




普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

数控技术应用及机械 CAD/CAM 系列

# 数控加工工艺与编程

陈洪涛 主编

 高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材  
(高职高专教育)

# 数控加工工艺与编程

陈洪涛 主编

高等教育出版社

## 内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)。主要内容有:数控加工技术的现状与发展趋势;数控加工工艺的基本特点、工艺分析与工艺设计方法;数控编程基础知识;数控车床、数控铣床、加工中心、数控线切割机床的加工工艺特点及程序编制中常用编程指令和编程方法;用户宏程序在数控编程中的应用。

本书构思新颖、结构合理、图文并茂、针对性强,注重实际应用,把数控加工工艺和编程紧密结合起来,重视学科之间的综合。特别是编程实例丰富,并配有大量走刀路线图和详细的程序说明加以分析,使读者能清晰地掌握编程的思路,便于灵活应用,学后可达到举一反三的效果。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校数控技术应用、机电一体化等专业教材,也可供从事数控加工的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

数控加工工艺与编程/陈洪涛主编. —北京:高等教育出版社,2003.9

普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 7-04-012634-6

I. 数… II. 陈… III. ①数控机床—加工—高等学校—教材②数控机床—程序设计—高等学校—教材  
IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 056990 号

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100011  
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588  
免费咨询 800-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京印刷一厂

开 本 787×1092 1/16  
印 张 14.75  
字 数 350 000

版 次 2003 年 9 月第 1 版  
印 次 2003 年 9 月第 1 次印刷  
定 价 18.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号)，提出了“力争经过5年的努力，编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用2至3年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用2至3年的时间，在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从2000年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的，随着这些教材的陆续出版，基本上解决了高职高专教材的有无问题，完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

# 前 言

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),是根据高职高专教育机电类专业人才培养目标及规格的要求编写的。

当今世界各国制造业广泛采用数控技术,以提高制造能力和水平,提高对动态多变市场的适应能力和竞争能力。大力发展以数控技术为核心的先进制造技术已成为各发达国家加速经济发展、提高综合国力的重要途径。数控技术也是关系我国制造业发展和综合国力提高的关键技术,尽快加速培养掌握数控技术的应用型人才已成为当务之急。

据有关调查显示,我国目前这类人才,不仅表现在数量上的短缺,更在质量上存在明显缺陷,即他们的知识结构还不能完全适应、满足企业需求。现在处于生产一线的各类数控人员主要是来自大学本科及高等职业技术学院的机电类专业的毕业生。他们具有一定的专业知识和动手能力,但一般缺乏工艺经验,难以满足企业对加工、编程和维修一体化复合型人才的要求。

为了适应高等职业教育对人才培养的需求,必须对课程体系进行整体优化,对传统的以学科为主线的教学内容进行必要的调整、合并,适当降低理论深度难度,拓宽知识面,加强岗位能力需要的新技术、新知识。本教材按培养、提高工艺实施与编程人员的职业能力进行阐述,将必要的知识支撑点融于能力培养的过程中,注重实践性教学,注重知识的综合应用,将数控加工工艺和数控编程有机结合起来,以达到满意的教学效果。

在我国大力发展高等职业教育的今天,适合于高等职业教育的高职高专教材建设已提上重要的议事日程。本书是按高职高专教学要求,结合多年的教学经验,在查阅大量国内外资料的基础上编写的。全书严格依据“以应用为目的,以必需、够用为度”的原则,力求从实际应用的需要出发,尽量减少枯燥、实用性不强的理论概念,较好地反映了国内外有关数控加工工艺的新发展和新成果,详细介绍了数控编程的常用编程指令及其应用,是一本内容新颖、实例丰富、深入浅出、系统性强、有较高实用价值的教材。

本书由陈洪涛副教授担任主编,参加本书编写的有四川工程职业技术学院陈洪涛(第5、6、7章)、朱超(第1、3章、第2章2.3节),四川职业技术学院黄杰东(第2章、2.1、2.2、2.4节),成都电子机械高等专科学校蒋勇敏(第4章)。

本书由重庆大学陶桂宝副教授审阅。在编写过程中,重庆大学陈国聪教授给予具体指导,绵阳奥神科技有限公司沈铎工程师对本书的编写给予了大力帮助和支持,并提供了部分的参考资料。本书在编写过程中还参阅了大量国内外同行的教材、资料与文献。在此一并致谢。

