



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新
版

21世纪

高职高专系列教材

数控机床原理及应用

©何伟 主编

提供电子教案增值服务

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高职高专系列教材

数控机床原理及应用

主 编 何 伟
副主编 张桂花 邓怀宇
主 审 林昌杰



机械工业出版社

本书以数控机床原理及数控编程为主线,比较全面、系统地叙述了数控机床技术及应用的有关内容。全书包括数控机床概述、数控机床的机械结构与工作原理、数控机床进给伺服驱动系统、数控机床电气控制系统、数控机床加工工艺、数控机床程序编制基础等内容。每章后附有习题与思考题。

本书可以作为高职、高专、成人高校数控技术应用专业、数控技术加工专业、机电一体化专业、机械制造专业、模具设计与制造专业的教材,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控机床原理及应用/何伟主编. —北京:机械工业出版社,2007.4
(21世纪高职高专系列教材)
ISBN 978-7-111-21071-9

I. 数… II. 何… III. 数控机床—高等学校:技术学校—教材
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 028871 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:赵丽欣 版式设计:张世琴 责任校对:张晓蓉
封面设计:雷明顿 责任印制:洪汉军
北京汇林印务有限公司印刷

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·13.75 印张·335 千字
0001-5000册

标准书号:ISBN 978-7-111-21071-9

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专机电专业系列教材 编委会成员名单

主 任 吴家礼
副 主 任 任建伟 李望云 张 华 梁 栋 盛靖琪
委 员 (排名不分先后)
陈志刚 陈剑鹤 韩满林 李柏青
盛定高 张 伟 李晓宏 刘靖华
陈文杰 程时甘 韩全立 张宪立
胡光耀 苑喜军 李新平 吕 汀
杨华明 刘达有 程 奎 李益民
吴元凯 王国玉 王启洋 杨文龙
秘 书 长 胡毓坚
副 秘 书 长 郝秀凯

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革的不断深入,以及新技术、新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,将努力将最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是编者在多年从事“数控机床原理及应用”课程教学与实践经验的基础上，广泛征求教师、专家意见，结合高等职业技术教学特点和教学大纲精神编写的机电类专业教材。

数控机床涵盖了科学技术发展的最新成果，课程内容涉及面较广。考虑到机电类专业对该课程内容的需求和许多企业要求机电类专业人员熟悉加工工艺和数控编程等应用知识的实际情况，本书以数控机床原理及数控编程为主线，比较全面、系统地叙述了数控机床技术及应用的有关内容，基础理论以“必需、够用”为度，数控编程以华中数控系统为主，应用实例紧密结合生产实际，重在应用，突出了内容的先进性、技术的综合性。全书包括数控机床概述、数控机床的机械结构与工作原理、数控机床进给伺服驱动系统、数控机床电气控制系统、数控机床加工工艺、数控机床程序编制基础等内容。每章后附有适当的习题与思考题，便于学生复习。

本书通俗易懂，涉及面广，内容丰富，可操作性强，适合于高等职业教育使用。可以作为高职、高专、成人高校数控技术应用专业、数控技术加工专业、机电一体化专业、机械制造专业、模具设计与制造专业的教材，也可供有关技术人员参考。

本书第1、4章由刘滨、周凌华编写，第2、3章由欧阳全会、段少丽、童星编写，第5章由张桂花、周凌华编写，第6、7、8章由何伟编写。本书由武汉交通职业学院何伟任主编并统稿，提出了全书的总体构思、编写大纲及编写的指导思想。张桂花任副主编并协助进行文字整理和绘制插图的工作。武汉华中数控股份有限公司邓怀宇工程师任副主编，对本书的编写提供了很多的帮助。参加本书编写工作的还有陶松桥、周丽、范有雄等。孙超、王妮在绘制插图和文字整理工作中做了大量的工作，孙真、金旭东、张亮等在数控编程上做了一定的工作，在此表示感谢。林昌杰教授在本书的编写中提出了不少宝贵意见和建议，在此表示衷心感谢。

为了方便教师教学，本书提供相关的教学资料（包括课件、电子教案、部分上课录像、答疑等内容），读者可以在 <http://www.whjzy.net/hw/index.html> 上下载，也可以在 <http://www.cmpbook.com> 上下载电子教案。

