

SHUKONG JIAGONG

ZIDONG BIANCHENG XITONG SHEJI

数控加工 自动编程系统设计

吴竹溪
谢友宝 编著
高延峰

- 数控加工编程基础
- 数控加工自动编程语言及应用
- 数控加工自动编程系统软件设计
- 数控加工自动编程系统发展前瞻

航空工业出版社

数控加工自动编程 系统设计

吴竹溪 谢友宝 高延峰 编著

航空工业出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了数控加工自动编程系统设计的基本原理、实现方法和发展概况。内容包括数控加工程序编制基础,数控加工自动编程系统概述,数控加工自动编程语言及应用,数控加工自动编程系统软件设计,数控加工自动编程系统的发展等。重点放在系统软件的设计,并给出了前、后置处理程序的清单。阐述详细,重点突出,图文结合,实用性强。

本书除供高等工科院校作教材使用外,亦可供从事计算机辅助制造及数控加工技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数控加工自动编程系统设计/吴竹溪,谢友宝,高延峰编著. —北京:航空工业出版社,2006.9

ISBN 7-80183-747-9

I. 数... II. ①吴...②谢...③高... III. 数控机床—程序设计 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第079653号

数控加工自动编程系统设计

Shukong Jiagong Zidong Biancheng Xitong Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64919539 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2006年9月第1版

2006年9月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:12

字数:298千字

印数:1—3000

定价:18.00元

前 言

随着电子元器件、计算机、传感与检测、自动控制及机械制造等技术的不断发展,数字控制技术也得到了迅速的发展和广泛应用。数控机床是典型的机电一体化产品,是现代制造技术的重要组成部分。采用数控机床,提高机械工业的数控化率,是当前机械制造业技术改造、技术革新的必由之路。数控加工技术是柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)等先进制造技术的基础,它代表了整个机械制造业的发展方向,也是衡量一个国家工业化水平和综合实力的重要标志。而数控加工程序的编制又成为制约数控加工技术的发展、提高数控机床使用效率的重要因素,为了解决这一矛盾,需借助于计算机自动编制数控加工程序。

目前,有关数控加工自动编程系统设计方法的书籍非常少,此类专著国内也未曾见到。本书采用面向对象的计算机编程工具,同时也扩充了相关知识及内容,汇集了作者多年来的教学、科研成果以及针对多层次学生教学理论和实践的总结。

本书可作为机械类专业本科生和研究生的教材,也可作为从事数控技术、软件系统设计开发等工程技术人员的参考资料。

本书由南昌航空工业学院吴竹溪、谢友宝、高延峰、崔丽珍合作编写,由吴竹溪和谢友宝任主编,其中第一、四章由谢友宝完成,第二、三章及程序调试由吴竹溪和高延峰完成,崔丽珍在全书编排及插图方面做了大量的工作。

南昌航空工业学院聂秋根教授在本书的整个编写过程中给予了全面的指导,并担任了本书的主审,作者对此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不当之处,敬请有关专家和读者批评指正。

编 者

2006 年 5 月

目 录

第一章 数控技术基础	(1)
第一节 数控机床简介	(1)
一、数控机床的产生与发展	(1)
二、数控机床的分类	(2)
三、数控加工的特点	(4)
第二节 数控加工程序编制基础	(6)
一、数控加工程序编制步骤	(6)
二、数控加工程序的结构与格式	(7)
三、主要数控加工功能指令	(8)
第三节 数控加工自动编程	(9)
一、语言式自动编程	(10)
二、图形交互式自动编程	(12)
三、实物编程	(14)
第二章 数控加工自动编程语言及应用	(15)
第一节 MPAPT 语言	(15)
一、几何定义语句	(16)
二、工艺参数语句和辅助语句	(25)
三、刀具运动语句	(26)
四、循环加工语句	(28)
第二节 MPAPT 语言应用举例	(30)
一、编程步骤及方法	(30)
二、编程举例	(31)
第三章 数控加工自动编程系统软件设计	(35)
第一节 系统总体设计	(35)
一、系统的运行过程	(35)
二、系统设计方法	(39)
第二节 前置处理程序设计	(43)
一、几何定义语句的处理	(43)
二、工艺参数语句和运动语句的处理	(75)
三、图形显示程序设计简述	(106)
第三节 后置处理程序设计	(108)

一、FANUC - 6M 数控系统加工程序格式及编程方法 (108)

二、后置处理程序的一般结构 (110)

三、FANUC - 6M 数控系统后置处理程序设计 (112)

第四章 图形交互式自动编程 (123)

第一节 概述 (123)

一、CAD/CAM 基本概念 (123)

二、图形交互式自动编程的步骤 (123)

三、典型的 CAD/CAM 软件 (124)

第二节 Master CAM 软件介绍 (125)

一、Master CAM 环境介绍 (125)

二、操作实例 (128)

第三节 Pro/ENGINEER 软件介绍 (133)