限于编者水平,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2003年4月

# 目 录

第 1 章 概论 .....	1	复习思考题 .....	40
1.1 数控加工技术概况 .....	1	第 3 章 数控编程基础 .....	41
1.2 数控加工的特点 .....	2	3.1 程序的格式 .....	42
1.3 数控机床的加工原理 .....	3	3.1.1 程序段的格式和组成 .....	42
1.4 数控加工技术的主要应用对象 .....	5	3.1.2 程序号和顺序号 .....	43
1.5 数控编程技术 .....	6	3.1.3 选择性程序段删除“/” .....	44
1.5.1 数控编程的内容 .....	6	3.1.4 程序数据输入格式 .....	44
1.5.2 数控编程方法 .....	7	3.1.5 坐标字的表示方式 .....	45
1.5.3 数控编程技术的发展概况 .....	8	3.2 数控机床的坐标系统 .....	46
1.5.4 技术现状与趋势 .....	9	3.2.1 坐标轴及其运动方向 .....	46
1.6 数控技术的发展趋势 .....	10	3.2.2 机床原点、机床参考点 .....	48
1.6.1 数控系统的发展趋势 .....	10	3.2.3 工件坐标系 .....	49
1.6.2 数控机床的发展趋势 .....	11	3.2.4 绝对坐标编程及增量坐标编程 .....	50
复习思考题 .....	12	3.3 数控程序的指令代码 .....	51
第 2 章 数控加工工艺基础 .....	13	3.3.1 准备功能 .....	51
2.1 数控加工工艺概述 .....	13	3.3.2 辅助功能 .....	53
2.1.1 数控加工工艺的基本特点 .....	13	3.3.3 进给功能 .....	53
2.1.2 数控加工工艺的主要内容 .....	14	3.3.4 主轴转速功能 .....	53
2.1.3 数控机床的合理选用 .....	14	3.3.5 刀具功能 .....	55
2.2 数控加工工艺分析与工艺设计 .....	15	复习思考题 .....	55
2.2.1 数控加工工艺分析 .....	15	第 4 章 数控车床加工及其程序编制 .....	56
2.2.2 数控加工工艺设计 .....	16	4.1 数控车削加工工艺 .....	56
2.2.3 数控编程中的数学处理 .....	29	4.1.1 数控车床加工的主要特点 .....	56
2.2.4 数控加工工艺守则 .....	32	4.1.2 数控车床的类型 .....	57
2.3 数控机床的工具系统 .....	33	4.1.3 车削用刀具及其主要特点 .....	57
2.3.1 数控镗铣加工用工具系统 .....	34	4.1.4 数控车削加工工艺路线制订 .....	65
2.3.2 数控车削加工用工具系统 .....	36	4.2 数控车床程序编制 .....	67
2.4 数控加工工艺文件的编制 .....	37	4.2.1 G 功能 .....	67
2.4.1 数控加工工序卡 .....	37	4.2.2 M 功能 .....	69
2.4.2 数控加工刀具卡 .....	37	4.2.3 F、S、T 功能 .....	70
2.4.3 数控加工走刀路线图 .....	39	4.2.4 工件坐标系设定(G50) .....	73
2.4.4 数控加工程序单 .....	39	4.2.5 快速定位和直线插补 .....	74

4.2.6 圆弧插补(G02,G03)·····	76	<b>第6章 数控电火花线切割加工</b> ·····	183
4.2.7 自动倒角及倒圆·····	78	<b>6.1 数控电火花线切割加工原理</b>	
4.2.8 程序暂停(G04)·····	80	<b>与特点</b> ·····	183
4.2.9 刀尖圆弧自动补偿功能·····	81	6.1.1 数控电火花线切割加工原理···	183
4.2.10 返回参考点检查(G27)·····	83	6.1.2 数控电火花线切割加工特点···	183
4.2.11 自动返回参考点(G28)·····	84	6.1.3 数控电火花线切割的应用·····	184
4.2.12 从参考点返回(G29)·····	85	<b>6.2 数控电火花线切割机床</b> ·····	185
4.2.13 螺纹切削指令(G32)·····	85	6.2.1 电火花线切割机床分类·····	185
4.2.14 单一固定循环(G90,G92,G94)···	87	6.2.2 电火花线切割机床型号·····	185
4.2.15 复合固定循环·····	92	<b>6.3 数控电火花线切割工艺基础</b> ·····	186
4.2.16 子程序·····	100	6.3.1 线切割加工的主要工艺指标···	186
<b>4.3 数控车床编程实例</b> ·····	102	6.3.2 影响线切割工艺指标的	
<b>复习思考题</b> ·····	108	若干因素·····	186
<b>第5章 数控铣床和加工中心加工及其程序编制</b> ·····	112	6.3.3 电火花线切割典型夹具、附件及工件装夹·····	191
<b>5.1 加工工艺基础</b> ·····	112	6.3.4 低速走丝线切割常用切割方法和技巧·····	195
5.1.1 数控铣床与加工中心		<b>6.4 线切割编程</b> ·····	199
工艺特点·····	112	6.4.1 3B格式程序编制·····	199
5.1.2 刀具及其工艺特点·····	114	6.4.2 低速走丝线切割机床编程·····	204
5.1.3 加工工艺分析·····	123	6.4.3 数控线切割自动编程·····	212
<b>5.2 数控铣床和加工中心编程</b> ·····	126	<b>复习思考题</b> ·····	214
5.2.1 G功能·····	127	<b>第7章 用户宏程序在数控编程中的应用</b> ·····	215
5.2.2 M功能·····	128	<b>7.1 概述</b> ·····	215
5.2.3 F、S、T功能·····	129	<b>7.2 变量</b> ·····	216
5.2.4 编程应注意的几个问题·····	130	7.2.1 变量及变量的引用·····	216
5.2.5 基本移动指令·····	133	7.2.2 变量的类型·····	217
5.2.6 程序暂停(G04)·····	138	<b>7.3 宏程序调用</b> ·····	218
5.2.7 刀具补偿指令·····	138	7.3.1 宏程序调用指令(G65)·····	218
5.2.8 返回参考点检查(G27)·····	148	7.3.2 自变量赋值·····	218
5.2.9 自动返回参考点(G28)·····	148	<b>7.4 变量的运算和控制指令</b> ·····	220
5.2.10 从参考点返回(G29)·····	148	7.4.1 算术和逻辑运算·····	220
5.2.11 第2、3、4参考点返回(G30)···	149	7.4.2 控制指令·····	220
5.2.12 固定循环功能·····	150	<b>7.5 用户宏程序应用实例</b> ·····	222
5.2.13 等导程螺纹切削(G33)·····	160	<b>复习思考题</b> ·····	226
5.2.14 转角的速度控制·····	162	<b>参考文献</b> ·····	227
5.2.15 子程序·····	163		
<b>5.3 加工中心综合编程实例</b> ·····	168		
<b>复习思考题</b> ·····	180		

