

普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材

数控加工技术与 项目实训

杨树财 张玉华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材

数控加工技术与项目实训

主 编	杨树财	张玉华		
副主编	张纪勇	文 利		
参 编	姜永梅	张金玲	翁 翎	于志祥
	王永忠	宋双柱	王广越	万 泉
主 审	司乃钧			



机械工业出版社

本书结合丰富实例,系统介绍了数控加工实训过程,使学生能在较短时间内熟练掌握数控设备的编程及操作。本书内容包括:数控机床基本知识、数控加工工艺知识、数控加工编程基础知识、数控车床编程与实训操作、数控铣床的操作与加工、数控电火花线切割编程与操作、快速成形技术、数控雕刻及激光雕刻加工、逆向工程以及数控机床的操作规程和故障处理。通过本书的学习,学生可具备数控机床程序编制和加工调试的能力,从而更好地适应现代化制造业的发展需求。

本书立足于高校大学生工程训练,力求反映数控加工技术的发展现状,以企业对高技能型人才的需求为出发点,结合“教、学、做”于一体,落实了“做中学、做中教”的人才培养理念。适合作为普通高等院校及高职高专院校机类或近机类专业实训教材,也可以作为数控技能鉴定培训教材及自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工技术与项目实训/杨树财,张玉华主编. —北京:机械工业出版社, 2013.2

普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材

ISBN 978-7-111-41056-0

I. ①数… II. ①杨…②张… III. ①数控机床-加工-高等学校-教材
IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第319144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:丁昕祯 责任编辑:丁昕祯 王丹凤 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·461千字

标准书号:ISBN 978-7-111-41056-0

定价:29.00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

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国高等教育改革的逐步深入,高等工科院校人才的培养方向正由知识型向知识、能力、素质和创新思维综合型方向发展,以满足国家对高等技术人才的需要。

长期教学实践经验表明,工程实践是提高理工科高等院校学生素质、能力和创新思维的有效途径,而工程训练是大学生在校学习期间进行的第一次比较系统的、典型的工程实践,通过工程训练不仅为大学生学习相关专业技术基础课和专业课打下基础,也使大学生具备了一定的技术素养和能力,并初步建立了工业生产的概念。工程训练的这种作用对教学科研型高校而言,更为突出,更为重要。

本书是根据教育部工程材料及机械制造基础课程指导组“工程训练教学基本要求”和教育部教学指导委员会“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的基本要求,结合哈尔滨理工大学《工程训练实习大纲》内容编写的。

本书在编写过程中,作者本着重视基础、强化实践、扩大知识面、从感性到理性、理论联系实际的原则,突出能力培养,通过实训项目训练熟悉或掌握数控加工工艺过程,获得初步的操作技能,巩固在实训中所接触到的感性知识。本书主要特点如下:

(1) 由基础知识、数控加工与实训、特种加工与实训等内容构成,讲述了数控人才所必须掌握的有关数控机床、数控系统、数控刀具、夹具和数控编程等方面的基础知识;以实用为原则,分别讲述了华中HNC-21T/M数控车床、铣床及加工中心的编程与操作;重点介绍了工程训练中心开设的常用特种加工项目。

(2) 本书打破传统知识编排模式,以每个知识点的学习与技能需要进行编写,便于学生有针对性的掌握每个知识点。

(3) 按照“教、学、做”相结合的教学模式针对不同专业学生编排课程内容和课程顺序,让学生边学边练,循序渐进。

(4) 增设具有实用性、代表性的实训项目,便于学生学习,同时增加综合性的与生产实际相结合的典型案例,强调技术应用能力学习,注重培养学生的创新能力。

本书由哈尔滨理工大学工程训练中心组织编写,杨树财、张玉华任主编。其中第1章由王广越编写,第2章由万泉编写,第3章由姜永梅编写,第4章由张金玲编写,第5章由翁翎编写,第6章由王永忠编写,第7章由于志祥编写,第8章由张玉华、文利编写,第9章由宋双柱、杨树财编写,第10章由张纪勇编写。

本书特别邀请司乃钧教授任主审,司教授提出了很多宝贵意见和建议,在此深表感谢。

本书编写过程中,各位参编教师和出版社工作人员均付出了艰辛的劳动,提出了许多宝贵意见。在此,谨向他们表示衷心的感谢!限于编者水平有限,时间仓促,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正!

