



全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

# 数控加工 与编程技术

李体仁 编 著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

# 数控加工与编程技术

编 著 李体仁  
参 编 张 斌 孙建功 李 佳



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书结合实例详细地介绍了数控加工手工编程和自动编程的基本知识,系统地分析了数控编程指令和编程方法。结合文字叙述,通过大量的实例、图表以及程序的形式来说明相关指令的应用,内容清晰、直观。兼顾课堂教学与自学的特点和需要,每章都附有一定的习题,有助于读者加深对本书内容的理解并检验学习效果。

本书可作为高校本科机械专业的专业课教材,也可作为数控加工职业技能的培训教材和数控加工行业的工程技术人员、高级技术工人的工作参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

数控加工与编程技术/李体仁编著. —北京:北京大学出版社, 2011. 1

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-18475-2

I. ①数… II. ①李… 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(2011)第 011800 号

书 名: 数控加工与编程技术

著作责任者: 李体仁 编著

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 周 瑞

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-18475-2/TH·0231

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 442 千字

2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 34.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

机床数控加工技术是先进制造与自动化技术中最核心的技术之一，是一种可以高效、优质地实现机械产品零件加工的理论和方法，是制造业自动化、柔性化和数字化的基础与关键技术。数控加工技术主要包括数控加工工艺装备、数控加工工艺和数控加工程序编制等技术，本书主要介绍数控加工程序编制技术。

本书从数控加工技术的应用角度出发，通过典型零件数控加工实例分析，介绍数控加工编程技术的基本概念、数控车削常用编程指令和程序编制方法、数控铣削常用编程指令和程序编制方法以及 CAD、CAM 编程基础知识，侧重于数控加工技术综合应用，强调基础性和实用性。

本书共分 5 章：数控加工与编程技术基础、数控铣床和加工中心编程、数控车床编程、数控编程实例、CAD/CAM 技术。第 1 章、第 3 章、第 4.1 节由陕西科技大学张斌编写，第 2 章、第 4.2 节由陕西科技大学孙建功编写，第 5 章由西安技师学院李佳编写，陕西科技大学闫永志、孙腾飞、董罡等参与了其中部分图的绘制和资料整理。全书由陕西科技大学李体仁审核、汇总和整理。在本书编写过程中，参阅了 FANUC 编程手册和相关的技术资料，在此表示衷心的感谢。

数控加工技术处于不断的发展当中，限于作者的水平与经验，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2010 年 11 月

# 目 录

<b>第 1 章 数控加工与编程技术基础</b> .....	1
1.1 数控加工的基础知识 .....	2
1.1.1 数控编程技术的基本概念 .....	2
1.1.2 数控技术的优点 .....	4
1.1.3 数控编程方法 .....	5
1.2 数控加工坐标系 .....	10
1.2.1 右手直角笛卡尔坐标(右手规则)的原则 .....	10
1.2.2 零件固定、刀具运动的原则 .....	12
1.3 参考点的概念 .....	13
1.3.1 机床原点 .....	13
1.3.2 机床参考点 .....	13
1.3.3 工件参考点 .....	14
1.3.4 刀具参考点 .....	15
1.4 程序的结构与组成 .....	15
1.4.1 程序有关的术语 .....	15
1.4.2 数据的尺寸输入格式 .....	18
1.4.3 程序的结构 .....	19
1.4.4 子程序 .....	28
1.5 数控加工工艺设计 .....	30
1.5.1 数控加工工艺概述 .....	30
1.5.2 数控加工中的刀具 .....	38
习题 .....	52
<b>第 2 章 数控铣床和加工中心编程</b> .....	53
2.1 数控铣床和加工中心编程基础 .....	55
2.1.1 数控铣床和加工中心 .....	55
2.1.2 数控铣床和加工中心的主要功能 .....	56
2.1.3 数控铣床和加工中心的工具系统 .....	57
2.1.4 数控铣床和加工中心用夹具 .....	59
2.1.5 数控铣床和加工中心进退刀路的工艺处理 .....	60
2.1.6 数控铣床和加工中心的加工对象 .....	62
2.1.7 数控铣床和加工中心的编程特点 .....	63
2.2 数控铣床和加工中心坐标系 .....	64
2.2.1 机床原点与参考点 .....	64
2.2.2 机床坐标系 .....	64
2.2.3 工件坐标系 .....	64
2.3 工件坐标系建立的方法 .....	65
2.3.1 G92 设定工件坐标系 .....	66
2.3.2 G54~G59 设定工件坐标系 .....	66
2.4 数控铣床 G00 编程指令 .....	69
2.4.1 基本编程指令 .....	69
2.4.2 刀具长度补偿的建立和取消 G43、G44、G49 .....	72
2.4.3 刀具半径补偿的建立和取消 G41、G42、G40 .....	76
2.4.4 孔加工固定循环 .....	82
2.4.5 子程序 .....	92
2.5 数控铣和加工中心高级编程指令 .....	95
2.5.1 机床坐标系选择 G53 .....	95
2.5.2 子坐标系(G52) .....	95
2.5.3 极坐标(G15、G16) .....	96
2.5.4 缩放比例(G50、G51) .....	98
2.5.5 坐标系旋转(G68、G69) .....	99
2.5.6 可编程镜像 .....	101
2.6 加工中心换刀编程指令 .....	102
2.7 用户宏程序 .....	105
2.7.1 变量 .....	105
2.7.2 运算 .....	106
2.7.3 系统变量 .....	107
2.7.4 转移和循环 .....	110

