

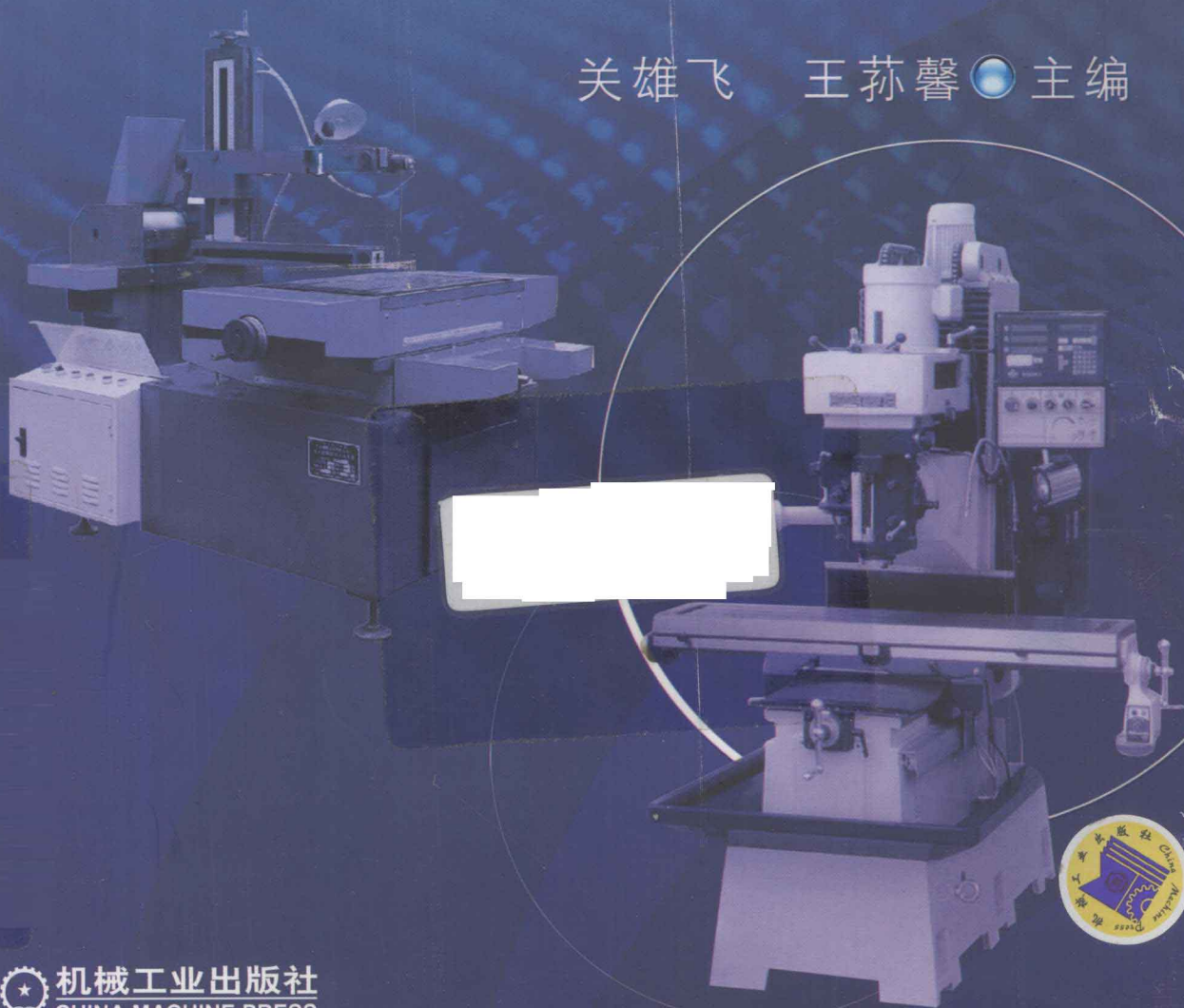


职业教育院校重点专业规划教材  
数控技术应用专业教学用书

# 数控加工编程技术

SHUKONG JIAGONG BIANCHENG JISHU

关雄飞 王荪馨 主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



职业教育院校重点专业规划教材  
数控技术应用专业教学用书

# 数控加工编程技术

主 编 关雄飞 王荪馨  
副主编 呼刚义  
参 编 杨 鹏  
主 审 董永亨



机械工业出版社

本书以 FANUC 0i 系统为教学对象, 内容包括数控加工编程基础、数控车削加工程序、数控铣削及加工中心加工程序、宏指令编程技术和 CATIA V5 自动编程技术。本书采用理实一体化的编写模式, 以课程培养目标为主线, 系统性强, 知识点连贯; 基本理论扎实, 基本概念清晰, 重要知识点分析透彻; 内容安排合理, 循序渐进, 深入浅出。

本书可作为职业院校机械制造类和机电一体化类专业教材, 也可作为相关企业工程技术人员参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工编程技术/关雄飞, 王荪馨主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 2

职业教育院校重点专业规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 37147 - 2

I. ①数… II. ①关…②王… III. ①数控机床 - 程序设计 - 高等职业教育 - 教材 IV. ① TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 013081 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 汪光灿 责任编辑: 汪光灿 张云鹏

版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀丽

封面设计: 陈 沛 责任印制: 杨 曦

北京京丰印刷厂印刷

2012 年 3 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14 印张 · 346 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 37147 - 2

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

销售二部: (010) 88379649

教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书本着“以就业为导向，工学结合”的原则，以实用为基础，根据企业的实际需求来进行课程设置和教学内容的选取，注重培养学生分析和解决生产实际问题的能力。

