



**第四编 数控机床  
床编程技**

# 第一章 数控加工的编程基础

## 第一节 数控编程概述

### 一、数控加工的过程

利用数控机床完成零件数控加工的过程如图 1-1 所示,主要包括下列步骤。

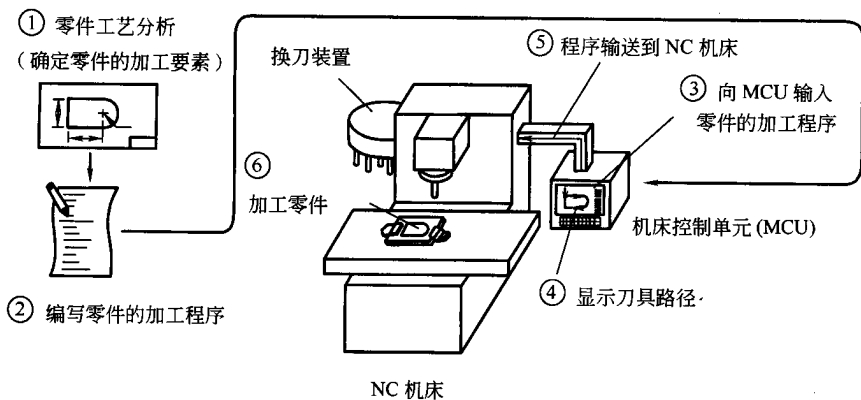


图 1-1 数控加工上的过程

①根据零件加工图样进行工艺分析,确定加工方案、工艺参数和位移数据。

②用规定的程序代码和格式编写零件加工程序单,或用自动编程软件进行 CAD/CAM 工作,直接生成零件的加工程序文件。

③程序的输入或传输。由手工编写的程序,可以通过数控机床的操作面板输入程序;由编程软件生成的程序,通过计算机的串行通讯接口直接传输到数控机床的数控单元 (MCU)。

④将输入/传输到数控单元的加工程序,进行试运行、刀具路径模拟等。

⑤通过对机床的正确操作,运行程序,完成零件的加工。

由此可见,数控编程是数控加工的重要步骤。用数控机床对零件进行加工时,首先对

零件进行加工工艺分析,以确定加工方法、加工工艺路线;正确地选择数控机床刀具和装卡方法;然后,按照加工工艺要求,根据所用数控机床规定的指令代码及程序格式,将刀具的运动轨迹、位移量、切削参数(主轴转速、进给量、吃刀深度等)以及辅助功能(换刀、主轴正转/反转、切削液开/关等)编写成加工程序单,传送或输入到数控装置中,从而指挥机床加工零件。

## 二、数控编程的内容与方法

程序编制一般包括以下几个方面的工作。

### (1) 加工工艺分析

编程人员首先要根据零件图纸,对零件的材料、形状、尺寸、精度和热处理要求等进行加工工艺分析。合理地选择加工方案,确定加工顺序、加工路线、装卡方式、刀具及切削参数等;同时还要考虑所用数控机床的指令功能,充分发挥机床的效能,加工路线要短,正确地选择对刀点、换刀点,减少换刀次数。

### (2) 数值计算

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) 编写零件加工程序单

加工路线、工艺参数及刀位数据确定以后,编程人员根据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。此外,还应附上必要的加工示意图、刀具布置图、机床调整卡、工序卡以及必要的说明。

### (4) 制备控制介质

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。通过程序的手工输入或通信传输入入数控系统。

### (5) 程序校对与首件试切

编写的程序单和制备好的控制介质,必须经过校验和试切才能正式使用。校验的方法是直接将控制介质上的内容输入到数控装置中,让机床空运转,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,用模拟刀具与工件切削过程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,要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,找出问题所在,加以修正。整个数控编程的内容及步骤,可用图 1-2 所示框图表示。

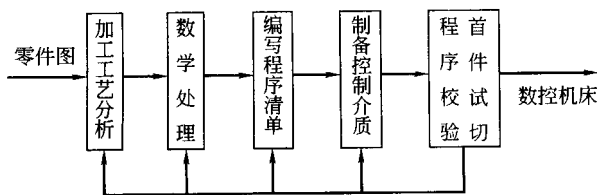


图 1-2 数控编程的步骤

### 三、数控编程的种类

数控编程,一般分为手工编程和自动编程两种。

#### (1) 手工编程

手工编程就是从分析零件图样、确定加工工艺过程、数值计算、编写零件加工程序单、制备控制介质到程序校验都是由人工完成。对于加工形状简单、计算量小、程序不多的零件,采用手工编程较容易,而且经济、及时。因此,在点位加工或由直线与圆弧组成的轮廓加工中,手工编程仍广泛应用。对于形状复杂的零件,特别是具有非圆曲线、列表曲线及曲面组成的零件,用手工编程就有一定困难,出错的概率增大,有时甚至无法编出程序,必须用自动编程的方法编制程序。

#### (2) 自动编程

自动编程是利用计算机专用软件编制数控加工程序的过程。编程人员只需根据零件图样的要求,使用数控语言,由计算机自动地进行数值计算及后置处理,编写出零件加工程序单,加工程序通过直接通讯的方式送入数控机床,指挥机床工作。自动编程使得一些计算繁琐、手工编程困难或无法编出的程序能够顺利地地完成。有关自动编程的内容,请参阅有关书籍。

## 第二节 数控机床与刀具运动

### 一、刀具沿工件的加工轮廓插补

数控加工的过程是刀具沿工件所要加工的轮廓移动(注:某些机床实际上是工作台移动而不是刀具运动,但为了编程上的方便,假定刀具相对于工件移动)——插补过程。如图 1-3、图 1-4 所示。按机床运动的控制轨迹,分为以下几种类型。

#### (1) 点位控制的数控机床

点位控制只要求控制机床的移动部件从一点移动到另一点的准确定位,对于点与点

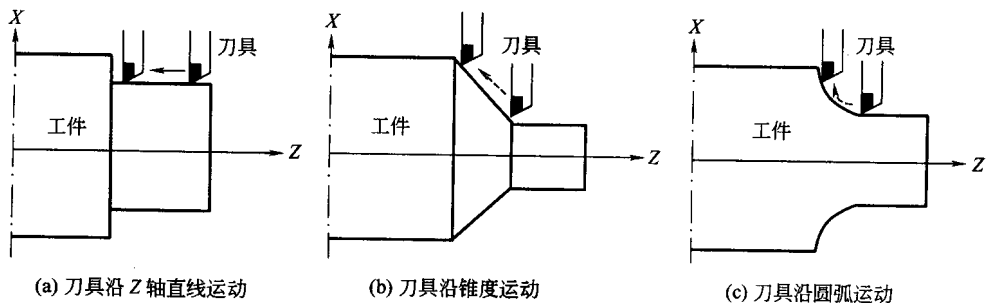


图 1-3 车削加工刀具运动轨迹

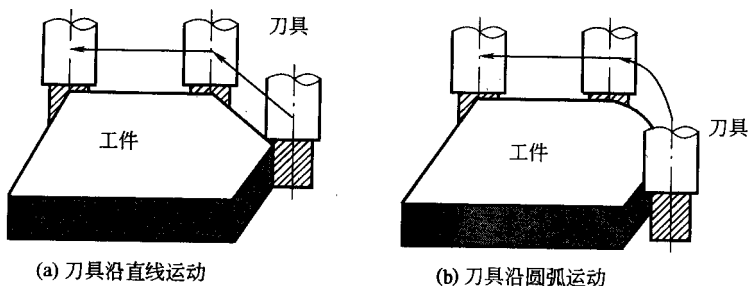


图 1-4 铣削加工刀具运动轨迹

之间运动轨迹的要求并不严格,在移动过程中不进行加工,各坐标轴之间的运动是不相关的。为了实现既快又精确的定位,两点间位移的移动一般先快速移动,然后慢速趋近定位点,以保证定位精度,图 1-5 所示为点位控制的运动轨迹。

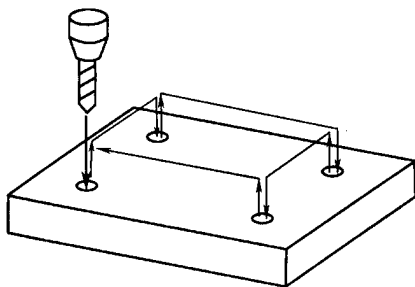


图 1-5 数控机床的点位加工轨剑

具有点位控制功能的机床主要有数控钻床、数控镗床、数控冲床等。随着数控技术的发展和数控系统价格的降低,单纯用于点位控制的数控系统已不多见。

### (2) 直线控制数控机床

直线控制数控机床也称为平行控制数控机床,其特点是除了控制点与点之间的准确定位外,还要控制两相关点之间的移动速度和路线(轨迹),但其运动路线只是与机床坐标

轴平行移动,也就是说同时控制的坐标轴只有一个(即数控系统内不必有插补运算功能),在移动的过程中刀具能以指定的进给速度进行切削,一般只能加工矩形、台阶形零件。

具有直线控制功能的机床主要有比较简单的数控车床、数控铣床、数控磨床等。这种机床的数控系统也称为直线控制数控系统。同样,单纯用于直线控制的数控机床也不多见。

### (3) 轮廓控制数控机床

轮廓控制数控机床也称连续控制数控机床,其控制特点是能够对两个或两个以上的运动坐标的位移和速度同时进行控制。为了满足刀具沿工件轮廓的相对运动轨迹符合工件加工轮廓的要求,必须将各坐标运动的位移控制和速度控制按照规定的比例关系精确地协调起来。因此在这类控制方式中,就要求数控装置具有插补运算功能,所谓插补就是根据程序输入的基本数据(如直线的终点坐标、圆弧的终点坐标和圆心坐标或半径),通过数控系统内插补运算器的数学处理,把直线或圆弧的形状描述出来,也就是一边计算,一边根据计算结果向各坐标轴控制器分配脉冲,从而控制各坐标轴的联动位移量与要求的轮廓相符合。在运动过程中刀具对工件表面连续进行切削,可以进行各种直线、圆弧、曲线的加工。轮廓控制的加工轨迹如图 1-6 所示。

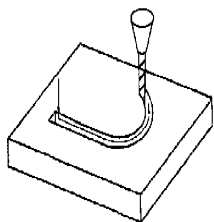


图 1-6 数控铣床的轮廓加工轨迹

这类机床主要有数控车床、数控铣床、数控线切割机床、加工中心等,其相应的数控装置称为轮廓控制数控系统。根据它所控制的联动坐标轴数不同,又可以分为下面几种形式。

①二轴联动 主要用于数控车床加工旋转曲面或数控铣床加工曲线柱面。

②二轴半联动 主要用于三轴以上机床的控制,其中两根轴可以联动,而另外一根轴可以作周期性进给。如图 1-7 所示就是采用这种方式用行切法加工三维空间曲面。

③三轴联动 一般分为两类,一类就是  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴联动,比较多的用于数控铣床、加工中心等,如图 1-8 所示用球头铣刀铣切三维空间曲面。另一类除了同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  其中两个直线坐标外,还同时控制围绕其中某一直线坐标轴旋转的旋转坐标轴。如车削加工中心,它除了纵向( $Z$ 轴)横向( $X$ 轴)两个直线坐标轴联动外,还需同时控制围绕  $Z$ 轴旋转的主轴( $C$ 轴)联动。

④四轴联动 同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴与某一旋转坐标轴联动,图 1-9 所示为同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴与一个工作台回转轴联动的数控机床。

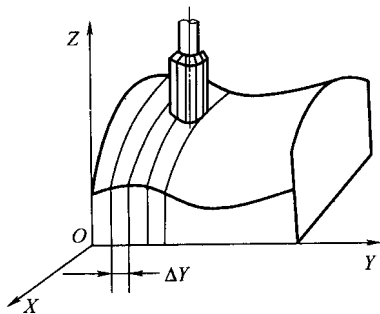


图 1-7 二轴半联动的曲面加工

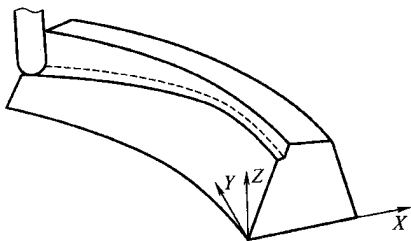


图 1-8 三轴联动的加工曲面

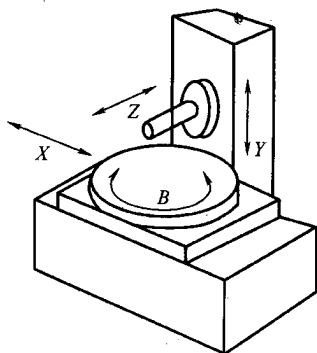


图 1-9 四轴联动的数据控机床

⑤五轴联动 除同时控制  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个直线坐标轴联动外,还同时控制围绕这些直线坐标轴旋转的  $A$ 、 $B$ 、 $C$  坐标轴中的两个坐标轴,形成同时控制五个轴联动。这时刀具可以被定在空间的任意方向,如图 1-10 所示。比如控制刀具同时绕  $X$  轴和  $Y$  轴两个方向摆动,使刀具在其切削点上始终保持与被加工的轮廓曲面成法线方向,以保证被加工曲面的光滑性,提高其加工精度和加工效率,减小被加工表面的粗糙度。

## 二、数控机床的坐标系和运动方向

规定数控机床坐标轴及运动方向,是为了准确地描述机床运动,简化程序的编制,并使所编程序具有互换性。目前国际标准化组织已经统一了标准坐标系,我国机械工业部也颁布了 JB 3051-82《数字控制机床坐标和运动方向的命名》的标准,对数控机床的坐标和运动方向作了明文规定。

### (1) 坐标和运动方向命名的原则

机床在加工零件时是刀具移向工件,还是工件移向刀具,为了根据图样确定机床的加工过程,特规定:永远假定刀具相对于静止的工件坐标而运动。

### (2) 坐标系的规定

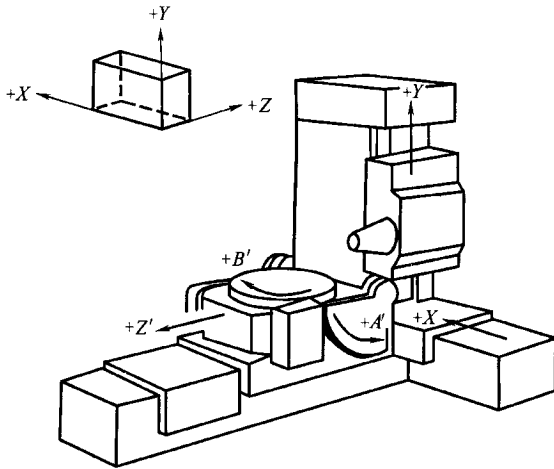


图 1-10 五轴联动的加工中心

为了确定机床的运动方向、移动的距离,要在机床上建立一个坐标系,这个坐标系就是标准坐标系,也叫机床坐标系。在编制程序时,以该坐标系来规定运动的方向和距离。

数控机床上的坐标系是采用右手直角笛卡儿坐标系。在图中,大拇指的方向为  $X$  轴的正方向,食指为  $Y$  轴的正方向,中指为  $Z$  轴正方向,如图 1-11 所示。图 1-12、图 1-13 分别给出了卧式车床和立式铣床的标准坐标系。

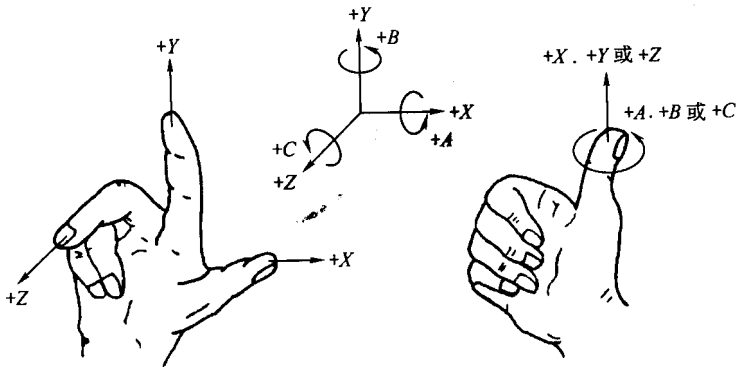


图 1-11 右手笛卡儿坐标系

### (3) 运动方向的确定

①  $Z$  坐标的运动  $Z$  坐标的运动由传递切削力的主轴决定,与主轴轴线平行的坐标轴即为  $Z$  坐标。对于车床、磨床等主轴带动零件旋转;对于铣床、钻床、镗床等主轴带动刀具旋转,与主轴平行的坐标系即为  $Z$  坐标,如图 1-12、图 1-13 所示,如果没有主轴(如牛头刨床), $Z$  轴垂直于工件装卡面。

$Z$  坐标的正方向为增大工件与刀具之间距离的方向。如在钻床加工中,钻入工件的方向为  $Z$  坐标的负方向,退出方向为正方向。



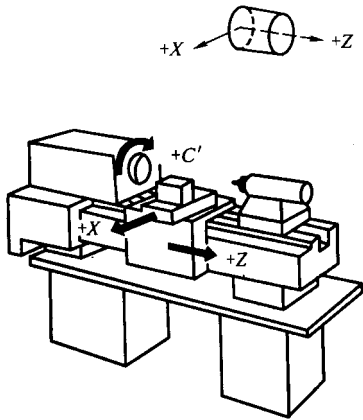


图 1-12 卧式车床坐标系

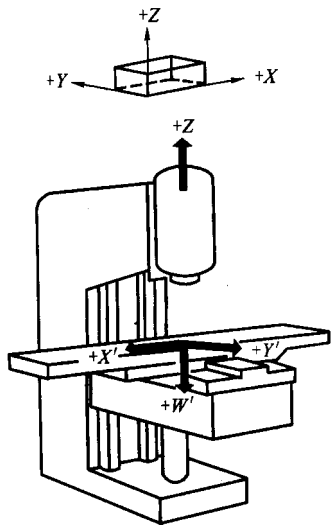


图 1-13 立式升降台铣床坐标系

②  $X$  坐标的运动  $X$  坐标为水平的且平行于工件的装卡面,这是在刀具或工件定位平面内运动的主要坐标。对于工件旋转的机床(如车床、磨床等), $X$  坐标的方向是在工件的径向上,且平行于横滑座。刀具离开工件旋转中心的方向为  $X$  轴正方向,如图 1-12 所示。对于刀具旋转的机床(如铣床、镗床、钻床等), $X$  运动的正方向指向右,如图 1-13 所示。

③  $Y$  坐标的运动  $Y$  坐标轴垂直于  $X$ 、 $Z$  坐标轴, $Y$  运动的正方向根据  $X$  和  $Z$  坐标的正方向,按右手直角坐标系来判断。

④ 旋转运动  $A$ 、 $B$  和  $C$   $A$ 、 $B$  和  $C$  相应地表示其轴线平行于  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  坐标的旋转运动。 $A$ 、 $B$  和  $C$  的正方向,相应地表示在  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  坐标正方向上按照右手螺旋前进的方向。

### 第三节 数控系统与加工功能

数控系统是数控机床的核心。数控机床根据功能和性能要求,配置不同的数控系统。本节介绍几种数控系统生产厂家的典型数控系统。

#### 一、典型数控系统

FANUC(日本)、SIEMENS(德国)、FAGOR(西班牙)、HEIDENHAIN(德国)、MITSUBISHI(日本)等公司的数控系统及相关产品,在数控机床行业占据主导地位,我国数控产品以华

中数控、航天数控为代表,也已将高性能数控系统产业化。

### (1) FANUC 公司的主要数控系统

①高可靠性的 Power Mate 0 系列 用于控制 2 轴的小型车床,取代步进电机的伺服系统,可配画面清晰、操作方便、中文显示的 CRT/MDI,也可配性能/价格比高的 DPL/MDI。

②普及型 CNC 0-D 系列 0-TD 用于车床,0-MD 用于铣床及小型加工中心,0-GCD 用于圆柱磨床,0-GSD 用于平面磨床,0-PD 用于冲床。

③全功能型的 0-C 系列 0-TC 用于通用车床、自动车床,0-MC 用于铣床、钻床、加工中心,0-GCC 用于内、外圆磨床,0-GSC 用于平面磨床,0-TTC 用于双刀架 4 轴车床。

④高性能/价格比的 0i 系列 整体软件功能包,高速、高精度加工,并具有网络功能。0i-MB/MA 用于加工中心和铣床,4 轴 4 联动;0ITB/TA 用于车床,4 轴 2 联动;0imateMA 用于铣床,3 轴 3 联动;0imateTA 用于车床,2 轴 2 联动。

⑤具有网络功能的超小型、超薄型 CNC 16i/18i/21i 系列 控制单元与 LCD 集成为一体,具有网络功能,超高速串行数据通讯。其中 FSI6i-MB 的插补、位置检测和伺服控制以纳米为单位。16i 最大可控 8 轴,6 轴联动;18i 最大可控 6 轴,4 轴联动;21i 最大可控 4 轴,4 轴联动。

除此之外,还有实现机床个性化的 CNC16/18/160/180 系列。

### (2) SIEMENS 公司的主要数控系统

①SINUMERIK 802S/C 用于车床、铣床等,可控 3 个进给轴和 1 个主轴,802S 适于步进电机驱动,802C 适于伺服电机驱动,具有数字 I/O 接口。

②SINUMERIK 802D 控制 4 个数字进给轴和 1 个主轴,PLC I/O 模块,具有图形式循环编程,车削、铣削/钻削工艺循环,FRAME(包括移动、旋转和缩放)等功能,为复杂加工任务提供智能控制。

③SINUMERIK 810D 用于数字闭环驱动控制,最多可控 6 轴(包括 1 个主轴和 1 个辅助主轴),紧凑型可编程输入/输出。

④SINUMERIK 840D 全数字模块化数控设计,用于复杂机床、模块化旋转加工机床和传送机,最大可控 31 个坐标轴。

### (3) FAGOR 公司数控系统

①CNC 8070 是目前 FAGOR 最高档数控系统,代表 FAGOR 顶级水平。是 CNC 技术与 PC 技术的结晶,是与 PC 兼容的数控系统,采用 Pentium CPU,可运行 Windows 和 MS-DOS。可控制 16 轴+3 电子手轮+2 主轴,可运行 VISUALBASIC, VISUALC++, 程序段处理时间小于 1ms,PLC 可达 1024 输入点/1024 输出点,具有以太网、CAN、SER-COS 通讯接口,可选用土 10V 模拟量接口。

②8055 系列数控系统是 FAGOR 高档数控系统,可实现 7 轴 7 联动+主轴+手轮控制。按其处理速度不同分为 8055/A、8055/B、8055/C 三种档次。适用于车床、车削中心、铣床、加工中心及其他数控设备。具有连续数字化仿形、RTCP 补偿、内部逻辑分析仪、

SERCOS 接口、远程诊断等许多高级功能。

③8040/8055—i 标准系列属中高档数控系统,采用中央单元与显示单元合为一体的结构,8040 可控 4 轴 4 联动 + 主轴 + 2 个手轮。8055—i 可实现 7 轴 7 联动 + 主轴 + 2 个手轮,两者用户内存均可达到 1MB 字节且具有 ±10V 模拟量接口及数字化 SERCOS 光缆接口,可配置带 CAN 接口的分布式 PLC。

④8040/8055—i/8055 TCO/MCO 系列是一种开放式的数控系统,可供 OEM 再开发成为专用数控系统,适用于任何机床设备。

⑤8040/8055—i/8055 TC/MC 系列是人机对话式数控系统,其主要特点是无需采用 ISO 代码编程,可将零件图中的数据通过人机交互图形界面直接输入系统,从而实现编程。俗称傻瓜式数控系统

⑥8025/8035 系列,8025 系列是 FAGOR 公司的中档数控系统,适用于铣床、加工中心、车床及其他数控设备。可控 2~5 轴不等,该数控系统是操作面板、显示器、中央单元合一的紧凑结构。8035 是 8040/8055—i/8055 的简化型,采用 32 位 CPU,同时也是 8025 的更新换代产品。

#### (4) 华中数控系统

华中数控以“世纪星”系列数控单元为典型产品,HNC—21T 为车削系统,最大联动轴数为 4 轴;HNC—21/22M 为铣削系统,最大联动轴数为 4 轴,采用开放式体系结构,内置嵌入式工业 PC。

伺服系统的主要产品包括:HSV—11 系列交流伺服驱动装置,HSV—16 系列全数字交流伺服驱动装置,步中电机驱动装置,交流伺服主轴驱动装置与电机,永磁同步交流伺服电机等。

#### (5) 北京航天数控系统

主要产品为 CASNUC 2100 数控系统,是以 PC 机为硬件基础的模块化、开放式的数控系统,可用于车床、铣床、加工中心等 8 轴以下机械设备的控制,具有 2 轴、3 轴、4 轴联动功能。

## 二、数控系统的主要功能

CNC 装置能控制的轴数以及能同时控制(即联动)轴数是主要性能之一。一般数控车床只需 2 轴控制 2 轴联动;一般铣床需要 2 轴半或 3 轴控制、3 轴联动;一般加工中心为多轴控制,3 轴或 3 轴以上联动。控制轴数越多,特别是同时控制轴数越多,CNC 装置的功能越强,编制程序也越复杂。

#### (1) 准备功能

准备功能是使数控机床作好某种操作准备的指令,用地址 G 和数字表示,ISO 标准中规定准备功能有 G00 至 G99 共 100 种。目前,有的数控系统也用到 00~99 之外的数字。

G 代码分为模态代码(又称续效代码)和非模态代码。代码表中按代码的功能进行了

分组 标有相同字母(或数字)的为一组,其中 00 组(或没标字母)的 G 代码为非模态代码,其余为模态代码。非模态代码只在本程序段有效,模态代码可在连续多个程序段中有效,直到被相同组别的代码取代。

准备功能包括数控轴的基本移动、程序暂停、平面选择、坐标设定、刀具补偿、基准点返回、固定循环、公英制转换等。

### (2) 刀具功能

刀具功能字 T。由地址功能码 T 和数字组成。刀具功能的数字是指定的刀号,数字的位数由所用的系统决定。图 1-14 所示为刀具功能示例。

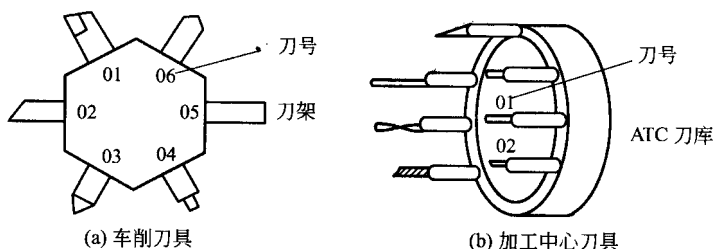


图 1-14 刀具功能示例

### (3) 主轴速度功能

主轴转速功能字 S,由地址码 S 和数字组成。主轴转速功能的示例如图 1-15 所示。

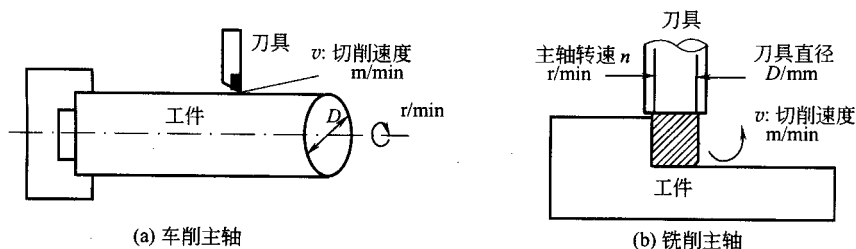


图 1-15 主轴转速功能示例

### (4) 进给功能

进给功能字 F 表示刀具中心运动时的进给速度,进给功能用 F 代码直接指令各轴的进给速度。由地址码 F 和数字构成。进给功能的示例如图 1-16 所示。

快速进给速度一般为进给速度的最高速度,它通过参数设定,用 G00 指令执行快速。数控机床操作面板上设置了中给倍率开关,倍率可在 0~200% 之间变化,每挡间隔 10%。使用倍率开关不用修改程序就可以改变进给速度。

### (5) 辅助功能(M 代码)

辅助功能也叫 M 功能或 M 代码,它是控制机床或系统的开关功能的一种命令。由地址码 M 和数字组成,从 M00-M99 共 100 种。各种型号的数控装置具有辅助功能的多少差别很大,而且有许多是自定义的,必须根据说明书的规定进行编程。常用的辅助功能有

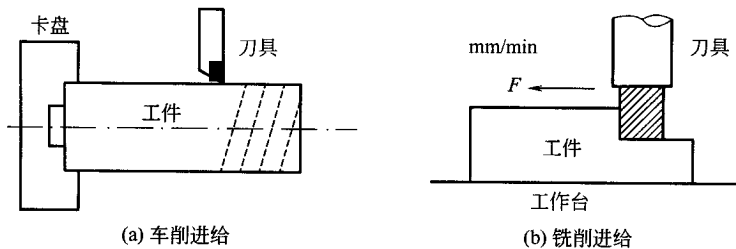


图 1-16 进给功能示例

程序停、主轴正/反转、冷却液接通和断开、换刀等。辅助功能的典型示例如图 1-17

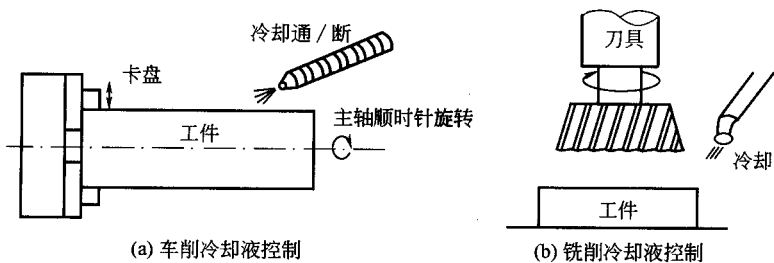
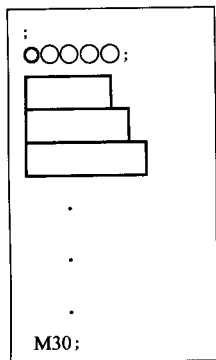


图 1-17 辅助功能示例

## 第四节 数控加工程序的结构与格式

### 一、程序的结构

#### (1) 加工程序的结构



程序号  
 程序段  
 程序段  
 程序段  
 程序段  
 ·  
 ·  
 ·  
 程序结束

数控加工中,为使机床运行而送到 CNC 的一组指令称为程序。每一个程序都是由程序号、程序内容和程序结束三部分组成,如图 1-18 所示。程序的内容则由若干程序段组成,程序段是由若干字组成,每个字又由字母和数字组成,如图 1-19 所示。即字母和数字组成字,字组成程序段,程序段组成程序。

数控加工中零件加工程序的组成形式,随数控系统功能的强弱而略有不同。对功能较强的数控系统加工程序可分为主程序和子程序,其结构如图 1-20 所示。

#### (2) 加工程序的组成

①程序号 程序号为程序的开始部分,为了区别存储器

图 1-18 程序构成

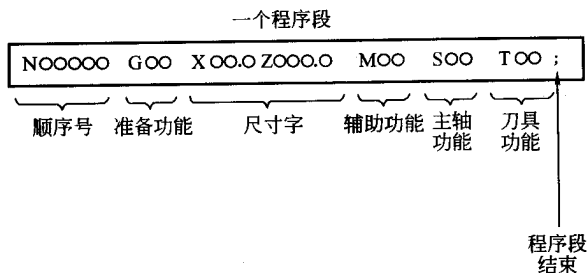


图 1-19 程序段构成

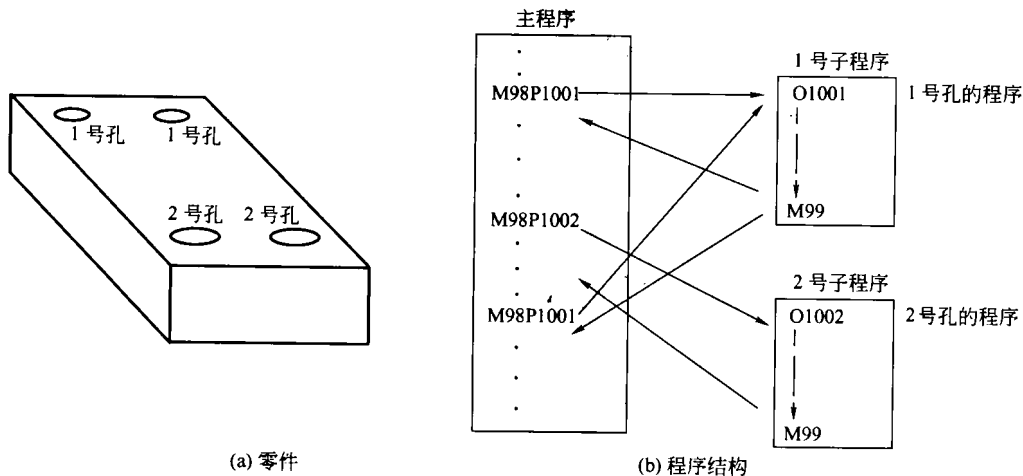


图 1-20 主程序和子程序

中的程序,每个程序都要有程序编号,在编号前采用程序编号地址码。如在 FANUC 系统中,采用英文字母“O”作为程序编号地址,而其他系统有的采用“P”、“%”以及“:”等。

②程序内容 程序内容是整个程序的核心,由许多程序段组成,每个程序段由一个或多个指令组成,表示数控机床要完成的全部动作。

③程序结束 以程序结束指令 M02 或 M30 作为整个程序结束的符号,来结束整个程序。

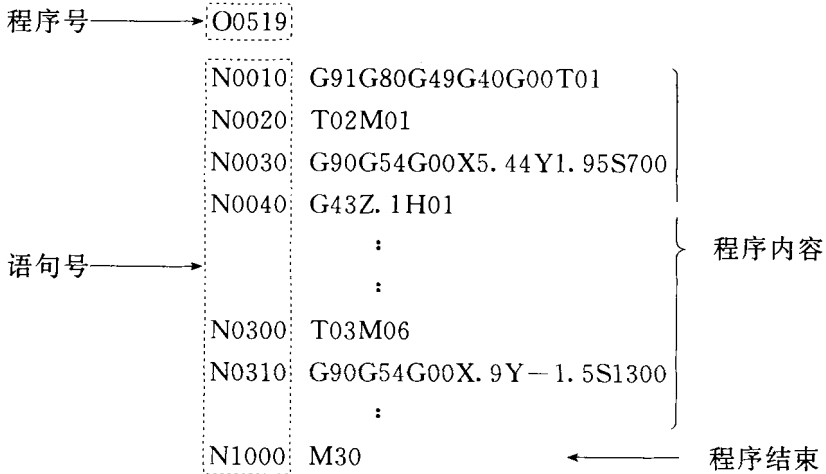
【例 1-1】 下面给出了一个典型数控加工程序的组成实例。

## 二、程序段格式

### (1) 程序段格式的种类

零件的加工程序是由程序段组成。程序段格式是指一个程序段中字、字符、数据的书写规则,通常有以下 3 种格式。

①字—地址程序段格式 字—地址程序段格式由语句号字、数据字和程序段结束组



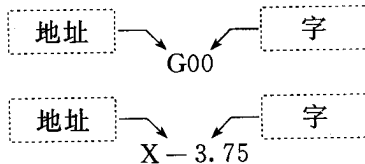
成。各字后有地址,字的排列顺序要求不严格,数据的位数可多可少,不需要的字以及与上一程序段相同的续效字可以不写。该格式的优点是程序简短、直观以及容易检查和修改。因此,该格式目前广泛使用。

②分隔符的程序段格式 这种格式事先规定了输入时可能出现的字的顺序,在每一个字前写一个分隔符,这样就可以不写地址符,只要按规定的顺序把相应的数字跟在分隔符后面就可以了。

使用分隔符的程序段与字—地址程序段的区别在于分隔符代替了地址符。在这种格式中,重复的可以不写,但分隔符不能省略。若程序中出现连在一起的分隔符,表明中间略去了一个数据字。

③固定程序段格式 这种程序段既无地址码也无分隔符,各字的顺序及位数是固定的。重复的字不能省略,所以每一个程序段的长度都是一样的。目前,这种程序段的格式很少使用。

【例 1-2】 确定代码 G00 和 X—3.75 中的地址和字。



【例 1-3】 下面的程序为线切割机床 3B 格式的加工程序,属典型的使用分隔符的程序段格式,其中每个程序段中的 3 个 B 均为分隔符。

B0 B2000B2000 GYL2; (加工直线)

B3000 B0B6000GYNR4; (加工圆弧)

BBB2000 GXLL; (加工直线)

.....

MJ (程序结束)

### (2) 字—地址程序段的编排规则

字—地址程序段格式的编排顺序如下。

N—G—X—Y—Z—I—J—K—P—Q—R—A—B—C—F—S—T—M—LF

注意：上述程序段中包括的各种指令并非在加工程序的每个程序段中都必须有，而是根据各程序段的具体功能来编入相应的指令。

例如：N20 G01 X35.2 Y—46.8 F120。

### (3) 程序段内各字的说明

字—地址程序段由语句号字、数据字和程序段结束组成，常用于表示地址的英文字母的含义见表 1-1，主要地址和指令值范围见表 1-2。

表 1-1 地址码中英文字母的含义

功 能	地 址	意 义
程序号	O	程序号
顺序号	N	顺序号
准备功能	G	指定移动方式(直线、圆弧等等)
尺寸字	X,Y,Z,U,V,W,A,B,C	坐标轴移动指令
	I,J,K	圆弧中心的坐标
	R	圆弧半径
进给功能	F	每分钟进给速度,每转进给速度
主轴速度功能	S	主轴速度
刀具功能	T	刀号
辅助功能	M	机床上的开/关控制
	B	工作台分度等等
偏置号	D,H	偏置号
暂停	P,X	暂停时间
程序号指定	P	子程序号
重复次数	P	子程序重复次数
参数	P,Q	固定循环参数



表 1-2 主要地址和指令值范围

功 能		地 址	公制输入	英制输入
程序号		O	1 ~ 9999	1 ~ 9999
顺序号		W	1 ~ 99999	1 ~ 99999
准备功能		G	0 ~ 99	0 ~ 99
尺寸字	增量单位 IS - B	X, Y, Z, U, V, W, C, J, K, R	± 99999.999mm	± 9999.9999in
	增量单位 IS - C		± 9999.9999mm	± 999.99999in
每分进给	增量单位 IS - B	F	1 ~ 24000mm/min	0.01 ~ 9600.00in/min
	增量单位 IS - C		1 ~ 10000mm/min	0.001 ~ 4000.00in/min
每转进给		F	0.001 ~ 500.00mm/r	0.0001 ~ 9.9999in/r
主轴速度功能		S	0 ~ 20000	0 ~ 20000
刀具功能		T	0 ~ 999999999	0 ~ 999999999
辅助功能		M	0 ~ 999999999	0 ~ 999999999
		B	0 ~ 999999999	0 ~ 999999999
偏置号		H, D	0 ~ 400	0 ~ 400
暂停	增量单位 IS - B	X, P	0 ~ 99999.999s	0 ~ 99999.999s
	增量单位 IS - C		0 ~ 9999.9999s	0 ~ 9999.9999s
程序号指定		P	1 ~ 9999	1 ~ 9999
子程序重复次数		P	1 ~ 999	1 ~ 999

①语句号字 用以识别程序段的编号,由地址码 N 和后面的若干位数字组成。例如 :N20 表示该语句的句号为 20。

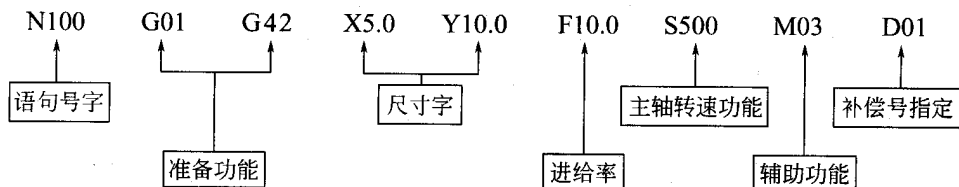
②功能字 功能字主要包括:准备功能字(G 功能字)、进给功能字(F 功能字)、主轴转速功能字(S 功能字)、刀具功能字(T 功能字)和辅助功能字(M 功能字),各功能字均由相应的地址码和后面的数字组成。

③尺寸字 尺寸字由地址码、+、- 符号及绝对(或增量)数值构成。尺寸字的地址码有 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、A、B、C、I、J、K、D、H 等,例如 X22.5 Y-55.0。尺寸字的“+”可

省略。

④程序段结束 写在每一程序段之后,表示程序结束。当用“EIA”标准代码时,结束符为“CR”;用“ISO”标准代码时为“NL”或“LF”,有的用符号“:”或“\*”表示;有的直接回车即可。

【例 1-4】 解释下列程序段中地址的含义。



## 第五节 数控系统的常用代码

为了满足设计、制造、使用和维修的需要,在输入代码、坐标系统、加工指令、辅助功能及程序段格式方面,国际上已形成了两种通用的标准,即国际标准化组织(ISO)标准和美国电子工业学会(EIA)标准。我国原机械工业部根据 ISO 标准制定了 JB 3050—82《数字控制机床用七单位编码字符》、JB 3051—82《数字控制机床和运动方向的命名》、JB3208—83《数字控制机床穿孔纸带程序段格式中的准备功能 G 和辅助功能 M 代码》。但是由于各个数控机床所选用的数控系统不一致,各数控系统所定义的代码、指令及其含义也不相同。

表 1-3、表 1-4 分别给出了 FANUC Oi 系列用于数控车床的 Oi-TA 和数控铣床(或加工中心)的 OIMA 两种典型数控系统的 G 代码。大家从现在开始就要建立这样一个概念,对于同一 G 代码而言,不同的数控系统所代表的含义不完全一样;对于同一功能,不同的数控系统采用的代码也有差异。因此,在编程时应根据所使用的数控系统,进行灵活运用,即应按所使用机床数控系统的代码编程规则进行编程。

表 1-3 FANUC Oi-TA 的 G 代码(用于数控车床)

G 代码	组	功 能
G00	01	定位
G01		直线插补
G02		圆弧插补/螺旋线插补 CW
G03		圆弧插补/螺旋线插补 CCW

G 代码	组	功 能	
G04	00	暂停 ,准确停止	
G05.1		预读控制(超前读多个程序段)	
G07.(G107)		圆柱插补	
G08		预读控制	
G09		准确停止	
G10		可编程数据输入	
G11		可编程数据输入方式取消	
G15		17	极坐标指令消除
G16	极坐标指令		
G17	02	选择 $X_p Y_p$ 平面	$X_p$ :X 轴或其平行轴
G18		选择 $Z_p X_v$ 平面	$Y_p$ :Y 轴或其平行轴
G19		选择 $Y_p Z_p$ 平面	$Z_p$ :Z 轴或其平行轴
G20	06	英寸输入	
G21		毫米输入	
G22	04	存储行程检测功能接通	
G23		存储行程检测功能断开	
G27	00	返回参考点检测	
G28		返回参考点	
G29		从参考点返回	
G30		返回第 2 3 4 参考点	
G31		跳转功能	
G33		01	螺纹切削
G37	00	自动刀具长度测量	
G39		拐角偏置圆弧插补	
G40	07	刀具半径补偿取消	
G41		刀具半径补偿 ,左侧	
G42		刀具半径补偿 ,右侧	
G40.(G150)	18	法线方向控制取消方式	
G41.(G151)		法线方向控制左侧接通	
G42.(G152)		法线方向控制右侧接通	

G 代码	组	功 能
G43	08	正向刀具长度补偿
G44		负向刀具长度补偿
G45	00	刀具位置偏置加
G46		刀具位置偏置减
G47		刀具位置偏置加 2 倍
G48		刀具位置偏置减 2 倍
G49	08	刀具长度补偿取消
G50	11	比例缩放取消
G51		比例缩放有效
G50.1	22	可编程镜像取消
G51.1		可编程镜像有效
G52	00	局部坐标系设定
G53		选择机床坐标系
G54	14	选择工件坐标系 1
G54.1		选择附加工件坐标系
G55		选择工件坐标系 2
G56		选择工件坐标系 3
G57		选择工件坐标系 4
G58		选择工件坐标系 5
G59		选择工件坐标系 6
G60		00/01
G61	15	准确停止方式
G62		自动拐角倍率
G63		攻丝方式
G64		切削方式
G65	00	宏程序调用
G66	12	宏程序模态调用
G67		宏程序模态调用取消
G68	16	坐标旋转有效
G69		坐标旋转取消

G 代码	组	功 能
G73	09	深孔钻循环
G74		左旋攻丝循环
G76	09	精镗循环
G80	09	固定循环取消/外部操作功能取消
G81		钻孔循环, 铰镗循环或外部操作功能
G82		钻孔循环或反镗循环
G83		深孔钻循环
G84		攻丝循环
G85		镗孔循环
G86		镗孔循环
G87		09
G88	镗孔循环	
G89	镗孔循环	
G90	03	绝对值编程
G91		增量值编程
G92	00	设定工作坐标系或最大主轴速度箝制
G92.1		工件坐标系预置
G94	05	每分进给
G95		每转进给
G96	13	恒周速控制(切削速度)
G97		恒周速控制取消(切削速度)
G98	10	固定循环返回到初始点
G99		固定循环返回到 R 点

表 1-4 FANUC Oi-MA 的 G 代码(用于数据控铁床或加工中心床)

G 代码			组	功能
A	B	C		
G00	G00	G00	01	定位(快速)
G01	G01	G01		直线插补(切削进给)
G02	G02	G02		顺时针圆弧插补
G03	G03	G03		逆时针圆弧插补
G04	G04	G04	00	暂停
G07.1	G07.1	G07.1		圆柱插补
(G107)	(G107)	(G107)		可编程数据输入
G10	G10	G10		可编程数据输入方式取消
G11	G11	G11		
G12.1	G12.1	G12.1	21	极坐标插补方式
(G112)	(G112)	(G112)		极坐标插补方式取消
G13.1	G13.1	G13.1	16	
(G113)	(G113)	(G113)		X <sub>P</sub> Y <sub>P</sub> 平面选择
G17	G17	G17		Z <sub>P</sub> X <sub>P</sub> 平面选择
G18	G18	G18	06	Y <sub>P</sub> Z <sub>P</sub> 平面选择
G19	G19	G19		英寸输入
G20	G20	G70	09	毫米输入
G21	G21	G71		存储行程检查接通
G22	G22	G22	08	存储行程检查断开
G23	G23	G23		主轴速度波动检测断开
G25	G25	G25	00	主轴速度波动检测断开
G23	G23	G23		返回参考点检查
G27	G27	G27	01	返回参考位置
G28	G28	G28		返回第 2、第 3 和第 4 参考点
G30	G30	G30		跳转功能
G31	G31	G31		
G32	G33	G33	01	螺纹切削
G34	G34	G34		变螺距螺纹切削

G 代码			组	功能
A	B	C		
G36	G36	G36	00	自动刀具补偿 X
G37	G37	G37		自动刀具补偿 Z
G40	G40	G40	07	刀尖半径补偿取消
G41	G41	G41		刀尖半径补偿左
G42	G42	G42		刀尖半径补偿右
G50	G92	G92	00	坐标系设定或最大主轴速度设定
( G50.3 )	( G92.1 )	( G92.1 )		工件坐标系预置
G50.2	G50.2	G50.2	20	多边形车削取消
( G250 )	( G250 )	( G250 )		多边形车削
G51.2	G51.2	G51.2	00	局部坐标系设定
( G251 )	( G251 )	( G251 )		机床坐标系设定
G52	G52	G52	14	选择工件坐标系 1
G53	G53	G53		选择工件坐标系 2
G54	G54	G54		选择工件坐标系 3
G55	G55	G55		选择工件坐标系 4
G56	G56	G56		选择工件坐标系 5
G57	G57	G57		选择工件坐标系 6
G58	G58	G58		
G59	G59	G59	00	宏程序调用
G65	G65	G65	12	宏程序模态调用
G66	G66	G66		宏程序模态调用取消
G67	G67	G67	00	精加工循环
G70	G70	G72		粗车外圆
G71	G71	G73		粗车端面
G72	G72	G74		多重车削循环
G73	G73	G75		排屑钻端面孔
G74	G74	G76		外径/内径钻孔
G75	G75	G77		多头螺纹循环
G76	G76	G78		

G 代码			组	功能
A	B	C		
G80	G80	G80	10	固定钻循环取消
G83	G83	G83		钻孔循环
G84	G84	G84		攻丝循环
G85	G85	G85		正面镗循环
G87	G87	G87		侧钻循环
G88	G88	G88		侧攻丝循环
G89	G89	G89		侧镗循环
G90	G77	G20	01	外径/内径车削循环
G92	G78	G21		螺纹切削循环
G94	G79	G24		端面车削循环
G96	G96	G96	02	恒表面切削速度控制
G97	G97	G97		恒表面切削速度控制取消
G98	G94	G94	05	每分进给
G99	G95	G95		每转进给
-	G90	G90	03	绝对值编程
-	G90	G90		增量值编程
-	G98	G98	11	返回到起始平面
-	G99	G99		返回到 R 平面



## 第二章 数控编程中的工艺分析

### 第一节 概述

无论是手工编程还是自动编程,编程前都要对所加工的零件进行工艺分析,拟定加工方案,选择合适的刀具,确定切削用量。在编程时,对一些工艺问题(如加工路线、对刀点、换刀点等)也需作一些处理。因此程序编制中的工艺分析是一项十分重要的工作。

#### 一、数控加工工艺的基本特征

工艺规程是操作者在加工时的指导性文件。在普通机床上加工零件时,工艺规程实际上只是工艺过程卡,机床的切削用量、走刀路线、工序的工步等往往是由操作者自行选定。在数控机床上加工零件时要把被加工的全部工艺过程、工艺参数和位移数据编制成程序,加工程序就是数控机床的指令性文件。因此,数控加工程序与普通机床工艺规程有很大差别,涉及的内容也较广。数控机床加工程序不仅要包括零件的工艺过程,而且还包括切削用量、刀具参数以及机床的运动过程。因此,要求编程人员对数控机床的性能、特点、运动方式、刀具系统、切削规范以及工件的装夹方法都要非常熟悉。同时,数控加具有工序内容复杂、工步的安排更为详尽等特点。工艺方案的好坏不仅会影响机床效率的发挥,而且将直接影响到零件的加工质量。

#### 二、数控加工工艺分析

数控加工工艺分析主要包括以下内容。

- ①选择适合在数控机床上加工的零件,确定工序内容。
- ②分析被加工零件的图纸,明确加工内容及技术要求。在此基础上,确定零件的加工方案,制定数控加工工艺路线。如划分工序、安排加工顺序、与传统加工工序的衔接等。
- ③加工工序的设计,如选取零件的定位基准,工步的划分、装卡与定位方案确定、选取刀辅具、确定切削用量等。
- ④数控加工程序的调整。选取对刀点和换刀点,确定刀具补偿等。

⑤分配数控加工中的容差。

⑥处理数控机床上的部分工艺指令。

总之,数控加工工艺内容繁多,但有些内容与普通机床加工工艺非常相似,因此本章仅对编程中的工艺分析进行讨论,关于编程中工艺指令的处理将在相关章节讨论。

## 第二节 数控加工的工艺分析与工艺设计

编程人员在进行工艺分析时,应根据被加工工件的材料、轮廓形状、加工精度等条件,依据机床使用说明书、编程手册、切削用量表、标准工具及夹具手册等资料,选用合适的机床,制定加工方案,确定零件的加工顺序、各工序所用刀具、夹具和切削用量等工作。

### 一、数控机床的合理选用

#### (1) 数控机床的应用范围

不同类型的数控机床有着不同的用途,在选用数控机床之前应对其类型、规格、性能、特点、用途和应用范围有所了解,才能选择最适合加工零件的数控机床。根据数控加工的特点和国内外大量应用实践,数控机床通常最适合加工具有以下特点的零件。

- ①多品种、小批量生产的零件或新产品试制中的零件。
- ②形状复杂,加工精度要求高,通用机床无法加工或很难保证加工质量的零件。
- ③在普通机床加工时,需要昂贵的工装设备(刀具、夹具和模具)的零件。
- ④具有难测量、难控制进给、难控制尺寸型腔的壳体或盒型零件。
- ⑤必须在一次装夹中完成铣、镗、铩、铰或攻丝等多工序的零件。
- ⑥价格昂贵,加工中不允许报废的关键零件。
- ⑦需要最短生产周期的急需零件。

从数控机床的类型方面考虑,数控车床适用于加工具有回转特征的轴类和盘类零件。数控镗铣床、立式加工中心适用于加工箱体类零件、板类零件、具有平面复杂轮廓的零件。卧式加工中心较立式加工中心用途要广一些,适宜复杂箱体、泵体、阀体类零件的加工,如图2-1所示。多轴联动的数控机床、加工中心可以用来加工复杂的曲面、叶轮螺旋桨以及模具,如图2-2所示。

#### (2) 把握好技术经济尺度,选择数控机床

在数控机床上加工零件时,通常有两种情况。一是有被加工零件要选择合适的加工设备,二是有数控机床选择适合的加工零件。无论哪种情况,通常都要根据被加工零件的精度、材质、形状、尺寸、数量和热处理等因素来选择。是选用普通机床加工,还是数控机床加工,或者选用专用机床来加工,究竟如何选择,概括起来要考虑3个方面因素。

- ①要保证被加工零件的技术要求,加工出合格的产品;

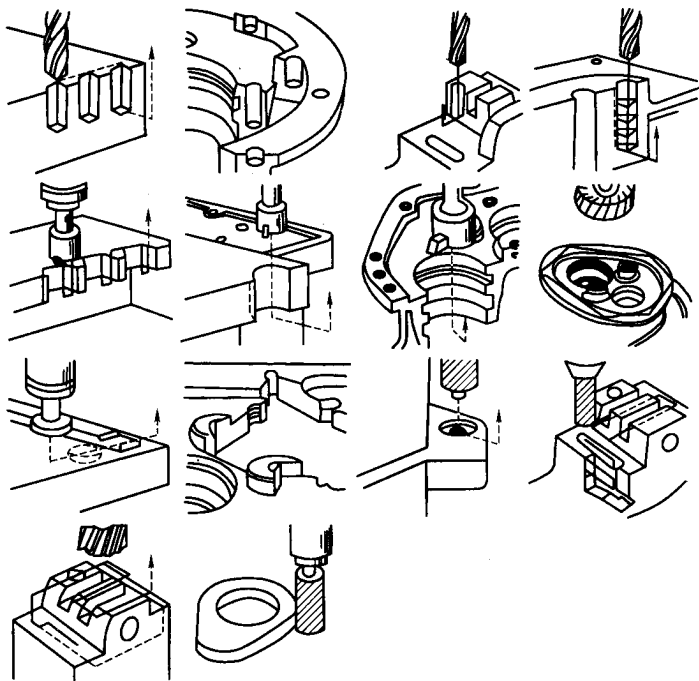


图 2-1 在加工中心上完成的工序

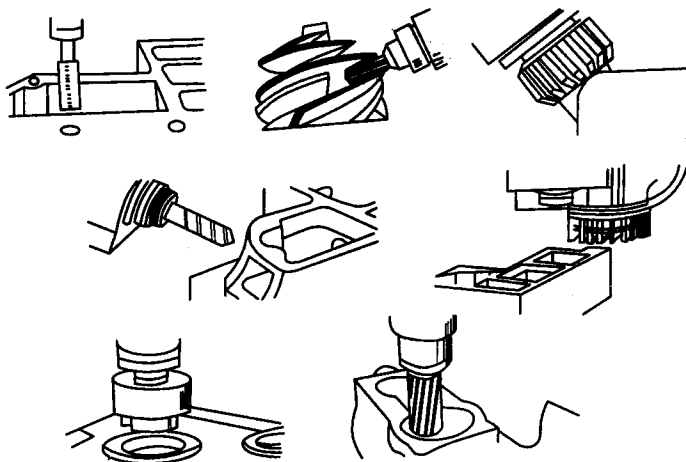


图 2-2 在多轴联动加工中心上完成的工序

- ②有利于提高生产率；
- ③尽可能降低生产成本(加工费用)。

图 2-3 所示为数控机床加工范围的定性分析。当零件不太复杂、生产批量不大时，宜采用普通机床，随着零件复杂程度的提高，数控机床就显得更为适用了。同时，在多品

种、小批量(100件以下)生产时,使用数控机床可获得较好的经济效益,零件批量的增大,对所选用的数控机床是不利的。

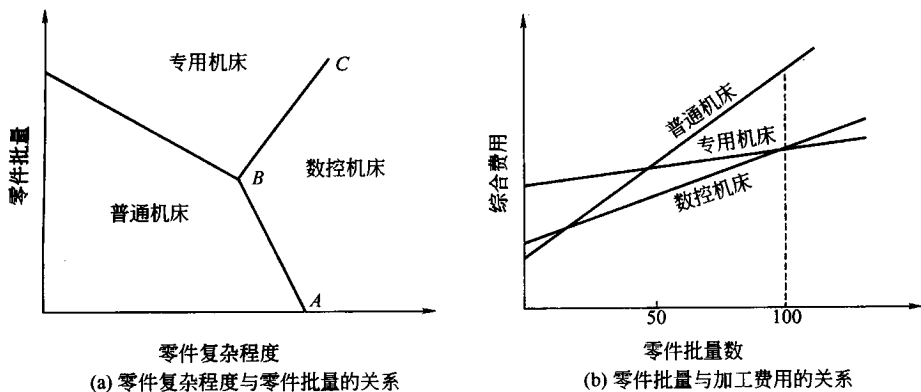


图 2-3 数控机床加工范围的定性分析

## 二、数控加工零件的工艺性分析

采用数控机床加工,必须根据数控机床的性能特点、应用范围,对零件的数控加工工艺进行全面、认真、仔细的分析。就数控编程而言,主要从数控加工的可能性和方便性两方面加以分析。

### (1) 零件图样上尺寸数据的给出应便于编程

① 零件图上尺寸标注方法应适应数控加工的特点 在数控加工零件图上,应以同一基准引注尺寸或直接给出坐标尺寸。这种标注方法既便于编程,也便于尺寸之间的相互协调,在保持设计基准、工艺基准、检测基准与编程原点设置的一致性方面带来很大方便。由于设计人员一般在尺寸标注中较多地考虑装配方面的使用特性,而不得不采用局部分散的标注方法,这样就会给工序安排与数控加工带来许多不便。数控加工的精度和重复定位精度都很高,不会因产生较大的累计误差而破坏使用特性,可将局部的分散标注改为同一基准的引注尺寸或直接给出坐标尺寸的标注方法。如图 2-4 所示。

② 构成零件图的几何要素的条件应充分 构成零件轮廓的几何元素(点、线、面)的条件(如相切、相交、垂直和平行等)是数控编程的重要依据。手工编程时,要依据这些条件计算基点或节点坐标;自动编程时,则要根据这些条件才能对构成零件的所有几何元素进行定义,无论哪一条件不明确,编程都无法进行。因此,在分析零件图样时,务必要分析几何元素的给定条件是否充分,发现问题及时与设计人员协商解决。

③ 认真分析零件的技术要求 零件的技术要求主要是指尺寸精度、形状精度、位置精度、表面粗糙度及热处理等。这些要求在保证零件使用性能的前提下,应经济合理。过高的精度和表面粗糙度要求会使工艺过程复杂、加工困难、成本提高。

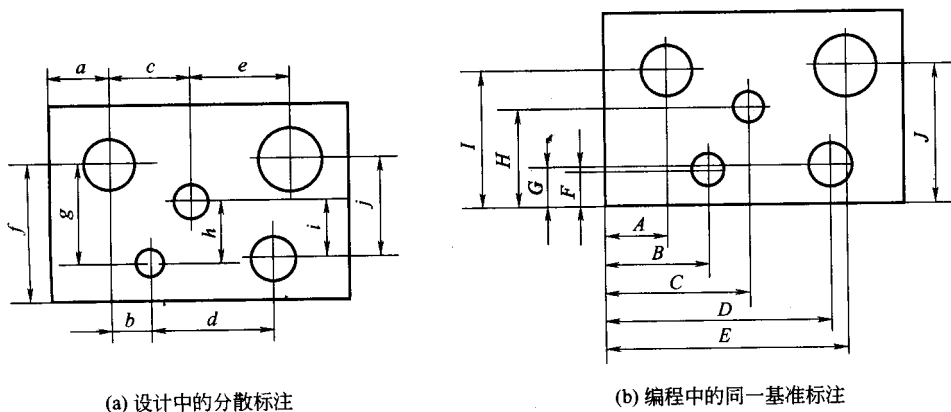


图 2-4 零件尺寸标注

④零件材料分析 在满足零件功能的前提下,应选用廉价、切削性能好的材料。而且,材料选择应立足国内,不要轻易选用贵重或紧缺的材料。

## (2) 零件的结构工艺性应符合数控加工的要求

零件的结构工艺性是指所设计的零件在满足使用要求的前提下制造的可行性和经济性。良好的结构工艺性,可以使零件加工容易,节省工时和材料。而较差的零件结构工艺性,会使加工困难,浪费工时和材料,有时甚至无法加工。因此,零件各加工部位的结构工艺性应符合数控加工的特点。

①零件的内腔和外形最好采用统一的几何类型和尺寸,这样可以减少刀具规格和换刀次数,使编程方便,提高生产效率。

②内槽圆角的大小决定着刀具直径的大小,所以内槽圆角半径不应太小。对于图 2-5 所示零件,其结构工艺性的好坏与被加工轮廓的高低、转角圆弧半径的大小等因素有关。图(b)与图(a)相比,转角圆弧半径大,可以采用较大直径的立铣刀来加工;加工平面时,进给次数也相应减少,表面加工质量也会好一些,因而工艺性较好。通常  $R < 0.2H$  时,可以判定零件该部位的工艺性不好。

③零件铣槽底平面时,槽底圆角半径  $r$  不要过大。如图 2-6 所示,铣刀端面刃与铣削平面的最大接触直径  $d = D - 2r$  ( $D$  为铣刀直径),当  $D$  一定时, $r$  越大,铣刀端面刃铣削平面的面积越小,加工平面的能力就越差,效率越低,工艺性也越差。当  $r$  大到一定程度时,甚至必须用球头铣刀加工,这是应该尽量避免的。

④应采用统一的基准定位,在数控加工中若没有统一的定位基准,则会因工件的二次装夹而造成加工后两个面上的轮廓位置及尺寸不协调现象。另外,零件上最好有合适的孔作为定位基准孔。若没有,则应设置工艺孔作为定位基准孔。若无法制出工艺孔,最起码也要用精加工表面作为统一基准,以减少二次装夹产生的误差。

此外,还应分析零件所要求的加工精度、尺寸公差等是否可以得到保证,有没有引起矛盾的多余尺寸或影响加工安排的封闭尺寸等。

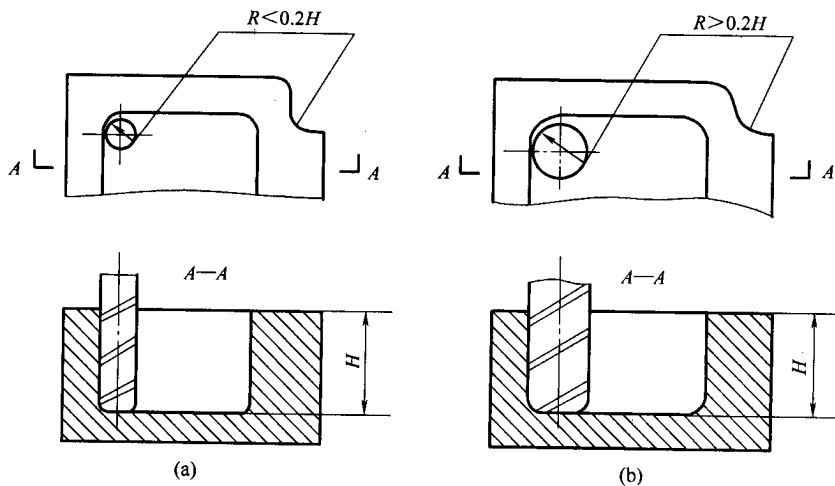


图 2-5 内槽结构工艺性对比

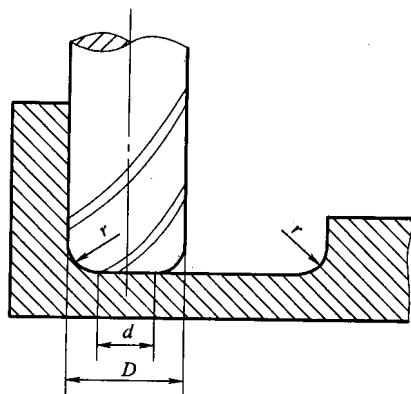


图 2-6 零件槽底平面圆弧对加工工艺的影响

### 三、加工方法的选择与加工方案的确定

#### (1) 加工方法的选择

加工方法的选择应以满足加工精度和表面粗糙度的要求为原则。由于获得同一级加工精度及表面粗糙度的加工方法一般有许多,在实际选择时,要结合零件的形状、尺寸和热处理要求等全面考虑。

例如,加工 IT7 级精度的孔,采用镗削、铰削、磨削等加工方法均可达到精度要求,如果加工箱体类零件的孔,一般采用镗削或铰削,而不宜采用磨削加工。一般小尺寸箱体孔选择铰孔,当孔径较大时则应选择镗孔。此外还应考虑生产率和经济性的要求,以及生产设备的实际情况。

表 2-1 为孔加工精度与加工方法之间的相互关系,图 2-7 所示为外圆加工的加工方法与加工精度的关系,图 2-8 所示为平面加工方法的加工精度等级。详细内容可查阅有关工艺手册。

表 2-1 孔加工精度与加工方法(孔长度不大于直径 5 倍)

孔的精度	孔 的 毛 坯 性 质	
	在实体材料上加工孔	预先铸出或热冲出的孔
H13、H12	一次钻孔	用扩孔钻钻孔或镗刀镗孔
H11	孔径不大于 10 :一次钻孔 孔径大于 10 ~ 30 :钻孔及扩孔 孔径大于 30 ~ 80 :钻孔、扩孔或钻、扩、镗孔	孔径不大于 80 :粗扩、精扩 或用镗刀粗镗、精镗 或根据余量一次镗孔或扩孔
H10 H9	孔径不大于 10 :钻孔及铰孔 孔径大于 10 ~ 30 :钻孔、扩孔及铰孔 孔径大于 30 ~ 80 :钻孔、扩孔、铰孔或钻、镗、铰(或镗)	孔径不大于 80 用镗刀粗镗(一次或二次,根据余量而定) 铰孔(或精镗)
H8 H7	孔径不大于 10 :钻孔、扩孔、铰孔 孔径大于 10 ~ 30 :钻孔、扩孔及一次或两次铰孔 孔径大于 30 ~ 80 :钻孔、扩孔(或用镗刀分几次粗镗) 一次或二次铰孔(或粗镗)	孔径不大于 80 用镗刀粗镗(一次或二次,根据余量而定) 及半精镗、精镗或精铰

## (2) 加工方案的确定原则

零件上比较精密的尺寸及表面的加工,常常是通过粗加工、半精加工和精加工逐步达到的。对这些加工部位仅仅根据质量要求选择相应的加工方法是不够的,还应正确地确定从毛坯到最终成型的加工方案。

确定加工方案时,首先应根据主要表面的精度和表面粗糙度的要求,初步确定为达到这些要求所需要的加工方法。例如,对于孔径不大的 IT7 级精度的孔,最终的加工方法选择精铰孔时,则精铰孔前通常要经过钻孔、扩孔和粗铰孔等加工。

## (3) 平面类零件斜面轮廓加工方案的选择

在加工过程中,工件按表面轮廓可分为平面类零件和曲面类零件。其中平面类零件中的斜面轮廓,有固定斜角的外形轮廓和变斜角的外形轮廓两种,如图 2-9 所示。

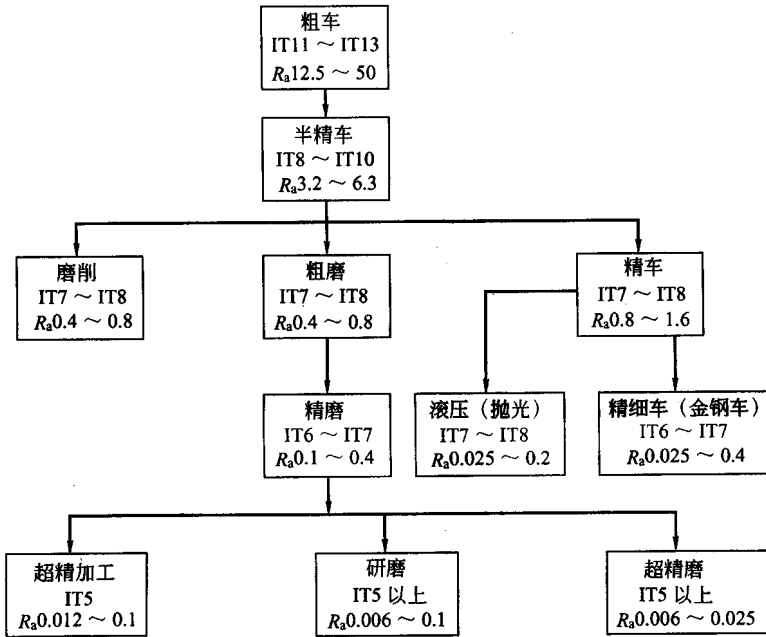


图 2-7 外圆加工方法与加工精度

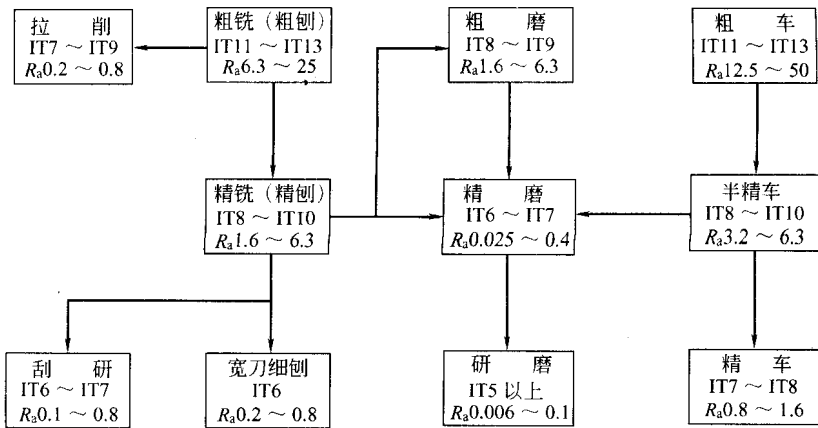


图 2-8 常见平面加工方案

一个有固定斜角的斜面可以采用不同的刀具进行加工。在实际加工中,应根据零件的尺寸精度、倾斜角的大小、刀具的形状、零件的安装定位方法、编程的难易程度等因素,选择一个较好的加工方案。