2.7.5 宏程序调用 .....	111	3.6.2 轴向粗车循环 G71 .....	166
习题 .....	114	3.6.3 径向粗车循环 G72 .....	168
<b>第 3 章 数控车床编程 .....</b>	<b>118</b>	3.6.4 模式重复切削 循环 G73 .....	173
3.1 数控车床编程基础 .....	119	3.6.5 精加工循环 G70 .....	175
3.1.1 概述 .....	119	3.7 断屑循环指令 .....	176
3.1.2 前置刀架和后置刀架 车床坐标系 .....	121	3.7.1 深孔钻循环 G74 .....	176
3.1.3 绝对坐标编程和相对 坐标编程 .....	124	3.7.2 径向切槽多重 循环 G75 .....	177
3.1.4 恒表面线速度切削 .....	125	3.8 程序举例 .....	180
3.1.5 切削进给(G98/G99、 F 指令) .....	126	3.9 刀尖半径补偿 G40, G41, G42 .....	185
3.1.6 刀具功能(T 指令) .....	127	习题 .....	193
3.1.7 直径和半径编程 .....	128	<b>第 4 章 数控编程实例 .....</b>	<b>196</b>
3.1.8 进、退刀方式 .....	128	4.1 数控车床编程实例 .....	197
3.2 数控车床工件坐标系的建立 .....	129	4.1.1 数控车削加工工艺特点 .....	197
3.2.1 试切对刀法 .....	129	4.1.2 数控车削实例 .....	200
3.2.2 G50 设定工件坐标系 .....	129	4.2 数控铣床和加工中心编程实例 .....	226
3.2.3 G54~G59 设定工件 坐标系 .....	131	习题 .....	242
3.2.4 CNC 车床编程格式 .....	133	<b>第 5 章 CAD/CAM 技术 .....</b>	<b>249</b>
3.3 基本的 G 指令 .....	134	5.1 CAD/CAM 概述 .....	250
3.3.1 快速移动指令 G00 .....	137	5.1.1 CAD 技术的应用 .....	251
3.3.2 直线插补 G01 .....	138	5.1.2 CAD 技术的发展历程 .....	252
3.3.3 圆弧插补 G02、G03 .....	143	5.1.3 CAD 技术发展的关键及 主流产品 .....	253
3.3.4 暂停指令 G04 .....	145	5.1.4 CAD/CAM 集成系统 .....	256
3.4 螺纹切削编程 .....	146	5.1.5 产品数据交换标准 .....	256
3.4.1 概述 .....	146	5.1.6 后置处理技术 .....	257
3.4.2 螺纹切削时的运动 .....	147	5.2 自动编程的基本流程 .....	259
3.4.3 螺纹切削指令 G32 .....	150	5.3 调制解调器(Modem)三维加工 编程的基本流程 .....	260
3.4.4 基本螺纹切削循环 指令 G92 .....	153	5.3.1 模型设计 .....	260
3.4.5 多重螺纹切削 循环 G76 .....	155	5.3.2 文件转换 .....	261
3.5 简单台阶轴的单一循环编程 .....	156	5.3.3 工艺介绍 .....	263
3.5.1 直线切削循环 G90 .....	157	5.3.4 刀具轨迹生成 .....	264
3.5.2 径向切削循环 G94 .....	161	5.3.5 后置处理 .....	271
3.6 复杂轴类零件的多重 循环编程 .....	164	5.3.6 程序的传输和加工 .....	277
3.6.1 概述 .....	164	5.4 音乐盒模型编程加工的流程 .....	279

---

5.4.1 加工工艺介绍 .....	279	习题 .....	294
5.4.2 刀具路径 .....	280	<b>参考文献</b> .....	295
5.4.3 实体验证 .....	292		
5.4.4 后处理 .....	293		

# 第 1 章

## 数控加工与编程技术基础

数控加工技术是先进制造自动化技术最核心的技术之一，学习数控加工技术必须首先了解数控加工的主要特点和基本方法，数控加工与传统普通加工的主要区别，数控程序编制的基本要求和规律，在数控加工中如何根据不同类型零件的加工要求确定相应的工艺方案，从而使程序符合工艺的要求，本章将从这几个方面讲述数控加工的基本原理。



### 学习目标

- 了解数控加工技术的主要特点和一般加工步骤
- 掌握数控机床坐标系的基本规则
- 掌握数控加工程序的术语及程序结构
- 了解数控加工工艺的主要特点



### 学习要求

知识要点	能力要求	相关知识
数控加工的基础知识	(1) 了解什么是数控加工； (2) 掌握数控加工过程的基本步骤	数控机床的结构与工作方式、机械加工基本方法
数控加工坐标系	(1) 了解数控加工中有关坐标系的规定； (2) 学会分析不同类型数控机床的坐标方向	右手笛卡尔坐标系
参考点的概念	(1) 了解数控加工中几个参考点及其相互关系	右手笛卡尔坐标系
程序的结构与组成	(1) 了解数控编程中的常用术语及其各自的功能； (2) 掌握数控编程语句的编写规则； (3) 掌握程序基本结构及各类指令字的功能	准备功能、辅助功能、主轴功能、进给功能、刀具功能
数控加工工艺设计	(1) 了解数控加工工艺与传统加工工艺的区别； (2) 掌握数控加工工艺编制的步骤	机械加工工艺规程、机械加工刀具及工装





