



上海市教育委员会组编  
李郝林 方键 编

上海市普通高校“九五”重点教材

# 机床数控技术



359  
8

 机械工业出版社  
China Machine Press

上海市普通高校“九五”重点教材

# 机床数控技术

上海市教育委员会组编

李郝林 方 键 编  
汤季安 徐 弘 审



机械工业出版社

本书系世界银行贷款资助项目，重点介绍了数控机床的应用技术。为了便于不同需要的读者学习和掌握数控技术，全书分为上篇和下篇。上篇强调数控技术的应用知识，下篇则介绍数控改造和开发方面所需要的一些理论知识。本书的编写立足于数控应用技术的论述，对于 SIEMENS 典型数控系统的应用和操作知识也进行了介绍，并在附录中分别介绍了数控技术在自动化生产系统中的应用和 CAD/CAM 软件在生产中的应用情况。

本书的编写和材料组织立足于数控技术的应用，它不仅可作为机械类专业的教材，对一般的科技人员也有一定的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

机床数控技术/李郝林等编. - 北京: 机械工业出版社, 2000.

上海市普通高校“九五”重点教材

ISBN 7-111-08177-3

I. 机… II. 李… III. 数控机床-高等学校-教材 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 65393 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: 邓海平 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘志文

封面设计: 李雨桥 责任印制: 路琳

成都新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>· 13.75 印张· 337 千字

0 001 - 4 000 册

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

## 前 言

机床数控技术是 70 年代发展起来的一种机床自动控制技术。数控机床是典型的机电一体化产品，是高新技术的重要组成部分。采用数控机床，提高机械工业的自动化生产水平和产品质量，是当前机械制造业技术改造、技术更新的必由之路。现代数控机床是柔性制造单元（FMC），柔性制造系统（FMS）乃至计算机集成制造系统（CIMS）中不可缺少的基础设备。

本书分两个部分（上篇“操作知识”和下篇“技术基础”）介绍了数控机床的应用技术，其中上篇强调数控技术的应用知识，下篇则介绍数控改造及开发方面所需要的一些理论知识。为了提高学生解决实际问题的能力，本书在介绍数控编程技术的同时，还结合 SIEMENS 系统实例叙述了典型的数控系统及其操作知识。此外，对数控机床的一些控制元件和部件，不仅介绍了其工作原理和控制原理，还通过产品实例，介绍了它们与系统其它元部件信号的连接方式，这对于学生掌握这些产品的应用知识是十分重要的。考虑到现代数控机床已成为制造自动化系统不可缺少的基础设备，本书在附录中介绍了数控技术在制造自动化系统中的应用情况，对计算机直接数控（DNC）、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）做了简要介绍。另外，在附录中还介绍了 CAD/CAM 软件在产品开发中的应用情况，论述了制造业从设计到制造全过程的一体化解决方案。本书的编写和材料组织立足于数控技术的应用，它不仅适于高等院校机械设计制造及其自动化专业的师生，而且对有关科技人员也具有一定的参考价值。

本书由李郝林、方键共同编写，王维青、郁文也参加了部分章节的编写工作，在此一并致谢。

该书的主审为上海开通数控公司汤季安高级工程师、上海机床厂有限公司徐弘高级工程师。

该书在编写过程中，得到了上海机床厂有限公司、上海开通数控公司的大力支持，为我们提供了许多产品资料，在此一并致谢。

本教材属于世界银行贷款资助的课程建设项目之一。在教材编写的同时，我们还制作了介绍数控技术的光盘，内容包括各类数控产品展示，数控机床附件，如各种伺服电动机、传感器等实物照片，典型数控加工过程动画演示，包括曲轴磨削、曲面加工、数控车削等，此外还开发了供学生练习编程的模拟刀具轨迹软件，读者如有需要，可与编者联系，EMAIL：[haolin@public2.sta.net.cn](mailto:haolin@public2.sta.net.cn)

编 者  
于上海

# 目 录

前言

## 上篇 操作知识

第一章 概述 .....	2	第四节 数控加工的工艺路线设计 .....	100
第一节 数控机床 .....	2	第五节 数控加工工序的设计 .....	101
第二节 数控加工的特点 .....	2	思考题与习题 .....	106
第三节 数控机床的分类 .....	3	第四章 数控系统操作知识 .....	107
第四节 数控技术的学习方法 .....	3	第一节 概述 .....	107
第二章 数控加工的程序编制 .....	9	第二节 数控机床的操作面板 .....	107
第一节 程序编制的基础知识 .....	9	第三节 数控机床的加工准备 .....	110
第二节 数控铣床的程序编制 .....	18	第四节 程序管理操作 .....	112
第三节 数控车床的程序编制 .....	39	第五节 JOG 模式 .....	113
第四节 自动编程 .....	65	第六节 MDA 操作 .....	115
第五节 图形交互自动编程 .....	79	第七节 自动加工操作 .....	116
思考题与习题 .....	93	思考题与习题 .....	119
第三章 数控机床程序编制中的工艺处理 .....	97	第五章 典型的计算机数控系统介绍 .....	120
第一节 概述 .....	97	第一节 概述 .....	120
第二节 选择数控加工的零件及数控加工		第二节 西门子 840D 简介 .....	121
的内容 .....	98	第三节 西门子 840D 数控系统的组成 .....	122
第三节 数控加工零件的工艺性分析 .....	99	思考题与习题 .....	130