一、零件设计窗口介绍 (133)

二、下拉式菜单 (134)

三、窗口基本操作 (137)

四、Pro/ENGINEER 参数式设计的特性 (138)

附录 (144)

参考文献 (186)

第一章 数控技术基础

第一节 数控机床简介

一、数控机床的产生与发展

数字控制（Numerical Control，简称 NC 或数控）技术是一种自动控制技术，凡是在生产过程中应用数字信息操纵运行的生产设备，简称为数控设备，用数字信息控制的金属切削机床就叫数控机床。

1952 年，美国帕森斯公司（Parsons）和麻省理工学院（MIT）合作研制成功了世界上第一台数控机床，它是一台三坐标数控铣床，用于加工直升机叶片轮廓检查用样板。这台数控铣床的计算与控制装置采用电子管元件组成的专用计算机，即逻辑运算与控制采用硬件连接电路。1955 年，该类机床进入实用化阶段，在复杂曲面的加工中发挥了重要作用。

1958 年，我国开始研制数控机床，在研制与推广使用数控机床方面取得了一定成绩。近年来，由于引进了国外数控系统与伺服系统，使我国的数控机床在品种、数量和质量方面得到了迅速发展。目前，我国已有几十家机床厂能够生产不同类型的数控机床和加工中心。在数控技术领域，我国和先进的工业国家之间还存在着不小的差距，但这种差距正在逐步缩小。

数字控制机床（Numerical Control Machine Tool，简称 NC 机床）的产生较好地解决了复杂、精密、小批量零件的加工问题，满足了科学技术与社会生产日益发展的需要。NC 机床与普通机床、自动与半自动化机床相比具有突出的优点。它不仅提高了加工精度和生产效率，同时也减轻了劳动强度，改善了劳动条件，更重要的是有利于生产管理和产品的更新换代。

计算机数字控制机床（Computer Numerical Control Machine Tool，简称 CNC 机床）也称现代数控机床，是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新颖的数控设备。它是实现柔性自动化的关键设备和柔性自动化生产线的基本单元。现代数控机床是综合应用了计算机、自动控制、电气传动、精密测量、精密机械制造等技术的最新成果而发展起来的，它采用微处理器作为机床的数控装置，通过编制各种系统软件来实现不同的控制功能和加工功能。

自从世界上第一台数控机床诞生以来，经过短短数十年的发展，数控系统无论在内部结构还是在外观上都发生了急剧的变化。已经经历了五代的发展演变过程：第一代采用电子管、继电器，第二代采用晶体管分立元件，第三代采用集成电路，第四代采用小型计算机数控，1974 年出现的第一台微处理器数控表明进入了第五代。数控机床的控制部分已从以硬件为主的数控装置，发展成为硬软件相结合的计算机数控系统。目前数控系统的可靠性日益提高，而且无论在国防工业或民用工业，数控技术的应用已相当普遍。

当前数控技术主要向着以下几个方向发展：

- 计算机数控 (Computer Numerical Control—CNC)；
- 计算机直接数控 (Direct Numerical Control—DNC)；
- 自适应控制 (Adaptive Control—AC)；
- 柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System—FMS)；
- 计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System—CIMS)。