具有变斜角的外形轮廓,若单纯从技术上考虑,最好的加工方案是采用多坐标联动的数控机床,这样不但生产效率高,而且加工质量也好。但是这种机床设备投资大,生产费用高,一般中小企业几乎无力购买,因此应考虑其他可能的加工方案。例如可在两轴半坐



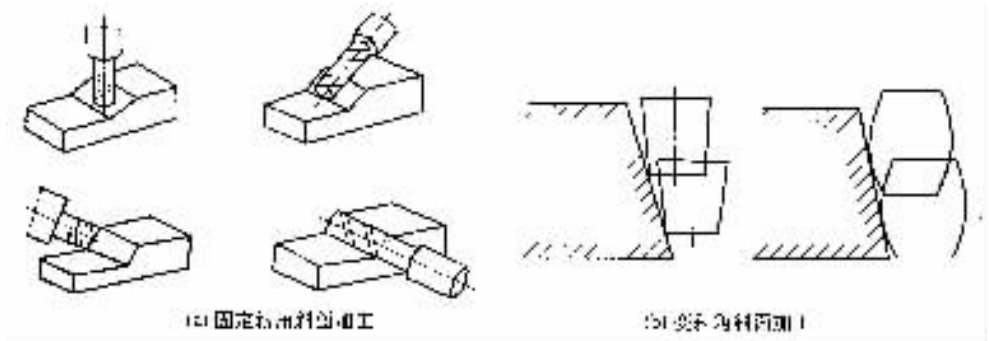


图 2-9 斜面轮廓加工

标控制的数控铣床上用锥形铣刀或鼓形铣刀,采用多次行切的方法进行加工,为提高零件的表面加工质量,对少量的加工残痕可用手工修磨。

此外,还要考虑机床选择的合理性。例如,单纯铣轮廓表面或铣槽的简单中小型零件,选择数控铣床进行加工较好,而大型非圆曲线、曲面的加工或者是不仅需要铣削而且有孔系加工的零件,在数控镗铣加工中心上加工较好。

## 四、工序与工步的划分

在数控机床上加工零件,工序可以比较集中,在一次装夹中尽可能完成大部分或全部工序。首先应根据零件图纸,考虑被加工零件是否可以在一台数控机床上完成整个零件的加工,如不能则应决定其中哪一部分在数控机床上加工,哪一部分在其他机床上加工,即对零件的加工工序进行划分。

### (1) 工序划分的原则

数控加工通常按下列原则划分工序。

① 基面先行原则 用作精基准的表面应优先加工出来,因为定位基准的表面越精确,装夹误差就越小。例如轴类零件加工时,总是先加工中心孔,再以中心孔为精基准加工外圆表面和端面。又如箱体类零件总是先加工定位用的平面和两个定位孔,再以平面和定位孔为精基准加工孔系和其他平面。

② 先粗后精原则 各个表面的加工顺序按照粗加工→半精加工→精加工→光整加工的顺序依次进行,逐步提高表面的加工精度和减小表面粗糙度。

③ 先主后次原则 零件的主要工作表面、装配基面应先加工,从而能及早发现毛坯中主要表面可能出现的缺陷。次要表面可穿插进行,放在主要加工表面加工到一定程度后、最终精加工之前进行。

④ 先面后孔原则 对箱体、支架类零件,平面轮廓尺寸较大,一般先加工平面,再加工孔和其他尺寸,这样安排加工顺序,一方面用加工过的平面定位,稳定可靠;另一方面在加工过的平面上加工孔,比较容易,并能提高孔的加工精度,特别是钻孔时的轴线不易偏斜。

## (2) 工序划分方法

数控加工中,一般工序划分有以下几种方式。

①按所用刀具划分工序 为了减少换刀次数,压缩空行程时间,减少不必要的定位误差,可按刀具集中工序的方法加工零件,即在一次装夹中,尽可能用同一把刀具加工出可能加工的所有部位,然后再换另一把刀加工其他部位。在专用数控机床和加工中心中常用这种方法。

②按零件的装卡定位方式划分工序 由于每个零件的结构形状不同,各表面的技术要求也有所不同,加工时的定位方式各有差异。一般加工外形时以内形定位,加工内形时又以外形定位。因而可根据定位方式的不同来划分工序。如图 2-10 所示,加工内轮廓时,以外形面定位;加工外轮廓时,以内形面定位。

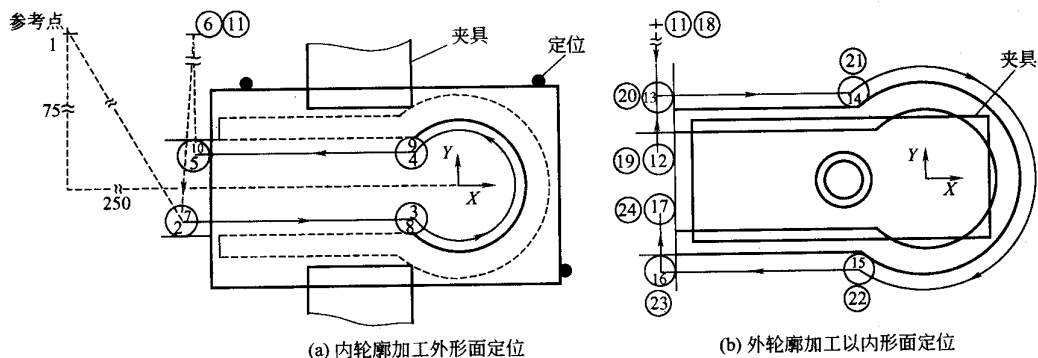


图 2-10 按装卡定位方式划分工序

③按粗、精加工划分工序 根据零件的加工精度、刚度和变形等因素来划分工序时,可按粗、精加工分开的原则划分工序,即先粗加工再精加工。此时可用不同的机床或刀具进行加工。通常在一次装卡中,不允许将零件某一部分表面加工完毕后,再加工零件的其他表面。如图 2-11 所示的零件,应先切除整个零件的大部分余量,再将其表面精车一遍,以保证加工精度和表面粗糙度的要求。

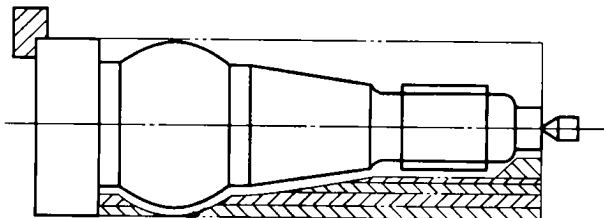


图 2-11 按粗、精加工划分工序

## (3) 工步的划分

工步的划分主要从加工精度和效率两方面考虑。在一个工序内往往需要采用不同的刀具和切削用量,对不同的表面进行加工。为了便于分析和描述较复杂的工序,在工序内

又细分为工步。工步划分的原则是：

①同一表面按粗加工、半精加工、精加工依次完成，或全部加工表面按先粗加工后精加工分开进行。

②对于既有铣面又有镗孔的零件，可先铣面后镗孔。按此方法划分工步，可以提高孔的加工精度。因为铣削时切削力较大，工件易发生变形。先铣面后镗孔，使其有一段时间恢复，可减少由变形引起的对孔加工精度的影响。

③按刀具划分工步。某些机床工作台回转时间比换刀时间短，可采用按刀具划分工步，以减少换刀次数，提高加工效率。

总之，工序与工步的划分要根据零件的结构特点、技术要求等情况综合考虑。

## 五、零件的装卡方法与夹具的选择

### (1) 安装定位的基本原则

在数控机床上加工零件时，安装定位的基本原则与普通机床相同，也要合理选择定位基准和夹紧方案。为了提高数控机床的效率，在确定定位基准和夹紧方案时应注意下列几点。

- ①力求设计基准、工艺基准和编程计算的基准统一。
- ②尽量减少装夹次数，尽可能在一次装夹定位后，加工出全部待加工表面。
- ③避免采用占机人工调整式加工方案，以充分发挥数控机床的效能。

### (2) 夹具的选择原则

数控加工的特点对夹具提出了两个基本要求，一是保证夹具的坐标方向与机床的坐标方向相对固定；二是要能协调零件与机床坐标系的尺寸。除此之外，重点考虑以下几点。

①单件小批量生产时，优先选用组合夹具、可调夹具和其他通用夹具，以缩短生产准备时间和节省生产费用。

②在成批生产时，才考虑采用专用夹具，并力求结构简单。

③零件的装卸要快速、方便、可靠，以缩短机床的停顿时间。

④夹具上各零部件应不妨碍机床对零件各表面的加工，即夹具要敞开，其定位、夹紧机构元件不能影响加工中的走刀（如产生碰撞等）。

⑤为提高数控加工的效率，批量较大的零件加工可以采用多工位、气动或液压夹具。

此外，为了提高数控加工的效率，在成批生产中还可以采用多位、多件夹具。例如在数控铣床或立式加工中心的工作台上，可以安装组合夹具，如图 2-12 所示。

## 六、加工路线的确定

### (1) 加工路线的确定原则

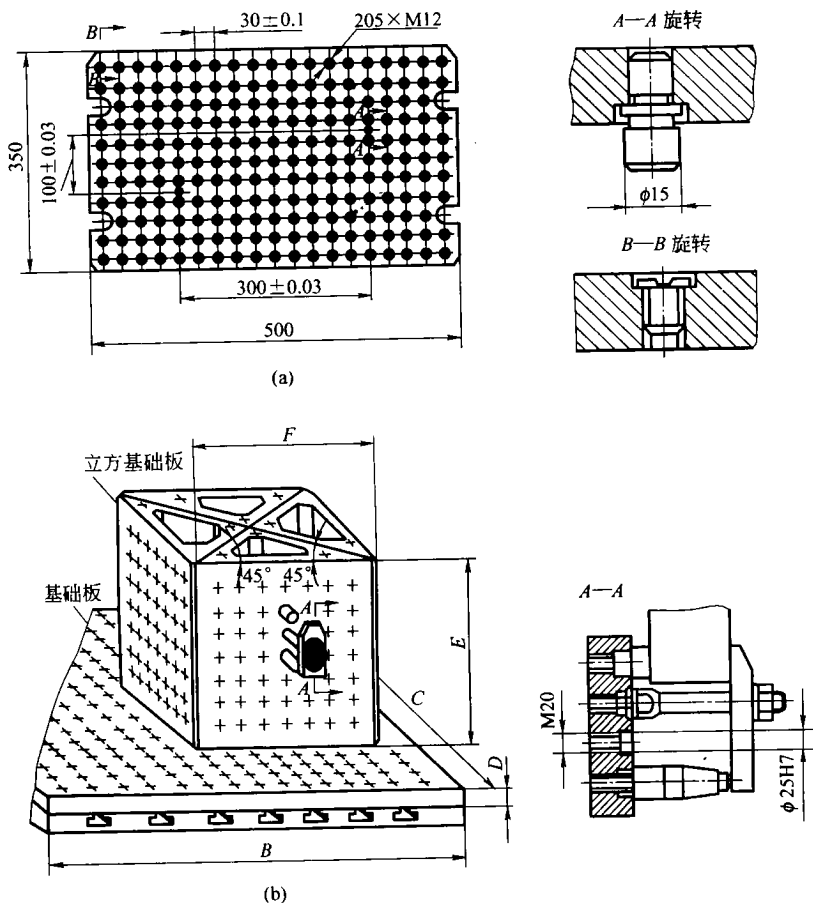


图 2-12 新型数控夹具

在数控加工中,刀具刀位点相对于工件运动的轨迹称为加工路线。确定加工路线是编写程序前的重要步骤,加工路线的确定应遵循以下原则。

- ①加工路线应保证被加工零件的精度和表面粗糙度,且效率较高。
- ②使数值计算简单,以减少编程工作量。
- ③应使加工路线最短,这样既可以减少程序段,又可以减少空刀时间。

此外,确定加工路线时,还要考虑工件的加工余量和机床、刀具的刚度等情况,确定是一次走刀,还是多次走刀来完成加工,以及在铣削加工中是采用顺铣还是逆铣等。

## (2) 辅助程序段的设计

①轮廓加工的进退刀路径设计 在对零件的轮廓进行加工时,为了保证零件的加工精度和表面粗糙度符合要求,应合理地设计进退刀路径。

如图 2-13 所示,当铣削平面零件外轮廓时,一般采用立铣刀侧刃切削。刀具切入工件时,应避免沿零件外廓的法向切入,而应沿外廓曲线延长线的切向切入,以避免在切入

处产生刀具的刻痕而影响表面质量,保证零件外廓曲线平滑过渡。同理,在切离工件时,也应避免在工件的轮廓处直接退刀,而应该沿零件轮廓延长线的切向逐渐切离工件。

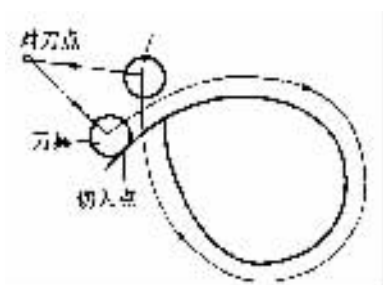


图 2-13 外轮廓加工刀具的切入切出

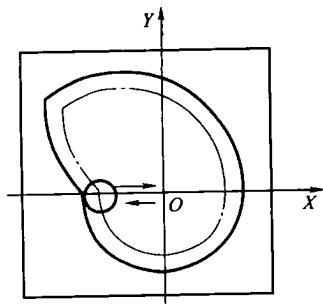


图 2-14 内轮廓加工刀具的切入和切出 1

铣削封闭的内轮廓表面时,若内轮廓曲线允许外延,则应沿切线方向切入切出。若内轮廓曲线不允许外延(见图 2-14),刀具只能沿内轮廓曲线的法向切入切出,此时刀具的切入切出点应尽量选在内轮廓曲线两几何元素的交点处。当内部几何元素相切无交点时(见图 2-15),为防止刀具在轮廓拐角处留下凹口,刀具切入切出点应远离拐角。

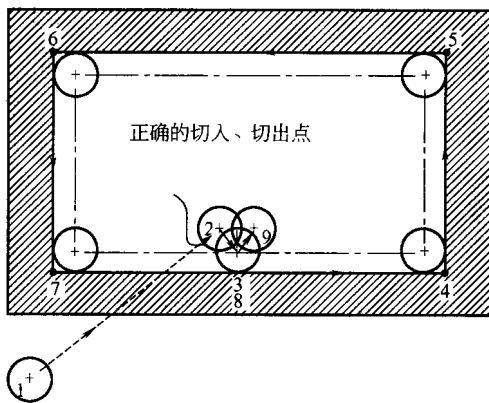


图 2-15 内轮廓加工刀具的切入和切出 2

如图 2-16 所示,用圆弧插补方式铣削外整圆时,当整圆加工完毕时,不要在切点处直接退刀,而应让刀具沿切线方向多运动一段距离,以免取消刀补时,刀具与工件表面相碰造成工件报废。铣削内圆弧时也要遵循从切向切入的原则。最好安排从圆弧过渡到圆弧的加工路线(见图 2-17),这样可以提高内孔表面的加工精度和加工质量。

② 孔加工时引伸距离的确定 孔加工在确定轴向尺寸时,应考虑一些辅助尺寸,包括刀具的引入距离和超越距离。数控钻孔的尺寸关系如图 2-18 所示,图中各参数的含义如下。

$Z_d$ ——被加工孔的深度(mm);

$\Delta Z$ ——具的轴向引入距离(mm),其经验数据为已加工面钻、镗、铰孔  $\Delta Z = 1 \sim 3\text{mm}$ ;毛面上钻、镗、铰孔  $\Delta Z = 5 \sim 8\text{mm}$ ;铣削前攻螺纹时  $\Delta Z = 5 \sim 10\text{mm}$ ;

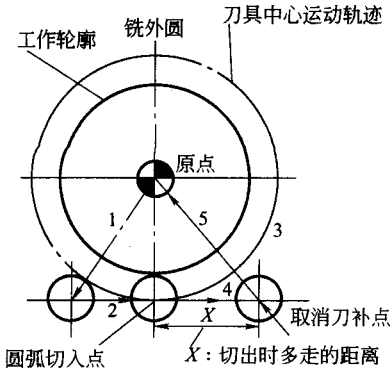


图 2-16 外圆铣削

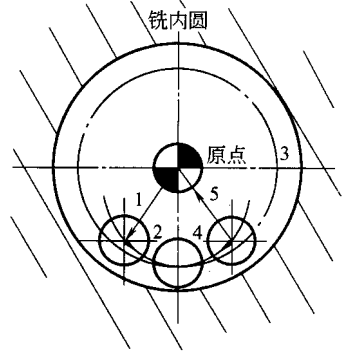


图 2-17 内圆铣削

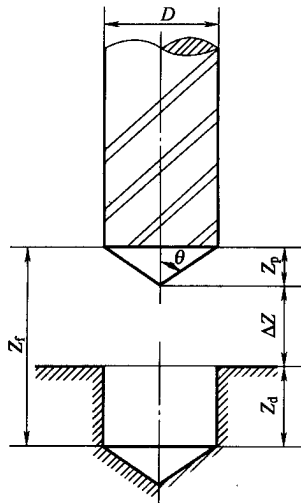


图 2-18 数控钻孔的尺寸关系

$Z_p$ ——钻孔深度( mm )

$$Z_p = D \cot \theta + D/2 = 0.3D$$

$Z_f$ ——刀具轴向位移量 ,即程序中的坐标尺寸( mm ) ,

$$Z_p = Z_d + \Delta Z + Z_q$$

钻孔时刀具超越距离为  $1/\sqrt{3}$ mm。

③ 螺纹加工的引伸距离的确定 在数控车床上车螺纹时 ,沿螺距方向的 Z 向进给应和车床主轴的旋转保持严格的速度比例关系 ,因此应避免在进给机构加速或减速的过程中切削。为此要有引入距离  $\delta_1$  和超越距离  $\delta_2$ 。如图 2-19 所示  $\delta_1$  和  $\delta_2$  的数值与车床拖动系统的动态特性、螺纹的螺距和精度有关。一般  $\delta_1$  为 2~5mm ,对大螺距和高精度的螺纹取大值  $\delta_2$  一般取  $\delta_1$  的 1/4 左右。若螺纹收尾处没有退刀槽时 ,收尾处的形状与数控系统有关 ,一般按 45°退刀收尾。

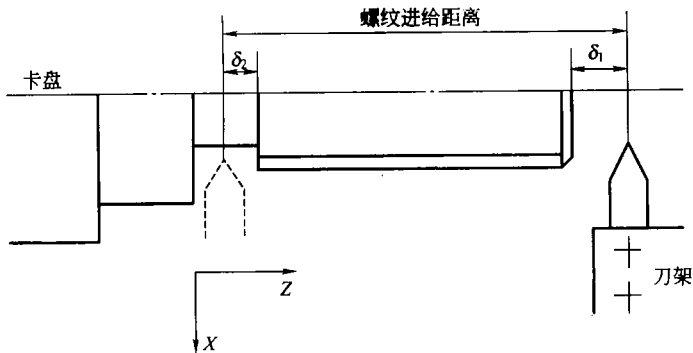


图 2-19 切削螺纹时的引入与超越距离

### (3) 孔加工路线的确定

孔加工时的加工路线确定,应根据技术条件按加工路线最短或加工精度最高的原则,同时,还应考虑孔加工时的引伸距离。

对于点位控制的数控机床,只要求定位精度较高,定位过程尽可能地快,而刀具相对于工件的运动路径无关紧要,因此这类机床应按路径最短来安排走刀路线。

对于位置要求较高的孔系加工,特别要注意孔的加工顺序的安排。在精镗孔系时,镗孔路线一定要注意各孔的定位方向一致,即采用单向趋近定位点的方法,以避免传动系统反向间隙误差对定位精度的影响。

例如,加工图 2-20(a)所示的孔系,在该零件上镗 6 个尺寸相同的孔,当按加工路线最短原则确定的走刀路线如图 2-20(b)所示。由于 5、6 孔与 1~4 孔定位方向相反, $Y$  方向反向间隙会使定位误差增加,而影响 5、6 孔与其他孔的位置精度。如按定位精度最高的原则确定孔加工路线,如图 2-20(c)所示,按此加工路线,加工完 4 孔后往  $Y$  正方向多移动一段距离到  $P$  点,然后再折回来加工 5、6 孔,这样各孔的定位方向一致,可以避免反向间隙的引入,提高了 5、6 孔的位置精度。

### (4) 内型腔加工路线设计

铣削内型腔轮廓表面时,切入和切出无法外延,这时铣刀可沿零件轮廓的法线方向切入和切出,并将其切入、切点选在零件轮廓两几何元素的交点处。

图 2-21 所示为加工凹槽的 3 种加工路线。其中图(a)和(b)分别为用行切法加工和环切法加工凹槽的走刀路线,图(c)为先用行切法,最后环切一刀光整轮廓表面。三种方案中(a)图方案最差(c)图方案最好。

轮廓加工中应避免进给停顿。因为加工过程中的切削力会使工艺系统产生弹性变形并处于相对平衡状态,进给停顿时,切削力突然减小,会改变系统的平衡状态,刀具会在进给停顿处的零件轮廓上留下刻痕。

为提高工件表面的精度和减小粗糙度,可以采用多次走刀的方法,精加工余量一般以  $0.2 \sim 0.5 \text{mm}$  为宜。而且精铣时宜采用顺铣,以减小零件被加工表面粗糙度的值。

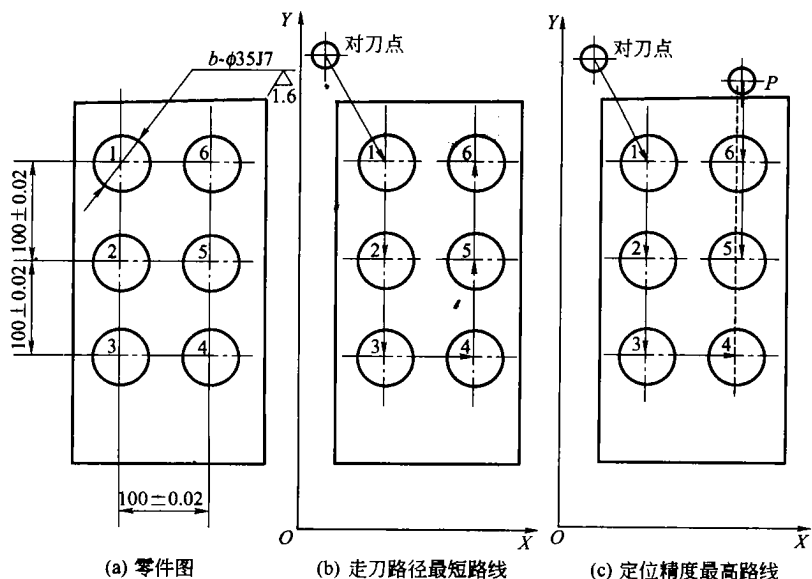


图 2-20 孔加工路线的确定

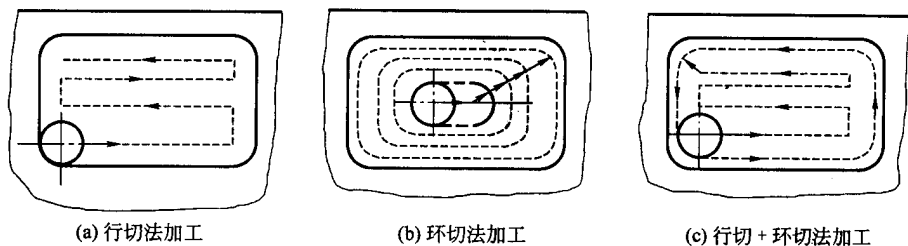


图 2-21 凹槽加工走刀路线

### (5) 曲面加工路线的确定

铣削曲面时,常用球头刀采用行切法进行加工。所谓行切法是指刀具与零件轮廓的切点轨迹是一行一行的,而行间的距离是按零件加工精度的要求确定的。对于边界敞开的曲面加工,可采用两种走刀路线。图 2-22 所示为发动机大叶片,采用图 2-22(a)所示的加工方案时,每次沿直线加工,刀位点计算简单,程序少,加工过程符合直纹面的形成,可以准确保证母线的直线度。当采用图 2-22(b)所示的加工方案时,符合这类零件数据给出情况,便于加工后检验,叶形的准确度较高,但程序较多。由于曲面零件的边界是敞开的,没有其他表面限制,所以边界曲面可以延伸,球头刀应由边界外开始加工。

## 七、刀具的选择

刀具的选择是数控加工工艺中重要内容之一,它不仅影响机床的加工效率,而且直接



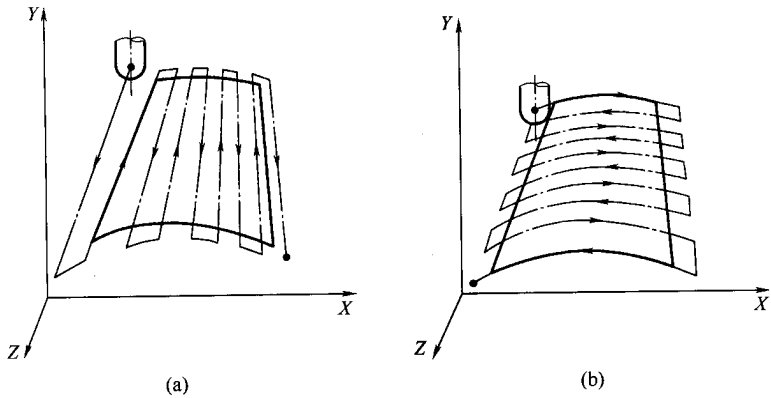


图 2-22 曲面加工的走刀路线

影响加工质量。数控加工对刀具的要求更高。不仅要求精度高、强度大、刚度好、耐用度高,而且要求尺寸稳定、安装调整方便。这就要求采用新型优质材料制造数控加工刀具,并合理选择刀具结构、几何参数。

### (1) 数控车刀的类型与刀片选择

数控车刀常见的类型有尖形车刀、圆弧形车刀和成型车刀。为减少换刀时间和方便对刀,便于实现机械加工的标准化,数控车削加工时,应尽量采用机夹可转位式车刀,其刀片常见形式如图 2-23 所示。

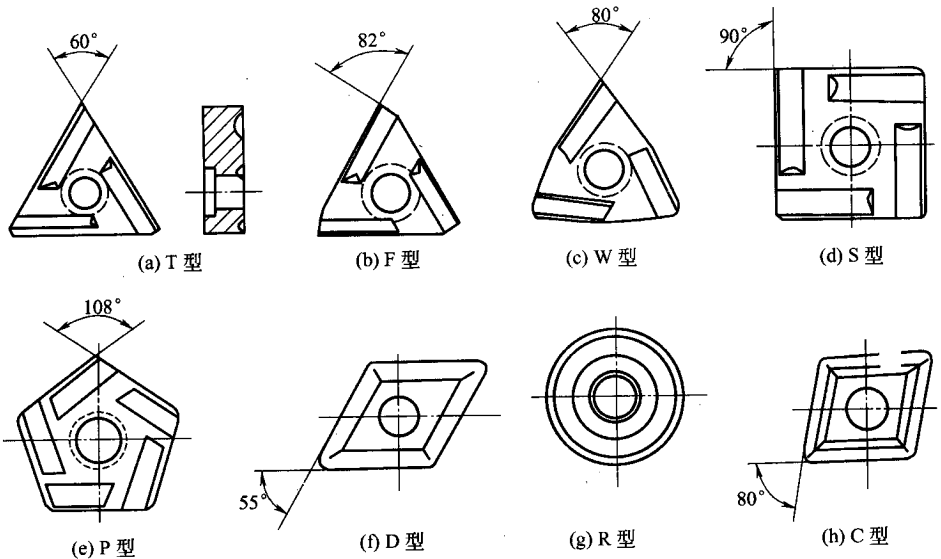


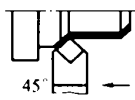
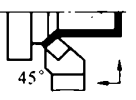
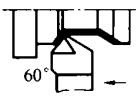
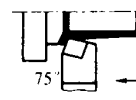
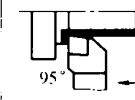
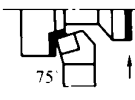
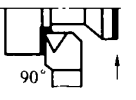
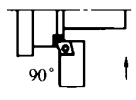
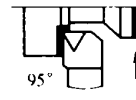
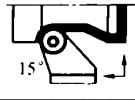
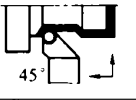
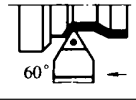
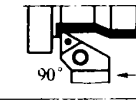
图 2-23 常见可转位车刀刀片

常见刀片材料有高速钢、硬质合金、涂层硬质合金、陶瓷、立方氮化硼和金刚石等,其中应用最多的是硬质合金和涂层硬质合金刀片。选择刀片材质主要依据被加工工件的材料、被加工表面的精度、表面质量要求、切削载荷的大小以及切削过程有无冲击和振动等。

刀片形状、几何尺寸的选择,主要依据被加工工件的表面形状、切削方法、刀具寿命和刀片的转位次数等因素选择。被加工表面与适用的刀片形状可参考表 2-2 选取,表中刀片型号组成见国家标准 GB 2076-87《切削刀具可转位刀片型号表示规则》。

需要注意的是,编程时要考虑数控车刀主偏角和副偏角的合理选择,特别是零件轮廓非单一曲线组成的情况。主偏角的大小决定于工件形状,例如车阶梯轴时,则需用  $K > 90^\circ$  的刀具,而副偏角的选择要考虑是否与已加工表面轮廓产生干涉。

表 2-2 被加工表面与适用的刀片形状

	主偏角	45°	45°	60°	75°	95°
车削外圆表面	刀片形状及加工示意					
	推荐选用刀片	SCMA SPMR SCMM SNMM-8 SPUN SNMM-9	SCMA SPMR SCMM SNMC SPUN SPGR	TCMA TNMM-8 TCMM TPUN	SCMM SPUM SCMA SPMR SNMA	CCMA CCMM CNMM-7
车削端面	主偏角	75°	90°	90°	95°	
	刀片形状及加工示意					
	推荐选用刀片	SCMA SPMR SCMM SPUR SPUN CNMC	TNUN TNMA TCMA TPUM TCMM TPMR	CCMA	TPUN TPMR	
车削成型面	主偏角	15°	45°	60°	90°	93°
	刀片形状及加工示意					
	推荐选用刀片	RCMM	RNNC	TNMM-8	TNMC	TNMA

## (2) 数控铣刀的选择

选用数控铣刀时应注意以下几点:

①在数控机床上铣削平面时,应采用可转位式硬质合金刀片铣刀。一般采用两次走刀,一次粗铣、一次精铣。当连续切削时,粗铣刀直径要小些以减小切削扭矩,精铣刀直径要大一些,最好能包容待加工表面的整个宽度。加工余量大且加工表面又不均匀时,刀具直径要选得小一些,否则,当粗加工时会因接刀刀痕过深而影响加工质量。

②高速钢立铣刀多用于加工凸台和凹槽,最好不要用于加工毛坯面,因为毛坯面有硬化层和夹砂现象,会加速刀具的磨损。

③加工余量较小,并且要求表面粗糙度较低时,应采用立方氮化硼(CBN)刀片端铣刀或陶瓷刀片端铣刀。

④镶硬质合金立铣刀可用于加工凹槽、窗口面、凸台面和毛坯表面。

⑤镶硬质合金的玉米铣刀可以进行强力切削,铣削毛坯表面和用于孔的粗加工。

⑥加工精度要求较高的凹槽时,可采用直径比槽宽小一些的立铣刀,先铣槽的中间部分,然后利用刀具的半径补偿功能铣削槽的两边,直到达到精度要求为止。

⑦在数控铣床上钻孔,一般不采用钻模,钻孔深度为直径的5倍左右的深孔加工,容易折断钻头,可采用固定循环程序,多次自动进退,以利于冷却和排屑。钻孔前最好先用中心钻钻一个中心孔或采用一个刚性好的短钻头镗窝引正。镗窝除了可以解决毛坯表面钻孔引正问题外,还可以替代孔口倒角。

铣刀的种类、形式繁多,限于篇幅,在此不一一叙述各种铣刀尺寸的选择方法。下面以立铣刀为例(见图2-24)推荐按下述经验数据选取。

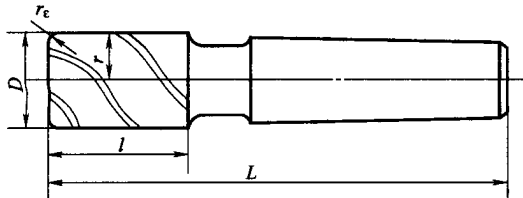


图2-24 立铣刀尺寸选择

①刀具半径  $r$  应小于零件内轮廓面的最小曲率半径  $\rho$ ,一般取  $r=(0.8 \sim 0.9)\rho$ 。

②零件的加工高度  $H \leq (1/4 \sim 1/6)r$ ,以保证具有足够的刚度。

③对不通孔(深槽),选取  $l = H + (5 \sim 41)\text{mm}$  ( $l$  为刀具切前部分长度,  $H$  为零件高度)。

④加工外形及槽时,选取  $l = H + r_e + (5 \sim 10)\text{mm}$  ( $r_e$  为刀尖半径)。

⑤粗加工内轮廓面时(见图2-25),铣刀具大直径  $D_{\text{粗}}$  可按下式计算:

$$D_{\text{粗}} = \frac{2(\delta \sin \varphi / 2 - \delta_1)}{1 - \sin \varphi / 2} + D$$

式中  $D$ —轮廓的最小凹圆角直径;

$\delta$ —圆角邻边夹角等分线上的精加工余量;

$\delta'$ —粗加工余量;

$\varphi$ —圆角两邻的夹角。

⑥加工筋时,刀具直径为  $D = (5 \sim 10)b$  ( $b$  为筋的厚度)。

对一些立体平面和变斜角轮廓外形的加工,常用球头铣刀、环形铣刀、鼓形刀、锥形刀和盘形刀(见图2-26)。

曲面加工常采用球头铣刀,但加工曲面较平坦部位时,刀具以球头顶端刃切削,切削条件较差,因而应采用环形刀。在单件或小批量生产中,为取代多坐标联动机床,常采用

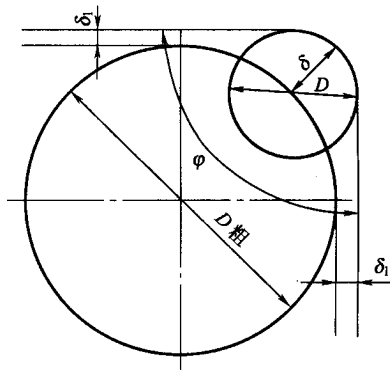


图 2-25 粗加铣刀直径估算法

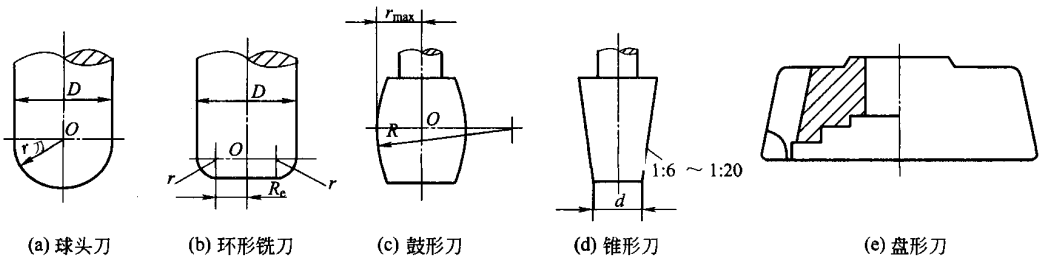


图 2-26 常用铣刀

鼓形刀或锥形刀来加工飞机上一些变斜角零件,加镶齿盘铣刀,适用于在五坐标联动的数控机床上加工一些球面,其效率比用球头铣刀高近 10 倍,并可获得好的加工精度。

在加工中心上,各种刀具分别装在刀库上,按程序规定随时进行选刀和换刀工作。因此必须有一套连接普通刀具的接杆,以便使钻、镗、扩、铰、铣削等工序用的标准刀具,迅速、准确地装到机床主轴或刀库上去。作为编程人员应了解机床上所用刀杆的结构尺寸以及调整方法、调整范围,以便在编程时确定刀具的径向和轴向尺寸。目前我国的加工中心采用 TSG 工具系统,其柄部有直柄(三种规格)和锥柄(四种规格)两种,共包括 16 种不同用途的刀柄。

## 八、切削用量的确定

### (1) 切削用量的选择原则

切削用量包括主轴转速(切削速度)、背吃刀量、进给量。切削用量的大小对切削力、切削功率、刀具磨损、加工质量和加工成本均有显著影响。数控加工中选择切削用量时,就是在保证加工质量和刀具耐用度的前提下,充分发挥机床性能和刀具切削性能,使切削效率最高,加工成本最低。

自动换刀数控机床往主轴或刀库上装刀所费时间较多,所以选择切削用量要保证刀

具加工完一个零件,或保证刀具耐用度不低于一个工作班,最少不低于半个工作班。对易损刀具可采用姐妹刀形式,以保证加工的连续性。粗、精加工时切削用量的选择原则如下。

①粗加工时切削用量的选择原则 首先选取尽可能大的背吃刀量;其次要根据机床动力和刚性的限制条件等,选取尽可能大的进给量,最后根据刀具耐用度确定最佳的切削速度。

②精加工时切削用量的选择原则 首先根据粗加工后的余量确定背吃刀量;其次根据已加工表面的粗糙度要求,选取较小的进给量;最后在保证刀具耐用度的前提下,尽可能选取较高的切削速度。

## (2) 切削用量的选择方法

①背吃刀量  $a_p$  (mm) 的选择 根据加工余量确定。粗加工( $R_a 10 \sim 80 \mu\text{m}$ )时,一次进给应尽可能切除全部余量。在中等功率机床上,背吃刀量可达  $8 \sim 10\text{mm}$ 。半精加工( $R_a 1.25 \sim 10 \mu\text{m}$ )时,背吃刀量为  $0.5 \sim 2\text{mm}$ 。精加工( $R_a 0.32/1.25 \mu\text{m}$ )时,背吃刀量为  $0.2/0.4\text{mm}$ 。

在工艺系统刚性不足或毛坯余量很大,或余量不均匀时,粗加工要分几次进给,并且应当把第一、二次进给的背吃刀量尽量取得大一些。

②进给量(进给速度)( $\text{mm}/\text{min}$  或  $\text{mm}/\text{r}$ )的选择 进给量(进给速度)是数控机床切削用量中的重要参数,根据零件的表面粗糙度、加工精度要求、刀具及工件材料等因素,参考切削用量手册选取。对于多齿刀具,其进给速度  $v_f$ 、刀具转速  $n$ 、刀具齿数  $Z$  及每齿进给量  $f_z$  的关系为

$$v_f = f_n = f_z Z n$$

粗加工时,由于对工件表面质量没有太高的要求,这时主要考虑机床进给机构的强度和刚性及刀杆的强度和刚性等限制因素,可根据加工材料、刀杆尺寸、工件直径及已确定的背吃刀量来选择进给量。

在半精加工和精加工时,则按表面粗糙度要求,根据工件材料、刀尖圆弧半径、切削速度来选择进给量。如精铣时可取  $20 \sim 25\text{mm}/\text{min}$ ,精车时可取  $0.10 \sim 0.20\text{mm}/\text{r}$ 。

最大进给量受机床刚度和进给系统的性能限制。在选择进给量时,还应注意零件加工中的某些特殊因素。比如在轮廓加工中,选择进给量时,应考虑轮廓拐角处的超程问题。特别是在拐角较大、进给速度较高时,应在接近拐角处适当降低进给速度,在拐角后逐渐升速,以保证加工精度。

以加工图 2-27 所示零件为例,铣刀由 A 点运动到 B 点,再由 B 点运动到 C 点。如果速度较高,由于惯性作用,在 B 点可能出现超程现象,将拐角处的金属多切去一部分;而在加工外形面时,可能在 B 点处留有多余的金属未切去。为了克服这种现象,可在接近拐角处适当降低速度。这时可将 AB 段分成  $AA'$  和  $A'B$  两段,在  $AA'$  段使用正常的进给速度,  $A'B$  段为低速度。低速度的具体值要由具体机床的动态特性和超程允差决定。机床动态特性是在机床出厂时由制造厂提供给用户的一个“超程表”中给出的,也可由用户自

己通过实验确定,超程表中应给出不同进给速度时的超程量。超程允差主要由零件的加工精度决定,其值可与程序编制允差相等。

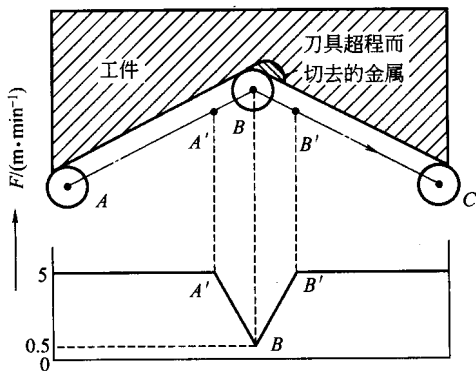


图 2-27 超程误差与控制

低速度段的长度,即图 2-27 冲  $A'B$  段的长度,由机床动态特性决定。由正常进给速度变到拐角处的低速度的过渡过程时间,应小于刀具由  $A'$  点移动至  $\mu$  点的时间。

加工过程中,由于切削力的作用,机床、工件、刀具系统产生变形,可能使刀具运动滞后,从而在拐角处可能产生“欠程”。因此,拐角处的欠程问题,在编程时赠给予足够重视。此外,还应充分考虑切削的自然断屑问题,通过选择刀具几何形状和对切削用量的调整,使排屑处于最顺畅状态,严格避免长屑缠绕刀具而引起故障。

③切削速度  $v_c$  (m/min) 的选择 根据已经选定的背吃刀量、进给量及刀具耐用度选择切削速度。可用经验公式计算,也可根据生产实践经验在机床说明书允许的切削速度范围内查表选取或者参考有关切削用量手册选用。

切削速度  $v_c$  确定后,按下式计算出机床主轴转速  $n$  (r/min, 对有级变速的机床,需按机床说明书选择与所算转速冗接近的转速),并填入程序单中。

$$n = 1000v_c / \pi D$$

式中  $D$ ——工件或刀具直径 mm。

在选择切削速度时,还应考虑,应尽量避免积屑瘤产生的区域,断续切削时,为减小冲击和热应力,要适当降低切削速度;在易发生振动的情况下,切削速度应避免自激振动的临界速度;加工大件、细长件和薄壁工件时,应选用较低的切削速度;加工带外皮的工件时,应适当降低切削速度。

## 九、对刀点与换刀点的确定

在编程时,应正确地选择“对刀点”和“换刀点”的位置。“对刀点”就是在数控机床上加工零件时,刀具相对于工件运动的起始点。由于程序段从该点开始执行,所以对刀点又称为“程序起点”或“起刀点”。

对刀点的选择原则是：便于用数字处理和简化程序编制；在机床上找正容易，加工中便于检查；引起的加工误差小。

对刀点可选在工件上，也可选在工件外面，但必须与零件的定位基准有一定的尺寸关系，如图 2-28 中的  $x_0$  和  $y_0$ ，这样才能确定机床坐标系与工件坐标系的关系。

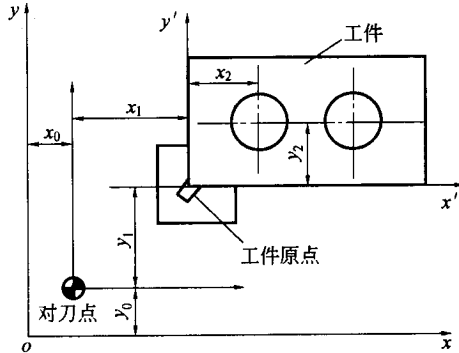


图 2-28 对刀点和换刀点

为了提高加工精度，对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上，如以孔定位的工件，可选孔的中心作为对刀点。刀具的位置则以此孔来校正，使“刀位点”与“对刀点”重合。工厂常用的找正方法是将千分表装在机床主轴上，然后转动机床主轴，以使“刀位点”与对刀点一致。一致性越好，对刀精度越高。所谓“刀位点”是指车刀、镗刀的刀尖，钻头的钻尖，立铣刀、端铣刀刀头底面的中心，球头铣刀的球头中心。

零件安装后工件坐标系与机床坐标系就有了确定的尺寸关系。在工件坐标系设定后，从对刀点开始的第一个程序段的坐标值为对刀点在机床坐标系中的坐标值为  $(x_0, y_0)$ 。当按绝对值编程时，不管对刀点和工件原点是否重合，都是  $x_2, y_2$ 。当按增量值编程时，对刀点与工件原点重合时，第一个程序段的坐标值是  $x_2, y_2$ ；不重合时，则为  $(x_2 + y_2)(y_2 + y_2)$ 。

对刀点既是程序的起点，也是程序的终点。因此在成批生产中要考虑对刀点的重复精度，该精度可用对刀点相距机床原点的坐标值  $(x_0, y_0)$  来校核。

所谓“机床原点”是指机床上一个固定不变的极限点。例如，对车床而言，是指车床主轴回转中心与车头卡盘端面的交点。

加工过程中需要换刀时，应规定换刀点。所谓“换刀点”是指刀架转位换刀时的位置。该点可以是某一固定点（如加工中心机床，其换刀机械手的位置是固定的），也可以是任意的一点（如车床）。换刀点应设在工件或夹具的外部，以刀架转位时不碰工件及其他部件为准。其设定值可用实际测量方法或计算确定。

图 2-29、图 2-30 所示分别为铣削和车削加工中的试切对刀法。

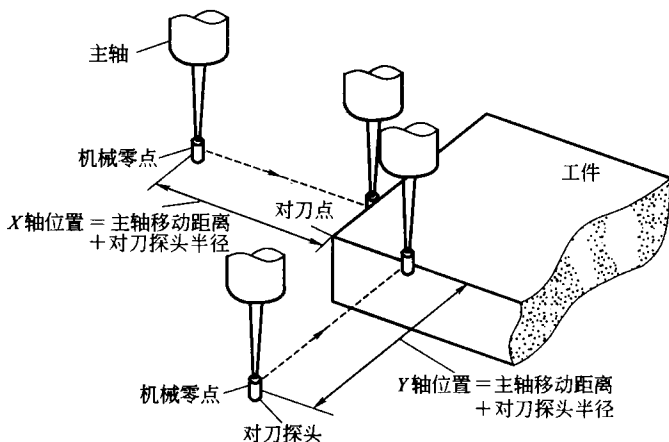


图 2-29 铣削加工对刀示意

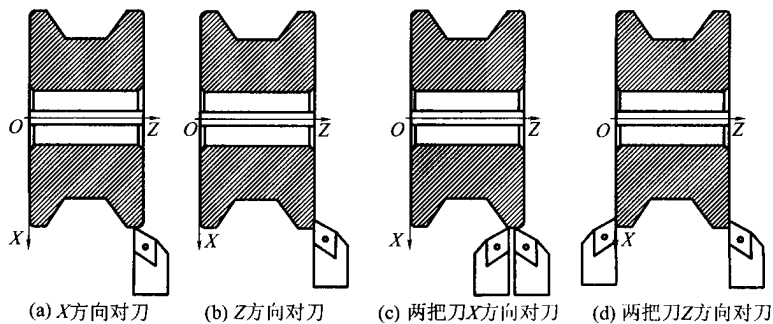


图 2-30 车削加工对刀示意

### 第三节 数控加工工艺文件

数控加工工艺文件既是数控加工、产品验收的依据,也是操作者要遵守、执行的规程,同时还为产品零件的重复生产积累和储备了必要的技术工艺资料。它是编程人员在编制加工程序单时作出的与程序单相关的技术文件。该文件主要包括数控加工工序卡、数控刀具调整单、机床调整单、零件加工程序单等。

不同的数控机床,工艺文件的内容有所不同,为了加强技术文件管理,数控加工工艺文件也应向标准化、规范化的方向发展。但目前国家尚未制定统一的标准,各企业应根据本单位的实际情况,制定必要的工艺文件。

以下分别介绍数控加工的工艺文件,仅供参考。

#### (1) 工序卡

数控加工工序卡与普通加工工序卡有许多相似之处,但不同的是该卡中应反映使用



的辅具、刀具切削参数、切削液等,它是操作人员配合数控程序进行数控加工的主要指导性工艺文件,工序卡应按已确定的工步顺序填写。典型数控加工工序卡见表 2-3。

表 2-3 数控加工工序卡

工厂名	数控加工工序卡片	产品名称或代号		零件名称		零件图号		
工序号	程序编号	夹具名称		使用设备		车间		
				三爪卡盘和自制心轴				
工步号	工步内容		刀具号	刀具规格 /mm	主轴转速 /r·min <sup>-1</sup>	进给速度 /mm·min <sup>-1</sup>	背吃刀量/mm	备注
1	平端面		T01	25 × 25	320		1	手动
2	钻中心孔		T02	φ4	950		2	手动
3	钻孔		T03	φ31.5	200		15.75	手动
4	镗通孔至尺寸 φ31.9mm		T04	20 × 20	320	40	0.2	自动
5	铰孔至尺寸 φ32 <sup>0</sup> <sub>+0.033<sub>0</sub></sub>		T05	0S32	32		0.1	手动
6	粗镗内孔斜面		T04	20 × 20	320	40	0.8	自动
7	精镗内孔斜面保证 1:5 ± 6,		T04	20 × 20	320	40	0.2	自动
8	粗车外圆至尺寸 φ71 光轴		T08	25 × 25	320		1	手动

工厂名	数控加工工序卡片	产品名称或代号		零件名称		零件图号	
9	掉头车另一端面,保证长度尺寸 76mm	T01	25 × 25	320			自动
10	粗镗螺纹底孔至尺寸 $\phi 34$	T04	20 × 20	320	40	0.5	自动
11	精镗螺纹底孔至尺寸 $\phi 34.2$	T04	20 × 20	320	25	0.1	自动
12	切 5mm 内孔退刀槽	T06	16 × 16	320			手动
13	$\phi 34.2\text{mm}$ 孔边倒角 $2 \times 45^\circ$	T07	16 × 16	320			手动
14	粗车内孔螺纹	T07	16 × 16	320		0.4	自动
15	精车内孔螺纹至 M36X2 - 7H	T07	16 × 16	320		0.1	自动
16	自右至左车外表面	T08	25 × 25	320	30	0.2	自动
17	自左至右车外表面	T09	25 × 25	320	30	0.2	自动
编制		审核		批准		年 月 日	共 1 页 第 1 页

若在数控机床上只加工零件的一个工步时,也可不填写工序卡。在工序加工内容不十分复杂时,可把零件草图反映在工序卡上,并注明编程原点和对刀点等。

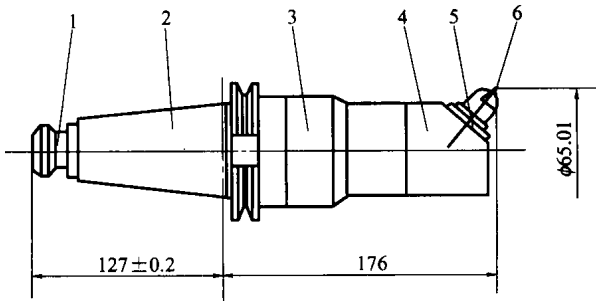
## (2) 数控刀具调整单

数控刀具调整单主要包括数控刀具卡片(简称刀具卡)和数控刀具明细表(简称刀具表)两部分。

数控加工时,对刀具的要求十分严格,一般要在机外对刀仪上,事先调整好刀具直径和长度。刀具卡主要反映刀具编号、刀具结构、尾柄规格、组合件名称代号、刀片型号和材料等,它是组装刀具和调整刀具的依据。刀具卡的格式见表 2-4。

表 2-4 数控刀具卡片

零件图号		JS0102-4	数控刀具卡片			使用设备
刀具名称		镗刀				TC-30
刀具编号		T13003	换刀方式	自动	程序编号	
刀具 组成	序号	编 号	刀具名称	规 格	数 量	备 注
	1	7013960	拉 钉		1	
	2	390.140-5063050	刀 柄		1	
	3	391.35-4063110M	镗刀杆		1	
	4	448S-405628-11	镗刀体		1	
	5	2148C-33-1103	精镗单元	$\phi 0 \sim \phi 72\text{mm}$	1	
6	TRMR110304-21SIP	刀 片		1		



备 注						
编 制		审 核		批 准		共 页 第 页

数控刀具明细表是调刀人员调整刀具参数的主要依据,刀具表的格式见表 2-5~表 2-7。

表 2-5 数控刀具明细表

零件图号		零件名称		材 料		数控刀具明细表				程序编号		车 间		使用设备	
JS0102-4															
刀号	刀位号	刀具名称	刀具图号	刀 具				刀补地址		换刀方式		加工部位			
				直径/mm		长度/mm									
				设定	补偿	设定	直径	长度	自动/手动						
T13001		镗刀		φ63		137					自动				
T13002		镗刀		φ64.8		137					自动				
T13003		镗刀		φ65.01		176					自动				
T13004		镗刀		φ65 × 45°		200					自动				
T13005		环沟铣刀		φ50	φ50	200					自动				
编 制		审 核		批 准		年 月 日				共 页		第 页			

表 2-6 数控加工刀具卡(车削加工)

产品名称 或代号		零件名称		零件图号		程序编号			
工 步 号	刀 具 号	刀具名称	刀具型号	刀 片		刀尖半径 /mm	备注		
				型 号	牌 号				
4	T04	φ18mm 钻头							
5	T05	机夹可转位车刀	PDJNL1515-11Q	DNMA110404	GC435	0.4			
6	T06	机夹可转位车刀	PCGCL2525-08Q	CCMW080304	GC435	0.4			
7	T07	成型车刀				2			
8	T08	成型车刀				2			
9	T09	机夹可转位车刀	PDJNL1515-11Q	DNMA110404	GC435	0.4			
10	T10	机夹可转位车刀	PCJCL1515-06Q	CCMW060204	GC435	0.4			
编制		审核		批准		共 1 页		第 1 页	

注:刀具型号组成见国家标准 GB 5343.1-93《可转位车刀型号表示规则》和 GB 5343.2-93《可转位车刀型式尺寸和技术要求》;刀片型号和尺寸见有关刀具手册,GC435 为山特维克(Sand Vik)公司涂层硬质合金刀具牌号。

表 2-7 数控加工刀具卡(铣削加工)

产品名称或代号		零件名称	支成套	零件图号	程序编号		
工步号	刀具号	刀具名称	万柄型号	刀 具		补偿量 /mm	备 注
				直径/mm	长度/mm		
1	T01	中心钻 $\phi 3\text{mm}$	JT40-Z6-45	$\phi 3$	280		
2	T13	锥柄麻花钻 $\phi 31\text{mm}$	JT40-M3-75	$\phi 31$	330		
3	T02	锥柄麻花钻 $\phi 11\text{mm}$	JT40-M1-35	$\phi 11$	330		
4	T03	锥柄埋头钻 $\phi 17\text{mm} \times 11\text{mm}$	JT40-M2-50	$\phi 17$	300		
5	T04	粗镗刀 $\phi 34\text{mm}$	JT40-TQC30-165	$\phi 34$	320		
6	T05	硬质合金立铣刀 $\phi 32\text{mm}$	JT40-MW4-85	$\phi 32$	300		
7	T05						
编 制		审 核	批 准			共 1 页	第 1 页

### (3) 数控加工程序单

数控加工程序单是编程人员通过对被加工零件的工艺分析,经过数值计算,按照所使用数控机床的编程规则编制的。是记录数控加工工艺过程、工艺参数、位移数据的清单,是实现数控加工的主要依据。不同的数控机床,不同的数控系统,程序单的格式不同。FANUC 系统数控铣削加工程序单示例见表 2-8。

表 2-8 数控加工程序单示例

程 序	注 释
O0002	主程序号
N10 G90 G21 G40 G80	绝对坐标、公制尺寸、取消刀具半径补偿和固定循环
N20 G91 G28 X0 Y0 Z0	返回 XYZ 参考点
N30 G92 X-100 Y200 Z0	工件坐标系设定
N40 G00 G90 X12.0 Y0 Z0 S2000 M03 T1	快速移动到②,主轴以 2000r/min 正转,刀具 1 准备
N50 G43 Z3 H01	刀具 1 快速移动到工件上面 3mm 位置
N60 M08	冷却液开
N70 M98 P0004 L5	调用子程序 5 次
N80 G80	固定循环取消
N90 G00 G90 Z25 M05	绝对模式迅速抬刀,主轴停止
N100 M09	冷却液关

程 序	注 释
N110 G91 G20 X0 Y0 Z0	返回到 XYZ 参考点
N120 M30	程序结束,存储器复位
O0004	子程序号
N10 G91 G83 Y12 Z-12.0 R3.0 Q3.0 F250	调用快速深孔钻 G83 固定循环指令
N20 X12 L9	在④...⑫位置钻孔
N30 Y12	在⑬位置钻孔
N40 X-12 L9	在⑭...⑳位置钻孔
N50 M99	返回主程序 N060 程序段

此外,在数控加工工艺文件中,对于较复杂轨迹的数控铣削、零件的切入/切出方式等,还应绘制刀具轨迹图,即刀具路线示意图。

## 第三章 数控编程中的数学处理

### 第一节 数值计算

对零件图形进行数学处理是编程前的一个关键性的环节。不但对手工编程来说是必不可少的工作步骤,即使采用计算机进行自动编程,也经常需要对工件的轮廓图形先进行数学预处理,才能对有关几何元素进行定义。作为一名编程人员,即使数控编程系统具有完备的处理功能,不需要人工干预处理,也应该明白其中的数学理论,知道数控编程系统如何进行工作的,本节主要介绍以下有关的数值计算内容。

#### (1) 基点和节点的坐标计算

一个零件的轮廓复杂多样,但大多是由许多不同的几何元素组成。如直线、圆弧、二次曲线及列表点曲线等。各几何元素间的连结点称为基点,如两直线间的交点、直线与圆弧或圆弧与圆弧间的交点或切点、圆弧与二次曲线的交点或切点等。显然,相邻基点间只能是一个几何元素。

对于由直线与直线或直线与圆弧构成的平面轮廓零件,由于目前一般机床数控系统都具有直线、圆弧插补功能,故数值计算比较简单。此时,主要应计算出基点坐标与圆弧的圆心点坐标。

当零件的形状是由直线段或圆弧之外的其他曲线构成,而数控装置又不具备该曲线的插补功能时,其数值计算就比较复杂。将组成零件轮廓曲线按数控系统插补功能的要求,在满足允许的编程误差的条件下,用若干直线段或圆弧来逼近给定的曲线,逼近线段的交点或切点称为节点。如图 3-1 所示,图(a)为用直线段逼近非圆曲线的情况,图(b)为用圆弧段逼近非圆曲线的情况。编写程序时,应按节点划分程序段。逼近线段的近似区间愈大,则节点数目愈少,相应地程序段数目也会减少,但逼近线段的误差 $\delta$ 应小于或等于编程允许误差 $\delta_{允}$ ,即 $\delta \leq \delta_{允}$ 。考虑到工艺系统及计算误差的影响, $\delta_{允}$ 一般取零件公差的 $1/5 \sim 1/10$ 。

#### (2) 刀位点轨迹的计算

刀位点是标志刀具所处不同位置的坐标点,不同类型刀具的刀位点不同,数控系统就是从对刀点开始控制刀位点运动,并由刀具的切削刃加工出不同要求的零件轮廓,零件的轮廓形状是通过刀具切削刃进行切削形成的。对于具有刀具半径补偿功能的数控机床,

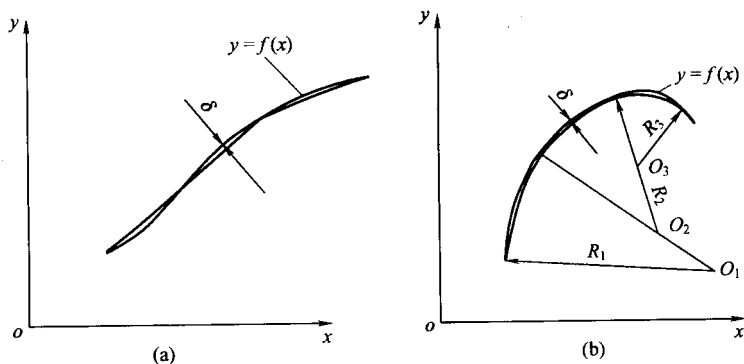


图 3-1 曲线的逼近

只要在编写程序时,在程序的适当位置写入建立刀具补偿的有关指令,就可以保证在加工过程中,使刀位点按一定的规则自动偏离编程轨迹,达到正确加工的目的。这时可直接按零件轮廓形状,计算各基点和节点坐标,并作为编程时的坐标数据。

当机床所采用的数控系统不具备刀具半径补偿功能时,编程时需对刀具的刀位点轨迹进行数值计算,按零件轮廓的等距线编程。例如简易数控车床,只有长度偏移功能而无半径补偿功能,编程时为保证精确地加工出零件轮廓,就需要做某些偏置计算。用球头刀加工三坐标立体型面零件时,程序编制要算出球头刀球心的运动轨迹,而由球头刀的外缘切削刃加工出零件轮廓。

### (3) 辅助计算

辅助计算包括增量计算及辅助程序段的数值计算。

辅助程序段是指刀具从对刀点到切入点或从切出点返回到对刀点而特意安排的程序段。切入点位置的选择应依据零件加工余量而定,适当离开零件一段距离。切出点位置的选择,应避免刀具在快速返回时发生撞刀。使用刀具补偿功能时,建立刀补的程序段应在加工零件之前写入,加工完成后应取消刀具补偿。某些零件的加工,要求刀具“切向”切入和“切向”切出。以上程序段的安排,在绘制走刀路线时,即应明确地表达出来。数值计算时,按照走刀路线的安排,计算出各相关点的坐标。

## 第二节 基点坐标的计算

零件轮廓或刀位点轨迹的基点坐标计算,一般采用代数法或几何法。代数法是通过列方程组的方法求解基点坐标,这种方法虽然已根据轮廓形状,将直线和圆弧的关系归纳成若干种方式,并变成标准的计算形式,方便了计算机求解,但手工编程时采用代数法进行数值计算还是比较繁琐。根据图形间的几何关系利用三角函数法求解基点坐标,计算比较简单、方便,与列方程组解法比较,工作量明显减少,本节分别介绍两种求解基点坐标



的方法,要求重点掌握三角函数法求解基点坐标。

## 一、联立方程组法求解基点坐标

由直线和圆弧组成的零件轮廓,可以归纳为直线与直线相交、直线与圆弧相交或相切、圆弧与圆弧相交或相切、一直线与两圆弧相切等几种情况。采用联立方程组求解基点坐标,计算过程是比较繁琐的,为简化计算,可以将计算过程标准化。

### (1) 直线与圆弧相交或相切

如图 3-2 所示,已知直线方程为  $y = kx + b$  求以点  $(x_0, y_0)$  为圆心,半径为  $R$  的圆与该直线的交点坐标  $(x_c, y_c)$ 。

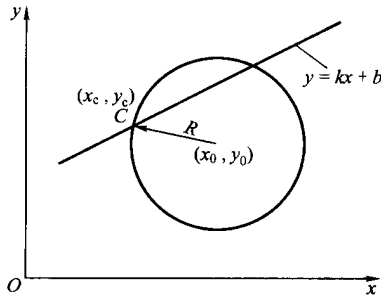


图 3-2 直线与圆弧相交

直线方程与圆方程联立,得联立方程组

$$\begin{cases} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \\ y = kx + b \end{cases}$$

经推算后可给出标准计算公式如下。

$$A = 1 + k^2$$

$$B = [k(b - y_0) - x_0]$$

$$C = x_0^2 + (b - y_0)^2 - R^2$$

$$x_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{求 } x_c \text{ 较大时取“+”})$$

$$y_c = kx_c + b$$

上式也可用于求解直线与圆相切的切点坐标。当直线与圆相切时,取  $B^2 - 4AC = 0$ , 此时  $x_c = -B/(2A)$ , 其余计算公式不变。

### (2) 圆弧与圆弧相交或相切

如图 3-3 所示,已知两相交圆的圆心坐标及半径分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $R_1$  和  $(x_2, y_2)$ 、 $R_2$ , 求其交点坐标  $(x_c, y_c)$ 。

联立两圆方程

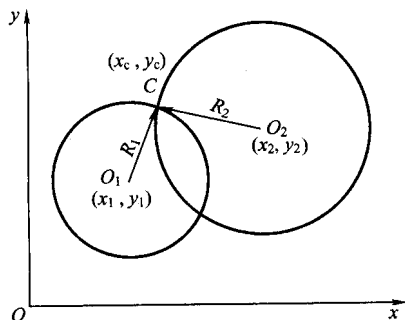


图 3-3 圆弧与圆弧相交

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = R_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = R_2^2 \end{cases}$$

经推算可给出标准计算公式如下。

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

$$D = \frac{(x_2^2 + y_2^2 - R_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 - R_1^2)}{2}$$

$$A = 1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2$$

$$B = 2\left(y_1 - \frac{D}{\Delta y}\right)\frac{\Delta x}{\Delta y} - x_1$$

$$C = \left(y_1 - \frac{D}{\Delta y}\right)^2 + x_1^2 - R_1^2$$

$$x_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{求 } x_c \text{ 较大值时取“+”})$$

$$y_c = \frac{D - \Delta x x_c}{\Delta y}$$

当两圆相切时,  $B^2 - 4AC = 0$ , 因此上式也可用于求两圆相切的切点。

【例 3-1】零件图形如图 3-4 所示, 该零件轮廓由四条直线和一个圆弧组成。由图可知, 应确定的基点坐标为 A、B、C、D、E 点。其中 A、B、D、E 各点的坐标可直接由图上的数据得出, 而 C 点是过 B 并与圆  $O_2$  相切的直线和圆  $O_2$  的切点。根据初等数学, 求 C 点坐标  $x_c, y_c$  可以采用以下方法。

方法一

连接  $\overline{BO_2}$ , 取中点  $O_1$ , 设  $O_1$  点坐标为  $(x_1, y_1)$ ,  $O_2$  点坐标为  $(x_2, y_2)$ , 则 C 点为以  $O_1$  为圆心, 半径为  $\overline{O_1O_2}$  与以  $O_2$  为圆心半径为  $R$  的圆的交点。

因  $O_1$  为  $\overline{BO_2}$  的中点, 用求线段中点公式可求出

$$x_1 = \frac{x_2 + x_B}{2} = \frac{80 + 0}{2} = 40$$

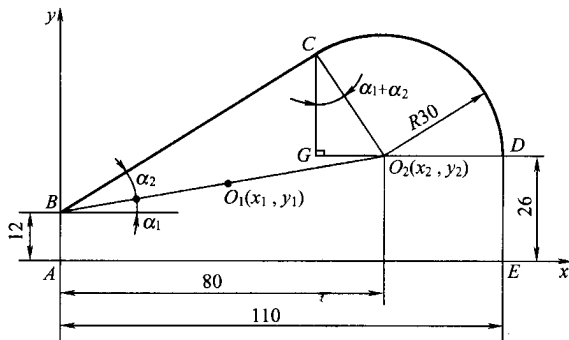


图 3-4 零件轮廓的基点坐标计算

$$y_1 = \frac{y_2 + y_B}{2} = \frac{26 + 12}{2} = 19$$

令  $\overline{O_1O_2} = R_1$  则

$$R_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = 40.60788$$

并令  $R_1 = R = 30$

由图可知  $x_2 = 80$ ,  $y_2 = 26$  至此 两相交圆标准计算式所需数据全部确定 即

圆  $O_1$  :  $x_1 = 40$ ,  $y_1 = 19$ ,  $R_1 = 40.60788$

圆  $O_2$  :  $x_2 = 80$ ,  $y_2 = 26$ ,  $R_2 = 30$

用标准计算公式求解

$$\Delta x = 80 - 40 = 40$$

$$\Delta y = 26 - 19 = 70$$

$$D = \frac{(80^2 + 26^2 - 30^2) - (40^2 + 19^2 - 40.60788^2)}{2} = 2932$$

$$A = 1 + \left(\frac{40}{7}\right)^2 = 33.65306$$

$$B = 2 \left[ 19 - \frac{2932}{7} \right] \times \frac{40}{7} - 40 = -4649.796$$

$$C = \left( 19 - \frac{2932}{7} \right)^2 + 40^2 - 40.60788^2 = 159836.7$$

此处所求两圆交点应为  $x_c$  较小值 故

$$x_c = \frac{-(-4649.796) - \sqrt{(-4649.796)^2 - 4 \times 33.65306 \times 159836.7}}{2 \times 33.65306} = 64.27849$$

$$y_c = \frac{2932 - 40 \times 64.27849}{7} = 51.55149$$

方法二

由图可知

$$\Delta x = x_2 - x_B = 80 - 0 = 80$$

$$\Delta y = y_2 - y_B = 26 - 12 = 14$$

$$a_1 = \arctg \frac{\Delta y}{\Delta x} = 9.92625^\circ$$

$$a_2 = \arcsin \frac{R}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = 21.67778^\circ$$

用  $k$  表示  $\overline{BC}$  直线的斜率

$$k = \tan(a_1 + a_2) = 0.6153$$

该直线对  $y$  轴的截距  $b = 12$

用通过  $O_2$  的圆方程与直线  $\overline{BC}$  的方程联立求解

$$\begin{cases} (x - 80)^2 + (y - 26)^2 = 30^2 \\ y = 0.6153x + 12 \end{cases}$$

$$A = 1 + k^2 = 1.3786$$

$$\begin{aligned} B &= 2[k(b - y_2) - x_2] = 2[0.6153 \times (12 - 26) - 80] \\ &= -177.23 \end{aligned}$$

$$x_c = \frac{-B}{2A} = \frac{-(-177.23)}{2 \times 1.3786} = 64.279$$

$$y_c = kx_c + b = 0.6153 \times 64.279 + 12 = 51.551$$

## 二、三角函数法求解基点坐标

对于由直线和圆弧组成的零件轮廓,采用手工编程时,常利用直角三角形的几何关系进行基点坐标的数值计算,图 3-5 所示为直角三角形的几何关系,三角函数计算公式见表 3-1。