## 下篇 技术基础

第六章 数控机床的位移检测装置 .....	132	第三节 数字积分插补法 .....	180
第一节 概述 .....	132	第四节 数据采集插补法 .....	187
第二节 编码器 .....	132	思考题与习题 .....	193
第三节 光栅 .....	135	第九章 自由曲线及曲面的加工 .....	194
第四节 旋转变压器 .....	139	第一节 概述 .....	194
第五节 感应同步器 .....	141	第二节 曲线、曲面加工的基础知识 .....	195
思考题与习题 .....	145	思考题与习题 .....	201
第七章 数控机床的伺服系统 .....	146	附录 A 数控技术与制造自动化系统	
第一节 概述 .....	146	(MAS) .....	202
第二节 步进电动机控制系统 .....	146	第一节 概述 .....	202
第三节 交流伺服电动机控制系统 .....	156	第二节 制造自动化系统 .....	203
第四节 直流伺服电动机控制系统 .....	163	第三节 总结 .....	207
思考题与习题 .....	167	附录 B CAD/CAM 软件在产品开发中的	
第八章 数控系统插补原理 .....	168	应用 .....	209
第一节 概述 .....	168	附录 C 部分 CAD/CAM 软件一览表 .....	213
第二节 逐点比较插补法 .....	168	参考文献 .....	214

**上 篇**

**操 作 知 识**

# 第一章 概 述

## 第一节 数控机床

数控，即数字控制（Numerical Control，缩写为 NC），在机床领域指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。数控机床即是采用了数控技术的机床。在数控机床上加工零件时，一般是先编写零件加工程序单，即用程序规定零件加工的路线和工艺参数（如主轴转速、切削速度等），数控系统根据加工程序自动控制机床的运动，将零件加工出来。当变更加工对象时，除了只需重新编写零件的加工程序、更换刀具和调整夹具外，机床本身不需要进行任何调整就能把零件加工出来。所以，数控机床是一种灵活性极强的、高效能的全自动化加工机床。

数控机床主要由程序介质、数控装置、伺服系统和机床四部分组成，如图 1-1 所示。其中，程序介质用于记载各种加工信息，常用的有磁带和磁盘等。数控装置是控制机床运动的中枢系统，它的功能是按照规定的控制算法进行插补运算，并将结果经由输出装置送到各坐标控制伺服系统。伺服系统是数控系统的执行部分，它包括驱动主轴运动的控制单元、主轴电动机、驱动进给运动的控制单元及进给电动机。伺服系统按照数控装置的输出指令控制机床上的移动部件作相应的移动，并对定位的精度和速度进行控制。通常数控系统由数控装置和伺服系统两部分组成，各公司的数控产品也是将两者作为一体的。数控机床是一种高度自动化的机床，它既可以进行大切削量的粗加工，也可以进行半精加工和精加工，这就要求数控机床具有大功率和高精度。数控机床的主轴转速和进给速度远高于同规格和普通机床。

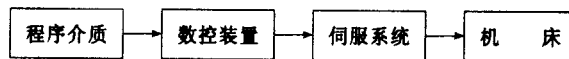


图 1-1 数控机床的组成

## 第二节 数控加工的特点

数控机床与普通机床加工零件的区别，在于数控机床是按照程序自动加工零件，而普通机床要由工人手工操作来加工零件。在数控机床上加工零件只要改变控制机床动作的程序，就可以达到加工不同零件的目的。因此，数控机床特别适用于加工小批量且形状复杂要求精度高的零件。

由于数控加工是一种程序控制过程，使其相应形成了以下几个特点：

1) 自动化程度高，可以减轻工人的体力劳动强度。数控机床对零件的加工是按事先编好的程序自动完成的，操作者除了操作键盘、装卸零件、安装刀具、完成关键工序的中间测量以及观察机床的运行之外，不需要进行繁重的重复性手工操作，劳动强度与紧张程度均可大为减轻，劳动条件也得到相应的改善。

2) 加工精度高、加工质量稳定可靠,加工误差一般能控制在 0.01mm 左右。数控机床进给传动链的反向间隙与丝杠螺距误差等均可由数控装置进行补偿,因此,数控机床能达到比较高的加工精度。此外数控机床的传动系统与机床结构都具有很高的刚度和热稳定性,而且提高了它的制造精度,特别是数控机床的自动加工方式,避免了生产者的人为操作误差,同一批加工零件的尺寸一致性好,产品合格率高,加工质量十分稳定。