# 第1章

## 概论

### 1.1 数控加工技术概况

数字控制(Numerical Control)简称数控(NC),是近代发展起来的一种自动控制技术,是用数字化信息实现机械设备控制的一种方法,在数控加工技术方面得到了广泛的应用。

随着科学技术的不断发展,社会对产品多样化的要求日益强烈,产品更新换代越来越快,多品种、中小批量生产的比重明显增加,复杂形状的零件越来越多,精度要求也越来越高。此外,激烈的市场竞争要求产品研制生产周期越来越短,传统的加工设备和制造方法已难于适应这种多样化、柔性化与复杂形状零件的高效、高质量加工要求。因此,近几十年来,能有效解决复杂、精密、小批多变零件加工问题的数控加工技术得到了迅速发展和广泛应用,使制造技术发生了根本性的变化。

数控加工是根据被加工零件的图样和工艺要求,编制成以数码表示的程序输入到机床的数控装置或控制计算机中,以控制工件和工具的相对运动,使之加工出合格零件的方法。该项技术是20世纪40年代后期为适应加工复杂外形零件而发展起来的一种自动化加工技术。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设想。1949年,该公司在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下,开始数控机床研究,并于1952年试制成功第一台三坐标数控铣床,揭开了数控加工技术的序幕。

当时的数控系统采用电子管、继电器和模拟电路组成,体积庞大,价格昂贵,一般称之为第一代数控系统。1959年制成了晶体管和印刷电路的第二代数控系统,体积缩小,成本有所下降。1965年出现了第三代的集成电路数控系统,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),及采用小型计算机控制的计算机数控(简称CNC)系统,使数控系统进入了以小型计算机化为特征的第四代。1974年,以微处理器为基础的CNC系统问世,标志着数控系统进入第五代。

前三个阶段的数控系统主要是由电路的硬件和连线组成,称为硬件数控系统。它的特点是具有很多硬件电路和连接结点,电路复杂,可靠性不好。第四、五代的数控系统主要是由计算机硬件和软件组成,称计算机数控系统。它最突出的特点是利用存储在存储器里的软件控制系



统工作，因此也称软件数控系统。这种系统容易扩大功能，柔性好，可靠性高。数控系统经过 50 多年的不断发展。目前，数控性能大大提高，以 FANUC 公司为例，1991 年开发成功的 FS15 系统与 1971 年开发的 FS220 系统相比，体积只有后者的十分之一，加工精度提高 10 倍，加工速度提高了 20 倍，可靠性提高了 30 倍以上。

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个方面。数控机床是数控加工的硬件基础，其性能对加工效率、精度等方面具有决定性的影响。高速、高效和高精度是数控机床技术发展的目标。零件加工程序的编制是实现数控加工的重要环节，对于产品质量的控制有着重要的作用。特别是对于复杂零件加工，其编程工作的重要性甚至超过数控机床本身。数控编程所追求的目标是如何更有效地获得满足各种零件加工要求的高质量数控加工程序，以便充分发挥数控机床的性能，获得更高的加工效率和质量。

当今的数控机床已经在机械加工部门占有非常重要的地位，是柔性制造系统(FMS——Flexible Manufacturing System)、计算机集成制造系统(CIMS——Computer Integrated Manufacturing System)、自动化工厂(FA——Factory Automation)的基本构成单位。努力发展数控加工技术，并向更高层次的自动化、柔性化、敏捷化、网络化和数字化制造方向推进，是当前机械制造业发展的方向。

## 1.2 数控加工的特点

与普通机床加工相比，数控加工具有如下的特点：

### 1. 自动化程度高

在数控机床上加工零件时，除了手工装卸工件外，全部加工过程都可由机床自动完成。在柔性制造系统上，上下料、检测、诊断、对刀、传输、调度、管理等也都可由机床自动完成，这样大大减轻了操作者的劳动强度，改善了劳动条件。

### 2. 具有加工复杂形状零件的能力

复杂形状零件在飞机、汽车、造船、模具、动力设备和国防工业等部门的产品制造中具有十分重要地位，其加工质量直接影响整机产品的性能。数控加工运动的任意可控性使其能完成普通加工方法难以完成或者无法进行的复杂型面加工。

### 3. 生产准备周期短

在数控机床上加工新的零件，大部分准备工作是根据零件图样编制的数控程序，而不是去准备靠模、专用夹具等工艺装备，而且编程工作可以离线进行。这样大大缩短了生产的准备时间，因此应用数控机床十分有利于产品的升级换代和新产品的开发。