二、数控机床的分类

数控机床种类很多，如铣削类、钻铰类、车削类、磨削类、线切割、加工中心等（如图 1-1 所示）。其分类方法也很多，大致有以下几种。

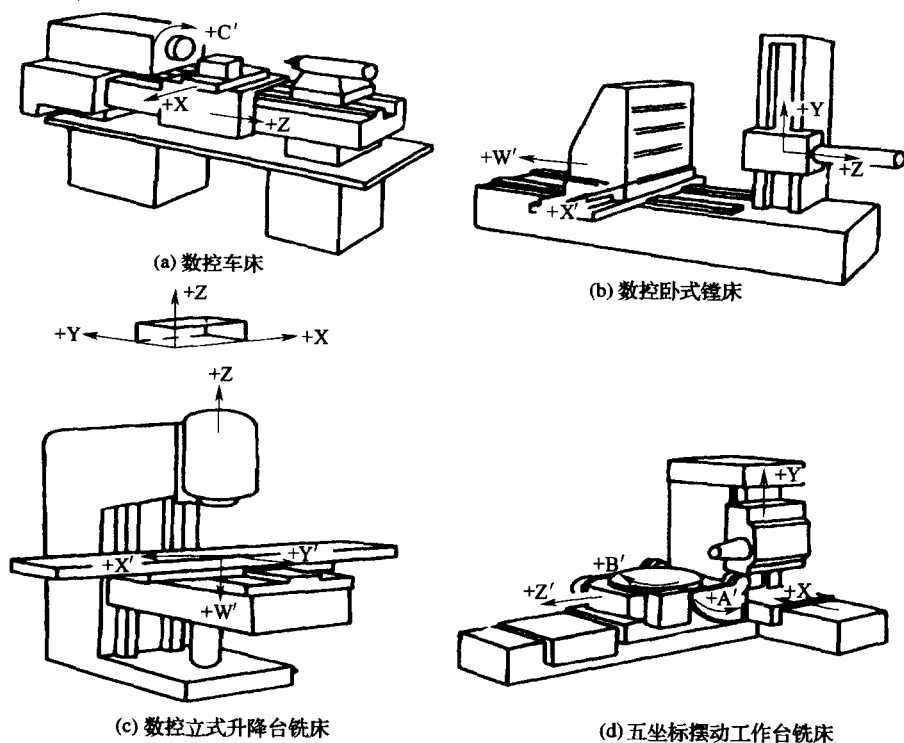


图 1-1 常用数控机床

1. 按控制刀具与工件相对运动轨迹分类

(1) 点位控制 (Point to Point Control) 或位置控制 (Positioning) 数控机床

这类机床只能控制工作台从一个位置精确地移动到另一位置，在移动过程中不进行加工，各个运动轴可以同时移动，也可以依次移动，见图 1-2 (a)，如数控镗床、钻床、冲床，数控点焊机及数控折弯机等均属此类。

(2) 轮廓控制 (Contouring Control) 数控机床

这类机床能够同时对两个或两个以上坐标轴进行连续控制，具有插补功能，工作台或刀具边移动边加工，见图 1-2 (b)，图 1-2 (c)，如数控铣床、车床、磨床及加工中心等都采用轮廓控制系统。

2. 按加工方式分类

- (1) 金属切削类：如数控车床、钻床、镗床、铣床、磨床、加工中心等。
- (2) 金属成形类：如数控折弯机、弯管机、四转头压力机等。
- (3) 特殊加工类：如数控线切割、电火花、激光切割机等。
- (4) 其他类：如数控火焰切割机、三坐标测量机等。

3. 按控制坐标轴数分类

- (1) 两坐标数控机床：两轴联动、用于加工各种曲线轮廓的回转体，如数控车床。

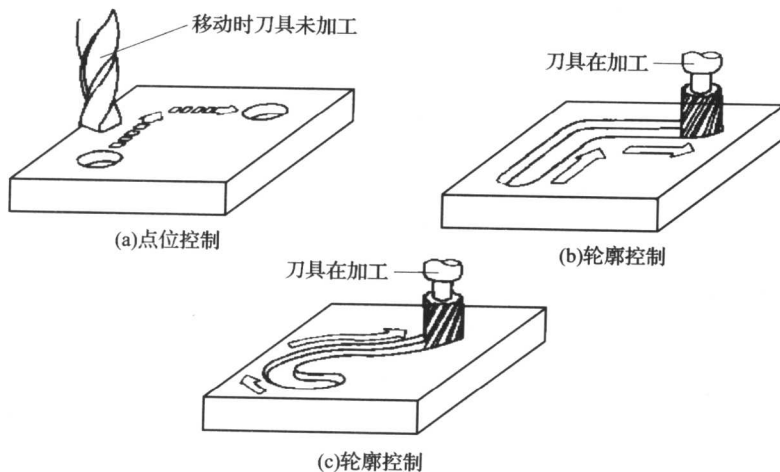


图 1-2 点位控制及轮廓控制

- (2) 三坐标数控机床：三轴联动，多用于加工曲面零件，如数控铣床、数控磨床。

- (3) 多坐标数控机床：四轴或五轴联动，多用于加工形状复杂的零件。图 1-3 为两种不同类型的四轴联动数控机床。

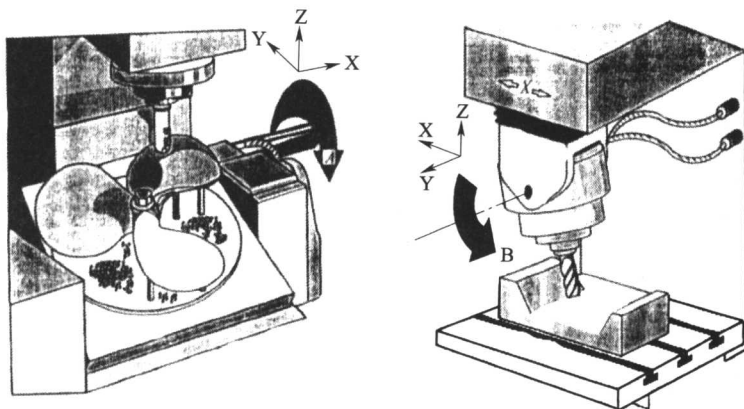


图 1-3 不同类型的四轴联动数控机床

4. 按驱动系统的控制方式分类

- (1) 开环控制 (Open Loop Control) 数控机床

开环控制数控机床的工作原理如图 1-4 所示。



图 1-4 开环控制数控机床的工作原理

这类机床不带位置检测反馈装置，通常使用功率步进电机或电液脉冲马达作为执行机构，数控装置输出的脉冲通过环形分配器和驱动电路，使步进电机转过相应的步距角，再经过减速齿轮带动丝杠旋转，最后转换为移动部件的直线位移。这类机床反应快，调试方便，比较稳定，维修简单。但是系统对移动部件的误差没有补偿和校正，步进电机的步距误差、齿轮与丝杠等的传动误差都将反映到被加工零件的精度中去，所以精度比较低。此类数控机床多为经济类机床。