3) 加工生产率高。零件加工所需要的时间包括机动时间与辅助时间两部分。数控机床能够有效地减少这两部分时间,因而加工生产率比普通机床高得多。数控机床主轴转速和进给量的范围比普通机床的范围大,每一道工序都能选用最合理的切削用量;良好的结构刚性允许数控机床进行大切削用量的强力切削,有效地节省了机动时间。数控机床移动部件的快速移动和定位均采用了加速与减速措施,因而选用了很高的空行程运动速度,消耗在快进、快退和定位的时间要比一般机床少得多。数控机床在更换被加工零件时几乎不需要重新调整机床,而零件又都安装在简单的定位夹紧装置中,用于停机进行零件安装调整的时间可以节省不少。

4) 对零件加工的适应性强、灵活性好,能加工形状复杂的零件。

5) 有利于生产管理的现代化。用数控机床加工零件,能准确地计算零件的加工工时,并有效地简化了检验和工夹具、半成品的管理工作。这些特点都有利于使生产管理现代化,便于实现计算机辅助制造。数控机床及其加工技术是计算机辅助制造系统的基础。

目前,在机械行业中,随着市场经济的发展,产品更新周期越来越短,中小批量的生产所占有的比例越来越大,对机械产品的精度和质量要求也在不断地提高。所以,普通机床越来越难以满足加工的要求。同时,由于技术水平的提高,数控机床的价格在不断下降,因此,数控机床在机械行业中的使用将越来越普遍。

### 第三节 数控机床的分类

数控机床的种类很多,功能各异,人们可从不同的角度对其进行分类。一般按机械运动的轨迹可分为:点位控制系统、直线控制系统和连续控制系统。按伺服系统的类型可分为:开环伺服系统、闭环伺服系统和半闭环伺服系统。按控制坐标数可分为:两坐标数控机床、三坐标数控机床和多坐标数控机床。

但从用户角度考虑,按机床加工方式或能完成的主要加工工序来分类可能更为合适。目前在常用的金属切削机床中,如车床、铣床、磨床、钻床、镗床以及齿轮加工机床,均开发了相应的数控机床,而且品种分类越来越细。按照数控机床的加工方式,可以把它分为以下几类:

(1) 金属切削类 属于此类的有数控车床、铣床、钻床、镗床、磨床、齿轮加工机床和加工中心等。

(2) 金属成形类 属于此类的有数控折弯机、弯管机、冲床、旋压机等。

(3) 特种加工类 属于此类的有数控线切割机、电火花加工机床以及激光切割机等。

(4) 其它类 如数控火焰切割机床、数控激光热处理机床、三坐标测量机等。

### 第四节 数控技术的学习方法

数控机床是一种自动化程度高的机床,随着科学技术的发展和生产上新要求的不断提



出，数控系统的功能在不断地扩大。因此，学习和掌握数控技术，对于从事数控技术开发、数控机床操作以及数控机床改造均是十分重要的。人们学习一种知识，总是具有一定的目的性。以下我们从数控机床操作者、数控机床改造者和特种数控机床开发者的不同需要，阐述数控技术的学习方法。

### 1. 数控机床的操作者

采用数控机床加工零件，首先要编写加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据的加工程序，以控制机床的运动，实现零件的切削加工。

对于数控机床的操作者来讲，其最主要的任务就是根据零件图样，编制相应的数控加工程序。目前数控加工程序的编制方法主要有两种，即手工编程和计算机自动编程。所谓手工编程，即编程中的工艺处理、数学处理、程序单编写、程序效验等工作主要靠人工完成。自动编程则在很高的程度上将人工完成的工作交给计算机及其外围设备装置进行。目前，在编程的各项工作中，除工艺处理仍主要依靠人工进行外，其余的工作均已通过自动编程达到了较高的计算机自动处理的程度。但在目前情况下，要取消手工编程是不可能的，我国多数工厂都采用手工编程方法编写零件加工程序。如果一个编程人员光学会自动编程而缺乏对手工编程的了解，一旦遇到目标程序在加工中发生问题，就不能较快地查出错误所在并及时进行必要的修正。因此，在一定程度上，手工编程是数控加工程序编制的基础。本书主要介绍手工编程的知识。

为使初学者对数控机床加工过程有个初步、具体的了解，我们通过一数控铣床的加工实例，介绍数控机床操作者应做的工作。

图 1-2 所示为一盖板零件，该零件的毛坯是一块  $180\text{mm} \times 90\text{mm} \times 12\text{mm}$  板料，要求铣削成图中粗实线所示的外形。