编 者

目 录

前言	
第1章 数控机床基本知识	1
1.1 数控机床与数控技术	1
1.1.1 数控机床的出现和发展	1
1.1.2 数控技术的发展趋势	2
1.2 数控机床的组成、基本工作原理以及特点和应用	3
1.2.1 数控机床的组成	3
1.2.2 数控机床的基本工作原理	5
1.2.3 数控机床的特点和应用	6
1.3 数控系统	7
1.3.1 数控系统的组成	7
1.3.2 CNC装置的工作过程	8
1.3.3 CNC装置的功能	9
1.3.4 CNC装置的硬件结构	11
1.3.5 CNC装置的软件结构	15
1.4 数控机床的分类	17
1.4.1 按加工方式分类	17
1.4.2 按控制运动的方式分类	17
1.4.3 按同时控制轴数分类	19
1.4.4 按伺服系统分类	19
1.5 思考题	20
第2章 数控加工工艺知识	21
2.1 数控刀具和夹具	21
2.1.1 数控刀具的种类及特点	21
2.1.2 数控刀具的选择	21
2.1.3 六点定位原理	23
2.1.4 夹具的分类	24
2.1.5 夹具的选择	25
2.2 数控加工工艺	25
2.2.1 数控加工工艺过程	25
2.2.2 毛坯的种类及选择原则	26
2.2.3 定位基准的选择	27
2.2.4 工序尺寸及其公差确定	29
2.2.5 数控加工工艺路线的确定	30
2.2.6 切削用量的选择	31
2.2.7 编写数控加工工艺文件	32
2.3 数控编程中的工艺准备	33
2.3.1 数控加工零件的工艺性分析	33
2.3.2 加工方法的选择原则和加工方案的确定原则	34
2.3.3 工序与工步的划分	35
2.3.4 对刀点与换刀点的确定	36
2.4 思考题	36
第3章 数控加工编程基础知识	37
3.1 数控编程概述	37
3.1.1 数控机床的坐标系	37
3.1.2 数控程序的编制内容和方法	40
3.1.3 数控程序的结构和格式	42
3.2 数控编程指令代码及基础知识	44
3.2.1 概述	44
3.2.2 辅助功能指令(M指令)	44
3.2.3 准备功能指令(G指令)	45
3.2.4 其他辅助指令	48
3.2.5 编程中的数学处理与坐标值计算	48
3.3 思考题	50
第4章 数控车床编程与实训操作	51
4.1 华中世纪星HNC-21T系统数控车床	51
4.1.1 车床简介	51
4.1.2 操作面板	52
4.2 数控车床的基本操作	54
4.2.1 机床的上电、关机、急停和超程解除	54
4.2.2 机床手动操作	55
4.2.3 数据设置	56
4.2.4 程序输入与文件管理	58
4.2.5 显示	59
4.2.6 程序运行	61
4.3 数控车床编程指令	63
4.3.1 基本指令G92、G00、G01、G28和G29等的格式及应用	63
4.3.2 圆弧插补指令G02、G03的格式及应用	67
4.3.3 固定循环指令G80、G81的格式及应用	70

4.3.4 复合循环指令 G71、G72、G73 的格式及应用	74	5.6.3 凹槽加工实例	139
4.3.5 螺纹车削加工指令 G32、G76、G82 的格式及应用	80	5.7 数控铣削加工中心编程基础与实例	141
4.3.6 刀具补偿指令 G40、G41、G42 的格式及应用	84	5.7.1 加工中心编程概述	141
4.3.7 子程序编程格式与应用	86	5.7.2 加工中心编程特点及特有指令	143
4.4 数控车床的对刀操作	89	5.7.3 加工中心的操作方法	145
4.5 典型零件的加工实例	92	5.7.4 复杂异形零件加工实例	146
4.5.1 外轮廓加工实例	92	5.8 思考题	150
4.5.2 内轮廓加工实例	94	第6章 数控电火花线切割编程与操作	151
4.5.3 螺纹加工实例	95	6.1 数控电火花线切割机床的工作原理与组成	151
4.5.4 综合样件加工实例	96	6.1.1 数控电火花线切割机床的工作原理及特点	151
4.6 思考题	98	6.1.2 数控电火花线切割机床的组成	153
第5章 数控铣床的操作与加工	100	6.1.3 数控电火花线切割机床的使用规则及维护保养	155
5.1 华中世纪星 HNC-21M 数控铣床	100	6.2 数控电火花线切割机床	156
5.1.1 基本结构与主要功能	100	6.2.1 数控电火花线切割的加工工艺	156
5.1.2 机床控制面板与软件操作界面	101	6.2.2 数控电火花线切割加工的装夹方法	157
5.2 数控铣床的基本操作	103	6.2.3 安装工件	158
5.2.1 机床的上电、关机、急停和超程解除	103	6.2.4 电极丝的安装与位置调整	159
5.2.2 机床手动操作	104	6.2.5 调整电加工参数及加工工艺指标	161
5.2.3 数据设置	106	6.2.6 数控电火花高速走丝线切割加工的步骤	163
5.2.4 程序输入及校验	107	6.2.7 断丝处理	163
5.3 数控铣床编程指令	109	6.2.8 数控电火花线切割机床的操作	164
5.3.1 数控铣床编程的几个基本指令	109	6.2.9 数控电火花线切割加工编程和加工实例	168
5.3.2 刀具补偿功能指令格式及应用	115	6.3 低速走丝线切割加工简介	170
5.3.3 简化编程指令格式及应用	119	6.3.1 低速走丝线切割加工的特点	170
5.3.4 钻镗固定循环指令格式及应用	122	6.3.2 低速走线切割加工的工艺分析及程序编制	173
5.4 宏程序编程	126	6.3.3 低速走丝线切割加工实例	175
5.4.1 宏程序编程的技术特点	126	6.4 思考题	180
5.4.2 宏变量及常量	127	第7章 快速成形技术	181
5.4.3 运算符与表达式	130	7.1 快速成形技术简介	181
5.4.4 语句表达式	130	7.1.1 概述	181
5.4.5 宏程序编程举例	132	7.1.2 快速成形技术的特点及应用	183
5.5 数控铣床的对刀操作	135	7.2 几种典型的快速成形工艺	186
5.5.1 用 G92 建立工件坐标系的对刀方法	135	7.2.1 液态光固化聚合物选择性固化成形	186
5.5.2 用 G54 ~ G59 建立工件坐标系的对刀方法	135	7.2.2 粉末材料选择性烧结成形	188
5.6 典型零件的加工实例	136		
5.6.1 钻孔加工实例	136		
5.6.2 轮廓加工实例	138		

