步进驱动系统，而 802C 带有伺服驱动系统；两者最多均可带三个驱动轴和一个主轴。

2) SINUMERIK 802D 系统，属中低档系统，其特点是：全数字驱动，中文系统，结构简单（通过 PROFIBUS 连接系统面板、I/O 模块和伺服驱动系统），调试方便。其核心部件——控制面板单元（PCU）具有 CNC、PLC、人机界面和通信等功能，集成的 PC 硬件可使用户非常容易地将控制系统安装在机床上。

3) SINUMERIK 840D/810D 系统，840D/810D 几乎同时推出，具有非常高的系统一致性，显示/操作面板、机床操作面板、S7—300PLC、输入/输出模块、PLC 编程语言、数控系统操作、工件程序编程、参数设定、诊断、伺服驱动等许多部件均相同。810D 是 840D 的 CNC 和驱动控制集成形，其没有驱动接口，NC 软件的选件基本包含了 840D 的全部功能。

4) SINUMERIK 840C 系统，一直雄居世界数控系统水平之首，内装功能强大的 PLC 135WB2，可以控制 SIMODRIVE 611A/D 模拟式或数字式交流驱动系统，适合于高复杂度的数控机床。

国内市场上能见到的国外数控系统的品牌还有日本的三菱（MITSUBISHI）、德国的海德汉（HEIDENHAIN）、意大利的菲迪亚（FIDIA）、西班牙的发格（FAGOR）、美国的哈斯（HAAS）、法国的纽目（NUM）等。

(3) 广州数控（GSK）系统 广州数控系统是广州数控设备有限公司（简称广州数控、GSK）的数控产品。该公司能够为用户提供 GSK 全系列机床控制系统、进给伺服驱动装置和伺服电动机、大功率主轴伺服驱动装置和主轴伺服电动机等数控系统的集成解决方案，成套机床数控系统包括数控系统、伺服驱动、伺服电动机等。

广州数控系统包括车床数控系统、钻铣床数控系统、加工中心数控系统和磨床数控系统等系列产品。

(4) 华中数控系统 武汉华中数控股份有限公司成立于 1994 年，由华中科技大学、中国国家科技部、湖北省、武汉市科委、武汉市东湖高新技术开发区、香港大同工业设备有限公司等政府部门和企业共同投资组建，其产品包括数控系统、伺服单元和电动机、主轴单元及主轴电动机等。华中数控系统的主要型号有 HNC—1T 车床数控系统、HNC—1M 铣床、加工中心数控系统、HNC—2000 型高性能数控系统等。

国内市场上能见到的国产数控系统的品牌还有北京的凯恩帝 (KND)、北京的航天数控、南京大地数控、南京四开、成都广泰等。

1.2.3 数控机床的分类

数控机床的分类形式多种多样,从不同的角度分类就有不同的分类方式,如按机床结构布局分:卧式、立式、龙门式等;按是否有刀库分:单一功能的数控车床或数控铣床以及加工中心等。下面主要介绍按加工原理分类、按控制运动轨迹分类和按驱动装置的特点分类。

1. 按加工原理分类

按加工原理的不同,数控机床可以分为金属切削类数控机床,如数控车床、数控铣床、加工中心、数控磨床等;特种加工类数控机床,如数控电火花线切割机床、数控电火花成形机床、数控火焰切割机床、数控激光加工机床等;板材加工类数控机床,如数控压力机、数控剪板机、数控折弯机和数控旋压机等。图 1-4 ~ 图 1-6 列举了常见的金属切削类数控机床。