本书具有以下特点：

1. 基础理论扎实，基本概念清晰，知识点系统且实用。
2. 书中所选的教学内容，力求使学生在学会各种编程指令之外，更多地掌握指令的特点和应用方法，以及结合机械加工工艺知识，提高学生编制正确、经济合理零件加工程序的能力。
3. 采用了理实一体化的编写模式，以课程培养目标为主线，以大纲要求的知识点为基础来设置教学单元，在理论学习的基础上，根据需要辅以典型零件加工案例的解析，使学生对所学内容有一个全面、系统的理解和掌握。
4. 本书所举典型案例均来自生产实际，且内容主题鲜明，深入浅出。
5. 对案例的分析不仅有工艺分析与设计、参考程序，而且更强调加工轨迹的设计与表达。通过各工序的刀路示意图，学生更容易掌握零件加工程序的编制，甚至不必去讲解参考程序，学生就可以根据刀路示意图自行完成加工程序的编制，教学效果较好。

本课程建议学时为 80 学时，具体安排如下：

序号	内 容	计划学时数/节
单元一	数控加工编程基础	8
单元二	数控车削加工程序	20
单元三	数控铣削及加工中心加工程序	24
单元四	宏指令编程技术	16
单元五	CATIA V5 自动编程技术	12

本书由关雄飞、王荪馨任主编，呼刚义任副主编，杨鹏参与编写。全书由董永亨主审。在编写过程中，主审对书稿提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和疏漏在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言	145
单元一 数控加工编程基础	1
第一节 基本概念	1
第二节 数控编程基本知识	9
第三节 数控加工工艺基础	18
思考与练习题	36
单元二 数控车削加工程序	37
第一节 基本编程指令及应用	37
第二节 循环功能指令及应用	51
第三节 螺纹加工与编程	66
第四节 综合加工典型案例	78
思考与练习题	85
单元三 数控铣削及加工中心加工程序	91
第一节 基本功能指令及应用	91
第二节 坐标变换功能指令	103
第三节 铣削平面轮廓	111
第四节 孔加工循环指令	121
第五节 综合加工典型案例	128
思考与练习题	145
单元四 宏指令编程技术	151
第一节 FANUC Oi 系统宏程序编程基础知识	151
第二节 数控车床宏指令编程	158
第三节 数控铣床及加工中心宏指令编程	161
第四节 宏程序综合应用典型案例	172
思考与练习题	179
单元五 CATIA V5 自动编程技术	182
思考与练习题	209
附录	212
附录 A FANUC、华中世纪星、SIEMENS 数控车床指令对照	212
附录 B FANUC Oi-MC、华中世纪星 HNC-22M、SIEMENS 802D 数控铣床指令对照	217
参考文献	220

# 单元一 数控加工编程基础

## 学习目标

1. 了解数控技术及数控机床的产生及发展现状。
2. 了解数控机床的工作过程和数控机床加工工艺特点。
3. 理解数控机床坐标系的概念，熟悉数控编程的内容，掌握编程方法。
4. 数控加工程序的格式、结构及常用指令的功能，掌握其应用。
5. 能够合理选用常用加工刀具，合理选择切削用量。
6. 能够设计一般零件的加工工艺路线。

## 第一节 基本概念

### 一、数控技术及其发展

#### 1. 数控技术

数控即数字控制 (Numerical Control, NC) 是使用数字化信息，按给定的工作程序、运动轨迹和速度，对控制对象进行控制的技术。数控系统所控制的—般是位移、角度、速度等机械量，也可以是温度、压力、流量、颜色等物理量。这些量的大小不仅是可测量的，而且可经 A/D 或 D/A 转换。

现代数控技术综合运用了微电子、计算机、自动控制、精密测量、机械设计与制造等技术的最新成果，具有动作顺序的程序自动控制，位移和相对位置坐标的自动控制，速度、转速及各种辅助功能的自动控制等功能，在许多领域得到了越来越广泛的应用。

#### 2. 数控机床

采用了数字控制技术的设备称为数控设备。其操作命令是用数字或数字代码的形式来描述，工作过程是按指令程序自动进行。数控机床就是一种典型的数控设备，它是装备了数控系统的金属切削机床。

#### 3. 数控加工

数控加工是指在数控机床上进行零件加工的工艺方法。数控加工的实质就是数控机床按照编制好的加工程序，对零件进行自动加工的过程。

#### 4. 数控技术的产生与发展

为了满足现代生产对机械产品精度、生产效率、轮廓形状、改型频繁等日益提高的需求，数控机床应运而生。自 1952 年美国帕森斯公司与美国空军合作，研制出第一台数控铣床之后，人们在数控技术的研究、改进和应用等方面取得了很大的发展。数控系统的发展一般可划分成以下五代产品：

1952 年出现的第一代数控系统，即采用电子管和继电器的数控装置。

1959 年出现的第二代数控系统，即采用晶体管的数控装置。

1965年出现的第三代数控系统，即采用小规模集成电路的数控装置。

1970年出现的第四代数控系统，即采用大规模集成电路及小型计算机的数控装置。

1974年出现的第五代数控系统，即采用微处理器或微型计算机的数控装置。

## 二、数控机床的组成及工作原理

### 1. 数控机床的组成

数控机床的组成如图 1-1 所示，主要由输入输出装置、数控装置、伺服驱动系统、测量反馈装置和机床本体组成。

(1) 输入输出装置 输入输出装置的主要功能有编制程序、输入程序和数据、打印和显示等。这一部分的硬件，简单的可能只有键盘和发光二极管显示器，一般的可再加上纸带、光电读带机、磁带、磁盘输入机、人机对话编程操作键盘和显示器，目前通常还包含有一套自动编程机或 CAD/CAM 系统。