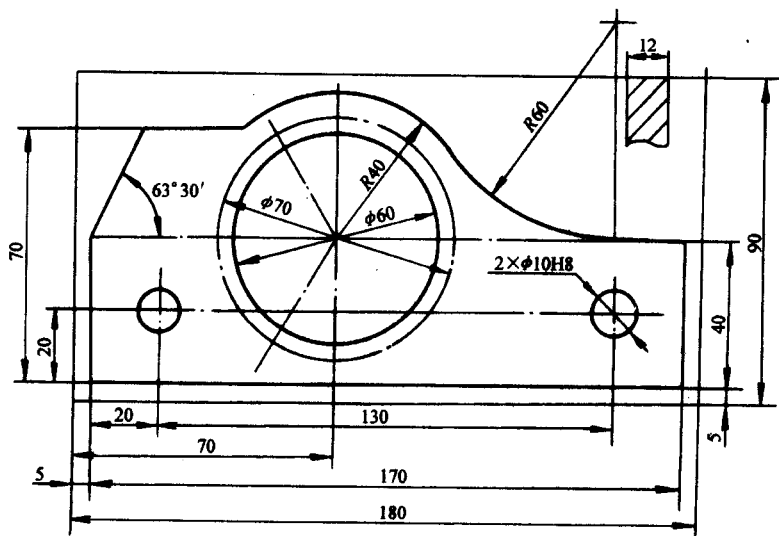


图 1-2 盖板零件图

手工编程过程主要包括以下几个方面：

1) 对零件图进行工艺分析，确定加工部位，解决如何安装与定位的工艺问题等。铣削时以其底面和  $2 \times \phi 10\text{H}8$  的孔定位，从  $\phi 60\text{mm}$  孔对工件进行压紧。

2) 确定编程坐标系、编程原点、对刀位置及对刀方法等。在编程时, 工件坐标系原点定在工件左下角  $A$  点 (如图 1-3 所示), 现以  $\phi 10\text{mm}$  立铣刀进行轮廓加工, 对刀点在工件坐标系中的位置为  $(-25, 10, 40)$ , 刀具的切入点为  $B$  点。

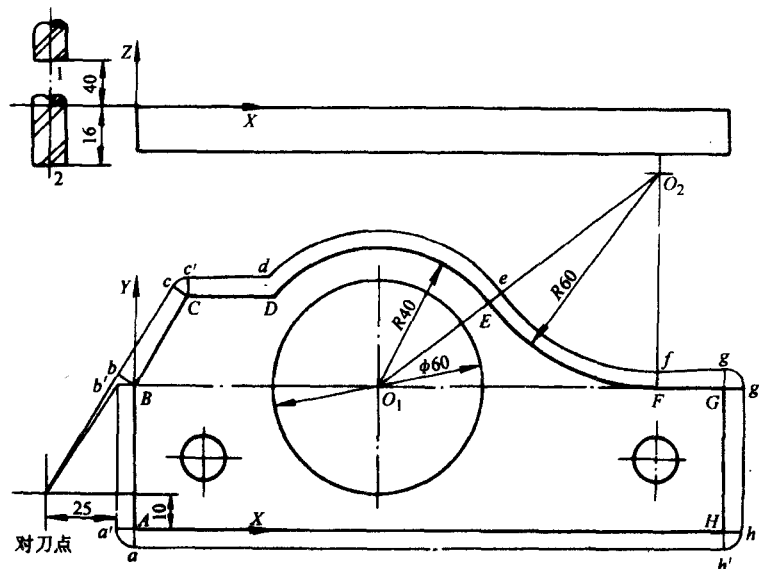


图 1-3 坐标计算简图

3) 确定加工路线、刀具运动方向与运动轨迹, 解决铣刀怎么走的问题。这时还应注意分析毛坯的余量状况、加工变形问题。

刀具中心的进给路线为: 对刀点 1 → 下刀点 2 -  $b - c - c'$  ... → 下刀点 2 → 对刀点 1。

4) 确定加工所用各种工艺参数, 包括主轴转速 ( $S$ )、进给速度 ( $F$ )、每次进给的背吃刀量、刀具参数等。

5) 数值计算。一个零件的轮廓往往是由许多不同的几何元素所组成, 如直线、圆弧、曲线等。各几何元素间的连接点称为基点。由于目前一般数控系统都具有直线、圆弧插补功能, 因此, 对于由直线与直线或直线与圆弧构成的平面轮廓零件, 其数值计算比较简单, 只需在各基点处注上代号 (如:  $A$ 、 $B$ 、 $O_1$ 、 $O_2$  等) 即可。而当零件的形状是由直线段或圆弧段之外的其它曲线构成时, 其数值计算就比较复杂。必须在满足允许的编程误差条件下将曲线离散成小线段后才能进行加工。一般取零件公差  $1/5 \sim 1/10$  作为编程的允许误差。

对于如图 1-2 所示的盖板零件, 其轮廓均由直线或圆弧段组成, 其基点为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ , 圆弧  $DE$  和  $EF$  的圆心分别为  $O_1$  和  $O_2$ 。

6) 填写程序单。每种数控系统, 根据系统本身的特点及编程的需要, 都有一定的程序格式。对于不同的机床, 其程序格式也不同。因此, 编程人员必须严格按照机床说明书的规定格式进行编程。本书将以两台数控机床为例, 介绍手工编程指令系统。