### 4. 加工精度高、质量稳定

目前，普通数控加工的尺寸精度通常可达  $\pm 0.005 \text{ mm}$ ，最高的尺寸精度可达  $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 。数控机床是按预先编制好的加工程序进行工作的，加工过程中无需人的参与或调整，因此不受操作工人的技术水平或情绪的影响，加工精度稳定。另外，数控机床可以通过采用在线自动补偿(实时补偿)技术来消除或减少热变形、力变形和刀具磨损的影响，使加工精度的一致性得到保证。这在传统机床上则是无法做到的，因此采用数控加工技术可以提高零件的加工精度和产品质量。

### 5. 生产效率高

数控机床的加工效率一般比普通机床高 2~3 倍,尤其在加工复杂零件时,生产率可提高十几倍甚至几十倍。一方面是因为其自动化程度高,具有自动换刀和其他辅助操作自动化等功能,而且工序集中,在一次装夹中能完成较多表面的加工,省去了划线、多次装夹、检测等工序;另一方面是加工中可采用较大的切削用量,有效地减少了加工中的切削工时。数控机床在配有适当的刀库、工件毛坯库、上下料装置和多种传感器的条件下,不仅具有全自动的加工功能,而且具有对加工过程进行自动监控、检测、报警及修正误差等功能。因此,数控机床可以实现白班有人看管和做好各种准备工作后,二、三班则可以在“无人看管”的条件下(国外称为“熄灯生产”)进行 24 小时乃至 72 小时的连续加工。这不仅改善了劳动条件,解决了晚上和节假日(含周六、周日)连续工作的问题,也大大提高了劳动生产率、设备利用率,缩短了生产周期,增加了企业的经济效益。

### 6. 易于建立计算机通信网络

由于数控机床是使用数字信息,易于与计算机辅助设计和制造(CAD/CAM)系统联接,形成计算机辅助设计和制造与数控机床紧密结合的一体化系统。另外,数控机床通过因特网(Internet)、内联网(Intranet)、外联网(Extranet)现在已可实现远程故障诊断及维修,已初步具备远程控制 and 调度,进行异地分散网络化生产的可能,从而为今后进一步实现制造过程网络化、智能化提供了必备的基础条件。

当然,数控加工在某些方面也有不足之处,这就是数控机床价格昂贵,加工成本高,技术复杂,对工艺和编程要求较高,加工中难以调整,维修困难等。

## 1.3 数控机床的加工原理

数控机床的加工原理如图 1-1 所示。在数控机床上加工零件时,要事先根据零件加工图样的要求确定零件加工的工艺过程、工艺参数和刀具参数,再按规定编写零件数控加工程序,然后通过手动数据输入(MDI——Manual Data Input)方式或与计算机通讯等方式将数控加工程序送到数控系统,在数控系统控制软件的支持下,经过分析处理与计算后发出相应的指令,通过伺服系统使机床按预定的轨迹运动,从而控制机床进行零件的自动加工。下面通过介绍数控机床的组成对这一过程进行说明。

### 1. 程序编制及控制介质

数控程序是数控机床自动加工零件的工作指令。在对加工零件进行工艺分析的基础上,确定零件坐标系在机床坐标系上的相对位置,即零件在机床上的装夹位置,刀具与零件相对运动的尺寸参数,零件加工的工艺路线或加工顺序、切削加工的工艺参数以及辅助装置的动作等。这样得到零件的所有运动、尺寸、工艺参数等加工信息,然后按数控机床规定采用的代码和程序格式,将工件的尺寸、刀具运动中心轨迹、位移量、切削参数(主轴转速、切削进给量、背吃刀量等)以及辅助功能(换刀、主轴的正转与反转、切削液的开与关等)编制成数控加工程序。编制程序的工作可由人工进行,也可在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成,比较先进的数控机床可以在它的数控装置上直接编程。