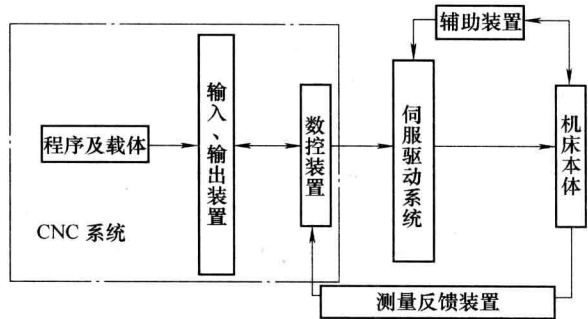


图 1-1 数控机床组成框图

(2) 数控装置 数控装置是数控设备的控制核心。

它接收输入的程序和数据，对其进行分类、译码和存储，并按要求完成数值计算、逻辑判断、输入输出控制、轨迹插补等。数控装置一般由一台专用计算机或通用计算机、输入输出接口及机床控制器（可编程序控制器）等部分组成。机床控制器主要用于实现对机床辅助功能 M、主轴转速功能 S 和换刀功能 T 的控制。

(3) 伺服驱动系统 伺服驱动系统包括伺服控制电路、功率放大电路、伺服电动机等。其主要功能是接收数控装置插补运算产生的信号指令，经过功率放大和信号分配，驱动机床伺服电动机运动。伺服电动机可以是步进电动机、直流伺服电动机或交流伺服电动机。

(4) 测量反馈装置 该装置由测量部件和相应的测量电路组成，其作用一般是检测速度、位移、角度等机械量，并将信息反馈给数控装置，构成闭环控制系统。常用的测量部件有脉冲编码器、旋转变压器、感应同步器、光栅和磁尺等。

(5) 机床本体 机床本体是被控制的对象，是实现零件加工的执行部件，是数控机床的主体，它包括床身、立柱、主轴、进给机构等机械部件。

另外，为了保证数控机床功能的充分发挥，还有一些配套的辅助控制装置（如冷却、排屑、防护、润滑、照明、储运、程编和对刀等装置）。

### 2. 数控机床的工作原理

当使用机床加工零件时，通常需要对机床的各种动作进行控制，这不仅需要控制动作的先后顺序，而且需要控制机床各运动部件的位移量和运动速度。采用数控机床加工零件时，只需要将零件图形和工艺参数、加工步骤等以数字信息的形式，编成程序或代码输入到机床控制系统中，再经进行运算处理后转换成驱动伺服系统的指令信号，从而控制机床各部件协调动作，加工出零件。当更换加工对象时，只需要重新编写加工程序，即可由数控装置自动控制加工的全过程，这就能较方便地制造出不同的零件。数控加工的原理如图 1-2 所示。

数控加工过程总体上可分为数控程序编制和机床加工控制两大部分。数控机床的控制系统能按照数字程序指令控制机床实现主轴自动启停、换向和变速，能自动控制进给速度、方

向和加工路线进行加工，能选择刀具并根据刀具尺寸调整吃刀量及刀路，能完成加工中所需要的各种辅助动作。

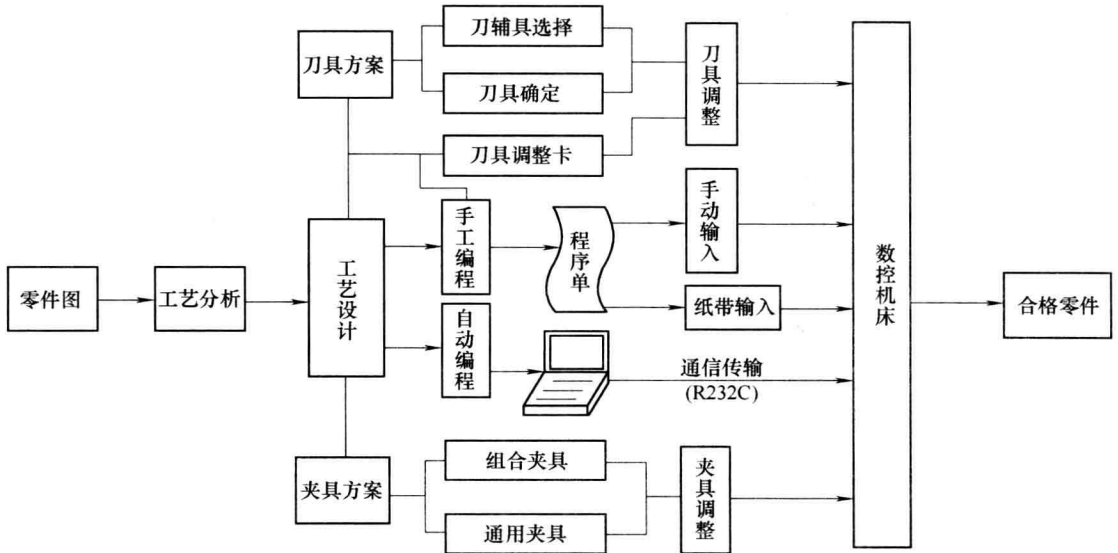


图 1-2 数控加工原理框图

### 三、数控机床的分类

#### 1. 按工艺用途分类

- 1) 金属切削类，如数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床、数控滚齿机、加工中心等。
- 2) 金属成形类，如数控折弯机、数控弯管机、数控压力机等。
- 3) 特种加工类，如数控线切割机床、数控电火花加工机床、数控激光切割机床等。
- 4) 其他类，如数控等离子切割机、数控三坐标测量机等。

#### 2. 按运动轨迹控制分类

(1) 点位控制数控机床 这类机床只控制运动部件从一点移动到另一点的准确定位，在移动过程中不进行加工，对两点间的移动速度和运动轨迹没有严格要求，可以同时沿多个坐标移动，也可以依次沿各个坐标移动。为了减少移动时间和提高终点位置的定位精度，一般先快速移动，当接近终点位置时，再减速缓慢靠近终点。图 1-3 为点位控制加工示意图。