7.2.3 薄形材料选择性切割成形	189	9.1.3 逆向工程的研究对象及内容	225
7.2.4 丝状材料选择性熔覆成形	191	9.1.4 逆向工程的应用范围	225
7.2.5 其他快速成形技术	194	9.2 逆向工程的关键技术	227
7.2.6 快速原型制作实例图	195	9.2.1 数据采集	227
7.3 粉末材料选择性烧结成形系统实训 ..	197	9.2.2 数据处理	229
7.3.1 SLS 快速成形的预处理	197	9.2.3 CAD 模型重建	234
7.3.2 SLS 快速成形的后处理	201	9.3 逆向工程项目实训	238
7.3.3 SLS 工艺原型制作实例	204	9.3.1 三坐标测量实训	238
7.4 思考题	207	9.3.2 激光扫描实训	246
第 8 章 数控雕刻及激光雕刻加工	209	9.4 逆向工程实施的软件条件	249
8.1 数控雕刻加工	209	9.4.1 基于正向的商品化 CAD 系统 软件	250
8.1.1 数控雕刻机的组成、分类及 特点	209	9.4.2 专用的逆向软件	250
8.1.2 数控雕刻机的典型应用	210	9.5 思考题	251
8.1.3 数控雕刻机加工的一般步骤	211	第 10 章 数控机床的操作规程和故障处理 ..	252
8.2 激光雕刻加工	213	10.1 数控机床的安全操作与维护保养	252
8.2.1 激光加工物理基础	213	10.1.1 文明生产和安全操作规程	252
8.2.2 激光雕刻技术	214	10.1.2 数控机床的维护保养	254
8.2.3 激光雕刻机的操作规范	220	10.2 数控机床的故障诊断与排除	255
8.3 思考题	222	10.2.1 数控机床维修前的准备工作	255
第 9 章 逆向工程	223	10.2.2 数控机床常见故障的分类	257
9.1 逆向工程简介	223	10.2.3 数控机床常见故障的处理	259
9.1.1 逆向工程的定义	223	10.3 思考题	263
9.1.2 逆向工程的出现和发展	224	参考文献	264

第 1 章 数控机床基本知识

1.1 数控机床与数控技术

随着社会生产和科学技术的不断进步，工业新产品层出不穷。机械制造产业作为国民工业的基础，其产品更是日趋精密复杂，特别是在宇航、航海、军事等领域所需的机械零件，精度要求更高，形状更为复杂而且批量往往较小，传统加工技术已经很难适应现在制造业的需求，数控机床作为一种革新技术设备应运而生。

国际信息处理联盟（IFIP）第五技术委员会对数控机床定义如下：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号码或其他符号编码指令规定的程序。定义中所说的程序控制系统即数控系统。即把数字化刀具移动轨迹的信息输入数控装置，经过译码、运算，从而实现控制刀具与工件的相对运动，加工出所需零件的一种机床即为数控机床。

数控技术是现代工业实现自动化、柔性化、集成化生产的基础，是知识密集、资金密集的现代制造技术，也是国家重点发展的前沿技术。特别是在市场竞争日趋激烈的今天，市场需求不断变化，为满足加速开发研制新产品，改变单一大批量的生产格局，以数控加工技术为代表的现代制造技术呈现出强大的生命力。近几年在我国已经呈现出以数控加工技术逐步部分代替传统机械制造技术的趋势。

1.1.1 数控机床的出现和发展

1948 年，美国帕森斯公司接受美国空军委托，研制飞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想法。1949 年，该公司在美国麻省理工学院（MIT）伺服机构研究室的协助下，开始研究数控机床，并于 1952 年试制成功第一台由大型立式仿形铣床改装而成的三坐标数控铣床，不久即开始正式生产，于 1957 年正式投入使用。这是制造技术发展过程中的一个重大突破，标志着制造领域中数控加工时代的开始。数控加工是现代制造技术的基础，这一发明对于制造行业而言，具有划时代的意义和深远的影响。主要工业发达国家都十分重视数控加工技术的研究和发展。当时的数控装置采用电子管元件，体积庞大，价格昂贵，只在航空工业等少数有特殊需要的部门用于加工复杂型面零件。1959 年，制成了晶体管元件和印制电路板，使数控装置进入了第二代，体积缩小，成本有所下降。1960 年以后，较为简单和经济的点位控制数控钻床和直线控制数控铣床得到较快发展，使数控机床在机械制造业各部门逐步获得推广。1965 年，出现了第三代小规模集成电路数控装置，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大规模集成电路及小型计算机化为特征的第四代。1974 年，成功研制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。第五代与第三代相比，数控装置的功能扩大了一倍，而体积则缩小为原来的 1/20，价格降低了 3/4，可靠性也得到极大的提高。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；数控装置更趋于小型化，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。经过几十年的发展，目前的数控机床已经实现了计算机控制并在机械制造业中得到了广泛应用。

我国于1958年开始研制数控机床，成功试制出配有电子管数控系统的数控机床，1965年开始批量生产配有晶体管数控系统的三坐标数控铣床。20世纪80年代以来，在消化、吸收国外先进技术的基础上，我国数控技术有了新的发展，数控机床进入小批量生产的商品化时代。例如，从1980年开始，北京机床研究所从日本FANUC公司引进了FANUC数控系统，在引进、消化、吸收国外先进技术的基础上，北京机床研究所又开发出BS03经济型数控系统和BS04全功能数控系统。目前，我国已经能够批量生产和供应各类数控系统，并掌握了多轴（五轴以上）联动、螺距误差补偿、图形显示和高精度伺服系统等多项关键技术，基本上能够满足国内各机床生产厂家的需要，并研制了具有自主知识产权的数控技术平台和数控系统。

1.1.2 数控技术的发展趋势

现代数控机床目前大致向以下几个方面发展。

1. 高速、高精度

要提高机械加工的生产率，其中最主要的方法是提高切削速度。现代数控机床在提高加工速度的同时，也在进行高精度化，目前已可在加工最小设定单位时，进给速度达24m/min。要做到这一点，就对机械和数控系统提出更高的要求。