(2) 闭环控制 (Closed Loop Control) 数控机床

这类机床带有位置检测反馈装置，位置检测装置安装在机床运动部件上，加工中将检测到的实际运行位置反馈到数控装置中，与输入的指令位置相比较，用差值对移动部件进行控制。闭环控制数控机床精度高。从理论上说，闭环系统的控制精度主要取决于检测装置的精度，但这并不意味着可以降低机床的结构与传动链的要求，传动系统的刚性不足及间隙、导轨的爬行等各种因素将增加调试的困难，严重时会使闭环控制系统的品质下降甚至引起振荡。故闭环系统的设计和调整都有较大的难度，此类机床主要用于一些精度要求较高的镗铣床、超精密车床和加工中心等。闭环控制数控机床的工作原理如图 1-5 所示。

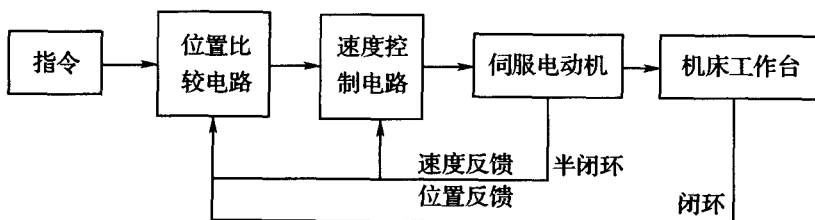


图 1-5 闭环控制数控机床的工作原理

(3) 半闭环控制 (Semi-Closed Loop Control) 数控机床

半闭环控制数控机床与闭环控制不同的是，检测元件安装在电动机的端头或丝杠的端头。该系统不是直接测量工作台的位移量，而是通过检测丝杠或电动机轴上的转角间接地测量工作台的位移量，然后反馈给数控装置。显然，半闭环控制系统的实际控制量是丝杠的转动，而由丝杠转动变换为工作台的移动，不受闭环的控制，这一部分的精度由丝杠螺母（齿轮）副的传动精度来保证。其特点是比较稳定，调试方便，精度介于开环与闭环之间，因此被广泛采用。

三、数控加工的特点

1. 数控加工过程

与一般加工方法相比，数控加工仅在控制方式上有所不同。例如加工图 1-6 所示的台阶轴，为了达到指定的工艺要求，需要对机床的动作进行控制，

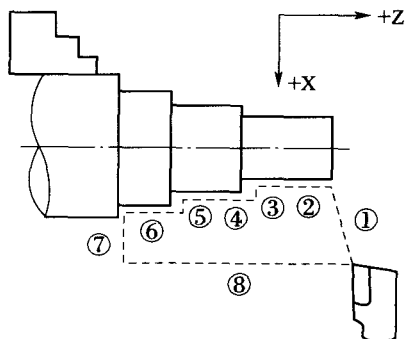


图 1-6 台阶轴

一是控制机床动作的先后次序，二是控制机床各运动部件的位移量。若在普通机床上加工此零件，刀具从起始位置接近工件，对加工面进行切削、快速退回等一系列的开车、停车、走刀、主轴变速等操作都是由人工直接控制的。若在数控车床上加工，首先根据零件图样，按规定的代码，将被加工零件的加工内容、尺寸和加工操作步骤等，即被加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据（称为数控加工程序），以数字指令信息形式记录在控制介质上，然后由控制介质将数字信息输入控制机，经过转化处理变成驱动伺服机构的指令信号，最后由伺服机构控制机床的各种动作，自动地加工出该台阶轴。由此可知，数控加工的方法是用控制机和伺服机构代替人的大脑和双手的部分功能，用数控加工程序控制全部加工过程，图 1-7 是用数控机床加工零件过程的示意图。虚线框中所包含的内容称为数控加工程序编制。

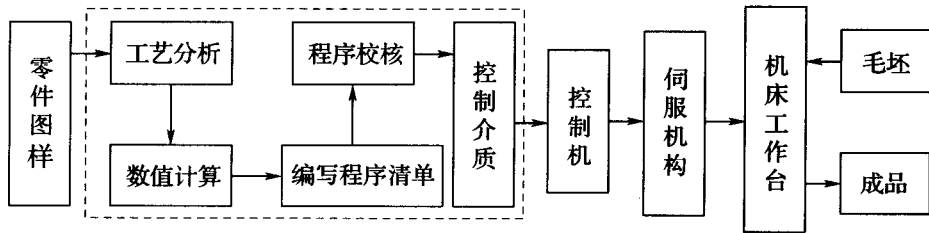


图 1-7 数控机床加工零件过程

2. 数控加工的特点

由于数控机床不断地完善和更新以及编程技术的迅速发展，使数控加工方法获得日益广泛的应用。这是因为数控加工方法与传统加工方法相比具有许多特点：

(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，全部加工过程都由机床自动完成，这就减轻了操作者的劳动强度，改善了劳动条件。