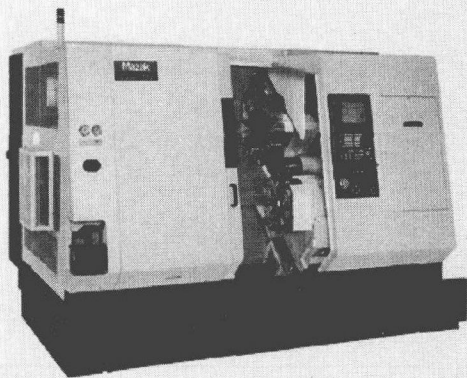
## 导入案例

数控加工是在数控机床上进行零件加工的一种工艺方法,用数字信息控制零件和刀具的移动。是解决零件品种多变、形状复杂、精度要求等问题和实现高效化和自动化加工的有效途径。

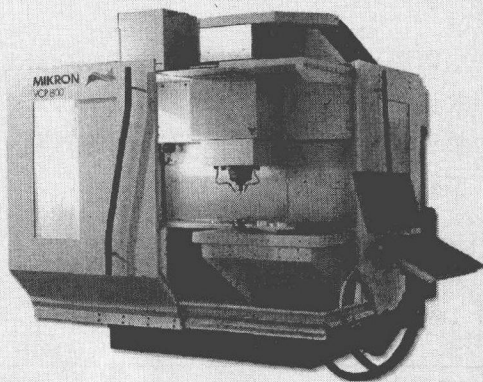
数控技术起源于航空工业的需要,20世纪40年代后期,美国一家直升机公司提出了数控机床的初始设想,1952年美国麻省理工学院研制出三坐标数控铣床。50年代中期这种数控铣床已用于加工飞机零件。60年代,数控系统和程序编制工作日益成熟和完善,数控机床已被用于各个工业部门。

近年来,我国数控加工技术发展非常迅速,国产数控机床已经可以满足国内市场的需要,高性能的车削中心和车铣中心通过引进技术和自主开发,一些产品已能满足部分高端用户的需要。其中,立式加工中心在技术上比较成熟,技术性能与国际水平接近,但卧式加工中心等产品在精度和性能上与国外同类产品相比还有一定差距。因此,目前我国在卧式加工中心、高速加工中心、五轴加工中心等方面主要依赖进口。

由于数控加工技术在生产柔性化、加工精度、加工质量等方面的巨大优势,在机械制造业中正逐渐成为主要力量,我们所从事的制造业也正是由于数控技术的应用而发生了很大的变化。想要了解数控加工的基本原理,数控加工的过程是什么样的,都可以从本章找到答案。



双刀架车削中心



立式加工中心

## 1.1 数控加工的基础知识

### 1.1.1 数控编程技术的基本概念

随着科学技术和社会生产的不断进步,机械产品日趋复杂,对机械产品的质量和生产率的要求也越来越高。在航空航天、微电子、信息技术、汽车、造船、建筑、军工和计算机技术等行业中,零件形状复杂、结构改型频繁、批量小、零件精度高、加工困难、生产效率低等已成为日益突出的现实问题。机械加工工艺过程的自动化和智能化是适应上述发

展特点的最重要手段。

为解决上述问题,一种灵活、通用、高精度、高效率的“柔性”自动化生产设备——数控机床应运而生了。目前,数控技术已逐步普及,数控机床在工业生产中得到了广泛应用,已成为机床自动化的一个重要发展方向。所谓数控是数字控制(Numerical Control, NC)的简称,是指用数字、文字和符号组成的数字指令来实现单台或多台机械设备动作控制的技术。它控制的通常是位置、角度、速度等机械量和与机械能量流向有关的开关量。目前数控一般采用通用或专用计算机实现数字程序控制,因此也被称为计算机数控,(CNC)。这种技术用计算机按照事先存储的程序来执行对设备的控制。由于计算机代替了原先使用的硬件逻辑电路组成的数控装置,使数据的存储、处理、运算、逻辑判断等各种控制功能的实现可以通过计算机软件来完成。

数控加工技术的应用是机械制造业的一次技术革命,它使机械制造业的发展进入了一个崭新的阶段。由于数控机床综合应用了电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等方面的技术成果,具有高柔性、高精度与高度自动化的特点,因此它提高了机械制造业的制造水平,解决了机械制造中常规加工技术难以解决、甚至无法解决的复杂型面零件的加工,为社会提供了高质量、多种类及高可靠性的机械产品,已取得了巨大的经济效益。

数控加工具有较强的适应性和通用性,能获得更高的加工精度和稳定的加工质量,具有较高的生产效率、能获得良好的经济效益,能实现复杂的运动,能改善劳动条件、提高劳动生产率,便于实现现代化的生产管理等特点。