（1）机械方面 如机床主轴若要高速化，就要提高主轴和机床机械结构的动、静态刚度；采用能承受高速的机械零件，如采用陶瓷球的滚珠轴承等。

（2）数控系统方面 主要是提高计算机的运算速度。现代数控系统已从16位的CPU，发展到普遍采用32位CPU，并向64位CPU发展。主机频率由5MHz提高到20~33MHz。有的系统还制造了插补器的专用芯片，以提高插补速度；有的采用多CPU系统，减轻主CPU负担，进一步提高控制速度。

（3）伺服系统方面

1）采用数字伺服系统。使伺服电动机的位置环、速度环的控制都实现数字化。FANUC 15系列开发出专用的数字信号处理器，位置指令输入后，它与从脉冲编码器来的位置信息，以及检测出的电动机电流信息一起，在专用的微处理器芯片内，进行控制位置、速度和电动机电流的运算，最后向功率放大器发出指令，以达到对电动机的高速、高精度控制。

2）采用现代控制理论提高跟随精度。当数控系统发出位置指令后，由于机械部分不能很快响应而会产生滞后现象，影响了加工精度。现代控制理论中有各种算法能够实现高速和高精度的伺服控制，但是，由于他们的计算方法和存储容量都加大很多，有时还可采用专用芯片的办法，使复杂的计算能够在线实现，从而使得滞后量减少很多，提高了跟随速度。

3）采用高分辨率的位置编码器。一般交流伺服电动机轴上装有回转编码器（脉冲发生器）用于检测电动机的角位移。显然，编码器的分辨率越高，则电动机转动角度就越精确。现代高分辨率位置编码器绝对位置的测量可达163840脉冲/r。

4）实现多种补偿功能。数控系统能实现多种补偿功能，提高数控机床的加工精度和动态特性。数控系统的补偿功能主要用于补偿机械系统带来的误差。例如：

① 直线度的补偿。随着某一轴的运动，对另一轴加以补偿，提高工作台运动的直线度。

② 采用新的丝杠导程误差补偿方法。用几条近似线表示导程误差，仅对其中几个点进行补偿。此法可减少补偿数据的设定点数，使补偿方法大为简化。

③ 丝杠、齿轮间隙补偿。

④ 热变形误差补偿，用于补偿由于机床热变形而产生机床几何位置变化引起的加工误差。

⑤ 刀具长度、半径等补偿。

⑥ 存储型补偿。这种补偿方法，可根据机床使用的实际情况（如机床零件的磨损情况等）适时地修订补偿值。

2. 提高数控系统的可靠性

提高数控系统的可靠性，可大大降低数控机床的故障率。新型的数控系统大量采用大规模和超大规模集成电路，还采用专用芯片提高集成度以及使用表面封装技术等方法，减少了元器件数量和它们之间的连线和焊点数目，从而大幅度降低系统的故障率。

此外，现代数控系统还具有人工智能（AI）故障诊断系统，用它来诊断数控系统及机床的故障，把专家们所掌握的对于各种故障的原因及处置方法作为知识库储存到计算机的存储器中，以知识库为依据来开发软件，分析查找故障原因。只要通过回答显示器提出的简单问题，就能和专家一样诊断出机床的故障原因以及提出排除故障的方法。

3. CNC 系统的智能化

由于 CNC 系统使用的计算机容量越来越大，运算速度越来越快，使得 CNC 系统不仅能完成机床的数字控制功能，而且还可以充分利用软件技术，使系统智能化，给读者以更大的帮助。例如，将迄今为止必须由编程人员决定的零件的加工部位、加工工序、加工顺序等，也可由 CNC 系统自动地决定。操作人员只要将加工形状和必要的毛坯形状输进 CNC 系统，就能自动生成加工程序。这样，NC 加工的编程时间大为缩短，即使经验不足的操作人员也能进行操作。

CNC 系统如何与人工智能技术相结合，尚待发展。除了上述在故障诊断和编程方面的应用外，还有更大的领域留待人们去探索。

4. 具有更高的通信功能

越来越多的工厂希望将多台数控机床组成各种类型的生产线或 DNC（Direct Numerical Control 直接数字控制）系统，这就要求 CNC 系统提高联网能力。一般 CNC 系统都具有 RS232 远距离串行接口，可以按照用户的格式要求，与同一级计算机进行多种数据交换。

为了满足不同厂家对不同类型数控机床联网功能要求，现代数控系统大都具有 MAP（制造自动化协议）接口，现在已实现了 MAP3.0 版本，并采用光缆通信，以提高数据传送速度和可靠性。

1.2 数控机床的组成、基本工作原理以及特点和应用

数控机床又称 CNC（Computer Numerical Control 计算机数字控制）机床，是电子计算机或专用电子计算装置对数字化信息进行处理而实现自动控制的机床。

1.2.1 数控机床的组成

数控机床一般由程序输入装置、数控装置、伺服系统、强电控制装置、检测装置和机床本体六部分组成，如图 1-1 所示。

1. 程序输入装置

程序输入装置的作用是将程序载体（包括穿孔纸带、磁带、软盘等）上的数控代码信息转换成相应的电脉冲信号传送至数控装置。

现代对于微机控制的数控机床可用操作面板上的键盘直接把加工程序输入到数控装置，或通

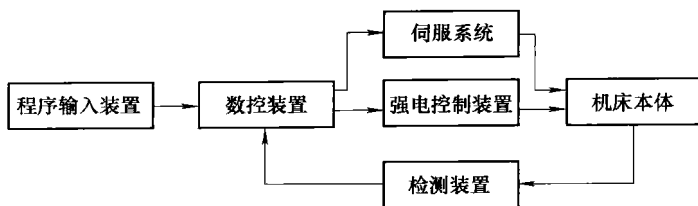


图 1-1 数控机床的组成

过 PC 与 CNC 之间的连接直接把程序输入数控装置。

2. 数控装置

数控装置是数控机床的控制核心，其功能是接受程序输入装置输入的加工信息，经译码、处理与计算，发出相应的脉冲送给伺服系统，通过伺服系统使机床按预定的轨迹运动。一般一台机床专用计算机包括：印制电路板、各种电器元件、显示器和键盘等部分。