由于编者的水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 数控机床概述 1

1.1 数控机床简介 1

1.1.1 数控技术与数控机床 1

1.1.2 数控加工技术 2

1.2 数控机床的工作原理及组成 3

1.2.1 数控机床的组成及各部分功能 3

1.2.2 数控机床的工作原理 5

1.2.3 数控机床的规格、性能和可靠性指标 6

1.3 数控机床的特点与分类 7

1.3.1 数控机床的特点 7

1.3.2 数控机床的分类 9

1.4 数控技术及数控机床的发展 13

1.4.1 数控技术及数控机床的产生与发展历史 13

1.4.2 数控技术及数控机床的发展趋势 14

1.5 习题与思考题 15

第 2 章 数控机床的机械结构与工作原理 16

2.1 数控机床的主传动系统 16

2.1.1 主传动系统的特点 16

2.1.2 数控机床主轴的变速方式 17

2.1.3 主轴部件 18

2.1.4 典型主传动系统及部件结构 22

2.2 数控机床的自动换刀装置 25

2.2.1 自动换刀装置的形式 26

2.2.2 刀库 31

2.3 习题与思考题 42

第 3 章 数控机床进给伺服驱动系统 43

3.1 数控机床进给伺服系统的机械传动结构 43

3.1.1 进给传动机械结构的性能与

特点 43

3.1.2 电动机与丝杠的联接 44

3.1.3 滚珠丝杠螺母副 45

3.1.4 进给传动系统齿轮间隙的消除 52

3.2 进给伺服驱动系统的组成和基本原理 54

3.2.1 步进电动机开环伺服系统 54

3.2.2 闭环伺服驱动系统 59

3.2.3 数控机床检测元件 63

3.3 习题与思考题 70

第 4 章 数控机床电气控制系统 72

4.1 计算机数控系统 72

4.1.1 CNC 系统的组成与功能 72

4.1.2 CNC 系统的硬件结构 74

4.1.3 CNC 装置的软件结构 75

4.1.4 软件插补方法 78

4.2 可编程控制器系统 81

4.2.1 PLC 的结构、特点及工作原理 82

4.2.2 数控机床的 PLC 控制系统 86

4.3 数控机床的控制信息与接口信息 89

4.3.1 数控机床的控制信息 89

4.3.2 NC 侧与 MT 侧的概念 89

4.3.3 数控机床的接口信息 89

4.3.4 数控机床输入/输出和通信接口 90

4.4 习题与思考题 91

第 5 章 数控机床加工工艺 92

5.1 数控加工工艺分析与设计 92

5.1.1 制定数控加工工艺的内容 92

5.1.2 数控加工的工艺性分析 92

5.1.3 数控加工工艺路线设计 94

5.1.4 数控加工工序设计 95

5.1.5 数控加工专用技术文件的编写 100

5.2 数控车削加工工艺基础 101

5.2.1	数控车削加工方法及工艺特点	101
5.2.2	数控车削加工进给路线的确定	101
5.2.3	典型数控车削加工工艺分析实例	104
5.3	数控铣削加工工艺基础	106
5.3.1	数控铣削加工方法及工艺特点	106
5.3.2	数控铣削加工进给路线的确定	108
5.3.3	典型数控铣削加工工艺分析实例	111
5.4	习题与思考题	115
第6章 数控机床程序编制基础 117		
6.1	程序编制的基本知识	117
6.1.1	数控机床编程的基本概念	117
6.1.2	机床坐标轴	118
6.1.3	机床坐标系、机床原点和机床参考点	119
6.1.4	工件坐标系、程序原点和对刀点	121
6.1.5	程序结构	122
6.2	常用准备功能和辅助功能	123
6.2.1	准备功能 G 代码	123
6.2.2	辅助功能 M 代码	127
6.2.3	主轴功能 S、进给功能 F 和刀具功能 T	130
6.2.4	工件坐标系设定指令 G92	130
6.2.5	绝对值编程与相对值编程指令 G90、G91	132
6.2.6	坐标平面选择指令 G17、G18、G19	132
6.2.7	进给控制指令 G00、G01、G02、G03、G04	133
6.2.8	回参考点控制指令 G28、G29	140
6.3	子程序调用	141
6.3.1	子程序调用指令 M98 及子程序返回指令 M99	141
6.3.2	子程序调用应用实例	141
6.4	习题与思考题	143