数控机床是一种高度自动化的机床,有一般机床所不具备的许多优点,所以数控机床的应用范围在不断扩大,但数控机床是一种高度机电一体化产品,技术含量高,成本高,使用维修都有一定难度,若从效益最优化的技术经济角度出发,数控机床一般适用于加工如下零件。

- (1) 多种类、小批量零件。
- (2) 结构较复杂、精度要求较高的零件。
- (3) 需要频繁改型的零件。
- (4) 价格昂贵、不允许报废的关键零件。
- (5) 最小生产周期的急需零件。

数控加工过程包括按给定的零件加工要求(零件图样、CAD数据或实物模型)进行加工的全过程,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方面,如图1.1所示。数控加工就是根据被加工零件和工艺要求编制成以数码表示的程序,输入到数控机床的数控装置或控制计算机中,以控制工件和刀具的相对运动,使之加工出合格零件的方法。使用数控机床加工时,必须编制零件的加工程序,理想的加工程序不仅应保证加工出符合设计要求的零件,同时应能使数控机床功能得到合理的应用和充分的发挥,且能安全可靠和高效地工作。数控加工中的工艺问题的处理与普通机械加工基本相同,但又有其特点,因此在设计零件的数控加工工艺时,既要遵循普通加工工艺的基本原则和方法,又要考虑数控加工本身的特点和零件编程要求。数控编程技术是数控加工技术中的关键技术之一,也是目前CAD/CAPP/CAM系统中最能明显发挥效益的环节之一。数控编程技术在实现设计加工自动化、提高加工精度和加工质量、缩短产品研制周期等方面发挥着重要作用,在机械制造工业、航空工业、汽车工业等领域有着广泛的应用。

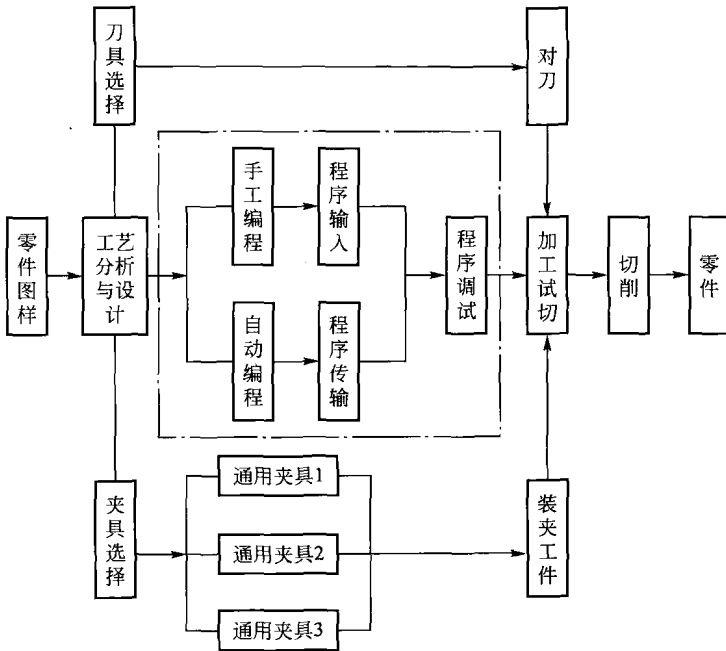


图 1.1 数控加工过程

### 1.1.2 数控技术的优点

#### 1. 与传统加工方式的区别

零件的加工主要有以下几个步骤。

- (1) 零件图的工艺分析。
- (2) 加工方法的选择。
- (3) 零件的装夹及切削刀具的选择。
- (4) 切削用量的确定。
- (5) 切削工件。

无论对于传统加工，还是数控加工，其基本步骤都是相同的，主要的区别在于各种数据输入方式的不同。在传统加工中，操作人员需要手动操作机床，移动切削刀具实现加工。如果对一批零件进行加工，则需要操作人员不断重复地进行同样的机床操作。但事实上，操作人员只能进行近似的加工，无法保证每一次的加工都是完全相同的。因此，如何保证尺寸公差和表面质量，成为需要解决的典型问题。这也就造成了传统加工方法下加工的零件有较多的不一致。而对于数控加工而言，一旦零件程序验证无误，就可以进行反复多次使用，可以保持零件加工的一致性。当然，考虑到刀具磨损等因素，也需要调整零件的安装及采取相应的补偿措施。

实际生产中，往往采用传统加工与数控加工相结合的方式，在简单零件生产和零件粗加工中，传统加工方法依然发挥着重大作用，而对于复杂零件和精度要求高的零件采用数控加工方法则更为有利。

#### 2. 数控加工的优点

数控加工的优势主要集中在以下几个方面。

### 1) 缩短加工准备时间

程序编制完成, 经过试切证实无误后, 就可以为下次使用做好准备, 直接调用非常方便。准备时间通常只是在首次加工中较长, 但对任何以后的运行来说, 几乎不需要太多的准备时间。即使零件根据实际工程需要进行修改, 其加工程序也可以方便快捷地进行相应的修改, 使整体的准备时间大大缩短。