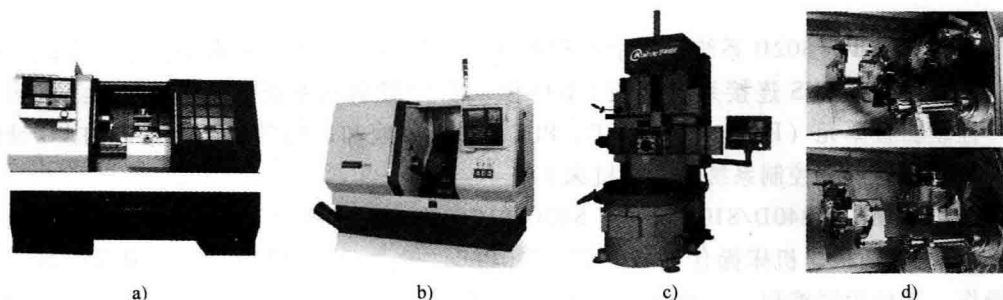


图 1-4 数控车床

a) 平床身前置刀架卧式车床 b) 斜床身后置刀架卧式车床 c) 立式数控车床 d) 车削加工中心

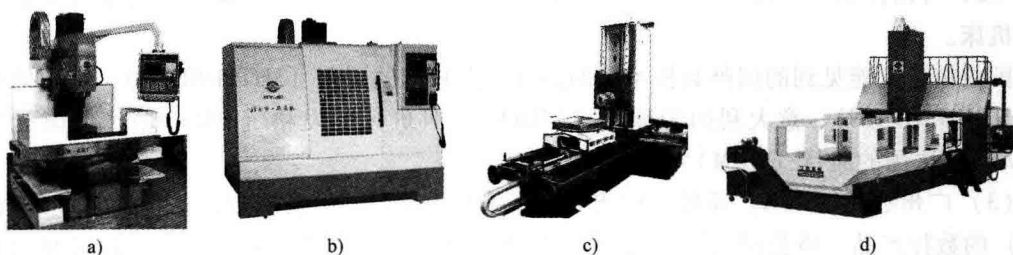


图 1-5 数控铣床

a) 无防护罩立式数控铣床 b) 带防护罩立式数控铣床 c) 卧式数控镗铣床 d) 龙门式数控铣床

2. 按控制运动轨迹分类

按运动轨迹的不同,数控机床可以分为以下几类:

(1) 点位控制数控机床 其特点是机床移动部件只能实现由一个位置到另一个位置的精确定位,在移动和定位过程中不进行任何加工。机床数控系统只控制行程终点的坐标值,不控制点与点之间的运动轨迹,因此几个坐标轴之间的运动无任何联系。可以几个坐标同时向目标点运动,也可以各个坐标单独依次运动。如数控坐标镗床、数控钻床、数控冲床、数

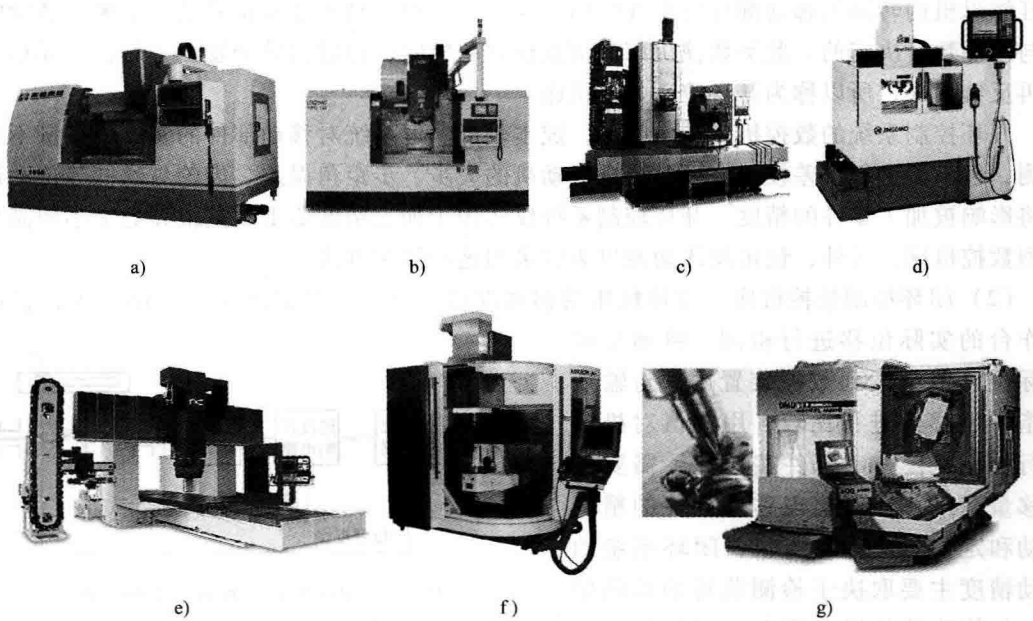


图 1-6 加工中心

- a) 斗笠式刀库立式加工中心 b) 圆盘式刀库立式加工中心 c) 链式刀库卧式加工中心
d) 数控雕铣机 e) 摆头式五轴加工中心 f) 摆台式五轴加工中心 g) 五轴加工案例

控点焊机等都是点位控制数控机床。

(2) 直线控制数控机床 其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变化。直线控制的简易数控车床只有两个坐标轴，可加工阶梯轴。直线控制的数控铣床有三个坐标轴，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，驱动动力头带有多轴箱的轴向进给进行钻镗加工，它也可算是一种直线控制数控机床。

(3) 轮廓控制数控机床 其能对两个或两个以上运动的位移及速度进行联动控制，使合成的平面或空间的运动轨迹能满足零件轮廓的要求。它不仅能控制机床移动部件的起点与终点坐标，而且能控制整个加工轮廓每一点的速度和位移，将工件加工成要求的轮廓形状。当前常用的数控车床、数控铣床、数控磨床就是典型的轮廓控制数控机床。数控火焰切割机、电火花加工机床以及数控绘图机等也采用了轮廓控制系统。轮廓控制系统的结构要比点位/直线控制系统更为复杂，在加工过程中需要不断进行插补运算，然后进行相应的速度与位移控制。