对图 1-2 所示的盖板零件, 其加工程序如下:

```
O0001
N01 G92 X - 25.0 Y10.0 Z40.0
N02 G90 G00 Z - 16.0 S300 M03
```

```

N03 G41 G01 X0 Y40.0 F100 D01 M08
N04 X14.96 Y70.0
N05 X43.54
N06 G02 X - 102.0 Y64.0 I26.46 J - 30.0
N07 G03 X - 150.0 Y40.0 I48.0 J36.0
N08 G01 X170.0
N09 Y0
N10 X0
N11 Y40.0
N12 G00 G40 X - 25.0 Y10.0 Z40.0 M09
N13 M30

```

7) 校验程序。程序的校验可采用数控系统中模拟加工的功能，由屏幕显示出零件加工的轨迹，并判断显示的轨迹是否与编程的轨迹相符合。

8) 试切加工。上述模拟加工功能只能大致看出程序的正确性，而对程序中存在的微小错误（如较小的数值错误等）都无法反映出来，所以试切检查是有必要的。

由以上工作过程可以看出，作为一个编程人员，主要应掌握：

1) 数控程序的编制知识，即 G 代码与 M 代码的应用知识。常用的 G 代码有二十余种，因此这一部分知识是容易掌握的。

2) 数控系统的操作知识，即如何利用数控系统达到机床控制的目的。这就相当于计算机语言学习中，学会了 C 语言、BASIC 语言的编程，进而如何上机操作的问题。常用的数控系统有 FANUC、SIEMENS 等，本书将对这些系统的操作方法进行简单介绍。

3) 数控加工工艺知识。实际上，数控加工工艺设计的原则和内容在许多方面与普通机床加工工艺相同，其不同点将在本书上篇第三章中进行讲述。

## 2. 数控机床改造者

这里数控机床改造是指将普通机床（如车床、铣床等）改造为经济型数控机床。目前，在我国许多单位均开发了由单板机或单片机与步进电动机组成的功能较简单、价格较低的经济型数控系统。将经济型数控系统用于普通机床的改造和升级换代，是符合我国目前国情的一条有效途径。

然而也应当指出，旧机床能改造成数控机床，但并不是所有的旧机床都适合于数控改造。衡量是否合适的主要标准是机床基础件的刚性和改装的经济性。数控机床属于高精度的机床，工件移动或刀具移动的位置精度要求很高，一般在 0.001 ~ 0.01mm 之内，高的定位精度和运动精度要求机床基础件具有很高的刚度和抗震性。基础件不稳定、受力后容易变形的机床都不适于改造成数控机床。此外，机床数控改造的总费用由机械维修和增加数控系统两部分组成，机械部分改造的费用与旧机床原有零件利用的多少密切相关，数控系统的价格对新、旧机床都一样。由于数控系统本身价格较高，从经济效果考虑，大、中型机床，尤其是重型机床，最适于数控改造。

从事数控机床改造的工作，首先需根据所改造机床的种类及精度要求，选定一个适当的经济型数控系统。不同的数控系统，控制的轴数、供用户使用的指令数不尽相同，如一些系统尚不具备刀具半径补偿、刀具长度补偿等处理功能。因此，数控改造者必须熟悉所选用数

控系统的功能，选择性能价格比较优的系统供数控改造使用。

机床数控化改造包括主传动的数控化改造和进给传动的数控化改造，以下分别叙述这两方面的工作。

主传动的数控化改造包括电气部分和机械部分的数控改造。对主传动电气部分改造，主要是将原普通交流电动机拖动改为直流电动机拖动，即用直流电动机替换原普通交流电动机，并配置相应的直流调速装置。普通交流电动机的调速一般不易实现，主轴的变速需通过主轴箱内各滑移齿轮位置的转换获得不同的转速。为了使主轴能获得从低到高各种不同转速，满足加工的需要，机械档数一般较多，使主轴箱结构复杂，体积庞大，在运转过程中，尤其在高速时，振动和噪声都较大，对零件的加工精度会产生不良影响。用交/直流主轴驱动或采用变频器控制普通交流变频电动机可采用速度闭环控制，电网电压和切削力矩的变化对电动机转速的影响很小，易实现无级平滑调速，且调速范围较宽，所需机械档数也较少（一般为2档或4档）。齿轮数量的减少，致使主轴箱结构简单，体积缩小，转动时的振动和噪声减小，零件的加工精度较高。主传动机械部分的数控改造，主要是主轴部件和主轴支承或工作台导轨的改造。主轴本身的刚性和旋转精度以及支承的刚性都将直接影响零件的加工精度。主轴部分的数控改造，首先应保证本身的刚性以及修复和提高本身的旋转精度。