采用点位控制的机床有数控钻床、数控坐标镗床、数控冲床和数控测量机等。

(2) 点位直线控制数控机床 这类机床不仅要控制点的准确定位，而且要控制刀具（或工作台）以一定的速度沿与坐标轴平行的方向进行切削加工。机床应具有主轴转速的选择与控制、切削速度与刀具的选择及循环进给加工等辅助功能。图 1-4 为直线控制加工示意图，这种控制常用于简易数控车床、数控镗铣床等。

(3) 轮廓控制数控机床 这类机床能够对两个或两个以上运动坐标的位移及速度进行连续相关的控制，使所合

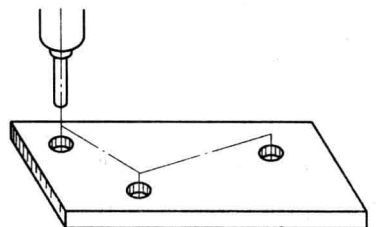


图 1-3 点位控制加工示意图



成的平面或空间运动轨迹能满足零件轮廓的要求。其数控装置一般要求具有直线和圆弧插补功能、主轴转速控制功能及较齐全的辅助功能。这类机床用于加工曲面、凸轮及叶片等复杂形状的零件。图 1-5 为轮廓控制加工示意图，轮廓控制数控机床有数控铣床、数控车床、数控磨床和加工中心等。

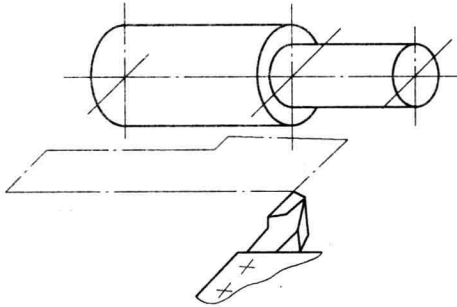


图 1-4 直线控制加工示意图

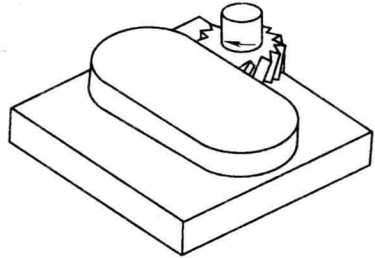


图 1-5 轮廓控制加工示意图

### 3. 按伺服驱动系统分类

(1) 开环控制系统 开环控制系统框图如图 1-6 所示。这类控制系统没有位置检测元件，伺服驱动部件通常为反应式步进电动机或混合式伺服步进电动机。数控系统每发出一个进给指令脉冲，经驱动电路功率放大后，驱动步进电动机旋转一个角度，再经传动机构带动工作台移动。这类系统信息流是单向的，即进给脉冲发出去以后，实际移动值不再反馈回来，所以称为开环控制。

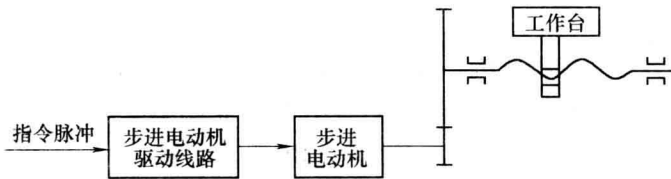


图 1-6 开环控制系统框图

开环控制系统的特点是结构较简单、成本较低、技术容易掌握，但由于受步进电动机的步距精度和传动机构的传动精度的影响，难以实现高精度的位置控制，进给速度也受步进电动机工作频率的限制。一般适用于中、小型经济型数控机床，特别适用于由旧机床改造的简易数控机床。

(2) 闭环控制系统 闭环控制系统框图如图 1-7 所示。这类控制系统带有直线位移检测装置，直接对工作台的实际位移量进行检测。伺服驱动部件通常采用直流伺服电动机或交流伺服电动机。图中 A 为速度测量元件，C 为位置测量元件。当位移指令值发送到位置比较电路时，若工作台没有移动，则没有反馈量，指令值使得伺服电动机转动，通过 A 将速度反馈信号送到速度控制电路，通过 C 将工作台实际位移量反馈回去，在位置比较电路中位移指令值进行比较，再用比较后得出的差值进行位置控制，直至差值为零时为止。这类控制系统，因为把机床工作台纳入了控制环节，故称闭环控制系统。该系统可以消除包括工作台

传动链在内的传动误差，因而定位精度高。但由于工作台惯量大，对机床结构的刚性、传动部件的间隙及导轨副的灵敏性等的要求非常严格，否则对系统稳定性会带来不利影响。

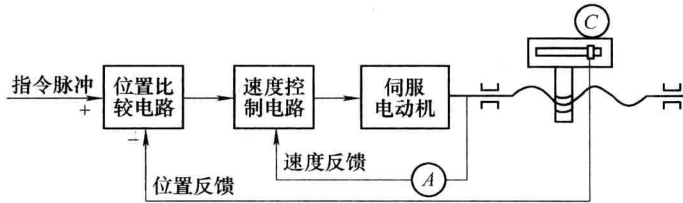


图 1-7 闭环控制系统框图

闭环控制系统的特点是定位精度高，但调试和维修都较困难，系统复杂，成本高，一般适用于精度要求高的数控设备，如数控精密镗铣床。

(3) 半闭环控制系统 半闭环控制系统框图如图 1-8 所示。这类控制系统与闭环控制系统的区别在于它采用角位移检测元件，检测反馈信号不是来自工作台，而是来自与电动机输出轴相联系的角位移检测元件 B。通过测速发电机 A 和光电编码盘（或旋转变压器）间接检测出伺服电动机的转角，推算出工作台的实际位移量，并将此值与指令值进行比较，用差值来实现控制。从图 1-8 可以看出，由于工作台没有包括在控制回路中，因而称之为半闭环控制。这类控制系统的伺服驱动部件通常采用宽调速直流伺服电动机，目前已将角位移检测元件与电动机设计成一个部件，使系统结构简单、方便。半闭环控制系统的性能介于开环和闭环之间，精度没有闭环高，调试却比闭环方便，因而得到广泛应用。