数控装置的基本工作过程：

(1) 译码 将程序段中的各种信息，按一定语法规则翻译成数控装置能识别的语言，并以一定的格式存储在指定的内存专用区间。

(2) 刀具补偿 刀具补偿包括刀具长度补偿、刀具半径补偿。

(3) 进给速度处理 编程给定的刀具移动速度是加工轨迹切线方向的速度，速度处理就是将其分解成各运动坐标方向的分速度。

(4) 插补 一般数控装置能对直线、圆弧进行插补运算。一些专用或较高档的数控装置还可以完成椭圆、抛物线、正弦曲线和一些专用曲线的插补运算。

(5) 位置控制 在闭环数控装置中，位置控制的作用是在每个采样周期内，把插补计算得到的理论位置与实际反馈位置相比，用其差值去控制进给电动机。

3. 伺服系统

机床伺服系统是数控系统的执行部分，是以机床移动部件（工作台）的位置和速度作为控制量的自动控制系统。它由速度控制装置、位置控制装置、驱动伺服电动机和相应的机械传动装置组成。其功能是接受数控装置输出的脉冲信号指令，使机床上的移动部件作相应的移动。每一个脉冲信号指令使机床移动部件产生的位移量称为脉冲当量，常用的脉冲当量为 $0.01\text{mm}/\text{脉冲}$ 或 $0.001\text{mm}/\text{脉冲}$ 。

伺服系统应满足的要求是，进给速度范围要大（如 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 低速趋近， $24\text{m}/\text{min}$ 快速移动），位移精度要高，工作速度响应要快以及工作稳定性要好。

伺服系统由驱动装置和执行机构组成。驱动装置是执行机构（工作台、主轴）的驱动部件，它由伺服驱动器与伺服电动机组成。

数控机床的伺服系统按其控制方式，可分为开环伺服系统、半闭环伺服系统、闭环伺服系统三大类。

4. 强电控制装置

强电控制装置的主要功能是接受数控装置控制的内置式可编程控制器（PLC）输出的主轴变速、换向、起动或停止，刀具的选择和更换，分度工作台的转位和锁紧，工件的夹紧或松开，切削液的开启或关闭等辅助操作的信号，经功率放大直接驱动相应的执行元件，诸如接触器、电磁阀等，从而实现数控机床在加工过程中的全部自动操作。

5. 检测装置

在半闭环和闭环伺服控制装置中，使用位置检测装置间接或直接测量执行部件的实际进给位

移，并与指令位移进行比较，将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动。常用的位移检测元件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅及磁栅等。

6. 机床本体

机床本体是数控机床的机械部分，包括床身、主轴箱、工作台、进给机构、辅助装置（如刀库液压气动装置、冷却系统和排屑装置等）。数控机床是高精度、高生产率的自动化加工机床。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很大的差异。这些差异能更好地满足数控技术的要求，并充分适应数控加工的特点。通常对数控机床的精度、静刚度、动刚度和热刚度等均提出了更高的要求，而传动链则要求尽可能的简单。

数控机床的机床本体的特点有：

- 1) 由于采用了高性能的主轴及伺服传动系统，数控机床的机械传动结构大为简化，传动链较短。
- 2) 为适应连续地自动化加工，数控机床机械结构一般要求具有较高的动刚度和阻尼，具有较高的耐磨性，而且热变形要小。
- 3) 为了减小摩擦，提高传动精度，数控机床更多地采用高效传动部件，如滚珠丝杠副、直线滚动导轨及使用直线电动机等。

1.2.2 数控机床的基本工作原理

在数控机床上加工零件通常经过的步骤有：

- 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，并把它记录在程序载体上。
- 2) 把程序载体上的程序通过输入装置输入到 CNC 装置中。
- 3) CNC 装置将输入的程序经过处理之后，向机床各个坐标的伺服系统发出信号。
- 4) 伺服系统根据 CNC 装置发出的信号，驱动机床的运动部件，并控制必要的辅助操作。
- 5) 通过机床的机械部件带动刀具与工件的相对运动，加工出工件。
- 6) 检测机床的运动，并通过反馈装置反馈给 CNC 装置，以减小加工误差。当然，开环数控机床是没有检测、反馈系统的。

1. 程序载体

数控机床是按照输入的零件加工程序运行的。零件的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（进给量、主轴转数等）和辅助运动等。将零件加工程序用一定的格式和代码，储存在一种程序载体上，如穿孔纸带、光盘、盒式磁带或软盘等，通过数控机床的输入装置，将程序信息输入到 CNC 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 CNC 装置。根据程序载体的不同，相应有不同的输入装置，例如：对于穿孔纸带，配对光电读阅机；对于盒式磁带，配对录放机；对于软盘，配对软盘驱动器和驱动卡。有时为了用户方便，数控机床可以同时配备两种输入装置。

现代数控机床，还可以通过手动方式（MDI 方式），将零件加工程序，用数控系统的操作面板上的按键，直接输入到 CNC 装置；或者采用与上级机通信方式直接将加工程序输入到 CNC 装置。

3. CNC 装置

CNC 装置由信息输入、处理和输入输出三个部分组成。程序载体通过输入装置将加工信息传

给 CNC 装置, 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。

数控机床的辅助操作, 如刀具的选择与更换、切削液的开停等能够用可编译程序控制器 (PLC) 进行控制。现代数控系统中, 一般备有 PLC 附加电路板, 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。无论从技术上或经济上都是有利的。