### 2) 缩短零件的装夹时间, 简化零件的安装

零件的安装时间属于非生产性的辅助时间, 由于 CNC 机床的设计采用模块化的夹具、标准的数控刀具、定位装置、自动换刀系统及其他一些先进装置, 使得零件的安装时间更短, 比普通机床更为高效。

在普通机床加工中, 非标准刀具和自产刀具的使用, 使机床周围的工作台和工作箱非常凌乱, 但对于数控机床而言, 采用标准刀具进行切削, 例如: 中心钻、镗孔刀具及多工步刀具等都被标准刀具所取代。与非标刀具和专用刀具相比, 标准刀具的换刀更加简单。此外, 从刀具储备来说, 标准刀具也更有优势。在夹具方面, 为 CNC 加工设计的装夹系统通常不要求钻模、定位孔等辅助定位, 因此结构简单, 装卸较为方便。

### 3) 提高零件加工的精度和重复精度

CNC 机床加工的精确性和重复性是许多用户考虑的主要优势。程序一旦确定, 就可根据需要反复使用, 而不会漏掉其中的任何一位数据。程序允许存在例如刀具磨损等可变因素, 通过采取相应的补偿措施来保证加工精度。CNC 机床的精确性和重复性可以保证多次生产零件的一致性。

### 4) 可以进行复杂轮廓外形零件加工

CNC 车床、铣床和加工中心可以针对各种零件外形进行加工, 通过采用计算机编程生成三维刀具路径, 顺利完成加工。很多时候, 不需要额外制造模型, 就可以完成复杂零件的加工。

### 5) 提高切削有效时间的一致性

在 CNC 机床上, 手动操作仅用来装卸工件等辅助性工作, 对大批量生产而言, 非生产时间造成的消耗由于可以平摊在许多零件上而变得比较小。而相对固定的切削加工时间主要体现在程序执行的重复性工作上, 这样生产进度和分配到单机上的工作可以进行精确的计算。

### 6) 提高零件加工的生产效率

数控加工为提高生产率和产品质量提供了保障, 由于数控技术使生产自动化程度大大提高, 因此可以有效地提高零件的加工效率。

## 1.1.3 数控编程方法

数控编程是从零件图纸到获得数控加工程序的全过程。数控编程的主要内容包括: 分析加工要求并进行工艺设计, 以确定加工方案, 选择合适的数控机床、刀具、夹具, 确定合理的走刀路线及切削用量等; 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或机床运动轨迹; 按照数控系统可接受的程序格式, 生成零件加工程序, 然后对其进行验证和修改, 直到生成合格的加工程序。根据零件加工表面的复杂程度、数值计算的难易程度、数控机床的数量及现有编程条件等因素, 数控加工程序可通过手工编程或计算机辅助编程来获得。

因此, 数控编程包含了数控加工与编程、机械加工工艺、CAD/CAM 软件应用等多方

面的知识,其主要任务是计算加工走刀中的刀位点(Cutter Locationpoint, CL点),多轴加工中还要给出刀轴矢量。数控铣或者数控加工中心的加工编程是目前应用最广泛的数控编程技术。

数控编程通常分为手工编程和计算机辅助编程两类,而计算机辅助编程又分为数控语言自动编程、交互图形编程和CAD/CAM集成系统编程等多种。目前数控编程正向集成化、智能化和可视化方向发展。

### 1. 手工编程

手工编程就是指从工艺分析、数值计算直到数控程序的试切和修改等过程全部或主要由人工完成,是数控编程中最常见的方法。由于手工编程中,所有的计算由手工完成,因此,要求编程人员不仅要熟悉各种类型的数控代码及编程规则,而且还必须具备机械加工工艺知识和数值计算能力。对于点位加工或几何形状不太复杂的零件,数控编程计算较简单、程序段不多,手工编程是可行的。但对形状复杂的零件,特别是具有曲线、曲面(如叶片、复杂模具型腔)或几何形状并不复杂但程序量大的零件(如复杂孔系的箱体)以及数控机床拥有量较大而且产品不断更新的企业,手工编程就很难胜任。根据生产实践统计,手工编程时间与数控机床加工时间之比一般为30:1。可见手工编程效率低、出错率高,因而必然要被其他先进编程方法所替代。

手工编程的编程内容和一般步骤如图1.2所示。

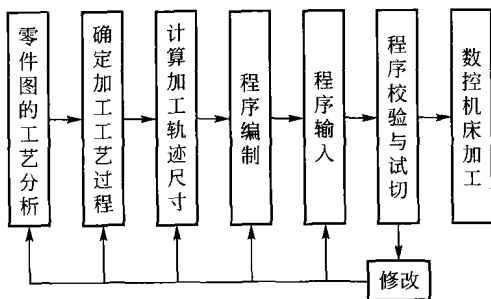


图 1.2 手工编程步骤

#### 1) 零件图的工艺分析、确定加工过程

在确定加工工艺过程时,编程人员要根据被加工零件图纸,对工件的形位公差、尺寸、技术要求进行分析,选择加工方案,确定加工顺序、加工路线、装夹方式、刀具及切削参数等,同时还要考虑所用数控系统的指令功能,充分发挥机床的效能,尽量缩短走刀路线,减少编程工作量。