(2) 对加工对象的适应性强。在数控机床上实现自动加工的控制信息是由控制介质提供，或以手工方式通过键盘输入控制机。当加工对象改变时，除了相应变换刀具和解决工件装夹方式外，只要重新编制零件的加工程序，便可自动加工出新的零件，不必对机床作任何复杂的调整。这样既省去许多专用工装、样板和标准样件，又缩短了生产准备周期。针对航空、航天产品改型频繁、试制周期短等特点，数控加工方法显现出独特的优越性。

(3) 加工精度高及加工质量稳定。数控加工的尺寸精度通常在 $0.005 \sim 0.1\text{mm}$ 之间，不受零件形状复杂程度的影响。加工中消除了操作者的人为误差，提高了同批零件尺寸的一致性，使产品质量保持稳定。这为提高产品的装配质量和工作效率创造了有利条件，零件废品率大为降低。

(4) 具有高的生产效率。数控加工方法的效率高，一方面是由于数控机床具有高的自动化程度，另一方面是加工过程中省去了划线、多次装夹定位、检测等工序，有效地提高了生产效率。

(5) 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（CAD）系统连接，形成计算机辅助设计与制造紧密结合的一体化系统。

应当指出，数控加工技术的应用也有不利的因素，这就是数控机床价格昂贵、技术复杂、对机床维护与编程技术要求较高。为了提高数控机床的利用率，保持良好的经济效益，

需要切实解决好加工程序编制、刀具供应、编程与操作维护人员的培训、机床附件和数控装置备件的订货等问题。

第二节 数控加工程序编制基础

普通机床的加工是由操作人员手动操作的，而数控机床的动作指令是由数控程序来控制的。数控程序的编制通常有三种途径：①手工编程；②用数控语言进行辅助编程；③用CAD/CAM软件进行计算机自动编程。要熟悉一个数控机床的控制系统，掌握手工编程方法是最为有效的途径。因为不论是用数控语言进行计算机辅助编程或是利用CAD/CAM软件进行计算机自动编程，输出的源程序或刀位文件都必须经过后置处理系统转换成机床控制系统规定的加工指令程序格式。所以，掌握手工编写加工指令程序的方法是数控编程人员的基本功。本节主要介绍手工编程的基础知识。对配备不同数控系统的机床，加工指令程序的格式可能会有所不同，但基本方法和步骤是相同的。

一、数控加工程序编制步骤

数控机床是按事先编好的加工程序进行零件加工的，程序编制的好坏将直接影响零件的加工质量、生产效率和刀具寿命等。

所谓程序编制，就是程序员根据加工零件的图样和加工工艺，将零件加工的工艺过程、工艺参数、加工路线及加工中需要的辅助动作，如换刀、冷却、夹紧、主轴正反转等，按照加工顺序和数控机床规定的指令代码及程序格式编成加工程序单。这种把零件图样和加工工艺转换成加工指令并输入到数控装置的过程称为数控加工的程序编制。

程序编制一般包括五个步骤：

1. 分析零件图样，确定加工工艺

了解零件的几何形状尺寸、尺寸精度、形位公差、表面粗糙度以及热处理等技术要求，了解零件的材料、毛坯种类、加工性能、零件数量等。通过分析，确定零件的加工工艺。

加工工艺就是零件加工的方法和步骤。内容包括：确定加工方法，排列加工工序（包括毛坯制造、热处理和检验工序），确定定位装夹方法及进退刀位置、走刀路线和切削用量等。

2. 刀具运动轨迹的计算

数控机床对零件的加工是按照零件的几何图形分段进行的。编程前，需要对零件的几何图形进行分段，并根据所确定的工件坐标系，对几何元素之间的交点、切点及插补节点、圆心坐标等进行数值计算，以供编程时使用。

3. 编写加工程序单

按照已经确定的加工顺序、走刀路线、所用刀具、切削用量及辅助动作，按照所用数控机床的功能指令代码及程序段格式，逐段编写加工程序单。对于加工过程比较复杂的工件还应附上必要的加工示意图、刀具卡片和刀具布置图、机床调整卡、工序卡及必要的说明。