控制介质是存储加工程序的媒介,常用的控制介质有穿孔纸带、磁盘、磁带等信息载体。

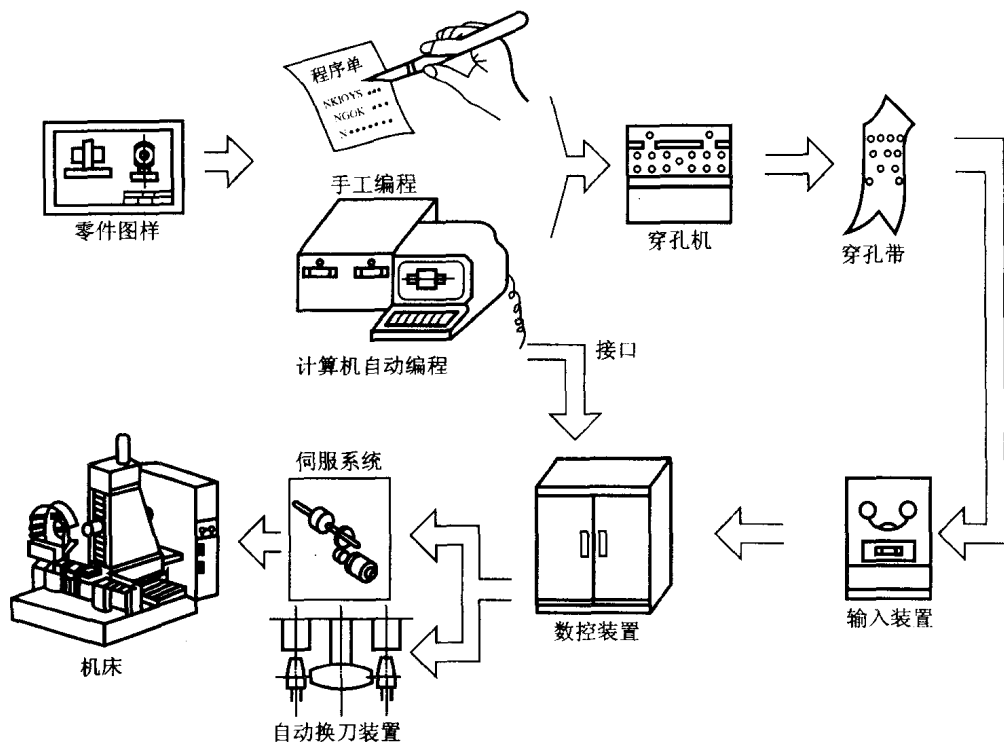


图 1-1 数控机床的加工原理

## 2. 输入/输出装置

数控机床在进行加工前，必须接受由操作人员输入的零件加工程序，然后才能根据输入的程序进行加工。在加工过程中，操作人员要向机床数控装置输入操作命令，数控装置要为操作人员显示必要的信息，如坐标值、报警信号等。此外，输入的程序并非全部正确，有时需要编辑、修改和调试。以上工作都是机床数控系统和操作人员进行信息交流的过程，要进行信息交流必须具备输入/输出装置。

将数控程序输入数控装置，可采用以下几种方式：

(1) 控制介质输入 主要有两种输入方法：一种方法是通过纸带输入，即在特制的纸带上穿孔，用孔的不同位置的组合构成不同的数控代码，通过纸带阅读机将指令输入。穿孔纸带使用 ISO (国际标准化组织)标准和 EIA (美国电子工业协会)制定的两种标准信息代码，现在的数控系统两种代码都可以识别应用。另一种方法是对于配置有计算机软驱动器的数控机床，可以将存储在磁盘上的程序通过软驱输入系统。尽管穿孔纸带已逐渐被淘汰，但是规定的标准信息代码仍然是数控程序编制、制备控制介质所遵守的标准。

(2) 手动输入 操作者可以利用机床上的显示屏及键盘输入加工程序指令，控制机床的运动。一种是手动数据输入(MDI)，它适用于一些比较短的程序，只能使用一次，机床动作后程序就消失。另一种是在控制装置的编辑(EDIT)状态下，用按键输入加工程序，存入控制装置的内存中。用这种方式可以对程序进行编辑，程序可重复使用。除此之外。在具有会话编程功能的数控装置上，可以按照显示屏上提示的问题，选择不同的菜单，将图样上指定的有关尺寸数

字等输入，就可自动生成加工程序。

(3) 直接输入存储器 利用这种方式可以使用数控装置的串行口，通过对有关参数的设定和相关软件，直接读入在自动编程机上或其他计算机上编制好的程序。

### 3. 数控装置及辅助控制装置

数控装置是数控机床的核心，它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、插补运算和逻辑处理后，输出各种信号和指令控制机床的各个部分，进行规定的、有序的动作。其中最基本的控制信号是：由插补运算决定的各坐标轴的进给位移量、进给方向和速度的指令，经伺服驱动系统驱动执行部件作进给运动。其他还有主运动部件的变速、换向和启/停信号，刀具选择和交换的指令信号，冷却液、润滑液的启停、工件和机床部件松开、夹紧、分度工作台转位等辅助指令信号等。

辅助控制装置是连接数控装置和机床机械、液压部件的控制系统。其主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、换刀、辅助装置动作等指令信号，经过编译、逻辑判断、功率放大后驱动相应的电器、液压、气动和机械部件，以完成指令所规定的动作。此外，行程开关和监控检测等开关信号也要经过辅助控制装置送到数控装置进行处理。

### 4. 伺服驱动系统及位置检测装置

伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动电动机组成，并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。它根据数控装置发来的速度和位移指令控制执行部件的进给速度、方向和位移。每个作进给运动的执行部件，都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。在半闭环和闭环伺服驱动系统中，还有位置检测装置，间接或直接地测量执行部件的实际位移和速度并发送反馈信号与指令信号进行比较，按闭环原理，将其误差转换放大后控制执行部件的运动，以提高系统精度。

### 5. 机械部件

数控机床的机械部件包括主运动部件、进给运动执行部件(如工作台、拖板)、传动部件和床身立柱等支撑部件，此外还有冷却、润滑、排屑、转位和夹紧等辅助装置。对于加工中心类的数控机床，还有自动刀具交换装置、自动交换工作台装置等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似，但传动结构要求更为简单，在精度、刚度、抗振性、耐磨性、耐热性等方面要求更高，而且其传动和变速系统要便于实现自动化控制。

## 1.4 数控加工技术的主要应用对象

数控加工是一种可编程的柔性加工方法，但其设备费用相对较高，故目前数控加工主要应用于加工零件形状比较复杂、精度要求较高，以及产品更换频繁、生产周期要求短的场所。具体地说，下面这些类型的零件最适宜于数控加工：

- (1) 形状复杂、加工精度要求高或用数学方法定义的复杂曲线、曲面轮廓。
- (2) 公差带小、互换性高、要求精确复制的零件。
- (3) 用通用机床加工时，要求设计制造复杂的专用工装或需很长调整时间的零件。
- (4) 价值高的零件。
- (5) 小批量生产的零件。