进给传动的数控化改造同样包括电气部分和机械部分的数控改造。电气部分改造，主要是确定控制方式，选择伺服系统和测量元件。数控系统的控制方式基本上可分为开环、闭环、半闭环三种方式。一般小型机床的数控化改造多采用开环控制方式，大、中型机床的数控化改造多采用半闭环控制方式。闭环控制由于需直接测出移动部件的实际位置，要在机床的相应部位安装直线测量元件，工作量大，费时多，而且闭环控制的调试相当麻烦，在机床数控化改造中一般不采用这种控制方式。伺服系统的选择，在机床的数控化改造中，小型机床多采用步进电动机驱动系统，大、中型机床则多采用交流伺服系统或直流伺服系统。关于位置测量元件，目前在数控机床中使用最广泛的旋转型测量元件有旋转变压器和光电脉冲编码器。进给传动机械部分的数控改造主要是提高移动部件的灵活性，减少或消除传动间隙，特别是减少反向间隙等内容。其改造工作量较大，通常的改造部位有导轨副、进给箱和移动元件等。

总之，把普通机床改造成数控机床，无论是电气部分的改造，还是机械部分的改造，其主要改造工作都在进给传动部分。作为数控机床改造者，不但要熟悉数控系统的使用方法，还要熟悉机床的机械结构。

### 3. 特种数控机床开发者

所谓特种数控机床，是指为某一特殊用途而开发研制的专用数控机床，如多工位数控钻床等。对这一类数控机床的开发者来说，需要做的工作首先是根据机械本体的结构设计、控制轴数及伺服系统的性能要求，选择恰当的数控系统作为机床的控制器，如FANUC、SIEMENS或其它一些品牌的数控系统。然后，将机床位移传感器、导轨的行程开关等信号与数控系统相连，并根据机床电器控制系统的逻辑，在数控系统上编制PLC逻辑控制程序，从而完成数控系统的设计。由此过程可以看出，从事数控机床系统的开发工作，最主要的是要熟悉某一种或几种数控系统，掌握其与机床电器、传感器信号的连接方式以及系统参数的配置方法。

以上从不同的应用目的出发，叙述了数控技术人员所应掌握的知识，其中作为数控机床

操作者所应具备的知识是从事其它两类工作的基础。只有熟悉了数控机床的功能及操作方法，才能更好地选用和开发新的数控系统。因此，本书重点对这一部分内容进行了介绍。上篇中，第二章介绍数控程序编制的有关知识，第三章以 FANUC、SIEMENS 数控系统为例，介绍一些典型数控系统的特点及操作方法，第四章介绍了有关数控加工的工艺知识；第五章介绍了自由曲线及曲面的加工方法。下篇的各章则重点介绍了数控系统常用的位移传感器、数控机床的伺服系统等，书中除了介绍这些装置的工作原理外，还重点对其相应的产品及产品的使用方法进行了介绍。总之，下篇中的理论知识对于从事数控改造及数控系统设计工作是必须的，而对于仅仅操作数控机床的人员来讲，并非是必要的。

## 第二章 数控加工的程序编制

### 第一节 程序编制的基础知识

在数控机床上加工零件，首先要编制零件的加工程序，然后才能进行自动加工。

通过对零件图的分析，把零件的加工工艺路线、工艺参数、刀具的运动轨迹、位移量、切削参数（主轴转速、进给量等）以及辅助动作（主轴正转、反转、切削液开和关、自动换刀等），按照数控机床规定的指令代码及程序格式编写成加工程序单，再把这一程序单中的内容记录在控制介质上（如穿孔带、磁带、磁盘、磁泡存储器），然后输入到数控机床的数控装置中，从而指挥机床加工零件。这种从零件图的分析到制成控制介质的全部过程，称为数控加工的程序编制。

#### 一、程序编制的内容与步骤

程序编制的主要内容有：分析被加工零件的零件图，确定加工工艺过程，进行刀具运动轨迹的坐标计算，编写零件加工的程序，制作控制介质，校验程序，首件试切及校验修整。编制程序的步骤一般如图 2-1 所示。

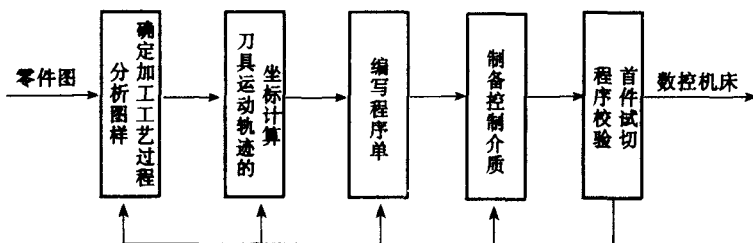


图 2-1 程序编制的步骤

#### 1. 分析图样、确定加工工艺过程

选择适合数控加工的工件和合理的加工工艺，是提高数控加工技术经济效果的首要因素。数控机床最适宜加工以下类型的零件：小批量特别是重复轮番投产的零件，表面复杂的零件，加工过程中需要测量的零件，需要精密钻镗夹具的零件等。在确定加工工艺过程时，编程人员要根据图样对工件的形状、尺寸、技术要求、毛坯等进行详细分析，从而选择加工方案，确定工步顺序、加工路线、定位夹紧，并合理选用刀具及切削用量等。制订数控加工工艺除考虑通常的一般工艺原则外，还应考虑充分发挥所用数控机床的指令功能，走刀路线要短，换刀次数尽可能少等。