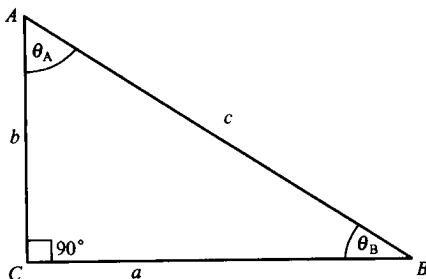


图 3-5 直角三角形的几何关系

【例 3-2】 利用直角三角形的几何关系,计算图 3-6 所示零件各孔在直角坐标系中的位置坐标。

表 3-1 直角三角形中的几何关系

已知角	求相应的边	已知边	求相应的角
$\theta_A$	$a/c = \sin(\theta_A)$	$a, c$	$\theta_A = \arcsin(a/c)$
$\theta_A$	$b/c = \cos(\theta_A)$	$b, c$	$\theta_A = \arccos(b/c)$
$\theta_A$	$a/b = \tan(\theta_A)$	$a, b$	$\theta_A = \arctan(a/b)$
$\theta_B$	$b/c = \sin(\theta_B)$	$b, c$	$\theta_B = \arcsin(b/c)$
$\theta_B$	$a/c = \cos(\theta_B)$	$a, c$	$\theta_B = \arccos(a/c)$
$\theta_B$	$b/a = \tan(\theta_B)$	$b, a$	$\theta_B = \arctan(b/a)$
勾股定理	$c^2 = a^2 + b^2$	三角形内角和	$\theta_A + \theta_B + 90^\circ = 180^\circ$

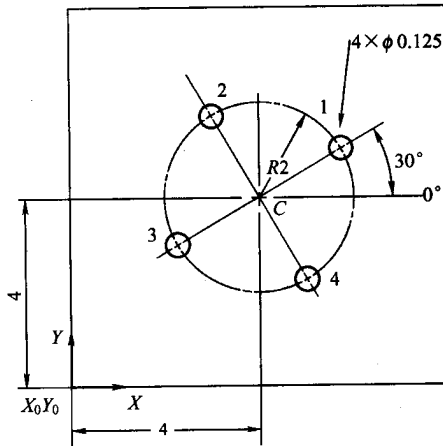


图 3-6 孔位置坐标的计算

孔 1 :  $X_1 = 4 + 2 \times \cos 30^\circ = 4 + 1.732 = 5.732$  ,  $Y_1 = 4 + 2 \times \sin 30^\circ = 4 + 1.0 = 5.0$  ;

孔 2 :  $X_2 = 4 - 2 \times \cos 60^\circ = 4 - 1.0 = 3.0$  ,  $Y_2 = 4 + 2 \times \sin 60^\circ = 4 + 1.732 = 5.732$  ;

同理 孔 3 :  $X_3 = 2.268$  ,  $Y_3 = 3.0$  ; 孔 4 :  $X_4 = 5.0$  ,  $Y_4 = 2.268$ 。

### 三、三角函数法求解刀位点轨迹的基点坐标

刀位点是刀具上代表刀具在工件坐标系中所在位置的一个点。编程时用该点的运动来描述刀具的运动,运动所形成的轨迹称为编程轨迹。在需要计算刀具中心轨迹数据的数控系统中,要算出与零件轮廓的基点和节点相对应的刀具中心轨迹上基点和节点坐标值。图 3-7 所示为采用  $\phi 10\text{mm}$  立铣刀加工某样板曲线时的起刀点位置和刀具中心运动轨迹。由图不难看出,刀心运动轨迹是零件轮廓的等距线,根据零件轮廓条件和刀具半径  $r_{\text{刀}}$  就可求出刀具中心轨迹。

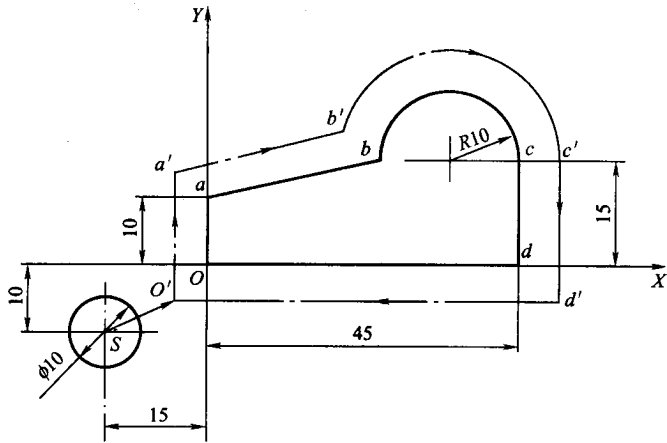


图 3-7 轮廓铣削加工时的刀心轨迹

实际上 利用几何关系计算刀位点轨迹的基点坐标更为方便,以下通过典型实例,作具体介绍。

(1) 直线轮廓的刀位点坐标计算

【例 3-3】 图 3-8 所示为被加工轮廓和刀具的走刀路径,计算图中各刀位点的坐标(单位为英制)结果见表 3-2。

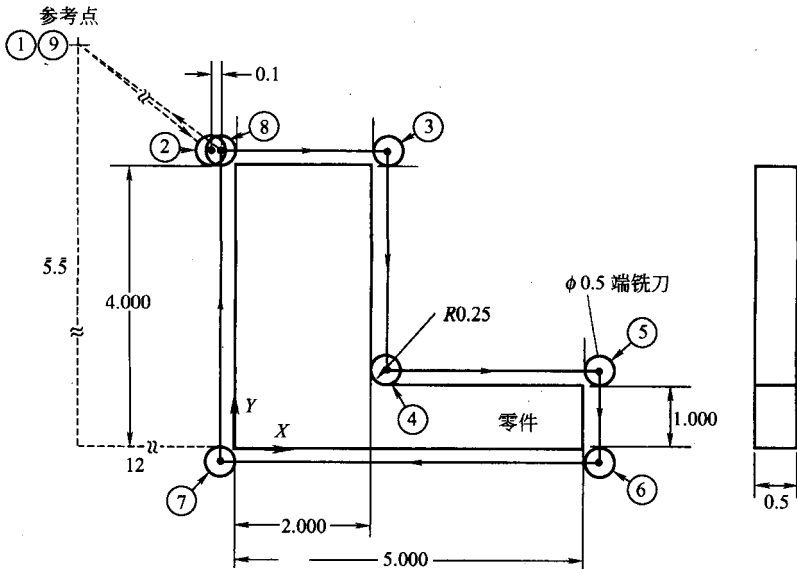
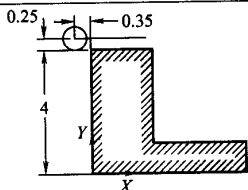
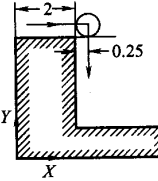
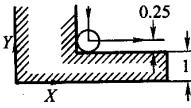
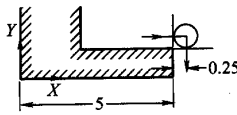
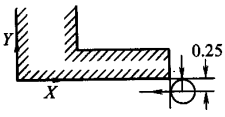
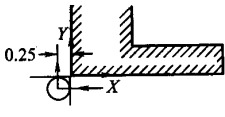
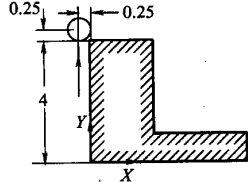


图 3-8 由直线组成轮廓铣削加工时的刀位点轨迹

(2) 斜线轮廓的刀位点坐标计算

零件轮廓为斜线关系,有以下 3 种情况。

表 3-2 零件的刀位点坐标

刀位点位置	图例及计算	坐标值	
		X	Y
②	 $X = -0.25 - 0.1 = -0.35$ $Y = 4 + 0.25 = 4.25$	-0.35	4.25
③	 $X = 2 + 0.25 = 2.25$ $Y = 4.25$	2.25	4.25
④	 $X = 2.25$ $Y = 1 + 0.25 = 1.25$	2.25	1.25
⑤	 $X = 5 + 0.25 = 5.25$ $Y = 1.25$	5.25	1.25
⑥	 $X = 5.25$ $Y = -0.25$	5.25	-0.25
⑦	 $X = -0.25$ $Y = -0.25$	-0.25	-0.25
⑧	 $X = -0.25$ $Y = 4 + 0.25 = 4.25$	-0.25	4.25

①刀位点在零件轮廓外侧 相邻轮廓线之间的内夹角大于  $90^\circ$  ,其几何关系和刀位点偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  奇迹和计算公式如图 3-9 所示。

②刀位点在零件轮廓外侧 相邻轮廓线之间的内夹角小于  $90^\circ$  ,其几何关系和刀位点偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  奇迹和计算公式如图 3-10 所示。

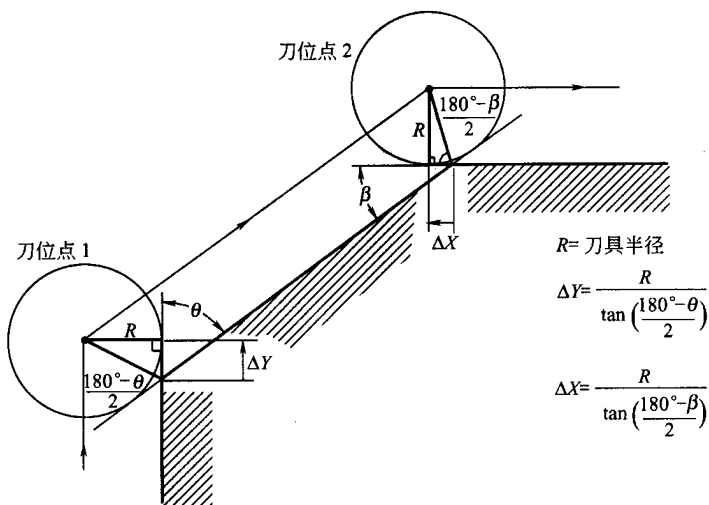


图 3-9 斜线轮廓的刀位点计算(1)

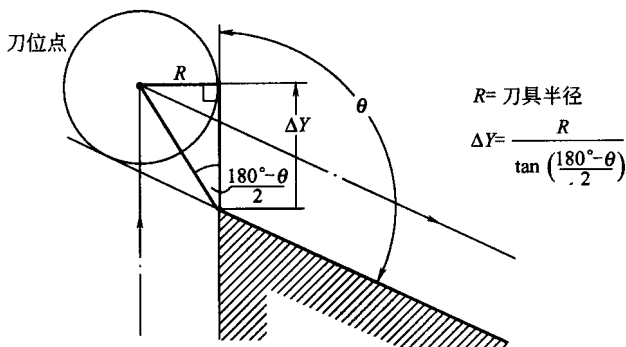


图 3-10 斜线轮廓的刀位点计算(2)

③刀位点在零件轮廓内侧 相邻轮廓线之间的内夹角小于  $180^\circ$  其几何关系和刀位点偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$  奇迹和计算公式如图 3-11 所示。

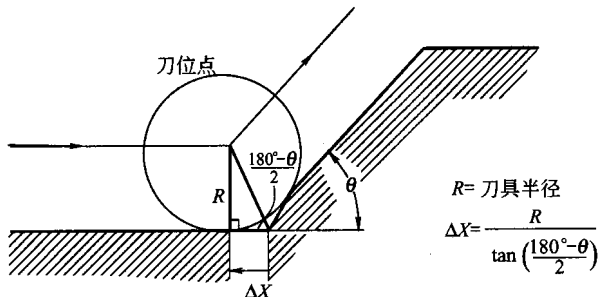


图 3-11 斜线轮廓的刀位点计算(3)

【例 3-4】 图 3-12 所示为被加工轮廓和刀具的走刀路径, 计算图中各刀位点的坐



标(英制单位)结果见表 3-3。

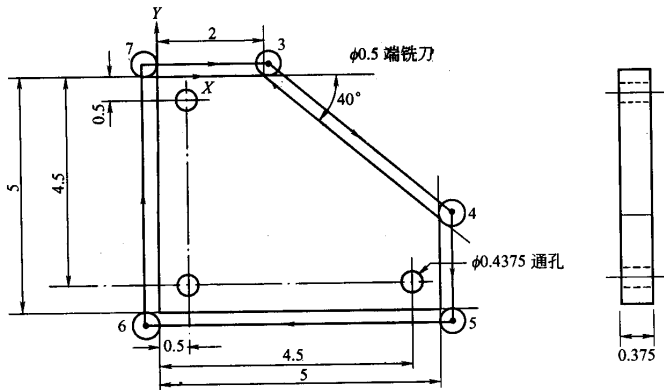


图 3-12 斜线轮廓的刀位点计算实例

表 3-3 零件的刀位点坐标

刀位点位置	图例及计算	坐标值	
		X	Y
②		-0.25	0.25
③	$\Delta X = \frac{0.25}{\tan(70^\circ)}$ $\Delta X = \frac{0.25}{2.7475}$ $\Delta X = 0.091$ $X = 2 + 0.091 = 2.091$ $Y = 0.25$	2.091	0.25
④	$\frac{h}{3} = \tan(40^\circ)$ $h = 3 \times 0.8391$ $h = 2.5173$ $\Delta Y = \frac{0.25}{\tan(65^\circ)}$ $\Delta Y = \frac{0.25}{2.1445}$ $\Delta Y = 0.1166$ $X = 5.25$ $Y = -2.5173 + 0.1166$ $Y = -2.4007$	5.25	-2.4007
⑤	$X = 5 + 0.25$ $Y = -5 - 0.25$	5.25	-5.25
⑥	$X = -0.25$ $Y = -5 - 0.25$	-0.25	-5.25
⑦	$X = -0.25$ $Y = 0.25$	-0.25	0.25

(3) 直线与圆弧组成零件轮廓的刀位点轨迹计算

【例 3-5】 图 3-13 所示为一铣削加工轮廓, 图 中所标注的尺寸为英制单位。计算刀位点轨迹②~⑧的坐标数据。

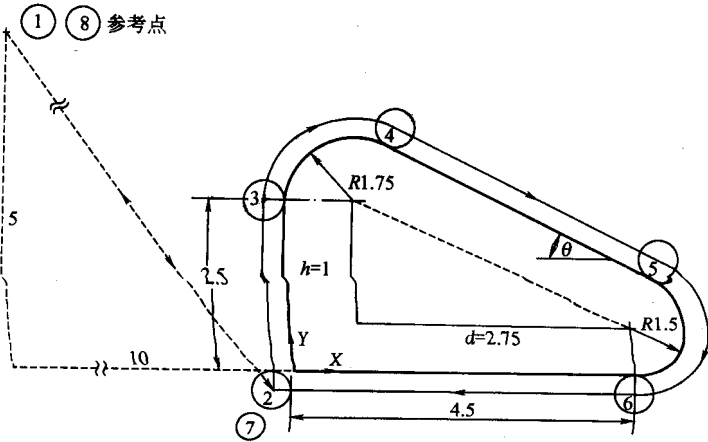


图 3-13 铣削加工轮廓及刀位点轨迹

轮廓中弧  $R1.75$  与弧  $R1.5$  及其切线的几何关系如图 3-14 所示, 计算公式如下。

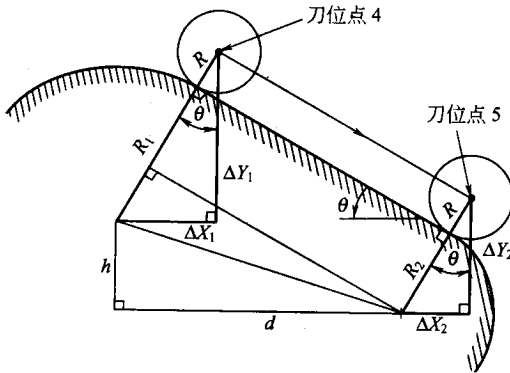


图 3-14 弧-线-弧轮廓的几何关系

$$\Delta X_1 = (R_1 + R) \sin \theta$$

$$\Delta Y_1 = (R_1 + R) \cos \theta$$

$$\Delta X_2 = (R_2 + R) \sin \theta$$

$$\Delta Y_2 = (R_2 + R) \cos \theta$$

$$\theta = \arctan(h/d) + \arcsin\left(\frac{R_1 - R_2}{\sqrt{h^2 + d^2}}\right)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{1}{2.75}\right) + \arcsin\left(\frac{0.25}{\sqrt{2.75^2 + 1^2}}\right)$$

$= 19.9831^\circ + 4.9011^\circ = 24.8842^\circ$

刀位点④和⑤的几何关系如图 3-15 所示,各刀位点坐标的计算结果见表 3-4。

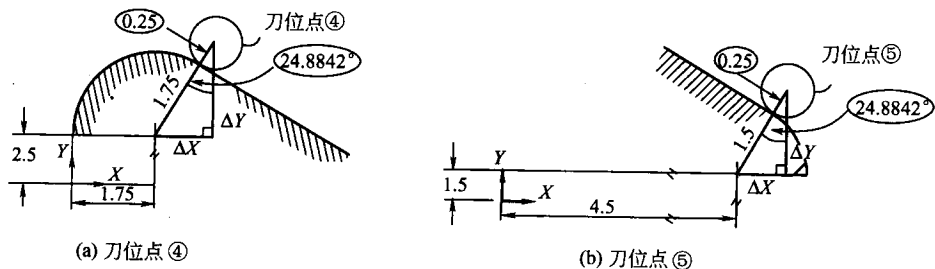


图 3-15 刀位点④和⑤的几何尺寸

表 3-4 刀位点轨迹的计算结果

刀位点位置	$\Delta X$	$\Delta Y$	X	Y	I	J
进刀点②			-0.25	-0.25		
圆弧起点③			-0.25	2.5	2.0	0
圆弧终点④	$(1.75 + 0.25) \times \sin(24.8842^\circ) = 0.8416$	$2 \times \cos(24.8842^\circ) = 1.5875$	$0.8416 + 1.75 = 2.5916$	$2.5 + 1.8143 = 4.3143$		
圆弧起点⑤	$(1.5 + 0.25) \times \sin(24.8842^\circ) = 0.7364$	$1.75 \times \cos(24.8842^\circ) = 1.5875$	$4.5 + 0.7364 = 5.2364$	$1.5 + 1.5875 = 3.0875$	-0.7364	-0.5875
圆弧终点⑥			4.5	-0.25		
退刀点⑦			-0.25	-0.25		

## 第三节 非圆曲线节点坐标的计算

### 一、非圆曲线节点坐标的计算步骤

数控加工中把除直线与圆弧之外可以用数学方程式表达的平面轮廓曲线,称为非圆曲线。其数学表达式的形式可以是以  $y = f(x)$  的直角坐标的形式给出,也可以是以  $\rho = \rho(\theta)$  的极坐标形式给出,还可以是以参数方程的形式给出。通过坐标变换,后面两种形式的数学表达式,可以转换为直角坐标表达式。非圆曲线类零件包括平面凸轮类、样板曲线、圆柱凸轮以及数控车床上加工的各种以非圆曲线为母线的回转体零件等。其数值计算过程,一般可按以下步骤进行。

①选择插补方式。即应首先决定是采用直线段逼近非圆曲线,还是采用圆弧段或抛物线等二次曲线逼近非圆曲线。

②确定编程允许误差,即应使  $\delta \leq \delta_{允}$ 。

③选择数学模型,确定计算方法。非圆曲线节点计算过程一般比较复杂。目前生产中采用的算法也较多。在决定采取什么算法时,主要应考虑的因素有两条:其一是尽可能按等误差的条件,确定节点坐标位置,以便最大程度地减少程序段的数目;其二是尽可能寻找一种简便的算法,简化计算机编程,省时快捷。

④根据算法,画出计算机处理流程图。

⑤用高级语言编写程序,上机调试程序,并获得节点坐标数据。

### 二、常用的计算方法

用直线段逼近非圆曲线,目前常用的节点计算方法有等间距法、等程序段法、等误差法和伸缩步长法;用圆弧段逼近非圆曲线,常用的节点计算方法有曲率圆法、三点圆法、相切圆法和双圆弧法。以下分别予以介绍。

#### (1) 等间距法直线段逼近

①基本原理 等间距法就是将某一坐标轴划分成相等的间距。如图 3-16 所示,沿  $x$  轴方向取  $\Delta x$  为等间距长,根据已知曲线的方程  $y = f(x)$ ,可由  $x_i$  求得  $y_i$ ,  $x_{i+1} = x_i + \Delta x$ ,  $y_{i+1} = f(x_i + \Delta x)$ 。如此求得的一系列点就是节点。

由于要求曲线  $y = f(x)$  与相邻两节点连线间的法向距离小于允许的程序编制误差  $\delta_{允}$ ,  $\Delta x$  值不能任意设定。一般先取  $\Delta x = 0.1$  进行试算。实际处理时,并非任意相邻两点间的误差都要验算,对于曲线曲率半径变化较小处,只需验算两节点间距离最长处的误差,而对曲率半径变化较大处,应验算曲率半径较小处的误差,通常由轮廓图睦接观察确

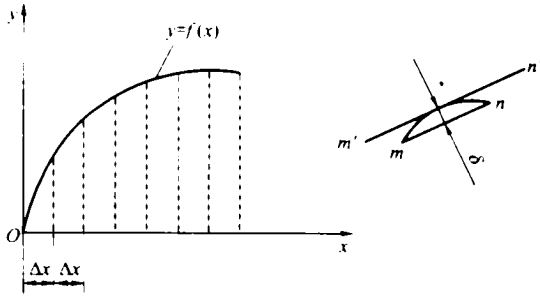


图 3-16 等间距法直线逼近

定校验的位置。

②误差校验方法 设需校验  $mn$  曲线段,点  $m(x_m, y_m)$  和点  $n(x_n, y_n)$  已求出,则  $m$ 、 $n$  两点的直线方程为

$$\frac{x - x_n}{y - y_n} = \frac{x_m - x_n}{y_m - y_n}$$

令  $A = y_m - y_n$ ,  $B = x_n - x_m$ ,  $C = y_m x_n - x_m y_n$

则  $Ax + By = C$  即为过  $mn$  两点的直线方程,距  $mn$  直线为  $\delta$  的等距线  $m'n'$  的直线方程可表示如下

$$Ax + By = C \pm \delta \sqrt{A^2 + B^2}$$

式中,当所求直线  $m'n'$  在  $mn$  上边时,取 '+' 号,在  $mn$  下边时取 '-' 号。 $\delta$  为  $m'n'$  与  $mn$  两直线的距离。

联立方程求解

$$\begin{cases} Ax + By = C \pm \delta \sqrt{A^2 + B^2} \\ y = f(x) \end{cases}$$

求解时,  $\delta$  的选择的两种方法:其一为取  $\delta$  为未知,利用联立方程组求解只有惟一解的条件,可求出实际误差  $\delta_{\text{实}}$ ,然后用  $\delta_{\text{实}}$  与  $\delta_{\text{允}}$  进行比较,以便修改间距值;其二为取  $\delta = \delta_{\text{允}}$ ,若方程无解,则  $m'n'$  与  $y = f(x)$  无交点,表明  $\delta_{\text{实}} < \delta_{\text{允}}$ 。

(2)等程序段法直线逼近的节点计算

①基本原理 等程序段法就是使每个程序段的线段长度相等。如图 3-17 所示,由于零件轮廓曲线  $y = f(x)$  的曲率各处不等,因此首先应求出该曲线的最小率半径  $R_{\text{min}}$ ,由  $R_{\text{min}}$  及  $\delta_{\text{允}}$  确定允许的步长  $l$ ,然后从曲线起点  $a$  开始,按步长  $l$  依次截取曲线,得  $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、...点,则  $ab = bc = \dots = l$  即为所求各直线段。

②计算步骤

a. 求最小曲率半径  $R_{\text{min}}$ 。设曲线方程为  $y = f(x)$  则其曲率半径为

$$R = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''}$$

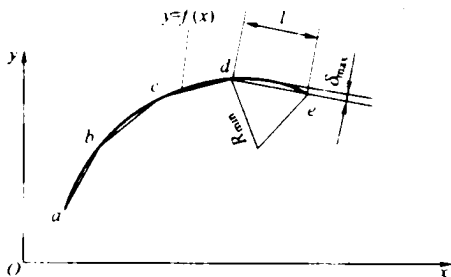


图 3-17 等程序段法直线段逼近

取  $\frac{dR}{dx} = 0$

即  $3y'y''^2 - (1 + y'^2)y''' = 0$

根据  $y = f(x)$  依次求出  $y'$ 、 $y''$ 、 $y'''$ 、 $x$  利用上式即得  $R_{min}$ 。

b. 确定允许步长  $l$ 。以  $R_{min}$  为半径作的圆弧如图 3-17 所示,由几何关系可知

$$l = 2\sqrt{R_{min}^2 - (R_{min} - \delta_{允})^2} \approx 2\sqrt{2R_{min}\delta_{允}}$$

c. 求出曲线起点  $a$  的坐标  $(x_a, y_a)$ , 并以该点为圆心, 以  $l$  为半径, 所得圆方程与曲线方程  $y = f(x)$  联立求解, 可求得下一个点  $b$  的坐标  $(x_b, y_b)$ , 再以  $b$  点为圆心进一步求出  $c$  点直到求出所有节点。

求解方法

$$\begin{cases} (x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = l^2 \\ y = f(x) \end{cases} \quad \text{可求出}(x_b, y_b)$$

$$\begin{cases} (x - x_b)^2 + (y - y_b)^2 = l^2 \\ y = f(x) \end{cases} \quad \text{可求出}(x_c, y_c)$$

.....

### (3) 等误差法直线段逼近的节点计算

①基本原理 设所求零件的轮廓方程为  $y = f(x)$ , 如图 3-18 所示, 首先求出曲线起点  $a$  的坐标  $(x_a, y_a)$ , 以点  $a$  为圆心, 以  $\delta_{允}$  为半径作圆, 与该圆和已知曲线公切的直线, 切点分别为  $P(x_p, y_p)$ 、 $T(x_T, y_T)$ , 求出此切线的斜率, 过点  $a$  作  $PT$  的平行线交曲线于  $b$  点, 再以  $b$  点为起点用上法求出  $c$  点, 依次进行, 这样即可求出曲线上的所有节点。由于两平行线间距离恒为  $\delta_{允}$ , 因此, 任意相邻两节点间逼近误差为等误差。

②计算步骤如下。

a. 以  $a(x_a, y_a)$  起点为圆心,  $\delta_{允}$  为半径作圆 则

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = \delta_{允}^2$$

b. 求圆与曲线公切线  $PT$  的斜率, 用以下方程联立求  $x_T, y_T, x_p, y_p$

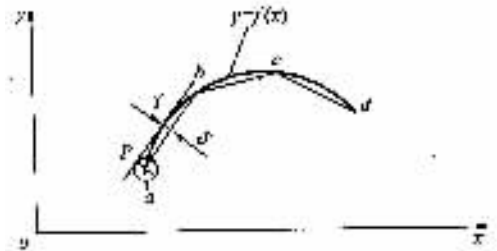


图 3-18 等误差法直线段逼近

$$\begin{cases} \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P} = -\frac{x_P - x_A}{y_P - y_A} & (\text{圆切线方程}) \\ y_P = \sqrt{\delta^2 - (x_P - x_A)^2} + y_A & (\text{圆方程}) \\ \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P} = f'(x_T) & (\text{曲线切线方程}) \\ y_T = f(x_T) & (\text{曲线方程}) \end{cases}$$

则  $k = \frac{y_T - y_P}{x_T - x_P}$

c. 过点  $a$  与直线  $PT$  平行的直线方程为

$$y - y_a = k(x - x_a)$$

d. 与曲线联立求解  $b$  点  $(x_b, y_b)$

$$\begin{cases} y = y_a + k(x - x_a) \\ y = f(x) \end{cases}$$

e. 按以上步骤顺次求得  $c, d, \dots$  各节点坐标。

③特点 各程序段误差  $\delta$  均相等, 程序段数目最少。但计算过程比较复杂, 必须由计算机辅助才能完成计算。在采用直线逼近非圆曲线的拟合方法中, 是一种较好的拟合方法。

#### (4) 曲率圆法圆段逼近的节点计算

①基本原理。已知轮廓曲线  $y = f(x)$  如图 3-19 所示, 曲率圆法是用彼此相交的圆弧逼近非圆曲线。其基本原理是从曲线的起点开始, 作与曲线内切的曲率圆, 求出曲率圆的中心。以曲率圆中心为圆心, 以曲率圆半径加(减)  $\delta_{允}$  为半径, 所作的圆(偏差圆)与曲线  $y = f(x)$  的交点为下一个节点, 并重新计算曲率圆中心, 使曲率圆通过相邻两节点。重复以上计算即可求出所有节点坐标及圆弧的圆心坐标。

#### ②计算步骤

a. 以曲线起点  $(x_n, y_n)$  开始作曲率圆

圆心坐标 
$$\zeta_n = x_n - y'_n \frac{1 + (y'_n)^2}{y''_n}$$

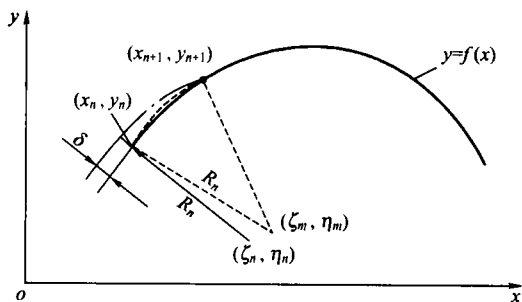


图 3-19 曲率圆法圆弧段逼近

$$\eta_n = y_n + \frac{1 + (y'_n)^2}{y''_n}$$

$$R_n = \frac{[1 + (y'_n)^2]^{3/2}}{y''_n}$$

b. 偏差圆方程与曲线方程联立求解

$$\begin{cases} (x - \zeta_n)^2 + (y - \eta_n)^2 = (R_n \pm \delta)^2 \\ y = f(x) \end{cases}$$

得交点  $(x_{n+1}, y_{n+1})$

c. 求过  $(x_n, y_n)$  和  $(x_{n+1}, y_{n+1})$  两点, 半径为  $R_n$  的圆的圆心

$$\begin{cases} (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = R_n^2 \\ (x - x_{n+1})^2 + (y - y_{n+1})^2 = R_n^2 \end{cases}$$

得交点  $\zeta_m, \eta_m$ , 该圆即为逼近圆。

d. 重复上述步骤, 依次求得其他逼近圆。

(5) 三点圆法圆弧段逼近的节点计算

三点圆法是在等误差直线段逼近求出各节点的基础上, 通过连续三点作圆弧, 并求出圆心点的坐标或圆的半径。如图 3-20 所示, 首先从曲线起点开始, 通过  $P_1, P_2, P_3$  三点作圆。圆方程的一般表达形式为

$$x^2 + y^2 + Dx + Ey + F = 0$$

其圆心坐标  $x_0 = -\frac{D}{2}, y_0 = -\frac{F}{2}$

半径  $R = \frac{\sqrt{D^2 + E^2 - 4F}}{2}$

通过已知点  $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$  的圆, 其

$$D = \frac{y_1(x_3^2 + y_3^2) - y_3(x_1^2 + y_1^2)}{x_1y_2 - x_3y_2}$$

$$E = \frac{x_3(x_2^2 + y_2^2) - x_1(x_2^2 + y_2^2)}{x_1y_2 - x_3y_2}$$



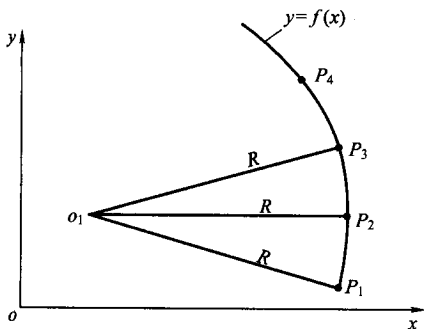


图 3-20 三点圆法圆段逼近

$$F = \frac{y_3 x_2 (x_1^2 + y_1^2) - y_1 x_2 (x_3^2 + y_3^2)}{x_1 y_2 - x_3 y_2}$$

为了减少圆弧段逼近的数目,应使圆段逼近误差  $\delta = \delta_{允}$ ,为此应作进一步的计算。设已求出连续三个节点  $P_1, P_2, P_3$  处曲线的曲率半径分别为  $R_{P1}, R_{P2}, R_{P3}$ ,通过  $P_1, P_2, P_3$  三点的圆的半径为  $R$ ,取

$$R_p = \frac{R_{p1} + R_{p2} + R_{p3}}{3} \text{ 按 } \delta = \frac{R\delta_{允}}{|R - R_p|} \text{ 算出 } \delta \text{ 值,按 } \delta \text{ 值再进行一次等误差直线段逼近}$$

重新求得  $P_1, P_2, P_3$  三点,用此三点作一圆弧,该圆弧即为满足  $\delta = \delta_{允}$  条件的圆弧。

### (6) 相切圆法圆弧段逼近的节点计算

①基本原理 如图 3-21 所示,过曲线上  $A, B, C, D$  点作曲线的法线,分别交于  $M, N$  点,以  $M$  点为圆心, $AM$  为半径作圆  $M$ ,以  $N$  点为圆心, $ND$  为半径作圆  $N$ ,若使圆  $M$  和圆  $N$  相切,必满足

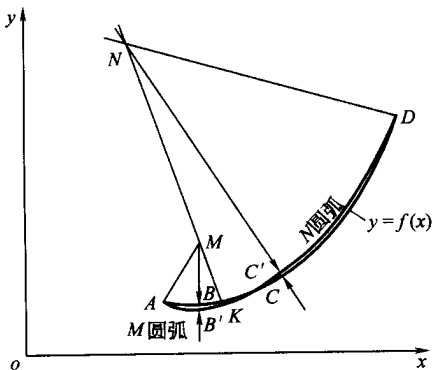


图 3-21 相切圆法圆弧段逼近

$$\overline{AM} + \overline{MN} = \overline{DN} \quad \text{切点为 } k$$

由图  $BB'$  与  $CC'$  应为两段圆弧与曲线逼近误差的最大值,应满足

$$\overline{BB'} = |\overline{MA} - \overline{MB}| = \delta_{允}$$

$$\overline{CC'} = |\overline{ND} - \overline{NC}| = \delta_{允}$$

由以上条件确定的  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三点可保证： $M$ 、 $N$  圆相切条件； $\delta_{允}$  条件； $M$ 、 $N$  圆弧在  $A$ 、 $D$  点分别与曲线相切条件。

确定  $B$ 、 $C$ 、 $D$  后，再以  $D$  点为起点，确定  $E$ 、 $F$ 、 $G$  点，依次进行，即可实现整个曲线段的相切圆弧法逼近。

### ② 计算方法

a. 自起点  $A$  开始，任意选定  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三点，求圆心坐标，点  $A$  和点  $B$  处曲线的法线方程式为

$$(x - x_A) + k_A(y - y_A) = 0$$

$$(x - x_B) + k_B(y - y_B) = 0$$

式中  $k_A$ 、 $k_B$ ——曲线在  $A$  和  $B$  处的斜率， $k = dy/dx$ 。

解上两式得两法线交点  $M$  的坐标为

$$x_M = \frac{k_A x_B - k_B x_A + k_A k_B (y_B - y_A)}{k_A - k_B}$$

$$y_M = \frac{(x_A - x_B) + (k_A y_A - k_B y_B)}{k_A - k_B}$$

同理可求  $N$  点坐标为

$$x_N = \frac{k_C x_D - k_D x_C + k_C k_D (y_D - y_C)}{k_C - k_D}$$

$$y_N = \frac{(x_C - x_D) + (k_C y_C - k_D y_D)}{k_C - k_D}$$

### b. $B$ 、 $C$ 、 $D$ 三点坐标值计算

$$\sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} + \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2} = \sqrt{(x_D - x_N)^2 + (y_D - y_N)^2}$$

$$|\sqrt{(x_A - x_M)^2 + (y_A - y_M)^2} - \sqrt{(x_B - x_M)^2 + (y_B - y_M)^2}| = \delta_{允}$$

$$|\sqrt{(x_D - x_N)^2 + (y_D - y_N)^2} - \sqrt{(x_C - x_N)^2 + (y_C - y_N)^2}| = \delta_{允}$$

式中  $y_A = f(x_A)$ ， $y_B = f(x_B)$ ， $y_C = f(x_C)$ ， $y_D = f(x_D)$ 。

用迭代法解此联立方程组，可求出  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三点坐标。

c.  $B$ 、 $C$ 、 $D$  求出后，利用上式求圆心  $M$  和  $N$  坐标，并求出  $R_M$ 、 $R_N$ 。

③特点 在圆弧逼近零件轮廓的计算中，采用相切圆法，每次可求得两个彼此相切的圆弧，由于在前一个圆弧的起点处与后一个终点处均可保证与轮廓曲线相切，因此，整个曲线是由一系列彼此相切的圆弧逼近实现的。可简化编程，但计算过程繁琐。

此外，还有双圆弧法逼近非圆曲线。该法在数学处理上也是用连续相切的圆弧，单计算过程比相切圆弧法要简单得多。通过适当的方式控制节点的位置，可以保证双圆弧逼近各区段插补误差小于编程允差。由于数学描述简单，这就给求解节点坐标的程序编制带来极大方便，因此，在圆弧段逼近非圆曲线中，它是一种简便易行的方法。

## 第四节 列表曲线型值点坐标的计算

实际零件的轮廓形状,除了可以用直线、圆弧或其他非圆曲线组成之外,有些零件图的轮廓形状是通过实验或测量的方法得到的。零件的轮廓数据在图样上是以坐标点的表格形式给出,这种由列表点(又称为型值点)给出的轮廓曲线称为列表曲线。列表轮廓零件在用传统的工艺方法加工时,其加工质量完全取决于钳工的技术水平,且生产效率极低。目前广泛采用数控加工,但在加工程序的编制方面遇到了较大的困难,这主要是由于数学方程的描述与数控加工对列表曲线轮廓逼近的一般要求之间往往存在矛盾。也就是说,要获得比较理想的拟合效果,其数学处理过程相应会变得比较复杂。然而与非圆曲线比较,列表曲线在数据输入的形式上又比较简单,除了给出各列表点的坐标数据之外,只需再给出端点条件,将这些数据输入到计算机中,用事先编制好的可以处理列表曲线的计算机处理程序进行自动处理,很快便可获得结果。

在列表曲线的数学处理方面,常用的方法有牛顿插值法、三次样条曲线拟合、圆弧样条拟合与双圆弧样条拟合等。由于以上各种拟合方法在使用时,往往存在着某种局限性,目前处理列表曲线的方法通常是采用二次拟合法,即在对列表曲线进行拟合时,第一次先选择直线方程或圆方程之外的其他数学方程式来拟合列表曲线,称为第一次拟合,然后根据编程允差的要求,在已给定的各相邻列表点之间,按照第一次拟合时的数学方程(称为差值方程)进行插点加密求得新的节点。目前比较一致的意见是采用三次参数样条函数对列表曲线进行第一次拟合,然后使用双圆弧样条进行第二次逼近。

为了在给定的列表点之间得到一条光滑的曲线,对列表曲线逼近一般有以下要求。

① 方程式表示的零件轮廓必须通过列表点。

② 方程式给出的零件轮廓与列表点表示的轮廓凹凸性应一致,即不应在列表点的凹凸性之外再增加新的拐点。

③ 光滑性。为使数学描述不过于复杂,通常一个列表曲线要用许多参数不同的同样方程式来描述,希望在方程式的两两连接处有连续的一阶导数或二阶导数,若不能保证一阶导数连续,则希望连接处两边一阶导数的差值应尽量小。

需要说明的是,在对列表轮廓处理的过程中,有一个非常重要的概念,就是光顺处理,“光”的意思是光滑,“顺”的意思是顺眼。尽管在数学处理时,可以满足轮廓逼近的一般要求,但若给出的列表点存在某种不足,仍会给加工后的零件带来某种误差而造成不光顺。这主要由于列表数据多数是通过实验或测量方法获得,故必然会产生某种误差,而且在设计数据的多次传递过程中,也会产生人为误差,使得列表点中,产生若干个“坏点”。若首先对输入的列表数据进行检查,找出坏点,予以修正,则可达到光顺处理的目的。

## 第五节 数控车床使用假想刀尖点时偏置计算

在数控车削加工中,为了对刀的方便,总是以“假想刀尖”点来对刀。所谓假想刀尖点,是指图 3-22(a)中  $M$  点的位置。由于刀尖圆弧的影响,仅仅使用刀具长度补偿,而不对刀尖圆弧半径进行补偿,在车削锥面或圆弧面时,会产生欠切的情况,如图 3-23 所示。目前,较高级的车床控制系统,不仅具有刀尖圆弧半径补偿功能,而且还可以根据刀尖的实际状况,选择刀位点的位置,编程和补偿都十分方便。大多数车床采用简易数控系统,不具备半径补偿功能。因此,当零件精度要求较高且又有圆锥或圆弧表面时,可以按刀尖圆弧中心编程,也可以在局部进行补偿计算。图 3-22(a)是车削锥体表面时由于刀尖圆弧半径  $r_{\text{刀}}$  引起的刀位补偿量计算简图。当采用在  $Z$  向(纵向)与  $X$  向(径向)同时进行刀具位置补偿时,实际刀刃与工件接触点  $A$  移到编程时刀尖设定点  $M$  上,  $r_{\text{刀}}$  的补偿量可按下式计算。

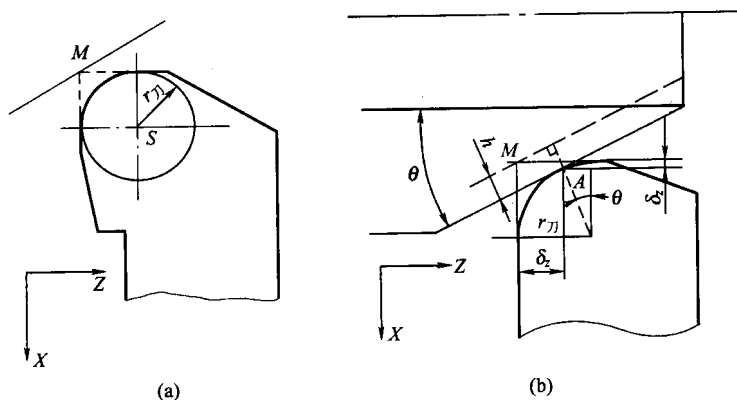


图 3-22 假想刀尖点编程时的补偿计算

$$\delta_z = r_{\text{刀}} - r_{\text{刀}} \sin \theta = r_{\text{刀}}(1 - \sin \theta)$$

$$\delta_x = r_{\text{刀}} - r_{\text{刀}} \cos \theta = r_{\text{刀}}(1 - \cos \theta)$$

也可不用这种  $Z$  向和  $X$  向同时补偿的方法,而只在  $Z$  向或  $X$  向进行补偿。由图 3-22(b)可知,因为

$$h = \sqrt{2} r_{\text{刀}} \cos(45^\circ - \theta) - r_{\text{刀}} = r_{\text{刀}}(\sin \theta + \cos \theta - 1)$$

所以  $Z$  向或  $X$  向的补偿量分别按下面公式计算

$$\Delta Z = \frac{h}{\sin \theta} = r_{\text{刀}} \left( 1 - \tan \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\Delta X = \frac{h}{\cos \theta} = r_{\text{刀}} \left( \frac{2}{1 + \cos(\theta/2)} \right)$$

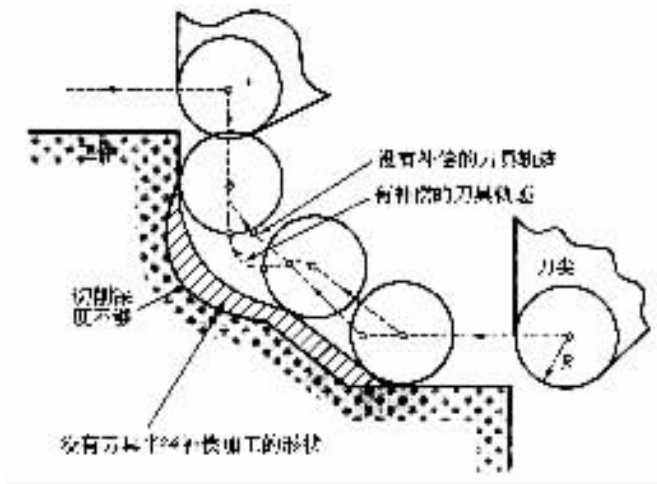


图 3-23 欠切与过切现象

## 第六节 简单立体型面零件的数值计算

三坐标数控机床加工立体型面零件,可由加工数个平面曲线所叠成。因此,平面零件的数值计算方法,可以在三坐标数控铣床加工立体零件中应用。简单立体型面零件是指以直线为母线沿生成线运动所形成的立体型面。如图 3-24 所示,母线是一与  $z$  轴夹角为  $\theta$  的直线,生成线是椭圆,即圆锥体是简单立体型面的例子。这类零件,可在三坐标数控铣床上用球头刀或圆弧盘铣刀采用“行切法”加工,这时刀具沿  $xy$  平面运动一圈,在零件轮廓上加工出一个平面曲线,然后在  $z$  方向移动一个行距  $\Delta z$ ,再加工出一个新的平面曲线,直至整个表面加工完了。

就加工每个平面曲线来说,其数值计算方法与平面曲线零件的数值计算方法相同。对立体型面来说,还需解决以下两个问题。

### (1) 行距 $\Delta z$ 的确定

用球头刀或圆弧盘铣刀加工立体型面零件,刀痕在行间构成了被称为切残量的表面不平度  $h$  (见图 3-25)。若允许的表面不平度为  $h_{允}$ , 则

$$S = 2\sqrt{2Rh_{允} - h_{允}^2} \approx \sqrt{2Rh_{允}}$$

所以

$$\Delta z = S \sin \varphi = 2\sqrt{2Rh_{允}} \sin \varphi$$

式中  $\varphi$ ——母线与  $xy$  平面的夹角,即  $\varphi = 90^\circ - \theta$ 。

### (2) 球头刀半径 $R$ 或圆弧盘铣刀圆弧半径 $R$ 在加工截面上的投影 $r$ 的计算

由图 3-25 可知,在加工截面内计算刀具中心轨迹时,其刀具半径不是  $R$  而是  $r$ ,  $r$  与球头刀半径  $R$  的关系

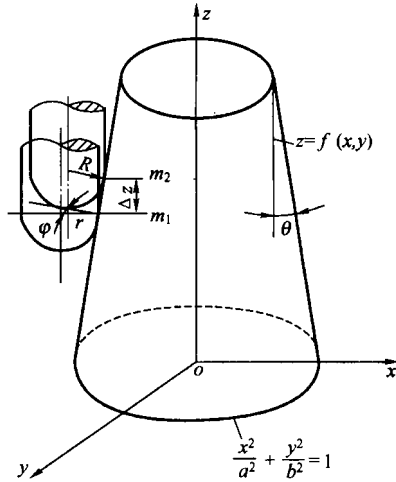


图 3-24 椭圆锥体的行切法加工

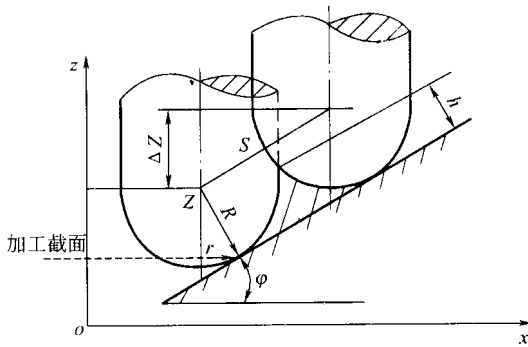


图 3-25 行距与切残量的关系

$$r = R \sin \varphi$$

球头刀球心或圆弧盘铣刀的圆心平面距加工表面距离

$$Z = R \cos \varphi$$

圆弧盘铣刀中心轨迹可按下式计算

$$X_D = x + (R \sin \varphi + r_{\text{盘}}) \sin \Psi$$

$$Y_D = y + (R \sin \varphi + r_{\text{盘}}) \cos \Psi$$

式中  $x, y$ ——零件轮廓节点坐标；

$\Psi$ ——零件轮廓法线在  $xy$  平面上投影与  $y$  轴的夹角；

$r_{\text{盘}}$ ——圆弧盘铣刀  $R$  圆弧中心的半径值。

若零件轮廓节点处的法线的方向角为  $\alpha, \beta, \gamma$ ，法线向量在  $xy$  平面投影与  $y$  轴夹角为  $\Psi$  则

$$X_D = x + R \cos \alpha + \gamma_{\text{盘}} \sin \Psi$$

$$Y_D = y + R \cos \beta + \gamma_{\text{盘}} \cos \Psi$$

$$Z_D = z + R \cos \gamma$$

数控机床加工简单立体型面零件时,数控系统要有三坐标控制功能,但只要有两坐标连续控制(两坐标联动)就可以加工平面曲线。刀具沿  $z$  方向运动时,不要求  $x, y$  方向也同时运动。这种用行切法加工立体型面时,三坐标运动、两坐标联动的加工编程方法称为两轴半联动加工。

## 第四章 数控车削加工编程

### 第一节 数控车削编程概述

#### 一、数控车削的编程特点

##### (1) 数控车削加工的内容

数控车削加工包括端面车削、外圆柱面车削、内圆柱面的车削(镗孔)、钻孔加工、螺纹加工、复杂外形轮廓面车削等,如图4-1所示。

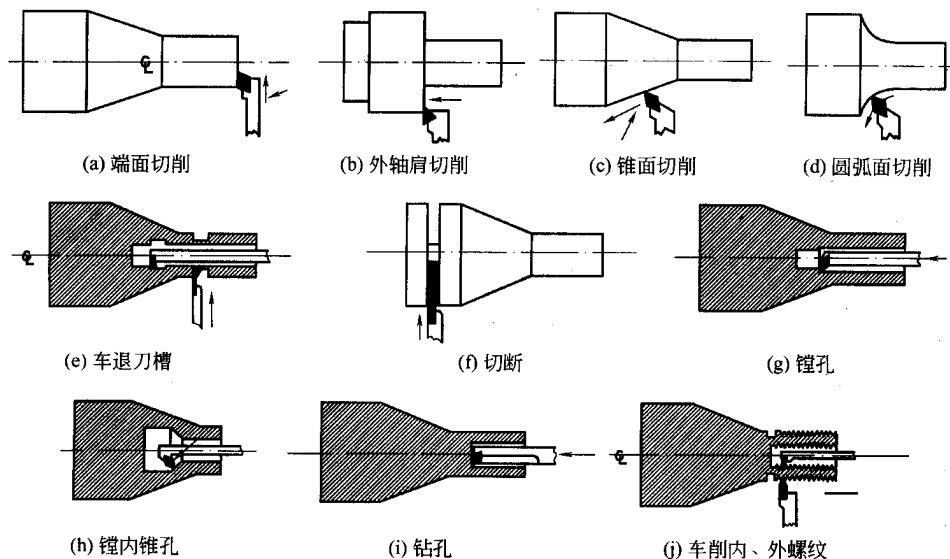


图4-1 车削加工的主要内容

##### (2) 数控车削加工的编程特点

①在一个程序段中,根据图样上标注的尺寸,可以采用绝对值编程或增量值编程,也可以采用混合编程。一般情况下,利用自动编程软件编程时,通常采用绝对值编程。



②被加工零件的径向尺寸在图样上和测量时,一般用直径值表示。所以采用直径尺寸编程更为方便。

③由于车削加工常用棒料或锻料作为毛坯,加工余量较大,为简化编程,数控装置常具备不同形式的固定循环,可进行多次重复循环切削。

④编程时,认为车刀刀尖是一个点,而实际上为了提高刀具寿命和工件表面质量,车刀刀尖常磨成一个半径不大的圆弧,为提高工件的加工精度,编制圆头刀程序时,需要对刀具半径进行补偿。大多数数控车床都具有刀具半径自动补偿功能(G41、G42),这类数控车床可直接按工件轮廓尺寸编程。

## 二、车床数控系统的功能与指令代码

数控系统是数控机床的核心。数控机床根据功能和性能要求,配置不同的数控系统。系统不同,其指令代码也有差别,因此,编程时应按所使用数控系统代码的编程规则进行编程。

数控车床常用的功能指令有准备功能 G、辅助功能 M、刀具功能 T、主轴转速功能 S 和进给功能 F。几种常用的典型数控车削系统的 G 功能代码见表 4-1~表 4-4,供读者学习参考。

表 4-1 SIMENS 802S/C 系统常用指令

路径数据		暂停时间	G4
绝对/增量尺寸	G90 ,G91	程序结束	M02
公制/英制尺寸	G71 ,G70	主轴运动	
半径/直径尺寸	G22 ,G23	主轴速度	S
可编程零点偏置	G158	旋转方向	M03/M04
可设定零点偏置	G54 ~ G57 ,G500 ,G53	主轴速度限制	G25 ,G26
轴运动		主轴定位	SPOS
快速直线运动	G0	特殊车床功能	
进给直线插补	G1	恒速切削	G96/G97
进给圆弧插补	G2/G3	圆弧倒角/直线倒角	CHF/RND
中间点的圆弧插补	G5	刀具及刀具偏置	

路径数据		暂停时间	G4
定螺距螺纹加工	G33	刀具	T
接近固定点	G75	刀具偏置	D
回参考点	G74	刀具半径补偿先择	G41 ,G42
进给率	F	转角处加工	G450 ,G451
准确停/连续路径加工	G9 ,G60 ,G64	取消刀具半径补偿	G40
在准确停时的段转换	G601/G602	辅助功能	M

表 4-2 华中世纪星 HNC-21/22T 数控车系统的 G 代码

代码	组别	功 能	代码	组别	功 能
G00	01	快速定位	G57	11	坐标系选择 4
G01		直线插补	G58		坐标系选择 5
G02		圆弧插补( 顺时针 )	G59		坐标系选择 6
G03		圆弧插补( 逆时针 )	G65	调用宏指令	
G04	00	暂停	G71	06	外径/内径车削复合循环
G20	08	英制输入	G72		端面车削复合循环
G21		米制输入	G73		闭环车削复合循环
G28	00	参考点返回检查	G76		螺纹车削复合循环
G29		参考点返回	G80		外径/内径车削固定循环
G32	01	螺纹切削	G81		端面车削固定循环
G36	17	直径编程	G82		螺纹车削固定循环
G37		半径编程	G90		13
G40	09	取消刀尖半径补偿	G91	相对编程	
G41		刀尖半径左补偿	G92	00	工件坐标系设定
G42		刀尖半径右补偿	G94	14	每分钟进给
G54	11	坐标系选择 1	G95		每转进给
G55		坐标系选择 2	G96	16	恒线速度切削
G56		坐标系选择 3	G97		恒转速切削

表 4-3 FANUC Oi-T 系统常用 G 指令

G 代码			组	功 能	G 代码			组	功 能
A	B	C			A	B	C		
G00	G00	G000	01	快速定位	G70	G70	G72	00	精加工循环
G01	G01	G01		直线插补(切削进给)	G71	G71	G73		外圆粗车循环
G02	G02	G02		圆弧插补(顺时针)	G72	G72	G74		端面粗车循环
G03	G03	G03		圆弧插补(逆时针)	G73	G73	G75		多重车削循环
G04	G04	G04	00	暂停	G74	G74	G76	00	排屑钻端面孔
G10	G10	G10		可编程数据输入	G75	G75	G77		外径/内径钻孔循环
G11	G11	G11		可编程数据输入方式取消	G76	G76	G78		多头螺纹循环
G20	G20	G70	06	英制输入	G80	G80	G80	10	固定钻循环取消
G21	G21	G71		米制输入	G83	G83	G83		钻孔循环
G27	G27	G27	00	返回参考点检查	G84	G84	G84	10	攻丝循环
G28	G28	G28		返回参考位置	G85	G85	G85		正面镗循环
G32	G33	G33	01	螺纹切削	G87	G87	G87	10	侧钻循环
G34	G34	G34		变螺距螺纹切削	G88	G88	G88		侧攻丝循环
G36	G36	G36	00	自动刀具补偿 X	G89	G89	G89	10	侧镗循环
G37	G37	G37		自动刀具补偿 Z	G90	G77	G20		外径/内径车削循环
G40	G40	G40	07	取消刀尖半径补偿	G92	G78	G21	01	螺纹车削循环
G41	G41	G41		刀尖半径左补偿	G94	G79	G24		端面车削循环
G42	G42	G42		刀尖半径右补偿	G96	G96	G96		02
G50	G92	G92	00	坐标系或主轴最大速度设定	G97	G97	G97	恒表面切削速度控制取消	
G52	G52	G52	00	局部坐标系设定	G98	G94	G94	05	每分种进给
G53	G53	G53		机床坐标系设定	G99	G95	G95		每转进给
G54 ~ 59			14	选择工件坐标系 1 ~ 6	-	G90	G90	03	绝对值编程
G65	G64	G65	00	调用宏指令	-	G91	G91		增量值编程

表 4-4 为 FAGOR 8055T 系统常用的 G 功能

G 代码	功 能	G 代码	功 能
G00	快速定位	G16	用 2 个方向选择主平面
G01	直线插补	G17	主平面 X-Y 纵轴为 Z
G02	顺时针圆弧插补	G18	主平面 Z-X 纵轴为 Y
G03	逆时针圆弧插补	G19	主平面 Y-Z 纵轴为 X
G04	停顿/程序段准备停止	G20	定义工作区下限
G05	圆角过渡	G21	定义工作区上限
G06	绝对圆心坐标	G22	激活/取消工作区
G07	方角过渡	G28	第二主轴选择
G08	圆弧切于前一路径	G29	主轴选择
G09	三点定义圆弧	G30	主轴同步(偏移)
G10	图像镜像取消	G32	进给率“F”用作时间的倒函数
G11	图像相对于 X 轴镜像	G33	螺纹切削
G12	图像相对于 Y 轴镜像	G36	自动半径过渡
G13	图像相对于 Z 轴镜像	G37	切向入口
G14	图像相对于编程的方向镜像	G38	切向出口
G15	纵向轴的选择	G39	自动倒角连接
G40	取消刀具半径补偿	G77	从动轴
G41	左手刀具半径补偿	G77S	主轴速度同步
G42	右手刀具半径补偿	G78	从动轴取消
G45	切向控制	G78S	取消主轴同步
G50	受控圆角	G81	直线车削固定循环
G54 ~ G57	绝对零点偏置	G82	端面车削固定循环
G58	附加零点偏置	G83	钻削固定循环
G59	附加零点偏置	G84	圆弧车削固定循环
G60	轴向钻削/攻丝固定循环	G85	端面圆弧车削固定循环
G61	径向钻削/攻丝固定循环	G86	纵向螺纹切削固定循环
G62	纵向槽加工固定循环	G87	端面螺纹切削固定循环
G63	径向槽加工固定循环	G88	沿 X 轴开槽固定循环
G66	模式重复固定循环	G89	沿 Z 轴开槽固定循环

G 代码	功 能	G 代码	功 能
G68	沿 X 轴的余量切除固定循环	G90	绝对坐标编程
G69	沿 Z 轴的余量切除固定循环	G91	增量坐标编程
G70	以英寸为单位编程	G92	坐标预置/主轴速度限制
G71	以毫米为单位编程	G93	极坐标原点
G72	通用和特定缩放比例	G94	直线进给率 $\text{mm}(\text{in})/\text{min}$
G74	机床参考点搜索	G95	旋转进给率 $\text{mm}(\text{in})/\text{r}$
G75	探针运动直到接触	G96	恒速切削
G76	探针接触	G97	主轴转速为 $\text{r}/\text{min}$

从表中可以看出,对于同一 G 代码而言,不同的数控系统所代表的含义不完全一样;对于同一功能,不同的数控系统采用的代码也有差异。因此,在编程时应根据所使用的数控系统进行灵活运用。

### 三、数控车削编程中的有关问题

#### (1) 坐标系统

数控车床坐标系统分为机床坐标系和工作坐标系(编程坐标系)。无论哪种坐标系都规定与车床主轴轴线平行的方向为 Z 轴,且规定从卡盘中心至尾座预尖中心的方向为正方向。在水平面内与主轴轴线垂直的方向为 X 轴,且规定刀具远离主轴旋转中心的方向为正方向。

①机床坐标系 以机床原点为坐标系原点建立起来的 X、Z 轴直角坐标系称为机床坐标系。车床的机床原点为主轴旋转中心与卡盘后端面的交点。机床坐标系是制造和调整机床的基础,也是设置工作坐标系的基础,一般不允许随意变动。如图 4-2 所示。

②参考点 参考点是机床上的一个固定点。该点是刀具退离到一个固定不变的极限点(图 4-2 中点  $O'$  即为参考点),其位置由机械挡块或行程开关来确定。以参考点为原点,坐标方向与机床坐标方向相同建立的坐标系叫做参考坐标系,在实际使用中通常是以参考坐标系计算坐标值。

③工件坐标系(编程坐标系) 数控编程时应该首先确定工件坐标系和工件原点。零件在设计中有设计基准,在加工过程中有工艺基准,同时应尽量将工艺基准与设计基准统一,该基准点通常称为工件原点,以工件原点为坐标原点建立起来的 X、Z 轴直角坐标系称为工件坐标系。在车床上工件原点可以选择在工件的左或右端面上,即工件坐标系是将参考坐标系通过对刀平移得到的。(见图 4-3)。

#### (2) 加工路线与加工余量的关系

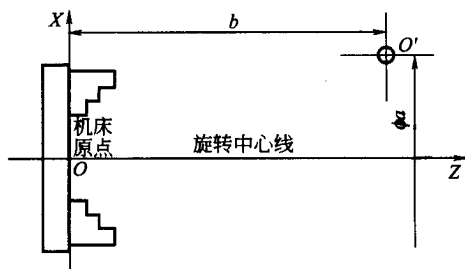


图 4-2 机床坐标系

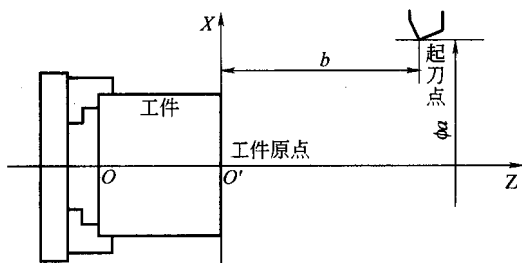


图 4-3 工件坐标系

如果在数控车床上加工含有锻、铸硬皮层的零件,且加工余量较大时,应注意程序的合理安排。

①对大余量毛坯进行阶梯切削时的加工路线 图 4-4 所示为车削大余量工件时的两种加工路线,图(a)是错误的阶梯路线,图(b)按 1~5 的顺序切削,每次切削所留的余量相等,是正确的阶梯切削路线。因为在同样背吃刀量的条件下,按图(a)方式加工所剩的余量过多。

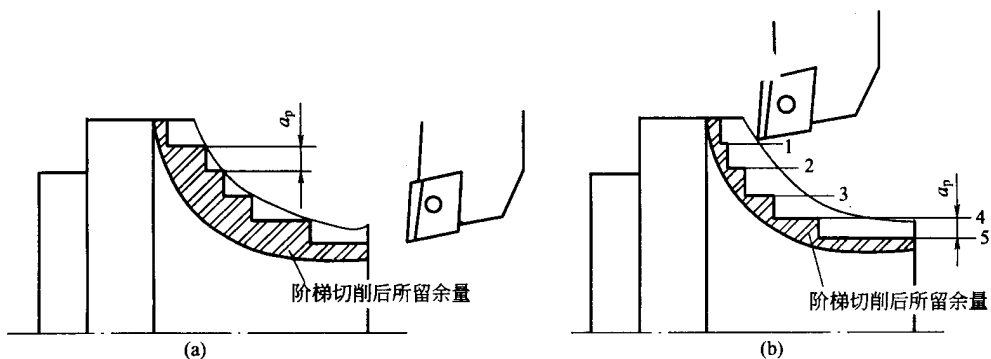


图 4-4 大余量毛坯的阶梯切削路线

根据数控加工的特点,还可以放弃常用的阶梯车削法,改用依次从轴向和径向进刀、顺毛坯轮廓走刀的路线,如图 4-5 所示。

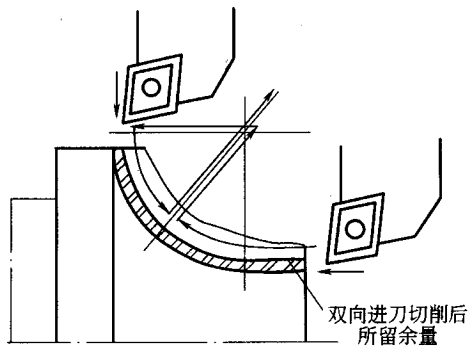


图 4-5 双向进刀的走刀路线

②分层切削时刀具的终止位置 当某表面的余量较多需分层多次走刀切削时,从第二刀开始就要注意防止走刀至终点时切削深度的猛增。如图 4-6 所示,设以  $90^\circ$  主偏刀分层切削外圆,合理的安排应是每一刀的切削终点依次提前一小段路离  $e$  (例如可取  $e = 0.1\text{mm}$ ) ;如果  $e = 0$  ,则每一刀都终止在同一轴向位置,主切削刃就可能受到瞬时的重负荷冲击。因此,当刀具的主偏角大于(等于)  $90^\circ$  时,应做出层层递退的安排,这对延长粗加工刀具的寿命是有利的。

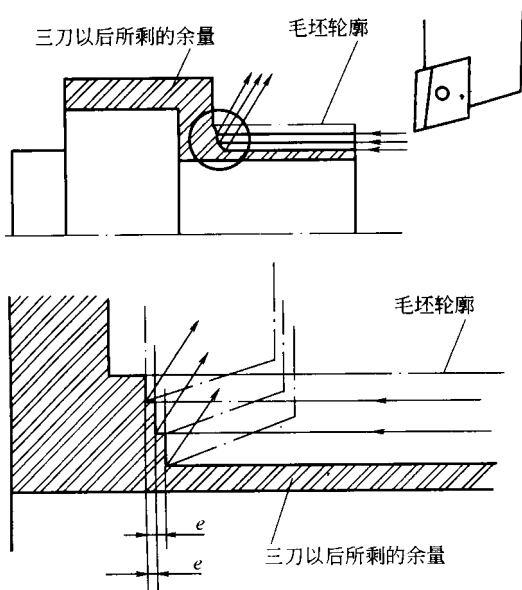


图 4-6 分层切削时刀具的终止位置

### (3) 加工参数的选择

数控车削加工参数的选择与普通车床类似,但由于数控车床是一次装夹,连续完成多道工序甚至是全部工序,因而选择加工参数时应注意以下几点。

①合理选择切削用量 切削用量选择是否合理,对于能否充分发挥机床潜力与刀具

切削性能,实现优质、高产、低成本和安全操作具有很重要的作用。车削用量的选择原则是:粗车时,首先考虑选择尽可能大的背吃刀量 $a_p$ ,可使走刀次数减少,增大进给量 $f$ 有利于断屑。

精车时,加工精度和表面粗糙度要求较高,加工余量不大且较均匀,因此选择精车的切削用量时,应着重考虑如何保证加工质量,并在此基础上尽量提高生产率。因此,精车时应选用较小(但不能太小)的背吃刀量 $a_p$ 和进给量 $f$ ,并选用性能高的刀具材料和合理的几何参数,以尽可能提高切削速度 $v$ 。

此外,在安排粗、精车削用量时,应注意机床说明书给定的允许切削用量范围,对于主轴采用交流变频调速的数控车床,由于主轴在低速时输出扭矩降低,尤其注意此时的切削用量选择。推荐的切削用量数据见表4-5,供应用时参考,详细内容请查阅切削用量手册。

表4-5 数控车削用量推荐值

工件材料	加工内容	切削用量 $a_p/\text{mm}$	切削速度 $v/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	进给量 $f/\text{m}\cdot\text{r}^{-1}$	刀具材料
$\sigma_b > 600\text{MPa}$ 碳素钢	粗加工	5~7	60~80	0.2~0.4	YT类
	粗加工	2~3	80~120	0.2~0.4	
	精加工	2~6	120~150	0.1~0.2	
	钻中心孔		500~800 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$		W18Cr4V
	钻孔		~30	0.1~0.2	
	切断(宽度<5mm)		70~110	0.1~0.2	YT类
铸 铁 200HBS 以下	粗加工		50~70	0.2~0.4	YC类
	精加工		70~100	0.1~0.2	
	切断(宽度<5mm)		50~70	0.1~0.2	

②合理选择刀具 刀具尤其是刀片的选择是保证加工质量、提高加工效率的重要环节。零件材质的切削性能、毛坯余量、工件的尺寸精度和表面粗糙度要求等都是选择刀片的重要依据。

从编程的角度讲,在选择刀具几何角度时,要特别注意主偏角和副偏角的选择,前者影响刀具的切削范围,后者则可对已加工轮廓造成干涉。图4-7所示为典型的车削刀具——陶瓷刀具。



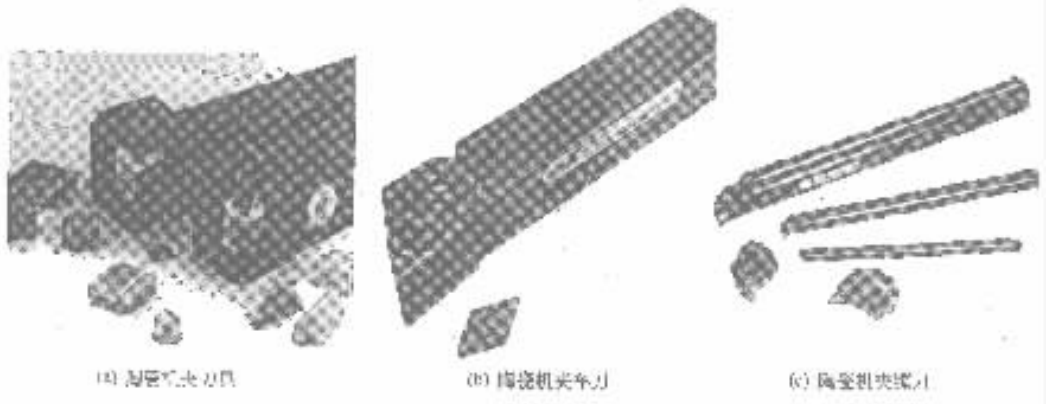


图 4-7 典型的车削刀具

## 第二节 基本功能及其指令的编程

### 一、尺寸系统

#### (1) 工件坐标系设定指令

工作坐标系设定指令是规定工作坐标系原点的指令,工件坐标系原点又称编程零点。数控编程时,必须先建立工件坐标系,用来确定刀具刀位点在坐标系中的坐标值。

①编程格式 工件坐标系设定指令的编程格式如下。

$G50(X \alpha)(Z \beta)$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为刀尖的起始点距工件原点在  $X$  向和  $Z$  向的尺寸。执行  $G50$  指令时,机床不动作,即  $X$ 、 $Z$  轴均不移动,系统内部对  $(\alpha, \beta)$  进行记忆,CRT 显示器上的坐标值发生了变化,这就相当于在系统内部建立了以工件原点为坐标原点的工作坐标系。

【例 4-1】 建立如图 4-8 所示零件的工件坐标系。

若选工作左端面  $O'$  点为坐标原点时,坐标系设定的编程为

$G50 X150.0 Z100.0$  ;

若选工件右端面  $O$  点为坐标原点时,坐标系设定的编程为

$G50 X150.0 Z20.0$ 。

②注意事项 有些数控机床用  $G92$  指令建立工件坐标系,如华中数控 HNC-21T 系统,有的数控系统则直接采用零点偏置指令( $G54 \sim G57$ )建立工件坐标系,如 SIMENS 802S/C 系统。