(6) 钻、镗、铰、攻螺纹及铣削加工联合进行的零件。

由于现代工业生产的需要，目前应用数控机床进行加工的部分典型行业及典型复杂零件如下：

- (1) 电器、塑料制造业和汽车制造业等——模具型面。
- (2) 航空航天工业——高压泵体、导弹仓、喷气叶片、框架、机翼、大梁等。
- (3) 造船业——螺旋桨。
- (4) 动力工业——叶片、叶轮、机座、壳体等。
- (5) 机床工具业——箱体、盘轴类零件，凸轮、非圆齿轮、复杂形状刀具与工具。
- (6) 兵器工业——炮架件体、瞄准陀螺仪壳体、恒速器壳体。

另外，20世纪60~80年代，以数控机床应用为基础的柔性制造技术在汽车、飞机及一些行业中得到发展，其应用结果表明，柔性制造适于多品种、变化批量产品的生产。当前，柔性制造技术发展了以数控加工中心、数控加工模块及多轴加工模块组成的柔性自动线，使自动线柔性化，给单一品种的大量生产方式带来了转机，例如，现已广泛应用于汽车制造业发动机零件的制造中。目前，世界上许多汽车厂，包括我国的上海通用汽车公司，已经采用以高速加工中心组成的生产线部分替代组合机床。

可见，目前的数控加工主要应用于以下两个方面：

(1) 常规零件加工 如二维车削、箱体类镗铣等，其目的在于：①提高加工效率，避免人为误差，保证产品质量；②以柔性加工方式取代高成本的工装设备，缩短产品制造周期，适应市场需求。这类零件一般形状较简单。实现上述目的的关键：一方面在于提高机床的柔性自动化程度、高速高精加工能力、加工过程的可靠性与设备的操作性能；另一方面在于合理的生产组织、计划调度、工艺过程安排。

(2) 复杂形状零件加工 如涡轮叶片、模具型腔等。该类零件在众多的制造行业中具有重要的地位，其加工质量直接影响以至决定着整机产品的质量。这类零件型面复杂，常规加工方法难以实现，它不仅促使了数控加工技术的产生，而且也一直是数控加工技术的主要研究及应用对象。由于零件型面复杂，在加工技术方面，除要求数控机床具有较强的运动控制能力(如多轴联动)外，更重要的是如何有效地获得高效优质的数控加工程序，并从加工过程整体上提高生产效率。

## 1.5 数控编程技术

### 1.5.1 数控编程的内容

数控编程的主要内容包括：

(1) 分析零件图样，确定工艺过程 包括确定加工方案，选择合适的机床、刀具及夹具，确定合理的走刀路线及切削用量等。

(2) 数学处理 包括建立工件的几何模型，计算加工过程中刀具相对工件的运动轨迹等。数学处理的最终目的是为了获得编程所需要的所有相关位置坐标数据。

(3) 编写程序单 按照数控装置规定的指令和程序格式，编写零件的加工程序单。

(4) 制作程序介质并输入程序信息 加工程序可以存储在控制介质(如穿孔纸带、磁盘)上,作为控制数控装置的输入信息。通常,若加工程序简单,可直接通过机床操作面板上的键盘输入。

(5) 程序校验和试切削 编制的加工程序必须通过空运行、图形动态模拟或试切削等方法检验程序的正确性。当发现错误时,通过分析产生错误的性质来修改程序或调整刀具补偿参数,直到加工出合格的零件。

### 1.5.2 数控编程方法

根据问题复杂程度的不同,数控加工程序可通过手工编程或自动编程来获得。

#### 1. 手工编程

手工编程是指从零件图样分析、工艺处理、数值计算、书写程序单、纸带制作和检验等均由人工完成。它要求编程人员不仅要熟悉数控指令及编程规则,而且还要具备数控加工工艺知识和数值计算能力。如在加工中心上用立铣刀加工如图 1-2 所示的工件形状,因该零件轮廓由直线和简单的圆弧轮廓组成,可以手工计算坐标值(如表 1-1 所示)并确定刀具路径来完成数控编程,使刀具沿  $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_4 \rightarrow P_5 \rightarrow P_6 \rightarrow P_1$  的轨迹运动加工。手工编制的加工程序(为简化,此处没考虑铣刀半径)如下:

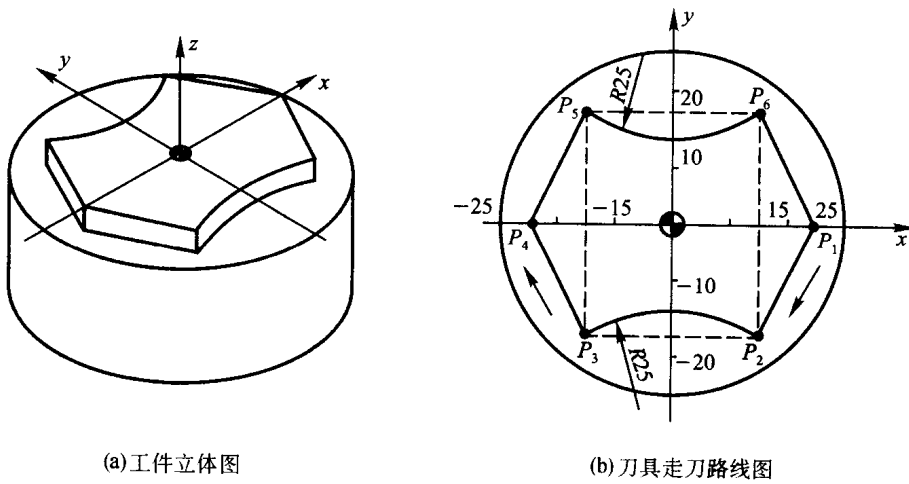


图 1-2 手工编程零件例

表 1-1 计算坐标值

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
X	25	15	-15	-25	-15	15
Y	0	-20	-20	0	20	20

mm

O1001; (程序号)  
 G90 G00 G54 X25.0 Y0 S1000; (建立工件坐标系,刀具快速运动到  $P_1$  点)  
 G43 Z100.0 H01; (建立刀具长度补偿,快速移动到  $z100$  位置)