第7章 数控车床的程序编制		144
7.1	数控车床几个常用的 G 指令	144
7.1.1	有关单位设定的 G 指令	144
7.1.2	直径方式和半径方式编程指令 G36、G37	145
7.1.3	恒线速度指令 G96、G97	145
7.1.4	倒角加工指令	147
7.2	车削加工简单循环指令	149
7.2.1	内(外)径切削循环指令 G80	149
7.2.2	端面切削循环指令 G81	150
7.3	车削加工复合循环指令	151
7.3.1	内(外)径粗车复合循环指令 G71	151
7.3.2	端面粗车复合循环指令 G72	154
7.3.3	闭环车削复合循环指令 G73	156
7.4	螺纹切削加工指令	157
7.4.1	单行程螺纹切削指令 G32	157
7.4.2	简单循环螺纹切削指令 G82	160
7.4.3	螺纹切削复合循环指令 G76	161
7.5	车削刀具补偿功能	163
7.5.1	刀具几何尺寸补偿与刀具磨损补偿	163
7.5.2	刀具刀尖半径补偿原理	164
7.5.3	刀具刀尖圆弧半径补偿指令 G40、G41、G42	166
7.6	数控车削加工编程综合实例	168
7.7	习题与思考题	170
第8章 数控铣床的程序编制		172
8.1	铣削刀具补偿功能	172
8.1.1	刀具半径补偿指令 G40、G41、G42	172
8.1.2	刀具半径补偿过程中的过切及棱角过渡现象	176
8.1.3	刀具长度补偿指令 G43、G44、G49	179
8.2	数控铣床中有关坐标系的指令	181
8.2.1	直接机床坐标系编程指令 G53	181
8.2.2	工件坐标系选择指令 G54~G59	182
8.2.3	局部坐标系设定 G52	186

8.3 简化编程指令	187	8.4.4 镗孔循环指令 G76、G85、G86、 G87、G88、G89	198
8.3.1 镜像功能 G24、G25	187	8.5 数控铣削加工编程实例	201
8.3.2 缩放功能 G50、G51	189	8.5.1 简单二维轮廓零件的数控铣削加工 手工编程实例	201
8.3.3 旋转变换 G68、G69	191	8.5.2 简单二维轮廓零件数控挖槽铣削 加工手工编程实例	204
8.4 固定循环指令	192	8.6 习题与思考题	207
8.4.1 固定循环组成及动作顺序 指定	193	参考文献	209
8.4.2 钻孔循环指令 G73、G81、G82、 G83	195		
8.4.3 攻螺纹循环指令 G84、G74	196		

第 1 章 数控机床概述

本章要点

- 数控机床、数控技术与数控加工的概念
- 数控机床的控制原理、组成和性能指标
- 数控机床的特点及分类
- 数控技术及数控机床的发展及技术水平

1.1 数控机床简介

随着社会的进步及科技的发展，产品更新换代的速度不断加快，人们对产品多样化的需求不断增加，使得机械加工技术经历了用机器代替手工、从作坊形成工厂、由单件生产方式发展到多品种小批量生产方式和机械制造的柔性化、系统化、智能化生产方式等三个发展阶段。

随着计算机、自动控制、伺服驱动、精密测量、新型机械结构等多方面的技术成果及其在机械加工技术中的应用，一种灵活、通用、高精度、高效率的自动化生产设备——数控机床应运而生，并已成为先进制造技术不可缺少的工艺装备。

1.1.1 数控技术与数控机床

数控，即数字控制（Numerical Control, NC），一般定义为“用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法”，所谓“数字化信号”是相对于模拟控制而言的。机床中的数字控制专指用数字化信号对机床的工作过程进行的可编程自动控制。这种用数字化信息（数字量及字符）发出指令并实现自动控制的技术即数控技术。

数控技术最先应用于机床控制，包括对刀具和工件间相对运动的几何信息控制（即运动轨迹行程量控制），机床完成加工所必需的辅助工艺信息控制（即机床运动开关量逻辑控制），如主轴转速、主轴转向、刀具选择、切削液开闭等。这种采用了数控技术的机床即数控机床。

国际信息处理联盟（international federation of information processing）第五技术委员会对数控机床作了如下定义：“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使用代码，或其他符号编码指令规定的程序”。换言之，数控机床是一种采用计算机技术，利用数字信息进行控制的高效率、能自动化加工的机床。编程人员能够按照数控机床所规定的数字化代码把各种机械位移量、工艺参数、辅助功能（如换刀、切削液开闭等）表示出来，并编制成程序输入数控机床。数控系统接收程序后，进行逻辑处理与运算，发出各种控制指令，数控机床根据指令完成生产、设计人员所要求的各种机械动作，自动完成零件的加工任务。而且，当被加工零件或加工工序变换时，只需由编程人员相应地改变程序就可

实现新的加工。因此，数控机床是一种灵活性强、技术密集度及自动化程度都很高的机电一体化加工设备。

随着数控技术的发展，数控机床已成为机械自动化加工的重要设备。为了世界性的技术交流和贸易，为了数控技术的规范和发展，已形成了多个国际通用的标准，如 ISO（国际标准化组织标准）、IEC（国际电工委员会标准）和 EIA（美国电子工业协会标准）。这些标准一般都规定了数控机床的坐标轴和运动方向、数控机床的编码字符、数控机床的程序段格式、准备功能和辅助功能、数控的名词术语等。