#### (2) 绝对和增量尺寸编程( $G90/G91$ )

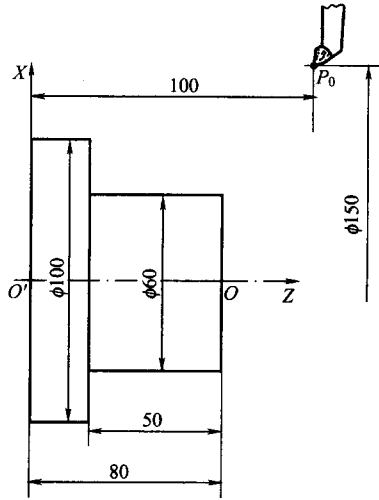


图 4-8 工件坐标系设定实例

$G90$  和  $G91$  指令分别对应着绝对位置数据输入和增量位置数据输入。 $G90$  表示程序段中的尺寸字为绝对坐标值,即从编程零点开始的坐标值。系统上电后,机床处在  $G90$  状态。 $G90$  编入程序时,以后所有输入的坐标值全部是以编程零点为基准的绝对坐标值,并且一直有效,直到在后面的程序段中由  $G91$ (增量位置输入数据)替代为止。

图 4-9 所示零件,轴向的相互位置采用相对尺寸标注,在编程时采用  $G91$  方式比较方便,而图 4-10 所示零件采用绝对尺寸标注,亦采用  $G90$  方式编程。

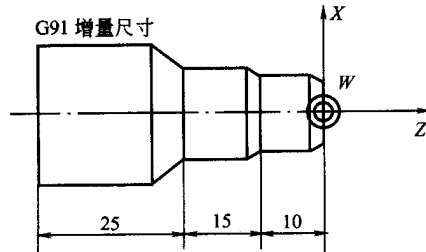


图 4-9 相对尺寸标注

注意:有些数控系统没有绝对和增量尺寸指令,当采用绝对尺寸编程时,尺寸字用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示;采用增量尺寸编程时,尺寸字用  $U$ 、 $V$ 、 $W$  表示。数控车床采用  $X$ 、 $Z$  和  $U$ 、 $W$  分别表示绝对和增量尺寸。

### (3) 公制尺寸/英制尺寸指令

工程图纸中的尺寸标注有公制和英制两种形式。数控系统可根据所设定的状态,利用代码把所有的几何值转换为公制尺寸或英制尺寸(刀具补偿值和可设定零点偏置值也作为几何尺寸),同样进给率  $F$  的单位也分别为  $\text{mm}/\text{min}$ ( $\text{in}/\text{min}$ )或  $\text{mm}/\text{r}$ ( $\text{in}/\text{r}$ )。该指令为续效指令,系统上电后,机床处在公制状态。

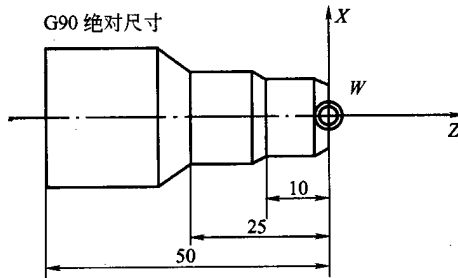


图 4-10 绝对尺寸标注

公制与英制单位的换算关系为

$$1\text{mm} \approx 0.0394\text{in}$$

$$1\text{in} \approx 25.4\text{mm}$$

注意:数控系统不同,公制/英制尺寸指令不同。FANUC 系统采用 G21/G20 代码,SIEMENS 和 FAGOR 系统采用 G71/G70 代码。

#### (4) 半径/直径数据尺寸

SIEMENS 802S/C 数控系统,G22 和 G23 指令定义为半径/直径数据尺寸编程。在数控车床中,可把 X 轴方向的终点坐标作为半径数据尺寸,也可作为直径数据尺寸,通常把 X 轴的位置数据用直径数据编程更为方便。

注意:华中数控的世纪星 HNC-21/22T 系统的直径/半径编程采用 G36/G37 代码。

## 二、刀具功能 T、主轴转速功能 S 和进给功能 F

### (1) 选择刀具与刀具偏置

选择刀具和确定刀参数是数控编程的重要步骤,其编程格式因数控系统不同而异,主要格式有以下几种。

①采用 T 指令编程 由地址功能码 T 和数字组成。有  $T \times \times$  和  $T \times \times \times \times$  两种格式,数字的位数由所用数控系统决定,T 后面的数字用来指定刀具号和刀具补偿号。

例如:T0404 表示选择第 4 号刀,4 号偏置量。

T0200 表示选择第 2 号刀,刀具偏置取消。

②采用 T、D 指令编程 利用 T 功能选择刀具,利用 D 功能可以选择相关的刀偏。在定义这两个参数时,其编程的顺序为 T、D。T 和 D 可以编写在一起,也可以单独编写,例如

T5 D18——选择 5 号刀,采用刀具偏置表 18 号的偏置尺寸;

D22——仍用 5 号刀,采用刀具偏置表 22 号的偏置尺寸;

T3——选择 3 号刀,采用刀具与该刀相关的刀具偏置尺寸。

### (2) 主轴转速功能 S

由地址码 S 和在其后面的若干数字组成,单位为转速单位( $r/min$ )。例如 :S320 表示主轴转速为  $320r/min$ 。

注意 :有些数控机床没有伺服主轴,即采用机械变速装置,编程时可以不编写 S 功能。

①线速度控制(G96) 当数控机床的主轴为伺服主轴时,可以通过指令 G96 来设定恒线速度控制。系统执行 G96 指令后,便认为用 S 指定的数值表示切削速度。例如 G96 S150 表示切削速度为  $150m/min$ 。

②主轴转速控制(G97) G97 是取消恒线速度控制指令,编程 G97 后,S 指定的数值表示主轴每分钟的转速。例如 G97 S1200 表示主轴转速为  $1200r/min$ 。

③最高速度限制(G50 或 G92) G50(G92)除有坐标系设定功能外,还有主轴最高转速设定功能。例如 G50 S2000 表示把主轴最高转速设定为  $2000r/min$ 。用恒定速度控制进行切削加工时,为了防止出现事故,必须限定主轴转速。

### (3)进给功能 F

进给功能 F 表示刀具中心运动时的进给速度。由地址码 F 和后面若干位数字构成。这个数字的单位取决于每个系统所采用的进给速度的指定方法。具体内容见所用机床编程说明书。注意事项如下。

①进给率的单位是直线进给率  $mm/min$ (或  $in/min$ ),还是旋转进给率  $mm/r$ (或  $in/r$ ),取决于每个系统所采用的进给速度的指定方法。直线进给率与旋转进给率的含义如图 4-11 所示。

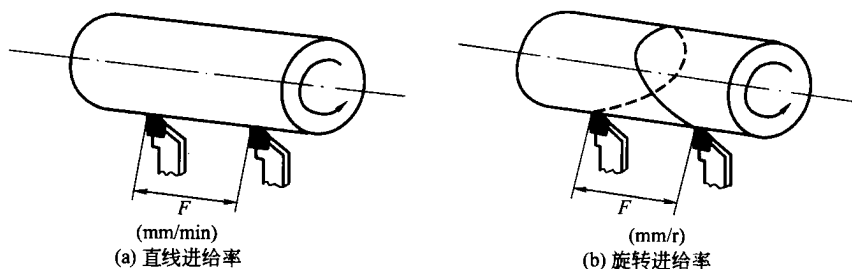


图 4-11 直线进给率与旋转进给率

②当编写程序时,第一次遇到直线(G01)或圆弧(G02/G03)插补指令时,必须编写进给率 F。如果没有编写 F 功能,CNC 采用 F0。当工作在快速定位(G00)方式时,机床将以通过机床轴参数设定的快速进给率移动,与编写的 F 指令无关。

③F 功能为模态指令,实际进给率可以通过 CNC 操作面板上的进给倍率旋钮,在 0~120% 之间控制。

## 三、常用的辅助功能

辅助功能也叫 M 功能或 M 代码,它是控制机床或系统开关功能的一种命令。常用的

辅助功能编程代码见表 4-6。各种机床的 M 代码规定有差异,编程时必须根据说明书的规定进行。

表 4-6 常用的辅助功能的 M 代码、含义及用途

功能	含义	用 途
M00	程序停止	实际上是一个暂停指令。当执行有 M00 指令的程序段后,主轴的转动、进给、切削液都将停止。它与单程序段停止相同,模态信息全部被保存,以便进行某一手动操作,如换刀、测量工件的尺寸等。重新启动机床后,继续执行后面的程序
M01	选择停止	与 M00 的功能基本相似,只有在按下“选择停止”后,M01 才有效,否则机床继续执行后面的程序段,按“启动”键继续执行后面的程序
M02	程序结束	该指令编在程序的最后一条,表示执行完程序内所有指令后,主轴停止、进给停止、切削液关闭,机床处于复位状态
M03	主轴正转	用于主轴顺时针方向转动
M04	主轴反转	用于主轴逆时针方向转动
M05	主轴停止转动	用于主轴停止转动
M07	冷却液开	用于切削液开
M08	冷却液开	用于切削液开
M09	冷却液关	用于切削液关
M30	程序结束	使用 M30 时,除表示执行 M02 的内容之外,还返回到程序的第一条语句,准备下一个工件的加工
M98	子程序调用	用于调用子程序
M99	子程序返回	用于子程序结束及返回

## 第三节 插补指令的编程

### 一、快速线性移动指令 G00

G00 用于快速定位刀具,没有对工件进行加工,可以在几个轴上同时执行快速移动,由此产生一线性轨迹。

#### (1) 编程格式

G00 X(U)-Z(W)-

式中 X、Z 为刀具移动的目标点坐标。

## (2) 注意事项

①使用 G00 指令时,刀具的实际运动路线并不一定是直线,而是一条折线。因此,要注意刀具是否与工件和夹具发生干涉,如图 4-12 所示。对不适合联动的场合,每轴可单动。

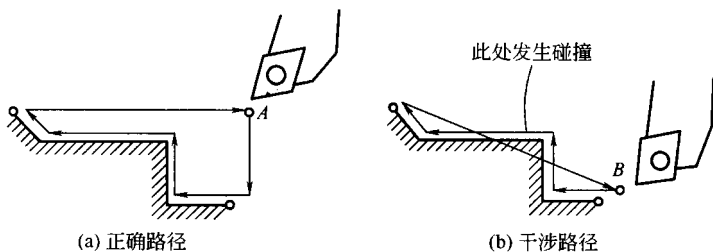


图 4-12 刀具与工件的干涉现象

②使用 G00 指令时,机床的进给率由轴机床参数指定,G00 指令是模态代码。

【例 4-2】如图 4-13 所示,若 X 轴的快速进给速度为 3000mm/min,Z 轴的快速进给速度为 6000mm/min,利用快速移动指令将刀具从起始点 A 移动到点 C,程序如下

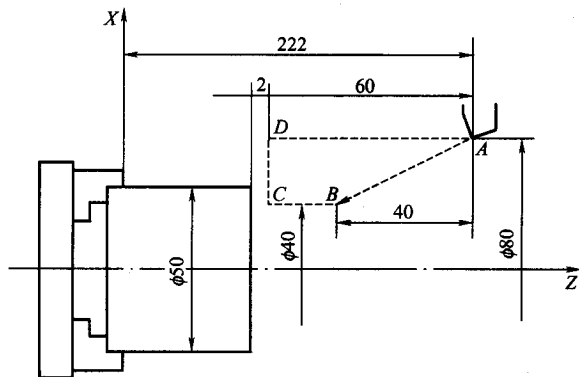


图 4-13 快速定位 G00 的应用

G50 X80.0 Z222.0 ; 工件坐标系设定

G00 X40.0 Z162.0(或 U-40.0 W-60.0); 刀具移动路径为 A→B→C

执行上述程序段时,刀具实际的运动路线不是直线,而是折线,首先刀具以快速合成速度运动到 B 点,然后沿 Z 轴移动到 C 点。实际应用中,经常采用单轴分别移动的编程方法,程序如下。

G50 X80.0 Z222.0 工件坐标系设定

G00 Z162.0(或 W-60.0) ;刀具沿 Z 轴移动 A→B

X40.0(或 U-40.0) ;仍然执行 G00,刀具沿 X 轴移动 B→C

## 二、带进给率的线性插补指令 G01

直线插补指令是直线运动指令,它命令刀具在两坐标间以插补联动方式按指定的进给速度做任意斜率的直线运动,该指令是模态(续效)指令。

图 4-14 为车削加工直线插补的刀具轨迹,从点 $(X_1, Z_1)$ 到点 $(X_2, Z_2)$ 、点 $(X_3, Z_3)$ ,刀具的运动路径均为直线。

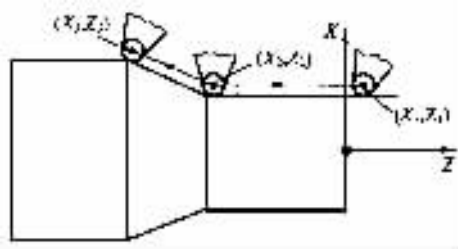


图 4-14 车削加工直线插补

### (1) 编程格式

G01 X(U) Z(W) F \_

式中 X、Z 为刀具移动的目标点坐标, F 为进给速度。

### (2) 说明

① G01 指令后的坐标值取绝对值编程还是取增量值编程由 G90/G91 决定。

② F 指令也是模态指令, F 的单位由直线进给率或旋转进给率指令确定。

【例 4-3】 图 4-15 所示为几种典型车削加工的直线插补实例。刀具从 1 点运动到 2 点,分别用绝对和相对尺寸编写直线加工的程序。

### 圆弧插补指令 G02/G03

圆弧插补指令命令刀具在指定平面内按给定的进给速度 F 作圆弧运动,切削出圆弧轮廓。

### (1) 圆弧顺逆的判断

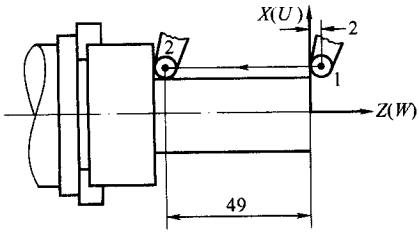
圆弧插补指令分为顺时针圆弧插补指令(G02)和逆时针圆弧插补指令(G03)。数控车床的刀架位置有两种形式,即刀架在操作者一侧或在操作者外侧,因此,应根据刀架的位置判别圆弧插补时的顺逆,如图 4-16 所示。

### (2) G02/G03 的编程格式

在零件上车削加工圆弧时,不仅要用 G02/G03 指出圆弧的顺逆时针方向,用 X、Z 指定圆弧的终点坐标,而且还要指定圆弧的中心位置。常用指定圆心位置的方式有两种,因而 G02/G03 的指令格式有两种。

#### ① 用 I、K 指定圆心位置

G02 } X \_ Z \_ I \_ K \_ F  
G03 }



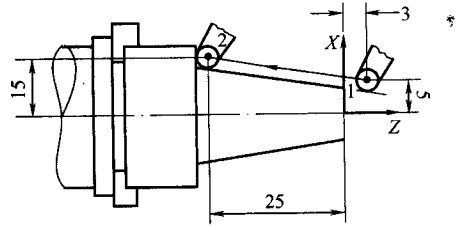
绝对坐标编程：

N040 G01 Z-49.0 F30

相对坐标编程：

N040 G01 W-51.0 F30

(a) 柱面加工



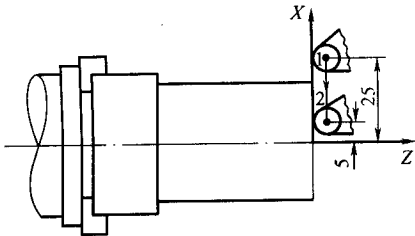
绝对坐标编程：

N050 G01 X30.0 Z-25.0 F30

相对坐标编程：

N050 G01 U20.0 W-28.0 F30

(b) 外锥面加工



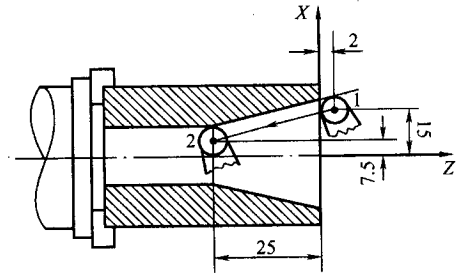
绝对坐标编程：

N060 G01 X10.0 F30

相对坐标编程：

N060 G01 U-40.0 F30

(c) 端面加工



绝对坐标编程：

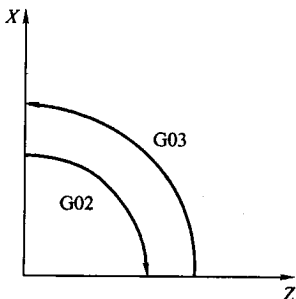
N070 G01 X15.0 Z-25.0 F30

相对坐标编程：

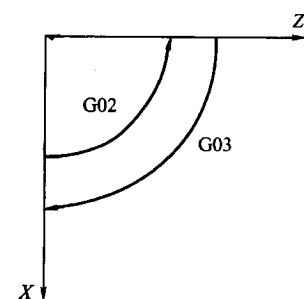
N070 G01 U-15.0 W-27.0 F30

(d) 内锥孔加工

图 4-15 车削加工的直线插补实例



(a) 刀架在外侧时 G02, G03 方向



(b) 刀架在内侧时 G02, G03 方向

图 4-16 圆弧的顺逆方向与刀架位置的关系



②用圆弧半径 R 指定圆心位置

G02 } X \_ Z \_ R \_ F \_  
G03 }

(3)说明

①采用绝对值编程时,圆弧终点坐标为圆弧终点在工件坐标系中的坐标值,用 X、Z 表示,当采用增量值编程时,圆弧终点坐标为圆弧终点相对于圆弧起点的增量值。

②数控车床的圆心坐标为 I、K 表示圆弧起点到圆弧中心所作矢量分别在 X、Z 坐标轴方向上的分矢量(矢量方向指向圆心)。图 4-17 分别给出了在绝对坐标系中,顺弧与逆弧加工时的圆心坐标 I、K 的关系。

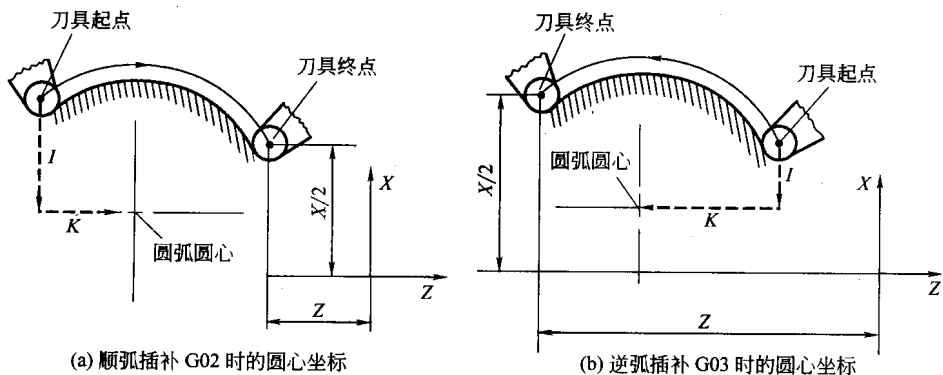


图 4-17 绝对坐标系中的圆心坐标

③当用半径指定圆心位置时,由于在同一半径 R 的情况下,从圆弧的起点到终点有两个圆弧的可能性,为区别二者,规定圆心角  $\alpha \leq 180^\circ$  时,用 '+R' 表示,如图 4-18 所示的圆弧 1;  $\alpha > 180^\circ$  时,用 '-R' 表示,如图 4-18 所示的圆弧 2。

④用半径 R 指定圆心位置时,不能描述整圆。

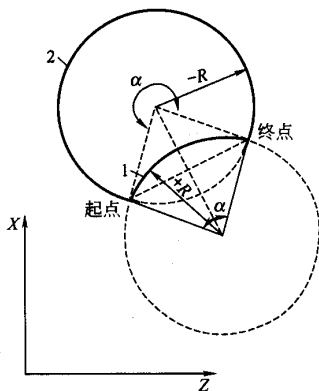


图 4-18 圆弧插补时 +R 与 -R 的区别

【例 4-4】 刀具加工轨迹如图 4-19 所示,圆弧为顺时针方向,图中采用英制尺寸,绝对坐标编程时的加工程序如下。

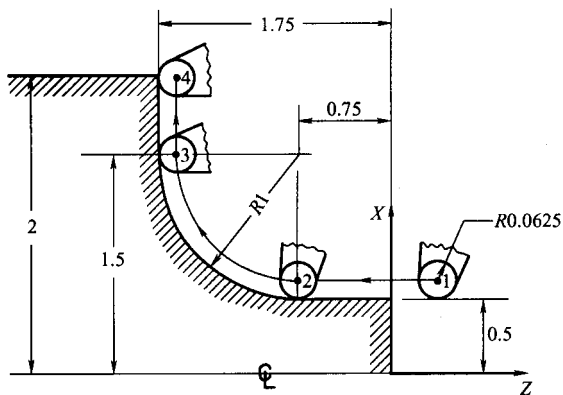


图 4-19 顺弧加工实例

N050G01 Z-0.75 F0.15 ;直线加工到②点  
 N060 G02 X3.0 Z-1.6875 I1.9375 K0 ;加工 R1 圆弧到③点  
 或 N060 G02 X3.0 Z-1.6875 R0.9375 )  
 N070 G01 X4.0 ;直线加工到④点

(例 4-5) 刀具加工轨迹如图 4-20 所示,圆弧为逆时针方向,图中采用英制尺寸,绝对坐标编程时的加工程序如下。

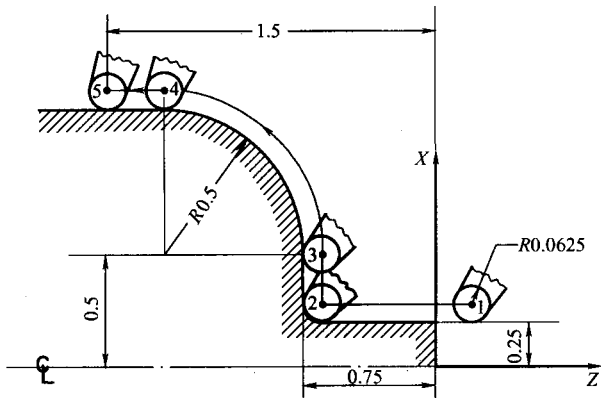


图 4-20 逆弧加工实例

.....  
 N060 G01 Z-0.6875 F0.15 ;直线加工到位置②  
 N070X 1.0 ;直线加工到位置③  
 N080 G03 X2.125 Z-1.25 I0 K-0.5625 ;加工 R0.5 圆弧到点④  
 或 N080 G03 X2.125 Z-1.25 R0.5625 )

N090 G01 Z—1.5

;直线加工到位置⑤

.....

### 三、螺纹车削加工指令

螺纹加工的类型包括 :内(外)圆柱螺纹和圆锥螺纹、单头螺纹和多头螺纹、恒螺距与变螺距螺纹 ,数控系统提供的螺纹加工指令包括单一螺纹指令和螺纹固定循环指令。前提条件是主轴上有位移测量系统。横螺距螺纹的形式如图 4-21 所示。数控系统的不同 ,螺纹加工指令也有差异 ,实际应用中按所使用机床的要求编程。

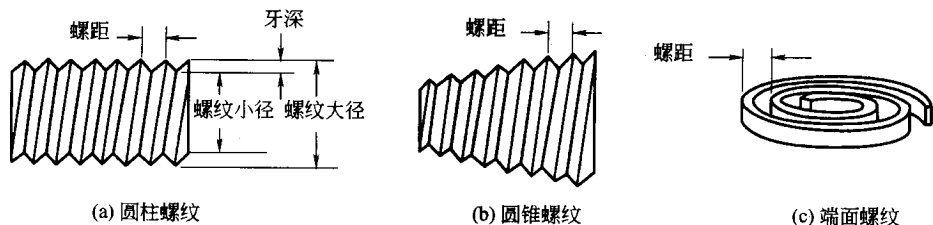


图 4-21 螺纹形式

G32/G33 指令可以执行单行程螺纹切削 ,车刀进给运动严格根据输入的螺纹导程进行。但是 ,车刀的切入、切出、返回均需编入程序。

#### (1) 编程格式

几种典型数控系统的单行程螺纹加工的编程格式见表 4-7。

表 4-7 典型数控系统单行程螺纹编程指令

数控系统	编程格式	说明
FANUC	G32 X(U)_Z(W)_F_	F 采用旋转进给率 ,表示螺距
SIEMENS	圆柱螺纹 :G33 Z_ K_ SF_ 锥螺纹 :G33 Z_ X_ K_ G33 Z_ X_ I_ 端面螺纹 :G33 X_ I_ SF_	K 为螺距 ,SF 起始点偏移量 锥度小于 45° ,螺距 K 锥度大于 45° ,螺距 I
FAGOR	G33 X...C L Q	X...C 螺纹终点 ,L 螺距 ,Q 表示多头螺纹时的主轴角度
HNC-21T	G32 X(U)_Z(W)_R_E_P_F_	R、E 螺纹切削的退刀量 ,F 螺纹导程 ,P 切削起始点的主轴转角

## (2) 注意事项

①进行横螺纹加工时,其进给速度  $F$  的单位采用旋转进给率,即  $\text{mm}/\text{r}$  (或  $\text{in}/\text{r}$ );

②为避免在加减速过程中进行螺纹切削,要设引入距离  $\delta_1$  和超越距离  $\delta_2$ ,即升速进刀段和减速退刀段,如图 4-22 所示。一般  $\delta_1$  为  $2 \sim 5\text{mm}$ ,对于大螺距和高精度的螺纹取大值; $\delta_2$  一般取  $\delta_1$  的  $1/4$  左右,若螺纹的收尾处没有退刀槽时,一般按  $45^\circ$  退刀收尾。

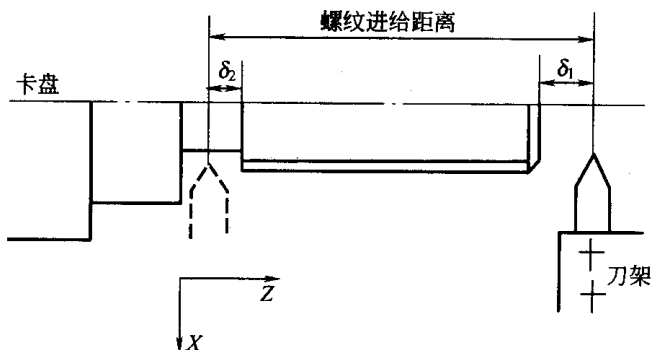


图 4-22 切削螺纹时的引入距离

③螺纹起点与螺纹终点径向尺寸的确定。螺纹加工中的编程大径应根据螺纹尺寸标注和公差要求进行计算,并由外圆车削来保证。如果螺纹牙型较深、螺距较大,可采用分层切削,如图 4-23 所示。常用螺纹切削的进给次数与背吃刀量可参见表 4-8。

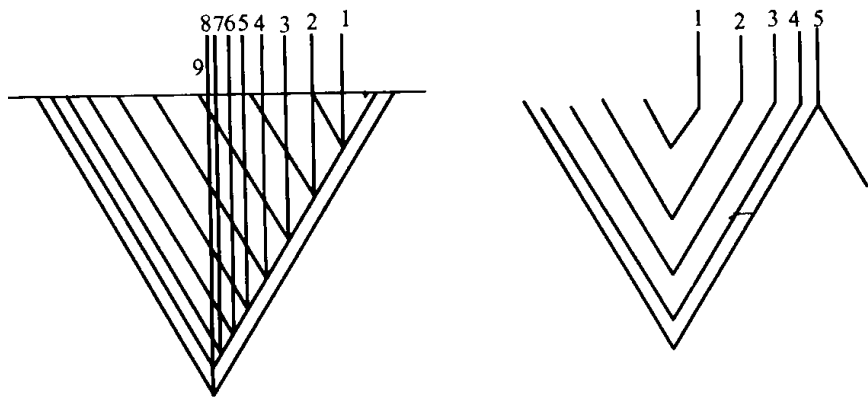


图 4-23 螺纹进刀切削方法

【例 4-6】 图 4-24 所示为圆柱螺纹编程实例,螺纹外径已加工完成,牙型深度  $1.3\text{mm}$ ,分 5 次进给,吃刀量(直径值)分别为  $0.9\text{mm}$ 、 $0.6\text{mm}$ 、 $0.4\text{mm}$ 、 $0.4\text{mm}$  和  $0.1\text{mm}$ ,采用绝对编程,加工程序如下:

表 4-8 常用螺纹切削的进给次数与背吃刀量

公制螺纹								
螺距/mm		1.0	1.5	2	2.5	3	3.5	4
牙深(半径值)		0.649	0.974	1.299	1.624	1.949	2.273	2.598
切削次数及吃刀量(直径值)	1次	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.5
	2次	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
	3次	0.2	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	4次		0.16	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
	5次			0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
	6次				0.15	0.4	0.4	0.4
	7次					0.2	0.2	0.4
	8次						0.15	0.3
	9次							0.2
英制螺纹								
牙/in		24	18	16	14	12	10	8
牙深(半径值)		0.698	0.904	1.016	1.162	1.355	1.626	2.033
切削次数及吃刀量(直径值)	1次	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2
	2次	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7
	3次	0.16	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
	4次		0.11	0.14	0.3	0.4	0.4	0.5
	5次				0.13	0.21	0.4	0.5
	6次						0.16	0.4
	7次							0.17

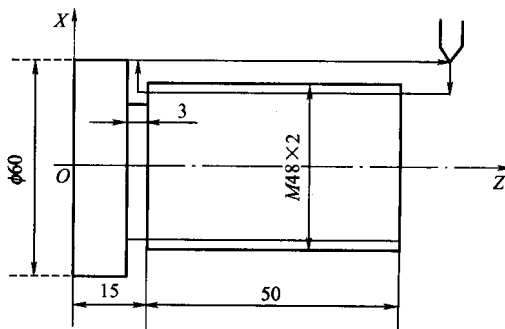


图 4-24 螺纹加工实例

N01 G54

N24 G00 X58.0

N02 G00 X58.0 Z71.0

N26 Z71.0

N04 X47.1

N28 X45.1

N06 G33 Z19.5 F2.0	N30 G33 Z13.5 F2.0
N08 G00 X58.0	N32 G00 X58.0
N10 Z71.0	N34 Z71.0
N12 X46.5	N36 X45.6
N14 G33 Z13.5 F2.0	N38 G33 Z13.5 F2.0
N16 G00 X58.0	N40 G00 X100.0
N18 Z71.0	N42 Z100.0
N20 X46.1	N44 M05
N22 G33 Z13.5 F2.0	N46 M30

#### 四、暂停指令 G04

G04 指令可使刀具作短暂的无进给光整加工,一般用于切槽、镗平面、镗孔等场合。

##### (1) 编程格式

G04 X(P) \_

##### (2) 说明

地址码 X 或 P 为暂停时间。其中 :X 后面可用带小数点的数,单位为 s,如 G04 X5 表示前面的程序执行完后,要经过 5s 的暂停,下面的程序段才执行。地址 P 后面不允许用小数点,单位为 ms。如 G04 P1000 表示暂停 1s。

【例 4-7】 图 4-25 所示为利用暂停 G04 进行切槽加工的实例。对槽的外圆柱面粗糙度有要求,编写加工程序如下。

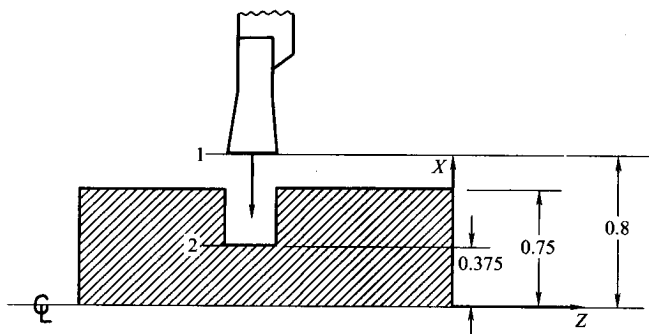


图 4-25 暂停指令 G04 的应用

.....

N06G00 X1.6

快速到①

N07G01 X0.75 F0.05

;以进给速度切削到②

N08G04 X0.24

;暂停 0.24s

N090 G00 X1.6

;快速到①

...

## 第四节 刀具补偿指令及其编程

### 一、不具备刀具半径补偿功能时的编程

在数控切削加工中,为了提高刀尖的强度,降低加工表面粗糙度,刀尖处成圆弧过渡刃。在车削内孔、外圆或端面时,刀尖圆弧不影响其尺寸、形状;在切削锥面或圆弧时,就会造成过切或少切现象。

目前,较高级的车床控制系统,不仅具有刀尖圆弧半径补偿功能,而且可以根据刀尖的实际情况,选择刀位点轨迹,编程和补偿都十分方便。但有些简易数控系统不具备半径补偿功能,因此,当零件精度要求较高且又有圆锥或圆弧表面时,可以按刀尖圆弧中心编程,也可以在局部进行补偿计算,来消除刀尖半径引起的误差。

#### (1) 按假想刀尖编程

数控车床总是按“假想刀尖”点来对刀,使刀尖位置与程序中的起刀点(或换刀点)重合。圆头刀假想刀尖是图 4-26(b)中的 P 点,相当于图(a)中尖头刀的刀尖点。

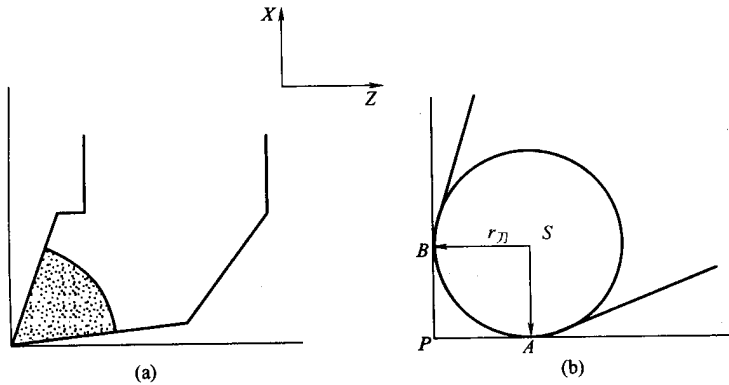


图 4-26 圆头刀假想刀尖

如果按假想刀尖加工图 4-27 中的轮廓 AB,则产生欠切的区域 ABCD,如图(a)所示。在 X 方向和 Z 方向分别产生误差  $\Delta X$  和  $\Delta Z$ ,其中

$$\Delta X = \left[ r \frac{2}{1 + \cot \frac{\theta}{2}} \right]$$

$$\Delta Z = r \left( 1 - \tan \frac{\theta}{2} \right)$$

因此,可直接按假想刀尖轨迹  $P_3P_4$  编程,在 X 方向和 Z 方向予以补偿  $\Delta X$  和  $\Delta Z$  即

可。如图 4-27(b) 所示。

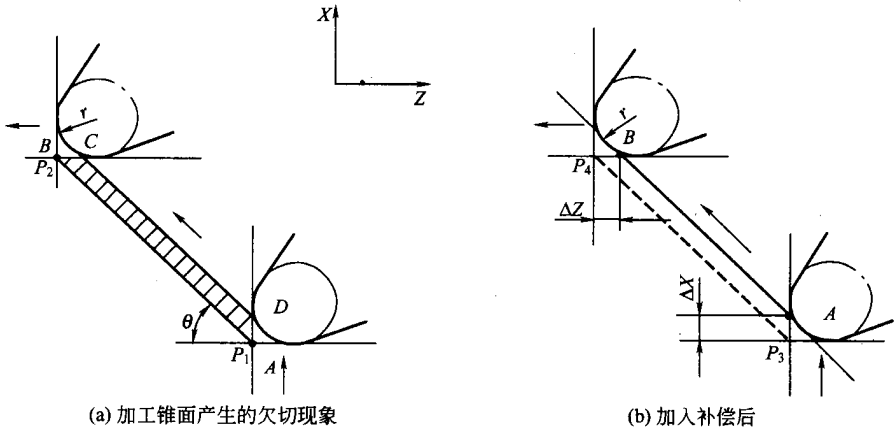


图 4-27 圆头刀加工锥面

如果按假想刀尖编程加工半径为  $R$  的凸凹圆弧  $AB$  时,图 4-28 中的粗实线轮廓。应按图中虚实线参数进行编程,但要求在加工前通过刀补开关给  $X$  方向和  $Z$  方向一个补偿量  $r$ 。

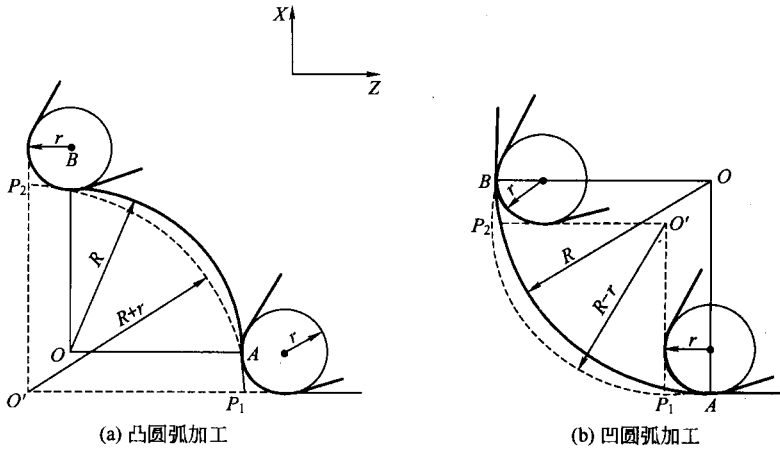


图 4-28 圆头刀加工凸凹圆

## (2) 刀心轨迹编程

不具备刀具半径补偿功能的数控系统,除按假想刀尖轨迹数据编程外,还可以按刀心轨迹编程。图 4-29 所示的手柄零件由 3 段圆弧组成,可按轮廓轨迹的等距线,即按图中的刀心轨迹编程。

用假想刀尖轨迹和刀心轨迹编程方法的共同缺点是当刀具磨损或重磨后,需要重新计算编程参数,否则会产生加工误差。



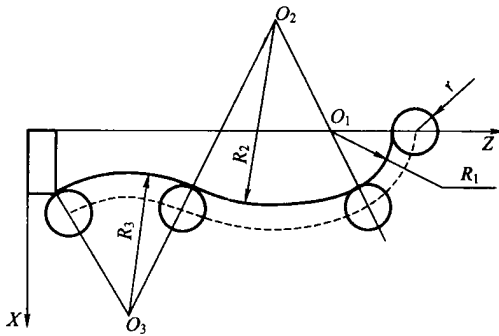


图 4-29 刀心轨迹编程

## 二、具备刀具半径补偿功能时的刀具半径补偿

### (1) 刀具半径补偿指令(G41、G42、G40)

在实际加工中,一般数控装置都有刀具半径补偿功能,为编制程序提供了方便。有刀具半径补偿功能的数控系统,编程时不需要计算刀具中心的运动轨迹,只按零件轮廓编程。使用刀具半径补偿指令,并在控制面板上手工输入刀具半径,数控装置便能自动地计算出刀具中心轨迹,并按刀具中心轨迹运动。即执行刀具半径补偿后,刀具自动偏离工件轮廓一个刀具半径值,从而加工出所要求的工件轮廓。

G41 为刀具半径左补偿,即刀具沿工件左侧运动方向时的半径补偿;G42 为刀具半径右补偿,即刀具沿工件右侧运动时的半径补偿;G40 为刀具半径补偿取消,使用该指令后,G41、G42 指令无效。G40 必须和 G41 或 G42 成对使用,如图 4-30 所示。

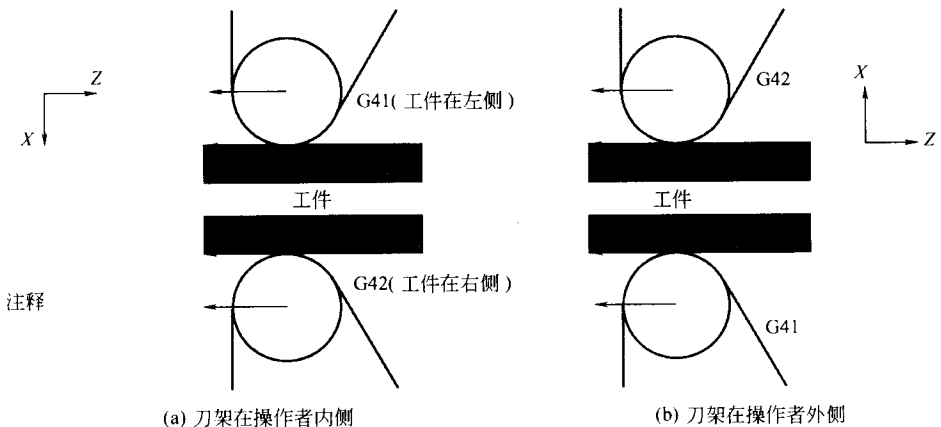


图 4-30 刀具半径补偿

刀具半径补偿的过程分为以下三步。

a. 刀补的建立,刀具中心从与编程轨迹重合过渡到与编程轨迹偏离一个偏置量的过

程。

b. 刀补进行 执行有 G41、G42 指令的程序段后 , 刀具中心始终与编程轨迹相距一个偏置量。

c. 刀补的取消 , 刀具离开工件 , 刀具中心轨迹要过渡到与编程重合的过程。图 4 - 31 所示为刀具半径补偿的建立与取消过程。

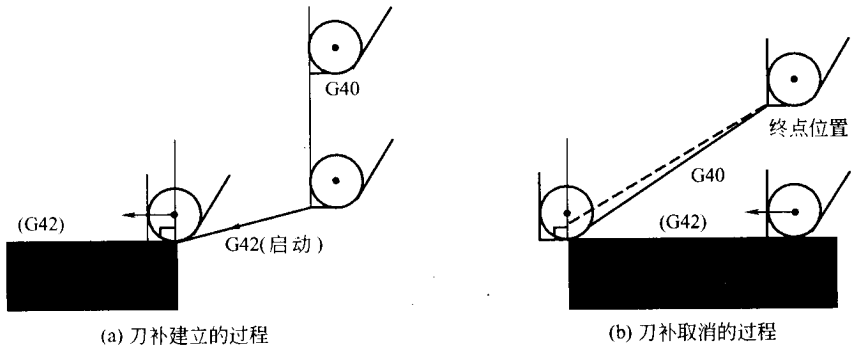


图 4 - 31 刀具半径补偿的建立与取消

编程时应注意 :G41、G42 不能重复使用 , 即在程序中前面有了 G41 或 G42 指令之后 , 不能再直接使用 G41 或 G42 指令。若想使用 , 则必须先用 G40 指令解除原补偿状态后 , 再使用 G41 或 G42 , 否则补偿就不正常了。

(2) 刀尖方位的确定

具备刀具半径补偿功能的数控系统 , 除利用刀具半径补偿指令外 , 还应根据刀具在切削时所摆的位置 , 选择假想刀尖的方位。按假想刀尖的方位 , 确定补偿量。假想刀尖的方位有 8 种位置可以选择 ( 见图 4 - 32 )。箭头表示刀尖方向 , 如果按刀尖圆弧中心编程 , 则选用 0 或 9。

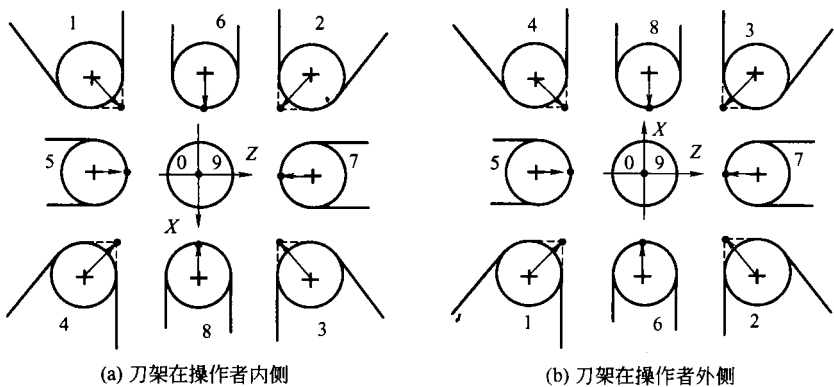


图 4 - 32 假想刀尖的位置

### (3) 刀具补偿量的确定

对应每一个刀具补偿号,都有一组偏置量 X、Z、刀尖半径补偿量 R 和刀尖方位号 T。根据装刀位置、刀具形状确定刀尖方位号。通过机床面板上的功能键 OFFSET 分别设定、代表刀具刀位点 A;+ 代表刀尖圆弧圆心

修改这些参数,数控加工中,根据相应的指令进行调用,提高零件的加工精度。图 4-33 所示为控制面板上的刀具偏置与刀具方位画面。

OFFSET 01		O0005		N0040	
NO.	X	Z	R	T	
01	025.036	002.006	000.400	1	
02	024.052	003.500	000.800	2	
03	015.036	004.082	001.000	0	
04	010.030	-002.006	000.602	4	
05	002.030	002.400	000.350	3	
06	012.450	000.220	001.008	5	
07	004.000	000.506	000.300	6	
ACTUAL		POSITION(RELATIVE)			
U	22.400	W	-10.000		
W	LSK				

图 4-33 机床中的刀具参数偏置量设置

## 第五节 固定循环

对数控车床而言,非一刀加工完成的轮廓表面、加工余量较大的表面,采用循环编程,可以缩短程序段的长度,减少程序所占内存。各类数控系统复合循环的形式和使用方法(主要是编程方法)相差甚大,下面介绍两种数控系统的车削固定循环。

### 一、FANUCOi - TA 系统的固定循环

FANUCOi - TA 车削数控系统分为简单固定循环、复合固定循环和钻孔固定循环 3 类。

#### (1) 简单固定循环

简单固定循环有 3 种:外径/内径切削固定循环(G90)、螺纹切削固定循环(G92),以及端面切削固定循环(G94)。

① 外径/内径切削固定循环(G90)又分为下列两种情况。

· 直线切削(圆柱面)固定循环。如图 4-34 所示,刀具从循环起点开始按矩形循环,

最后又回到循环起点,图中刀具路径中 R 为快速移动, F 为工作进给速度运动。编程格式为

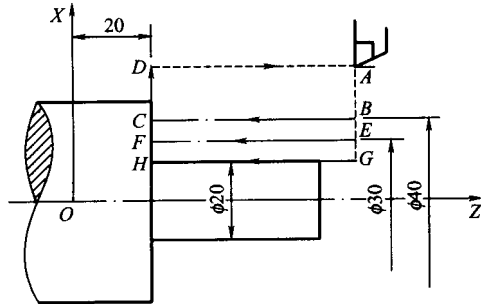


图 4-34 外圆车削循环

G90 X(U) Z(W) F

式中 X、Z 为圆柱面切削终点坐标值;U、W 为圆柱面切削终点相对循环起点的增量值,其加工顺序按 1、2、3、4 进行。

· 锥形切削固定循环。如图 4-35 所示。编程格式为

G90 X(U) Z(W) R F

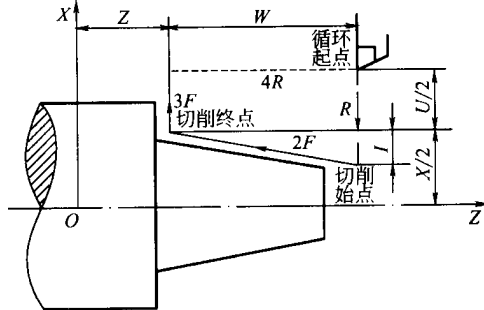


图 4-35 锥面车削循环

式中 X、Z 为圆锥面切削终点坐标值;U、W 为圆锥面切削终点相对循环起点的增量值;R 为切削始点与圆锥面切削终点的半径差。

【例 4-8】 加工如图 4-36 所示零件,利用单一形状固定循环指令,编写粗加工程序。

```

.....
G90 X40.0 Z20.0 F50.0           ;A→B→C→D→A
X30.0                           ;A→E→F→D→A
X20.0                           ;A→G→H→D→A
.....

```

【例 4-9】 加工如图 4-37 所示锥面零件,利用单一形状固定循环指令,编写粗加

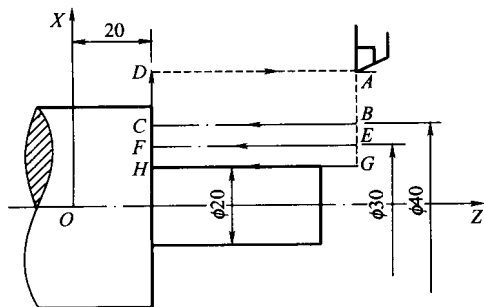


图 4-36 外圆车削循环应用实例

工程序。

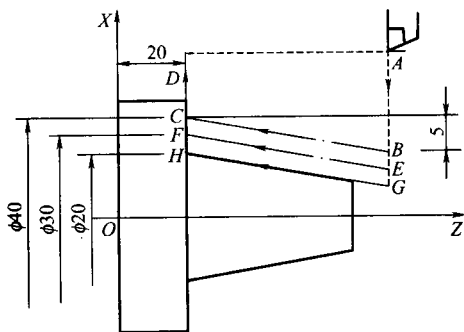


图 4-37 锥面车削循环应用实例

.....

```
G90 X40.0 Z20.0 R-5.0 F50.0      ;A→B→C→D→A
      X30.0                        ;A→Z→E→F→DVA
      X20.0                        ;A→G→H→D→A
```

.....

② 螺纹车削循环 G92。该指令可车削锥螺纹和圆柱螺纹，刀具从循环起点开始按梯形循环，最后又回到循环起点。如图 4-38、图 4-39 所示，图中刀具路径中 R 为快速移动，F 为工作进给速度运动。

· 锥螺纹的编程格式为

```
G92 X(U) Z(W) R F
```

式中 X、Z 为螺纹终点坐标值；U、W 为螺纹终点相对循环起点的增量值；R 为锥螺纹始点与终点的半径差；F 为进给率，采用与螺距相对应的旋转进给率。

· 圆柱螺纹的编程格式为

```
G92 X(U) Z(W) F
```

式中 X、Z 为螺纹终点坐标值；U、W 为螺纹终点相对循环起点的增量值；F 为进给率，

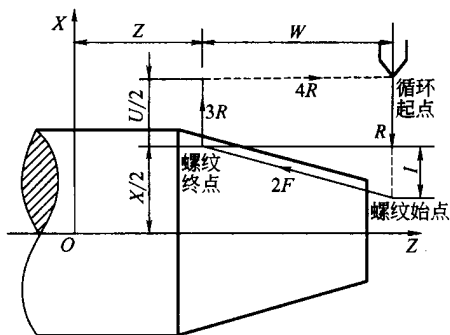


图 4-38 锥螺纹切削循环

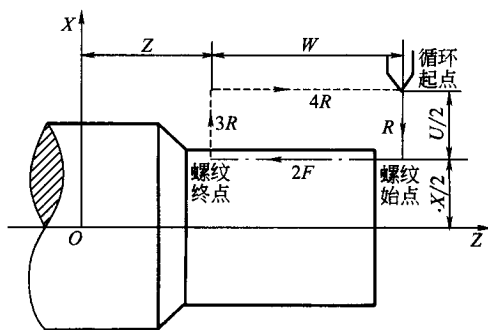


图 4-39 圆柱螺纹切削循环

采用与螺距相对应的旋转进给率。

【例 4-10】 加工如图 4-40 所示圆柱螺纹,起刀点设在 X100.0、Z150.0 位置,利用螺纹固定循环指令,编写加工程序。

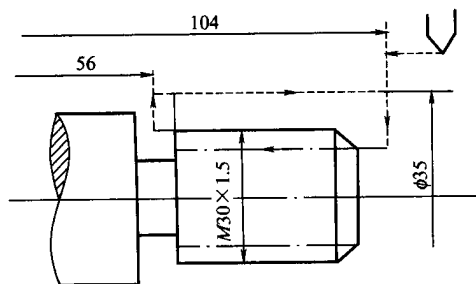


图 4-40 圆柱螺纹切削循环实例

N010G50 X100.0 Z150.0

坐标系设定

N020 G97 S300

主轴转速

N030 T0101 M03

选择 1 号刀,1 号刀具补偿建立

N040G00X35.0 Z104.0	刀具快速移动到循环起点
N050 G92X29.2 Z56.0 F1.5	螺纹切削循环 1
N060 X28.6	螺纹切削循环 2
N070 X28.2	螺纹切削循环 3
N080 X28.04	螺纹切削循环 4
N090G0 X100.0 Z150.0 T0100 M05	回起刀点, 刀具补偿取消, 主轴停
N100 M02	程序结束

【例 4-11】 加工如图 4-41 所示锥螺纹, 起刀点设在 X100.0、Z150.0 位置, 利用螺纹固定循环指令, 编写加工程序。

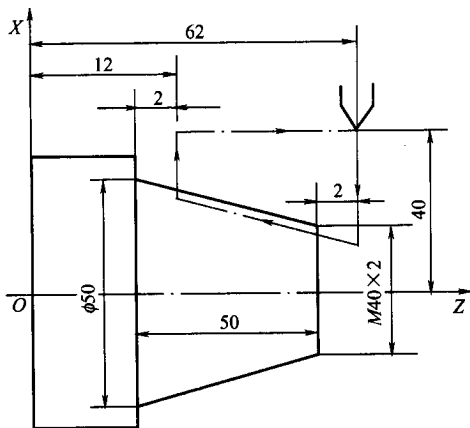


图 4-41 锥螺纹切削循环实例

N010 G50X100.0 Z150.0	坐标系设定
N020 G97S300	主轴转速
N030 T0101 M03	选择 1 号刀, 1 号刀具补偿建立
N040 G00 X80.0 Z62.0	刀具快速移动到循环起点
N050 G92 X49.6 Z12.0 R—5.0 F2.0	螺纹切削循环 1
N060 X48.7	螺纹切削循环 2
N070 X48.1	螺纹切削循环 3
N080 X47.5	螺纹切削循环 4
N090 X47.1	螺纹切削循环 5
N100 X47.0	螺纹切削循环 6
N110 G00X100.0 Z150.0T0100 M05	回起刀点, 刀具补偿取消, 主轴停
N120M02	程序结束

③端面车削固定循环(G94)又分为下列两种情况。

·平端面车削固定循环。如图 4-42 所示, 刀具从循环起点开始按矩形循环, 最后又回到循环起点, 图中刀具路径中 R 为快速移动; F 为工作进给速度运动。编程格式为 G94

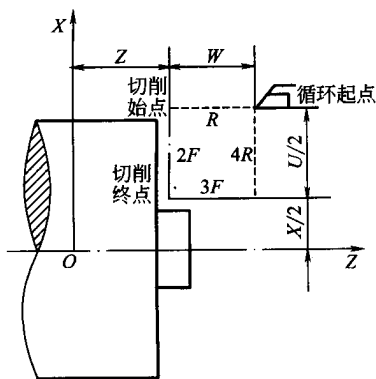


图 4-42 端面车削循环

$X(U) \ Z(W) \ F \_$

式中  $X$ 、 $Z$  为端面切削终点坐标值； $U$ 、 $W$  为端面切削终点相对循环起点的增量值。

· 锥形切削固定循环。如图 4-43 所示。编程格式为

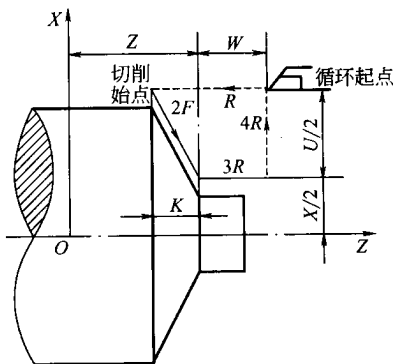


图 4-43 带锥度的端面车削循环

$G94 \ X(U) \ Z(W) \ K \text{ (或 } R) \ F \_$

式中  $X$ 、 $Z$  为圆锥面切削终点坐标值； $U$ 、 $W$  为圆锥面切削终点相对循环起点的增量值； $K$  (或  $R$ ) 为端面切削始点与切削终点的在  $Z$  方向的坐标增量。

【例 4-12】 加工如图 4-44 所示零件,利用端面车削固定循环指令,编写粗加工程序。

.....

G94 X50.0 Z16.0 F50.0

; A→B→C→D→A

Z13.0

A→E→F→D→A

Z10.0

;A→G→H→D→A

.....

【例 4-13】 加工如图 4-45 所示带锥面的零件,利用端面车削固定循环指令,编写粗加工程序。



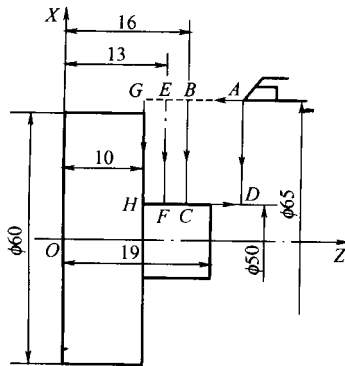


图 4-44 端面车削循环应用实例

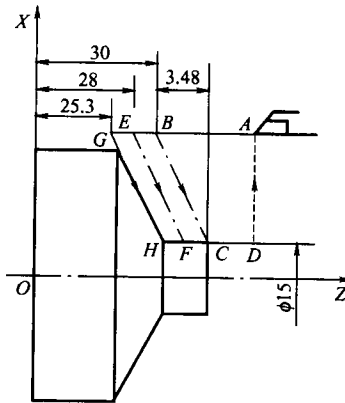


图 4-45 带锥度的端面车削循环应用实例

.....

G94 X15.0 Z33.48 R-3.48 F50.0 ;A→B→C→D→A  
 Z31.48 ;A→E→F→D→A  
 Z28.78 ;A→G→H→D→A

(2) 多重固定循环

FANUC 0i-TA 车削系统的多重固定循环的代码、编程格式及其用途见表 4-9, 循环指令中的地址码含义见表 4-10。

表 4-9 FANUC0i-TA 车削系统的多重固定循环

G 代码	编程格式	用途
G71	G71 R(ns)X(nf)U(Δu)W(Δw)X(Δd)F__S__T__	外圆粗车循环
G72	G72 R(ns)X(nf)U(Δu)W(Δw)X(Δd)F__S__T__	端面粗车循环

G 代码	编程格式	用途
G73	G73 R(ns)X(nf)X(Δi)X(Δk)X(Δu)W(Δw)X(Δd)F__S__T__	固定形状粗车循环
G70	G70 R(ns)X(nf)	精车循环

表 4-10 车削固定循环中地址码的含义

地址	含义
ns	循环程序段中第一个程序段的顺序号
nf	循环程序段中最后一个程序段的顺序号
Δi	粗车时, 径向切除的余量(半径值)
Δk	粗车时, 轴向切除的余量
Δu	径向(X轴方向)的精车余量(直径值)
Δw	轴向(Z轴方向)的精车余量
Δd	每次吃刀深度(在外径和端面粗车循环); 或粗车循环次数(在固定形状粗车循环)

①外径粗车固定循环 G71 适用于圆柱毛坯料粗车外圆和圆筒毛坯料粗车内径, 图 4-46 所示为用 G71 粗车外径的加工路径。图中 C 是粗车循环的起点, A 是毛坯外径与端面轮廓的交点, Δw 是轴向精车余量; Δu/2 是径向精车余量。Δd 是切削深度, e 是回刀时的径向退刀量(由参数设定)。(R)表示快速进给(F)表示切削进给。

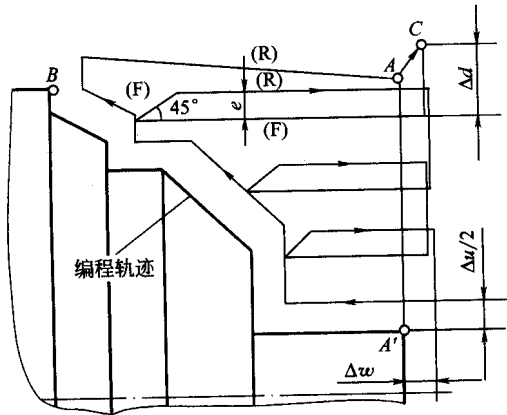


图 4-46 外径粗车循环 G71 的加工路径

编程格式为(以直径编程)

G71 P(ns)Q(nf)U(Δu)W(Δw)X(Δd) F\_\_S\_\_T\_\_

地址码含义见表 4-10, 当加工零件内轮廓时, 上述程序指令就成为内径粗车固定循环。此时, 径向精车余量 Δu 应指定为负值。

## 【例 4-14】 用外径粗加工复合循环 编制

如图 4-47 所示零件的加工程序。要求循环起始点在 A(46, 3), 切削深度为 2.5mm (半径量)。X 方向精加工余量为 0.4mm Z 方向精加工余量为 0.2mm, 其中点划线部分为工件毛坯。加工程序单见表 4-11。

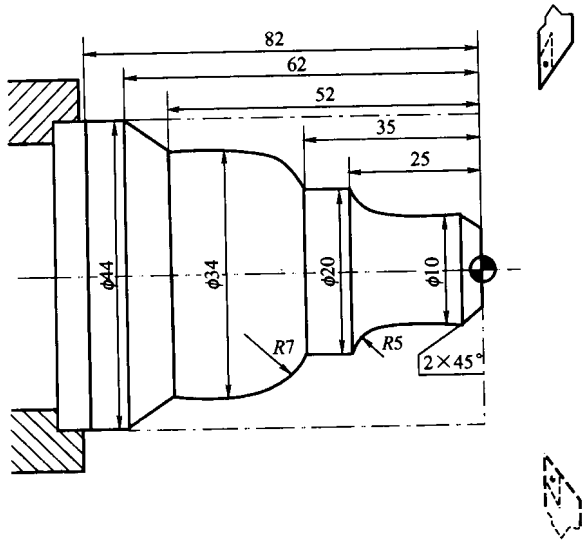


图 4-47 典型加工零件

表 4-11 加工程序

程 序	注 释
O5101	程序号
N010 G55 G00 X80 Z80	选定坐标系 G55 到程序起点位置
N020 m03	主轴以 400r/mm 正转
N030 G01 X46 Z3 F120	刀具到循环起点位置
N040 G71 P50 Q130 U0.4 W0.2 D2.5 F100	粗切量 1.5mm 精车余量 X0.4mm Z0.2mm
N050 G00 X0	精加工轮廓起始行 到径角延长线
N060 G01 X10 Z-2 F80	精加工 $2 \times 45^\circ$ 倒角
N070 Z-20	精加工 $\phi 10$ 外圆
N080 G02 U10 W-5 R5	精加工 R5 圆弧
N090 G01 W-10	精加工 $\phi 20$ 外圆

程 序	注 释
N100 G03 U14 W - 7 R7	精加工 R7 圆弧
N110 G01 Z - 52	精加工 $\phi 34$ 外圆
N120 U10 W - 10	精加工外圆锥
N130 W - 20	精加工 $\phi 44$ 外圆 精加工轮廓结束行
N140 G70 P50 Q130	精加工循环
N150 G00 X80 Z80	回对刀点
N160 M05	主轴停
N170 M30	主程序结束并复位

②端面粗车固定循环 G72 G72 适用于圆柱毛坯端面方向粗车,图 4-48 所示为从外径方向往轴心方向车削端面时的走刀路径。

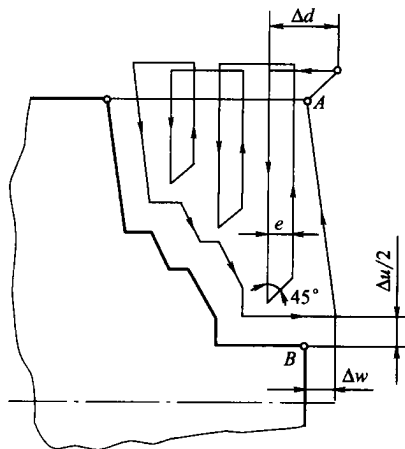


图 4-48 端面粗车循环 G72 的加工路径

编程格式为(以直径编程)

G72 P(ns) Q(nf) U( $\Delta u$ ) W( $\Delta w$ ) X( $\Delta d$ ) F\_\_ S\_\_ T\_\_

地址码含义见表 4-10。

【例 4-15】 利用端面粗车循环加工图 4-49 所示零件,采用直径编程和公制尺寸,加工程序见表 4-12。

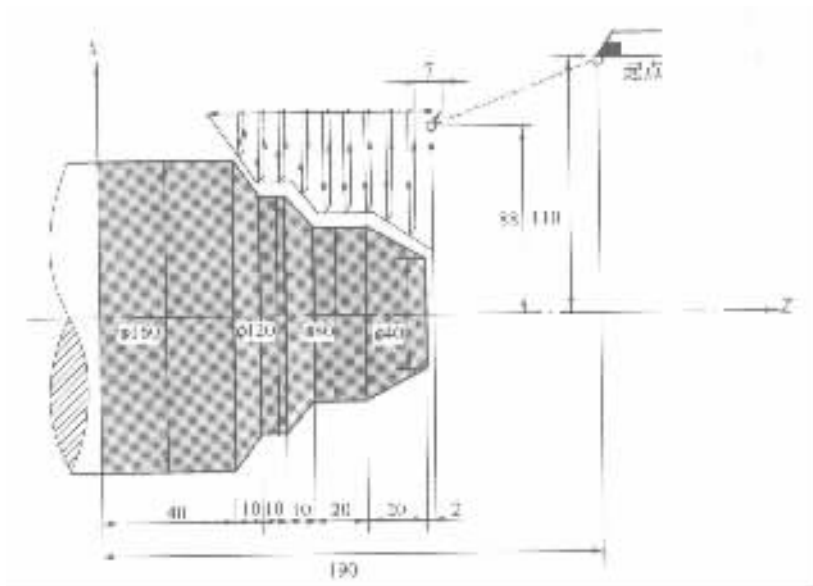


图 4-49 用 G72 端面粗车加工实例

表 4-12 加工程序

程 序	注 释
O5120	程序号
N010 G50X220.0 Z190.0	建立工件坐标系
N020 G00 X176.0 Z132.0 S550 M03	到循环起点
N030 G72 W7.0 R1.0	切削深度 7mm ,回退 1mm
N040 G72 P050 Q130 U4.0 W2.0 F0.3	端面粗车固定循环
N050 G00 Z36.0 S700	精加工轮廓起始点 ,到锥面延长线
N060 G01 X120.0W12.0 F0.15	精加工锥面
N070 W10.0	精加工 φ120 外圆
N080 X80.0 W10.0	加工锥面
N090 W20.0	精加工 φ80 外圆
N100 X36.0 W22.0	加工锥面
N110 G70 P050 Q100	精加工
N120 M05	主轴停
N130 M02	程序结束

③固定形状粗车循环 G73 适用于毛坯轮廓形状与零件轮廓形状基本接近时的粗车，例如，一般锻件或铸件的粗车，这种循环方式的走刀路线如图 4-50 所示。

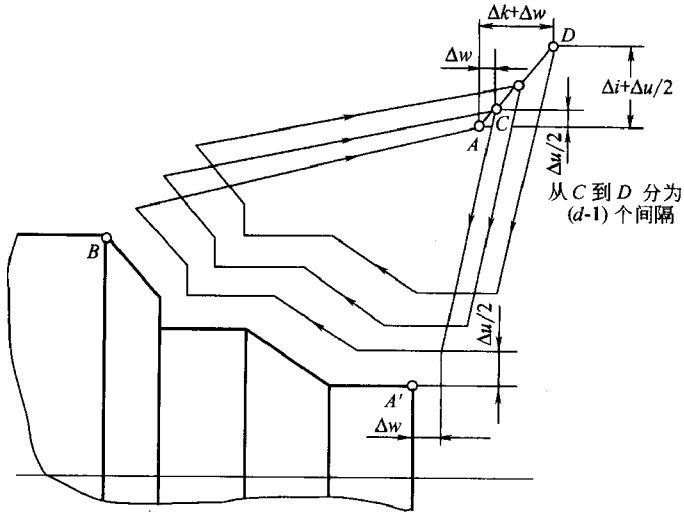


图 4-50 固定形状粗车循环 G73 的走刀路径

编程格式为

G73 P(ns) Q(nf) I(Δi) K(Δκ) U(Δu) W(Δω) D(Δd) F\_\_ S\_\_ T

地址码含义见表 4-10。

【例 4-16】 图 4-51 所示的零件，零件毛坯已基本锻造成形，用 FANUC 系统固定形状粗车循环指令(G73)编写粗加工程序。加工程序单见表 4-13。

表 4-13 应用 G73 固定形状粗车循环加工程序单

程 序	注 解
N010 G50 X260.0 Z220.0	工件坐标系建立
N020 G00 X220.0 Z160.0 S500 M03	至快速进刀起点
N030 G73 P040 Q090 I14.0 K14.0 U4.0 W2.0 D3 F30.0	G73 为固定形状粗车循环
N040 G00 X80.0 W-40.0 S800	} 精加工轮廓
N050 G01 W-20.0 F15.0	
N060 X120.0 W-10.0	
N070 W-20.0 S600	
N080 G02 X160.0 W-20.0 I20.0	
N090 G01 X180.0 W-10.0 S280	

程 序	注 解
N100 G70 P040 Q090	精加工复合循环,循环体 N040 ~ N090
N110 M05	主轴停止
N120 M30	程序结束

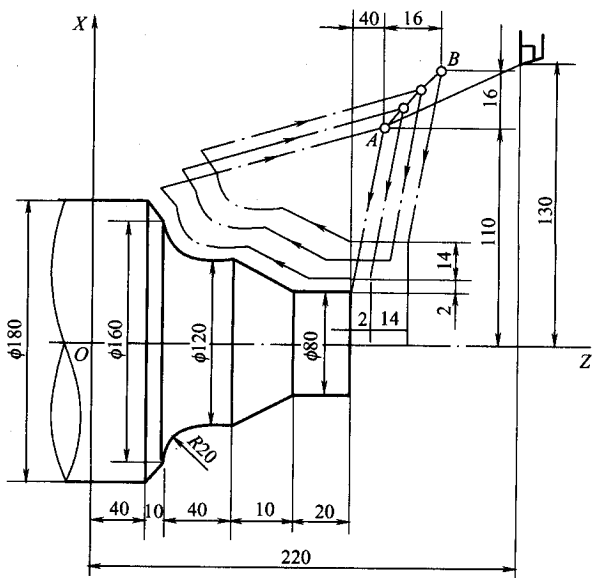


图 4-51 典型加工零件

## 二、华中数控 HNC 21/22T 的固定循环

HNC 21/22T 常用的固定循环代码见表 4-14,循环指令中的地址码含义见表 4-15。

表 4-14 华中数控世纪星 21/22T 固定循环

G 代码	编 程 格 式	用 途
G71	G71 U(Δd)R(r)X(xnf)X(Δx)X(Δz)F(f)S(s)T(t) 有凹槽时:G71 U(Δd)R(r)X(ns)X(xnf)X(e)F(f)S(s)T(t)	内/外圆粗车循环
G72	G72 W(Δd)R(r)F(ns)X(xnf)X(Δx)X(Δz)F(f)S(s)T(t)	端面粗车循环
G76	G76 C(c)R(r)X(e)X(a)X(s)X(z)X(i)X(k) U(d)X(Δd <sub>min</sub> )R(r)X(Δd)X(p)X(L)	螺纹切削复合循环