#### 2) 加工轨迹的数据计算与输入

数控机床按照工艺规划好的加工路径和切削参数来编写程序,因此要根据零件图的几何尺寸确定工艺路线及设定坐标系,计算零件粗、精加工运动的轨迹,得到刀位数据。对于形状比较简单的零件(如直线和圆弧组成的零件)的轮廓加工,要计算出几何元素的起点、终点、圆弧的圆心、两几何元素的交点或切点的坐标值,有的还要计算刀具中心的运动轨迹坐标值。对于形状比较复杂的零件(如非圆曲线、曲面组成的零件),需要用直线段或圆弧段逼近,根据加工精度的要求计算出节点坐标值,这种数值计算一般要用计算机来完成。

#### 3) 程序编制

在各项工艺参数、刀具路径等确定以后,编程人员根据数控系统的功能指令代码及程序段格式,逐段编写加工程序。

#### 4) 程序输入

把编制完成的加工程序通过控制面板输入到数控系统或通过程序的传输(或阅读)装置输入数控系统。

### 5) 程序校验与试切

输入到数控系统中的加工程序必须经过校验和试切才能正式使用。校验的方法是让数控机床空运行,按照规划的刀具路径进行模拟切削走刀,以检查机床的运动轨迹是否正确。在有 CRT 图形显示的数控机床上,用模拟刀具进行工件切削的方法进行检验更为方便,但这些方法只能检验运动是否正确,不能检验被加工零件的加工精度。因此,必须进行零件的首件试切。当发现有加工误差时,分析误差产生的原因,找出问题并进行修正。最后利用检验无误的数控程序进行加工。

## 2. 数控语言自动编程

对复杂零件进行编程加工时,其刀具运动轨迹的计算非常复杂,计算烦琐而且容易出错。编程工作量非常大,手工编程已经无法满足需要。因此必须采用计算机辅助编制数控程序。

自动编程是用计算机把人工输入的零件图纸信息改写成数控机床能执行的数控加工程序,各种数据的处理、计算和编程均由计算机来完成。计算机的计算更为精确和快速,不易出错。目前常使用 APT 语言自动编程(Automatically Programmed Tool)系统来实现。APT 语言是用专用语句编写源程序,再由 APT 处理程序经过编译和运算,输出刀具路径,然后通过后置处理,获得数控机床所要求的数控指令。除了 APT 语言之外,还有其他一些自动编程系统,如德国 EXAPT、法国 IFAPT、日本 FAPT 等。我国也在 20 世纪 70 年代研制了如 SKC、ZCX 等铣削、车削数控自动编程系统。20 世纪 80 年代,市场上相继出现了 NCG、APTX、APTXGI 等高水平软件,近几年来又出现了各种小而专的编程系统和多坐标编程系统。

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,使数控加工程序从面向机床指令的“汇编语言”级上升到面向几何元素。但由于 APT 语言属于开发得比较早的数控编程语言,当时计算机的图形处理能力不够强,因此必须在 APT 源程序中用语言的形式去描述几何图形信息和加工过程,再由计算机处理生成加工程序。可见这种编程方法的直观性较差,编程过程复杂且不易掌握,在编程过程中也不利于进行检查,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、CAPP 系统有效连接,不易实现高度的自动化和集成化。

## 3. CAD/CAM 系统自动编程

### 1) CAD/CAM 系统自动编程原理和功能

20 世纪 80 年代以后,随着 CAD/CAM 技术的成熟和计算机图形处理能力的提高,出现了 CAD/CAM 自动编程软件,它使用了以待加工零件 CAD 模型为基础的一种集加工工艺规划及数控编程为一体的自动编程方法。可以直接利用 CAD 模块生成几何图形,采用人机交互的实时对话方式,在计算机屏幕上指定零件被加工部位,并输入相应的加工参数,计算机便可自动进行必要的数据处理,编制出数控加工程序,同时在屏幕上动态地显示出刀具的加工轨迹。从而有效地解决了零件几何建模及显示、交互编辑以及刀具轨迹生成和验证等问题,具有形象、直观和高效等优点,推动了 CAD 和 CAM 向集成化方向发展。

目前,工作站和微机平台 CAD/CAM 软件已居主导地位,高档 CAM 软件的代表有 UG、IDEAS、Pro/E、CATIA 等。这类软件的特点是优越的参数化设计、变量化设计、特征造型技术与传统的实体和曲面造型功能结合在一起,加工方式完备,计算准确,实用性强。可以从简单的 2 轴加工到以 5 轴联动方式来加工的复杂工件表面,并可以对数控加

工过程进行自动控制和优化，是航空、造船、汽车等行业的首选 CAD/CAM 软件。此外，有一些相对独立的 CAM 软件如 Mastercam、Surfcam 等。这种软件主要通过中性文件从其他 CAD 系统获得产品几何模型。系统主要有交互工艺参数输入模块、刀具路径生成模块、刀具路径的编辑模块、三维动态仿真模块和后置处理模块。

国内 CAD/CAM 软件的代表有 CAXA - ME、金银花系统等。这些软件是我国面向机械制造业自主开发的中文界面的 CAD/CAM 软件，具备机械产品设计、工艺规划设计和数控加工自动编程等功能。