4. 伺服系统

伺服系统是数控机床的重要组成部分。它和一般机床进给系统的根本区别是: 一般进给系统只能稳定传递所需的力量和速度, 但不能接受随机的输入信息, 不能控制执行部件的位移和轨迹; 伺服系统则不然, 它能够将数控装置送来的指令信息加以放大, 经功率放大后, 通过机床进给传动元件 (如齿轮减速箱和滚珠丝杠螺母等) 去驱动机床移动部件 (工作台或刀架), 以便精确定位或按照规定的速度和轨迹运动, 使机床加工出符合图样要求的零件。

伺服系统直接影响数控机床的加工速度、位置、精度、表面粗糙度等, 它是数控机床的关键部件。

伺服系统中常见的驱动装置, 随控制系统的不同而不同。开环伺服系统常使用步进电动机, 闭环伺服系统常使用脉宽调速直流电动机和交流伺服电动机等。

5. 位置反馈系统

位置反馈系统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 装置, 与指令位置进行比较, 并且由 CNC 装置发出指令, 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)、自动托盘交换装置等。与普通机床相比, 数控机床的传动系统更为简单, 但对机床的动、静刚度要求更高, 传动装置的间隙要尽可能地小, 滑动面的摩擦因数要小, 并要有合适的阻尼, 以适应数控机床高定位精度和良好控制性能的要求。

1.2.3 数控机床的特点和应用

1. 数控机床的特点

(1) 具有高度柔性 数控机床的刀具运动轨迹由加工程序决定, 因此只要能编制出程序, 无论多么复杂的型面都能加工。当加工工件改变时, 只需要改变加工程序就可以完成工件的加工。因此, 数控机床既适合于零件频繁更换的场合, 也适合单件小批量生产及产品开发, 可缩短生产准备周期, 有利于机械产品的更新换代。

(2) 加工精度高, 尺寸一致性好 数控机床本身精度比较高, 一般数控机床的定位精度为 $\pm 0.01\text{mm}$, 重复定位精度为 $\pm 0.005\text{mm}$, 在加工过程中操作人员不参与操作, 工件的加工精度全部由机床保证, 消除了人为误差。因此, 加工出来的工件精度高, 尺寸一致性好, 质量稳定。

(3) 生产效率高 由于数控机床在结构设计上采用了有针对性的设计, 因此数控机床的主轴转速、进给速度和快速定位速度都比较高, 可以合理选择高的切削参数, 充分发挥刀具的切削性能, 减少切削时间, 还可以自动地完成一些辅助动作, 不需要在加工过程中进行中间测量, 能连续完成整个加工过程, 减少了辅助动作时间和停机时间, 即有效地减少了零件的加工时间, 因此, 数控机床的生产效率高。

(4) 减轻劳动强度且可能实现一人多机操作 一般数控机床加工出第一件合格工件后, 操

作人员只需要进行工件的装夹和起动机床，加工过程不需要人为干预，从而大大减轻了操作人员的劳动强度。现在的数控机床可靠性高，保护功能齐全，并且数控系统有自诊断和自停机功能，当一个工件的加工时间比其装夹时间长时，就能实现一人多机操作。

(5) 经济效益明显 虽然数控机床一次投资及日常维护保养费用较普通机床要高得多，但是若能充分地发挥数控机床的加工能力，将会带来良好的经济效益。这些效益不仅表现在生产效率高，加工质量好，废品少，而且还有减少工装和量刀具，缩短生产周期，减少再制品数量，缩短新产品试制周期等优势，从而为企业带来良好的经济效益。

(6) 利于生产管理现代化 在数控机床上，加工时间是可以预计的，并且每件的加工时间是不变的，因而工时和工时费用可以精确估计。有利于精确编制生产进度表、均衡生产和取得更高的预计产量。因此，有利于生产管理现代化。

与普通机床相比，数控机床价格昂贵，养护与维修费用较高，如果使用和管理不善，容易造成浪费并直接影响经济效益。因此，要求设备操作人员和管理人员有较高的素质，严格遵守操作规程和履行管理制度，以降低生产成本，提高企业的经济效益和市场竞争力。

2. 数控机床的应用

最适合应用数控加工的零件有：

- 1) 批量小而又多次生产的零件。
- 2) 几何形状复杂，加工精度高，用普通机床无法加工，或虽然能加工但很难保证加工质量的零件。
- 3) 在加工过程中必须进行多种加工，即在一次装夹中要完成铣、镗、铇、铰或攻螺纹等多工序的零件。
- 4) 用数学模型描述的复杂曲线或曲面轮廓零件。
- 5) 切削余量大的零件。
- 6) 必须严格控制公差 of 的零件。
- 7) 工艺设计会变化的零件。
- 8) 加工过程中如果发生错误将会造成严重浪费的贵重零件。
- 9) 需全部检验的零件。

1.3 数控系统

1.3.1 数控系统的组成

数控系统主要是靠存储程序来实现各种机床的不同控制要求。由图 1-2 可知，整个数控系统由程序、输入/输出设备、计算机数控（CNC）装置、可编程控制器单元、主轴控制单元和速度控制单元等部分组成，习惯上简称为 CNC 系统。CNC 系统能自动阅读输入程序载体上事先给定的数字值并将其译码，从而使机床动作并加工出符合要求的零件。

CNC 系统的核心是计算机数控（CNC）装置。CNC 装置实质上是一种专用计算机，它除了具有一般计算机的结构外，还有和数控机床功能有关的功能模块结构和接口单元。CNC 装置由硬件和软件两大部分组成。硬件是基础，软件必须在硬件的支持下运行；软件是灵魂，离开软件，硬件便无法工作；两者相辅相成，缺一不可。硬件的集成度、位数、运算速度、指令系统和内存容量等在很大程度上决定了数控装置的性能，然而高水平的软件又可以弥补硬件性能的某些不足。