表 4-15 车削固定循环中地址码的含义

地址	含 义	地址	含 义
ns	循环程序段中第一个程序段的顺序号	$\Delta x$	X 轴方向的精加工余量(半径值)
nf	循环程序段中最后一个程序段的顺序号	$\Delta z$	Z 轴方向的精车余量
$\Delta d$	切削深度(每次进刀量)	e	精加工余量,其值为轮廓的等距线距离,外
r	每次退刀量		径切削时为正,内径切削时为负

## 第六节 综合实例

【例 4-17】 按 SIEMENS 802S/C 系统,编写如图 4-52 所示的轧辊零件轮廓精加工程序。工件坐标系原点设在图中 A 点, B(100, 200) 为换刀点。采用左、右手轮廓车刀各 1 把,进给速度  $f = 120\text{mm}/\text{min}$ 。

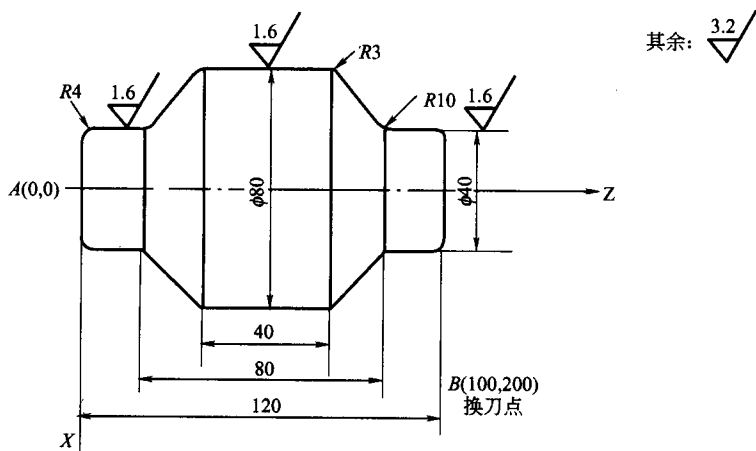


图 4-52 轧辊零件

零件精加工程序见表 4-16。

表 4-16 轧辊精加工程序

程 序	注 释
N010 G54 G90 G23	工件坐标系设定、绝对尺寸、直径编程
N020 M3 G94 T1 D1	主轴正转、直线进给率、选择 1 号刀 1 号编置
N030 G00 Z130.0	快速移动 Z 轴到 Z130 位置
N040 X50.0	快速移动 X 轴到 X50 位置



程 序	注 释
N850 G01 X30.0 Z120.0 F100	以插补速度进刀至点(15,120)(搭刀处)
N060 X32.0	返回至 R4 圆弧起点
N070 G03 X40.0 Z116.0 I0.0 K-4.0	加工左侧 R4 圆弧
N080 G01 X104.14.2	加工 $\phi 40$ 外轮廓
N090 G02 X45.858 Z97.071 I10.0 K0.0	加工 R10 圆弧
N100 G01 X78.243 Z80.879	加工斜面
N110 G03 X80.0 Z78.757 I-2.121 K-2.121	加工 R3 圆弧
N120 G01 X80.0 Z59.0	加工 R3 圆弧与 $\phi 80$ 轮廓(搭刀部分)
N130 G00 X100.0 Z58.0	快速退刀
N140 T1 D0	1 号刀刀具补偿取消
N150 G00 X200.0	X 向快速退刀
N160 Z200.0	Z 向快速退刀
N170 G55	工件坐标系设定
N180 T2 D1	换 2 号刀 2 号刀具补偿建立
N190 G00 Z-5.0	Z 向快速进刀至 Z-5mm 处
N200 X50.0	X 向快速进刀至 X50mm 处
N210 G01 X30.0 Z0.0 F100	以插补速度进刀至(15,0)点
N220 X32.0	返回至 R4 圆弧起点
N230 G02 X40.0 Z40.0 I0.0 K4.0	加工左侧 R4 圆弧
N240 G01 Z15.858	加工 $\phi R40$ 外轮廓
N250 G03 X45.858 Z22.929 I10.0 K0.0	加工 R10 圆弧
N260 G01 X78.243 Z39.121	加工斜面
N270 G02 X80.0 Z41.243 I-2.121 K2.121	加工 R3 圆弧
N280 G01 X80.0 Z61.0	加工 R3 圆弧与 $\phi 80$ 轮廓(搭刀部分)
N290 G00 X100.0 Z62.0	快速退刀
N300 T2 D0	2 号刀刀具补偿取消
N310 G00 X200.0	X 向快速退刀
N320 Z200.0	Z 向快速退刀
N330 M05	
N340 M30	程序结鼓速

【例 4-18】 编写图 4-53(a) 所示零件的车削精加工程序,图(b)为刀具安装及刀具尺寸位置,刀具及切削用量见表 4-17。换刀点位置为(X200,Z350),加工程序见表 4-18。

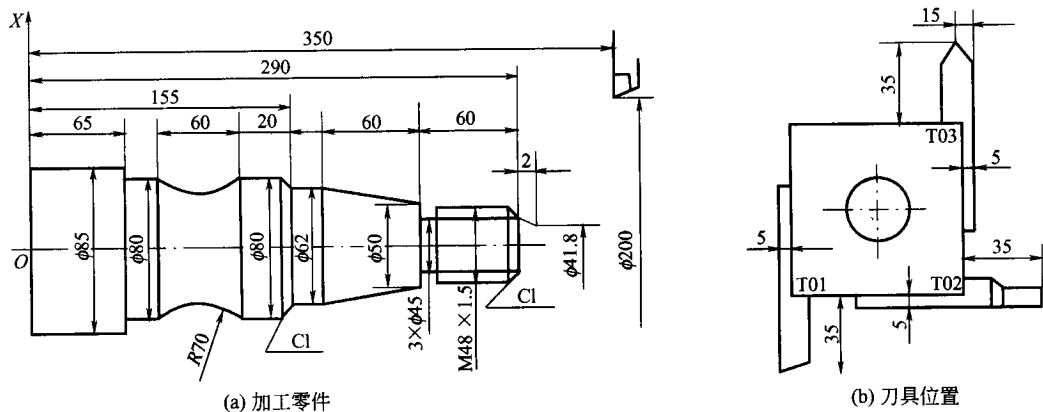


图 4-53 典型车削加工零件

表 4-17 刀具及切削用量

刀具编号	刀具规格	加工内容	主轴转速 $S/r \cdot \text{min}^{-1}$	进给转速 $S/r \cdot \text{min}^{-1}$
1	93°精车刀	外轮廓精加工	630	0.15
2	切槽刀	切退刀槽	315	0.16
3	螺纹车刀	轮廓粗加工	200	1.5

表 4-18 加工程序

程 序	注 释
O0002	程序号
N10 G50 X200.0 Z350.0	建立工件坐标系
N20 S630 M03 T0101	主轴正转 转速 630r/min
N30 G00 X41.8 Z272.0 M08	快进,切削液开
N40 G01 X47.8 Z289.0 F0.15	工进,倒角,进给还度 0.15mm/r
N50 Z230.0	精车螺纹大径 φ47.8
N60 X50.0	退刀
N70 X62.0 W-60.0	精车锥面
N80 Z155.0	精车 φ62 外圆
N90 X78.0	退刀
N100 X80.0 W-1.0	倒角
N110 W-19.0	精车圆弧
N120 G02 W-60.0 I63.25 K-30.0	精车 φ80 外圆

程 序	注 释
N130 G01 Z65.0	精车 $\phi 80$ 外圆
N140 X90.0	退刀
N150 G00 X200.0 Z350.0 T0100 M09	返回起点,取消刀具补偿,同时切削液关
N160 T0202	换 2 号刀,并进行刀具补偿
N170 S315 M03	主轴正转,转速 315r/min
N180 G00 X51.0 Z227.0 M08	快进,切削液开
N190 G01 X45.0 F0.16	工进,车 $\phi 45$ 槽,进给速度 0.16mm/r
N200 G04 X5.0	暂停进给 5s
N210 G00 X51.0	快速退刀
N220 X200.0 Z350.0 T0200 M09	返回起点,取消刀具补偿,同时切削液关
N230 T0303	换 3 号刀,并进行刀具补偿
N240 S200 M03	主轴正转,转速 200r/min
N250 G00 X62.0 Z296.0 M08	快进,切削液开
N260 G92 X47.2 Z231.5 F1.5	螺纹切削循环
N270 X46.6	
N280 X46.2	
N290 X46.04	
N300 G00 X200.0 Z350.0 T0200 M09	返回起点,取消刀具补偿,同时切削液关
N310 M05	主轴停止
N320 M30	程序结束

注:该程序采用绝对与相对坐标混合编程。

## 第五章 数控铣削加工编程

### 第一节 数控铣削编程概述

#### 一、数控铣床的编程特点

数控镗铣床是通过二轴联动加工零件的平面轮廓,通过二轴半控制、三轴或多轴联动来加工空间曲面零件,如图 5-1、图 5-2、图 5-3 所示。数控铣削加工编程具有如下特点。

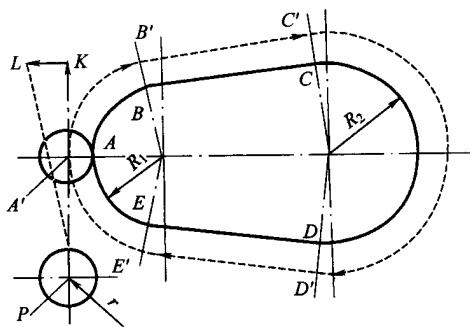


图 5-1 二轴联动的平面加工

①首先应进行合理的工艺分析。由于零件加工的工序多,在一次装卡下,要完成粗加工、半精加工和业加工,周密合理地安排各工序的加工顺序,有利于提高加工业度和生产效率。

②尽量按刀具集中法安排加工工序,减少换刀次数。

③合理设计进、退刀辅助程序段,选择换刀点的位置,是保证加工正常进行,提高零件加工的重要环节。

④对于编好的程序,必须进行认真检查,并于加工前进行试运行,减少程序出错率。

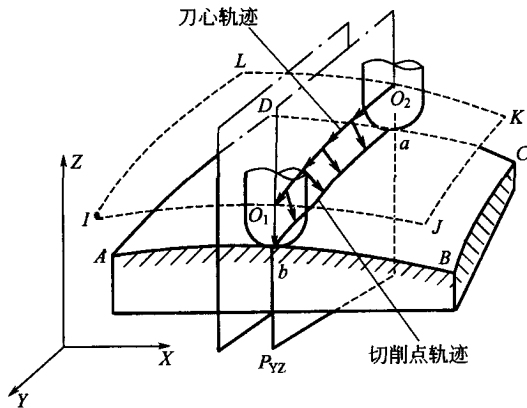


图 5-2 二轴半联动的曲面加工

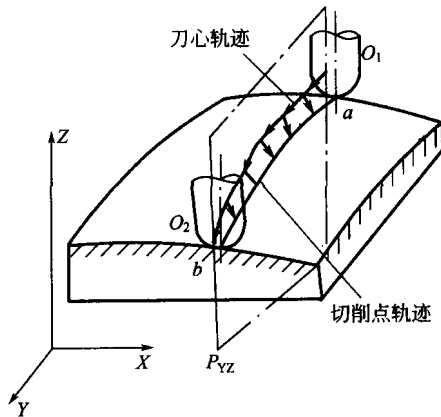


图 5-3 三轴联动的曲面加工

## 二、和控铣削编程中的坐标系

### (1) 机床坐标系

以机床原点为坐标系原点建立起来的 X、Y、Z 轴直角坐标系称为机床坐标系。机床坐标系是制造和调整机床的基础,也是设置工件坐标系的基础,一般不允许随意变动。

### (2) 参考点

参考点是机床上的一个固定点。该点是刀具退离到千个固定不变的极限点,其位置由机械挡块或行程开关来确定。以参考点为原点,坐标方向与机床坐标方向相同建立的坐标系叫做参考坐标系。

### (3) 工件坐标系(编程坐标系)

为了确定零件加工时在机床中的位置,必须建立工件坐标系。工件坐标系采用与机

床运动坐标系一致的坐标方向,工件坐标系的原点(即程序原点)要选择便于测量或对刀的基准位置,同时要便于编程计算。选择工件零点的位置时应注意如下。

- 工件零点应选在零件图的尺寸基准上,这样便于坐标值的计算,减少错误。
- 工件零点尽量选在精度较高的加工表面,以提高被加工零件的加工精度。
- 对于对称的零件,工件零点应设在对称中心上。
- 对于一般零点,通常设在工件外廓的某一角上。
- Z轴方向上的零点,一般设在工件表面。

图 5-4 所示为工件坐标系与机床坐标系的关系。

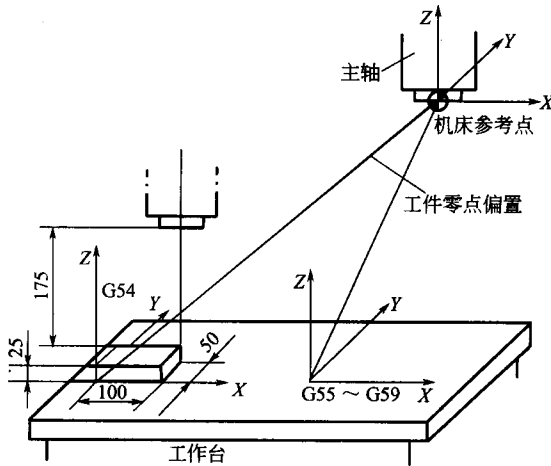


图 5-4 工件坐标系与机床坐标系间的关系

### 三、典型数控系统的指令代码

数控铣床数控系统常用的功能指令有准备功能 G、辅助功能 M、刀具功能 T、主轴转速功能 S 和进给功能 F。表 5-1~表 5-3 给出了几种常用的典型数控铣削系统的 G 功能代码,供读者学习参考。数控机床根据功能和性能要求,配置不同的数控系统。系统不同,其指令代码也有差别,因此,编程时应按所使用数控系统代码的编程规则进行编程。

表 5-1 SIMENS802S/C 系统常用指令

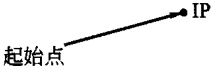

地址	含义及赋值	说明	编程
T	刀具号 0 ~ 32000 整数,不带符号	可以用 T 指令直接更换刀具,也可由 M6 进行,由机床数据设定	T...
D	刀具刀补号 0...9 整数,不带符号	用于某个刀具 T...的补偿参数 DO 表示补偿值 = 0 一个刀具最多有 9 个 D 号	D...

地址	含义及赋值	说 明	编 程	
S	主轴转速,在 G4 中表示暂停时间	主轴转速单位是 r/min,在 G4 中作为暂停时间	S...	
F	进给率(与 G4 一起可以编程停留时间)	刀具/工件的进给速度 对应 G94 或 G95,单位分别为 mm/min 或 mm/Y	F...	
M	辅助功能 0...99 整数,无符号	用于进行开关操作,一个程序段中最多有 5 个 M 功能	M...	
G	G 功能(准备功能字)已事先规定	按 G 功能组划分,一个程序段中只能有一个 G 功能组中的一个 G 功能指令	G...	
G0	快速移动	运动指令(插补方式),模态有效	G0X...Y...Z...	
G1 <sup>①</sup>	直线插补		G1X...Y...Z...F...	
G2	顺时针圆弧插补		圆心和终点 :G2X...Y...Z...I...K... ; 半径和终点 :G2X...Y...CR=...F... ; 张角和圆心 :G2AR :...I...J...F... ; 张角和终点 :G2AR :...X...Y...F... ;	
G3	逆时针圆弧插补		G3... ;其他同 G2	
G5	中间点圆弧插补		G5 X...Y...Z...IX=...JY=...KZ=...F...	
G33	恒螺距的螺纹切削		S...M... :主轴转速,方向 G33Z...K...在 Z 轴方向上带补偿夹具攻丝	
G4	暂停时间		特殊运行 程序段方式有效	G4P...或 G4S... ;自身程序段有效
G63	带补偿夹具切削内螺纹			G63Z...F...S...M...
G74	回参考点			G74X...Y...Z... ;自身程序段有效
G75	回固定点			G75X...Y...Z... ;自身程序段有效
G158	可编程的偏置	写存储器 程序段方式有效	G158X...Y...Z... ;自身程序段有效	
G258	可编程的旋转		G258RPL=... ;在 G17 到 G19 平面中旋转,自身程序段	
G259	附加可编程旋转		G259RPL=... ;在 G17 到 G19 平面中附加旋转,自身程序段有效	
G25	主轴转速下限		G25S... ;自身程序段有效	
G26	主轴转速上限		G26S... ;自身程序段有效	
G17 <sup>①</sup>	X/Y 平面		平面选择 模态有效	G17...所在平面的垂直轴为刀具长度补偿轴
G18	Z/X 平面			
G19	Y/Z 平面			

地址	含义及赋值	说 明	编 程
G40 <sup>①</sup>	刀尖半径补偿方式的取消	刀尖半径补偿 模态有效	
G41	调用刀尖半径补偿, 刀具在轮廓左侧移动		
G42	调用刀尖半径补偿, 刀具在轮廓右侧移动		
G500	取消可设定零点偏置	可设定零点偏置 模态有效	
G54 ~ G57	第一至第四可设定零点偏置		
G53	按程序段方式取消可设定零点偏置	取消可设定零点偏置	
G60 <sup>①</sup>	准确定位	定位性能 模态有效	
G64	连续路径方式		
G70	英制尺寸	英制/公制尺寸 模态有效	
G71 <sup>①</sup>	公制尺寸		
G90 <sup>①</sup>	绝对尺寸	绝对尺寸/增量尺寸 模态有效	
G91	增量尺寸		
G94 <sup>①</sup>	进给率 F, 单位 mm/min	进给/主轴 模态有效	
G95	主轴进给率 F, 单位 mm/r		

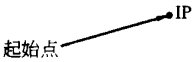
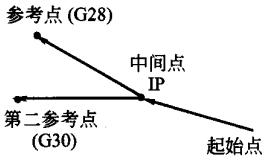
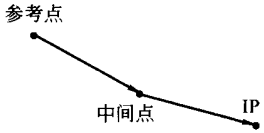

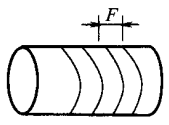
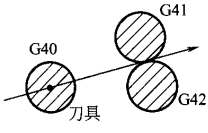
①功能在程序启动时生效(如果没有编程新的内容,请用“铣削”的系统为量)。

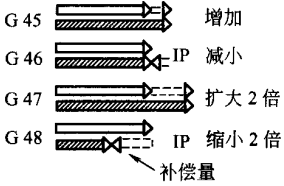
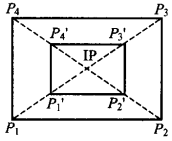
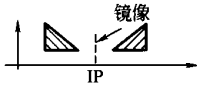
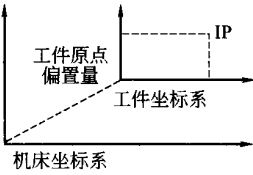
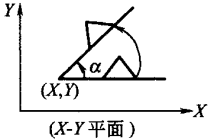
表 5-2 FANUCi-MA 系统的常用指令

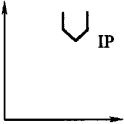
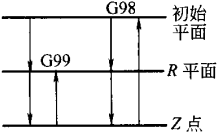
功能及代码	说 明	编 程 格 式
定位(G00)		G00IP __ ;
直线插补(G01)		G01 IP __ ;



功能及代码	说明	编程格式
圆弧插补 (G02, G03)		$G17 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} X\_Y\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ I\_J\_ \end{Bmatrix} F\_ ;$ $G18 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} X\_Z\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ I\_K\_ \end{Bmatrix} F\_ ;$ $G19 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} X\_Z\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ J\_K\_ \end{Bmatrix} F\_ ;$
螺旋插补 (G02, G03)		$G17 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} X\_Y\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ I\_J\_ \end{Bmatrix} a\_ F\_ ;$ $G18 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} X\_Z\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ I\_K\_ \end{Bmatrix} a\_ F\_ ;$ $G19 \begin{Bmatrix} G02 \\ G03 \end{Bmatrix} Y\_Z\_ \begin{Bmatrix} R\_ \\ J\_K\_ \end{Bmatrix} a\_ F\_ ;$ <p>a 任何圆弧插补轴以外的轴地址</p>
暂停(G04)		$G04 \begin{Bmatrix} X\_ \\ P\_ \end{Bmatrix} ;$
准确停止 (G09)		$G09 \begin{Bmatrix} G01 \\ G02 \\ G03 \end{Bmatrix} IP\_$
极坐标指令 (G15, G16)		$G17 \ G16 \ Xp\_Yp\_ \dots ;$ $G18 \ G16 \ Zp\_Xp\_ \dots ;$ $G19 \ G16 \ Yp\_Zp\_ \dots ;$ <p>G15 取消</p>
平面选择 (G17, G18, G19)		$G17 ;$ $G18 ;$ $G19 ;$
英制/公制 转换 (G20, G21)		G20 英制输入 G21 公制输入

功能及代码	说 明	编 程 格 式
返回参考点检测 (G27)		G27 IP __ ;
返回参考点 (G28) 返回第二参考点 (G30)		G28IP __ ; G30IP __ ;
从参考点返回到起始点 (G29)		G29IP __ ;
跳 转 功 能 (G31)		G31 IP __ F __ ;
螺 纹 切 削 (G33)		G33IP __ F __ ; F : 导程
刀具半径补偿 (G40 ~ G42)		$\left. \begin{matrix} G17 \\ G18 \\ G19 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} G41 \\ G42 \end{matrix} \right\} D$ <p>D : 刀具偏置号 G40 取消</p>
刀具长度补偿 (G43, G44, G49)		$\left. \begin{matrix} G17 \\ G18 \\ G19 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} G43 \\ G44 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} Z \\ Y \\ X \end{matrix} \right\} H$ $\left. \begin{matrix} G17 \\ G18 \\ G19 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} G43 \\ G44 \end{matrix} \right\} H \_ H : 刀具偏置号$ <p>G49 取消</p>

功能及代码	说明	编程格式
刀具长度补偿 (G43, G44, G49)		$\left. \begin{matrix} G43 \\ G44 \end{matrix} \right\} a \_ H \_$ a :单轴地址 H :刀具偏置号 G49 :取消
刀具偏置 (G45 ~ G48)		$\left. \begin{matrix} G45 \\ G46 \\ G47 \\ G48 \end{matrix} \right\} IP \_ D \_ ;$ D :刀具偏置号
比例缩放 (G50, G51)		$G51 X \_ Y \_ Z \_ \left\{ \begin{matrix} P \_ \\ I \_ J \_ K \_ \end{matrix} \right\} ;$ P I J K :比例缩放倍率 X Y Z :比例缩放中心坐标 G50 :取消
可编程镜像 (G50.1, G51.1)		G51.1 IP _ ; G50.1 ; .....取消
机床坐标系选择 (G53)		G53 IP _ ;
工件坐标系选择 (G54 ~ G59)		$\left. \begin{matrix} G54 \\ \cdot \\ \cdot \\ G59 \end{matrix} \right\} IP \_$
坐标系旋转 (G68, G69)		$G68 \left\{ \begin{matrix} G17 X \_ Y \_ \\ G18 Z \_ X \_ \\ G19 Y \_ Z \_ \end{matrix} \right\} Ra$ G69 :取消

功能及代码	说 明	编 程 格 式
固定循环 ( G73 ,G74 ,G80 ~ G89 )	“ 简化编程功能 ”	G80 ;取消 G73 } G74 } G76 } G81 } X __ Y __ Z __ P __ Q __ R __ F __ K __ . } . } G89 }
绝对指令/ 增量指令编程 ( G90/G91 )		G90 __ ;绝对指令 G91 __ ;增量指令 G90 __ G91 __ ;并用
工件坐标系变 更( G92 )		G92IP __ ;
工件坐标系 预置( G92.1 )		G92.1 IP 0 ;
每分/每转 进 给 ( G94 , G95 )		G94F __ ; G95F __ ;
恒定端面切 削速度控制 ( G96 ,G97 )		G96S __ ; G97S __ ;
返回起始点 /返回 R 点 ( G98 ,G99 )		G98 __ ; G99 __ ;

注 :IP \_\_ 绝对值指令时 ,是终点的坐标值 ;增量值指令时 ,是刀具移动的距离。

表 5-3 FACOR8055M 系统常用的 G 功能

G 代码	功 能	G 代码	功 能
G00	快速定位	G29	主轴选择
G01	直线插补	G30	主轴同步(偏移)
G02	顺时针圆弧插补	G32	进给率'F'用作时间的倒函数
G03	逆时针圆弧插补	G33	螺纹切削
G04	停顿/程序段准备停止	G36	自动半径过渡
G05	圆角过渡	G37	切向入口
G06	绝对圆心坐标	G38	切向出口
G07	方角过渡	G39	自动倒角连接
G08	圆弧切于前一路径	G40	取消刀具半径补偿
G09	三点定义圆弧	G41	左手刀具半径补偿
G10	图像镜像取消	G42	右手刀具半径补偿
G11	图像相对于 X 轴镜像	G45	切向控制
G12	图像相对于 Y 轴镜像	G50	受控圆角
G13	图像相对于 Z 轴镜像	G54 ~ G57	绝对零点偏置
G14	图像相对于编程的方向镜像	G58	附加零点偏置 1
G15	纵向轴的选择	G59	附加零点偏置 2
G16	用两个方向选择主平面	G60	轴向钻削/攻丝固定循环
G17	主平面 X - Y 纵轴为 Z	G61	径向钻削/攻丝固定循环
G18	主平面 Z - X 纵轴为 Y	G62	纵向槽加工固定循环
G19	主平面 Y - Z 纵轴为 X	G63	径向槽加工固定循环
G20	定义工作区下限	G66	模式重复固定循环
G21	定义工作区上限	G68	沿 X 轴的余量切除固定循环
G22	激活/取消工作区	G69	沿 Z 轴的余量切除固定循环
G28	第二主轴选择	G70	以英寸为单位编程
G71	以毫米为单位编程	G85	端面圆弧车削固定循环
G72	通用和特定缩放比例	G86	纵向螺纹切削固定循环
G74	机床参考点搜索	G87	端面螺纹切削固定循环
G75	探针运动直到接触	G88	沿 X 轴开槽固定循环
G76	探针接触	G89	沿 Z 轴开槽固定循环
G77	从动轴	G90	绝对坐标编程
G77S	主轴速度同步	G91	增量坐标编程
G78	从动轴取消	G92	坐标预置/主轴速度限制

G 代码	功 能	G 代码	功 能
G78S	取消主轴同步	G93	极坐标原点
G81	直线车削固定循环	G94	直线进给率 $\text{mm}(\text{in})/\text{min}$
G82	端面车削固定循环	G95	旋转进给率 $\text{mm}(\text{in})/r$
G83	钻削固定循环	G96	恒速切削
G84	圆弧车削固定循环	G97	主轴转速为 $r/\text{min}$

## 第二节 常用指令的编程方法

### 一、坐标系统与尺寸的编程

#### (1) 工件坐标系设定指令

工件坐标系设定指令是规定工件坐标系原点的指令,工件坐标系原点又称编程零点。数控编程时,必须先建立工件坐标系,用来确定刀具刀位点在坐标系中的坐标值。

编程格式:

G92 X\_\_Y\_\_Z\_\_

式中, X、Y、Z 为刀位点在工件坐标系中的初始位置,程序内绝对指令中的坐标数据,就是在工件坐标系中的坐标值。

注意事项:有的数控系统则直接采用零点偏置指令(G54~G57)建立工件坐标系,如 SIMENS802S/C 系统。

#### (2) 工件坐标系选择 G54~G59

G54~G59 是系统预定的 6 个工件坐标系,或称绝对零点偏置指令,可以根据需要任意选用。CNC 具有零点偏置表,这 6 个工件坐标系的原点在机床坐标系中的值用 MDI 方式输入,产生独立的某些工件零点,如图 5-5 所示。

工件坐标系一旦选定,后续程序段中绝对值编程时的指令值,均为相对此工件坐标系原点的值。G54~G59 为模态指令,当电源接通时,G54 为缺省值。

#### (3) 坐标平面选择指令(G17、G18、G19)

平面选择指令 G17、G18、G19 分别用来指定程序段中刀具的圆弧插补平面和刀具半径补偿平面。在笛卡儿直角坐标系中,三个互相垂直的轴 X、Y、Z 分别构成三个平面,如图 5-5 所示。G17 表示选择在 XY 平面内加工,G18 表示选择在 ZX 平面内加工,G19 表示选择在 YZ 平面内加工。立式数控铣床大都在 X、Y 平面内加工,故 G17 可以省略。

#### (4) 绝对和增量尺寸编程(G90/G91)

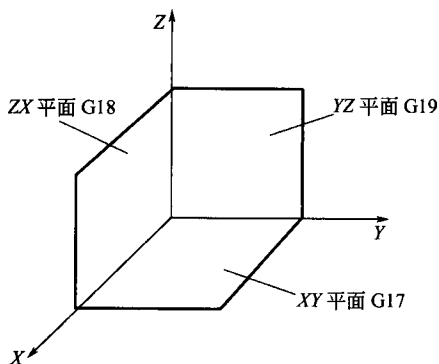
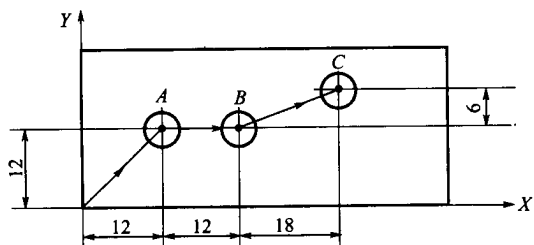


图 5-5 加工平面的选定

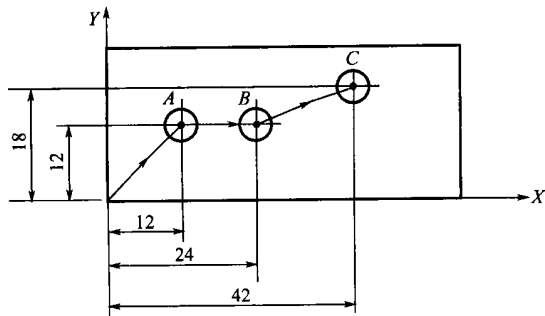
G90 和 G91 指令分别对应着绝对位置数据输入和增量位置数据输入。G90 表示程序段中的尺寸字为绝对坐标值,即从编程零点开始的坐标值。系统上电后,机床处在 G90 状态。G90 编入程序时,以后所有输入的坐标值全部是以编程零点为基准的绝对坐标值,并且一直有效,直到在后面的程序段中由 G91(增量位置输入数据)替代为止。

图 5-6 所示零件,孔 A、B、C 的相互位置采用相对尺寸标注,在编程时采用 G91 方式比较方便,而图 5-7 所示的零件采用绝对尺寸标注,亦采用 G90 方式编程。



刀具位置	坐 标	
	$\Delta X$	$\Delta Y$
A	12	12
B	12	0
C	18	6

图 5-6 相对尺寸标注及坐标计算



刀具位置	坐 标	
	X	Y
A	12	12
B	24	12
C	42	18

图 5-7 绝对尺寸标注及坐标计算

注意:有些数控系统没有绝对和增量尺寸指令,当采用绝对尺寸编程时,尺寸字用 X、

$Y$ 、 $Z$  表示 ;采用增量尺寸编程时 ,尺寸字用  $U$ 、 $V$ 、 $W$  表示。

## 二、刀具功能 T、主轴转速功能 S 和进给功能 F

数控铣床的刀具功能 T、主轴转速功能 S 和进给功能 F 的编程格式及其规则 ,与数控车床基本相同 ,请参考第 4 章。

## 三、常用的辅助功能

辅助功能也叫 M 功能或 M 代码 ,它是控制机床或系统开关功能的一种命令。常用的辅助功能编程代码见表 5-4。

表 5-4 常用的辅助功能的 M 代码、含义及用途

功能	含 义	用 途
M00	程序停止	实际上是一个暂停指令。当执行有 M00 指令的程序段后 ,主轴的转动、进给、切削液都将停止。它与单程序段停止相同 ,模态信息全部被保存 ,以便进行某一手动操作 ,如换刀、测量工件的尺寸等。重新启动机床后 ,继续执行后面的程序
M01	选择停止	与 M00 的功能基本相似 ,只有在按下“选择停止”后 ,M01 才有效 ,否则机床继续执行后面的程序段 ,按“启动”键 ,继续执行后面的程序
M02	程序结束	该指令编在程序的最后一条 ,表示执行完程序内所有指令后 ,主轴停止、进给停止、切削液关闭 ,机床处于复位状态
M03	主轴正转	用于主轴顺时针方向转动
M04	主轴反转	用于主轴逆时针方向转动
M05	主轴停止转动	用于主轴停止转动
M07	冷却液开	用于切削液开 1
M08	冷却液开	用于切削液开 2
M09	冷却液关	用于切削液关
M30	程序结束	使用 M30 时 ,除表示执行 M02 的内容之外 ,还返回到程序的第一条语句 ,准备下一个工件的加工
M98	子程序调用	用于调用子程序
M99	子程序返回	用于子程序结束及返回

注意 :许多 M 代码由机床厂定义 ,例如有些机床将 M41、M42 和 M43 分别定义为主轴低速、中速和高速档选择指令 ,各种机床的 M 代码规定有差异 ,编程时必须根据说明书的规定进行。



## 第三节 运动路径控制指令的编程

### 一、快速线性移动指令 G00

G00 用于快速定位刀具,没有对工件进行加工,可以在几个轴上同时执行快速移动,由此产生一线性轨迹。

#### (1) 编程格式

G00 X(U) Y(V) Z(W) \_

式中, X、Y、Z 为刀具移动的目标点坐标。

#### (2) 注意事项

①使用 G00 指令时,刀具的实际运动路线并不一定是直线,而是一条折线。因此,要注意刀具是否与工件和夹具发生干涉。

②使用 G00 指令时,机床的进给率由轴机床参数指定,G00 指令是模态代码。

### 二、带进给率的线性插补指令 G01

直线插补指令是直线运动指令,它命令刀具在两坐标间以插补联动方式按指定的进给速度做任意斜率的直线运动,该指令是模态(续效)指令。

#### (1) 编程格式

G01 X(U) Y(V) Z(W) F \_

式中, X、Y、Z 为刀具移动的目标点坐标;F 为进给速度。

#### (2) 说明

①G01 指令后的坐标值取绝对值编程还是取增量值编程由 G90/G91 决定。

②F 指令也是模态指令,F 的单位由直线进给率或旋转进给率指令确定。

【例 5-1】如图 5-8 所示,刀具从起点 A 沿直线 AB 切削,程序如下。

用绝对尺寸指令编程:

G90 G01 X60 Y50 F150 (G90 可以不写)

用相对尺寸指令编程:

G91 G01 X40 Y30 F150。

### 三、圆弧插补指令 G02/G03

圆弧插补指令命令刀具在指定平面内按给定的进给速度 F 作圆弧运动,切削出圆弧

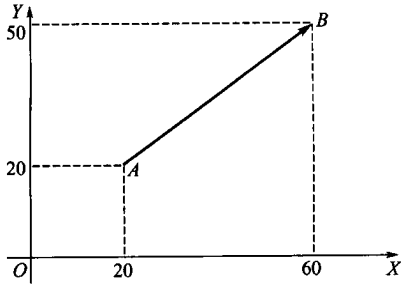


图 5-8 G01 编程实例

轮廓。

(1) 圆弧顺逆的判断

圆弧插补指令分为顺时针圆弧插补指令(G02)和逆时针圆弧插补指令(G03)。圆弧插补的顺逆可按图 5-9 给出的方向判断。沿圆弧所在平面(如 XZ 平面)的垂直坐标轴的负方向(-Y)看去,顺时针方向为 G02,逆时针方向为 G03。

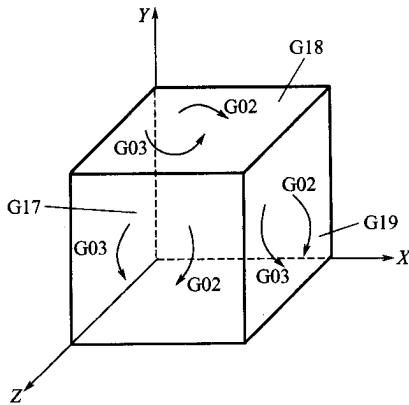


图 5-9 圆弧顺逆方向的判断

(2) G02/G03 的编程格式

在零件上加工圆弧时,不仅要用 G02/G03 指出圆弧的顺逆时针方向,用 X、Y、Z 指定圆弧的终点坐标,而且还要指定圆弧的中心位置。常用指定圆心位置的方式有两种,因而 G02/G03 的指令格式有两种。

①用 I、K 指定圆心位置：

$$\begin{cases} G02 \\ G03 \end{cases} X\_Y\_Z\_I\_J\_K\_F\_$$

②用圆弧半径 R 指定圆心位置：

$$\begin{cases} G02 \\ G03 \end{cases} X\_Y\_Z\_R\_F\_$$

(3)说明

①采用绝对值编程时,圆弧终点坐标为圆弧终点在工件坐标系中的坐标值,用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示;当采用增量值编程时,圆弧终点坐标为圆弧终点相对于圆弧起点的增量值。

②数控铣床的圆心坐标为  $I$ 、 $J$ 、 $K$  表示圆弧起点到圆弧中心所作矢量分别在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标轴方向上的分矢量(矢量方向指向圆心)。图 5-10 和图 5-11 分别给出了在  $X$ 、 $Y$  平面内,顺弧与逆弧加工时的圆心坐标的关系。

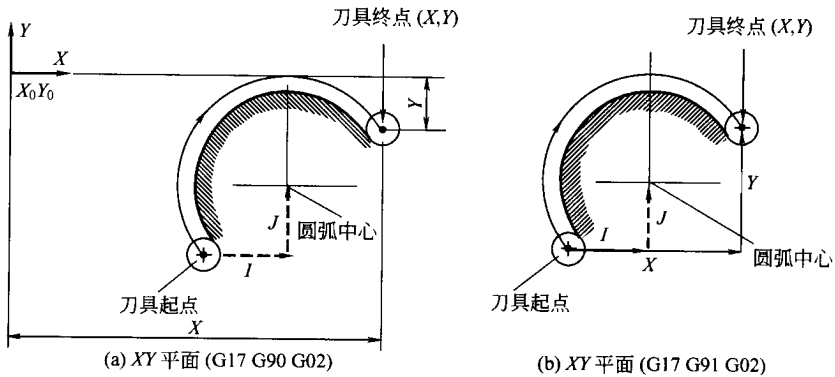


图 5-10 顺弧加工圆心坐标的表示方法

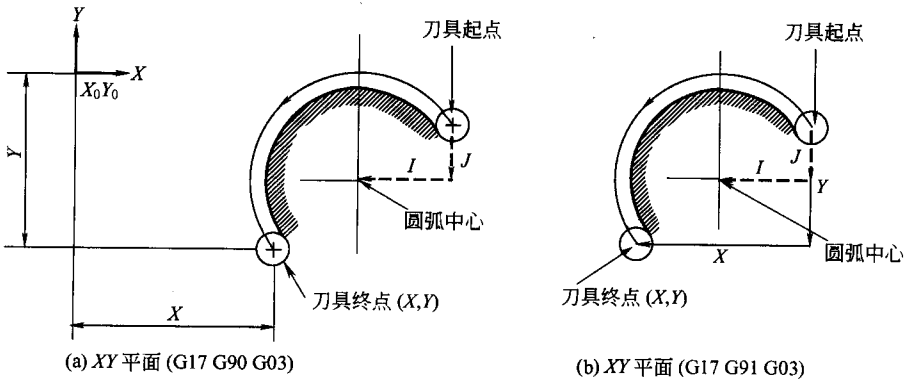


图 5-11 逆弧加工圆心坐标的表示方法

③当用半径指定圆心位置时,由于在同一半径  $R$  的情况下,从圆弧的起点到终点有两个圆弧的可能性,为区别二者,规定圆心角  $\alpha \leq 180^\circ$  时,用“ $+R$ ”表示,如图 5-12 中的圆弧 1; $\alpha > 180^\circ$  时,用“ $-R$ ”表示,图中的圆弧 2。

④用半径  $R$  指定圆心位置时,不能描述整圆。

[例 5-2] 顺时针圆弧加工的刀位点轨迹如图 5-13 所示,图中尺寸为英制尺寸,计算刀位点坐标并编写轮廓加工程序。

G90 G70

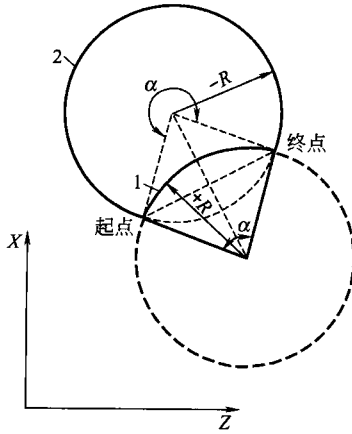


图 5-12 圆弧插补时 +R 与 -R 的区别

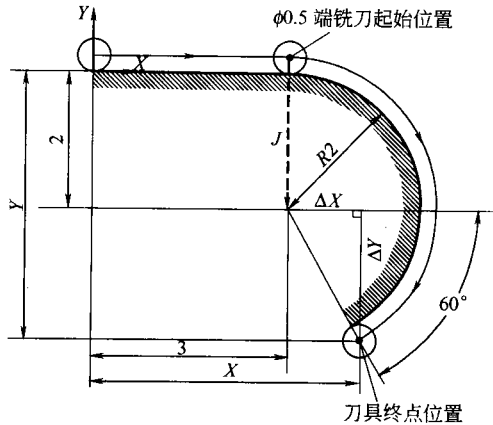


图 5-13 顺时针圆弧加工实例

G17

G01 X3.0 Y0.25 F10.0

G02 X4.125 Y-3.9486 I 0 J-2.25

$\Delta X$	$\Delta Y$	X	Y	I	J
$(2 + 0.25) \times \cos 60^\circ$	$-(2 + 0.25) \sin 60^\circ$	$3 + 1.125$	$-2 - 1.9486$		
$= 1.125$	$= -1.9486$	$= 4.125$	$= -3.9486$	0	-2.25

[例 5-3] 逆时针圆弧加工的刀位点轨迹如图 5-14 所示,图中尺寸为英制尺寸,计算刀位点坐标并编写轮廓加工程序。

G90 G70 G17

G01 X3.875 Y—2.0 F10.0

G03 X3.757 Y—1.5625I—0.8750 J0

$\Delta X$	$\Delta Y$	X	Y	I	J
$(1 - 0.125) \cos 30^\circ$ = 0.7578	$(1 - 0.125) \sin 30^\circ$ = 0.4375	$3 + 0.7578$ = 3.7578	$-2 + 0.438$ = -1.5625	-0.875	0

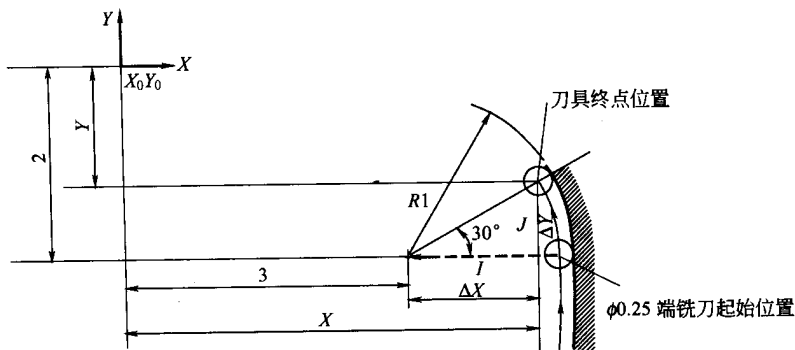


图 5-14 逆时针圆弧加工实例

## 四、暂停指令 G04

G04 指令可使刀具作短暂的无进给光整加工，一般用于镗平面、镗孔等场合。

### (1) 编程格式

G04 X(P) \_

### (2) 说明

地址码 X 或 P 为暂停时间。其中 X 后面可用带小数点的数，单位为 s，如 G04X5. 表示前面的程序执行完后，要经过 5s 的暂停，下面的程序段才执行。地址 P 后面不允许用小数点，单位为 ms。如 G04P 1000 表示暂停 1s。

### (3) 编程举例

【例 5-4】 图 5-15 所示为镗孔加工，对孔底有表面粗糙度要求，程序如下。

.....

N30 G91 G01 Z—7 F60；

N40 G04 X5. (刀具在孔底停留 5s)

N5 G00 Z7；

.....

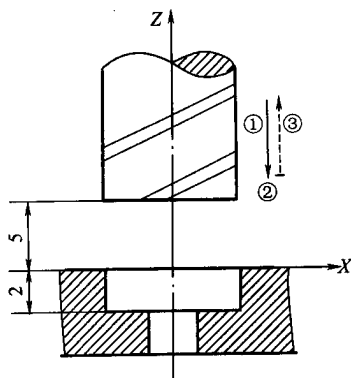


图 5-15 用 G04 的编程铤孔加工

## 第四节 刀具补偿指令及其编程

### 一、铣削加工时的刀具路径

#### (1) 安全高度的确定

对于铣削加工,起刀点和退刀点必须离开加工零件上表面一个安全高度,保证刀具在停止状态时,不与加工零件和夹具发生碰撞。在安全高度位置时刀具中心(或刀尖)所在的平面也称为安全平面,如图 5-16 所示。

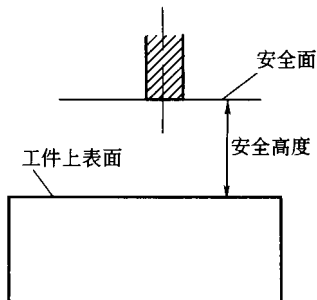


图 5-16 安全面高度

#### (2) 进刀/退刀方式的确定

对于铣削加工,刀具切入工件的方式,不仅影响加工质量,同时直接关系到加工的安全。对于二维轮廓加工,一般要求从侧向进刀或沿切线方向进刀,尽量避免垂直进刀,如图 5-17 所示。退刀方式也应从侧向或切向退刀。刀具从安全平面下降到切削高度时,应离开工件毛坯一个距离,不能直接贴着加工零件理论轮廓直接下刀,以免发生危险。下

刀运动过程不能用快速运动指令 G00,要用直线插补运动指令 G01,如图 5-18 所示。

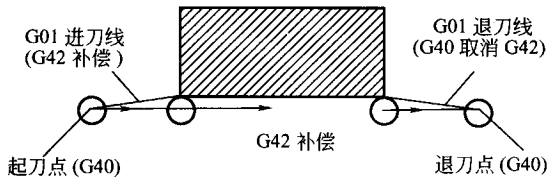


图 5-17 进刀/退刀方式

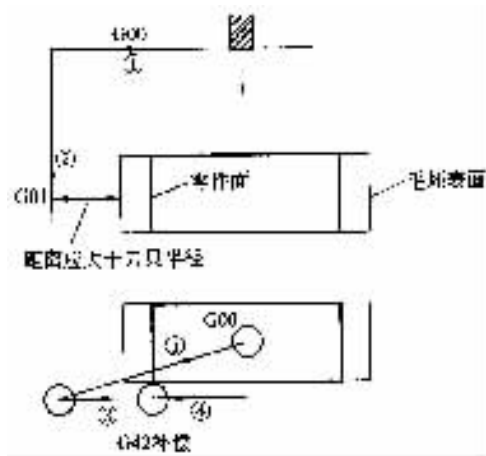


图 5-18 下刀过程

对于型腔的粗铣加工,一般应先钻一个工艺孔至型腔底面(留一定的精加工余量),并扩孔,以便所使用的立铣刀能从工艺孔进刀,进行型腔加工,如图 5-19 所示。

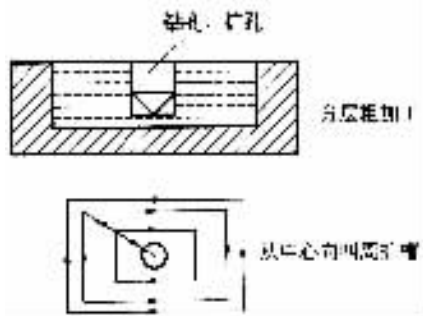


图 5-19 型腔的铣削路线

## 二、刀具半径补偿

(1) 刀具半径补偿指令(G41、G42、G40)

具备刀具半径补偿功能的数控系统,编程时不需要计算刀具中心的运动轨迹,只按零件轮廓编程。使用刀具半径补偿指令,并在控制面板上手工输入刀具半径,数控装置便能自动地计算出刀具中心轨迹,并按刀具中心轨迹运动。即执行刀具半径补偿后,刀具自动偏离工件轮廓一个刀具半径值,从而加工出所要求的工件轮廓。操作时还可以用同一个加工程序,通过改变刀具半径的偏移量,对零件轮廓进行粗、精加工。

G41 为刀具半径左补偿,即刀具沿工件左侧运动方向时的半径补偿,如图 5-20(a)所示;G42 为刀具半径右补偿,即刀具沿工件右侧运动时的半径补偿,如图 5-20(b)所示;G40 为刀具半径补偿取消,使用该指令后,G41、G42 指令无效。G40 必须和 G41 或 G42 成对使用。

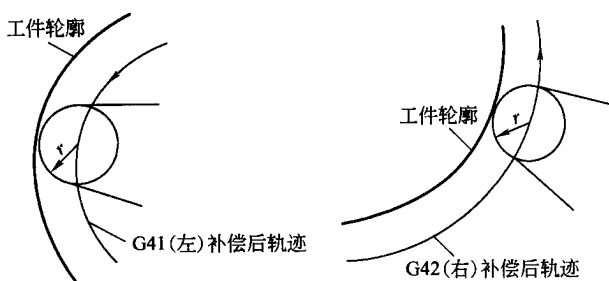


图 5-20 刀具半径补偿

## (2) 刀具半径补偿的过程

刀具半径补偿的过程分为三步。

① 刀补的建立,刀具中心从与编程轨迹重合过渡到与编程轨迹偏离一个偏置量的过程;

② 刀补进行,执行有 G41、G42 指令的程序段后,刀具中心始终与编程轨迹相距一个偏置量;

③ 刀补的取消,刀具离开工件,刀具中心轨迹要过渡到与编程重合的过程。

图 5-17 所示为铣削加工时刀补的建立与取消过程。编程时应注意:G41、G42 不能重复使用,即在程序中前面有了 G41 或 G42 指令之后,不能再直接使用 G41 或 G42 指令。若想使用,则必须先用 G40 指令解除原补偿状态后,再使用 G41 或 G42,否则补偿就不正常了。

【例 5-5】 利用刀具半径补偿功能,编写如图 5-21 所示零件的加工程序。工件坐标系  $Z_0$  设置在零件的上表面, $X_0$ 、 $Y_0$  设在零件的几何对称中心上。加工程序见表 5-5。



表 5-5 加工程序

程 序	说 明
O0051	程序号
N010G92X0Y0Z20.0	建立工件坐标系
N020G90G00X—60.0Y—60.0S500M03	绝对编程 快速定位到下刀点 A ,主轴正转
N030Z—24.0M08	快速在 A 点下刀
N040G41G01X—60.0Y—30.0D01F120	以切削速度进给 ,建立刀具半径左偏置
N050Y0	切削加工至 C 点
N060G02X—30.0Y30.0R30.0	加工左侧 R30 圆弧
N070G01X30.0Y30.0	加工直线
N080G02X30.0Y—30.0R30.0	加工右侧及 30 圆弧
N090G01X—30.0Y—30.0	加工直线
N100G02X—60.0Y0R30.0	加工左侧 R30 圆弧
N110G01X—60.0Y30.0	切向退刀
N120G40G00X—60.0Y60.0M09	刀具半径补偿取消
N130Z20.0	快速抬刀
N140X0Y0	返回起刀点
N150M30	主轴停止 程序结束

### 三、刀具长度补偿

当使用不同类型及规格的刀具或刀具磨损时,可在程序重新用刀具长度补偿指令补偿刀具尺寸的变化,而不必重新调整刀具或重新对刀。图 5-22 所示为不同刀具长度方向的偏移量。

#### (1) 编程格式

$$\left. \begin{array}{l} G43 \\ G44 \end{array} \right\} Z \_ H \_$$

#### (2) 说明

G43 为刀具长度正补偿 ;G44 为刀具长度负补偿 ;G49 为撤消刀具长度补偿指令。Z 值为刀具长度补偿值,补偿量存入由 H 代码指定的存储器中。偏置量与偏置号相对应,由 CRT/MDI 操作面板预先设在偏置存储器中。

使用 G43、G44 指令时,无论用绝对尺寸还是用增量尺寸编程,程序中指定的 Z 轴移动的终点坐标值,都要与 H 所指定寄存器中的偏移量进行运算,G43 时相加,G44 时相减,然后把运算结果作为终点坐标值进行加工。G43、G44 均为模态代码。

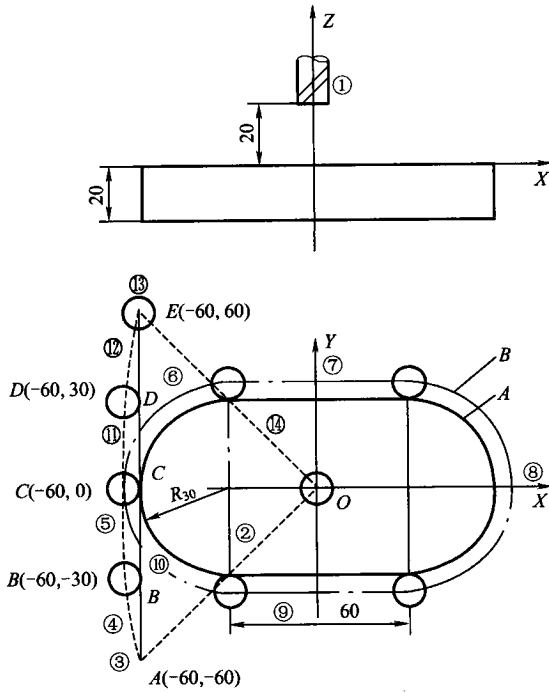


图 5-21 刀具半径补偿应用

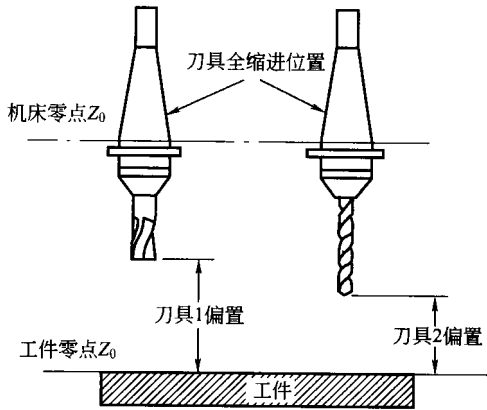


图 5-22 不同刀具的长度偏置

执行 G43 时

$$Z_{\text{实际值}} = Z_{\text{指令值}} + (H \times \times)$$

执行 G44 时

$$Z_{\text{实际值}} = Z_{\text{指令值}} - (H \times \times)$$

式中,  $H \times \times$  是指编号为  $\times \times$  寄存器中的刀具长度补偿量。

采用取消刀具半径补偿指令 G49 或用 G43H00 和 G44H00 可以撤消刀具长度补偿。

注意:在 FAGOR8055M 数控系统中,采用 G43 激活刀具长度补偿;G44 取消刀具长度补偿,刀具长度的寄存器偏置号也不需指定。

[例 5-6] 图 5-23 所示为刀具长度补偿编程实例,图中 A 为程序起点,加工路线为①—②—③—④—⑤—⑥—⑦—⑧—⑨。由于某种原因,刀具实际起始位置为 B 点,与编程的起点偏离了 3mm,现按相对坐标编程,偏置量存入地址为 H01 的存储器中。程序如下:

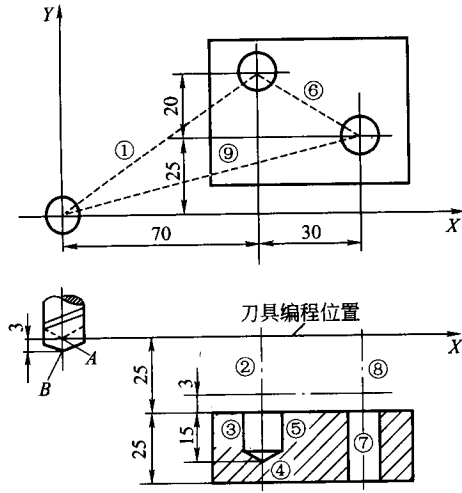


图 5-23 刀具的长度补偿实例

O0056

N1G91G00X70.0Y45.0S800M03

N2G43Z—22.0HI

N3G01Z—18.0F100M08

N4G04P2000

N5G00Z18.0

N6X30.0Y—20.0

N7G01Z—33.0F100

N8G00G49Z55.0M09

N9X—100.0Y—20.0

N100M30

## 第五节 FANUC 固定循环

数控铣床(加工中心)配备的固定循环功能,主要用于孔加工,包括钻孔、镗孔、攻螺纹

等。使用一个程序段就可以完成一个孔加工的全部动作。如果孔加工的动作无需变更,则程序中所有模态的数据可以不写,因此可以大大简化编程。

## 一、固定循环的动作

### (1) FANUC0i-MA 固定循环功能

因数控系统的不同,固定循环的代码及其编程格式有很大差别,本章主要介绍 FANUC0i-MA 数控系统的固定循环,常用的铣削固定循环见表 5-6。

表 5-6 FANUC 固定循环功能

G 代码	钻孔操作 (-Z 方向)	在孔底位置的操作	退刀操作 (+Z 方向)	用途
G73	间歇进给	—	快速进给	高速深孔钻循环
G74	切屑进给	暂停→主轴正转	切屑进给	反攻丝
G76	切屑进给	主轴准确停止	快速进给	精镗
G80	—	—	—	取消固定循环
G81	切屑进给	—	快速进给	钻孔、镗孔
G82	切屑进给	暂停	快速进给	钻孔、阶梯镗孔
G83	间歇进给	—	快速进给	深孔钻循环
G84	切屑进给	暂停→主轴反转	切屑进给	攻丝
G85	切屑进给	—	切屑进给	镗削
G86	切屑进给	主轴停止	快速进给	镗削
G87	切屑进给	主轴正转	快速进给	背削
G88	切屑进给	暂停→主轴停止	手动	镗削
G89	切屑进给	暂停	切屑进给	镗削

### (2) 固定循环动作

固定循环通常由 6 个动作组成,如图 5-24 所示。

- ① X 轴和 Y 轴的快速定位;
- ② 刀具快速从初始点进给到 R 点;
- ③ 以切屑进给的方式执行孔加工的动作;
- ④ 在孔底相应的动作;
- ⑤ 返回到 R 点;
- ⑥ 快速返回到初始点。

初始平面是为了安全下刀而规定的一个平面;R 点平面表示刀具下刀时自快进转为工进的高度平面。对于立式数控铣床,孔加工都是在  $X_Y$  平面定位并在 Z 轴方向进行。固定循环的编程格式如下。

### (3) 固定循环的定义平面

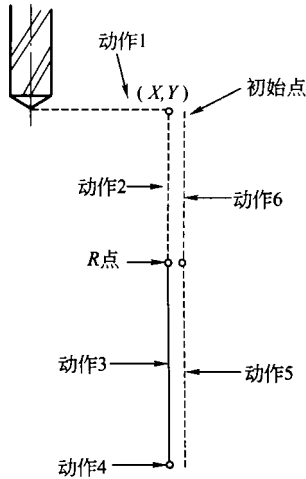


图 5-24 固定循环的动作

①初始平面 初始平面是为了安全下刀而规定的一个平面。初始平面到零件表面的距离可以任意设定在一个安全的高度上,当使用同一把刀具加工若干孔时,只有孔间存在障碍需要跳跃或全部孔加工完了时,才使用 G98 功能使刀具返回到初始平面上的初始点。

②R 点平面 R 点平面又叫 R 参考平面,这个平面是刀具下刀时自快进转为工进的高度平面。距工件表面的距离主要考虑工件表面尺寸的变化,一般可取 2~5mm。使用 G99 时,刀具将返回到该平面上的 R 点。

③孔底平面 加工盲孔时孔底平面就是孔底的 Z 轴高度,加工通孔时一般刀具还要伸出工件底平面一段距离,主要是保证全部孔深都加工到尺寸,钻削加工时还应考虑钻头钻尖对孔深的影响。

#### (4)沿钻孔轴的移动距离

固定循环沿钻孔轴的移动距离,即指令中的地址 R 和地址 Z 的数据指定与 G90 或 G91 的方式选择有关,图 5-25 给出了 G90 和 G91 的坐标计算方法。选择 G90 方式时,R 与 Z 一律取其终点坐标值,选择 G91 方式时,则 R 是指自初始点到 R 点的距离,Z 是指自 R 点到孔底平面 Z 点的距离。

#### (5)返回点平面

当刀具到达孔底后,刀具可以返回到 R 点平面或初始位置平面,由 G98 和 G99 指定。如果指令了 G98 则刀具返回到初始平面,如果指令了 G99 则刀具返回到 R 点平面。如图 5-26 所示。

## 二、常用的固定循环

### (1)高速深孔钻循环(G73)

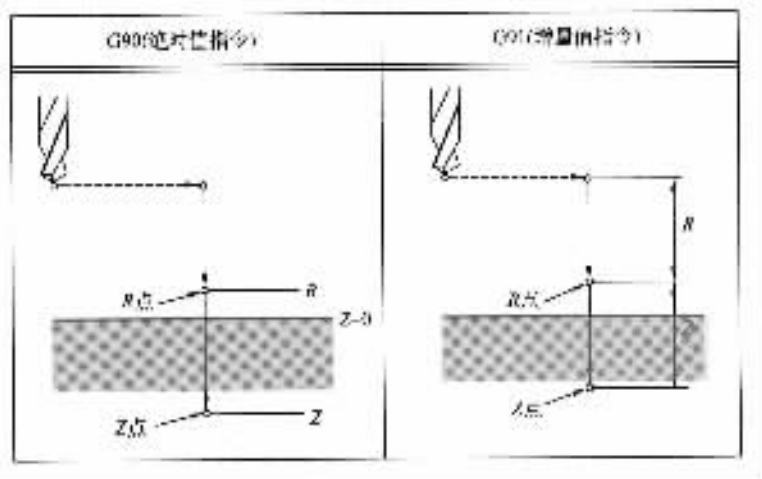


图 5-25 G90 和 G91 的坐标计算

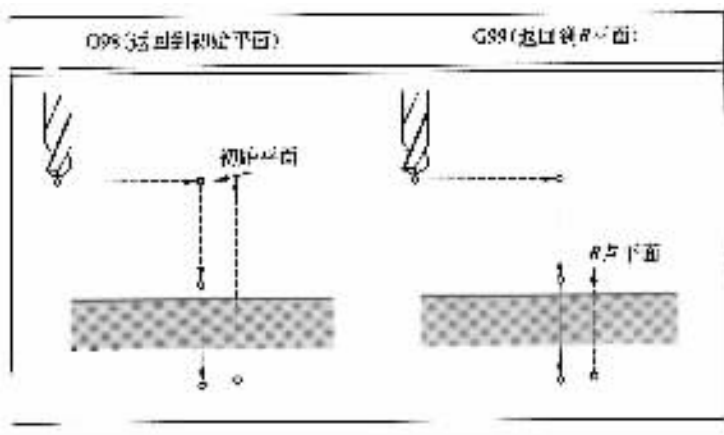


图 5-26 G90 和 G91 的返回平面

①指令功能 该循环执行高速深孔钻。它执行间歇切削进给直到孔的底部,同时从孔中排除切屑,该指令的动作步序如图 5-27 所示。

- ②指令格式  $G73X\_Y\_Z\_R\_Q\_F\_K\_;$  其中  $X\_Y\_;$  孔位置数据;  
 $Z\_;$  指定孔底平面位置(与工件坐标系 Z 轴零点位置及 G90/G91 方式选择有关);  
 $R\_;$  指定 R 平面位置(与工件坐标系 Z 轴零点位置及 G90/G91 方式选择有关);  
 $Q\_;$  每次切削进给的深度;  
 $F\_;$  切削进给速度;  
 $K\_;$  重复次数(如果需要的话)。

③说明 高速深孔钻循环沿着 Z 轴执行间歇进给,当使用这个循环时切屑容易从孔中排出,并且能够通过修改系统参数设定较小的回退值。在指定 G73 之前用辅助功能旋转主轴(M 代码),当 G73 代码和 M 代码在同一程序段中指定时,在第一个定位动作的同

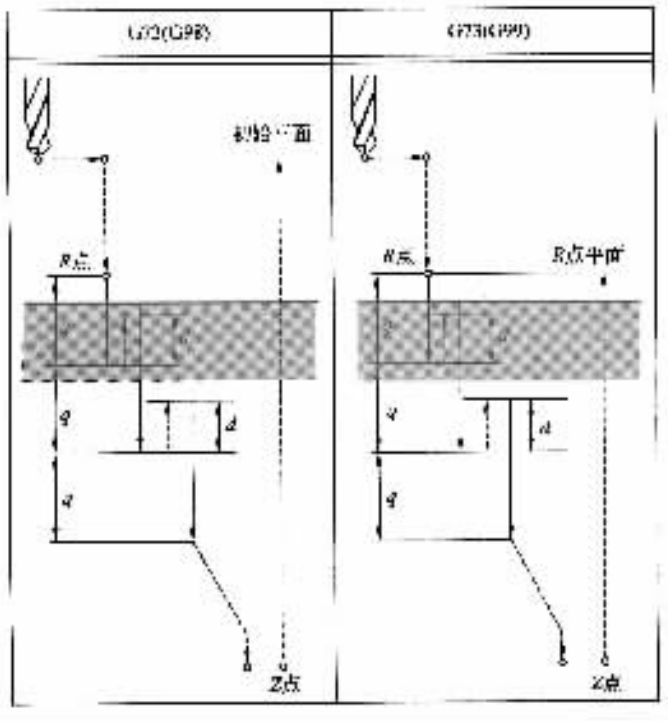


图 5-27 高速深孔钻循环(G73)动作步骤

时执行 M 代码, 然后系统处理下一个钻孔动作; 当指定重复次数  $K$  时只在第一个孔执行 M 代码, 对第二个和以后的孔, 不执行 M 代码; 当在固定循环中指定刀具长度偏置(G43, G44 或 G49)时, 在定位到 R 点的同时加偏置。

[例 5-7] 下面程序是高速深孔钻循环 G73 的编程实例。

S2000M3; 主轴开始旋转。

G90G99G73X300.Y-250.Z-150.R-100.Q15.F120.;

定位, 钻 1 孔, 然后返回到 R 点。

Y-550.;

定位, 钻 2 孔, 然后返回到 R 点。

Y-750.;

定位, 钻 3 孔, 然后返回到 R 点。

X1000.;

定位, 钻 4 孔, 然后返回到 R 点。

Y-550.;

定位, 钻 5 孔, 然后返回到 R 点。

G98Y-750.;

定位, 钻 6 孔, 然后返回初始位置平面。

G80G28G91X0Y0Z0;

返回到参考点。

M5;

主轴停止旋转。

(2)左旋(逆时针)攻丝循环(G74)

①指令功能 该循环执行左旋攻丝。在左旋攻丝循环中, 当到达孔底时, 主轴顺时针旋转, 该指令的动作步骤如图 5-28 所示。

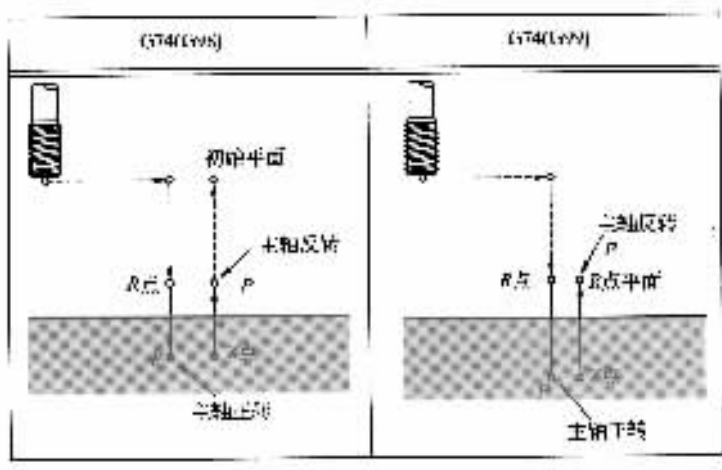


图 5-28 左旋(逆时针)攻丝循环(G74)动作步序

- ②指令格式 G74X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_P\_\_F\_\_K\_\_ ;其中 X\_\_Y\_\_ 孔位置数据 ;  
 Z\_\_ 指定孔底平面位置(与工件坐标系 Z 轴零点位置及 G90/G91 方式选择有关) ;  
 R\_\_ 指定 R 平面位置(与工件坐标系 Z 轴零点位置及 G90/G91 方式选择有关) ;  
 P\_\_ 孔底暂停时间 ;  
 F\_\_ 切削进给速度 ;  
 K\_\_ 重复次数(如果需要的话)。

③说明 用主轴逆时针旋转执行攻丝。当到达孔底时,为了退回,主轴顺时针旋转,该循环加工一个反螺纹。

在左旋攻丝期间,进给倍率被忽略。进给暂停,不停止机床,直到回退动作完成。在指定 G74 之前,使用辅助功能 M 代码使主轴逆时针旋转。

当 G74 指令和 M 代码在同一程序段中指定时,在第一个定位动作的同时执行 M 代码,然后系统处理下一个钻孔动作。

当在固定循环中指定刀具长度偏置(G43, G44 或 G49)时,在定位到 R 点的同时加偏置。

【例 5-8】 下面程序是左旋攻丝循环 G74 的编程实例。

```
S100 M4                主轴开始旋转。
G90 G99 G74 X300.Y-250.Z-150.R-100.Q15.F120. ;
                        定位 攻丝 1 孔 然后返回到 R 点。
Y-550. ;              定位 攻丝 2 孔 然后返回到 R 点。
Y-750. ;              定位 攻丝 3 孔 然后返回到 R 点。
X 1000. ;             定位 攻丝 4 孔 然后返回到 R 点。
Y-550. ;              定位 攻丝 5 孔 然后返回到 R 点。
G98 Y-750. ;          定位 攻丝 6 孔 然后返回初始位置平面。
```