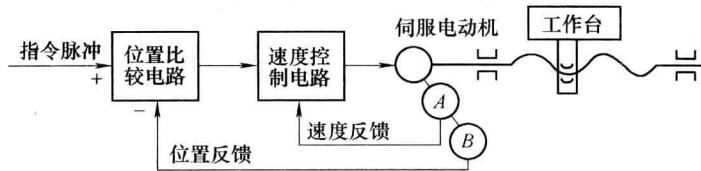


图 1-8 半闭环控制系统框图

#### 四、数控机床的特点及应用范围

##### 1. 数控机床的特点

(1) 适应性强 适应性也称为柔性，是指数控机床相对于生产对象的变化而具有的适应性。所谓适应性强，是指加工零件的形状变化时，只需改变加工程序，而机床、夹具等工艺装备一般不需改变。另外，数控机床可以完成多种工序，如镗铣加工中心能完成钻孔、镗孔、铰孔、铰孔、铣削、螺纹加工等加工工序。

(2) 加工精度高，质量稳定 对应数控系统每发出一个脉冲，机床工作台的位移量称为脉冲当量。目前数控装置的脉冲当量一般为 0.001mm。切削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，数控机床能达到较高的加工精度。

数控机床切削加工常采用工序集中方式，减少了多次装夹对加工精度的影响，自动加工方式也可避免人工操作误差，使工件加工的质量稳定，同一批零件尺寸一致性好。

(3) 生产效率高，生产准备周期短 与普通机床相比，由于数控机床的自动化程度高，并且综合应用了现代科学生产技术成果，其生产效率提高了 3~5 倍。对于复杂成形面的加

工,生产效率可提高 10 倍,甚至几十倍。对于新零件的加工,大部分准备工作是针对零件工艺编制数控程序,而不是去准备靠模、钻镗模、专用夹具等工艺装备,而且编程工作可以离线进行,可以利用 CAD/CAM 系统自动编程,这样大大缩短了生产准备时间。因此,十分有利于企业产品的升级换代和新产品的开发。

(4) 能实现复杂的运动 数控机床可以完成复杂的曲线和曲面自动加工,如螺旋桨、汽轮机叶片等空间曲面,非常适用于复杂异形零件的加工。这些是在普通机床上很难、甚至根本无法完成的。

(5) 减轻劳动强度、改善劳动条件 利用数控机床进行加工,只需按图样要求编制加工程序,然后输入并调试程序和机床,进行自动加工,观察监视加工过程并装卸工件,而不需要进行繁重的重复性手工操作,劳动强度与紧张程度可大为减轻,劳动条件也相应得到改善。

(6) 有利于实现制造和生产管理的现代化 数控机床使用数字信息与标准代码处理、传递信息,易于建立与计算机的通信联络,从而形成由计算机控制和管理的产品研发、设计、制造、管理及销售一体化系统。

## 2. 数控机床的应用范围

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。但是,数控机床的技术含量高,成本高,使用和维修都有一定难度。若从最经济的方面考虑,数控机床适用于如下零件的加工:

- 1) 多品种小批量零件。
- 2) 结构较复杂,精度要求较高或必须用数学方法确定的复杂曲线、曲面等零件。
- 3) 需要频繁改型的零件。
- 4) 钻削、镗削、铰削、铤削、攻螺纹及铣削等多工序联合加工的零件,如箱体、壳体等。
- 5) 价格昂贵,不允许报废的零件。
- 6) 要求全部检验的零件。
- 7) 生产周期短的急需零件。

## 五、数控编程技术概述

### 1. 数控编程的定义

把零件全部加工工艺过程及其辅助动作,按动作顺序用规定的标准指令、格式编写成数控机床的加工程序,并经过检验和修改后,制成控制介质的整个过程称为数控加工程序编制,简称数控编程。使用数控机床加工零件时,程序编制是一项重要的工作,迅速、正确而经济地完成程序编制工作,对于有效地使用数控机床是具有决定意义的。

### 2. 数控编程的内容和工作过程

如图 1-9 所示,数控程序的编制应该有如下几个过程。

(1) 分析零件图样,确定工艺过程 要分析零件的材料、形状、尺寸、精度及毛坯形状和热处理工艺等,以便确定该零件是否适宜在数控机床上加工,或适宜在哪类数控机床上加工。同时,还要确定在某台数控机床上加工该零件的哪些工序或哪几个表面。确定零件的加工方法、加工顺序、刀路、装夹定位方法、刀具及合理的切削用量等工艺参数。

(2) 数值计算 根据零件图样和确定的加工路线,算出数控机床所需输入的数据,如

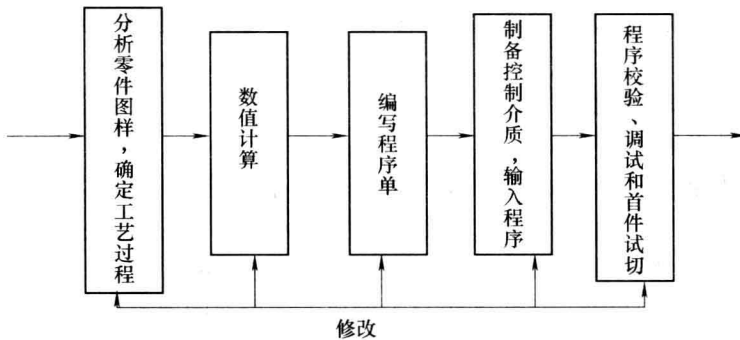


图 1-9 数控编程的内容和步骤

零件轮廓基点坐标、节点坐标等。

(3) 编写程序单 根据加工工艺路线、计算出的零件轮廓数据和已确定的加工用量，按照数控系统规定的程序段格式编写零件加工程序单。此外，还应填写有关的工艺文件，如数控加工工序卡片、数控刀具卡片、工件安装和零点设定卡片等。