#### 2. 运动轨迹计算

分析零件图，首先找出图样上的设计基准点，图样上各项尺寸均是以此点为基准进行标注的；然后确定工件原点。工件原点是人为设定的，设定的依据是既要符合零件图尺寸的标注习惯，又要便于编程。一般情况下，零件图的设计基准点就是工件原点。以工件原点为坐

标原点建立的坐标系，称为工件坐标系。

根据零件图的几何尺寸、进给路线及设定的工件坐标系，计算工件粗、精加工各运动轨迹关键点的坐标值。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，需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，有时还要计算刀具中心运动轨迹的坐标值。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，计算出逼近线段的交点坐标值，并限制在允许的误差范围以内。这种情况一般要用计算机来完成数值计算的工作。

### 3. 编写加工程序单

根据已确定的进给路线、刀具参数、切削参数、辅助动作以及运动轨迹坐标值，按照数控系统规定的功能指令代码及程序段格式，逐段编写加工程序单。并附上必要的加工示意图、刀具布置图、零件装夹图以及有关的工艺文件，如工序卡、机床调整卡、数控刀具卡、夹具卡等。

### 4. 制备控制介质

程序单只是程序设计的文字记录，还必须把编制好的程序单上的内容记录在控制介质上作为数控装置的输入信息。控制介质随数控装置的类型不同而异，以前数控机床上使用的控制介质一般都为穿孔纸带，目前穿孔纸带大部分已被磁盘所替代，一般数控系统均具有软盘驱动器或用 RS232 接口输入。

### 5. 程序校验与首件试切

程序单和制备好的控制介质必须经过校验和零件试切后才能正式使用。程序校验的方法常用的有两种，一种是将控制介质上的内容直接输入到数控装置，让机床空运转，在机床上用笔代替刀具，坐标纸代替工件进行空运转画图，检验机床运动轨迹的正确性。在具有 CRT 屏幕图形显示的数控机床上，则采用另一种校验方法，即用图形模拟刀具相对工件的运动。但这些方法只能粗略检验运动轨迹是否正确，不能检查被加工零件的误差大小。因此还必须进行零件的首件试切。当发现尺寸超差时，应进一步分析错误产生的原因，或者修改程序单，或者进行尺寸补偿。

以上是数控加工程序编制的一般内容与步骤。从编程的整个过程来看，编程人员不仅要熟悉机床数控系统的功能，而且要熟悉零件的加工工艺、装夹方法、刀具与切削用量等方面的知识，还必须是一名好的工艺员。

## 二、程序编制的方法

数控机床零件加工程序的编制方法一般分为手工编程和自动编程两种。

### 1. 手工编程

图 2-1 所示的编程过程，全部或主要由人工完成，这种编程方法叫手工编程。

手工编程至今仍广泛应用于简单的点位加工及直线与圆弧组成的轮廓加工中。因为这些加工工件的坐标计算较简单，加工程序不长，出错的几率小，采用手工编程经济又及时。但对于几何形状复杂的零件，特别是具有列表曲线、非圆曲线及曲面的零件（如叶片、复杂模具），或者表面的几何元素并不复杂而程序量很大的零件（如复杂的箱体），或者工步复杂的零件，手工编程就难以胜任，因此必须用自动编程的方法编制程序。

### 2. 自动编程

自动编程即由计算机自己编写零件程序。它是用一台通用计算机配上打印机和自动穿孔

机, 自动完成图 2-1 中几乎全部的编程内容。编程人员只需根据零件图样的要求, 用数控语言(一种直观易懂的编程语言)编写出相当简短的零件加工源程序, 输入计算机, 由计算机自动地进行工步划分、运动轨迹计算、切削用量选择、加工程序单的编制以及穿孔带的制作等。编制出的程序还可通过计算机屏幕或自动绘图仪进行刀具运动轨迹的图形校验, 可以在计算机屏幕上修改程序。自动编程显著缩短了编程时间, 使用时也十分方便。自动编程技术已被广泛应用, 并具有非常远大的发展前景。

### 三、程序的结构与格式

每种数控系统, 根据其本身的特点及编程的需要, 都有一定的程序格式。对于不同的机床, 程序的格式也不相同。因此编程人员必须严格按照机床使用说明书的规定格式进行编程。

#### 1. 程序的结构

一个完整的加工程序由若干程序段组成, 而程序段是由一个或若干个字组成, 每个字又是由若干个字符按某个顺序排列而成。字符指的是一个字母、数字、符号, 字符是构成程序的基本单元。例如, 某一加工程序:

```
%
O016
N001 G01 X90 Z-20 F0.2 S320 T0101 M03 LF
N002 X130 Z-50 LF
:
N100 G00 X400 Z150 M02 LF
```

这是一个完整的加工程序。它由 100 条程序段按操作顺序排列而成。程序以“%”作为开始, 以 M02 (或 M30) 作为全程序结束。每个程序段用序号“N”开头, 用 LF (EIA 代码为 CR) 结束。