G80 G28 G91 X0 Y0 Z0 ;

返回到参考点。

M5 ;

主轴停止旋转。

### (3) 精镗循环(G76)

①指令功能 精镗循环用于镗削精密孔。当到达孔底时主轴停止切削,刀具离开工件的被加工表面并返回,该指令的动作步序如图 5-29 所示。

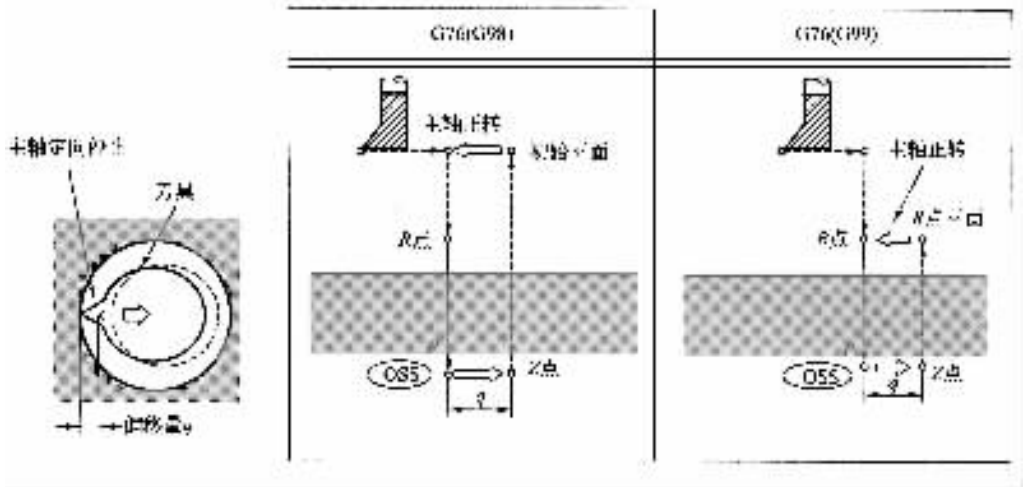


图 5-29 精镗循环(G76)动作步序

②指令格式 G76X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_Q\_\_P\_\_F\_\_K\_\_ ;其中 X\_\_Y\_\_ :孔位置数据 ;

Z\_\_ :指定孔底平面位置 ;

R\_\_ :指定 R 平面位置 ;

Q\_\_ :孔底的偏移量 ;

P\_\_ :孔底暂停时间 ;

F\_\_ :切削进给速度 ;

K\_\_ :重复次数(如果需要的话)。

③说明 当到达孔底时,主轴在固定的旋转位置停止,并且,刀具以刀尖的反方向移动退刀,以保证加工面不被破坏,实现精密和有效的镗削加工。

④注意 Q 在孔底的偏移量是在固定循环内保存的模式值,必须小心指定,因为它也用作 G73 和 G83 的切削深度。

### (4) 钻孔循环(G81)

①指令功能 该循环用作正常钻孔。切削进给执行到孔底,然后刀具从孔底快速移动退回,该指令的动作步序如图 5-30 所示。

②指令格式 G81X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_F\_\_K\_\_ ;其中 X\_\_Y\_\_ :孔位置数据 ;

Z\_\_ :指定孔底平面位置 ;

R\_\_ :指定 R 平面位置 ;

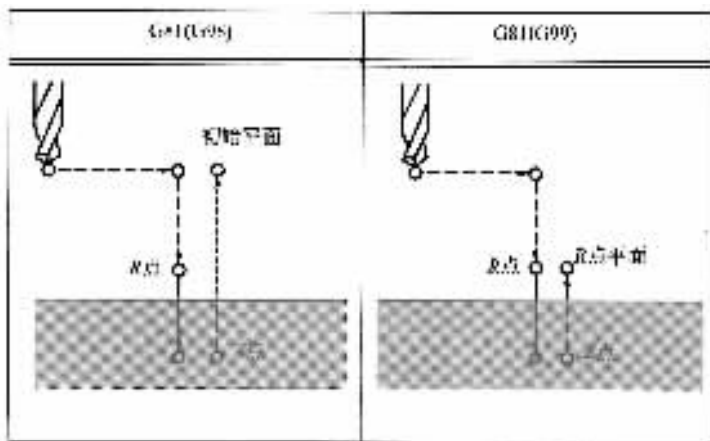


图 5-30 钻孔循环(G81)的动作步骤

F\_\_ :切削进给速度；

K\_\_ :重复次数(如果需要的话)。

③说明 在沿着 X 和 Y 轴定位以后,快速移动到 R 点。从 R 点到 Z 点执行钻孔加工,然后刀具快速移动退回。

关于主轴旋转、M 代码和刀具偏置等,与其他循环相同。

【例 5-9】 试采用重复固定循环方式,加工如图 5-31 所示各孔。

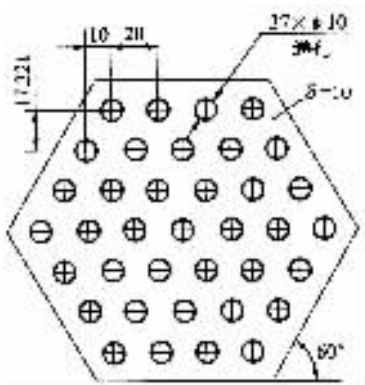


图 5-31 重复固定循环加工实例

程序如下。

```

N010G90G80G92X0.0Y0.0Z100.0
N020G00X—50.0Y51.963S800AM03
N030Z20.0AM08F40
N040G91G81G99X20.0Z—18.0R—17.0K4
N050X10.0Y—17.321
N060X—20.0K4
N070X—10.0Y—17.321
N080X20.0K5
N090X10.0Y—17.321
N100X—20.0K6
N110X10.0Y—17.321
    
```

N120X20.0K5

N130X—10.0Y—17.321

N140X—20.0K4

N150X10.0Y—17.321

N160X160X20.0K3

N170G80M109

N180G90G00Z100.0

N190X0.0Y0.0M105

N200M30

### (5) 镗孔循环(G82)

①指令功能 该循环用作正常钻孔。孔切削进给到孔底时执行暂停,然后刀具从孔底快速移动退回,该指令的动作步序如图5-32所示。

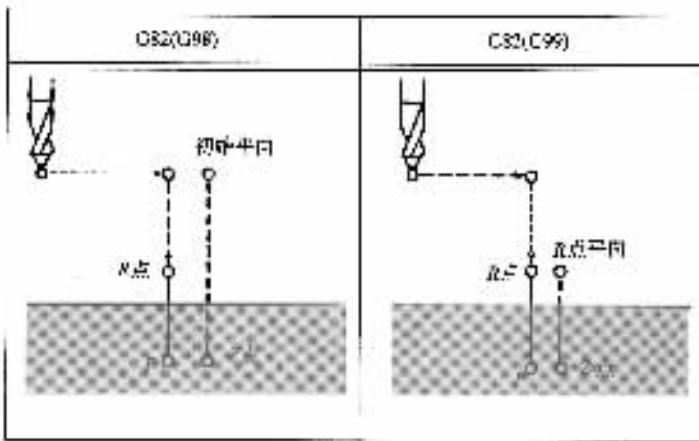


图5-32 镗孔循环(G82)的动作步序

②指令格式 G82X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_P\_\_F\_\_K\_\_ ;其中 X\_\_Y\_\_ 孔位置数据 ;

Z\_\_ 指定孔底平面位置 ;

R\_\_ 指定 R 平面位置 ;

P\_\_ 孔底暂停时间 ;

F\_\_ 切削进给速度 ;

K\_\_ 重复次数(如果需要的话)。

③说明 沿着 X 和 Y 轴定位以后,快速移动到 R 点,从 R 点到 Z 点执行钻孔加工,当到达孔底时执行暂停,然后刀具快速移动退回。

关于主轴旋转、M 代码和刀具偏置等,与其他循环相同。

### (6) 排屑钻孔循环(G83)

①指令功能 该循环执行深孔钻,间歇切削进给到孔的底部,钻孔过程中从孔中排除切屑。该指令的动作步序如图5-33所示。

②指令格式 G83X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_Q\_\_F\_\_K\_\_ ;其中 X\_\_Y\_\_ 孔位置数据 ;

Z\_\_ 指定孔底平面位置 ;

R\_\_ 指定 R 平面位置 ;

Q\_\_ 每次切削进给的深度 ;

F\_\_ 切削进给速度 ;

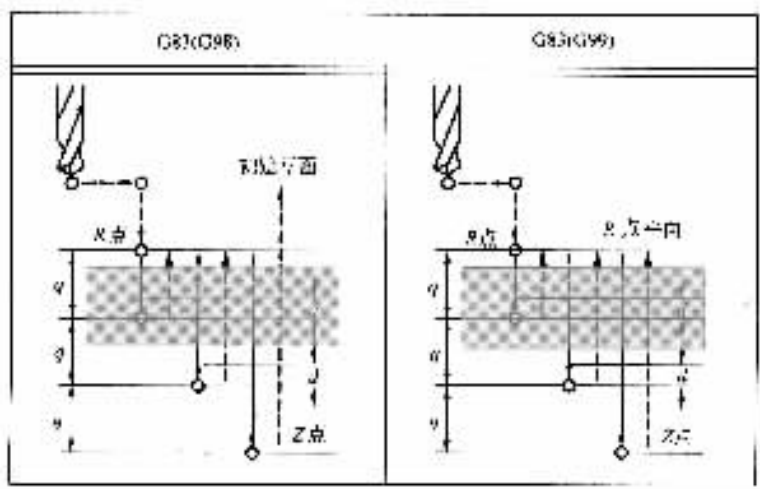


图 5-33 排屑钻孔循环(G83)的动作步序

K \_\_ 重复次数(如果需要的话)。

③说明  $Q$  表示每次切削进给的切削深度,它必须用增量值指定,在第二次和以后的切削进给中,执行快速移动到上次钻孔结束之前的  $d$  点,再次执行切削进给。 $d$  在机床参数中设定,在  $Q$  中必须指定正值,负值被忽略。

关于主轴旋转、M 代码和刀具偏置等,与其他循环相同。

### (7) 攻丝循环(G84)

①指令功能 该循环执行攻丝加工,当到达孔底时,主轴以反方向旋转。该指令的动作步序如图 5-34 所示。

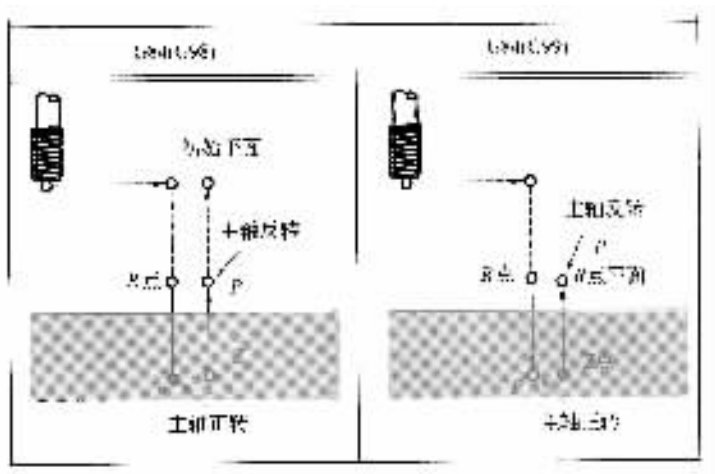


图 5-34 攻丝循环(G84)动作步序

②指令格式  $G84X\_Y\_Z\_R\_P\_F\_K\_;$  其中  $X\_Y\_$  孔位置数据;

- Z\_\_ 指定孔底平面位置；
- R\_\_ 指定 R 平面位置；
- P\_\_ 孔底暂停时间；
- F\_\_ 切削进给速度；
- K\_\_ 重复次数( 如果需要的话 )。

③说明 主轴顺时针旋转执行攻丝。当到达孔底时,为了回退主轴以相反方向旋转,这个过程生成螺纹。在攻丝期间进给倍率被忽略,进给暂停,不停止机床,直到返回动作完成。

关于主轴旋转、M 代码和刀具偏置等,与其他循环相同。

### (8) 镗孔循环(G85)

①指令功能 该循环用于镗孔加工,指令的动作步序如图 5-35 所示。

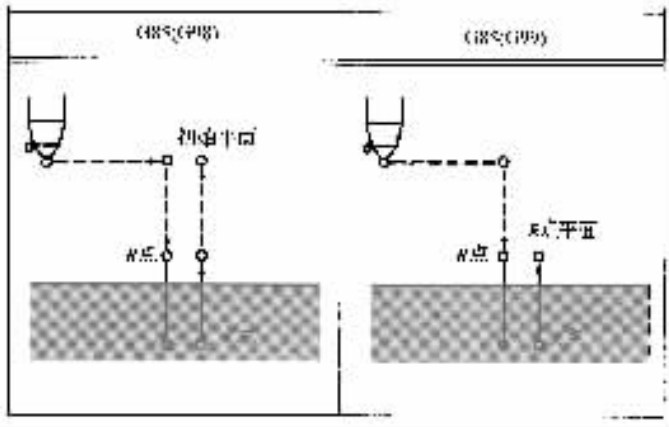


图 5-35 镗孔循环(G85)动作步序

- ②指令格式 G85X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_F\_\_K\_\_;其中 X\_\_Y\_\_ 孔位置数据；
- Z\_\_ 指定孔底平面位置；
  - R\_\_ 指定 R 平面位置；
  - F\_\_ 切削进给速度；
  - K\_\_ 重复次数( 如果需要的话 )。

③说明 沿着 X 和 Y 轴定位以后,快速移动到 R 点,从 R 点到 Z 点执行镗孔,当到达孔底时,执行切削进给,然后返回到 R 点。

关于主轴旋转、M 代码和刀具偏置等,与其他循环相同。

### (9) 背镗孔循环(G87)

①指令功能 该循环执行精密镗孔,循环的动作步序如图 5-36 所示。

- ②指令格式 G87X\_\_Y\_\_Z\_\_R\_\_Q\_\_P\_\_F\_\_K\_\_;其中 X\_\_Y\_\_ 孔位置数据；
- Z\_\_ 指定孔底平面位置；
  - R\_\_ 指定 R 平面位置；

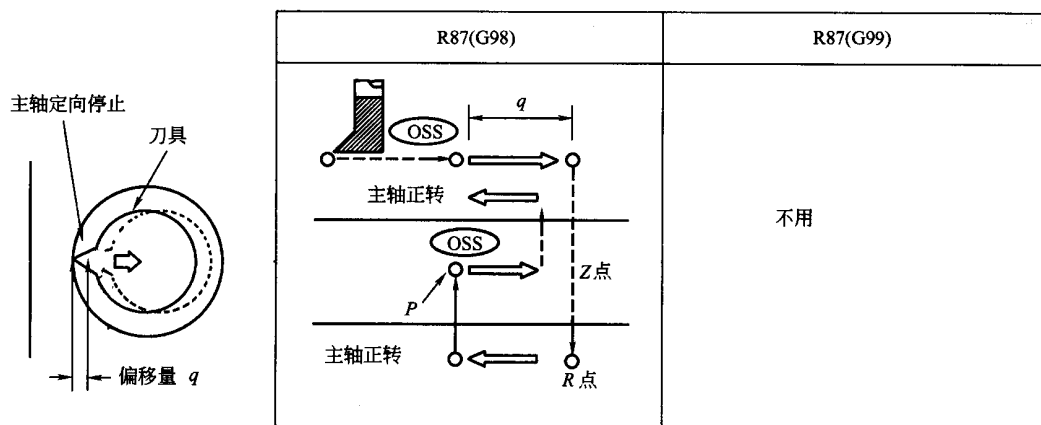


图 5-36 背镗孔循环(G87)动作步序

- Q\_\_ :刀具的偏移量 ;
- P\_\_ :暂停时间 ;
- F\_\_ :切削进给速度 ;
- K\_\_ :重复次数。

③说明 沿着  $X$  和  $Y$  轴定位以后 ,主轴在固定的旋转位置上停止 ;刀具在刀尖的相反方向移动 ,并在孔底(  $R$  点 )定位( 快速移动 ) ;然后刀具在刀尖的方向上移动并且主轴正转 ,沿  $Z$  轴的正向镗孔直到  $Z$  点。

在  $Z$  点主轴再次停在固定的旋转位置 ,刀具在刀尖的相反方向移动 ,然后刀具返回到初始位置。刀具在刀尖的方向上偏移 ,主轴正转 ,执行下一个程序段的加工。

关于主轴旋转、 $M$  代码和刀具偏置等 ,与其他循环相同。

④注意 : $Q$ ( 在孔底的偏移量 )在固定循环中保持的模式值。指定时须小心 ,因为它也用作  $G73$  和  $G83$  的切削深度。

## 第六节 SIEMENS 固定循环功能

循环是用于特定加工过程的工艺子程序 ,比如用于钻削、坯料切削或螺纹切削。SIEMENS 数控系统针对不同的数控机床 ,装有用于车削和铣削加工的标准循环。在各种具体加工中 ,只要改变参数就可以实现不同的循环功能。

下面介绍几种 SIEMENS 数控系统的典型固定循环如下。

- LCYC82 :用于钻孔、沉孔加工 ;
- LCYC83 :深孔钻削 ;
- LCYC85 :镗孔 ;
- LCYC93 :凹槽切削 ;

LCYC94 凹凸切削(E型和F型,按德国DIN标准);

LCYC95 坯料切削;

LCYC97 螺纹切削;

LCYC60 线性孔排列;

LCYC61 圆弧孔排列;

LCYC75 矩形槽、键槽、圆弧凹槽铣削等。

需要注意的是:上述标准循环有的用于车削加工,有的用于铣削加工,不同的数控系统其固定循环功能不同。通过本节的学习,要了解和掌握SIEMENS数控系统典型固定循环的参数设置和调用方法。

## 一、钻削铰孔加工 LCYC82

### (1) 功能

刀具以编程的主轴转速和进给速度钻孔,到达最后钻深后,可实现孔底停留,退刀时以快速退刀。循环过程如图5-37所示。

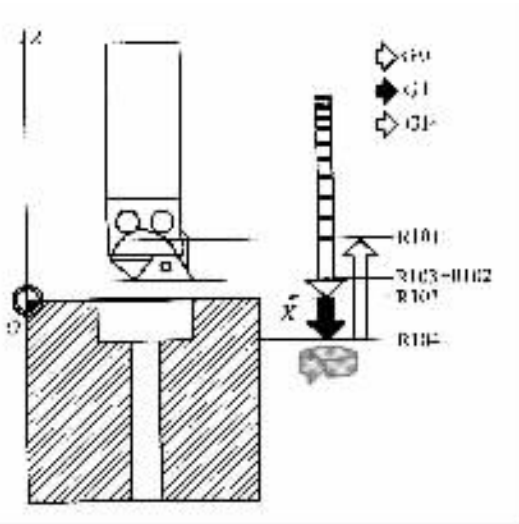


图 5-37 铰孔循环 LCYC82 的循环时序及参数

### (2) 调用格式

LCYC82

### (3) 参数与说明

该固定循环中使用的主要参数见表5-7。

### (4) 注意事项

①调用一个循环之前必须对该循环的传递参数赋值。循环结束以后传递参数的值保持不变;

②使用加工循环时,必须事先保留 R 参数,从而确保这些参数用于加工循环而不被程序中其他地方所使用。

表 5-7 镗孔循环 LCYC82 的主要参数

参 数	含 义	参 数	含 义
R101	起始平面	R104	最后钻深(绝对值)
R102	安全间隙	R105	钻底停留时间
R103	参考平面		

③如果在循环中没有设定进给值、主轴转速和主轴方向的参数,则编程时必须予以赋值。循环结束以后 G00、G90、G40 一直有效。

【例 5-10】 用钻削循环 LCYC82 加工如图 5-38 所示孔,孔底停留时间 2s,安全间隙 4mm。编制程序如下。

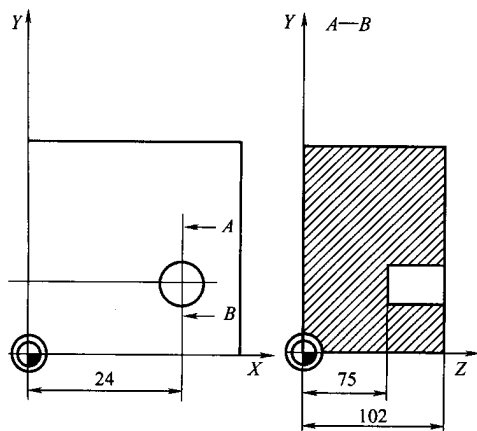


图 5-38 镗孔钻削循环 LCYC82 应用实例

```
N10G0G17G90F100T2D2S500M3
```

```
N20X24Y15
```

```
N30R101 = 110R102 = 4R103 = 102R104 = 75R105 = 2
```

```
N40LCYC82
```

```
N50M2
```

## 二、深孔钻削加工 LCYC83

### (1) 功能

深孔钻削循环加工,通过分步钻入达到最后的钻深。钻削既可以在每步到钻深后,提出钻头到其参考平面达到排屑目的,也可以每次上提 1mm 以便断屑。



## (2)调用格式

LCYC83

## (3)参数及说明

图 5-39 所示为带有排屑功能的深孔钻削循环 LCYC83 的时序和参数,调用之前必须选择平面,并且已经选取钻头的刀具补偿值。其参数的定义见表 5-8。

表 5-8 深孔钻削 LCYC83 的参数定义

参数	参数含义、数值范围	参数	参数含义、数值范围
R100 = 3	钻削加工轴 Z 编号	R106	起始点及排屑时停留时间
R101	退回平面(绝对平面)	R107	第一钻深(绝对值)
R102	安全间隙,无符号	R108	递减量,无符号
R103	参考平面(绝对平面)	R109	第一钻深进给量系数,无符号。数值范围 0.001~1
R104	最后钻深(绝对值)	R110	加工方式 断屑 = 1 排屑 = 1
R105	钻深停留时间(断屑)	R111	第一钻进给率

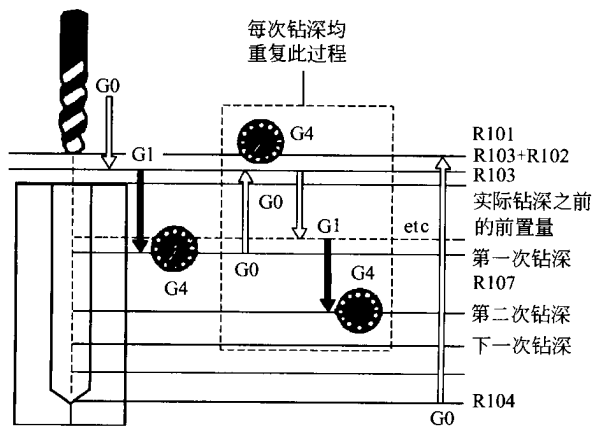


图 5-39 带有排屑功能的深孔钻削循环中的时序和参数

## 三、镗削循环 LCYC85

## (1)功能

刀具以编程的主轴转速和进给速度镗孔,到达最后镗深后,可实现孔底停留,进刀及退刀时分别以参数指定速度退刀,如图 5-40 所示。

## (2)调用格式

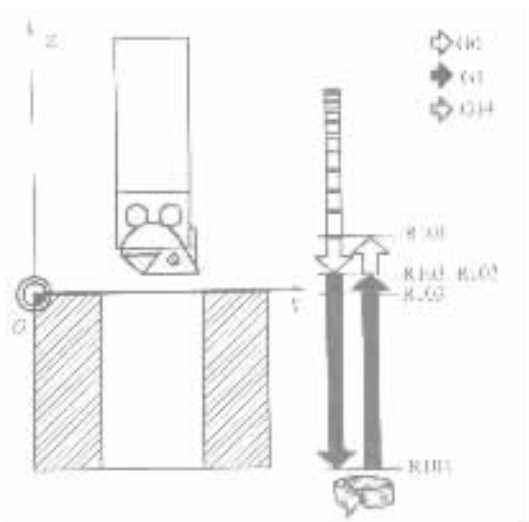


图 5-40 镗削循环 LCYC85 时序及参数

LCYC85

(3) 参数

镗削加工循环 LCYC85 的主要参数见表 5-9。

表 5-9 镗削循环 LCYC85 的主要参数

参 数	含 义	参 数	含 义
R101	起始平面	R105	钻底停留时间
R102	安全间隙	R107	钻削进给量
R103	参考平面	R108	退刀进给量
R104	最后钻深(绝对值)		

[例 5-11] 用镗削循环 LCYC85 加工如图 5-41 所示孔, 无孔底停留时间, 安全间隙 2mm。编写程序如下:

N10 G0 G18 G90 F1000 T2 D2 S500 M3

N20 X50 Y105 Z70

N30 R101 = 105 R102 = 2 R103 = 102 R104 = 77 R105 = 0 R107 = 200 R108 =

100

N40 LCYC85

N50 M2

## 四、槽型铣削循环 LCYC75

(1) 循环功能

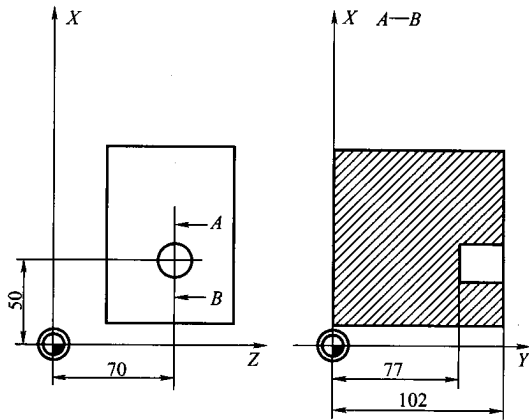


图 5-41 镗孔循环应用实例

通过设定相应的参数,利用此循环可以铣削矩形槽、键槽及圆形凹槽,循环加工可分为粗加工和精加工,如图 5-42 所示。

### (2) 调用格式

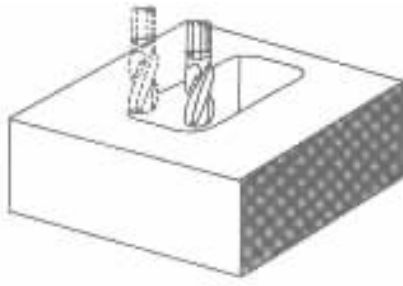


图 5-42 槽型铣削循环加工

### LCYC75

加工矩形槽时通过参数设置长度、宽度、深度,如果凹槽宽度等同于 2 倍的圆角半径,则铣削一个键槽,通过设定凹槽长度 = 凹槽宽度 = 2 倍的圆角半径,可以铣削一个直径为凹槽长度或凹槽宽度的圆形凹槽。加工时,一般在槽中心处已预先加工导向底孔,铣刀从垂直于凹槽深度方向的槽中心处开始进刀。如果没有钻底孔,则该循环要求使用带端面齿的铣刀,从而可以铣削中心孔。在调用程序中应设定主轴的钻速和方向,在调用循环之前必须先建立刀具补偿。

### (3) 参数

循环参数见表 5-10 表中部分参数使用情况如图 5-43 所示。

### (4) 加工过程

该循环的出发点位置任意,但需保证从该位置出发可以无碰撞地回到平面的凹槽中心点。

表 5-10 槽型铣削循环 LCYC75 参数

参数	含义、数值范围
R101	起始平面
R102	安全间隙
R103	参考平面(绝对坐标)
R104	凹槽深度(绝对坐标)
R116	凹槽圆心 X 坐标
R117	凹槽圆心 Y 坐标
R118	凹槽长度
R119	凹槽宽度
R120	圆角半径
R121	最大进刀深度
R122	Z 向进刀进给量
R123	铣削进给量

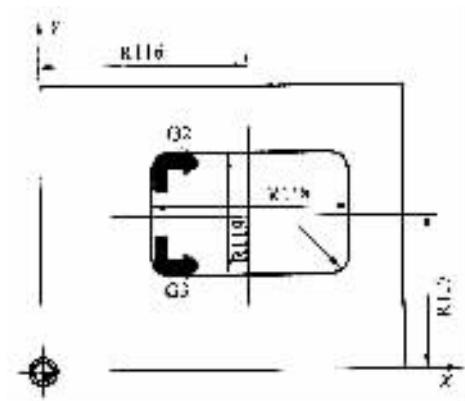


图 5-43 参数使用说明

①粗加工时,  $R127 = 1$

用 G0 到起始平面的凹槽中心点, 然后再同样以 G0 到安全间隙的参考平面处。凹槽的加工分为以下几个步骤。

- 以 R122 确定的进给量和调用循环之前的主轴转速进刀, 到下一次加工的凹槽中心点处。
- 按照 R122 确定的进给量和调用循环之前的主轴转速, 在轮廓和深度方向进行铣削, 直至最后精加工余量。
- 加工方向由 R126 参数给定的值确定。

• 在凹槽加工结束之后,刀具回到起始平面凹槽中心,循环过程结束。

②精加工时, R127 = 2

• 如果要求分多次进刀,则只有最后一次进刀到达最后深度凹槽中心点( R122 )。为了缩短返回的空行程,在此之前的所有进刀均快速返回,并根据凹槽和键槽的大小无需回到凹槽中心点才开始加工。通过参数 R124 和 R125 选择“仅进行轮廓加工”或者“同时加工轮廓和工件”。

仅加工轮廓 :R124 > 0 ,R125 = 0

轮廓和深度 :R124 > 0 ,R125 > 0

R124 = 0 ,R125 = 0

R124 = 0 ,R125 > 0

平面加工以参数 R123 设定的值进行,深度进给则以 R122 设定的参数值进行。

• 加工方向由参数 R126 设定的参数值确定。

• 凹槽加工结束以后刀具运行回到起始平面的凹槽中心点处,循环结束。

【例 5-12】 凹槽铣削。在图 5-44 中,用下的程序可以加工一个长度为 60mm、宽度为 40mm、圆角半径为 8mm、深度为 17.5mm 的凹槽。使用的铣刀不能切削中心,因此要求预加工凹槽中心(LCYC82)。凹槽边精加工的余量为 0.75mm,深度为 0.5mm,Z 轴上到参考平面的安全间隙为 0.5mm。凹槽的中心点坐标为( 60, 40 ),最大进刀深度为 4mm,加工分为粗加工和精加工。

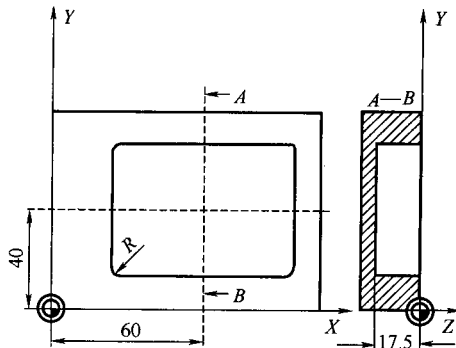


图 5-44 镗孔循环应用实例 1

```

N10 G17 G90 F200 S300 M3 T4 D1 //确定工艺参数
N20 G0 X60 Y40 Z5 //回到钻削位置
N30 R101 = 5 R102 = 2 R103 = 9
R104 = - 17.5 R105 = 2 //设定钻削循环参数
N40 LCYC82 //调用钻削循环
N50... //更换刀具
N60 R116 = 60 R117 = 40
    
```

```

R118 = 60  R119 = 40  R120 = 8           // 凹槽铣削循环粗加工设定参数
N70  R121 = 4  R122 = 120  R123 = 300
R124 = 0.75  R125 = 0.5                 // 与钻削循环相比较 R101 ~ R104 参
                                           // 数不变
N80  R126 = 2  R127 = 1
N90  LCYC75                             // 调用粗加工循环
N100...                                  // 更换刀具
N120  LCYC75                             // 调用精加工循环
N130  M2                                  // 程序结束

```

【例 5-13】 圆形槽铣削。在图 5-45 中,使用此程序加工 YZ 平面上一个圆形凹槽,中心点坐标为 Z50 X50,凹槽深 20mm,深度方向进给轴为 X 轴,没有给出精加工余量,也就是说使用粗加工加工此凹槽,使用的铣刀带端面齿,可以切削中心。

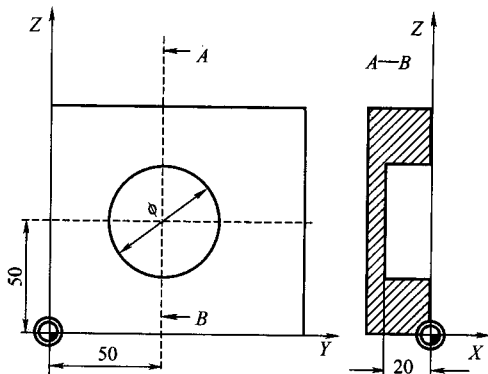


图 5-45 镗孔循环应用实例 2

```

N10  G19  G90  S200  M3  T1  D1         // 规定工艺参数
N20  G0  X40  Y5  Z60                 // 回到起始位置
N30  R101 = 4  R102 = 2  R103 = 0
R104 = -20  R116 = 50  R117 = 50       // 凹槽铣削循环设定参数
N40  R118 = 50  R119 = 50  R120 = 50
R121 = 4  R122 = 100                   // 凹槽铣削循环设定参数
N50  R123 = 200  R124 = 0
R125 = 0  R126 = 0  R127 = 1         // 凹槽铣削循环设定参数
N60  LCYC75                             // 调用循环
N70  M2                                  // 循环结束

```

## 第七节 子程序及其调用

某些被加工的零件中,常常会出现几何形状完全相同的加工轨迹,如图 5-46 所示。在程序编制中,将有固定顺序和重复模式的程序段作为子程序存放,可使程序简单化。主程序执行过程中如果需要某一个子程序,可以通过一定格式的子程序调用指令来调用该子程序,执行完后返回到主程序,继续执行后面的程序段。

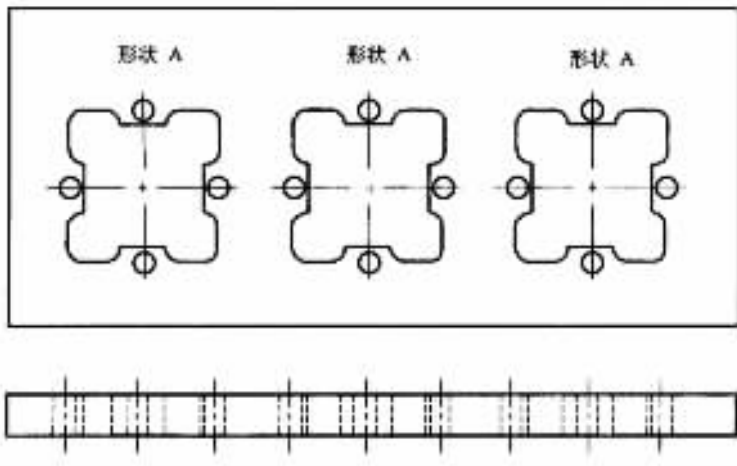


图 5-46 适宜用子程序编程的零件

### (1) 子程序的编程格式

子程序的格式与主程序相同,在子程序的开头编制子程序号,在子程序的结尾用 M99 指令(有些系统用 RET)返回。

$O \times \times \times \times$  (或  $: \times \times \times \times$ 、 $P \times \times \times \times$ 、 $\% \times \times \times \times$ )

.....

M99 ;

### (2) 子程序的调用格式

常用的子程序调用格式有以下几种。

① M98P  $\times \times \times$   $\times \times \times \times$

P 后面的前 3 位为重复调用次数,省略时为调用一次;后 4 位为子程序号。

② M98P  $\times \times \times \times$  L  $\times \times \times \times$

P 后面的 4 位为子程序号;L 后面的 4 位为重复调用次数,省略时为调用一次。

③ CALL  $\times \times \times \times$

子程序的格式为

(SUB)

.....

(RET)

(3)子程序的嵌套

为了进一步简化程序,可以让子程序调用另一个子程序,称为子程序的嵌套。子程序的嵌套不是无限次的,子程序结束时,如果用 P 指定顺序号,不返回到上一级子程序调出的下一个程序段,而返回到用 P 指定的顺序号 N 程序段,但这种情况只用于存储器工作方式,图 5-47 所示为子程序的嵌套及执行顺序。

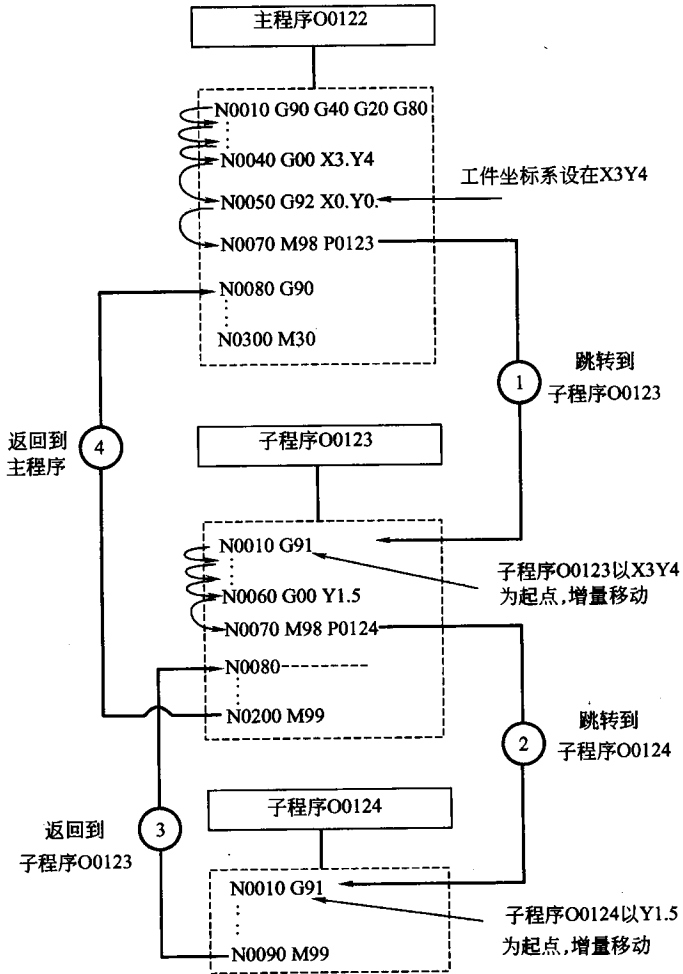


图 5-47 子程序的执行过程

【例 5-14】 图 5-48 所示零件,坯料厚度为 12mm,利用固定循环与子程序,编写孔加工程序,见表 5-11。



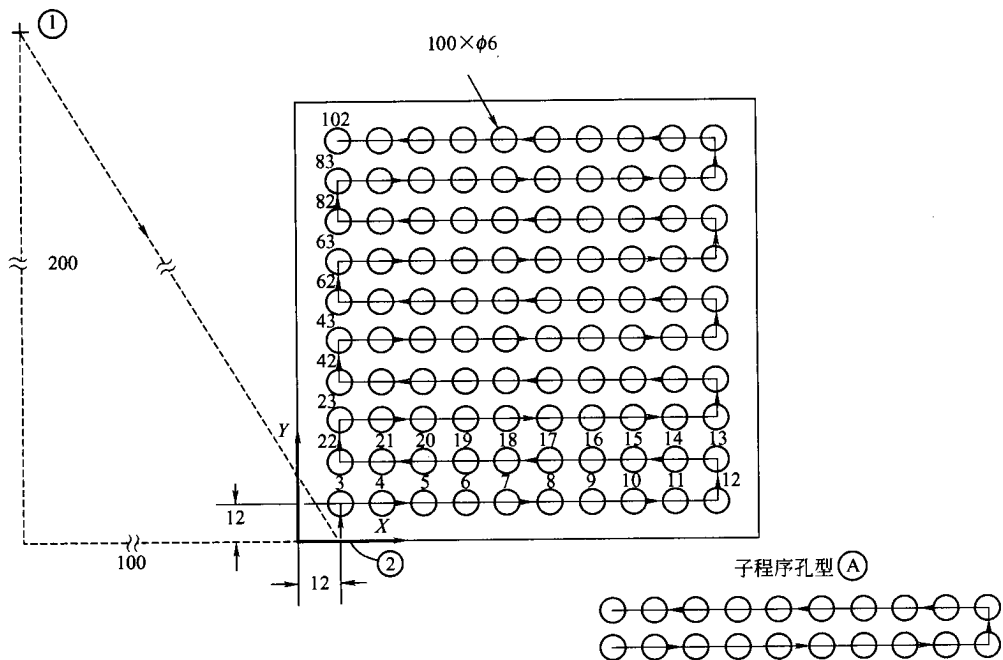


图 5-48 孔加工典型零件

表 5-11 加工程序单

主 程 序	注 释
O0002	主程序号
N10 G90 G21 G40 G80	绝对坐标、公制尺寸、取消刀具半径补偿和固定循环
N20 G91 G28 X0 Y0 Z0	返回 XYZ 参考点
N30 G92 X-100 Y200 Z100	工件坐标系设定
N40 G00 G90 X12.0 Y0 S2000 M03 T1	快速移动到②,主轴以 2000r/min 正转,刀具 1 准备
N50 G43 Z3 H01	刀具 1 快速移动到工件上面 3mm 位置
N60 M08	冷却液开
N70 M98 P0004 L5	调用子程序 5 次
N80 G80	固定循环取消
N90 G00 G90 Z25 M05	绝对模式迅速抬刀,主轴停止
N100 M09	冷却液关

主 程 序	注 释
N110 G91 G20 X0 Y0 Z0	返回到 XYZ 参考点
N120 M30	程序结束,存储器复位
O0004	子程序号
N10 G91 G83 Y12 Z-12.0 R3.0 Q3.0 F250	调用快速深孔钻 G83 固定循环指令
N20 X12 L9	在④...⑫位置钻孔
N30 Y12	在⑬位置钻孔
N40 X-12 L9	在⑭...⑳位置钻孔
N50 M99	返回主程序 N060 程序段

## 第八节 铣削编程综合实例

【例 5-15】 用一毛坯尺寸为  $72\text{mm} \times 42\text{mm} \times 5\text{mm}$  板料,加工成尺寸如图 5-49 所示的零件,分为内、外轮廓的粗精加工,刀具及切削用量的选择见表 5-12。工件的坐标系原点  $(X_0, Y_0)$  设定距毛坯右边和底边均  $21\text{mm}$  处,其  $Z$  坐标定在毛坯表面,装卡与定位方法如图 5-50 所示。按要求完成该零件的粗精加工程序编制。

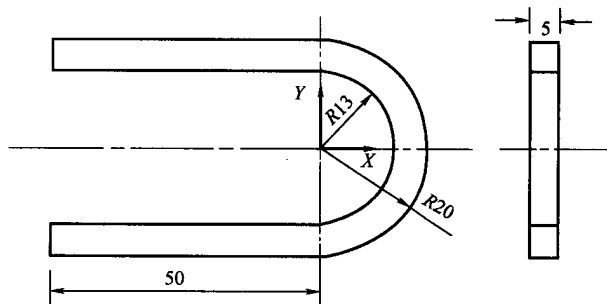


图 5-49 铣削加工典型零件

表 5-12 加工参数

序号	工序	刀具	主轴转速 $S/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度 $f/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
1	内外轮廓的粗加工,留出 0.4mm 的加工余量	$\phi 10\text{mm}$ 粗立铣刀	1800	120
2	内外轮廓的精加工	$\phi 8\text{mm}$ 立铣刀	2200	100

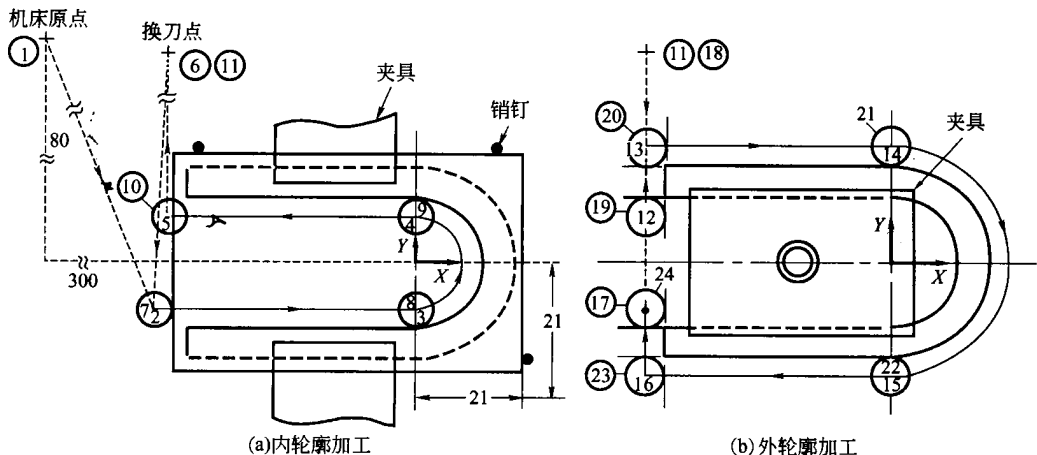


图 5-50 零件的装卡与定位

加工程序见表 5-13。

表 5-13 零件加工程序

程 序	注 释
%	
O1108	程序号
N020 G91 G28 X40 Y0 Z0	采用绝对尺寸指令、米制、注销刀具半径补偿和固定循环功能
N030 G92 X-300 Y80 Z100	刀具移至参考点
N010 G90 G21 G40 G80	设定工件坐标系原点坐标
N040 G00 G90 X-56.4 Y-7.6 S1800 M03 T2	刀具快速移至点 2, 主轴以 1800r/min 正转, 2 号刀具准备
N050 G43 Z5 H01	刀具长度补偿有效, 补偿号 H01
N060 M08	开冷却液
N070 G01 Z-5.5 F120	刀具以 120mm/min 进给速度沿 Z 轴直线插补至 -5.5mm 处
N080 X0	直线插补至点 3
N090 G03 X0 Y7.6 I0 J7.6	逆时针圆弧插补至点 4

程 序	注 释
N100 G01 X - 55.4	直线插补至点 5
N110 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速移至 20mm 处 ,主轴停止
N120 M09	关冷却液
N130 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 6
N140 M06	换 2 号刀具
N150 G00 G90 X - 55 Y - 9 S2200 M03 T1	刀具快速移至点 7 ,主轴以 2200r/min 正转 ,1 号刀具准备
N160 G43 Z5 H02	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H02
N170 M08	开冷却液
N180 G01 Z - 5.5 F100	刀具以 100mm/min 进给速度沿 Z 轴直线插补至 - 5.5mm 处
N190 X0	直线插补至点 8
N200 G03 X0 Y9 I0 J9	逆时针圆弧插补至点 9
N210 X - 54	直线插补至点 10
N220 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速移至 20mm 处 ,主轴停止
N230 M09	关冷却液
N240 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 11
N250 M06	换 1 号刀具
N260 M00	程序暂停
N270 G00 G90 X - 55.4 Y7.6 S1800 M03 T2	刀具快速移至点 12 ,主轴以 1800r/min 正转 ,2 号刀具准备
N280 G43 Z5 H01	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H01
N290 M08	开冷却液

程 序	注 释
N300 G01 Z - 5.5 F120	刀具以 120mm/min 进给速度沿 Z 轴直线插补至 -5.5mm 处
N310 Y25.4	直线插补至点 13
N320 X0	直线插补至点 14
N330 G02 X0 Y - 25.4 I0 J - 25.4	顺时针圆弧插补至点 15
N340 G01 X - 55.4	直线插补至点 16
N350 Y - 7.6	直线插补至点 17
N360 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速移至 20mm 处 ,主轴停止
N370 M09	关冷却液
N380 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 18
N390 M06	换 2 号刀具
N400 G00 G90 X - 54 Y9 S2200 M03 T1	刀具快速移至点 19 ,主轴以 2200r/min 正转 ,1 号刀具准备
N410 G43 Z5 H02	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H02
N420 M08	开冷却液
N430 G01 Z - 5.5 F100	刀具以 100mm/min 进给速度沿 Z 轴直线插补至 -5.5mm 处
N440 Y24	直线插补至点 20
N450 X0	直线插补至点 21
N460 G02 X0 Y - 24 I0 J - 24	顺时针圆弧插补至点 22
N0470 X - 54	直线插补至点 23
N480 Y - 9	直线插补至点 24
N490 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速移至 20mm 处 ,主轴停止
N500 M09	关冷却液
N510 G91 G28 X0 Y0 Z0	返回参考点
N520 M06	换刀

程 序	注 释
N530 M30 %	程序结束

说明 :该程序是按粗精加工要求 ,按刀具的刀位点轨迹编程 ,请同学按零件轮廓编程 ,而通过刀具半径补偿功能 ,实现零件的粗精加工。

【例 5 - 16】 加工如图 5 - 51 所示零件 ,工件材料为 45 号钢 ,毛坯尺寸为 175mm × 130mm × 6.35mm。工件坐标系原点(  $X_0, Y_0$  )定在距毛坯左边和底边均 65mm 处 ,其  $Z_0$  定在毛坯上 ,采用  $\phi 10$ mm 柄铣刀 ,主轴转速  $S = 1250\text{r}/\text{min}$  ,进给速度  $f = 150\text{mm}/\text{min}$ 。轮廓加工轨迹如图 5 - 52 所示 ,编写零件的加工程序见表 5 - 14。

表 5 - 14 加工的程序单

程 序	注 释
O1111	程序号
N0010 G90 G21 G40 G80	采用绝对尺寸指令、米制、注销刀具半径补偿和固定循环功能
N0020 G91 G28 X0 Y0 Z0	刀具移至参考点
N0030 G92 X - 200 Y200 Z100	设定工件坐标系原点坐标
N0040 G00 G90 X0 Y0 S1250 M03	刀具快速移至点 2 ,主轴以 1250r/min 正转
N0050 G43 Z5 H01	刀具沿 Z 轴快速定位至 5mm 处
N0060 M08	开冷却液
N0070 G01 Z - 10 F150	刀具沿 Z 轴以 150mm/min 直线插补至 - 10 处
N0080 G41 D01 X51	刀具半径补偿有效 ,补偿号 D01 ,直线插补至点 3
N0090 G03 X29 Y42 I - 51 J0	逆时针圆弧插补至点 4
N0100 G01 Y89.5	直线插补至点 5
N0110 G03 X23 Y95.5 I - 6 J0	逆时针圆弧插补至点 6
N0120 G01 X - 23	直线插补至点 7
N0130 G03 X - 29 Y89.5 I0 J - 6	逆时针圆弧插补至点 8
N0140 G01 Y42	直线插补至点 9
N0150 G03 X51 Y0 I29 J - 42	逆时针圆弧插补至点 10
N0160 G01 X0	直线插补至点 11
N0170 G00 Z5	沿 Z 轴快速定位至 5mm 处
N0180 M05	主轴停止

程 序	注 释
N0190 M00	程序暂停
N0200 S1250 M03	主轴正转
N0210 G06 X72.0 Y108	快速定位到点 12
N0220 G01 Z - 10 F150	沿 Z 轴下刀
N0230 X225	直线插补至点 14
N0240 G02 X41.5 Y89 I0 J - 19	顺时针圆弧插补至点 15
N0250 G01 Y48	直线插补至点 16
N0260 G02 X - 41.5 Y48 I - 41.5 J - 48	顺时针圆弧插补至点 17
N0270 G01 Y89	直线插补至点 18
N0280 G02 X - 22.5 Y108 I19 J0	顺时针圆弧插补至点 13
N0290 G40 G01 Y110.5	直线插补至点 19
N0300 G49 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 主轴停转
N0301 M09	关冷却液
N0302 G91 G28 X0 Y0 Z0	返回参考点
N0303 M06	换刀
N0304 M30	程序结束

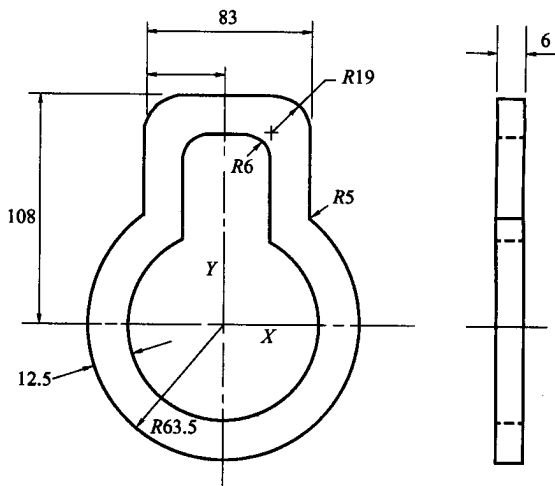


图 5-51 典型加工零件

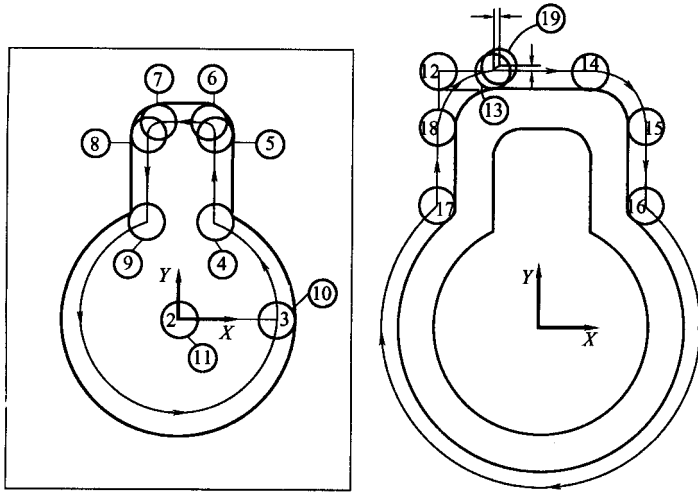


图 5-52 轮廓加工的刀位点轨迹



## 第六章 加工中心编程

### 第一节 加工中心编程概述

#### 一、加工中心的特点

加工中心是典型的集高新技术于一体的机械加工设备,它的发展代表了一个国家设计和制造业的水平,在国内外企业界受到高度重视。加工中心已成为现代机床发展的主流方向,与普通数控机床相比,它具有以下几个突出特点。

①具有刀库和自动换刀装置,能够通过程序或手动控制自动更换刀具,在一次装夹中完成铣、镗、钻、扩、铰、攻丝等加工,工序高度集中。

②加工中心通常具有多个进给轴(三轴以上),甚至多个主轴。联动的轴数也较多,例如三轴联动、四轴联动、五轴联动。因此能够自动完成多个平面和多个角度位置的加工,实现复杂零件的高精度定位和精确加工。

③加工中心上如果带有自动交换工作台,一个工件在加工的同时,另一个工作台可以实现工件的装夹,从而大大缩短辅助时间,提高加工效率。

#### 二、加工中心的主要加工对象

加工中心适用于复杂、工序多、精度要求高、需用多种类型普通机床和繁多刀具、工装,经过多次装夹和调整才能完成加工的零件。其主要加工对象有以下五类。

##### (1) 箱体类零件

箱体类零件是批具有一个以上孔系,内部有一定型腔,在长、宽、高方向有一定比例的零件。这类零件主在应用在机械、汽车、飞机等行业,如汽车的发动机缸体、变速箱体,机床的床头箱、主轴箱,柴油机缸体,齿轮泵壳体等,图6-1所示为热电机车主轴箱体。

箱体类零件一般都需要进行多工位孔系及平面加工,形位公差要求较为严格,通常要经过钻、扩、铰、镗、攻丝、铣等工序,不仅需要的刀具多,而且需多次装夹和找正,手工测量次数多,因此,导致工艺复杂、加工周期长、成本高,更重要的是精度难以保证。这类

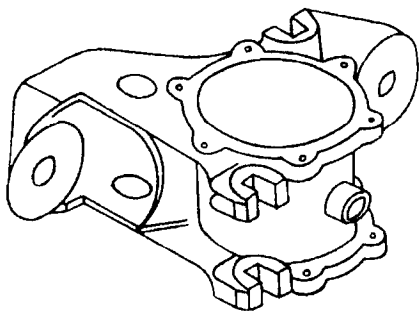


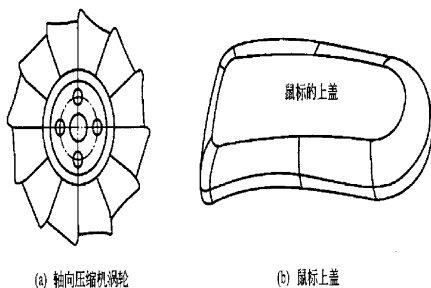
图 6-1 热电机车主轴箱体

零件在加工中心上加工,一次装夹可以完成普通机床 60%~95% 的工序内容,零件各项精度一致性好,质量稳定,同时可缩短生产周期,降低成本。

对于加工工位较多,工作台需多次旋转角度才能完成的零件,一般选用卧式加工中心;当加工的工位较多,且跨距不大时,可选立式加工中心,从一端进行加工。

## (2) 复杂曲面

在航空航天、汽车、船舶、国防等领域的产品中,复杂曲面类占有较大的比重。如叶轮、螺旋桨、各种曲面成型模具等,复杂曲面采用普通机械加工方法是难以胜任甚至是无法完成的,此类零件适宜利用加工中心加工,如图 6-2 所示。



(a) 轴向压缩涡轮

(b) 鼠标的上盖

图 6-2 复杂曲面组成的零件

就加工的可能性而言,在不出现加工干涉区或加工盲区时,复杂曲面一般可以采用球头铣刀进行三坐标联动加工。加工精度较高,但效率较低。如果工件存在加工干涉区或加工盲区,就必须考虑采用四坐标或五坐标联动的机床。

仅加工复杂曲面时并不能发挥加工中心自动换刀的优势,因为复杂曲面的加工一般经过粗铣→(半)精铣→清根等步骤,所用的刀具较少,特别是像模具这样的单件加工。

## (3) 异型件

异型件是外形不规则的零件,大多需要点、线、面多工位混合加工,如支架、基座、样板、靠模等。图 6-3 所示为支架。异型件的刚性一般较差,夹压及切削变形难以控制,加工精度也难以保证。这时可充分发挥加工中心工序集中的特点,采用合理的工艺措施,一

次或两次装夹,完成多道工序或全部的加工内容。实践证明,利用加工中心加工异型件时,形状越复杂,精度要求越高,越能显示其优越性。

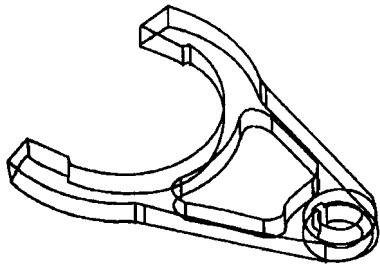


图 6-3 异型件

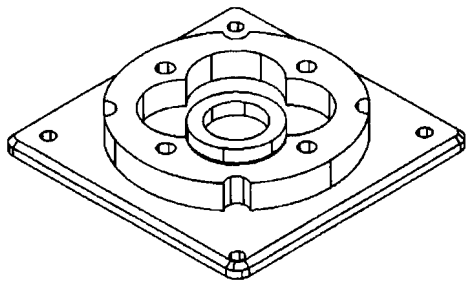


图 6-4 盘、套、板类典型零件

#### (4) 盘、套、板类零件

带有键槽、径向孔或端面有分布的孔系、曲面的盘套或轴类零件,以及具有较多孔加工的板类零件,适宜采用加工中心加工,如图 6-4 所示零件。



图 6-5 利用加工中心刻字

端面有分布孔系、曲面的零件宜选用立式加工中心,有径向孔的可选卧式加工中心。

#### (5) 特殊加工

熟练掌握了加工中心的功能之后,配合一定的工装和专用的工具,利用加工中心可完成一些特殊的工艺内容,例如在金属表面上刻字、刻线、刻图案,如图 6-5 所示。在加工中心的主轴装上高频电火花电源,可对金属表面进行线扫描表面淬火;在加工中心装上高速磨头,可进行各种曲线、曲面的磨削等。

## 三、加工中心的指令与代码

加工中心能实现三轴或三轴以上的联动控制,以保证对复杂零件进行加工。加工中心除具有直线插补和圆弧插补功能外,还具有各种加工固定循环、加工过程图形显示与编程、人机对话、故障自动诊断等功能。因此,所配置的数控系统通常档次较高,功能强大。

用于加工中心的数控系统,随着控制轴与联动轴的不同,其代码指令差别很大,特别是一些扩展功能和选择功能,其配置直接影响编程的难易程度。目前,用于加工中心的 FANUC 数控系统,以 0i 系列较为流行;SIEMENS 用于加工中心的数控系统,应以 802D、810D 和 840D 为主。请参阅前面相关数控系统的指令代码。

## 四、加工中心的主要参数

为了使大家进一步了解加工中心的性能参数,现以常州机床总厂的 TH5660A 型立式加工中心为例,介绍其主要性能参数。

### (1) TH5660A 的主要特点

该加工中心是立柱移动式的立式加工中心,具有三个数控轴,该加工中心具有以下特点。

①换刀装置采用凸轮联动机构,换刀可靠、速度快,进给系统采用大导程丝杠,能快速移动;

②导轨面采用高精度的直线导轨,因而在高速进给时快速灵活,低速进给时无爬行,具有精度高、稳定性好的特点;

③通过机床的三轴联动,可进行各种零件精确外形的铣削;

④配置 FAGOR8055M 数控系统,具有自诊断功能;

⑤主轴电机与主轴之间采用直接传动,因而传动效率高、噪声低;

⑥各轴的驱动均采用交流伺服电机。

### (2) TH5660A 加工中心的主要技术参数

工作台:

工作台外形尺寸(工作面) 1000 × 600mm;

工作台最大静载荷 1000kg;

T 型槽:

工作台左右行程(X 轴) 1000mm;

工作台前后行程(Y 轴) 600mm;

主轴箱上下行程(Z 轴) 500mm;

主轴:

主轴端面到工作台面最短距离 150mm;

主轴锥孔 ISO40;

轴 径  $\phi 60$ mm;

主轴转速 60 ~ 5000r/min;

交流主轴电动机 18.5/26kW;

最大扭矩 165N·m;

刀库:

刀库容量 24 把;

选刀方式 任意;

刀 柄 ISO7388 - 40;

拉 钉 ISO7388/2 - 40A;

最大刀具刀具平均质量尺寸(直径/长度)	φ80/300mm ;
从一次切削到另一次切削的时间	约 4kg 3s ;
进给速度 :	
X、Y、Z 轴进给速度	1 ~ 15000mm/min ;
X、Y 轴快速移动速度	15000mm/min ;
Z 轴快速移动速度	20000mm/min ;
位置精度 :	
分辨率	0.001mm ;
定位精度	( X )0.032mm ; ( Y、Z )0.022mm ;
重复定位精度	0.018mm ;
机床质量	7000kg ;
机床外形尺寸(长 × 宽 × 高)	4670mm × 3240mm × 3200mm ;
机床电源	3 × 380V/50Hz/21kVA ;
机床使用环境	温度 0 ~ 35℃ ;
湿度	小于 85%。

## 第二节 加工中心基本指令的编程

### 一、换刀指令

#### (1) 刀具的选择

刀具的选择是指把刀库上指令了刀号的刀具到换刀的位置,为下次换刀做好准备。这一动作的实现,是通过选刀指令—T 功能指令实现的。T 功能指令用 T×× 表示。由于受刀库容量的限制,编程时应注意 T 后面的数字应与刀库的总容量相对应。如刀库容量为 24 把刀,可用 T01 ~ T24 来指令 24 把刀具。

#### (2) 换刀指令 M06

加工中心具有自动换刀装置。不同的数控系统,其换刀程序是不同的,通常选刀和换刀分开进行,换刀动作必须在主轴停转条件下进行。换刀完毕启动主轴后,方可执行下面程序段的加工动作,选刀动作可与机床的加工动作重合起来,即利用切削时间选刀。常用的换刀程序可采用以下两种编程。

方法一 :.....

N050 G28 Z0 T02 M06

.....

方法二 N040 G01 Z... T02

.....

N080 G28 Z0 M06

N090 G01 Z... T03

.....