(4) 制备控制介质输入程序 将程序内容记录在控制介质（如穿孔纸带、磁盘等）上，作为数控装置的输入信息。程序的输入有手动数据输入、介质输入、通信输入等方式。

(5) 程序校验、调试和首件试切 可通过模拟软件来模拟实际加工过程，或将程序输入机床数控装置后进行空运行，也可通过首件试加工等多种方式来检验所编制的程序，若发现错误则应及时修正，直到程序正确无误为止。

### 3. 数控编程方法

数控程序的编制方法有手工编程和自动编程两种。

(1) 手工编程 从零件图样分析及工艺设计、数值计算、书写程序单、制备控制介质直至程序的校验等各个步骤均由人工完成的过程称为手工编程。对于点位加工或几何形状不太复杂的零件来说，编程计算较简单，程序量不大，可采用手工编程实现。这时，手工编程显得经济而且便捷。但对于轮廓形状复杂零件，或者零件轮廓是由复杂曲线、三维空间曲面几何元素组成时，计算工作量大且非常复杂，手工编程困难甚至无法实现，则必须采用自动编程的方法。

(2) 自动编程 编程工作的大部分或全部由计算机完成的过程称为自动编程，或称为计算机辅助编程。

按照输入方式的不同，计算机辅助编程可分为语言式自动编程、图形交互式自动编程、语音式自动编程和会话式自动编程四种。

语言式自动编程是指加工零件的几何尺寸、工艺方案、切削参数等用数控语言编写成源程序后，输入到计算机或编程机中，用相应软件处理后得到零件加工程序的编程方式，如美国的 APT 系统等。

图形交互式自动编程是指将被加工零件的几何图形及相关信息直接输入到计算机并在计算机显示器上显示出来，通过相应的 CAD/CAM 软件，经过人与计算机图形交互处理，最终得到零件的加工程序。随着计算机技术的不断发展，CAD/CAM 软件技术体现出了更强的优越性，因此，成为了现代数控加工编程的主流技术。目前，常见的 CAD/CAM 一体化软件有 CATIA、UG、Pro/E、MasterCAM、Solidworks、CAXA 制造工程师等。

自动编程的特点就在于编程效率高,编程误差少,可解决复杂形状零件的编程难题,降低编程费用。

## 六、数控技术的发展趋势

### 1. 数控系统的发展趋势

(1) 开放式数控系统 开放式数控系统就是数控系统的开发可以在统一的运行平台上,面向机床厂家和用户,其硬件、软件和总线规范都是对外开放的,通过改变、增加或裁减结构对象(数控功能),形成不同品种、不同档次的系列化的数控系统,而且为用户的二次开发带来极大的方便,用户可通过升级或组合来构成不同档次的数控系统,通过扩展构成不同类型数控机床的数控系统。开放式体系结构的数控系统可以采用大量的通用计算机的先进技术,解决了数控系统封闭性问题,系统集成度更高,更加小型化、微型化,增强了通信功能,提高了进线、联网能力,数控系统开放式体系已成为数控系统的发展方向。

(2) 数控系统的智能化 数控系统的控制性能已趋向智能化发展,数控系统可局部或全部实现加工过程的自适应、自诊断和自调整控制,可实现三维刀具补偿、运动参数自动补偿等功能;多媒体人机接口可使用户操作简单,人机界面交流极为友好;智能编程可实现加工数据、工艺参数的自动生成;智能数据库、智能监控、三维加工模拟功能及采用专家系统以降低对操作者的要求;伺服系统智能化的主轴交流驱动和智能化进给伺服驱动装置,能自动识别负载并自动优化、调整参数等。

### 2. 数控机床的发展趋势

(1) 高可靠性 数控机床的可靠性是数控机床产品质量的一项关键性指标。数控机床能否发挥其高性能、高精度、高效率,并获得良好的效益,关键取决于可靠性。衡量可靠性的重要的量化指标是平均无故障工作时间(MTBF值)。近些年来,高可靠性技术已在数控机床产品中得到了广泛的应用,并取得了明显的进展。

(2) 高速、高效化 受高生产效率的驱使,高速化已是现代机床技术发展的重要方向之一。高速切削可通过高速运算技术、快速插补运算技术、超高速通信技术和高速主轴等技术来实现,其特点就是“高转速、小吃深、快走刀”。

提高主轴转速可减少切削力,减小切削深度,有利于克服机床振动,传入零件中的热量大大减低,排屑加快,热变形减小,加工精度和表面质量得到显著改善。因此,经高速加工的工件一般不需要精加工。

(3) 高精度化 高精度化一直是数控机床技术发展追求的目标。它包括机床制造的几何精度和机床使用的加工精度控制两方面。

提高机床的加工精度,一般是通过减少数控系统误差,提高数控机床定位精度,提高基础件结构特性和热稳定性,采用补偿技术和辅助措施来达到的。

(4) 高柔性化 柔性是指机床适应加工对象变化的能力。目前,在进一步提高单机柔性自动化加工的同时,数控系统正向单元柔性和系统柔性化发展。体现系统柔性化的FMC(柔性制造单元)、FMS(柔性制造系统)和CIMS(计算机集成制造系统)发展迅速。