1.1.2 数控加工技术

数控加工是随着数控机床的产生、发展而逐步完善起来的一种应用技术，是机械制造业人员长期从事数控加工实践的经验总结。所谓数控加工技术就是使用数控机床加工零件的方法。

数控加工技术是在多种技术交叉的基础上发展起来的，其核心技术是微电子技术向精密机械技术渗透所形成的机电一体化技术。具体说来，数控加工涉及的基本技术有：

① 精密机械技术。精密机械技术是数控加工的基础。先进的机械设计理论、精良的机械加工技术以及新材料新工艺的采用，使数控机床具有高精度、高速度、高可靠性、体积小、质量小、维修方便、价格低廉等优点。

② 电子元器件技术。数控加工技术的发展是与电子元器件技术的发展密切相关的。随着电子元器件技术由晶体管、集成电路到微型计算机的发展，数控技术也随之不断地发展，直至计算机高速、准确地指挥和管理数控系统的有序运行。同时，由于采用存储器存储，使零件的加工程序更容易显示、检查、修改和编辑，也减少了数控系统的硬件配置，提高了系统的可靠性。

③ 软件技术与自动编程。数控系统的软件主要完成管理和控制两种工作。管理工作完成输入、I/O 处理、通信、显示、诊断等任务；控制工作完成译码、刀具补偿、速度处理、插补、位置控制等任务。由于数控系统采用了软件控制，因此大大增加了数控系统的灵活性，降低了系统的制造成本。而且，数控系统的软件已外延到 CAD/CAM，运用 CAD/CAM 软件（如 Mastercam、Pro/E 等）编制的零件加工程序，可通过中间软件送到数控系统控制数控机床的加工运行。

数控系统的控制装置按照预先编制好的零件加工程序指挥数控机床进行工作。所谓编程，即将零件的图形尺寸、工艺过程、工艺参数、机床的运动以及刀具位移等按数控系统规定的程序段格式和规定的语言记录在程序上的过程。目前一般采用手工编程和自动编程两种方法。20 世纪 70 年代开始出现的图像数控编程技术有效地解决了几何造型与零件几何形状的显示、交互设计、修改及刀具轨迹生成进给过程的仿真显示、验证等问题，使得图像数控编程系统真正成为一个集成化的 CAD/CAM 系统。特别是对于形状复杂的零件，利用 CAD/CAM 软件自动编程极大地提高了产品设计的效率。

④ 自动控制理论和伺服驱动技术。自动控制理论和伺服驱动技术对数控机床的功能、动态特性和控制品质都有决定性的影响。自动控制理论对一个具体的控制装置或系统的设计、仿真和现场调试具有理论指导作用。在伺服速度环控制中采用前馈控制，使传统的位置环偏差控制的跟踪滞后现象得到改善，增加了系统的稳定性和伺服精度。同时，伺服系统的

位置环和速度环都采用软件控制，以适应不同类型数控机床复杂的控制算法。

⑤ 精密检测和传感技术。精密检测和传感技术一直是闭环和半闭环控制系统中的关键技术，检测和传感装置也是实现自动控制的关键环节之一。随着对机床精度要求的不断提高，对测量装置和传感器的分辨率和精度也提出了更高的要求，出现了高精度的具有“细分”电路分辨率的传感器和激光传感器。

⑥ 网络和通信技术。计算机网络和通信技术为以数控机床为基础的柔性制造单元(FMC)、柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的产生创造了条件，使得产品的异地加工、装配和调试都成为可能。

⑦ 可编程控制技术。可编程序控制器 PLC (Programmable Logic Controller) 是一种专为在工业环境下运用而设计的数字运算电子系统。编程人员将事先编制好的完成执行逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等特定功能的用户指令保存在 PLC 的存储器中，采用循环扫描方式，定期检测数字式或模拟式的输入和输出，控制各类机械加工或生产过程。由于使用 PLC 可以方便地实现程序的显示、编辑、诊断、存储和传送，也没有传统的继电器接触不良、触点熔焊、磨损、线圈烧断等缺点，因此极大地提高了数控系统的快速性和可靠性。