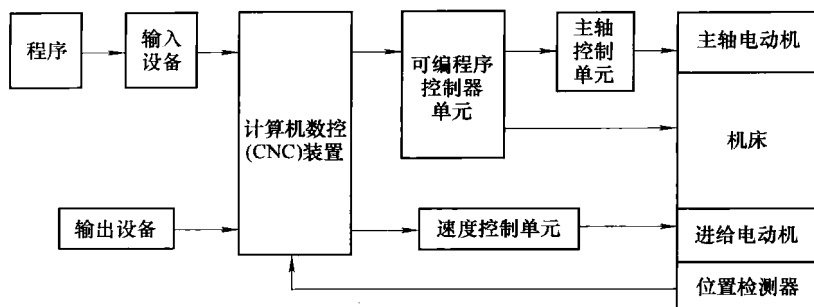


图 1-2 数控系统的组成

CNC 装置在采用微处理机和微型计算机以后，它的性能和可靠性大大提高，而成本却不断下降，其优越的性价比，促进了数控机床迅速发展。

1.3.2 CNC 装置的工作过程

CNC 装置的工作过程是在硬件的支持下，执行软件的过程。CNC 装置的工作原理是通过输入设备输入机床加工零件所需的各种数据信息，经过译码、计算机处理、运算，将每个坐标轴的移动分量送到其相应的驱动电路，经过转换、放大、驱动伺服电动机，带动坐标轴运动，同时进行实时位置反馈控制，使每个坐标轴都能精确移动到指令所要求的位置。下面从输入、译码、刀具补偿、进给速度处理、插补、位置控制、I/O 接口、显示和诊断方面来简述 CNC 装置的工作过程。

1. 输入

CNC 装置开始工作时，首先要通过输入设备完成加工零件各种数据信息的输入工作。输入给 CNC 装置的各种数据信息包括零件程序、控制参数和补偿数据，输入方式有光电阅读机纸带输入、键盘输入、磁盘输入、通信接口输入和连接上级计算机的 DNC 接口输入。在输入过程中，CNC 装置还要完成输入代码、校验和代码转换。输入的全部数据信息都存储在 CNC 装置的存储器中。

2. 译码

在输入过程完成后，CNC 装置就要对输入的信息进行译码，即将零件程序以程序段为单位进行处理，把其中的零件轮廓信息、加工速度信息及其他辅助信息，按照一定的语法规则解释成计算机能识别的数据形式，并以一定的数据格式放在指定的内存专用区内。在译码过程中还要完成对程序段的语法检查等工作。若发现语法错误立即报警显示。

3. 刀具补偿

通常情况下，CNC 机床是以零件加工轮廓轨迹来编程的，但是 CNC 装置控制的是刀具中心轨迹（刀架中心点和刀具中心点），而不是刀尖轨迹。刀具补偿的作用是把零件轮廓轨迹转换为刀具中心轨迹。刀具补偿是 CNC 装置在实时插补前要完成的一项插补准备工作。刀具补偿包括刀具半径补偿和刀具长度补偿（刀具偏置）。目前，在较先进的 CNC 装置中，刀具补偿功能还包括程序段之间的自动转接和切削判别，即所谓的 C 功能刀具补偿。

4. 进给速度处理

CNC 装置在实时插补前要完成的另一项插补准备工作是进给速度处理。因为编程指令给出的刀具移动速度是在各坐标合成方向上的速度，进给速度处理要根据合成速度计算出各坐标方向

的分速度。此外，还要对机床允许的最低速度和最高速度的限制进行判别处理，以及用软件对进给速度进行自动加、减速处理。

5. 插补

插补就是通过插补程序在一条已知曲线的起点和终点之间进行“数据点的密化”工作。CNC 装置中有一个采样周期，即插补周期，一个插补周期形成一个微小的数据段。执行若干个插补周期后实现从曲线的起点到终点的加工。插补程序在一个插补周期内运行一次，程序执行时间直接决定了进给速度的大小。因此，插补计算的实时性很强，只有尽量缩短每一次插补运算的时间，才能提高最大进给速度和留有一定的空闲时间，以便更好地处理其他工作。

6. 位置控制

由图 1-2 可知，位置控制是在伺服系统的位置环上。位置控制可以由软件完成，也可以由硬件完成。它的主要任务是在每个采样周期内，将插补计算出的指令位置与实际位置的反馈进行比较，获得差值去控制进给伺服电动机。在位置控制中，通常还要完成位置回路的增益调整，各坐标方向的螺距误差补偿和反向间隙补偿，以提高机床的定位精度。

7. I/O 接口

I/O 接口主要是处理 CNC 装置与机床之间强电信号的输入、输出和控制，例如换刀、换挡和冷却等。

8. 显示

CNC 装置显示的主要作用是便于操作人员对机床进行各种操作，通常有零件程序显示、参数显示、刀具位置显示、机床状态显示、报警显示等。有些 CNC 装置中还有刀具加工轨迹的静态和动态图形显示。

9. 诊断

现代 CNC 机床都具有联机 and 脱机诊断功能。联机诊断是指 CNC 装置中的自诊断程序随时检查不正常的事件。脱机诊断是指系统空转条件下的诊断。一般 CNC 装置都配备脱机诊断程序，用以检查存储器、外围设备和 I/O 接口等。脱机诊断还可以采用远程通信方式进行诊断。把用户的 CNC 装置通过电话线与远程通信诊断中心的计算机相连，由诊断中心计算机进行诊断、故障定位和修复。