高柔性是指具有开放性体系结构,通过重构和编辑,视需要系统的组成可大可小;功能可专用也可通用,功能价格比可调;可以集成用户的技术经验,形成专家系统。

(5) 高复合化 复合化包含工序复合化和功能复合化。工件在一台设备上一次装夹后,

通过自动换刀等各种措施,来完成多种工序和表面的加工。在一台数控设备上能完成多工序切削加工(如车削、铣削、镗削、钻削等)的加工中心,可以替代多台机床和多次装夹的加工,既能减少装卸时间,省去工件搬运时间,提高每台机床的加工能力,减少半成品库存量,又能保证和提高形位精度,从而打破了传统的工序界限和分散加工的工艺规程。从发展趋势看,加工中心主要是通过主轴头的立卧自动转换和数控工作台来完成五面和任意方位上的加工。此外,还出现了与车削或磨削复合的加工中心等。

另外,复合化还体现在 CNC 系统与加工过程作为一个整体,实现了机、电、液、气、光、声等综合控制,使测量造型、加工一体化,实时检测与修正一体化,机床主机设计与数控系统设计一体化。

(6) 网络化 实现多种通讯协议,既满足单机需要,又能满足 FMS、CIMS 对基层设备的控制要求。配置网络接口,可通过 Internet 实现远程监视和控制加工,进行远程检测和诊断,使维修变得简单。建立分布式网络化制造系统,可便于形成“全球制造”。

## 第二节 数控编程基本知识

### 一、字的概念和功能指令

字即指令字,也称功能字,它是由地址符和数字组成,是组成数控程序的最基本的单元,不同的地址符及其后续数字表示了不同的指令字及含义。

例如, G01 是一个指令字,表示直线插补功能,其中, G 为地址符,数字 01 为地址中的内容;又如, X-200. 是一个指令字,表示 X 轴坐标为 -200., 其中, X 为地址符,数字 -200. 为地址中的内容。

常用的地址符及其含义见表 1-1。

表 1-1 常用的地址符及其含义

机 能	地 址 码	说 明
程序名	O、%、P	程序编号
程序段号	N	程序段号地址
坐标字	X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R	直线坐标轴
	A、B、C、D、E	旋转坐标轴
	R	圆弧半径
	I、J、K	圆弧中心坐标
准备功能	G	指令机床动作方式
辅助功能	M	机床辅助动作指令
补偿值	H、D	补偿值地址
进给功能	F	指定进给速度
主轴转速功能	S	指定主轴转速
刀具功能	T	指定刀具编号
暂停功能	P、X	指定暂停时间
重复次数	L	指定子程序及固定循环的重复次数

一个指令字表达了一个特定的功能含义，在实际工作中，应根据不同的数控系统说明书来使用各个功能指令。

### 1. 程序名功能字

程序名又称程序号，每个独立的程序都应有程序名，它可作为识别、调用该程序的标志。程序名一般是由程序名地址符（字母）和1~4位数字构成，不同的数控系统程序名地址符所用字母可能不同，如FANUC系统用O，华中系统则用%，具体可参阅机床使用说明书。

### 2. 程序段号功能字 N

程序段号用来表示程序段的序号，它由地址符N和后续数字组成，即N××××，如N10。数控加工中的顺序号实际上是程序段的名称，与程序执行的先后次序无关，数控系统不是按程序段号的次序来执行程序，而是按照程序段编写时的排列顺序逐段执行。一般使用时，程序段号应按一定的增量间隔顺序编写，以便程序的检索、编辑、检查和校验等。

### 3. 坐标字功能字

坐标字用于确定机床在各种坐标轴上移动的方向和位移量，它是由坐标地址符和带正、负号的数字组成。例如，X-50.00表示坐标位置是X轴负方向50mm。

### 4. 准备功能字 G

准备功能字的地址符是G，后跟两位数字组成，准备功能字简称G功能、G指令或G代码，它是使机床或数控系统建立起某种加工方式的指令。G指令从G00至G99共有100种。表1-2为FANUC Oi数控铣床系统常用G功能指令。

表 1-2 FANUC Oi 数控铣床系统常用 G 功能指令

代码	组	意 义	代码	组	意 义	代码	组	意 义
* G00	01	快速点定位	* G40	07	取消刀具半径补偿	G81	09	钻孔循环
G01		直线插补	G41		刀具半径左补偿	G82		钻孔循环
G02		顺时针圆弧插补	G42		刀具半径右补偿	G83		啄式钻深孔循环
G03		逆时针圆弧插补	G43	刀具长度正补偿	G84	攻螺纹循环		
G04	00	暂停延时	G44	08	刀具长度负补偿	G85		镗孔循环
* G17	02	选择 XY 平面	* G49	00	取消刀具长度补偿	G86		镗孔循环
G18		选择 XZ 平面	G52		局部坐标系设置	G87		背镗循环
G19		选择 YZ 平面	G54	14	零点偏置	G88		镗孔循环
G20	06	寸制单位	~			G89		镗孔循环
* G21		米制单位	59			* G90		绝对坐标编程
G27	00	参考点返回检查	G73	09	高速深孔钻削固定循环	G91	03	增量坐标编程
G28		返回参考点	G74		左旋攻螺纹循环	G92	00	工作坐标系设定
G29		从参考点返回	G76		精镗循环	* G98	10	返回初始点
G30		返回第二参考点	* G80		钻孔循环取消	G99		返回 R 点

注：1. 表内00组为非模态指令，其他组为模态指令。

2. 标有\*的指令为默认指令，即数控系统通电启动后的默认状态。

G指令分为模态指令（又称续效指令）和非模态指令（又称非续效指令）两类。模态指令表示该指令在一个程序段中一旦出现，后续程序段中一直有效，直到有同组中的其他G

指令出现时才失效。

同一组的模态指令在同一个程序段中不能同时出现，否则只有后面的指令有效，而非同一组的 G 指令可以在同一程序段中同时出现。

非模态 G 指令只在该指令所在程序段中有效，而下一程序段便失效。

### 5. 辅助功能字 M

辅助功能字的地址符是 M，简称 M 功能、M 指令或 M 代码，它由地址码 M 和两位数字组成，共有 100 种，从 M00 到 M99。它是控制机床辅助动作的指令，主要用于指定主轴的开、停、正反转，切削液的开、关，夹具的夹紧、松开，刀具的更换，排屑器的开、关等。M 指令也有模态指令和非模态指令两类。