3. 按驱动装置的特点分类

(1) 开环控制数控机床 其控制系统没有位置检测元件，如图 1-7 所示，伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机。数控系统每发出一个进给脉冲，经驱动电路功率放大后，驱动步进电动机旋转一个角度，再经过齿轮减速装置带动丝杠旋转，通过

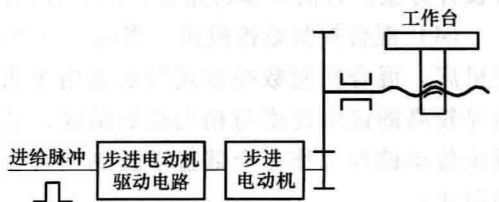


图 1-7 开环控制数控机床系统框图

丝杠螺母机构转换为移动部件的直线位移。移动部件的移动速度与位移量是由输入脉冲的频率与脉冲数所决定的。此类数控机床的信息流是单向的，即进给脉冲发出去后，实际移动值不再反馈回来，所以称为开环控制数控机床。

开环控制系统的数控机床结构简单，成本较低。但系统对移动部件的实际位移量不进行监测，也不能进行误差校正。因此步进电动机的失步、步距角误差、齿轮与丝杠等传动误差都将影响被加工零件的精度。开环控制系统仅适用于加工精度要求不是很高的中小型简易经济型数控机床。另外，快走丝线切割机床常采用这种控制方式。

(2) 闭环控制数控机床 该种机床的移动部件上直接安装直线位移检测装置，直接对工作台的实际位移进行检测，将测量的实际位移值反馈到数控装置中，与输入的指令位移值进行比较，用差值对机床进行控制，使移动部件按照实际需要的位移量运动，最终实现移动部件的精确运动和定位。从理论上讲，闭环系统的运动精度主要取决于检测装置的检测精度，与传动链的误差无关，因此其控制精度高。图 1-8 所示为闭环控制数控机床的系统框图。图中 A 为速度传感器、C 为直线位移传感器。当位移指令值发送到位置比较电路时，若工作台没有移动，则没有反馈量，指令值使得伺服电动机转动，通过 A 将速度反馈信号送到速度控制电路，通过 C 将工作台实际位移量反馈回去，在位置比较电路中，与位移指令值相比较，用比较后得到的差值进行位置控制，直至差值为零为止。

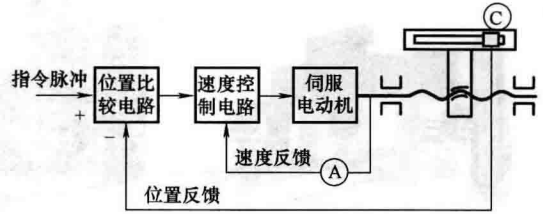


图 1-8 闭环控制数控机床系统框图

闭环控制数控机床的定位精度高，但调试和维修都较困难，系统复杂，成本高。

(3) 半闭环控制数控机床 该种机床的传动丝杠上装有角位移检测装置（如光电编码器等），通过检测丝杠的转角间接地检测移动部件的实际位移，然后反馈到数控装置中去，并对误差进行修正，如图 1-9 所示。通过测速元件 A 和光电编码盘 B 可检测出伺服电动机的转速和转角，从而计算出工作台的实际位移量，将此值与指令值进行比较，用差值来实现控制。由于工作台没有包括在控制回路中，因而称为半闭环控制数控机床。

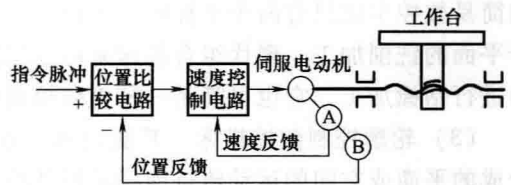


图 1-9 半闭环控制数控机床系统框图

半闭环控制数控系统的调试比较方便，并且具有很好的稳定性，中档数控机床常采用这种设计方案。目前大多将角度检测装置和伺服电动机设计成一体，使结构更加紧凑。

(4) 混合控制数控机床 将以上三类数控机床的特点结合起来，就形成了混合控制数控机床。混合控制数控方式特别适用于大型或重型数控机床，因为大型或重型数控机床需要较高的进给速度与相当高的精度，其传动链惯量与力矩大，如果只采用全闭环控制，机床传动链和工作台全部置于控制闭环中，闭环调试比较复杂。混合控制系统又分为两种形式：

1) 开环补偿型。它的基本控制选用步进电动机的开环伺服机构，另外附加一个校正电