在“%”后的 O016 表示从数控装置的存储器中调出编号为 016 的加工程序。目前的计算机数控 (CNC) 系统存储器中可预先存入多个加工程序, 需要时即可调出使用。但不是所有的 CNC 系统都具备“O”功能, 有些机床是采用人工调出。

程序中的每个字表示一种功能, 若干个字组成一条程序段, 每条程序段则表示一种操作。例如在第一程序段中, 除程序段结束字符“LF”外共有 8 个字, 这些字都有各自的功能。N001 表示第一条运行的程序段; G01 字为直线插补指令, 由 3 个字符组成; X90 字表示刀具沿 X 轴正向位移至 90 (编程单位), 由 3 个字符组成; Z-20 表示刀具位移至 Z 轴负方向 20 处, 由 4 个字符组成; F0.2 字为进给量 0.2mm/r; S320 字表示主轴转速为 320r/min; T0101 字表示用一号刀、一号刀补; M03 为主轴正转。该程序段表示一个完整的操作, 即命令机床用一号刀以 0.2mm/r 的进给量和 320r/min 的主轴正向转速, 直线插补至目标点 (X90, Z-20)。

机床数控系统对程序段的字符数有一定限制, 当大于限定的字符数时, 可分成两条程序段。

#### 2. 程序段格式

程序段格式是指一个程序段中字、字符、数据的书写规则。不同的数控系统, 往往有截然不同或大同小异的程序段格式。



程序段格式通常有以下三种：

(1) 文字地址程序段格式 简称字-地址格式，如上例所示。在这种格式中，每个字前有表示地址的字母（表 2-1）；在一个程序段内，坐标字和各种功能字常按一定顺序排列（也可以不按顺序排列，但编程不方便）；不需要的字以及与上一程序段相同的续效字可以不写；数据的位数可多可少（但不得大于规定的最大允许位数）。这种格式编程直观灵活，程序简短，不易出错。

表 2-1 地址字母表

地址	功能	地址的含义	地址	功能	地址的含义
A	坐标字	绕 X 轴旋转	N	顺序号	程序段顺序号
B	坐标字	绕 Y 轴旋转	O	程序号	程序号、子程序号的指定
C	坐标字	绕 Z 轴旋转	P		暂停或程序中某功能的开始使用的顺序号
D	补偿号	刀具半径补偿指令	Q		固定循环终止段号或固定循环中的定距
E		第二进给功能	R	坐标字	固定循环中定距离或圆弧半径的指定
F	进给速度	进给速度的指令	S	主轴功能	主轴转速的指令
G	准备功能	指令动作方式	T	刀具功能	刀具编号的指令
H	补偿号	补偿号的指定	U	坐标字	与 X 轴平行的附加轴的增量坐标值或暂停时间
I	坐标字	圆弧中心 X 轴向坐标	V	坐标字	与 Y 轴平行的附加轴的增量坐标值
J	坐标字	圆弧中心 Y 轴向坐标	W	坐标字	与 Z 轴平行的附加轴的增量坐标值
K	坐标字	圆弧中心 Z 轴向坐标	X	坐标字	X 轴的绝对坐标值或暂停时间
L	重复次数	固定循环及子程序的重复次数	Y	坐标值	Y 轴的绝对坐标值
M	辅助功能	机床开/关指令	Z	坐标字	Z 轴的绝对坐标值

(2) 固定顺序程序段格式 在这种格式中，各字无地址码，各字的顺序及位数是固定的，任何一个数字（包括“0”）都不能省略，所以各程序段长度都一样。这种格式的控制系統简单，用于早期的数控机床。由于编程不直观，且程序段长，目前很少使用。

(3) 使用分隔符的固定顺序程序段格式 这种格式预先规定了程序中可能出现的字的书写顺序，各字间用分隔符“HT”隔开，以表示地址的顺序。由于有分隔符，不需要的字或与上一段相同的字可以省略，但必须保留相应的分隔符，因此各程序段的分隔符数目相等。这种格式较第 2 种格式清晰，易于检查和核对，常用于功能不多的装置，如数控线切割机床等。

在上述三种程序段格式中，目前国内外用得最广泛的是文字地址程序段格式。

#### 四、数控机床坐标系和运动方向的规定

统一规定数控机床坐标轴名称及其运动的正负方向，是为了使所编程序对同类型机床有互换性，同时也使程序编制简便。目前，国际标准化组织已经统一了标准的坐标系。我国也已制订了 JB3051-82《数控机床坐标和运动方向的命名》数控标准，它与 ISO841 等效。

##### 1. 坐标轴的命名

标准的坐标系采用右手直角笛卡尔坐标系，如图 2-2 所示。这个坐标系的各个坐标轴与机床的主要导轨相平行。直角坐标 X、Y、Z 三者的关系及其正方向用右手定则判定，围绕 X、Y、Z 各轴（或与 X、Y、Z 各轴相平行的直线）回应的运动及其正方向 +A、+B、+