CAD/CAM 软件所具有的基本功能包括以下几个方面：

(1) 三维造型利用计算机建立完整的产品三维几何形状。

(2) 参数管理：包括加工对象参数、刀具参数、加工工艺参数等的设置，是交互式图形编程的主要内容，因此是 CAD/CAM 软件数控编程的主要功能组成部分。

(3) 刀位点的计算：根据用户设定的加工参数和加工对象计算出刀位点，由于刀位点是数控编程中最重要和复杂的工作环节，因此它也是利用 CAD/CAM 软件进行交互式图形编程的明显优势。

(4) 动态仿真：以图形化的方式直观、逼真地模拟加工过程，检验编写的数控程序的正确性。

(5) 刀具轨迹的编辑与修改：可以对数控刀具轨迹采用多种编辑手段进行增加、删除和修改。

(6) 后置处理：CAD/CAM 软件计算出的刀具轨迹包含了大量刀位点的坐标，后置处理的作用就是将这些刀位点坐标按标准的格式转换到数控程序中。数控程序主体的实现，实际上是一个文字处理过程。

(7) 生成工艺文件：将操作人员所需要的各种工艺信息编写成符合标准和要求的文档，避免编程人员与机床操作人员的失误。

### 2) CAD/CAM 系统编程的基本步骤

不同 CAD/CAM 系统的功能、用户界面有所不同，编程操作也不尽相同。但从总体上讲，其编程的基本原理及基本步骤大体是一致的，如图 1.3 所示。

(1) 建立 CAD 模型。利用 CAD/CAM 系统的几何建模功能，将零件被加工部位的几何图形准确地绘制在计算机屏幕上。同时在计算机内自动形成零件图形的数据文件。例如可以利用 Mastercam 或者使用其他的 CAD 软件造型后，对其进行数据转换，转换成

Mastercam 专用的文件格式。通过 Mastercam 的文件转换功能来读取其他 CAD 软件的造型文件。也可借助于三坐标测量仪 CMM 或激光扫描仪等工具测量被加工零件的形体表面，通过反求工程将测量的数据处理后送到 CAD 系统进行建模。

(2) 加工工艺分析与规划。工艺分析与规划主要包括以下内容。

① 确定加工对象：通过分析模型，确定零件加工区域及加工方法。

② 工艺规划：按照零件形状特征、功能要求、精度和粗糙度等要求，合理安排加工

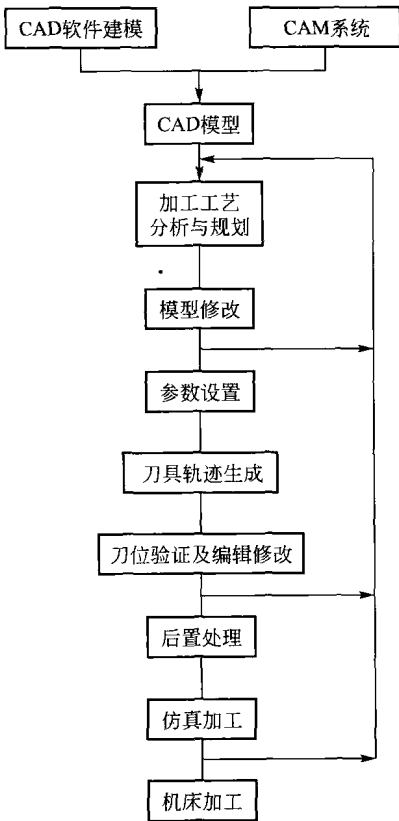


图 1.3 CAD/CAM 系统数控编程步骤

工艺路线,选择加工刀具;确定加工余量;详细明确从粗加工到精加工的各个环节。

(3) 模型修改。由于CAD造型人员更多考虑零件设计的方便性与完整性,并不考虑对CAM加工的影响,因此要根据加工对象及工艺规划对CAD模型作适合于CAM编程的处理,例如进行曲面修补、对轮廓曲线进行修整等。

(4) 参数设置。参数设置构成了自动编程的主要操作内容,直接影响数控程序的生成质量,主要包括如下内容。

① 设置切削方式,指定刀具轨迹的相关参数。

② 设置加工对象,用户通过交互手段选择被加工几何体或其中的加工分区、毛坯、避让区域等。

③ 工艺参数与刀具参数设置,针对每一个加工工序选择合适的加工刀具,在CAD/CAM软件中设置工艺参数,例如对切削液控制、进给量、主轴转速等的设置。

④ 数控程序参数设置,参数主要有进刀和退刀方式、行间距、安全高度等。

(5) 刀具轨迹。刀具轨迹的生成是基于屏幕图形以人机交互方式进行的。用户根据屏幕提示,通过光标选择相应的图形目标,确定待加工的零件表面及限制边界,输入切削加工的对刀点,选择切入和走刀方式。然后软件系统将自动地从图形文件中提取所需的几何信息,进行分析判断,计算节点数据,自动生成走刀路线,并将其转换为刀具位置数据,存入指定的刀位文件。