S1000 M03;	(主轴以 $1\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速正转)
G00 Z3.0	(刀具快速移动到 $z = 3$ 位置)
G01 Z - 2.0 F150;	(刀具以 $150\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的进给速度切入到 $z = -2$ 位置)
X15.0 Y - 20.0;	(刀具沿直线运动到 $P_2$ 点)
G03 X - 15.0 R25.0;	(刀具沿逆时针圆弧运动到 $P_3$ 点)
G01 X - 25.0 Y0;	(刀具沿直线运动到 $P_4$ 点)
X - 15.0 Y20.0;	(刀具沿直线运动到 $P_5$ 点)
G03 X15.0 R25.0;	(刀具沿逆时针圆弧运动到 $P_6$ 点)
G01 X25.0 Y0;	(刀具沿直线运动到 $P_1$ 点)
G00 Z10.0 M05;	(刀具沿 $z$ 轴方向快速退刀至 $z = 10$ 位置, 主轴停止)
G91 G28 Z0;	( $z$ 轴回机床参考点)
G28 X0 Y0;	( $x, y$ 轴回机床参考点)
M30;	(程序结束)

在各机械制造行业中, 均有大量仅由直线、圆弧等几何元素构成的形状并不复杂的零件需要加工。这些零件的数值计算较为简单, 程序段数不多, 程序检验也容易实现, 因而可采用手工编程方式完成编程工作。由于手工编程不需要特别配置专门的编程软硬件, 易于掌握和运用, 因此手工编程仍然是一种运用十分普遍的编程方法。但目前在航空、船舶、兵器、汽车、模具等制造业中, 经常会有一些具有复杂形面的零件需要加工, 有的零件形状虽不复杂, 但加工程序很长。这些零件的数值计算、程序编写、程序校验相当复杂繁琐, 工作量很大, 采用手工编程是难以完成的。

## 2. 自动编程

自动编程是借助数控自动编程系统由计算机来辅助生成加工程序。此时, 编程人员一般只需借助数控编程系统提供的各种功能对加工零件的几何参数、工艺参数及加工过程进行较简单的描述后, 即可由计算机自动完成程序编制的全过程。自动编程解决了手工编程难以解决的复杂零件的编程问题, 既减轻了编程的劳动强度, 又提高了效率和准确性, 在数控加工中的应用日益广泛。

### 1.5.3 数控编程技术的发展概况

为解决复杂型面零件在数控机床上加工的编程问题, 20 世纪 50 年代, 美国麻省理工学院 (MIT) 设计了一种专门用于机械零件数控加工程序编制的语言 APT (Automatically Programmed Tool)。其后 MIT 组织美国各大飞机公司共同开发了 APT II。到了 20 世纪 60 年代, 在 APT II 的基础上研制的 APT III 已经到了应用阶段。以后又几经修改和充实, 发展成为 APT IV、APT AC 和 APT IV/SS 等。APT 语言用专用语句书写源程序, 将其输入计算机, 由 APT 处理程序经过编辑和运算, 输出刀具中心轨迹, 然后再经过后置处理, 把通用的刀位数据转换成数控机床所要求的 NC 程序段格式。

采用 APT 语言编制数控程序具有程序简练、走刀控制灵活等优点, 使数控加工编程从面向机床指令的“汇编语言”级, 上升到面向零件几何元素和加工方式的高级语言级直接描述, 表 1-2 给出了用 APT 语言描述定义语句的例子。但 APT 仍有许多不足之处: 采用语言定义零

件几何形状，难以描述复杂的几何形状，缺乏几何直观性；缺少对零件形状、刀具运动轨迹的直观图形显示和刀具轨迹的验证手段；难以和 CAD 数据库和 CAPP 系统有效连接；不容易作到高度的自动化、集成化。

表 1-2 APT 语句举例

定义的种类	定义语句的例子
点	P2 = P/L1, L2 (直线 $L_1$ 与直线 $L_2$ 交点的坐标)
线	L1 = L/P1, P2 (过 $P_1$ 和 $P_2$ 两点的直线)
圆	C1 = C/O, 20, 25 (中心坐标为(0,20), 半径为 25 的圆)
刀具移动	GL/L1, T0, L2 (沿直线 $L_1$ 左侧移动, 到直线 $L_2$ 停止)