1.2 数控机床的工作原理及组成

1.2.1 数控机床的组成及各部分功能

数控机床主要由计算机数控系统和机床本体两部分组成，如图 1-1 所示。

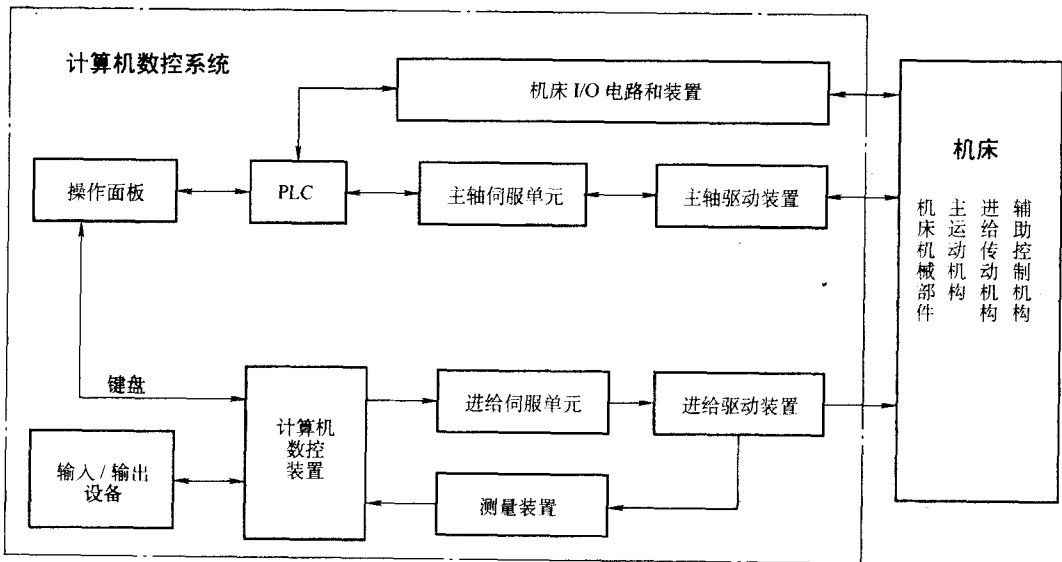


图 1-1 数控机床的组成

计算机数控系统主要由计算机数控装置 CNC (Computer Numerical Control)、PLC、进给伺服系统、主轴伺服系统等部分组成。进给伺服系统又由进给伺服单元、进给驱动装

置、测量装置组成。主轴伺服系统由主轴伺服单元、主轴驱动装置组成。

机床本体主要由机床机械部件、主运动机构、进给传动机构、辅助控制机构等组成。

计算机数控系统一般由数控系统生产厂制造，由机床制造厂将其连接到机床上。数控系统通过控制机床的切削运动和顺序逻辑动作加工零件。数控系统通过运行由机床用户编制的零件加工程序，控制机床对工件的切削运动和特定的顺序动作。数控系统通过 PLC（可编程序控制器）或 PMC（可编程序机床控制器），经过由机床制造厂编制的机床顺序逻辑控制程序，控制机床的顺序逻辑动作。另外，机床制造厂还需设置机床的固有参数，使通用的数控系统个性化，实现数控系统与机床的有机结合。

1. 输入/输出设备

控制介质用于记载零件加工过程中的各种加工信息，是实现操作者与设备之间联系的媒介物。程序输入输出设备是 CNC 系统与外围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。目前数控机床常用的控制介质和程序输入/输出设备有 RS232 接口、软盘和 U 盘等。

2. 计算机数控装置

计算机数控装置是数控机床的“指挥中心”，一般由 CPU 和存储器组成。其功能是识别输入的零件加工程序和各种操作命令并进行相应的处理，然后输出控制命令到相应的执行部件（如送给伺服系统的速度和位移指令、送给辅助控制装置的机床辅助动作指令等），最终完成零件的加工。计算机数控装置主要由计算机系统、位置控制板、通信接口板、PLC 接口板、扩展功能模块以及相应的控制软件等模块组成。

3. 伺服系统

数控机床的伺服驱动系统由电路和伺服电动机组成，包括主轴伺服驱动系统和进给伺服驱动系统。主轴伺服驱动系统包括主轴伺服单元和主轴驱动装置，用于控制机床主轴的旋转运动，并为机床主轴提供驱动功率和所需的切削力。进给伺服驱动系统包括进给伺服单元和进给驱动装置，是用于机床工作台或刀架坐标的控制系统，控制机床各坐标轴的切削进给运动，并提供切削过程所需的转矩。

每一坐标轴方向的进给运动部件配备一套进给伺服驱动系统，对于数控装置发出的每个脉冲信号，机床的进给运动部件都有一个相应的位移量，此位移量称为脉冲当量，也称为最小设定单位，其值越小，加工精度越高。