多数加工中心都规定了“换刀”点位置,即定距换刀。一般立式加工中心规定换刀点的位置在 $Z_0$ 处(即机床 $Z$ 轴零点),采用方法一换刀时, $Z$ 轴返回参数点的同时,刀库进行选刀,然后进行刀具交换,若 $Z$ 轴的回零时间小于选刀时间,则换刀占用的时间较长;方法二采用是提前选刀,回零后立即换刀,所以这种方法较好。

## 二、参考点操作指令的编程

### (1) 指令格式

参考点是数控机床上的一个特殊位置,通常,在这个位置上交换刀具或设定工件坐标系。用于参考点操作的指令包括返回参考点和从参考点返回,如图6-6所示。不同的数控系统,该功能的指令代码有所不同,下面以FANUC0i-MT系统为例,介绍参考点操作指令的编程格式。

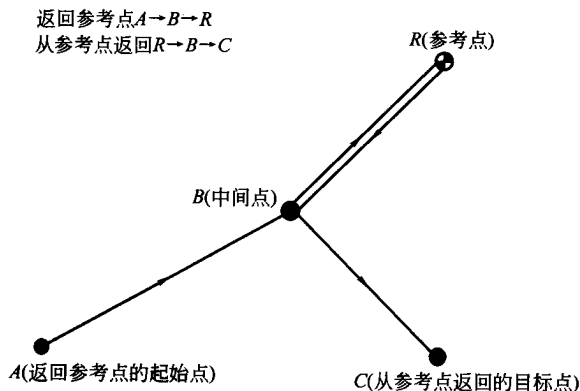


图6-6 返回参考点和从参考点返回

#### ·返回参考点

G28 IP\_\_ 返回参考点

G30 P2 IP\_\_ 返回第2参考点(P2可以省略)

G30 P3 IP\_\_ 返回第3参考点

G30 P4 IP\_\_ 返回第4参考点

IP 指定中间位置的指令(绝对值/增量值指令)

#### ·从参考点返回

G29IP \_\_ ;IP 指定中间点位置的指令(绝对值/增量值指令)

·返回参考点检查

G27IP \_\_ ;IP 指定参考点的指令(绝对值/增量值指令)

## (2)说明

①返回参考点(G28)指令,各轴以快速移动速度执行中间点或参考点的定位。因此,为了安全,在执行该指令之前,应该清除刀具半径补偿和刀具长度补偿。中间点的坐标储存在 CNC 中,每次只存储 G28 程序段中指令轴的坐标值。对其他轴,用以前指令过的坐标值。

例如 N1 G28 X40.0 ;中间点,只沿 X 轴移动

N2 G28 Y60.0 ;中间点(X40.0,Y60.0)

②返回第 2、3、4 参考点(G30),在没有绝对位置检测器的系统中,只有在执行过自动返回参考点 G28 或手动返回参考点之后,方可使用返回第 2、3、4 参考点功能,通常当刀具自动交换(ATC)位置与第 1 参考点不同时,使用 G30 指令。

③从参考点返回(G29),在一般情况下,在 G28 或 G30 指令后,立即指定从参考点返回指令。对增量值编程,指令值指定离开中间点的增量值,以各轴的快速移动速度对中间点或参考点定位。

当由 G28 指令刀具经中间点到达参考点之后,工件坐标系改变时,中间点也变为新坐标系。若此时指令了 G29,则刀具经新坐标系的中间点移动到指令位置。对 G30 指令也执行同样的操作。

④返回参考点检测(G27),G27 指令刀具以快速移动速度定位。如果刀具到达参考点的,返回参考点指示灯亮,但是如果刀具到达的位置不是参考点,则显示报警。

## (3)注意事项

①返回参考点速度可以使用快速移动倍率(F0 25 50 100%),为此设定值是 100% 的速度值。

②参考点返回完成,在已经建立机床坐标系之后,自动返回参考点进给速度将与正常工作时的快速移动速度一致。

③在参考点未返回,机床坐标系建立之前可用参数选择手动快速速度。

【例 6-1】 图 6-7 所示为返回参考点和从参考点返回的编程实例。

G28 G90 X1000.0 Y500.0 (编程从 A 到 B 的移动)

T1111 在参考点换刀

G29 X1300.0 Y200.0 编程从 B 到 C 的移动

## 三、常用指令的编程

### (1)常用指令

加工中心常用指令与铣削加工的编程规则基本相同。但要注意的是,由于加工中心

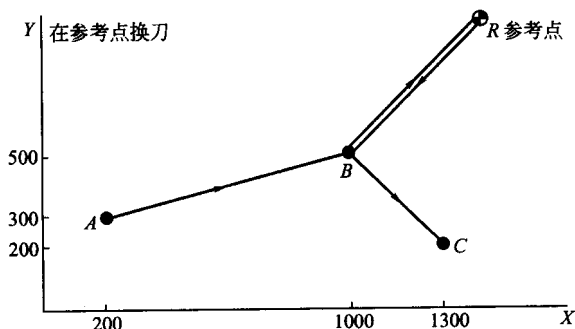


图 6-7 返回参考点和从参考点返回实例

可以实现三轴以上的联动,因此,可以实现空间插补。

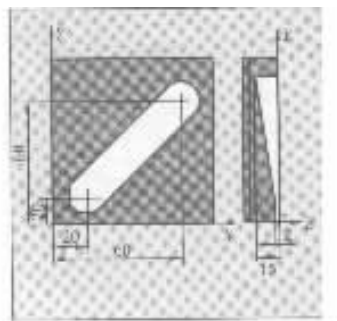


图 6-8 空间插补加工实例

【例 6-2】 铣削加工如图 6-8 所示的槽,工件坐标系定义如图所示。刀具在  $X/Y$  方向中从起点插补到终点, $Z$  方向同步进刀,程序如下。

```

N10 G17 S400 M03      选择工作平面
N20 G0 X20 Y20 Z2    接近起始位置
N30 G1 Z-2           Z 向进刀
N10 X80 Y80 Z-153   沿斜线加工
N50 G0 Z100 M30     退回换刀点 程序结束

```

### (2) 其他功能

除常用指令外,其他功能(如固定循环、子程序等)均与铣削加工的编程格式与规则相似,这里就不再详述。

## 第三节 FANUC 数控系统宏指令编程

虽然子程序对编制相同加工操作的程序非常有用,但用户宏程序由于允许使用变量、算术和逻辑运算及条件转移,使得编制机上加工操作的程序更方便、更容易。可将相同加工操作编为通用程序,如型控加工宏程序和固定加工循环宏程序。使用时加工程序可用一条简单指令调出用户宏程序,和调用子程序完全一样。

### 一、宏变量及常量

#### (1) 变量

在常规的主程序和子程序内,总是将一个具体的数值赋给一个地址。为了使程序更具有通用性,更加灵活,在宏程序中设置了变量,即将变量赋给一个地址。



①变量的表示 变量可以用“#”号和跟随其后的变量序号来表示 :#  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )

例 :# 5 , # 109 , # 501。

②变量的类型 变量根据变量号可以分成 4 种类型 ,见表 6-1。

表 6-1 变量类型

变量号	变量类型	功能
# 0	空变量	该变量总是空 ,没有值能赋给该变量
# 1 ~ # 33	局部变量	只能用在宏程序中存储数据 ,例如 ,运算结果。当断电时局部变量被初始化为空。调用宏程序时 ,自变量对局部变量赋值
# 100 ~ # 199 # 500 ~ # 999	公共变量	在不同的宏程序中的意义相同。当断电时 ,变量 # 100 ~ # 199 初始化为空。变量 # 500 ~ # 999 的数据保存 ,即使断电也不丢失
# 1000 ~	系统变量	用于读写 CNC 运行时各种数据的变化 ,例如刀具的当前位置和补偿值

公共变量是在主程序和主程序调用的各用户内公用的变量。也就是说 ,在一个宏指令中的 #  $i$  与在另一个宏指令中的 #  $i$  是相同的。其中 # 100 ~ # 131 公共变量在电源断电后即清零 ,重新开机时被设置为“0” ;# 500 ~ # 531 公共变量即使断电后 ,它们的值也保持不变 ,因此也称为保持性变量。

③变量值的范围 局部变量和公共变量可以有 0 值或下面范围中的值  $-10^{47} \sim -10^{-29}$  或  $10^{-29} \sim 10^{47}$  ,如果计算结果超出有效范围 ,则发出 P/S 报警。

④变量的引用 将跟随在一个地址后的数值用一个变量来代替 ,即引入了变量  $i$ 。

例 对于 F # 103 ,若 # 103 = 50 时 ,则为 F50 ;

对于 Z - # 110 ,若 # 110 = 100 ,则 Z 为 - 100 ;

对于 G # 130 ,若 # 130 = 3 时 ,则为 G03。

## (2)系统变量

系统变量定义为有固定用途的变量 ,它的值决定系统的状态。系统变量包括刀具偏置变量、接口的输入/输出信号变量、位置信息变量等。

系统变量的序号与系统的某种状态有严格的对应关系。例如 ,刀具偏置序号为 # 01 ~ # 99 ,这些值可以用变量替换的方法加以改变 ,在序号 1 ~ 99 中 ,不用作刀具偏置变量的变量可以用作保持性公共变量 # 500 ~ # 531。

接口输入信号 # 1000 ~ # 1015 ,# 1032。通过阅读这些系统变量 ,可以知道各输入口的情况。当变量值为“1”时 ,说明接点闭合 ;当变量值为“0”时 ,表明接点断开。这些变量

的数值不能被替换, 阅读变量 # 1032, 所有输入信号一次读入。

## 二、宏程序调用

宏程序有许多种调用方式, 其中包括非模态调用( G65 ) 模态调用( G66 ,G67 ), 用 G 代码、T 代码和 M 代码调用宏程序。利用宏程序调用指令 G65 可以实现丰富的宏功能, 包括算术运算、逻辑运算筹码等处理功能。其一般形式为

$G65 Hm R# i Q# j R# k$

其中  $m$  ——宏程序功能, 数值范围 01 ~ 99 ;

$\# i$  ——运算结果存放处的变量名 ;

$\# j$  ——被操作的第一个变量, 也可以是一个常数 ;

$\# k$  ——被操作的第二个变量, 也可以是一个常数。

例如, 当程序功能为加法运算时

程序 P# 100 Q# 101 R# 102... 含义为  $\# 100 = \# 101 + \# 102$

程序 P# 100 Q- # 101 R# 102... 含义为  $\# 100 = - \# 101 + \# 102$

程序 P# 100 Q# 101 R15... 含义为  $\# 100 = \# 101 + 15$

## 三、算术与逻辑运算指令

该类指令可以在变量中执行, 运算符右边的表达式可包含常量和/或由函数或运算符组成的变量。表达式中的变量  $\# j$  和  $\# k$  可以用常数赋值左边的变量, 也可以用表达式赋值。

(1) 算术运算指令( 见表 6-2 )

表 6-2 算术运算指令

G 码	H 码	功 能	定 义
G65	H01	定义, 替换	$\# i = \# j$
G65	H02	加	$\# i = \# j + \# k$
G65	H03	减	$\# i = \# j - \# k$
G65	H04	乘	$\# i = \# j \times \# k$
G65	H05	除	$\# i = \# j / \# k$
G65	H21	平方根	$\# i = \sqrt{\# j}$
G65	H22	绝对值	$\# i =   \# j  $

G 码	H 码	功 能	定 义
G65	H23	求余	$\# i = \# j \cdot \text{trunc}(\# j / \# k) \cdot \# k$ trunc 舍弃小于 1 的分数部分
G65	H24	BCD 码→二进制码	$\# i = \text{BIN}(\# j)$
G65	H25	二进制码→BCD 码	$\# i = \text{BCD}(\# j)$
G65	H26	复合乘/除	$\# i = (\# i \times \# j) \div \# k$
G65	H27	复合平方根 1	$\# i = \sqrt{\# j^2 + \# k^2}$
G65	H28	复合平方根 2	$\# i = \sqrt{\# j^2 - \# k^2}$

①变量的定义和替换  $\# i = \# j$ 

编辑格式 :G65 H01 P # i Q # j

例 :G65 H01 P # 101 Q1005 ( # 101 = 1005 )

G65 H01 P # 101 Q - # 1005 ( # 101 = - # 112 )

②加法  $\# i = \# j + \# k$ 

编辑格式 :G65 H02 P # i Q # j R # k

例 :G65 H02 P # 101 Q # 102 R # 103 ( # 101 = # 102 + # 103 )

③减法  $\# i = \# j - \# k$ 

编辑格式 :G65 H03 P # i Q # j R # k

例 :G65 H03 P # 101 Q # 102 R # 103 ( # 101 = # 102 - # 103 )

④乘法  $\# i = \# j \times \# k$ 

编辑格式 :G65 H04 P # i Q # j R # k

例 :G65 H04 P # 101 Q # 102 R # 103 ( # 101 = # 102 × # 103 )

⑤除法  $\# i = \# j / \# k$ 

编辑格式 :G65 H05 P # i Q # j R # k

例 :G65 H05 P # 101 Q # 102 R # 103 ( # 101 = # 102 / # 103 )

⑥平方根  $\# i = \sqrt{\# j}$ 

编辑格式 :G65 H21 P # i Q # j

例 :G65 H21 P # 101 Q # 102 ( # 101 =  $\sqrt{\# 102}$  )⑦绝对值  $\# i = | \# j |$ 

编辑格式 :G65 H22 P # i Q # j

例 :G65 H22 P # 101 Q # 102 ( # 101 = | # 102 | )

⑧复合平方根 1  $\# i = \sqrt{\# j^2 + \# k^2}$ 

编辑格式 :G65 H27 P # i Q # j R # k

例 :G65 H27 P # 101 Q # 102 R # 103 ( # 101 =  $\sqrt{\# 102^2 + \# 103^2}$  )

⑨复合平方根 2  $\# i = \sqrt{\# j^2 - \# k^2}$

编辑格式 :G65 H28 P # i Q # j R # k

例 :G65 H28 P # 101 Q # 102 R # 103 (  $\# 101 = \sqrt{\# 102^2 - \# 103^2}$  )

(2)逻辑运算指令(见表 6-3)

表 6-3 逻辑运算指令

G 码	H 码	功 能	定 义
G65	H11	逻辑“或”	$\# i = \# j \cdot \text{OR} \cdot \# k$
G65	H12	逻辑“与”	$\# i = \# j \cdot \text{AND} \cdot \# k$
G65	H13	异或	$\# i = \# j \cdot \text{XOR} \cdot \# k$

①逻辑或  $\# i = \# j \text{ OR } \# k$

编辑格式 :G65 H11 P # i Q # j R # k

例 :G65 H11 P # 101 Q # 102 R # 103 (  $\# 101 = \# 102 \text{ OR } \# 103$  )

②逻辑与  $\# i = \# j \text{ AND } \# k$

编辑格式 :G65 H12 P # i Q # j R # k

例 :G65 H11 P # 101 Q # 102 R # 103 (  $\# 101 = \# 102 \text{ AND } \# 103$  )

(3)三角函数指令(见表 6-4)

表 6-4 三角函数指令

G 码	H 码	功 能	定 义
G65	H31	正弦	$\# i = \# j \cdot \sin(\# k)$
G65	H32	余弦	$\# i = \# j \cdot \cos(\# k)$
G65	H33	正切	$\# i = \# j \cdot \tan(\# k)$
G65	H34	反正切	$\# i = \tan^{-1}(\# j / \# k)$

①正弦函数  $\# i = \# j \times \sin(\# k)$

编辑格式 :G65 H31 P # i Q # j R # k (单位 :度)

例 :G65 H31 P # 101 Q # 102 R # 103 [  $\# 101 = \# 102 \times \sin(\# 103)$  ]

②余弦函数  $\# i = \# j \times \cos(\# k)$

编辑格式 :G65 H32 P # i Q # j R # k (单位 :度)

例 :G65 H31 P # 101 Q # 102 R # 103 [  $\# 101 = \# 102 \times \cos(\# 103)$  ]

③正切函数  $\# i = \# j \times \tan(\# k)$

编辑格式 :G65 H33 P # i Q # j R # k (单位 :度)

例 :G65 H31 P # 101 Q # 102 R # 103 [  $\# 101 = \# 102 \times \tan(\# 103)$  ]

④反正切  $\# i = \tan^{-1}(\# j / \# k)$

编辑格式 :G65 H34 P#i Q# j R# k (单位 :度  $0 \leq \#j \leq 360^\circ$ )

例 :G65 H34 P#i Q# j R# k [ #101 =  $\tan^{-1}$ ( #102/ #103 )]

## 四、控制类指令

### (1) A 类控制指令

用非模态调用 G65 ,可以实现转移功能 ,见表 6-5。

表 6-5 控制类指令

G 码	H 码	功 能	定 义
G65	H80	无条件转移	GOTO <i>n</i>
G65	H81	条件转移 1	IF #j = #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H82	条件转移 2	IF #j ≠ #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H83	条件转移 3	IF #j > #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H84	条件转移 4	IF #j < #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H85	条件转移 5	IF #j ≥ #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H86	条件转移 6	IF #j ≤ #k ,GOTO <i>n</i>
G65	H99	产生 P/S 报警	P/S 报警号 500 + <i>n</i> 出现

#### ①无条件转移

编辑格式 :G65 H80 P*n* (*n* 为程序段号 ,以下类同)

例 :G65 H80 P120 (转移到 N120)

#### ②条件转移 1 #j EQ #k (=)

编辑格式 :G65 H81 P*n* Q# j R# k

例 :G65 H81 P1000 Q# 101 R# 102

//当 #101 = #102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 #101 ≠ #102 执行下一程序段。

#### ③条件转移 2 #j NE #k (≠)

编辑格式 :G65 H82 P*n* Q# j R# k

例 :G65 H82 P1000 Q# 101 R# 102

//当 #101 ≠ #102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 #101 = #102 执行下一程序段。

#### ④条件转移 3 #j GT #k (>)

编辑格式 :G65 H83 P*n* Q# j R# k

例 :G65 H83 P1000 Q# 101 R# 102

//当 #101 > #102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 #101 ≤ #102 执行下一程序段。

#### ⑤条件转移 4 #j LT #k (<=)

编辑格式 :G65 H84 P*n* Q# j R# k

例 :G65 H84 P1000 Q # 101 R # 102 //当 # 101 < # 102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 # 101 ≥ # 102 执行下一程序段。

⑥条件转移 5 # j GE # k ( ≥ )

编辑格式 :G65 H85 Pn Q# j R# k

例 :G65 H85 P1000 Q # 101 R # 102 //当 # 101 ≥ # 102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 # 101 < # 102 执行下一程序段。

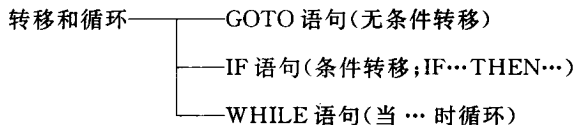
⑦条件转移 6 # j LE # k ( ≤ )

编辑格式 :G65 H86 Pn Q# j R# k

例 :G65 H86 P1000 Q # 101 R # 102 //当 # 101 ≤ # 102 转移到 N1000 程序段 ;  
若 # 101 > # 102 执行下一程序段。

## (2) B 类控制指令

在程序中 ,使用某些语句可以改变控制的流向 ,有 3 种转移和循环操作可供使用。



①无条件转移指令 其编程格式为

GOTO n ;n 为顺序号(1 ~ 99999)

例如 :

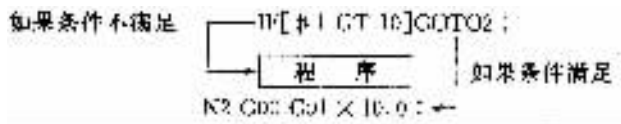
GOTO1 ;

GOTO # 10 ;

②条件转移指令 有两种形格式。

• IF[ 条件表达式 ]GOTO n

如果指定的条件表达式满足时 ,转移到标有顺序号 n 的程序段 ;如果指定的条件表达式不满足 ,执行下一个程序段 ,执行顺序如下。



• IF[ 条件表达式 ]THEN

如果条件表达式满足 ,执行预先决定的宏程序语句 ,只执行一个宏程序语句。

条件表达式必须包括运算符 ,运算符插在两上变量中间或变量和常数中间 ,并且用括号 ,封闭 ,表达式可以替代变量。

运算符由两个字母组成 ,用于两个值的比较 ,以决定它们是相等还是一个值小于或大于另一个值。注意 ,不能使用不等号。常用的运算符及其含义见表 6-6。

表 6-6 运算符及其含义

运算符	含 义	运算符	含 义
EQ	等于( = )	GE	大于或等于( ≥ )
NE	不等于( ≠ )	LT	小于( < )
GT	大于( > )	LE	小于或等于( ≤ )

【例 6-3】 下面的程序计算数值 1~10 的总和。

O9500

#1 = 0 ; 存储和数变量的初值

#2 = 1 ; 被加数变量的初值

N1 IF[ #2 GT 10 ]GOTO 2 ; 当被加数大于 10 时转移到 N2

#1 = #1 + #2 ; 计算和数

#2 = #2 + #1 ; 下一个被加数

GOTO 1 ; 转到 N1

N2 M30 ; 程序结束

③ 循环语句 其编程格式为

WHILE[ 条件表达式 ]DO $m$ (  $m = 1, 2, 3$  )

“ WHILE.....END $m$  ”程序的含义为 :条件表达式满足时 ,程序段 DO $m$  至 END $m$  重复执行 ,条件表达式不满足时 ,程序转到 END $m$  后执行。如果 WHILE[ 条件表达式 ]部分被省略 ,则程序段 DO $m$  ~ END $m$  之间的部分将一直重复执行。

注意 :WHILE DO $m$  和 END $m$  必须成对使用 ,DO 语句允许有 3 层嵌套 ,DO 语句范围不允许交叉 ,即如下语句是错误的。

DO 1

DO 2

END 1

END 2

【例 6-4】 下面的程序计算数值 1~10 的总和。

O0001

#1 = 0 ;

#2 = 1 ;

WHILE[ #2 LT 10 ]DO1 ;

#1 = #1 + #2 ;

#2 = #2 + 1

END 1 ;—M30 ;

## 五、用户宏程序应用实例

【例 6-5】 用宏程序和子程序功能顺序加工圆周等分孔。设圆心在零点,它在机床上的坐标系为 $(X_0, Y_0)$ ,在半径为 $r$ 的圆周上均匀地钻几个等分孔,起始角度为 $a$ ,孔数为 $n$ 。以零件上表面为 $Z$ 向零点。如图 6-9 所示。

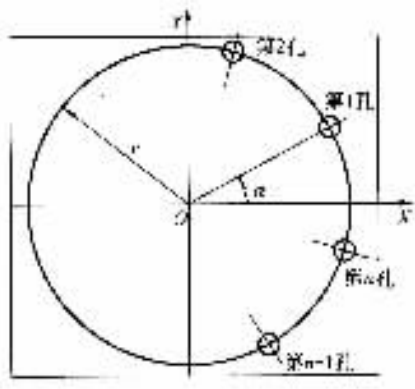


图 6-9 等分孔的计算参数

使用以下保持型变量

# 502 半径  $r$ ;

# 503 起始角度  $a$ ;

# 504 孔数  $n$ , 当  $n > 0$  时, 按逆时针方向加工, 当  $n < 0$  时, 按顺时针方向加工;

# 505 孔底  $X$  坐标值;

# 506  $R$  平面  $Z$  坐标值;

# 507  $F$  进给量。

使用以下变量进行操作运算

# 100 表示第  $i$  步钻孔的计数器;

# 101 计数器的最终值(为  $n$  的绝对值);

# 102 第  $i$  个孔的角度位置  $\theta_i$  的值;

# 103 第  $i$  个孔的  $X$  坐标值;

# 104 第  $i$  个孔的  $Y$  坐标值;

使用用户宏程序编制的钻孔子程序如下

O9010

N110 G65 H01 P# 100 Q0

// # 100 = 0

N120 G65 H22 P# 101 Q# 504

// # 101 = | # 504|

N130 G65 H04 P# 102 Q# 100 R360

// # 102 = # 100  $\times$  360°

N140 G65 H05 P# 102 Q# 102 R# 504

// # 102 = # 102 / # 504



```

N150 G65 H02 P# 102 Q# 503 R# 102 // # 102 = # 503 + # 102
// 当前孔角度位置  $\theta_i = \alpha + (306^\circ$ 
 $\times i) / n$ 
N160 G65 H32 P# 102 Q# 502 R# 102 // # 103 = # 502  $\times \cos(\# 102)$  当
前孔的 X 坐标
N170 G65 H31 P# 104 Q# 502 R# 102 // # 104 = # 502  $\times \sin(\# 102)$  当
前孔的 Y 坐标
N180 G90 G00 X# 103 Y# 104 // 定位到当前孔(返回开始平
面)
N190 G00 Z# 506 // 快速回到 R 平面
N200 G01 Z# 506 F# 507 // 加工当前孔
N210 G00 Z# 506 // 快速回到 R 平面
N220 G65 H02 P# 100 Q# 100 R1 // # 100 = # 100 + 1 孔计数
N230 G65 H84 P- 130 Q# 100 R# 101 // 当 # 100 < # 101 时 , 向上返
回到 130 程序段
N240 M99 // 子程序结束
调用上述子程序的主程序如下
O0010
N10 G54 G90 G00 X0 Y0 Z20 // 进入加工坐标系
N20 M98 P9010 // 调用钻孔子程序 , 加工圆
周等分孔
N30 Z20 // 抬刀
N40 G00 G90 X0 Y0 // 返回到加工坐标系零点
N50 M30 // 程序结束

```

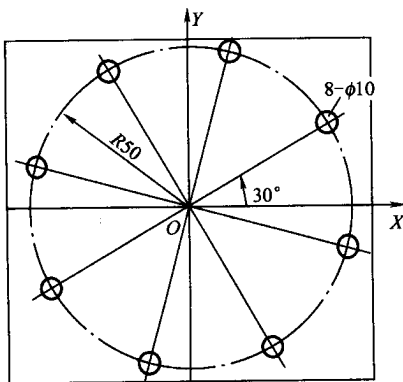


图 6-10 等分孔加工应用实例

设置 G54 :  $X = -400, Y = -100, Z = -50$ 。变量 # 500 ~ # 507 可在程序中赋值 , 也可由 MDI 方式设定。

根据以下数据 , 使用用户宏程序功能加工圆周等分孔。在半径为 50mm 的圆周上均匀地钻 8 个  $\phi 10$  的等分孔 , 第一个孔的起始点角度为  $30^\circ$  , 设圆心为零点 , 以零件的上表面为 Z 向零点。如图 6-10 所示。

首先在 MDI 方式中 , 设定以下变量的值

# 502 : 半径  $r$  为 50 ;

# 503 : 起始角度  $\alpha = 30^\circ$  ;

# 504 : 孔数  $n$  为 8 ;

# 505 : 孔底 Z 坐标值为 - 20 ;

# 506 :R 平面 Z 坐标值为 5 ;

# 507 :F 进给量为 50。

加工程序为

O6100

N10 G54 G90 G00 X0 Y0 Z20

N20 M98 P9010

N30 G00 G90 X0 Y0

N40 Z20

N50 M30

设置 G54 :X = - 400 ,Y = - 100 ,Z = - 50。

【例 6-6】 用循环宏指令 加工如图 6-9 所示圆环点阵孔群中的各孔。

宏程序中用到下列变量 :

# 1 ——第一孔的超始角度 A ,在主程序中用对应的文字变量 A 赋值 ;

# 3 ——孔加工固定循环中 R 平面值 C ,在主程序中用对应的文字变量 C 赋值 ;

# 9 ——孔加工的进给量值 F ,在主程序中用对应的文字变量 F 赋值 ;

# 11 ——要加工孔的孔数 H ,在主程序中用对应的文字变量 H 赋值 ;

# 18 ——加工孔所在的圆环半径值 R ,在主程序中用对应的文字变量 R 赋值 ;

# 26 ——孔深坐标值 Z ,在主程序中用对应的文字变量 Z 赋值 ;

# 30 ——基准点 ,即圆环形中心的 X 坐标值 X0 ;

# 31 ——基准点 ,即圆环形中心的 Y 坐标值 Y0 ;

# 32 ——当前加工孔的序号 i ;

# 33 ——当前加工第 i 孔的角度 ;

# 100 ——已加工孔的数量 ;

# 101 ——当前加工孔的 X 坐标值 ,初值设置为圆环形中心的 X 的坐标值 X0 ;

# 102 ——当前加工孔的 Y 坐标值 ,初值设置为圆环形中心的 X 的坐标值 Y0。

用户宏程序如下 :

O6000

N6010 # 30 = # 101 //基准点保存

N6020 # 31 = # 102 //基准点保存

N6030 # 32 = 1 //计数值置 1

N6040 WHILE[ # 32 LE ABS[ # 11 ]]DO1 //进入孔加工循环体

N6050 # 33 = # 1 + 360 \* [ # 32 - 1 ] / # 1 //计算第 i 孔的角度

N6060 # 101 = # 30 + # 18 \* COS[ # 33 ] //计算第 i 孔的 X 坐标值

N6070 # 102 = # 31 + # 18 \* SIN[ # 33 ] //计算第 i 孔的 Y 坐标值

N6080 G90 G81 G98 X # 101

Y # 102 Z # 26 R # 3 F # 9 //钻削第 i 孔

```

N6090 # 32 = # 32 + 1           // 计数器对孔序号 i 计数累加
N6100 # 100 = # 100 + 1       // 计算已加工孔数
N6110 END1                     // 孔加工循环体结束
N6120 # 101 = # 30            // 返回 X 坐标初值 X0
N6130 # 102 = # 31           // 返回 Y 坐标初值 Y0
M99                            // 宏程序结束

```

在主程序中调用上述宏程序的调用格式为

```
G65 P6000 A~ C~ F~ H~ R~ Z~
```

上述程序段中各文字变量后的值均应按零件图样中给定值来赋值。

## 第四节 SIEMENS 系统宏程序应用

### (1) 计算参数

SIEMENS 系统宏程序应用的计算参数如下

R0 ~ R99 —— 可自由使用；

R100 ~ R249 —— 加工循环传递参数(如程序中没有使用加工循环,这部分参数可自由使用)；

R250 ~ R299 —— 加工循环内部计算参数(如程序中没有使用加工循环,这部分参数可自由使用)。

### (2) 赋值方式

为程序的地址赋值时,在地址之后应使用 '=' ,N、G、L 除外。

例 :G00 X = R2

### (3) 控制指令

控制指令主要有

IF 条件 GOTOF 标号

IF 条件 GOTO 标号

说明 :IF —— 如果满足条件,跳转到标号处;如果不满足条件,执行下一条指令。

GOTOF —— 向前跳转。

GOTOB —— 向后跳转。

标号 —— 目标程序段的标记符,必须要由 2 ~ 8 个字母或数字组成,其中开始两个符号必须是字母或下划线。标记必须位于程序有顺序号字,标记符必须紧跟顺序号字,标记符后面必须为冒号。

条件 —— 计算表达式,通常用比较运算表达式,比较运算符见表 6-7。

例如

...

表 6-7 比较运算符

比较运算符	意 义	比较运算符	意 义
=	等于	<	小于
≠	不等于	≥	大于或等于
>	大于	≤	小于或等于

N10 IF R1 < 10 GOTOF LAB1

...

N100 LAB1G0 Z80

【例 6-7】 用镗孔循环 LCYC85 加工如图 6-11 所示的矩阵排列孔,无孔底停留时间,安全间隙为 2mm。

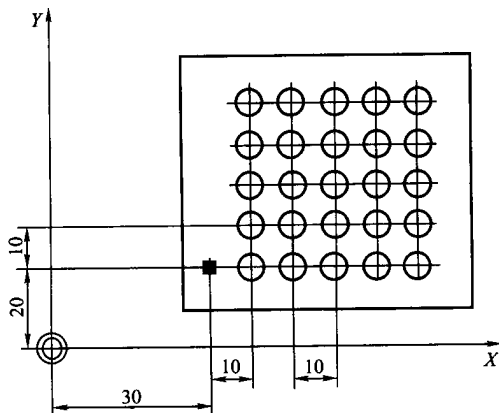


图 6-11 矩阵排列孔加工实例

N10 G0 G17G90 F1000 T2 D2 S500 M3

N20 X10 Y10 Z105

N30 R1 = 0

N40 R101 = 105 R102 = 2 R103 = 102 R104  
= 77 R105 = 0 R107 = 200 R108 = 100

N50 R115 = 85 R116 = 30 R117 = 20 R118  
= 10 R119 = 5 R120 = 0 R121 = 10

N60 MARKE1 LCYC60

N70 R1 = R1 + 1 R117 = R117 + 10

N80 IF R1 < 5 GOTOB MARKE1

N90 G0 G90 X10 Y10Z105

N100 M2

## 第五节 FAGOR 高级语言编程简介

FAGOR8055M/T 数控系统的 CNC 有一系列的内部变量,可以从用户程序、从 PLC 或通过 DNC 访问。从用户程序访问这些变量通过高级语言命令实现。

被访问的每一个系统变量可以通过助记符记入,根据它们的用途,可分为只读变量和读写变量。

### 一、词汇描述

所有形成数字控制的高级语言词汇必须大写,只有与文本相关的可以用大写或小写字母。FAGOR 数控系统用于高级语言编程的元素包括保留词、数字常量和符号。

#### (1)保留词

CNC 用于命名系统变量、运算符、控制变量等的高级语言编程词集,如 CALL、CLOCKE、CYTIME、DATE、ERROR、GOTO、IF、KEY、INPUT、OPEN、PCALL、RET、RPT、SUB、TOOL、WRITE 等,具体内容请参阅编程手册。

#### (2)数字常量

用高级语言编写的程序段允许用不超过 # 6.5 的小数格式表示数字( # 6.5 的含义为整数小于 6 位,小数小于 5 位)如果用十六进制格式,前面必须加 \$ 符号,最大为 8 位。

赋予变量的常数超出格式 # 6.5 时,将通过算术参数、算术表达式或十六进制格式表示。例如,将数值 10000000 赋予变量 TIMER,可以采用下列方式之一完成。

( TIMER = 5F5E100 );

( TIMER = 10000 \* 10000 );

( P100 = 10000 \* 10000

TIMER = P100 )

#### (3)符号

高级语言使用的符号有

( ) = + - \* / ,

### 二、流控制语句

在通过串行线连接的 PC 上执行的程序中,不能使用 GOTO 和 RPT 语句。

#### (1)GOTO N(表达式)

GOTO 引起在同一程序段内的跳转,跳转到 N(表达式)定义的程序段。跳转后程序将从指定程序段继续开始执行,跳转标号可以通过数字或结果为数字的表达式给出。

例如：

G00 X30 Z10 T2 D4

Z20

(GOTO N22)

跳转语句

X20 Z30

;不执行

X30 Z25

;不执行

N22 G01 X10 Z10 F100

;从这一段继续执行

G02 X0 Z40 I-10 K0

……

(2)RPT N(表达式) ,N(表达式)

RPT 执行同一程序段内用标号 N(表达式)定义程序段之间的部分。两个标号都可以通过数字或结果为数字的表达式给出,且两个标号选择的程序必须属于同一程序,第 1 个标号定义起始段,第 2 个标号定义终止段,一旦程序执行完毕,将继续执行编写 RPT 的程序段后面的程序段。

例如：

N10 G91 G01 X-20 Z-20

X10

G02 X10 Z-10 I10 K0

N20 G01 Z-10

N30(RPT N10 ,N20 )N3

N40 G01 X20

M30

当到达 N30 时,程序将执行选择的部分 N10 ~ N20 共 3 次,一旦这一工作完成,将继续执行程序段 N40。

(3)IF 动作 1 ELSE 动作 2

分析该语句给出的条件,它必须是一个关系表达式。如果条件为真(结果等于 1),将执行 动作 1,否则(结果等于 0),将执行 动作 2。

例如：

( IF( P8 EQ 12.8 )CALL3 ELSE PCALL5 ,A2 ,B5 ,D8 )

如果 P8 = 12.8 执行 CALL3 ;如果  $8 \neq 12.8$  执行 PCALL5 ,A2 ,B5 ,D8。

该语句可以没有 ELSE 部分,即对程序而言,IF 条件满足执行条件 1 足够了,故可将上述语句简写成

( IF( P8 EQ 12.8 )CALL3 )

动作 1 和 作 2 可以是表达式或语句,但不能是 IF 和 SUB。

### 三、子程序语句

#### (1)子程序的格式

FAGOR 数控系统的子程序语句与其他系统有很大差异,其格式为

(SUB 整数)

SUB 定义在此之后的程序段集合为子程序,并将子程序标识为一个 0~9999 之间的整数。在 CNC 的内存中两个子程序不能用一个标识符,其返回语句为

(RET)

RET 表示由 SUB 定义子程序在该程序段结束,相当于 FANUC 系统的 M99。

例如:

(SUB12) 定义子程序 12

G91 G01 X P0 F500

Z P1

X - P0

Z - P1

(RET) ;子程序结束

#### (2)子程序的调用

①子程序的调用格式 1 为

(CALL(表达式))

CALL 调用由数字或结果为数字的表达式指定的子程序。FAGOR8055 系列最多允许嵌套 15 层,每层可以重复 9999 次。

【例 6-8】 利用子程序编程,对图 6-12 所示零件进行车削加工。

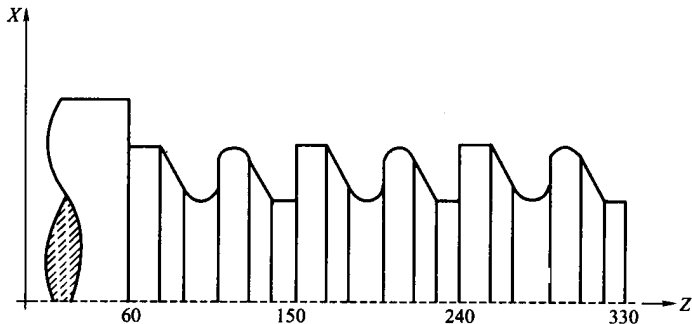


图 6-12 车削加工子程序应用典型实例

G90 G01 X100 Z330

(CALL10)

G90 G01 X100 Z240

```

(CALL10)
G90 G01 X100 Z150
(CALL10)
M30
(SUB)
G91 G01 Z - 10
      X40 Z - 10
G03 X0 Z - 20 I0 K - 10
G01 X - 20
G02 X0 Z - 20 I0·K - 10
G01 X40 Z - 10
      Z - 20
(RET)

```

【例 6-9】 如图 6-13 所示,在  $X$ 、 $Y$  平面内加工八个螺纹孔,应用多次调用子程序,可以使程序变得非常简单,程序如下。

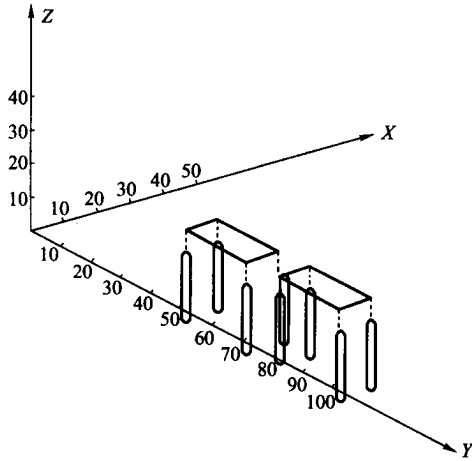


图 6-13 孔加工子程序应用实例

```

G54
G90 G00 X20 Y20 Z10
(CALL10)
G90 G00 X20 Y50 Z10
(CALL10)
M05
M30
子程序：

```



( SUB10 )

G91 G01 Y20 F2000

( CALL 11 )

G91 G01X10

( CALL 11 )

G91 G01 Y - 20

( CALL 11 )

G91 G01 X - 10

( CALL 11 )

( RET )

( SUB11 )

T1 D1

G54

M06

G43

G81 G98 G91 Z - 8 I - 22 F100 S500

;钻削固定循环

G44 G01 Z10 F500

T2 D2

G54

M06

G43

G84 Z - 8 I - 22 K15 F100 S400

;攻丝固定循环

G80

( RET )

②子程序的调用格式 2 为

( PCALL( 表达式 )( 赋值语句 )( 赋值语句 ), ... )

PCALL 调用由数字或结果为数字的表达式指定的子程序。另外,该子程序最多可以有 26 个局部参数通过赋值语句被初始化。

例如 ( PCALL52 ,A3 ,B5 ,C4P10 = 20 )

在这种情况下,除生成新的子程序嵌套层之外,将生成新的局部参数嵌套层,在 15 层子程序嵌套层内,最多可以有 6 层局部参数嵌套层。主程序和参数嵌套层的每个子程序都有 26 个局部参数( P0 ~ P25 )。

【例 6 - 10】 利用局部参数赋值语句及其调用格式编写如图 6 - 14 所示零件的加工程序。

G90 G01 X80 Z330

( PCALL10 ,P0 = 20 ,P1 = - 10 ) ;或( PCALL10 ,A20 ,B - 10 )

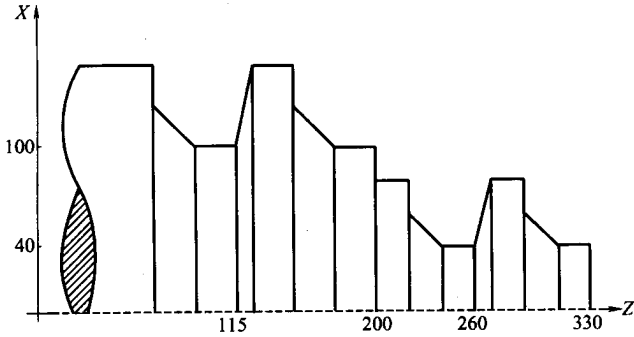


图 6-14 子程序应用实例

```

G90 G01 X80 Z260
(PCALL10, P0 = 20, P1 = -10) ; 或 (PCALL10, A20, B-10)
G90 G01 X200 Z150
(PCALL10, P0 = 30, P1 = -15) ; 或 (PCALL10, A30, B-15)
G90 G01 X200 Z115
(PCALL10, P0 = 30, P1 = -15) ; 或 (PCALL10, A30, B-15)
M30
(SUB)
G91 G01    ZP1
          XP0 ZP1
          XP0
          ZP1
(RET)

```

【例 6-11】 用 FAGOR 8055M 高级语言编写自动换刀子程序。

```

(SUB6) ;子程序定义
(EFHOLD) ;PLC 进给保持无效
(ESBLK) ;单段执行
(P1 = TOOL ,P2 = NXTTOOL) ;确定当前刀具和下一个刀具
(IFP1 EQP2GOTON100) ;换刀操作条件
(IFP2 EQ 0 GOTO N100)
(IF P1 NE P2 GOTO N100)
(DSBLK) ;取消单段执行
N10 G00G90G80G40G44G53 ;补偿清零
N15 G53 G00 Z0 ;
N20 M19 ;主轴定位

```

N30 M91	;刀库向前
N40 M92	;刀具松开
N50 G00 Z105	到换刀平面
N55 M93	;刀库旋转
N60 G00 Z0	;
N70 M94	;刀具夹紧
N80 M95	;刀库向后
N90 M05	
N100 M06	换刀
( DFHOLD )	PLC 进给保持
G04	
( RET )	子程序结束

【例 6-12】 由函数、算术表达式等数学计算形成的曲线轮廓,可以直接在程序中使用高级语言编写。要生成如图 6-15 所示的心形曲线,编程方法如下。

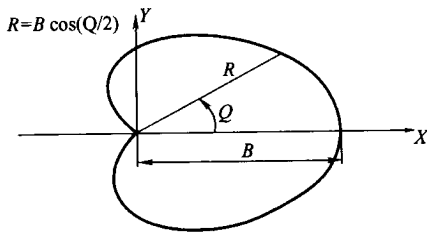


图 6-15 心形曲线加工

```
G00 X0 Y0
G93
(PCALL2 ,A0 ,B30 ,C5 ,D500)
(SUB2)
(OPEN P12345)
(WRITE EP3)
N100( P10 = P1 * ( ABS( COS( P0/2 ) ) ) )
(WRITE G01 G05 RP10 QP0)
(P0 = P0 = 2)
```

## 第六节 加工中心编程综合实例

【例 6-13】 试采用固定循环方式加工如图 6-16 所示各孔,工件材料为 HT300,

使用刀具 T01 为镗孔刀, T02 为直径 13mm 钻头, T03 为铤钻。工件坐标系设置  $Z_0$  在工件上表面,  $X_0$ 、 $Y_0$  零件的对称中心位置, 加工程序见表 6-8。

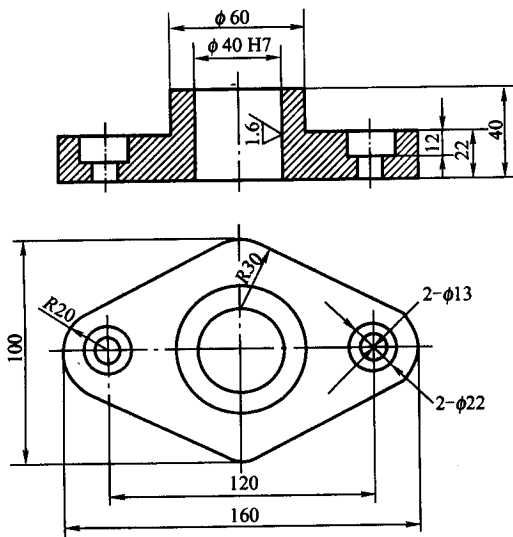


图 6-16 固定循环加工实例

表 6-8 加工程序

CNC 程序	说 明
O0057	程序编号
T01 M06	选择 1 号刀, 换刀
G90 G00 G54 X0 Y0 T02	绝对坐标, 建立工件坐标系 $X_0$ 、 $Y_0$
G43 H01 Z10.0 S400 M03 F40	1 号刀长度补偿, 快进到初始平面, 主轴正转
G98 G85 X0 Y0 R3.0 Z-45.0	固定循环 G85 镗孔 $\phi 38$ R 平面离上表面 3mm
G80 G28 G49 Z0 M06	固定循环及长度补偿取消, 返回到 $Z_0$ 点, 换 2 号刀
G00 X-60 Y50 T03	快速移动至 X-60Y50 点, 选 3 号刀
G43 H02 G00 Z10.0 S600 M03	建立 2 号刀长度补偿, 快进到初始平面
G98 G73 X-60.0 Y0 R-15.0 Z-48.0 Q4.0 F40	高速深孔往复排屑固定循环 G73 钻孔 1, 返回到初始平面
X60.0	继续执行 G73 高速深孔往复排屑钻孔 2



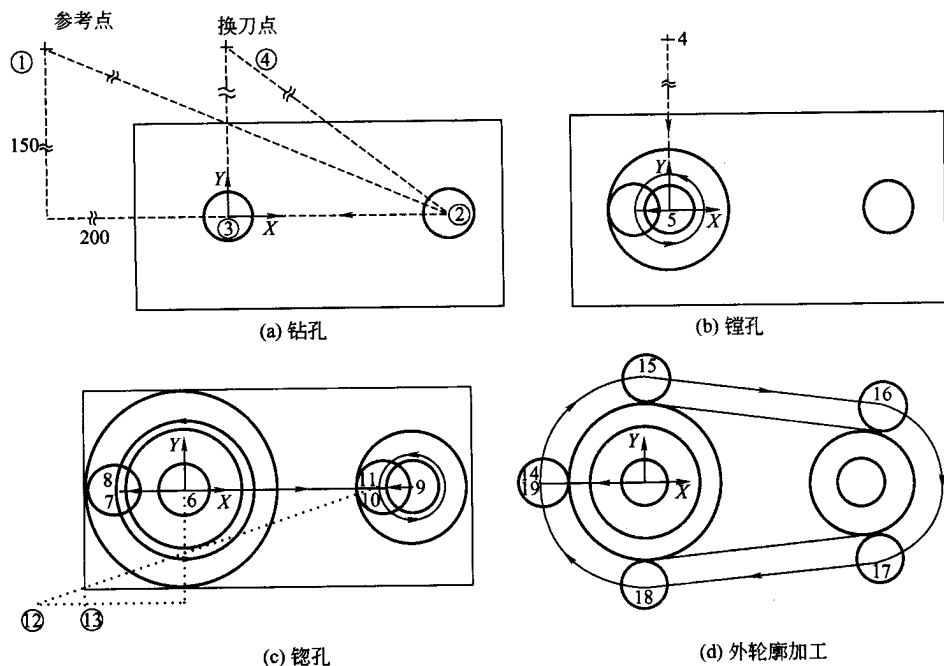


图 6-18 零件的加工程序

表 6-9 工序及切削用量

序号	工 序	刀 具	主轴转速 S /r·min <sup>-1</sup>	进给速度/ /mm·min <sup>-1</sup>
1	钻两个 φ3.8mm 的通孔	φ13.8mm 钻	700	50
2	铰 φ14mm 孔	φ14mm 铰刀	80	10
3	扩孔至 φ29.4mm	φ29.4mm 钻	260	40
4	精镗 φ30mm 孔	φ230mm 镗刀	400	30
5	镗孔 φ50mm φ24mm	φ24mm 立铣刀	400	40
6	用内孔对工件重新夹紧,完成外轮廓加工	φ24mm 立铣刀	400	40

表 6-10 加工程序单

程 序	注 释
O1110	程序号
N010 G90 G21 G40 GS0	采用绝对尺寸指令 米制 注销刀具半径补偿和固定循环功能 (钻孔操作)

程 序	注 释
N020 G91 G28 X0 Y0 Z0	刀具移至参考点 1
N030 G92 X—200 Y150 Z0	设定工件坐标系原点坐标
N040 G00 G90 X70 Y0 Z0 S700 M03 T2	刀具快速移至点 2 ,主轴以 700r/min 正转 ,2 号刀具准备
N050 G43 Z50 H01	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H01
N060 M08	开冷却液
N070 G98 G81 X0 Y0 Z—20 R5 F50	钻孔循环 ,孔底位置为 Z 轴—20mm 处 ,进给速度为 50mm/min
N080 X0	点 3 处钻孔循环
N090 G80	注销固定循环
N100 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 ,主轴停止
N110 M09	关冷却液
N120 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 4
N130 G49 M06( M01 )	注销刀具长度补偿 ,换 2 号刀具
N140 G00 G90 X70 Y0 Z0 S80 M03 T3	刀具快速移至点 2 ,主轴以 80r/min 正转 ,3 号刀具准备
N150 G43 Z50 H02	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H02
N160 M08	开冷却液
N170 G01 Z—20 F10	沿 Z 轴以 10mm/min 直线插补至—20mm
N180 G01 Z5 F20	沿 Z 轴以 20mm/min 直线插补至 5mm
N190 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 ,主轴停止
N200 M09	关冷却液
N210 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 4
N220 G49 M06( M01 )	注销刀具长度补偿 ,换 3 号刀具( 选择停止 )
N230 G00 G90 X0 Y0 Z0 S260 M03 T4	刀具快速移至点 5 ,主轴以 260r/min 正转 ,4 号刀具准备
N240 G43 Z50 H03	刀具长度补偿有效 ,补偿号 H03
N250 M08	开冷却液
N260 G98 G81 X0 Y0 Z—20 R5 F40	钻孔循环 ,孔底位置为 Z 轴—20mm 处 ,进给速度为 40mm/min
N270 G80	注销固定循环
N280 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 ,主轴停止
N290 M09	关冷却液
N300 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 4

程 序	注 释
N310 G49 M06 ( M01 )	注销刀具长度补偿 换 4 号刀具 ( 选择停止 , 下面进行镗孔加工 )
N320 G00 G90 X0 Y0 Z0 S400 M03 T5	刀具快速移至点 5 主轴以 400r/min 正转 5 号刀具准备
N330 G43 Z50 H04	刀具长度补偿有效 补偿号 H04
N340 M08	开冷却液
N350 G98 G76 X0 Y0 Z—20 R5 Q0.1 F30	镗孔循环 , 孔底位置在 Z 轴—20mm 处 , 偏移量为 0.1mm 进给速度为 30mm/min
N360 G80	注销固定循环
N370 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 主轴停止
N380 M09	关冷却液
N390 G91 G28 Z0 Y0	移至换刀点 4
N400 G49 M06 ( M01 )	注销刀具长度补偿 换 5 号刀具 ( 选择停止 , 下面进行镗孔加工 )
N410 G00 G90 X0 Y0 Z0 S400 M03 T1	刀具快速移至点 6 主轴以 400r/min 正转 1 号刀具准备
N420 G43 Z50 H05	刀具长度补偿有效 补偿号 H05
N430 G00 G90 Z—5	刀具沿 Z 轴快速定位至—5mm 处
N440 M08	开冷却液
N450 G42 G01 X—25 D01	刀具半径补偿有效 补偿号 D01 直线插补至点 7
N460 G03 X—25 Y0 I25 J0	逆时针圆弧插补至点 8
N470 X—23	刀具向右平移 2mm
N480 G00 G90 Z10	刀具沿 Z 轴快速定位至 10mm 处
N490 G00 G90 X70 Y0	刀具快速移至点 9
N500 G00 G90 Z—5	刀具沿 Z 轴快速定位至—5mm 处
N510 X58	刀具快速移至点 10
N520 G03 X58 Y0 I12 J0	逆时针圆弧插补至点 11
N530 X60	刀具向右平移 2mm
N540 G00 G90 Z10	刀具沿 Z 轴快速定位至 10mm 处
N550 G40	注销刀具半径补偿
N560 G00 G90 X—40 Y—40	刀具快速移至点 12 ( 轮廓加工 )
N570 G00 G90 Z—20	刀具沿 Z 轴快速定位至—20mm 处
N580 G41 G01 X—25 D02	刀具半径补偿有效 补偿号 D02 直线插补至点 13
N590 Y0	直线插补至点 14
N600 G02 X5 Y24.5 I25 J0	顺时针圆弧插补至点 15
N610 G01 X72 Y12	直线插补至点 16
N620 G02 X72 Y—12 I—12 J—12	顺时针圆弧插补至点 17
N630 G01 X5 Y—24.5	直线插补至点 18
N640 G02 X—25 Y0 I—5 J24.5	顺时针圆弧插补至点 19
N650 G01 X—27	刀具向左平移 2mm



程序	注释
N660 G00 G90 Z20 M05	刀具沿 Z 轴快速定位至 20mm 处 主轴停止
N670 M09	关冷却液
N680 G91 G28 X0 Y0 Z0	返回到参考点
N690 G40	注销刀具半径补偿
N700 G49 M06	注销刀具长度补偿 换刀
N710 M30	程序结束

【例 6-15】 用卧式加工中心加工如图 6-19 所示端盖。

(1) 工艺方案及工艺路线的确定

① 图纸分析和决定安装基准 零件加工尺寸如图 6-19 所示,假定在卧式加工中心上只加工 B 面及各孔,根据图纸要求,选择 A 面为定位安装面,用弯板装夹。

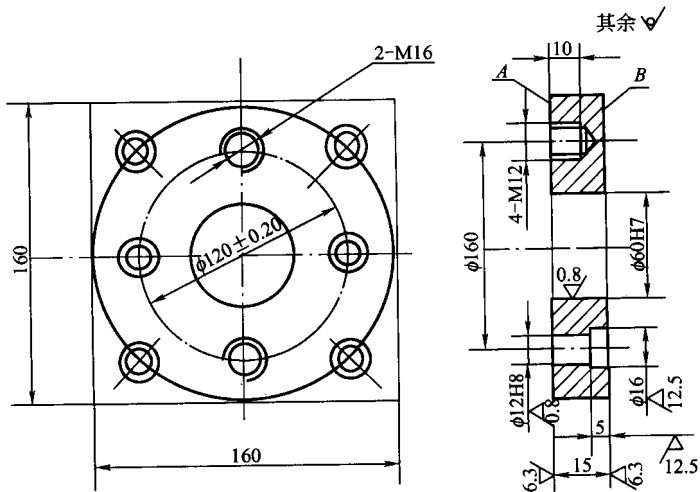


图 6-19 端盖零件

② 加工方法和加工路线的确定 加工时按先面后孔,先粗后精的原则。B 面用铣削加工,分粗铣和精铣; $\phi 60H7$  孔采用三次镗孔加工,即粗镗、半精镗和精镗; $\phi 12H8$  孔按钻、扩、铰方式进行; $\phi 16$  孔在  $\phi 12$  孔基础上再增加铰孔工序;螺纹孔采用钻孔后攻丝的方法加工。螺纹孔和阶梯孔在钻前都安排打中心孔工序;螺纹孔用钻头倒角。工艺参数见表 6-11。

表 6-11 端盖工艺参数

工序	工序内容	刀具号	刀具规格	$F/\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$a_p/\text{mm}$
1	粗铣 7.2 平面留余量 0.5	T01	$\phi 100$ 端铣刀	70	3.5
2	精铣 7.3 平面至尺寸	T13	$\phi 100$ 端铣刀	50	0.5

工序	工序内容	刀具号	刀具规格	F/mm·min <sup>-1</sup>	a <sub>p</sub> /mm
3	精镗 φ60H7 孔至 φ58	T02	镗刀	60	0.2
4	半精镗 φ60H7 孔至 φ59.95	T03	镗刀	50	0.5
5	精镗 φ60H7 孔至尺寸	T04	精镗刀	40	0.2
6	钻 2—φ12H8 及 2—M16 的中心孔	T05	φ3 中心钻	50	—
7	钻 2—φ12H8 至 φ10	T06	φ10 钻头	60	—
8	扩 2—φ12H8 至 φ1.85	T07	φ11.85 扩孔钻	40	—
9	铰 2—φ16 至尺寸	T08	φ16 阶梯铰刀	30	—
10	铰 2—φ12H8 至尺寸	T09	φ12H8 铰刀	40	—
11	钻 2—M16 底孔至 φ4	T10	φ14 钻头	60	—
12	倒 2—M16 底孔端角	T11	φ18 钻头	40	—
13	攻 2—M16 螺纹	T12	M16 机用丝锥	200	—

将零件安装在弯板夹具上,使定位面至工作台回转中心距离为 185mm。

③切削用量的选择 可根据有关手册查出所需的切削用量(略)。

## (2) 确定工件坐标系

①选 φ60H7 孔为 X、Y 坐标系原点,选距离被加工表面 30mm 处为工件坐标系 Z<sub>0</sub> 点,选距离工件表面 5mm 处为 R 点平面;

②计算刀具轨迹的坐标 本例铣削加工时要计算刀具轨迹坐标;

③按工艺路线和坐标尺寸编制加工程序。

## (3) 加工程序

O0003 端盖加工程序(FANUC 6M 系统)

N1 G92X0Y0Z0 ;	建立工件坐标系
N2G30Y0M06 T01 ;	刀具交换 换成端铣刀
N3 G90G00X0 Y0 ;	快速定位 X、Y 的零点
N4X—135.0 Y45.0 ;	将刀具从零点移出至进刀点
N5 S300 M03 ;	绝对方式 主轴启动、正转
N6 G43 Z—33.5 H01 ;	刀具长度补偿 处于切深处
N7 G01 X75.0 F70 ;	直线插补铣削加工
N8 Y—45.0 ;	
N9 X—135.0 ;	
N10G00G49 Z0M05 ;	取消补偿 主轴停止
N11 G30 Y0M06 T13 ;	刀具交换 换成精铣刀
N12 G00 X0 Y0 ;	
N13 X—135.0 Y45.0 ;	
N14 G43 Z—34.0 H13.535 M03 ;	
N15 G01 X75.0 F50 ;	

N16 Y—45.0 ;	
N17 X—135.0 ;	
N18 G00 G49 Z0 M05 ;	
N19 G30 Y0 M06 T02 ;	刀具交换 换成粗镗刀
N20 G00 X0 Y0 ;	
N21 G43 Z0 H02 S400 M03 ;	
N22G98G81Z—50.0R—25.0 Q0.2P200F40 ;	固定循环 粗镗 $\phi 60H7$ 孔
N23 G00 G49 Z0 M05 ;	
N24G30Y0M06 T03 ;	刀具交换 换半精镗刀
N25 Y0 ;	
N26G43 Z0 H03 S450M03 ;	
N27 G98 G81Z—50.0 R—25.0 F50 ;	固定循环 半精镗 $\phi 60H7$ 孔
N28 G00 G49 Z0 M05 ;	
N29 G30 Y0 M06 T04 ;	刀具交换 换精镗刀
N30 Y0 ;	
N31 G43 Z0H 04 S450 M03 ;	
N32G98G76Z—50.0R—25.0Q0.2P200F40 ;	精镗 $\phi 60H7$ 循环
N33 G00 G49 Z0 M05 ;	
N34 G30 Y0 M06 T05 ;	刀具交换 换中心钻
N35 X0 Y60.0 ;	
N36 G43 Z0 H05 S1000 M03 ;	固定循环 钻中心孔
N37 G98 G81 Z—35.0 R—25.0 F50 ;	
N38 X60.0 Y0 ;	
N39 X0 Y—60.0 ;	
N40 G00 G49 Z0 M05 ;	
N41 G30 Y0 M06 T06 ;	刀具交换 换 $\phi 10$ 钻头
N42 X—60 Y0 ;	
N43 G43 Z0 H06 S600 M03 ;	
N44G99 G81 Z—60.0 R—25.0 F60 ;	钻孔固定循环 镗 $\phi 12H8$ 为 $\phi 10$
N45 X60.0 ;	
N46 G00 G49 Z0 M05 ;	
N47G30Y0 M06 T07 ;	刀具交换 换 $\phi 11.85$ 扩孔钻
N48 X—60 Y0 ;	
N49 G43 Z0 H07 S300 M03 ;	
N50 G99 G81Z—60.0 R—25.0F40 ;	扩孔固定循环
N51 X60.0 ;	

N52 G49 G00 Z0 M05 ;

N53 G30 Y0 M06 T08 ;

刀具交换 换阶梯孔铣刀

N54 X—60 Y0 ;

.....

【例 6-16】 凸轮是典型机械零件之一,由于其轮廓复杂,在普通机床上加工,很难保证加工精度,而使用加工中心加工,既可以保证精度又可以提高效率。图 6-20 所示为心形凸轮零件。材料为 TH200,毛坯加工余量为 5mm。

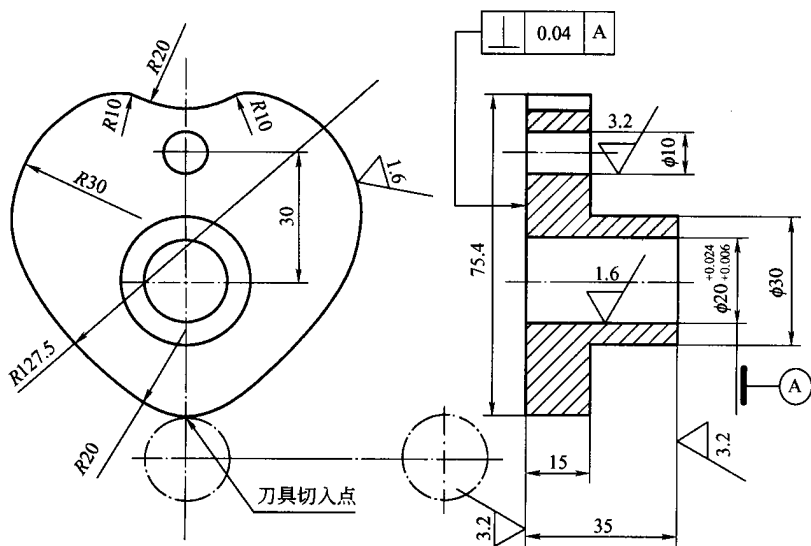


图 6-20 心形凸轮零件

### (1) 工艺分析

在加工中心进行工艺分析时,主要从两个方面考虑:精度、效率。理论上的加工工艺必须达到图纸要求,同时又能充分合理地发挥出机床功能。

① 图纸分析 图纸分析主要包括零件轮廓形状、尺寸精度、技术要求和定位基准等。从零件图可以看出,零件轮廓形状为圆弧过渡。图中尺寸精度和表面粗糙度要求较高的是凸轮外轮廓、安装孔和定位孔,位置精度要求较高的是底面和基准轴线之间的平行度,在加工过程中,这几项在加工过程中应重点保证。

② 确定定位基准 根据在加工中心上加工工件时,工件的定位仍遵守六点定位原则。在选择定位基准时,要全面考虑各个工件加工情况,保证工件定位准确,装卸方便,能迅速完成工件的定位和夹紧,保证各项加工的精度,应尽量选择工件上的设计基准作为定位基准。根据以上原则和图纸分析,加工首先以上面为基准加工底面、安装孔和定位孔,然后,以底面和两孔定位,一次装卡,将所有表面和轮廓全部加工完成,保证了图纸要求的尺寸精度和位置精度。

③ 工件的装夹 根据工艺分析,我们主要加工凸轮轮廓,当加工底面安装孔和定位孔

时采用平口虎钳装夹。平口虎钳装夹工件时,应首先找正虎钳固定钳口,注意工件应安装在钳口中间部位,工件被加工部分要高出钳口,避免刀具与钳口发生干涉,夹紧工件时,注意工件上浮。加工轮廓和其他表面时,用压板、螺栓装夹,此时应避免与被加工表面发生干涉。

④确定编程原点、编程坐标系、对刀位置及对刀方法 根据工艺分析,工件坐标原点 $X_0$ 、 $Y_0$ 设在基准上面的中心, $Z_0$ 点设在上表面。编程原点确定后,编程坐标、对刀位置与工件坐标原点重合,对刀方法可根据机床选择,我们选用手动对刀。

## (2) 确定加工所用各种工艺参数

切削条件的好坏直接影响加工的效率和经济性,这主要取决于编程人员的经验,工件的材料及性质,刀具的材料及形状,机床、刀具、工件的刚性,加工精度、表面质量要求,冷却系统等。具体参数见表6-12、表6-13。

表6-12 凸轮加工工艺卡

北方工业大学 机电中心		加工工序卡		零件名称		零件图号		材料			
01		01		凸轮		P001		HT200			
01		夹具名称		平口钳		夹具编号		使用设备		TH5660A	
工步号	加工内容	刀具号	刀具名称	刀具规格 /mm	补偿号	补偿值 /mm	主轴转速 /r·min <sup>-1</sup>	进给速度 /mm· min <sup>-1</sup>	进给倍率 /%	切削深度 /mm	加工余量 (mm)
1	铣底面	01	立铣刀	φ40	D1		220	44	100	2	4.5
					D2		500	44	100	0.5	0.5
2	钻中心孔	T02	中心钻	φ3	D3		900	80	100	2	8
3	钻孔	T03	麻花钻	φ18	D4		450	45	100	25	22
4	钻孔	T04	麻花钻	φ9.5	D5	5.05	450	45	100	25	16
5	铰孔	T05	铰刀	φ20	D6		30	5	100	25	
6	铰孔	T06	铰刀	φ10	D7		30	5	100	25	
7	铣外轮廓	T07	立铣刀	φ20	D8D9	D10	290	58	100	23	
8	铣上面	T08	立铣刀	φ40	D11		220	44	100	2	4.5
9	倒角	T09	倒角刀	φ20	D12		220	100	100	1	1

注 1. 启动机床回零后,检查机床零点;

2. 正确操作机床,注意安全,文明生产。

表6-13 刀具使用卡

编号	刀具名称	刀具规格	数量	用途	刀具材料
1	立铣刀	φ40mm	2	铣上、下面	合金镶条
2	中心钻	φ3mm	2	孔定位	高速钢(HSS)

编号	刀具名称	刀具规格	数量	用途	刀具材料
3	麻花钻	$\phi 18\text{mm}$	1	钻安装孔	高速钢(HSS)
4	麻花钻	$\phi 89.5\text{mm}$	1	钻定位孔	高速钢(HSS)
5	铰刀	$\phi 20\text{mm}$	1	铰孔	高速钢(HSS)
6	铰刀	$\phi 10\text{mm}$	1	铰孔	高速钢(HSS)
7	立铣刀	$\phi 20\text{mm}$	2	铣外轮廓	合金镶条
8	倒角刀	$\phi 16\text{mm}$	1	倒角	高速钢(HSS)

### (3) 数值计算

根据零件图样,按已确定的加工路线和允许的程序,保证误差,计算出数控系统所需数值。数值计算包括基点与节点的坐标、刀位点轨迹的计算。

由于以上计算工作量比较大,现在主要由计算机来完成。按零件图和工件坐标系,凸轮廓各交点( $X, Y$ )坐标如下。

(0.000, 31.633) (-13.09, -26.820) (-33.825, -4.072) (-40.295, 14.538)  
 (-17.275, 43.715) (-9.966, 42.660) (9.966, 42.660) (17.275, 43.175) (40.295,  
 14.538) (33.825, -4.072) (13.019, -26.820)

### (4) 编写加工程序

下面编写的程序是针对 TH5660A 立式加工中心,机床控制系统为 FAGOR 8055M 型, FAGOR 8055M 的特点是具有高级编程功能,可以很方便地将刀具值  $R$ (刀具半径)、 $L$ (刀具长度)、 $K$ (刀具半径磨损)、 $K$ (刀具长度磨损)在程序的开始时通过变量 TOR、TOL、TOL、TOK 等加载。零件程序简述如下。

P600001 程序名

(TOR1 = 20 ,TOL<sub>1</sub> = 0 ,TOL1 = 25 ,TOK1 = 0);

刀具 1 的尺寸

(TOR2 = 1.5 ,TOL<sub>2</sub> = 0 ,TOL2 = 20 ,TOK2 = 0);

刀具 2 的尺寸

(TOR3 = 9 ,TOL<sub>3</sub> = 0 ,TOL3 = 35 ,TOK3 = 0);

刀具 3 的尺寸

.....