(6) 刀位验证及编辑修改。为了确保程序的安全性,必须对所生成的刀位文件进行加工过程仿真,检查生成的刀具轨迹,验证走刀路线是否正确合理,检查有无过切或者加工不到位,检查是否发生刀具与工件、夹具的干涉。根据需要可对已生成的刀具轨迹进行编辑修改、优化处理,以得到用户满意的、正确的走刀轨迹。

(7) 后置处理。后置处理的目的是形成具体机床的数控加工文件,它实际是一个文本编辑处理过程。由于各机床所使用的数控系统不同,其数控代码及其格式也不尽相同。为此必须通过后置处理,将刀位文件转换成具体数控机床所需的数控加工程序。

**注意:**在上述工作中,由于工艺分析和规划决定了刀具轨迹的质量,参数设置构成了程序操作的主要内容,因此编程人员的主要工作集中在工艺分析与规划、参数设置阶段。

### 3) CAD/CAM 软件系统编程特点

(1) CAD/CAM 系统自动数控编程与手工编程相比,具有以下特点。

① 数据处理能力强,可以处理各种复杂零件,特别是空间曲面。

② 高效快速地生成数控加工程序。

③ 灵活多变的后置处理:同样的零件在不同的机床上加工,其控制系统的各种指令不尽相同,但前置处理过程中,数据处理和轨迹计算却是一致的,只需要在后置处理中作相应调整就可以自动生成适用于不同数控系统的程序。

④ 程序自检、纠错能力强:借助自动编程对数控程序的动态仿真加工功能,可以连续、逼真地显示刀具加工轨迹和零件轮廓,发现问题可以及时修改。

⑤ 与数控系统通信非常便捷:自动编程系统可以利用计算机和数控系统的通信接口,把自动生成的数控程序直接输入数控系统,控制机床完成加工。可以做到输入和加工同时进行,进一步提高了编程效率,缩短了生产周期。

(2) CAD/CAM 系统自动数控编程是一种先进的编程方法,与APT相比,具有以下的特点。



① 将被加工零件的几何建模、刀位计算、图形显示和后置处理等过程集成在一起，有效地解决了编程的数据来源、图形显示、走刀模拟和交互编辑等问题，编程速度快、精度高，弥补了数控语言编程的不足。

② 编程过程是在计算机上直接面向零件几何图形交互进行，不需要用户编制零件加工源程序，用户界面友好，使用简便、直观，便于检查。

③ 有利于实现系统的集成，不仅能够实现产品设计与数控加工编程的集成，还便于工艺过程设计、刀夹量具设计等过程的集成。

现在，利用 CAD/CAM 软件系统进行数控加工编程已成为数控程序编制的主要手段。

## 1.2 数控加工坐标系

在 CNC 编程中，所有图纸信息由基本的数字转换到程序中，也需要使用数字来描述相关的指令、功能等，因此必须将图纸信息翻译成机床控制系统可以认识的数字信息，而坐标系是理解 CNC 工作原理和零件几何尺寸的关键。

为了使编程人员可以在不知道机床上刀具与工件之间相对运动形式的情况下，按零件图纸对加工程序进行编制，并能使其在同类数控机床上具有互换性，国际标准化组织 (ISO) 对数控机床的坐标系统作了统一规定，即 ISO 841 标准。我国于 1982 年颁布了 JB 3051—1982《数控机床 坐标系和运动方向的命名》标准，对数控机床的坐标和运动方向作了明确规定，该标准与 ISO 841 标准等效。

直角坐标系出现在 17 世纪，是一个定义点的概念，它采用 XY 坐标定义一个平面的二维点，用 XYZ 坐标定义空间的三维点。直角坐标系是由数学家笛卡尔提出的，因此通常用他的名字来表示直角坐标系，即笛卡尔坐标系。机床的几何关系是机床固定点和工件浮动点之间距离的关系，CNC 机床的几何关系一般采用右手笛卡尔坐标系进行确定。这样就可以使机床上运动部件的成形运动和辅助运动有确定的方向和位置，数控机床坐标系一般遵守两个原则，即右手直角笛卡尔坐标(右手规则)的原则和零件固定、刀具运动的原则。

### 1.2.1 右手直角笛卡尔坐标(右手规则)的原则

数控机床坐标系的具体位置与机床的类型有关。右手笛卡尔坐标系的确定方法是：将右手放在坐标系中，拇指、食指、中指呈相互垂直状态，各手指对应的方向就是手指的末端到顶部的方向。其中，大拇指为 X 方向，食指为 Y 方向，中指为 Z 方向，如图 1.4 所示。

任何类型的 CNC 机床都可以设计成一根或多根附加轴，一般使用字母 U、V、W 来指定与第一轴 X、Y、Z 平行的第二轴。定义绕 X 轴旋转的附加轴为 A 轴，绕 Y 轴旋转的附加轴为 B 轴，绕 Z 轴旋转的附加轴为 C 轴，旋转轴的正方向用绕 X、Y、Z 轴的右手螺旋法则来进行确定。

数控机床各坐标轴及其正方向的确定原则如下。

#### 1. 确定 Z 轴

以平行于机床主轴的刀具运动坐标为 Z 轴，Z 轴正方向是使刀具远离工件的方向。例如立式铣床，主轴箱的上下运动或主轴本身的上下运动即为 Z 轴，且向上为正。若主轴不能上下