数控装置的指令主要由伺服驱动系统实施，所以伺服驱动系统是数控机床的重要组成部分。数控装置可以用足够高的速度计算并发出足够小的脉冲信号，关键在于伺服系统响应并执行指令的速度和精度，因此伺服系统的动态响应和伺服精度是影响数控机床的加工精度和生产率的重要因素。

测量装置是测量机床位置和速度的装置，是实现主轴、进给速度闭环控制和进给位置闭环控制的必要装置。

4. 可编程序控制器与机床 I/O 电路和装置

数控机床的自动控制由 CNC 和 PLC 共同完成。其中 CNC 负责完成与数字运算和管理有关的功能，如编辑加工程序、插补运算、译码、位置伺服控制等。PLC 用于接收来自零件加工程序的开关功能信息（辅助功能 M、主轴转速 S、换刀 T 等）、来自机床操作面板及

机床侧的开关量信号，并进行逻辑运算，完成输出控制功能，实现各功能及操作方式的联锁。也就是说，PLC按照预先规定的逻辑顺序对机床电气设备的起停，主轴的转速、转向及起停，刀具的更换，工件的夹紧、松开，液压、气动、冷却、润滑系统的运行，倍率开关的调节进行控制，并实现各种状态指示、故障报警以及通信等。

机床 I/O（输入/输出）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、接触器、行程开关等组成的逻辑电路。

5. 操作面板

操作面板也称为控制面板，是操作人员与数控机床（系统）进行信息交换的工具。操作面板主要由显示器、按钮、键盘等组成，是数控机床的输入/输出部件。操作人员可通过它对数控机床（系统）进行操作、编程、调试，也可通过它对机床参数进行设置和修改，还可通过它了解或查询数控机床（系统）的运行状态。

6. 机床本体

机床本体是数控机床的机械部分，是数控系统实现零件加工的执行部件。机床本体主要由主运动部件（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）、自动工件交换 APC（Automatic Pallet Changer）系统、自动刀具交换 ATC（Automatic Tool Changer）系统和辅助装置（如润滑、冷却、排屑、转位和夹紧装置等）组成。由于机床本体不仅要实现由数控装置控制的各种运动，而且还要承受包括切削力在内的各种作用力，因此机床本体必须保证有良好的几何精度、足够的刚度、小的热变形、低的摩擦阻力，才能有效地保证数控机床的加工精度。

1.2.2 数控机床的工作原理

利用数控机床完成零件数控加工的过程如图 1-2 所示。

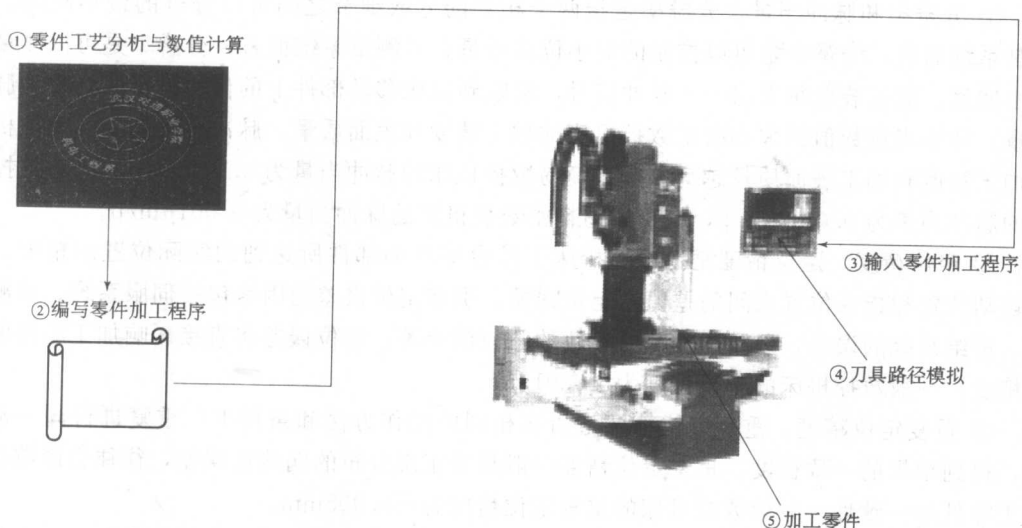


图 1-2 数控加工的过程

① 零件工艺分析与数值计算。在对零件图进行全面分析的基础上，确定零件的装夹定位方法、加工路线（如对刀点、换刀点、进给路线）、刀具的选择、切削用量等工艺参数

(如进给速度、主轴转速、切削深度等)。然后根据零件图和所确定的加工路线计算刀具中心运动轨迹。

一般的数控装置都具有直线插补和圆弧插补功能,因此加工只有圆弧和直线组成的简单零件时,只需计算零件轮廓上相邻几何图素的交点或切点的坐标值,得出直线的起点、终点,圆弧的起点、终点和圆心的坐标值。