### 6. 进给功能字 F

进给功能指令用来指定刀具相对于工件的进给速度，是模态指令，单位一般为 mm/min，它以地址符 F 和后续数字表示。例如，程序段 N10 G01 X50.0 Y0 F100；中，F100 表示刀具的进给速度是 100mm/min。当进给速度与主轴转速有关时且用进给量来表示刀具移动的快慢时，单位为 mm/r。加工螺纹时，F 可用来指定螺纹的导程。

### 7. 主轴转速功能字 S

主轴转速功能指令用来指定主轴的转速，是模态指令，单位为 r/min。它以地址符 S 和后续数字表示。例如，S1500 表示主轴转速为 1500r/min。有恒线速度功能的数控系统也可用 S 表示切削线速度，单位为 m/min。加工中，主轴的实际转速常用数控机床操作面板上的主轴速度倍率开关来调整。

### 8. 刀具功能字 T

刀具功能指令的作用是选择所需的刀具号和刀补号，是模态指令。它以地址符 T 和后续数字表示，数字的位数和定义由不同的机床自行确定，一般用两位或四位数字来表示。例如，T0101 表示选 1 号刀，采用 1 号刀补值；或用 T33 表示选 3 号刀具，采用 3 号刀补值。

## 二、程序格式

### 1. 程序的结构

一个完整的零件加工程序由程序名、程序内容和程序结束指令三部分构成。程序内容是由若干个程序段组成，每个程序段由若干个指令字组成，每个指令字又由字母、数字、符号组成。加工程序的结构如下：

```

O1001                                     //程序名
N10 G54 G90 G40 G00 Z100.0;
N20 M03 S1500;
N30 G00 X100.0 Y100.0;
⋮
N100 M05;
N110 M02;                                //程序结束指令

```

### 2. 程序段格式

程序段格式是指一个程序段中字的排列顺序和表达方式。数控系统曾用过的程序段格式有固定顺序程序段格式、带分隔符的固定顺序（也称表格顺序）程序段格式和字地址程序段格式，目前数控系统广泛采用的是字地址程序段格式。



字地址程序段格式也称字地址可变程序段格式。这种格式程序段的长短、字数和字长(位数)都是可变的,字的排列顺序没有严格要求,不需要的字以及与上一程序段相同的续效字可以不写。这种格式的优点是程序简短、直观、可读性强、易于检验、修改,因此现代数控机床广泛采用这种格式。

程序段由程序段号、若干个程序指令字和程序段结束符组成,而指令字又由地址码和数字及代数符号组成,各指令字可根据需要选用,不用的可省略。

字地址程序段的一般格式如下:

<u>N</u> __	<u>G</u> __	<u>X</u> __	<u>Y</u> __	<u>Z</u> __	...	<u>F</u> __	<u>S</u> __	<u>T</u> __	<u>M</u> __	;
程序	准备	尺寸字				进给	主轴	刀具	辅助	程序
段号	功能					功能	转速	功能	功能	段结
字	字					字	功能	字	字	束符
							字			

### 3. 主程序与子程序

机床的加工程序分为主程序和子程序。

主程序是指一个完整的零件加工程序。程序结束指令为 M02 或 M30。

编制零件加工程序时,时常会遇到一组程序段在一个程序中多次出现,或者在几个程序中都要使用它。这组典型的程序段可以按一定格式编成一个固定程序体,并单独加以命名,这个程序体称为子程序。

子程序不可以作为独立的加工程序使用,它只能通过主程序调用,实现加工中的局部动作。

子程序的指令格式有两种:

格式一: M98 P×××× L××××;

地址 P 后的 4 位数字为子程序号,地址 L 后的 4 位数字为重复调用的次数。子程序号及调用次数有效数字前的 0 可以省略。如果只调用一次,则地址 L 及其后的数字可以省略。

此格式的子程序号与调用次数很明确。例如, M98 P123 L2; 为调用子程序 O123 两次。

格式二: M98 P××××××;

地址 P 后为 6 位数字,前两位为调用次数,省略时为调用 1 次;后 4 位为所调用的子程序号。

此格式需要看地址 P 后数字的位数,位数 ≤ 4 位时,此数字表示子程序号; > 4 位时,后四位为子程序号,子程序号之前的数字为调用次数。例如, M98 P50321; 表示调用子程序 O321 五次, M98 P321; 表示调用子程序 O321 一次。

子程序被主程序多次调用时称为重复调用,一般重复调用的次数可以达到 9999 次。同时,子程序也可以调用另一个子程序,称为子程序的嵌套,一般嵌套层级不超过 4 级。

主程序 O0001 调用子程序 O1000 两次,且子程序 O1000 调用(1 级嵌套)子程序 O2000 的程序结构及执行路线如图 1-10 所示。

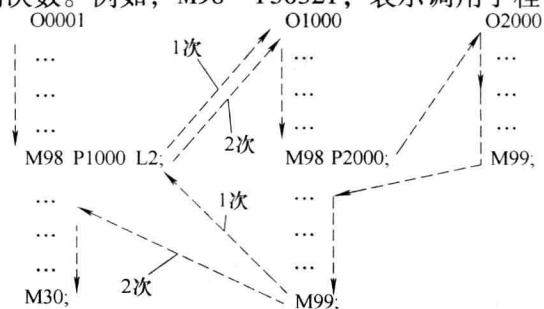


图 1-10 子程序的调用与嵌套