针对 APT 语言的缺点，1972 年由美国洛克希德飞机公司开发出具有计算机辅助设计、绘图和数控编程一体化功能的自动编程系统 CADAM，由此标志着一种新型的计算机自动编程方法的诞生。1978 年，法国达索飞机公司开始开发集三维设计、分析、NC 加工一体化的 CATIA 系统，随后很快出现了像 EUCLID、UG II、INTERGRAPH、Pro/ENGINEER、MasterCAM 等系统。这些系统都有效地解决了几何造型、零件几何形状的显示，交互设计、修改及刀具轨迹生成，走刀过程的仿真显示、验证等问题，推动了 CAD 和 CAM 向一体化方向发展。

#### 1.5.4 技术现状与趋势

日益增多的复杂形状零件和高精、高效的加工对数控编程技术提出了越来越高的要求，面向复杂形状零件、多轴加工和加工过程优化的数控编程技术越来越重要。同时，为适应高速加工、CIMS、并行工程和敏捷制造等先进制造技术的发展，缩短产品研制生产周期，以柔性快速地响应市场需求，数控编程技术呈现出进一步向集成化、智能化、自动化、易使用化和面向车间编程等方向发展的趋势。

复杂形状零件的加工一直是数控编程技术的主要研究内容。对于三坐标加工，目前的编程系统一般能较好地完成，达到较高的稳定性。但由于多轴加工在加工复杂形状零件的能力、质量和效率等诸多方面的显著优势，多轴编程显得越来越重要。但多轴加工编程较复杂，特别是由于零件形状的复杂多变，要实现较通用的多坐标自动编程有较大难度。因此，目前编程系统中对多坐标加工的处理一般采取面向专用零件方式。

数控加工的效率与质量极大地取决于加工方案与加工参数的合理选择，包括合适的机床、刀具形状与尺寸、刀具相对加工表面的姿态、走刀路线、主轴速度、背吃刀量和进给速度等。为了优化这些参数，必须知道在复杂的切削状态下这些参数与刀具受力、磨损、加工表面质量及机床颤振等众多因素之间的关系。在复杂形状零件的加工过程中，切削状态往往一直是变化的，其优化措施还必须具有动态自适应的特点。对于加工方案与参数的自动选择与优化是数控编程走向智能化与自动化的重要标志和要解决的关键问题，同时也是实现面向车间编程的重要前提。在建立工艺数据库的基础上，采取自动特征识别和基于特征与知识的编程是解决该问题的重要途径。



## 1.6 数控技术的发展趋势

1952年美国研制出世界上第一台数控铣床,开创了世界数控机床发展的先河。随后,德国、日本、苏联等国于1956年分别研制出本国第一台数控机床。我国于1958年由清华大学和北京第一机床厂合作研制了我国第一台数控铣床。近年来,由于引进了国外的数控系统与伺服系统的制造技术,使我国数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展,缩短了与国外厂家的差距。在“九五”末期,国产数控机床的国内市场占有率达50%,配国产数控系统(普及型)也达到了10%,2001年国内数控金属切削机床产量已达1.8万台。目前我国中档数控机床已与国外产品无太大差别,但与国际先进水平还存在一定的差距,主要表现在:可靠性差,外观质量差,产品开发周期长,应变能力差等方面。

### 1.6.1 数控系统的发展趋势

从1952年美国麻省理工学院研制出第一台试验性数控系统,到现在已走过了50年的历程。到20世纪80年代,总体发展趋势是:数控系统由NC向CNC发展;广泛采用32位CPU组成多微处理器系统;提高系统的集成度,缩小体积,采用模块化结构,使数控功能可根据需要进行组合与扩展,满足不同类型数控机床的需要;驱动装置向交流、数字化方向发展,减少了维修工作,提高了控制的精度和稳定性;CNC系统向人工智能化方向发展;采用新型的自动编程系统,增强通信功能,数控系统可靠性不断提高。总之,数控系统的功能越来越完善,使用越来越方便,可靠性越来越高,性能价格比也越来越好。

目前,国内外新一代数控系统的总体发展趋势是:

#### 1. 数控系统采用开放式体系结构

20世纪90年代以来,受通用微机技术飞速发展的影响,数控系统正朝着以通用微机(PC)为基础、体系结构开放和智能化的方向发展。1994年基于PC的NC控制器在美国首先出现于市场,此后得到迅速发展。由于基于PC的开放式数控系统可充分利用通用微机丰富的硬软件资源和适用于通用微机的各种先进技术,已成为数控技术发展的潮流和趋势。世界上许多数控系统生产厂家利用PC机丰富的软硬件资源开发出了开放式体系结构的新一代数控系统。开放式体系结构的数控系统具有良好的通用性、柔性、适应性、扩展性,并向智能化、网络化方向发展。如Cincinnati-Milacron公司从1995年开始在其生产的加工中心、数控铣床、数控车床等产品中采用了开放式体系结构的A2100系统。开放式体系结构可以大量采用通用微机的先进技术,实现声控自动编程、图形扫描自动编程等。数控系统继续向高集成度方向发展,芯片上可以集成更多的晶体管,使系统更加小型化、微型化,可靠性大大提高。利用多CPU的优势,实现故障自动排除;增强通信功能,提高进线、联网能力。开放式体系结构的新一代数控系统,其硬件、软件和总线规范都是对外开放的,由于有充足的软、硬件资源可供利用,不仅使数控系统制造商和用户进行的系统集成得到有力的支持,而且也为用户的二次开发带来极大方便,促进了数控系统多档次、多品种的开发和应用,既可通过升级或组合构成各种档次的数控系统,又可通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统。

#### 2. 数控系统控制性能大大提高