② 编写零件加工程序。根据刀具运动轨迹坐标值和已确定的切削用量以及辅助动作,结合数控系统规定使用的指令及程序段格式编写零件加工程序。

③ 输入零件加工程序。用手工编写的程序,可以通过数控机床的操作面板输入;由编程序软件生成的程序,可以通过计算机的串行通信接口或各类存储介质(软盘、U盘等)直接传输到数控机床的数控单元。

④ 刀具路径模拟。将传输到数控系统的加工程序进行刀具路径模拟。

⑤ 加工零件。正确操作机床,运行程序,完成零件的加工。

1.2.3 数控机床的规格、性能和可靠性指标

1. 规格指标

规格指标是数控机床的基本能力指标。根据数控机床类型的不同,其具体含义也不同。

数控车床主要有床身及刀架最大回转直径、行程范围、最大车削长度、最大车削直径等规格尺寸;数控铣床主要有工作台、工作台 T 形槽、工作台行程等规格尺寸。

2. 性能指标

数控机床的性能指标主要分为运动指标(如主轴转速、进给速度等)、精度指标(如脉冲当量、定位精度、重复定位精度等)、机床外形尺寸、机床质量以及与刀具系统、冷却系统、电气等有关性能指标。下面介绍其中较重要的性能指标。

① 分辨率和脉冲当量。分辨率是指两个相邻的分散细节之间可以分辨的最小间隔。对控制系统而言,分辨率是可以控制的最小位移增量;对测量系统而言,分辨率是可以测量的最小增量。数控装置每发出一个脉冲信号,反映到机床移动部件上的位移量,通常称为脉冲当量。脉冲当量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。一般简易数控机床的脉冲当量为 0.01mm/p ,普通数控机床的脉冲当量为 0.001mm/p ,精密或超精密数控机床的脉冲当量为 $0.001\mu\text{m/p}$ 。

② 定位精度。定位精度是指数控机床工作台等移动部件所达到的实际位置的精度。实际运动位置和指令位置之间的差值为定位误差。引起定位误差的因素包括伺服系统、检测系统、进给系统的误差,以及运动部件导轨的几何误差等。定位误差将直接影响加工零件的尺寸精度。一般数控机床的定位精度为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。

③ 重复定位精度。重复定位精度是指在相同的操作方法和条件下,重复进行同一动作时,得到结果的一致程度。重复定位精度一般是呈正态分布的偶然性误差,往往会影响批量加工零件的一致性。一般数控机床的重复定位精度为 $\pm 0.005\text{mm}$ 。

④ 最高主轴转速和最大加速度。数控机床的主轴采用直流或交流电动机驱动,选用高速精密轴承支承,保证主轴具有较宽的调速范围和较高的回转精度,并具有较高的刚度和抗振性。数控机床的主轴转速一般可以通过操作面板上的“主轴转速倍率”旋钮进行调节。现代数控机床的主轴转速普遍较高,可达到 $5000\sim 10000\text{r/min}$ 甚至更高,这对提高加工质量

和小孔加工极为有利。最高主轴转速是指主轴所能达到的最高速度，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一项性能指标。

⑤ 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快移动速度，最高进给速度是指进给轴在加工状态下的最快移动速度。它们都是影响零件加工质量、生产效率以及刀具寿命的主要因素。数控机床的进给速度一般可通过操作面板上的“进给倍率”旋钮进行调节。目前，数控机床的进给速度可达 10~30m/min。

⑥ 刀具系统。数控车床的刀具系统参数包括刀架工位数、刀具孔直径、刀杆尺寸、换刀时间等。加工中心的刀具系统参数包括刀库容量和换刀时间等。通常中小型加工中心的刀库容量为 16~60 把，大型加工中心的刀库容量可达 100 把以上。换刀时间一般为 5~20s。

3. 可靠性指标

数控机床的可靠性指标有以下三种。

① 平均无故障时间 MTBF (Mean time between failures)。MTBF 是指一台数控机床在使用中平均两次故障的间隔时间，即

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

② 平均修复时间 MTTR (Mean time to repair)。MTTR 是指一台数控机床从开始出现故障到能正常工作所用的平均修复时间，即

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

③ 平均有效度 A。A 是指正常工作时间与总时间之比，即

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

平均有效度是衡量设备可靠性的一个重要指标，反映了设备正常使用的能力。

1.3 数控机床的特点与分类

1.3.1 数控机床的特点

在数控机床上对工件加工是按照事先编制好的加工程序自动进行的，在加工过程中不需人工参与。而且，数控机床既能进行大切削量的粗加工以获得高效率，又能进行半精加工和精加工以获得高的加工精度。因此，数控机床的结构不但要求精密、完善，而且还应能长时间稳定、可靠地工作，以满足数控机床重复加工的需要。