4. 程序输入

比较简单的或较短的程序可以用手工直接输入。比较复杂、比较长的程序需先脱机输

入，检查无误后存入控制介质（磁盘、磁带或纸带）中，通过自动传输的方式，输入到数控装置中。

5. 程序校验和首件试切

输入的程序必须进行校验，校验的方法有：

(1) 起动数控机床，按照输入的程序进行空运转，即在机床上用笔代替刀具（主轴不转），坐标纸代替工件，进行空运转画图，检查机床运动轨迹的正确性。

(2) 在具有 CRT 屏幕图形显示功能的数控机床上，进行工件的模拟加工，检查工件图形的正确性。

(3) 用易加工材料（如塑料、木材、石蜡等）代替零件材料进行试切削。

对程序校验中发现的程序、坐标值、几何图形错误等必须进行修改，修改之后，必须进行首件试切。即用实际的零件毛坯、实际的刀具及切削用量进行实际切削检查。它不仅可以看出程序单和控制介质的错误，还可以知道加工精度、表面粗糙度是否符合要求。当发现尺寸超差时应分析原因，或修改程序、或改换调整刀具、或改变装夹方式、或进行尺寸补偿。首件试切成功后，才可以进行正式的切削加工。

二、数控加工程序的结构与格式

一个完整的数控加工程序是由若干程序段组成，每个程序段是按照一定顺序排列、能使数控机床完成某特定动作的一组指令，每个指令都是由地址字符和数字组成，如 G01 表示直线插补指令，M03 表示主轴顺时针旋转指令，X20.0 表示 X 向的位移，F100 表示刀具进给速度等。依靠这些指令，使刀具按直线或圆弧运动，控制主轴的旋转、起动，冷却液的开关，自动换刀装置和工作台交换装置的动作等。例如，某一加工程序：

```
%  
O020  
N001 G01 X80 Z -30 F0.2 S300 T0101 M03 LF  
N002     X120 Z -60                      LF  
.....  
N125 G00 X500 Z200                      M02 LF
```

这表示一个完整的加工程序，它由 125 个程序段按操作顺序排列而成。整个程序以 % 开始，以 M02（或 M30）作为程序的结束。每个程序段以序号 N 开头，用 LF 结束。具体说明如下：

1. 程序段格式

简单地说，程序段是由地址、符号、数字等组成。其中地址是由具有特定意义的字母表示（具体含义在后面说明）；符号为数字前面的正负号 $\pm$ ，+ 号可以省略。

在常用的控制系统中，程序段格式一般如下：

```
N_ G_ X_ Y_ Z_ （或 U_ V_ W_ ） I_ J_ K_ （或 R_ ） T_ H_ （或 D_ ） S_  
M_ F_ LF
```

2. 程序格式

一个完整的程序必须由三部分组成，即：准备程序段、加工程序段和结束程序段。

(1) 准备程序段

准备程序段是程序的准备部分，必须位于加工程序段的前面，其内容包括：

- ①程序号：001 ~ 099 或 %，有的数控系统可以没有程序号；
- ②确定坐标值的输入方式：G90 或 G91；
- ③建立工件坐标系：G92 或 G54 ~ G59 中的任一个；
- ④刀具选取：T_ 或 T_ _；
- ⑤主轴转速与旋转方向：S_、M03 或 M04；
- ⑥冷却液打开：M08；
- ⑦刀具快速定位：G00X_ Y_ ；
G00Z_ ；

(2) 加工程序段

加工程序段是根据具体加工零件的加工工艺，按刀具轨迹编写的。

(3) 结束程序段

结束程序段一般包括以下内容：

- ①刀具快速回退到程序起点；
- ②主轴停转 M05；
- ③冷却液关闭 M09；
- ④取消刀具补偿 G40 或 G49；
- ⑤程序结束代码 M02 或 M30。

注意：

- ①当程序是以 % 开始时，程序的最后一行一般也应 % 为结束标志。
- ②程序段的结束符号（LF、“;”、“*”、“\$”、CR 等）在一个程序中应保持统一。

三、主要数控加工功能指令

1. 程序段序号

由字母 N 和其后几位数字组成，用来表示程序执行的顺序，用作程序段的显示和检索。

2. 准备功能字

准备功能字（也称 G 指令）由字母 G 和其后两位数字组成。G 指令是与机床运动有关的一些指令，包括坐标系设定、坐标平面选择、坐标尺寸表示方法、插补、刀补、固定循环等方面的指令。ISO 及我国有关标准中规定的 G 指令可参考 ISO—1975 以及 JB 3208—1983。

G 代码有 G00 ~ G99 共 100 种，下面列出一部分常用的 G 指令：

- 插补类指令：G00（快速直线）、G01（直线）、G02（顺圆）、G03（逆圆）等；
- 平面选择类指令：G17（XY 平面）、G18（ZX 平面）、G19（YZ 平面）；
- 刀补类指令：G40（取消刀补）、G41（左刀补）、G42（右刀补）；
- 坐标方式指令：G90（绝对坐标）、G91（相对坐标）；
- 固定循环类指令：G80（取消固定循环）、G81 ~ G89（各种循环）。