1.3.3 CNC 装置的功能

CNC 装置的功能是指它满足不同控制对象各种要求的能力，通常包括基本功能和选择功能。基本功能是数控系统必备的功能，如控制功能、准备功能、插补功能、进给功能、主轴功能、辅助功能、刀具功能、字符显示功能和自诊断功能等。选择功能是供用户根据不同机床的特点和用途进行选择的功能，如补偿功能、循环功能、通信功能和人机对话编程功能等。下面简要介绍 CNC 装置的基本功能和选择功能。

1. 基本功能

(1) 控制功能 控制功能是指 CNC 装置控制各类转轴的功能，功能强弱取决于能控制的轴数以及能同时控制的轴数（即联动轴数）多少。控制轴有移动轴和回转轴、基本轴和附加轴。一般数控车床只需同时控制两个轴；数控铣床、镗床以及加工中心等需要有三个或三个以上的控制轴；加工空间曲面的数控机床需要三个以上的联动轴。控制轴数越多，尤其是联动轴数越多，CNC 装置就越复杂，编制程序也越困难。

(2) 准备功能 准备功能也称 G 功能，用于指定机床的动作方式，包括基本移动、程序暂停、平面选择、坐标设定、刀具补偿、基准点返回、固定循环、米寸制转换等指令，它用字母 G

和其后的两位数字表示。ISO 标准中准备功能有 G00 ~ G99 共 100 种, 数控系统可以从中选用。

(3) 插补功能 现代 CNC 机床的数控装置将插补分为软件插补和硬件插补两步进行: 先由软件算出每一个插补周期应走的线段长度, 即粗插补, 再由硬件完成线段长度上的一个个脉冲当量逼近, 即精插补。由于数控系统控制加工轨迹的实时性很强, 插补计算程序要求不能太长, 采用粗、精两级插补能满足数控机床高速度和高分辨率的发展要求。

(4) 进给功能 进给功能用 F 指令直接指定各轴的进给速度。

1) 切削进给速度。以每分钟进给距离的形式指定刀具切削速度, 用字母 F 和其后的数字指定。ISO 标准中规定 F1 ~ F5 共 5 种。字母 F 后的数字为进给速度的位数。

2) 同步进给速度。以主轴每转进给量规定的进给速度, 单位为 mm/r。

3) 快速进给速度。数控系统规定了快速进给速度, 它通过参数设定, 用 G00 指令执行快速移动, 还可用操作面板上的快速倍率开关分挡。

4) 进给速率。操作面板上设置了进给倍率开关, 倍率可在 0% ~ 200% 之间变化, 每挡间隔 10%。使用进给倍率开关时, 可不必修改程序中的 F 代码, 就可改变机床的进给速度。

(5) 主轴功能 主轴功能是指定主轴转速的功能, 用字母 S 和其后的数值表示。一般用 S2 和 S4 表示, 多用 S4, 其单位为 r/min 或 mm/min。主轴转向用 M03 (正向) 和 M04 (反向) 指定。机床操作面板上设置主轴倍率开关, 可以不修改程序改变主轴转速。

(6) 辅助功能 辅助功能是指用于指定主轴的开停、转向、冷却泵的通和断, 刀库的开停等的功能, 用字母 M 和其后的两位数字表示。ISO 标准中辅助功能有 M00 ~ M99, 共 100 种。

(7) 刀具功能 刀具功能是指用于选择刀具的功能, 用字母 T 和其后的两位或四位数字表示。

(8) 字符显示功能 CNC 装置可配置单色或彩色不同尺寸的 CRT 或液晶显示器, 通过软件和接口实现字符和图形显示。可以显示程序、参数、补偿值、坐标位置、故障信息、人机对话编程菜单、零件图形等。

(9) 自诊断功能 CNC 装置中设置了故障诊断程序, 可以防止故障的发生或扩大。在故障出现后可迅速查明故障类型及故障部位, 减少故障停机时间。不同 CNC 装置诊断程序的设置不同, 可以设置在系统程序中, 在系统运行过程中进行检查和诊断, 也可作为服务性程序, 在系统运行前或故障停机后诊断故障的部位。还可以进行远程通信故障诊断。

2. 选择功能

(1) 补偿功能 在加工过程中, 由于刀具磨损或更换刀具, 以及机械传动中的丝杠螺距误差和反向间隙等, 将使实际加工出的零件尺寸不一致, 造成加工误差。CNC 装置的补偿功能是把刀具长度或半径的补偿量、螺距误差和反向间隙误差的补偿量输入到其存储器中, 存储器就按补偿量重新计算刀具运动的轨迹和坐标尺寸, 加工出符合要求的零件。

(2) 循环功能 用数控机床加工零件, 一些典型的加工工序, 如钻孔、镗孔、深孔钻削、攻螺纹等, 所需完成的动作循环十分典型。将这些典型动作预先编好程序并存储在内存中, 用 G 代码进行指令, 形成固定循环功能。固定循环功能可以大大简化程序编制。

(3) 通信功能 CNC 装置通常具有 RS232C 接口, 有的还配置有 DNC 接口, 可以连接多种输入、输出设备, 实现程序和参数的输入、输出和存储。有的 CNC 装置可以与 MAP (制造自动化协议) 相连, 接入工厂的通信网络, 以适应 FMS \ CIMS 的要求。

(4) 人机对话编程功能 有的 CNC 装置可以根据蓝图直接编程, 编程人员只需输入表示图样上几何尺寸的简单命令, 就能自动地计算出全部交点、切点和圆心坐标, 生成加工程序。有的 CNC 装置可以根据引导图和说明显示进行对话式编程。有的 CNC 装置还备有用户宏程序, 用户宏程序是根据 CNC 装置提供的一套编程语言——宏程序编程指令, 自己编写的一些特殊加工子