为了满足数控机床高自动化、高效率、高精度、高速度、高可靠性的要求，与普通机床相比，数控机床的机械传动和结构具有以下一些特点：

① 采用钢板焊接结构和刚性高、抗振性好、承载能力大的静压或动压轴承以提高数控机床的静刚度和动刚度；

② 采用低摩擦因数的导轨和轴承以减少发热，通过良好的散热、隔热、冷却措施控制温升，设计热传导对称的结构以减少热变形，采用热变形对称结构以减少热变形对加工精度的影响；

③ 采用滚珠丝杠螺母副、静压蜗杆副以及塑料滑动导轨、滚动导轨、静压导轨等传动元件减小运动件的摩擦阻力，提高执行部件的抗振性和平稳性，提高运动精度和定位精度；

④ 提高数控机床的导轨、进给丝杠、主轴部件等主要零件的耐磨性，以提高数控机床的寿命和精度保持性；

⑤ 采用多主轴、多刀架、带刀库的自动换刀装置、刀具和工件的自动夹紧装置等，以最大限度地压缩辅助时间，提高生产效率。

由于数控机床的上述特点，使得数控加工具有如下优点：

① 易于加工异形复杂零件。数控机床由于能实现多坐标轴联动而容易完成许多普通机床难以完成或无法加工的空间曲线、曲面的加工，特别是其数控系统和 Mastercam 等 CAD/CAM 软件的配合使用使得数控加工更加方便。

② 加工精度高、质量稳定。数控机床采用了数字伺服系统，数控系统每输出一个脉冲，伺服执行机构使机床移动部件产生相应的位移，其运动分辨率远高于普通机床。同时，数控机床具有位置检测装置，可将移动部件的实际位移量或丝杠、伺服电动机的转角反馈到数控系统，并进行相应的补偿。而且，螺距的误差及其他传动误差可由闭环系统加以控制。另外，数控机床的自动加工方式很大程度上减少了机床操作人员的操作误差，使得同一批加工零件的尺寸一致性好，产品的合格率高，加工质量稳定。

③ 生产效率高。零件的加工时间包括机动时间和辅助时间，数控机床能有效地减少这两部分时间。数控机床刚性好、功率大，主轴转速和进给速度的调速范围比普通机床的调速范围大且为无级变速，每道工序都可选择较大且合理的切削用量。同时，数控机床的快速移动和停止采用了加速、减速措施，因而既能提高空行程运动速度，又能保证定位精度。这些都有效地减少了机动时间。另一方面，在数控机床上可以实现多道工序连续加工，更换工件时不需要调整机床，生产同一批工件时数控机床的定位精度、加工精度稳定，一般可省去加工过程中的中间检验环节，而只做工序间关键尺寸的抽样检验，故而大大缩短了零件加工的辅助时间。

④ 自动化程度高，劳动强度低。数控机床的加工过程是按输入的程序自动完成的，在工件加工过程中，操作者只需做装卸工件、更换刀具、关键工序的中间检验以及观察机床运行等工作，加工完毕后数控机床自动停车，这就使工人的劳动条件大为改善。

⑤ 对加工对象的适应性强。当加工对象改变后，只需改变相应的加工程序、调整相应的刀具参数等，并输入数控机床，即可实现加工。这为单件小批量多品种产品的生产、复杂型面的加工、产品改型和新产品的试制提供了极大的方便，大大缩短了生产准备周期。

根据数控加工的特点，数控机床适合于加工以下零件：

- 多品种、单件小批量生产的零件或新产品试制中的零件；
- 几何形状复杂、精度要求较高，在普通机床上无法加工或难以加工的零件；
- 加工过程中需要多工序加工的零件；
- 用普通机床加工时，需要昂贵工装设备（工具、夹具和模具）的零件；
- 需要最小生产周期的零件。

⑥ 有利于生产管理现代化。采用数控机床加工，能准确计算零件的加工工时和费用，并有效地简化检验、工夹具和模具的管理工作。数控机床及其加工技术是实现计算机辅助设计与制造（CAD/CAM）的基础，也是构成柔性制造系统（FMS）和计算机集成制造系统