3. 坐标功能字

坐标功能字由坐标的地址代码、正负号、绝对坐标值或增量坐标值表示的数值等三部分组成，用来指定机床各坐标轴的位移量和方向。坐标的地址代码为：X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、I、J、K、A、B、C、D、E 等。坐标的数量由插补指令决定，数值的位数由数控

系统规定。

4. 进给功能字

进给功能字由字母 F 和其后的几位数字组成，表示刀具相对于工件的运动速度。进给速度常用的指定方法有直接指定法和时间倒数指定法。

直接指定法：在 F 后面按照规定的单位直接写出要求的进给速度，单位为 mm/min。在加工螺纹时，进给速度为主轴每转的走刀量，单位为 mm/r。

时间倒数指定法：这种指定法给出 F 后面的数字是刀具以一定的进给速度走完编程轨迹所用时间的倒数，单位为 min^{-1} 。

5. 主轴转速功能字

主轴转速功能字由字母 S 和其后的几位数字组成，用以设定主轴速度。一般采用直接指定法，即在 S 后面直接写上要求的主轴速度，单位为 r/min。

6. 刀具功能字

刀具功能字由字母 T 和其后的几位数字组成，用来指定刀具号和刀具长度补偿。不同的数控系统有不同的指定方法和含义，例如 T10，表示可选择 10 号刀具，刀具长度补偿按 10 号数字拨盘所设定的数字进行补偿；又如 T1012，表示选择 10 号刀具，按存储在内存中的 12 号补偿值进行长度补偿。

7. 辅助功能字

辅助功能字（也称 M 代码）由字母 M 和其后的两位数字组成，主要用于数控机床开关量的控制。如主轴的正、反转，冷却液通、断，程序结束等。ISO 国际标准中，M 代码有 M00 ~ M99 共计 100 种，常用的 M 指令有：

- 程序结束类：M00（程序暂停）、M01（计划停止）、M02（程序结束）等；
- 主轴控制类：M03（主轴顺转）、M04（主轴逆转）、M05（主轴停止）；
- 冷却液控制类：M08（冷却液打开）、M09（冷却液关闭）；
- 程序调用：M98（调用子程序）、M99（子程序结束、返回主程序）。

8. 程序段结束符

程序段的末尾必须有一个程序段结束符号，ISO 标准中为 LF，EIA 标准中为 CR。

第三节 数控加工自动编程

由于手工编程效率低、精度低、周期长，特别是对于较复杂零件的数控加工，诸如非圆曲线与曲面等零件的加工，手工编程已无法胜任；而利用计算机进行自动编程则可以解决这些问题，即使一般简单零件的数控加工，若采用自动编程，也可大大提高编程效率与编程精度，因此自动编程在数控加工中占有越来越重要的位置。

所谓自动编程，就是借助于电子计算机及外围设备（如打印机、穿孔机、绘图仪等）完成数控加工程序的编制，并传送到数控装置或存入存储介质。下面分别介绍几种自动编程方法。

一、语言式自动编程

采用语言式自动编程，编程人员根据图样要求，用一种书写比较简单直观的数控加工自动编程语言（简称数控语言），描述被加工零件加工部位的几何图形和加工过程的程序（称为零件的源程序），把它作为计算机的输入，其他工作如刀具中心轨迹的计算，数控加工程序的编制以及存储等均由计算机及外围设备自动完成，且可通过绘图仪或屏幕显示器绘制刀具中心轨迹图形，模仿机床加工以检查数控加工程序的正确性。所以自动编程既可以减轻劳动强度，缩短编程时间，又可提高编程精度，减少差错。图 1-8 所示是采用“数控语言程序”实现自动编程的过程。

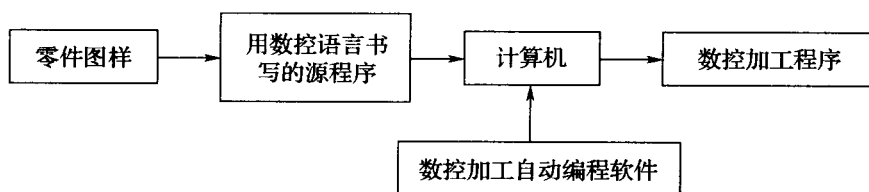


图 1-8 采用“数控语言程序”实现自动编程的过程

书写零件源程序的数控语言是一套规定的基本符号以及用这些符号来描述零件几何形状和加工过程的规则，这些符号和规则接近于生产中使用的工艺术语和工艺规程。因此，用这种数控语言编写的零件源程序简单直观，易于为编程人员所掌握，编程速度也较快。国际上最流行的数控语言主要有美国的 APT（Automatically Programmed Tools）语言。

用数控语言编写的零件源程序输入计算机之前，必须事先配备一套解释程序或编译程序（即数控软件），计算机才能对输入的源程序进行识别，并翻译成计算机能够计算、处理的可执行程序。这套数控软件是根据具体数控语言的要求，结合具体的计算机和数控机床，由人工编制的一套较宏大的计算机处理程序。有了这套程序，计算机才能把零件源程序处理成数控加工程序。

对自动编程系统的研制最早始于美国，1954 年推出了 APT I 系统；1958 年推出了 APT II；1962 年推出了 APT III；1970 年推出了 APT IV 且一直沿用到现在。该系统对于各种类型的数控机床都能实现自动编程，但因其编译系统（数控软件）庞大，故只能在大型计算机上才能运行。随着小型机和微机的发展，各国相继发展了一些较为灵活、针对性较强的小型自动编程系统。如美国的 ADAPT 系统、日本的 FAPT 系统、德国的 EXAPT 系统、法国的 IFAPT 系统以及我国某高校研制的 MPAPT 系统。这些系统主要适用于 $2 \sim 2\frac{1}{2}$ 坐标的数控机床进行点位加工或轮廓加工的自动编程。

为了使大家对自动编程概念的理解更为完整与深入，下面以 MPAPT 系统为例，简单介绍其基本结构及其数控软件的工作流程。

该系统主要适用于对平面类零件轮廓的数控加工进行自动编程。系统以微机作为自动编程的主机，由 MPAPT 数控软件支持，其外部设备包括打印机、CRT 终端显示器、绘图机、纸带穿孔机、纸带阅读机和数控机床控制装置。其结构如图 1-9 所示。

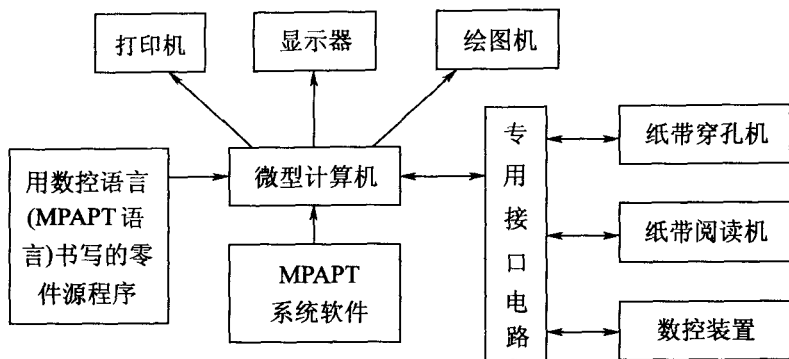


图 1-9 MPAPT 系统结构

系统软件主要包含前置处理程序、图形显示程序、后置处理程序和机床仿真加工程序。数控加工程序编制人员根据待加工零件图样，用 MPAPT 语言编写出零件源程序，然后通过键盘输入计算机。输入的源程序由前置处理程序进行解释、处理，在解释与处理过程中发现错误，屏幕上会立即显示出错语句和错误类型，根据错误类型，对源程序进行修改，直到所有的源语句解释、处理完毕，即可得到刀位（Cutter Location—CL）文件。此后，程序员借助人机对话，可确定是否转入图形显示程序，经屏幕绘图，以验证刀具中心轨迹是否正确；亦可直接转入后置处理程序进行处理，以输出特定的数控机床加工时所需要的数控加工程序。数控加工程序生成后，可进一步转入机床仿真加工程序，以图形方式来验证数控加工程序的正确性，然后将数控加工程序存盘或启动穿孔机穿制数控加工纸带或通过专用接口直接传输给数控机床的控制装置。手工编制简单零件的数控加工程序或穿制的纸带也可通过键盘或纸带阅读机输入计算机进行仿真加工，以验证手工编制的加工程序或制作的纸带是否正确，再进行修改（若有错）、存盘、穿孔制带或直接传输给机床控制装置进行加工。

由上面可知，自动编程系统数控软件的处理过程是：先将数控软件调入计算机，然后将用数控语言书写的零件源程序输入计算机，计算机才能对源程序的语句依次进行处理，直到获得所要求的数控加工程序为止。从零件源程序到数控加工程序的具体处理过程主要分为两个阶段，即前置处理和后置处理。前置处理主要完成对源程序进行翻译和计算刀具中心轨迹，它与具体的数控机床无关，其输出内容为刀位文件，文件内容包括刀具中心轨迹数据和有关的加工参数（如进给量、主轴转速等）。但这些内容还不能作为数控机床的控制指令，因此，必须把它们转换成符合特定数控机床指令要求的加工程序或控制纸带。这部分工作是由后置处理来完成的。所以前置处理程序一般是通用的，而后置处理程序是专用的，针对不同的数控机床，其处理方法因指令或指令格式的不同而不同。

综上所述，前置处理程序的处理对象是用数控语言书写的源程序，输出的结果是刀位文件；而后置处理程序的处理对象是前置处理程序输出的刀位文件，输出的结果则是特定数控机床的加工程序。后置处理程序不仅可以前接某一前置处理系统的输出，也可前接其他方式计算后得到的刀具中心轨迹数据，如图 1-10 所示。