G90 G17 G40 G44 G80 M09 ;

G44 为取消刀具长度补偿

T1 D1 ;

T01 号刀(粗加工底面)

M06 ;

G54 ;

建立工件坐标系

S220 M03 ;

主轴正转

G00 X-50 Y-40 Z20 ;

快速定位

G43 G01 Z5 F44 D1 ;

M08 ;

```
G01 Z—2 F44 ;
X50 Y—40 ;
Y—10 ;
X—50 ;
Y20 ;
X50 ;
Y50 ;
X—50 ;
Y80 ;
X50 ;
M05 M09 ;
G00 Z20
G00 X—50 Y—40
S220 M03 ;
G00 X—50 Y—40 Z20 ;
M08 ;
G01 Z—4.5 ;
    X50 Y—40 ;
        Y—10 ;

        X—50 ;
        20 ;

        X50 ;
        Y50 ;

        X—50 ;

        X50 ;
M05 M09 ;
G44 G00 Z20 ;
G00 Z20 ;
G00 X—50 Y—40 ;
S220 M03 ;
G00 X—50 Y—40 Z20 ;
M08 ;
```

G01 Z—4.5 ;

X50 Y—40 ;

Y—10 ;

X—10 ;

X—50 ;

Y20 ;

X50 ;

Y50 ;

X—50 ;

Y80 ;

X50 ;

M05 M09 ;

G44 G00 Z20

G00 Z20

S500 M03 ; (精加工底面)

G43 G01 Z5 F44 D2 ;

G00 X—50 Y—40 Z20 ;

M08 ;

G01 Z—5 :

X50 Y—40 ;

Y—10 ;

X—50 ;

Y20 ;

X50 ;

Y50 ;

X—50 ;

Y80 ;

X50 ;

M05 M09 ;

G44 G00 Z20 ;

T2 ; T02 号刀(钻孔定位)

M06 ;

G54 ;

S900 M03 ;

G43 G00 Z5 D3 ;

M08 ;



G98G81 X0Y0Z213 F8b ;                    定位并定义固定循环

X0 Y30 ;

G80 ;

G44 G00 Z20 ;

M05 M09 ;

T3 ;                    T03 号刀( 钻安装孔 )

M06 ;

G54 ;

S450 M03 ;

G43 G00 Z30 D4 ;

M08 ;

G98G83X0Y0Z2 138J8F45 ;                    定位并定义固定循环

G80 ;

G44 G00 Z20 ;

M05 M09 ;

T4 ;                    T04 号刀( 钻定位孔 )

M06 ;

G54 ;

S450 M03 ;

G43 G00 Z30 D5 ;

M08 ;

G98 G83 X0 Y30 Z2 I17 J4 F45 ;

G80 ;

G44 G00 Z20 ;

G00 X0 Y0 ;

M05 M09 ;

T5 ;                    T05 号刀( 铰安装孔 )

M06 ;

G54 ;

S30 M03 ;

G43 G00 Z30 D6 ;

M08 ;

G98 G85X0 Y0 Z2 138 F5 ;

G80 ;

G44 ;

M05 M09 ;

T6 ; T06 号刀( 铰定位孔 )

M06 ;

G54 ;

S30 M03 ;

G43 G00 Z30 D7 ;

M08 ;

G98 G85X0 Y30 Z2 I17 F5 ;

G80 ;

G44 G00 Z20 ;

M05 M09 ;

M30 ;

P600002

T7 D8 ; T07 号刀( 粗铣外轮廓 )

M06 ;

G54 ;

S290 M03 ;

G00 X60 Y—50 ;

G43 G00 Z20 D9 ;

M08 ;

G01 Z—40 F44

G41 G01 X60 Y—31.637F44 D8 : 半径补偿

G01 X0Y—31.637 ; 切向入口

G02 X—13.019 Y—26.820 R20 ;

X—33.825 Y—4.072 R127.5 ;

X—17.275 Y43.715 R30 ;

X—9.966 Y42.660 R20 ;

G03 X9.966 Y42.660 R20 ;

G02 X17.275 Y43.715 R10 ;

X33.825 Y—4.072 R30 ;

X—13.019 Y—26.820 R127.5 ;

X0 Y—31.633 R20 ;

G01 X—40 Y—31.633 ;

G40 G01 X—60 Y—50 ;

G44 G00 Z50 ;

G00 X60 Y—50 ;

G43 G00 Z20 D9 ;

G01 Z—40 F44 ;  
G41 G01 X60 Y—31.637 F44 D8 ;  
G01 X0 Y—31.637 ;  
G02 X—13.019 Y—26.820 R20 ;  
    X—33.825 Y—4.072 R127.5 ;  
    X—17.275 Y43.715 R30 ;  
    X—9.966 Y42.660 R20 ;  
G03 X9.966 Y42.660 R20 ;  
G02 X17.275 Y43.715 R10 ;  
    X33.825 Y—4.072 R30 ;  
    X—13.019 Y—26.820 R127.5 ;  
    X0 Y—31.633 R20 ;  
G01 X—40 Y—31.633 ;  
G40 G01 X—60 Y—50 ;  
G44 G00 Z50 ;  
S500M03 ;                   (精铣外轮廓)  
G00 X60 Y—50 ;  
G43 G00 Z20 D10 ;  
G01 Z—40 F44 ;  
G41 G01 X60 Y—31.637 F44 D10 ;  
G01 X0 Y—31.637 ;  
G02 X—13.019 Y—26.820 R20 ;  
    X—33.825 Y—4.072 R127.5 ;  
    X—17.275 Y43.715 R30 ;  
    X—9.966 Y42.660 R20 ;  
G03 X9.966 Y42.660 R20 ;  
G02 X17.275 Y43.715 R10 ;  
    X33.825 Y—4.072 R30 ;  
    X—13.019 Y—26.820 R127.5 ;  
    X0 Y—31.633 R20 ;  
G01 X—40 Y—31.633 ;  
G40 G01 X—60 Y—50 ;  
G44 G00 Z50 ;  
M05 M09 ;  
T8 ;                        T08 号刀(铣上面)  
M06 ;

```
G54 ;  
S220 M03 ;  
G43 G00 Z30 D11 ;  
M08 ;  
G01 X—20 Y0 F44 ;  
      Z—2 ;  
      X20 Y0 ;  
      Z—4.5 ;  
      X—20 Y0 ;  
S500 M03  
G01 Z—5 ;  
      X20 Y0 ;  
G44 G00 Z50 ;  
G00 X0 Y0 ;  
T9 ;           T09 号刀(倒角)  
M06 ;  
G54 ;  
S220 M03 ;  
G43 G00 Z30 D12 ;  
M08 ;  
G01 Z—2 ;  
G44 G00 Z50 ;  
M05 M09 ;     主轴停止  
M30 ;         程序结束
```

## 第七章 电火花线切割加工编程

### 第一节 电火花线切割加工概述

电火花线切割加工(WireCut EDM,简称WEDM)是在电火花加工基础上发展起来的一种新的工艺形式,是用线状电极(铜丝或钼丝)靠火花放电对工件进行切割,故称为电火花线切割,有时简称线切割。

#### 一、电火花线切割的基本原理

电火花线切割加工的基本原理是利用连续移动的细金属丝(铜丝或钼丝)作为工具电极(接高频脉冲电源的负极),对工件(接高频脉冲电源的正极)进行脉冲火花放电、切割成型。

根据电极丝的运行速度,电火花线切割机床通常分为两大类:一类是高速走丝电火花线切割机床(WEDM-HS),这类机床的电极丝作高速往复运动,一般走丝速度为 $8\sim 12\text{m/s}$ ,这是我国生产和使用的主要机种,也是我国独创的电火花线切割加工模式;另一类是低速走丝电火花线切割机床(WEDM-LS),这类机床的电极丝作低速单向运动,一般走丝速度为 $0.2\text{m/s}$ ,这是国外生产和使用的主要机种。

图7-1所示为高速走丝电火花线切割工艺及装置的示意。利用细钼丝4作工具电极进行切割,储丝筒7使钼丝作正反向交替移动,加工能量由脉冲电源3供给。在电极丝和工件之间浇注工作液介质,使加工中的电蚀产物由循环流动的工作液带走。工作台在水平面两个坐标方向各自按预定的控制程序,根据火花间隙状态作伺服进给移动,从而合成各种曲线轨迹,把工件切割成型。

#### 二、电火花线切割的特点

电火花线切割具有电火花加工的共性,金属材料的硬度和韧性并不影响加工速度,常用来加工淬火钢和硬质合金,对于非金属材料的加工,正在展开研究,当前绝大多数的线切割机,都采用数字程序控制,其工艺特点为

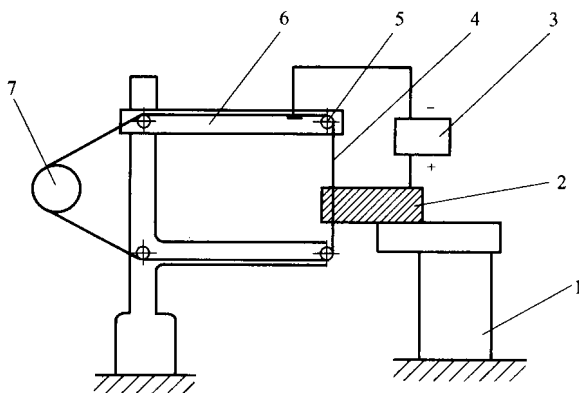


图 7-1 电火花线切割原理

1—绝缘底板 2—工件 3—脉冲电源 4—钼丝；  
5—导向轮 6—支架 7—储丝筒

- ① 不像电火花成型加工那样制造特定形状的工具电极，而是采用直径不等的细金属丝（铜丝或钼丝等）作工具电极，因此切割用的刀具简单，大大减少生产准备工作时间；
- ② 利用计算机辅助制图自动编程软件，可方便地加工复杂形状的直纹表面；
- ③ 电极丝直径较细（ $\phi 0.025 \sim 0.3\text{mm}$ ），切缝很窄，这样不仅有利于材料的利用，而且适合加工微细异型孔和窄缝等细小零件；
- ④ 电极丝在加工中是移动的，不断更新（低速走丝）或往复使用（高速走丝），可以完全或短时间不考虑电极丝损耗对加工精度的影响；
- ⑤ 依靠计算机对电极丝轨迹的控制和偏移轨迹的计算，可方便地调整凹凸模具的配合间隙，依靠锥度切割功能，有可能实现凹凸模一次加工成型；
- ⑥ 对于粗、中、精加工，只需调整电参数即可，操作方便、自动化程度高；
- ⑦ 加工对象主要是平面形状，台阶盲孔型零件还无法进行加工。但是当机床上加上能使电极丝作相应倾斜运动的功能后，可实现锥面加工；
- ⑧ 当零件无法从周边切入时，工件上需钻穿丝孔。

## 第二节 电火花线切割机床的基本结构

电火花线切割机床本体由床身、坐标工作台、走丝机构、线架、工作液箱、附件和夹具等几部分组成。

### (1) 床身部分

床身一般为铸件，是坐标工作台、绕丝机构及线架的支承和固定基础。通常采用箱式结构，应有足够的强度和刚度。床身内部安置电源和工作液箱，考虑电源的发热和工作液泵的振动，有些机床将电源和工作液箱移出床身外另行安放。

## (2) 坐标工作台部分

电火花线切割机床最终都是通过坐标工作台与电极丝的相对运动来完成对零件加工的。为保证机床精度,对导轨的精度、刚度和耐磨性有较高的要求。一般都采用“十”字滑板、滚动导轨和丝杠传动副将电动机的旋转运动变为工作台的直线运动,通过两个坐标方向各自的进给运动,经合成获得各种平面图形曲线轨迹。为保证工作台的定位精度和灵敏度。传动采用滚珠丝杠或精密丝杠螺母副,必须消除间隙。

## (3) 走丝机构

走丝系统使电极丝以一定的速度运动并保持一定的张力。在高速走丝机床上,一定长度的电极丝平整地卷绕在储丝筒上,丝张力与排绕时的拉紧力有关,储丝筒通过联轴节与驱动电动机相连。电动机带动储丝筒由专门的换向装置控制作正反向交替运转,同时沿轴向移动,走丝速度等于储丝筒周边的线速度,通常为 $8 \sim 12\text{m/s}$ 。在运动过程中,电极丝由线架支撑,并依靠导轮保持电极丝与工作台垂直或倾斜一定的几何角度(锥度切割时)。

## (4) 脉冲电源

受加工表面粗糙度和电极丝允许承载电流的限制,线切割加工脉冲电源的脉宽较窄( $2 \sim 60\mu\text{s}$ ),单个脉冲能量、平均电流一般较小,所以线切割加工总是采用正极性加工。脉冲电源的形式很多,如晶体管短形波脉冲电源、高频分组脉冲电源、并联电容型脉冲电源和低损耗电源等。

## (5) 数控装置

控制系统的主要作用是在电火花线切割加工过程中,按加工要求自动控制电极丝相对工件的运动轨迹和进给速度,来实现对工件的形状和尺寸加工。亦即当控制系统使电极丝相对工件按一定轨迹运动时,同时还应实现进给速度的自动控制,以维持正常的稳定切割加工。

电火花线切割机床控制系统的具体功能包括轨迹控制和加工控制。

① 轨迹控制 轨迹控制就是精确控制电极丝相对工件的运动轨迹,以获得所需的形状和尺寸。

电火花线切割机床现在普遍采用微机数控。目前,高速走丝电火花线切割机床的数控系统大多采用较简单的步进电动机开环系统,而低速走丝线切割机床的数控系统则大多是伺服电动机加码盘的半闭环系统,仅在一些少量的超精密线切割机床上采用伺服电动机加磁尺或光栅的全闭环数控系统。

② 加工控制 加工控制指在加工过程中对伺服进给、短路回退、间隙补偿、自适应控制、自动找中心、电源装置、走丝机构、工作液系统等控制功能。

进给控制是根据加工间隙的平均电压或放电状态的变化,通过取样、变频电路,不定期地向计算机发出中断申请,自动调整伺服进给速度,保持某一平均放电间隙,使加工稳定,提高切割速度和加工精度。

短路回退功能用来记忆电极丝经过的路线。发生短路时,改变加工条件并沿原来的

轨迹快速后退,消除短路,防止断丝。

线切割加工数控系统所控制的是电极丝中心移动的轨迹。因此,加工有配合间隙冲模的凸模时,电极丝中心轨迹应向原图形之外偏移进行“间隙补偿”,以补偿放电间隙和电极丝的半径,加工凹模时,电极丝中心轨迹应向图形之内“间隙补偿”。“间隙补偿”也叫“偏移补偿”。

自适应控制在工件厚度变化的场合,改变规准之后,能自动改变预置进给速度或电参数(包括加工电流、脉冲宽度、间隔),不用人工调节就能自动进行高效率、高精度的加工。自动找中心功能使孔中的电极丝自动找正后停止在孔中心处。

#### (6) 数控线切割机床的主要技术参数

数控线切割机床的主要技术参数包括:工作台行程(纵向行程×横向行程)、最大切割厚度、加工表面粗糙度、加工精度、切割速度以及数控系统的控制功能等。表7-1为DK77系列数控电火花线切割机床的主要型号及技术参数。DK7632慢速走丝电火花数控线切割机控制功能及主要参数见表7-2。

表7-1 DK77系列电火花线切割机床的主要型号及技术参数

规格型号	工作台尺寸 /mm	工作台行程 /mm	加工厚度 (可调)/mm	最大切割锥度 (选项)	最大承载 质量/kg	机床外形尺寸 /mm	机床质量 /kg
DK7720	390×280	200×250	200	6°~12°/80mm	200	1200×800×1400	1100
DK7725	394×294	250×320	250	6°~30°/80mm	250	1200×800×1500	1200
DK7732	360×600	320×400	400	6°~30°/80mm	400	1350×1220×1600	1400
DK7740	460×680	400×500	400	6°~30°/80mm	450	1600×1380×1550	1600
DK7750	600×900	500×630	600	6°~30°/80mm	700	1820×1760×1850	2300
DK7763	650×1050	630×800	600	6°~12°/80mm	1000	1850×2200×1850	2800
DK7763B	660×1260	630×1000	1000	6°~12°/80mm	1400	2030×2600×1650	3400
DK7780	1100×1600	800×1200	1000	6°~12°/80mm	2000	2600×2300×2200	5000

表7-2 DK7632慢速走丝电火花数控线切割机控制功能及主要参数

四轴联动,五轴控制	自动对边、定中心,自动回垂直	四轴联动,五轴控制	自动对边、定中心,自动回垂直
最小设定单位: 0.001mm或0.0001in	加工轨迹图形自动跟踪,加工速度、加工时间显示	工作台尺寸(L×W)	745mm×510mm
		工作台行程(X×Y)	500mm×350mm
最小移动单位: 0.001mm	加工参数设计:文件自动调用,人工屏幕修改	主轴行程Z	270mm
		辅助工作台行程(U×V)	70mm×70mm
代码方式:ISO代码	短路处理:自动回退		



四轴联动,五轴控制	自动对边、定中心、自动回垂直	四轴联动,五轴控制	自动对边、定中心、自动回垂直
指令方式(相对即增量方式、绝对方式)	断丝处理:多种断丝回归方式	最大工件尺寸	745mm × 510mm × 260mm
		电极丝直径范围	φ0.15 ~ 0.30mm
指令方式:公制、英制	加工中断:人工中断加工后可恢复加工	电极丝运行速度	1.8 ~ 1.2m · min <sup>-1</sup>
		最大加工电流	25A
反向间隙补偿:X、Y、U、Y、Z轴 ρ ~ 10 <sub>μ</sub> m	代码 G 代码、M 代码、T 代码	最大切割斜度	± 15°/100mm
		最大切割速度	≥ 210mm · min <sup>-1</sup>
螺距补偿:X、Y 二轴	输入电压三相 380V( + 10%、-15% )50 ± 1Hz	最佳加工表面粗糙度	R <sub>a</sub> ≤ 0.8 <sub>μ</sub> m
绝对零:X、Y、二轴	电源容量 18kVA	加工方式	喷流加工
线径补偿:0 ~ 0.999mm	控制机外形尺寸 650 × 1410 × 1932mm	机床外形尺寸(长 × 宽 × 高)	1520mm × 1575mm × 2150mm
加工程序调用方式 适用文件方式	控制机重 660kg	机床重量	2700kg

实际上,由于历史的原因和目前国内生产厂家包括合资、外资企业,还有引进的外国设备等,线切割机床的型号、命名、规格很不统一,在选用时一定要参考机床使用说明书。

### 第三节 电火花线切割的工艺与工装

电火花线切割加工,一般作为工件加工中最后工序。要达到加工零件的加工要求,应合理控制线切割加工的各种工艺因素,同时选择合适工装。

#### (1) 工艺分析

首先对零件图进行分析以明确加工要求。其次是确定工艺基准,采用什么方法定位。在确定工艺基准时,除了遵循基准选择原则外,还应从数控电火花线切割加工的特点出发,选择某些工艺基准作为电极丝的定位基准,用来将电极丝调整到相对于工件的正确位置。对于以底平面作主要定位基准的工件,当其上具有相互垂直而又同时垂直于底平面的相邻侧面时,应选择这两个侧面作为电极丝的定位基准。

#### (2) 切割路线的确定

在加工中,工件内部残余应力的相对平衡受到破坏后,会引起工件的变形,所以在选择切割路线时,需注意以下方面。

① 应将工件与其夹持部分分割的部分安排在切割路线的末端。如图 7-2 所示,图 7-2(a)为先切割靠近夹持的部分,使主要连接部位被割离,余下材料与夹持部分连接较

少,工件刚性下降,易变形而影响加工精度。图 7-2(b)所示切割路线才是正确的。

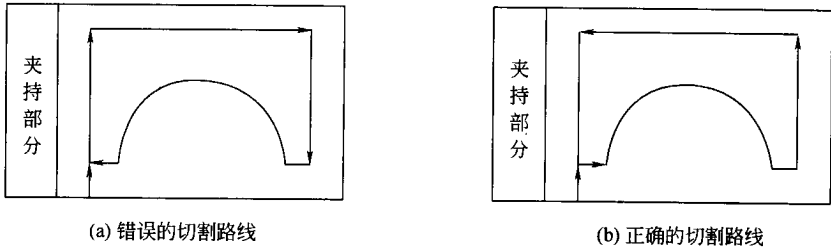


图 7-2 切割路线的选择 1

②切割路线应从坯件预制的穿丝孔开始,由外向内顺序切割。如图 7-3 所示,图 7-3(a)采用从工件端面开始由内向外切割的方案,变形最大,不可取。图 7-3(b)也是采用从工件端面开始切割,但路线由外向内,比图 7-3(a)方案安排合理些,但仍有变形。图 7-3(c)切割起点取在坯件预制的穿丝孔中,且由外向内,变形最小,是最好的方案。

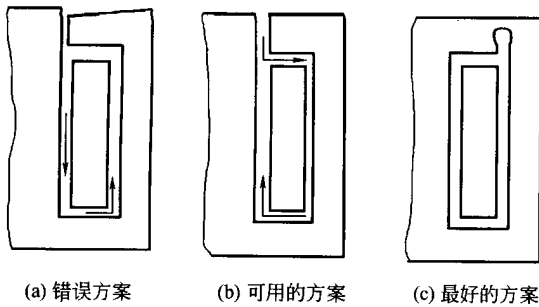


图 7-3 切割路线的选择 2

③两次切割法。切割孔类零件,为减少变形,采用两次切割,如图 7-4 所示,第一次粗加工型孔,周边留 0.1~0.5mm 余量,以补偿材料原来的应力平衡状态受到的破坏,第二次切割为精加工,这样可以达到较满意的效果。

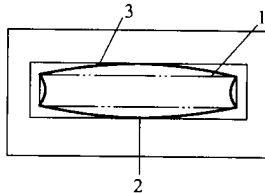


图 7-4 切割路线的选择 3

1—第一次切割路线 2—第一次切割后的图形 3—第二次切割的图形

④在一块毛坯上要切出两个以上零件时,不应连续一次切割出来,而应从该毛坯的不同预制穿丝孔开始加工。如图 7-5 所示。

⑤加工的路线,距离端面(侧面)应大于 5mm。

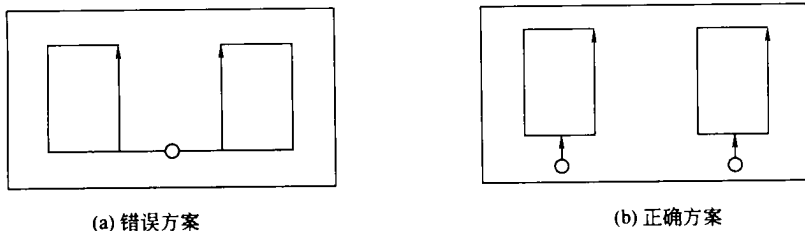


图 7-5 切割路线的选择 4

### (3) 电极丝初始位置的确定

线切割加工前,应将电极丝调整到切割的起始位置上,有时需要加工穿丝孔。穿丝孔位置的确定原则如下。

①当切割凸模需要设置穿丝孔时,其位置可选在加工轨迹的拐角附近,以简化编程。

②切割凹模等零件的内表面时,将穿丝孔设置在工件对称中心上,对编程计算和电极丝定位都较方便。但切入行程较长,不适合大型工件,此时应将穿丝孔设置在靠近加工轨迹边角处或选在已知坐标点上。

③在一块毛坯上要切出两个以上零件或在加工大型工件时,应沿加工轨迹设置多个穿丝孔,以便发生断丝时能就近穿丝,切入断丝点。

### (4) 加工条件的选择

数控电火花线切割的加工条件随工件材质、板厚、丝电极和加工要求的不同而不同。按照加工要求,使这些条件设定在稳定加工、不产生短路、不断丝的情况下,以获得较高的切割速度。

①电参数的选择 线切割加工一般采用晶体管高频脉冲电源,用单个脉冲能量小、脉宽窄、频率高的电参数进行正极性加工。可改变的电参数主要有脉冲宽度、电流峰值、脉冲间隔、空载电压、放电电流等。要获得较好的表面粗糙度时,所选用的电参数要小;若要求获得较高的切割速度,脉冲参数要大些,但加工电流的增大受到电极丝截面的限制,过大的电流将引起断丝,加工大厚度工件时,为了帮助排屑和工作液进入加工区,宜选用较高的脉冲电压、较大的脉宽和电流峰值,以增大放电间隙。快速走丝线切割加工电参数的选择见表 7-3。

表 7-3 快速走丝线切割加工电参数的选择

应用	脉冲宽度 $t_f/\mu\text{s}$	电流峰值 $I_e/\text{A}$	脉冲间隔 $t_0/\mu\text{s}$	空载电压/V
快速切割或加工大厚度工件 $R_a > 2.5\mu\text{m}$	20 ~ 40	大于 12	为实现稳定加工,一般选择 $t_0/t_f$ 为 3 ~ 4 以上	一般为 70 ~ 90
半精加工 $R_a = 1.25 \sim 2.5\mu\text{m}$	6 ~ 20	6 ~ 12		
精加工 $R_a < 2.5\mu\text{m}$	2 ~ 6	4.8 以下		

②工作液的选配 工作液对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有较大影响。电火花线切割所使用的工作液,在慢速走丝切割机床上大多采用去离子水(纯水),其导电率控制在  $10^4 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ ;只有在特殊情况下才采用绝缘性能较好的煤油;高速走丝时常用专用乳化液。常用工作液主要有乳化液和去离子水。

③电极丝选择 电极丝应具有良好的导电性和抗电蚀性,抗拉强度高,材质均匀。常用电极丝有钼丝、钨丝、黄铜丝等。黄铜丝直径在  $\phi 0.1 \sim 0.3 \text{mm}$  范围内,一般用于慢速导向走丝加工。快速走丝机床大都选用钼丝作电极丝,直径在  $\phi 0.08 \sim 0.2 \text{mm}$  范围内。

电极丝直径的选择应根据切缝宽窄、工件厚度和拐角尺寸大小来选择。若加工带尖角、窄缝的小型零件宜选用较细的电极丝;若加工大厚度的工件或大电流切割时应选较粗的电极丝。

④工件装夹及常用夹具 常用的工件装夹方式有如下方式。

- 悬臂支撑方式装夹。如图 7-6 所示,这种装夹方式通用性强、装夹方便。但由于一端悬伸,易出现切割表面与工件上下平面间垂直度误差,用于工件加工要求不高或悬臂较短的情况。

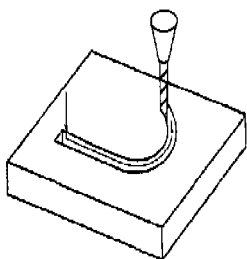


图 7-6 悬臂方式装夹工件

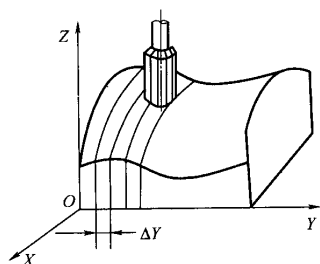


图 7-7 两端支撑方式装夹工件

- 两端支撑装夹。如图 7-7 所示,这种方式装夹方便、稳定、定位精度高,但不适用于装夹较小的零件。

- 桥式支撑装夹。如图 7-8 所示,这种支撑装夹方式是在双端夹具体下垫上两个支撑垫铁,其特点是通用性强、装夹方便,对大、中、小工件装夹都比较方便。

- 板式支撑装夹。如图 7-9 所示,根据常用的工件形状和尺寸采用有通孔的支撑板装夹工件。这种方式精度高,但通用性差。

- 复式支撑方式装夹。它是在桥式夹具上装上专用夹具组合而成,装夹方便,适用于成批零件加工。

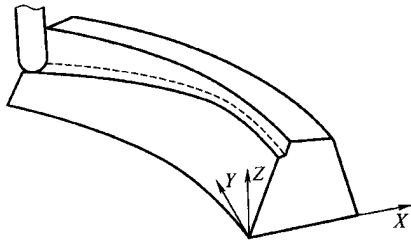


图 7-8 桥式支撑方式装夹

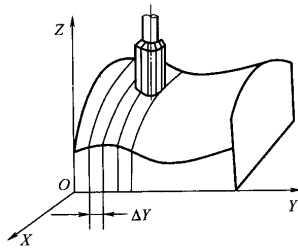


图 7-9 板式支撑方式装夹

## 第四节 电火花线切割编程方法

数控线切割编程方法分手工编程和自动编程。线切割程序格式有 3B、4B、5B、ISO 和 EIA 等,使用最多的是 3B 格式,慢走丝多采用 4B 格式,目前也有许多系统直接采用 ISO 代码格式。本节将主要介绍 3B、4B 和 ISO 格式的编程方法。

### 一、3B 代码编程

3B 代码编程格式是数控电火花线切割机床上最常用的程序格式,在该程序格式中无间隙补偿,但可通过机床的数控装置或一些自动编程软件自动实现间隙补偿。

#### (1) 3B 代码编程介绍

3B 代码编程的格式如下

$$B X B Y B J G Z$$

其中  $B$  ——间隔符,它的作用是将  $X$ 、 $Y$ 、 $J$  数码区分开来;

$X$ 、 $Y$  ——表示增量(相对)坐标值;

$J$  ——表示加工线段的计数长度;

$G$  ——表示加工线段计数方向;

$Z$  ——表示加工指令。

例如 :B1000 B2000 B2000 GY L2。

整个程序的最后 ,应有停机符“ MJ ”,表示程序结束(加工完毕)。

①坐标系与坐标值  $X$ 、 $Y$  的确定 平面坐标系是这样规定的 :面对机床操作台 ,工作台平面为坐标系平面 ,左右方向为  $X$  轴 ,且右方向为正 ;前后方向为  $Y$  轴 ,前方为正。编程时 ,采用相对坐标系 ,即坐标系的原点随程序段的不同而变化。加工直线时 ,以该直线的起点为坐标系的原点 , $X$ 、 $Y$  取该直线终点的坐标值 ;加工圆弧时 ,以该圆弧的圆心为坐标系的原点 , $X$ 、 $Y$  为该圆弧起点的坐标值 ,单位为  $\mu\text{m}$ 。坐标值的负号不写。

②计数方向  $G$  的确定 不管是加工直线还是圆弧 ,计数方向均按终点的位置来确定。加工直线时 ,终点靠近何轴 ,则计数方向取该轴 ;加工与坐标轴成  $45^\circ$  角的线段时 ,计数方向取  $X$  轴、 $Y$  轴均可 ,记作 :GX 或 GY (如图 7-10(a)所示) ;加工圆弧时 ,终点靠近何轴 ,则计数方向取另一轴 ;加工圆弧的终点与坐标轴成  $45^\circ$  时 ,计数方向取  $X$  轴、 $Y$  轴均可 ,记作 :GX 或 GY (如图 7-10(b)所示)。

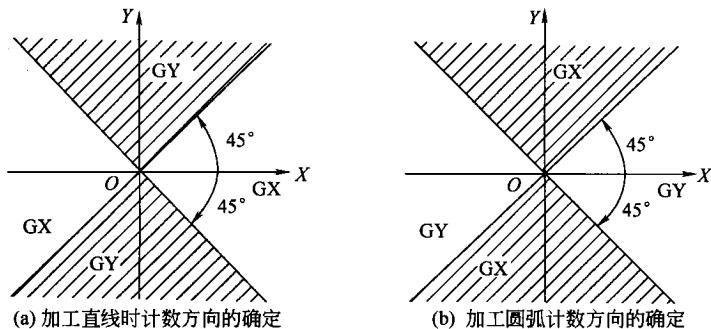


图 7-10 计数方向的确定

③计数长度  $J$  的确定 计数长度是在计数方向的基础上确定的。计数长度是指被加工的直线或圆弧在计数方向坐标轴上投影的绝对值总和 ,其单位为  $\mu\text{m}$ 。

例如 :在图 7-11 中 ,加工直线  $OA$  时计数方向为  $X$  轴 ,计数长度为  $OB$  ,数值等于  $A$  点的  $X$  坐标值 ;在图 7-12 中 ,加工半径为  $500\mu\text{m}$  的圆弧  $\widehat{MN}$  时 ,计数方向为  $X$  轴 ,计数长度为  $500\mu\text{m} \times 3 = 1500\mu\text{m}$  ,即  $\widehat{MN}$  中三段  $90^\circ$  圆弧在  $X$  轴上投影的绝对值总和。

④加工指令  $Z$  的确定 加工直线时有四种加工指令 :L1、L2、L3、L4。如图 7-13(a)所示 ,当直线在第 I 象限(包括  $X$  轴而不包括  $Y$  轴)时 ,加工指令记作 L1 ;当处于第 II 象限(包括  $Y$  轴而不包括  $X$  轴)时 ,记作 L2 ;L3、L4 依此类推。

加工顺时针圆弧时有四种加工指令 :SR1、SR2、SR3、SR4。如图 7-13(b)所示 ,当圆弧的起点在第 I 象限(包括  $Y$  轴而不包括  $X$  轴)时 ,加工指令记作 SR1 ,当起点在第 II 象限(包括  $X$  轴而不包括  $Y$  轴)时 ,记作 SR2 ;SR3、SR4 依此类推。

加工逆时针圆弧时有四种加工指令 :NR1、NR2、NR3、NR4。如图 7-13(b)所示 ,当圆弧的起点在第 I 象限(包括  $X$  轴而不包括  $Y$  轴)时 ,加工指令记作 NR1 ,当起点在

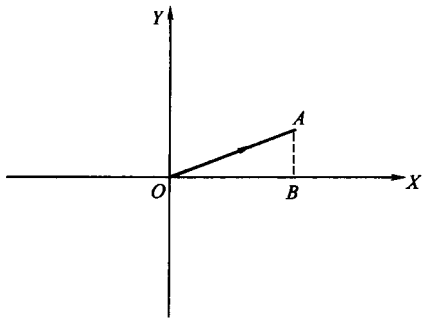


图 7-11 加工直线时计数长度的确定

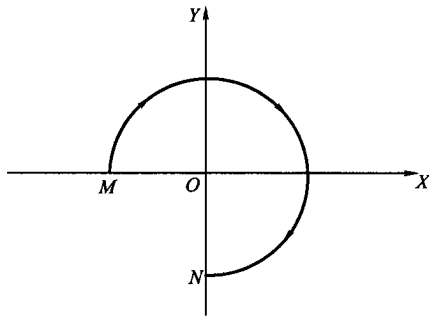


图 7-12 加工圆弧时计数长度的确定

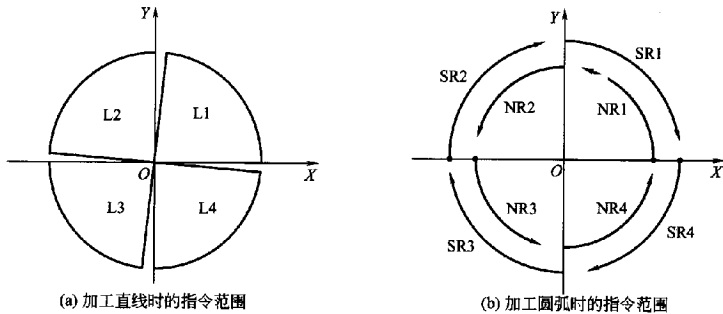


图 7-13 加工指令的确定范围

第 II 象限(包括 Y 轴而不包括 X 轴)时,记作 NR2 ;NR3、NR4 依此类推。

(2) 编程实例

按 3B 格式编写如图 7-14 所示的图形轮廓的线切割加工程序。

- ① 确定加工路线 起始点为 A ,加工路线按顺时针方向进行。
- ② 分别计算各段曲线的坐标值。
- ③ 按“ 3B ”格式编写程序单 程序如下。

Example .3b                    扩展名为 .3B 的文件名

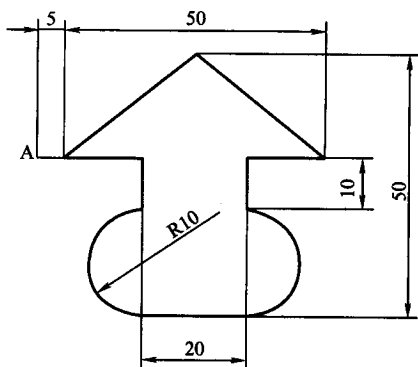


图 7-14 编程图形轮廓示例

B5000	B0	B5000	GX	L1
B25000	B20000	B25000	GX	L1
B25000	B20000	B25000	GX	L4
B15000	B0	B15000	GX	L3
B0	B10000	B10000	GY	L4
B0	B10000	B20000	GX	SR1
B20000	B0	B20000	GX	L3
B0	B10000	B20000	GX	SR3
B0	B10000	B10000	GY	L2
B15000	B0	B15000	GX	L3
B5000	B0	B5000	GX	L3
MJ				结束语句

### (3) 间隙补偿问题

在实际加工中,电火花线切割数控机床是通过控制电极丝的中心轨迹来加工的,图 7-15 中电极丝中心轨迹用虚线表示。在数控线切割机床上,电极丝的中心轨迹和图纸上工件轮廓之间差别的补偿就叫间隙补偿。

由于加工中程序的执行是以电极丝中心轨迹来计算的,而电极丝的中心轨迹不能与零件的实际轮廓线重合(见图 7-15)。要加工出符合图纸要求的零件,必须计算出电极丝中心轨迹的交点和切点坐标,按电极丝中心轨迹(图 7-15 中虚线轨迹)编程。电极丝中心轨迹与零件轮廓相距一个  $f$  值, $f$  值称为间隙补偿值。计算公式如下

$$f = d/2 + s$$

式中  $f$ ——偏移补偿值,mm;

$d$ ——电极丝直径,mm;

$s$ ——单边放电间隙(0.01mm)。



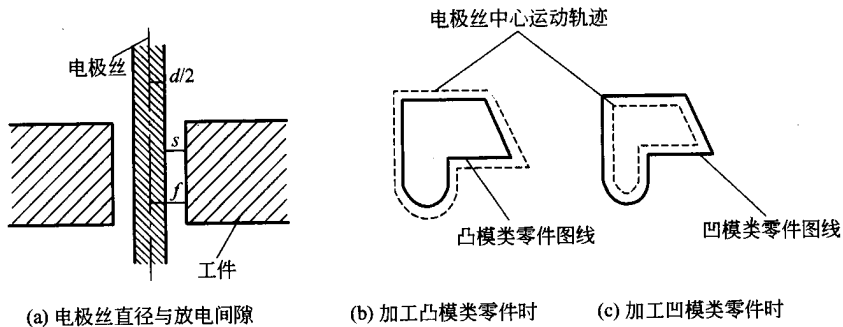


图 7-15 电极丝切割运动轨迹与图纸的关系

加工凸模时,电极丝中心轨迹应在所加工图形的外面, $f$ 取正值;加工凹模时,电极丝中心轨迹应在图形的里面, $f$ 取负值。所加工工件图形与电极丝中心轨迹间的距离,在圆弧的半径方向和线段垂直方向都等于间隙补偿值 $f$ 。

在加工冲压模或落料模的凸、凹模时,除考虑间隙补偿值 $f$ 外,还要考虑凸模与凹模的配合间隙,当加工冲孔模具时,配合间隙要在凹模上扣除,在加工落料模具时,配合间隙要在凸模上扣除。

## 二、4B 代码编程

### (1) 4B 代码编程介绍

4B 代码的编程格式如下:

B X B Y B J B R G D Z

4B 程序格式是有间隙补偿的程序,与 3B 格式相比,4B 格式增加了 R 和 D (或 DD) 两项功能。

① 圆弧半径 R R 通常为圆形尺寸已知的圆弧半径,因 4B 格式不能处理尖角的自动间隙补偿,若加工图形出现尖角时,取圆弧半径 R 大于间隙补偿量 $f$ 的圆弧过渡。

② 曲线形式 D 或 DD D 表示凸圆弧,DD 表示凹圆弧。加工外表面时,当调整补偿间隙后使圆弧半径增大的称为凸圆弧,用 D 表示;反之使圆弧半径减少的称为凹圆弧,用 DD 表示。加工内表面时,调整补偿间隙后使圆弧半径增大的称为凹圆弧,用 DD 表示;反之为凸圆弧,用 D 表示。由此可以看出,用 4B 代码编写加工相互配合的凸、凹模程序时,只要适当改变引入、引出程序段(加工凸、凹模的起始点对称)和补偿间隙,其他程序段是相同的。

③ 间隙补偿量的算法 当加工冲孔模具时(及冲后要求工件保证孔的尺寸),凸模的尺寸由孔的尺寸确定,因此,凸模的间隙补偿量 $f_{\text{凸}} = d/2 + s$ ,凹模的间隙补偿量 $f_{\text{凹}} = d/2 + s - \delta$ , $\delta$ 表示凸、凹模的配合间隙。当加工落料模时(即冲后保证冲下的工件尺寸),故 $f_{\text{凸}} : d/2 + s - \delta$ ,凹模的间隙补偿量 $f_{\text{凹}} : d/2 + s$ 。

④间隙补偿程序的引入、引出程序段 利用间隙补偿功能,可以用特殊的编程方式来编制不加过渡圆弧的引入、引出程序段。若图形的第一道加工程序加工的是斜线,引入程序段指定的引入线段必须与该斜线垂直。若是圆弧,引入程序段指定的引入线段应沿圆弧的径向进行(见图 7-16 的引入线段  $O_1A$ )。数控装置将引入、引出程序段的计数长度/修改为  $J-f$ ,这样就能方便地实现引入、引出程序段沿规定方向增加或减少  $f$  进行自动补偿。编程时,在引入、引出程序段中可以不考虑偏移量(间隙补偿量  $f$ )。

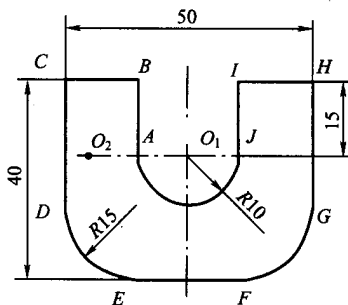


图 7-16 凸模的平均尺寸

(2) 编程举例

图 7-16 所示为凸模设计图,图中的所有尺寸都为名义尺寸,现要求凹模按凸模配作,保证双边配合间隙  $Z = 0.04\text{mm}$ ,试编制凸模和凹模的电火花线切割加工程序(电极丝为  $\phi 0.12$  的钼丝,单边放电间隙为  $0.01\text{mm}$ )。

①编制凸模加工程序 建立坐标系并计算出尺寸后,选取穿丝孔为  $O_1$  点,加工顺序为

$$O_1 \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow O_1$$

确定间隙补偿量:

$$f_{\text{凸}} = (0.12/2 + 0.01) = 0.07\text{mm}$$

加工前将间隙补偿量输入数控装置。图形上  $B$ 、 $C$ 、 $H$ 、 $J$  各点处需加过渡圆弧,其半径应大于间隙补偿量(取  $r = 0.10\text{mm}$ )。

凸模加工程序单见表 7-4。

表 7-4 凸模加工程序单(4B 程序格式)

序号	B	X	B	Y	B	J	B	R	G	I(DD)	Z	备注
1	B		B		B	10000	B		GX		L3	引入程序段
2	B		B		B	14900	B		GY		L2	
3	B	100	B		B	100	B	100	GX	D	NR1	过渡圆弧
4	B		B		B	14800	B		GX		L3	
5	B		B	100	B	100	B	100	GY	D	NR2	过渡圆弧

序号	B	X	B	Y	B	J	B	R	G	I(DD)	Z	备注
6	B		B		B	24900	B		GY		L4	
7	B	15000	B		B	15000	B	15000	CX	D	NR3	
8	B		B		B	20000	B		GX		L1	
9	B		B	15000	B	15000	B	15000	GY	D	NR4	
10	B		B		B	24900	B		GY		L2	
11	B	100	B		B	100	B	100	GX	D	NR1	过渡圆弧
12	B		B		B	14800	B		GX		L3	
13	B		B	100	B	100	B	100	GY	D	NR2	过渡圆弧
14	B		B		B	14900	B		GY		L4	
15	B	10000	B		B	20000	B	10000	GY	DD	SR4	
16	B		B		B	10000	B		GX		L1	引出程序段

②编制凹模加工程序 因 4B 程序格式有间隙补偿,所以凹模加工程序只需修改引入、引出程序段(引入点选在 Q 点)其他程序段与凸模加工程序相同。

加工凹模时的间隙补偿量为

$$f_{\text{凹}} = (0.12/2 + 0.01 - 0.04/2) = 0.05\text{mm}$$

### 三、ISO 代码数控程序编制

在我国电火花线切割加工的编程中,目前广泛使用的是 3B、4B 程序格式,为了便于加强交流,按照国际统一规范——ISO 代码进行自动编程是今后数控加工的必然趋势。

#### (1) 程序段格式

程序段是由若干个程序字组成的,其格式如下。

N \_ G \_ X \_ Y \_

字是组成程序段的基本单元,一般都是由一个英文字母加若干位 10 进制数字组成的(如 :X8000),这个英文字母成为地址字符。不同的地址字符表示的功能也不一样(见表 7-5)。

表 7-5 地址字符

功能	地址	意义	功能	地址	意义
顺序号	N	程序段号	锥度参数字	W、H、S	锥度参数指令
准备功能	G	指令动作方式	进给速度	F	进给速度指令
尺寸字	X、Y、Z	坐标轴移动指令	刀具速度	T	刀具编号指令(切削加工)
	A、B、C、U、V	附加轴移动指令	辅助功能	M	机床开/关及程序调用指令
	I、J、K	圆弧中心坐标	补偿字	D	间隙及电极丝补偿指令

①顺序号 位于程序段之首,表示程序的序号,后续数字 2—4 位。如 N03、N0010。

②准备功能 G 准备功能 G(以下简称 G 功能)是建立机床或控制系统工作方式的一种指令,其后续有两位正整数,即 G00 ~ G99。

③尺寸字 尺寸字在程序段中主要是用来指定电极丝运动到达的坐标位置。电火花线切割加工常用的尺寸字有 X、Y、U、V、A、I、J 等。尺寸字的后续数字在要求代数符号时应加正负号,单位为  $\mu\text{m}$ 。

④辅助功能 M 由 M 功能指令即后续的两位数组成,即 M00 ~ M99,用来指令机床辅助装置的接通或断开。

## (2) 程序格式

一个完整的加工程序是由程序名、程序的主体(若干程序段)、程序结束指令组成,如:

P10

N01 G92 X0 Y0

N02 G01 X5000 Y5000

N03 G01 X2500 Y5000

N04 G01 X2500 Y2500

N05 G01 X0 Y0

N06 M02

①程序名 由文件名和扩展名组成。程序的文件名可以用字母和数字表示,最多可用 8 个字符,如 P10,但文件名不能重复。扩展名最多用 3 个字母表示,如 P10.CUT。

②程序的主体 程序的主体由若干程序段组成,如上面加工程序中 N01 ~ N05 段。在程序的主体中又分为主程序和子程序。将一段重复出现的、单独组成的程序称为子程序。子程序取出命名后单独储存,即可重复调用。子程序常应用在某个工件上有几个相同型面的加工中。调用子程序所用的程序,称为主程序。

③程序结束指令 M02 M02 指令安排在程序的最后,单列一段。当数控系统执行到 M02 程序段时,就会自动停止进给并使数控系统复位。

## (3) ISO 代码及其编程

电火花线切割数控机床常用的 ISO 代码见表 7-6。

表 7-6 电火花线切割数控机床常用 ISO 代码

代码	功 能	代码	功 能	代码	功 能
G00	快速定位	G40	取消间隙补偿	G82	半程移动
G01	直线插补	G41	左偏间隙补偿	G84	微弱放电找正
G02	顺圆插补	G42	右偏间隙补偿	G90	绝对尺寸
G03	逆圆插补	G50	消除锥度	G91	增量尺寸

代码	功 能	代码	功 能	代码	功 能
G05	X 轴镜像	G51	锥度左偏	G92	定起点
G06	Y 轴镜像	G52	锥度右偏	M00	程序暂停
G07	X、Y 轴交换	G54	加工坐标系 1	M02	程序结束
G08	X 轴镜像 ,Y 轴镜像	G55	加工坐标系 2	M05	接触感知解除
G09	X 轴镜像 ,X、Y 轴交换	G56	加工坐标系 3	M96	主程序调用文件程序
G10	Y 轴镜像 ,X、Y 轴交换	G57	加工坐标系 4	M97	主程序调用文件结束
G11	Y 轴镜像 ,X 轴镜像 ,X、Y 轴交换	G58	加工坐标系 5	W	下导轮到工作台面高度
		G59	加工坐标系 6	H	工件厚度
G12	消除镜像	G80	接触感知	S	工作台面到上导轮高度

①快速定位指令 G00 在机床不加工情况下 ,G00 指令可使指定的某轴以最快速度移动到指定位置 ,其程序段格式为

G00 X\_\_Y\_\_

例如 ,图 7-17 中快速定位到线段终点的程序段格式为

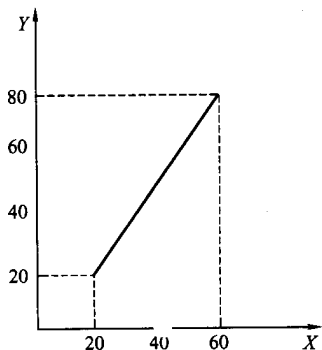


图 7-17 快速定位

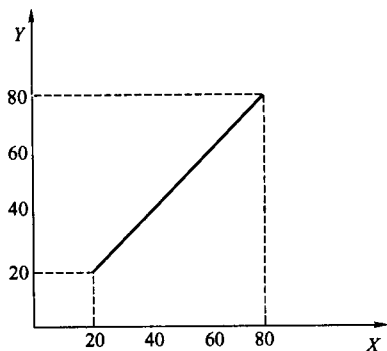


图 7-18 直线插补

G00 X60000 Y80000

注意 :如果程序段中有了 G01 或 G02 指令 ,则 G00 指令无效。

②直线插补指令 G01 该指令可使机床在各个坐标平面内加工任意斜率的直线轮廓和用直线段逼近的曲线轮廓 ,其程序段格式为

G01 X\_\_Y\_\_

例如 ,图 7-18 中直线插补的程序段格式为

G92 X20000 Y20000

G01 X80000 Y60000

目前,可加工锥度的电火花线切割数控机床具有 X、Y 坐标轴及 U、V 附加轴工作台,其程序段格式为

G01 X\_\_Y\_\_U\_\_V\_\_

③圆弧插补指令 G02/G03 G02 为顺时针插补圆弧指令, G03 为逆时针插补圆弧指令。

用圆弧插补指令编写的程序段格式为

G02 X\_\_Y\_\_I\_\_J\_\_

G03 X\_\_Y\_\_I\_\_J\_\_

程序段中 X、Y 分别表示圆弧终点坐标; I、J 分别表示圆心相对圆弧起点的在 X、Y 方向的增量尺寸。

例如,图 7-19 中圆弧插补的程序段格式为

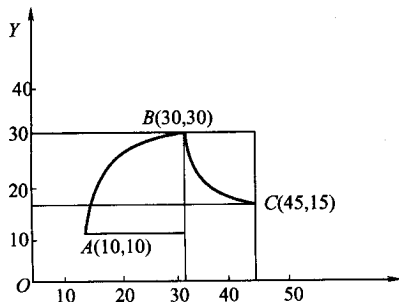


图 7-19 快速定位

G92 X10000 Y10000 起切点 A

G02 X30000 Y30000 I20000 J20000 AB 段圆弧

G03 X45000 Y15000 I15000 J-15000 BC 段圆弧

④指令 G90、G91、G92 G90 为绝对尺寸指令。表示该程序中的编程尺寸是按绝对尺寸给定的,即移动指令终点坐标值 X、Y 都是以工件坐标系原点(程序的零点)为基准来计算的。

G91 为增量尺寸指令。该指令表示程序段中的编程尺寸是按增量尺寸给定的,即坐标值均以前一个坐标位置作为起点来计算下一点的位置值。上述的 3B、4B 程序格式均按此方法计算坐标点,

G92 为定起点坐标指令。G92 指令中的坐标值为加工程序的起点的坐标值(如图 7-20 中的 A 点),其程序段格式为

G92 X\_\_Y\_\_

例如,加工图 7-20 中的零件,按图样尺寸编程

用 G90 指令编程

A1

程序名

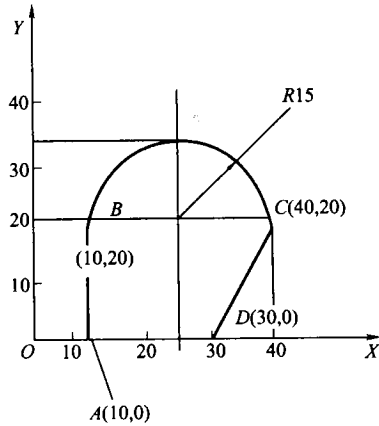


图 7-20 圆弧插补

N01	G92	X0	Y0	确定加工程序 起点 O 点
N02	G01	X10000	Y0	;O→A
N03	G01	X10000	Y20000	;A→B
N04	G02	X40000	Y20000	;B→C
N05	G01	X30000	Y0	;C→D
N06	G01	X0	Y0	;D→O
N07	M02			程序结束

用 G91 指令编程：

				程序名
A2				
N01	G92	X0	Y0	
N02	G91			;以下为增量尺寸编程
N03	G01	X10000	Y0	
N04	G02	X0	Y20000	
N05	G01	X30000	Y0	115000 J0
N06	G01	X-10000	Y-20000	
N07	G01	X-30000	Y0	
N08	M02			

### ⑤ 镜像及交换指令 G05、G06、G07、G08、G10、G11、G12

G05 为 X 轴镜像 函数关系式： $X = -X$

G06 为 Y 轴镜像 函数关系式： $Y = -Y$

在图 7-21 中，直线  $OA$  对  $X$  轴镜像为  $OA''$ ，对  $Y$  轴镜像为  $OA'$ 。在加工模具零件时，常遇到所加工零件的图形实对称的（如多孔凹模）。例如，编制图 7-22 中的  $ABC$  和  $A'B'C'$  的加工程序时，可以先编制其中一个，然后通过镜像交换指令即可加工。

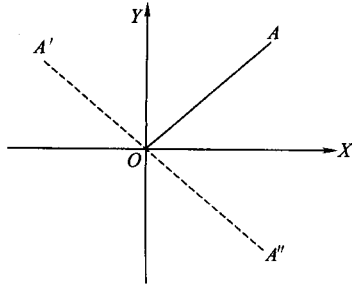


图 7-21 X 轴、Y 轴镜像

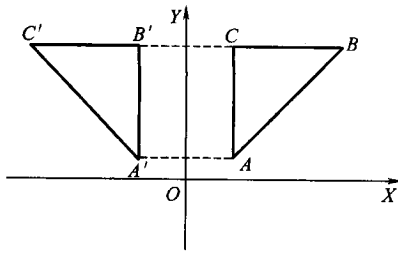


图 7-22 G05 指令

G12 位消除镜像指令。凡有镜像交换指令的程序,都需用 G12 作为该程序的消除指令。其他镜像及其交换指令功能见表 7-5。

⑥ 间隙补偿指令 G40、G41、G42

G41 为左偏补偿指令,其程序段格式为

G41 D\_\_

G42 为右偏补偿指令,其程序段格式为

G42 D\_\_

程序段中的 D 表示间隙补偿量,其计算方法与前面的方法相同。

注意:左偏、右偏是沿加工方向看,电极丝在加工图形左边为左偏,电极丝在右边为右偏,如图 7-23 所示。

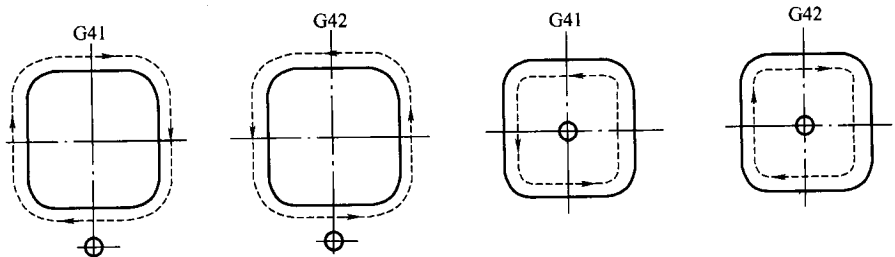


图 7-23 间隙补偿指令



⑦ 锥度加工指令 G50、G51、G52 在目前的一些电火花线切割数控机床上,锥度加工都是通过装在上导轮部位的  $U$ 、 $V$  附加轴工作台实现的。加工时,控制系统驱动  $U$ 、 $V$  附加轴工作台,使上导轮相对于  $X$ 、 $Y$  坐标轴工作台移动,以获得所要求的锥角。用此方法可以解决凹模的漏料问题。

G51 为锥度左偏指令,即沿走丝方向看,电极丝向左偏离。顺时针加工,锥度左偏加工的工件为上大下小;逆时针加工,左偏时工件上小下大。锥度左偏指令的程序段格式为

G51 A \_\_\_

G52 锥度右偏指令,用该指令顺时针加工,工件为上小下大;逆时针加工,工件上大下小。锥度右偏指令的程序段格式为

G52 A \_\_\_

程序段中:A 表示锥度值;G50 为取消锥度指令。

例如,图 7-24 中的凹模锥度加工指令的程序段格式为“G51 A0.5”。加工前还需输入工件及工件台参数指令 W、H、S 功能见表 7-6。

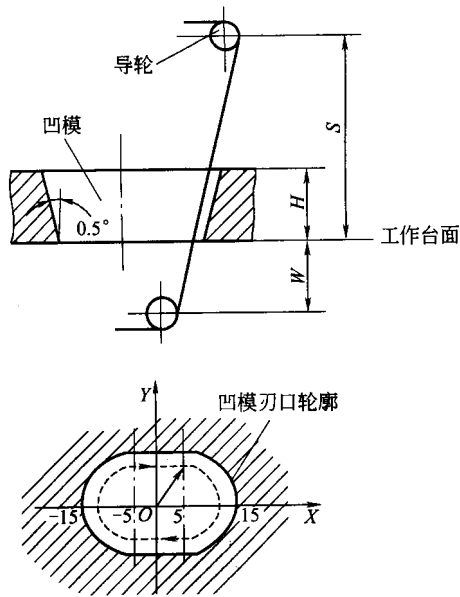


图 7-24 凹模锥度加工

#### (4) 编程举例

用绝对坐标和相对坐标两种方式编写如图 7-25 所示的凸模加工程序,切入长度为 10mm,间隙补偿量  $f = 0.1\text{mm}$ 。

按绝对坐标方式编程,程序为

% CIRCLE AND LINE

注释 圆和线

G92X0Y0

起始点坐标

G41D100

左侧补偿  $f = 0.1$

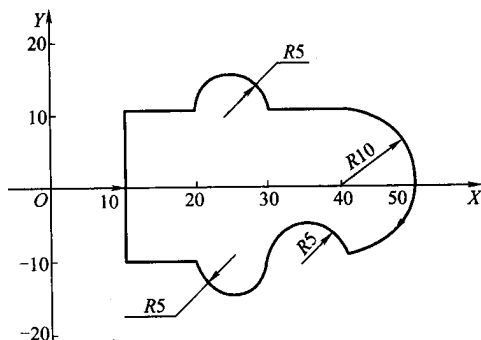


图 7-25 凹模加工

G01X10000	线,切入长度 10mm
Y10000	线 终点( 10 ,10 )
X20000	线 终点( 20 ,10 )
C02X30000Y10000I5000J0	顺圆 终点坐标为( 30 ,10 )圆心对起点坐标为( 5 0 )
G01X40000Y10000	线 终点( 40 ,10 )
C02X40000Y-10000I0J-10000	顺圆 终点为( 40 ,-10 ),圆心对起点为( 0 ,-10 )
G03X30000Y-10000I-5000J0	逆圆 终点为( 30 ,-10 ),圆心对起点为( -5 0 )
G02X20000Y-10000I-5000J0	顺圆 终点为( 20 ,-10 ),圆心对起点为( -5 0 )
G01X10000Y-10000	线 终点为( 10 ,-10 )
Y0	线 终点为( 10 0 )
G40	消除补偿
G01X0Y0	线,回起始点
M02	加工结束
按增量坐标方式编程 程序为	
%CIRCLE ANDLINE	注释 圆和线
G92X0Y0	起始点( 0 0 )
G91	增量坐标
G41D100	左侧补偿 $f = 0.1$
G01X10000	线,切入长度 10mm
Y10000	线 ,Y 正向走 10mm
XI0000	线 ,X 正向走 10mm
G02X10000Y0I5000J0	顺圆 终点对起点( 10 0 ),圆心对起点坐标为( 5 0 )
G01X10000Y0	线 ,X 正向走 10mm
C02X0Y-20000I0J-10000	顺圆 终点对起点( 0 ,-20 ),圆心对起点( 0 ,-10 )
C03X-10000Y0I-5000J0	逆圆 终点对起点( -10 0 ),圆心对起点( -5 0 )
G02X-10000Y0I-5000J0	顺圆 终点对起点( -10 0 ),圆心对起点( -5 0 )

G01X—10000Y0	线 ,X 负向走 10mm
Y10000	线 ,Y 正向走 10mm
G40	消除补偿
C01X—10000	线 ,X 负向走 10mm ,回起始点
M02	加工结束

## 第五节 电火花线切割编程综合举例

编制如图 7-26 所示的凸模的线切割加工程序。已知电极丝直径为  $\phi 0.1\text{mm}$  ,单边放电间隙为  $0.01\text{mm}$ 。图中双点划线为坯料外轮廓。

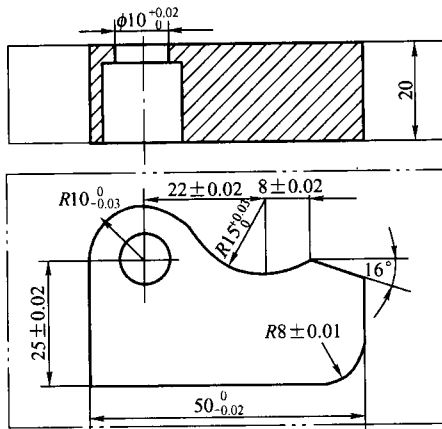


图 7-26 凸模零件

### (1) 工艺处理及计算

① 工件装夹 采用两端支撑方式装夹工件 ,如图 7-27 所示。

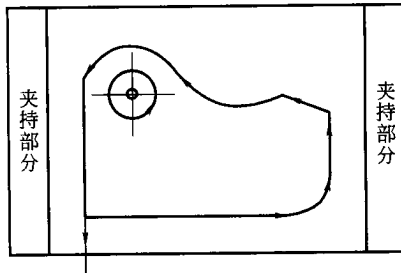


图 7-27 工件装夹及切割路线

② 选择穿丝孔及电极丝切入的位置 切割型孔时 ,在型孔中心处钻中心孔 ,切割外轮廓 ,电极丝由坯件外部切入。

③确定切割线路 切割线路如图 7-27 所示, 箭线所示为切割线路。先切割型孔, 后切割外轮廓。

④计算平均尺寸 如图 7-28 所示。

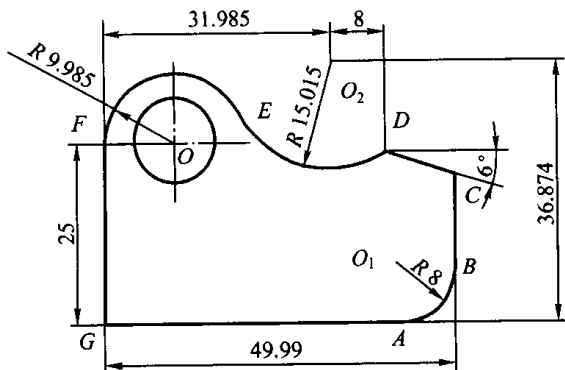


图 7-28 平均尺寸

⑤确定计算坐标系 为简单起见, 直接选型孔的圆心作为坐标系原点, 建立坐标系, 如图 7-28 所示。

⑥确定补偿间隙

$$f = \gamma + \delta = \left( \frac{0.1}{2} + 0.01 \right) = 0.06 \text{ mm}$$

## (2) 编制加工程序

### ·3B 格式编程

计算电极丝中心轨迹。3B 格式须按电极丝中心轨迹编程。电极丝中心轨迹如图 7-29 所示双点划线, 相对工件平均尺寸偏移一垂直距离  $f = 0.06 \text{ mm}$ 。

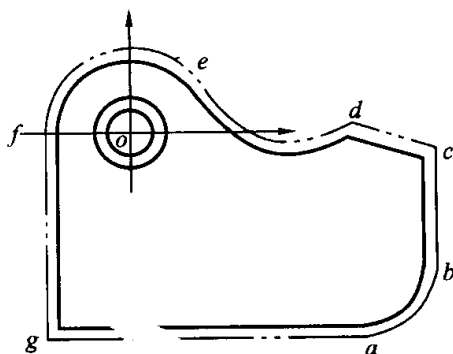


图 7-29 电极丝中心轨迹

计算交点坐标。将电极丝中心轨迹划分为单一的直线或圆弧, 可通过几何计算或 CAD 查询得到各点坐标。各点的坐标见表 7-7。

表 7-7 凸模电极丝轨迹各线段交点及圆心坐标

交点	X	Y	圆心	X	Y
a	32.005	-25.06	0	0	0
b	40.065	-17	$Q_1$	32.005	-17
c	40.065	-3.656	$O_2$	22	11.874
d	29.991	-0.767			
e	8.84	4.771			
f	-10.045	0			
g	-10.045	-25.06			

切割型孔时电极丝中心至圆心  $O$  的距离(半径)为

$$R = \frac{10.01}{2} - 0.06 = 4.954\text{mm}$$

编写程序单。切割凸模时,先切割型孔,然后按从  $g$  下面距  $g$  为 10mm 的点切入  $\rightarrow g \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow g$  下面距  $g$  为 10mm 的点切出的顺序切割,采用相对坐标编程,其线切割程序单见表 7-8。

表 7-8 凸模切割程序单(3B 格式)

序号	B	X	B	Y	B	J	G	Z	说明
1	B	945	B	0	B	4945	GX	L1	穿丝孔切入, $O \rightarrow$ 电极丝中心
2	B	4945	B		B	19780	GY	NR1	加工型孔圆弧
3	B	4945	B	0	B	4945	GX	L3	切出, 电极丝中心 $\rightarrow O$
4									拆卸钼丝
5	B	10045	B	35060	B	35060	GY	L3	空走 $O \rightarrow g$ 下面距 $g$ 为 10mm 的点
6									重新装钼丝
7	B	0	B	10000	B	10000	GY	L2	从 $g$ 下面距 $g$ 为 10mm 的点 $\rightarrow$ 切入
8	B	42050	B	0	B	42050	GX	L1	加工 $g \rightarrow a$
9	B	0	B	8000	B	8000	GY	NR4	加工 $d \rightarrow b$
10	B	0	B	13344	B	13344	GY	L2	加工 $b \rightarrow c$
11	B	10074	B	2889	B	10074	GX	L2	加工 $c \rightarrow d$
12	B	7991	B	12641	B	10166	GY	SR4	加工 $d \rightarrow e$
13	B	8840	B	4771	B	15319	GY	NR1	加工 $e \rightarrow f$
14	B	0	B	25060	B	25060	GY	L4	加工 $f \rightarrow g$
15	B	0	B	10000	B	10000	GY	L4	$g \rightarrow g$ 下面距 $g$ 为 10mm 的点 $\rightarrow$ 切出

## ·4B 格式编程

4B 格式直接按工件轮廓编程,即按图 7-29 所示平均尺寸编程,各点坐标见表 7-9。编写程序时,采用相对坐标,在 G、C、D 尖角处,取圆弧半径  $R = 0.1\text{mm}$  过渡(切点坐标及圆弧在坐标轴的投影长度可由 CAD 查询),其线切割程序见表 7-10。

表 7-9 凸模电极丝轨迹各线段交点及圆心坐标

交点	X	Y	圆心	X	Y
A	31.995	-25	O	0	0
B	40.005	-17	$Q_1$	30.995	-17
C	40.005	-3.701	$Q_2$	22	11.874
D	30	-0.832			
E	8.787	4.743			
F	-0.985	0			
G	-0.985	-25			

表 7-10 凸模切割程序单(4B 格式)

序号	B	X	B	Y	B	J	B	R	G	D	Z	说 明
1	B		B		B	5005	B		GX		L1	穿丝孔切入, $O \rightarrow$ 电极丝中心
2	B	5005	B		B	20020	B	5005	GY	D	NR1	加工型孔圆弧
3	B		B		B	5005	B		GX		L3	切出, 电极丝中心 $\rightarrow O$
4												拆卸钼丝
5	B	9985	B	35000	B	35000			GY		L3	空走, $O \rightarrow G$ 下面距 $G$ 为 10mm 的点
6												重新装钼丝
7	B		B		B	10000			GY		L2	从 $G$ 下面距 $G$ 为 10mm 的点一切入
8	B		B		B	41980	B		GX		L1	加工 $G \rightarrow A$
9	B		B	8000	B	8000	B	8000	GY	D	NR4	加工 $A \rightarrow B$
10	B		B		B	13224	B		GY		L2	加工 $B \rightarrow C$
11	B	100	B		B	72	B	100	GX	D	NR1	半径为 0.1mm 的圆弧过渡
12	B	9890	B	2836	B	9890	B		GX		L2	加工 $C \rightarrow D$
13	B	28	B	96	B	81	B	100	GX	D	NR1	半径为 0.1mm 的圆弧过渡
14	B	7962	B	12730	B	10083	B	15015	GY	DD	SR4	加工 $D \rightarrow E$

序号	B	X	B	Y	B	J	B	R	G	D	Z	说 明
15	B	8787	B	4743	B	15227	B	9985	GY	D	NR1	加工 E→F
16	B		B		B	25000	B		GY		L4	加工 F→G
17	B		B		B	10000	B		GY		L4	G→G 下面距 G 为 10mm 的点→切出

### ● ISO 代码编程

按图 7-29 所示平均尺寸编程,其线切割程序单见表 7-11。

表 7-11 凸模切割程序单(ISO 格式)

程序段	说明	程序段	说明
AM	文件名	G01 X—9985 Y—25000	走到 G 点
G92 X0 Y0	绝对坐标编程	G01 X31995 Y0	加工 GA
G41 D60	左偏间隙补偿, D 偏移量为 0.06mm	G03 X40005 Y—17 I0 J8000	加工 A→B
		G01 X40005 Y—3701	加工 B→C
G01 X5005 Y0	穿丝孔切入, O→电极丝中心	G01 X30000 Y832	加工 C→D
		G02 X8787 Y4743 I8000 J12706	加工 D→E
G03 X5005 Y0 I—5005 J0	加工型孔圆弧	G03 X—9985 Y0 I—8787 J—4743	加工 E→F
G40	取消间隙补偿		
G01 X0 Y0	回坐标原点	G01 X—9985 Y—25000	加工 F→G
M00	程序暂停, 拆卸钼丝	G01 X—9985 Y—35000	从 G 下方切出
G00 X—9985 Y—35000	空走, o→G 下面距 G 为 10mm 的点		
M00	程序暂停, 重新装钼丝	G40	取消间隙补偿
G41 D60	左偏间隙补偿, D 偏移量为 0.06mm	M02	程序结束

在采用电火花切割加工时,要注意其工艺规律,采用恰当的装夹方式、切入点、行走路径、行走方向、行走速度、高频电源电压、脉冲宽度和脉冲间隔,以达到所要求的尺寸精度和表面质量,尽可能地提高加工效率。

## 第八章 自动编程技术

### 第一节 数控编程软件概述

自动编程是利用计算机专用软件编制数控加工程序的过程。随着计算机技术的发展,计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)技术逐渐走向成熟。目前,以CAD/CAM一体化集成形式的软件已成为数控加工自动编程系统的主流。这些软件可以采用人机交互方式,进行零件几何建模(绘图、编辑和修改),对机床与刀具参数进行定义和选择,确定刀具相对于零件的运动方式、切削加工参数,自动生成刀具路径和程序代码,最后经过后置处理,按照所使用机床规定的文件格式生成加工程序。通过串行通讯的方式,将加工程序传送到数控机床的数控单元,实现对零件的数控加工。图8-1所示为CAD/CAM/CNC一体化系统框图。

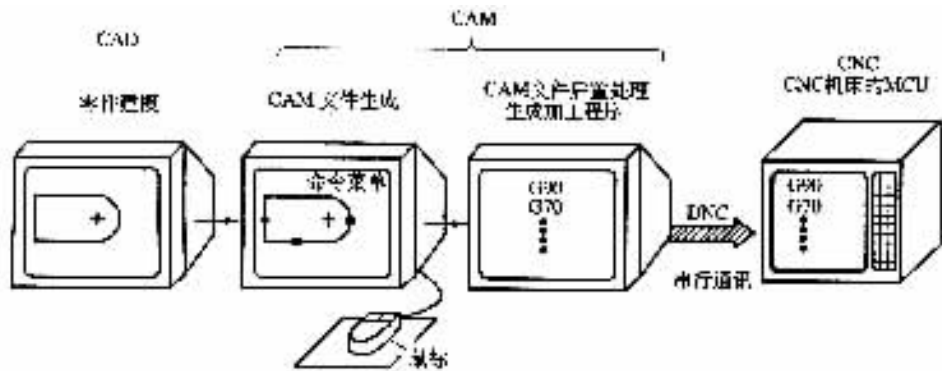


图 8-1 CAD/CAM/CNC 系统框图

#### 一、CAD/CAM 集成数控编程系统的基本原理

##### (1) CAD/CAM 系统的组成

一个集成化的 CAD/CAM 数控编程系统,一般由几何造型、刀具路径生成、刀具路径编辑、刀具路径验证、后置处理、图形显示、几何模型内核、运行控制和用户界面等部分组成。



成,它们的层次结构如图 8-2 所示。

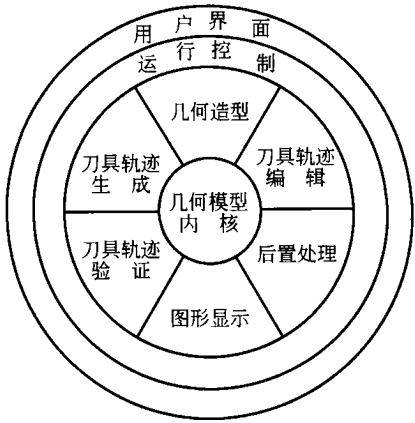


图 8-2 CAD/CAM 集成数控编程系统组成

①在 CAD/CAM 集成数控编程系统中,几何模型内核是整个系统的核心。在几何造型模块中,常用的几何模型包括表面模型(Surface Model)、实体模型(Solid Model)和加工特征单元模型(MachiningFeatureCellModel)。在集成化的 CAD/CAM 系统中,应用最为广泛的几何模型表示方法是边界表示(B-Rep: BoundaryRepresentation)和结构化实体几何(CSG: Constructive Solid Geometry)。在现代 CAD/CAM 系统中,最常用的几何模型内核主要有两种,分别为 Parasolid 和 ACIS。

②多轴刀具路径生成模块直接采用几何模型中加工特征单元的边界表示模式,根据所选用的刀具及加工方式进行刀位计算,生成数控加工工具路径。

③刀具路径编辑根据加工单元的约束条件对刀具路径进行裁剪、编辑和修改。

④刀具路径验证一方面检验刀具路径是否正确,另一方面检验刀具是否与加工单元的约束面发生干涉和碰撞。

⑤后置处理模块根据生成的刀具路径,转化为数控系统能够识别的加工代码(加工程序)。

⑥图形显示贯穿整个设计与加工编程过程的始终。

⑦用户界面提供用户一个良好的交互操作环境。

⑧运行控制模块支持用户界面所有的输入输出方式到各功能模块之间的接口。

## (2) CAD/CAM 系统的基本功能要求

一个典型的 CAD/CAM 集成系统,总的来说,一般应具备以下几大功能模块。

①造型设计包括二维设计、曲面设计、实体和特征设计、曲线、曲面以及实体的编辑(过渡、拼接、裁剪、转换和投影等)、NC 加工特征单元的定义和图素分析等。

②数控加工编程包括多坐标加工刀具路径生成、刀具路径编辑、刀具路径验证和后置处理等。

③在三维几何造型设计的基础上,能够自动生成二维工程图,并具有标注尺寸的功能。对于单一功能的数控编程系统,二维工程图功能不一定非有不可。

## 二、CAD/CAM 集成数控编程系统的应用

在使用一个 CAD/CAM 集成数控编程系统进行零件数控加工编程之前,应对该系统的功能及使用方法有一个比较全面的了解。

对于 CAD/CAM 集成数控编程系统,首先应了解其总体功能框架,包括造型设计、二

维工程绘图、装配、模具设计、制造等功能模块,以及每一个功能模块所包含的内容,特别应关注造型设计中的草图设计、曲面设计、实体造型以及特征造型的功能,因为这些是数控加工编程的基础。

一个系统的数控编程能力主要体现在以下几方面。

①适用范围 如车削、铣削、线切割(EDM)、雕刻等。

②可编程的坐标数 点位、二坐标、三坐标、四坐标以及五坐标。

③可编程的对象 多坐标点位加工编程、表面区域加工编程(是否具备多曲面区域的加工编程)、轮廓加工编程、曲面交线及过渡区域加工编程、型腔加工编程、曲面通道加工编程等。

④是否具备刀具路径的编辑功能和刀具路径验证(仿真)的功能。

⑤系统的界面和使用方法。

⑥系统对文件的管理方式。

对于一个零件的数控加工编程,最终要得到的是能在指定的数控机床上完成该零件加工的正确的数控程序(NC程序),该程序是以文件形式存在的。在实际编程时,往往还要构造一些中间文件,如零件模型、几何元素(曲线、曲面)的数据文件、刀具文件、刀具路径(NCI文件)等。在使用之前应该熟悉系统对这些文件的管理方式以及它们之间的关系。选择正确的后置处理程式。

### (1) 分析加工零件

当拿到待加工零件的零件图样或工艺图样(特别是复杂曲面零件和模具图样)时,首先应对零件图样进行仔细的分析,内容包括

①分析待加工表面 一般来说,在一次加工中,只需对加工零件的部分表面进行加工。这一步骤的内容是:确定待加工表面及其约束面,并对其几何定义进行分析,必要的时候需对原始数据进行一定的预处理(如对不对称公差尺寸求平均值),要求所有几何元素的定义具有惟一性。

②确定加工方法 根据零件毛坯形状以及待加工表面及其约束面的几何形态,并根据现有机床设备条件,确定零件的加工方法及所需的机床设备和工夹具量具。

③确定程序原点及工件坐标系 一般根据零件的基准面(或孔)的位置以及待加工表面及其约束面的几何形态,在零件毛坯上选择一个合适的程序原点及编程坐标系(工件坐标系)。

### (2) 对待加工表面及其约束面进行几何造型

这是数控加工编程的第一步。对于CAD/CAM集成数控编程系统来说,一般可根据几何元素的定义方式,在前面零件分析的基础上,对加工表面及其约束面进行几何造型。对使用CAD软件绘制的二维工程图,要作适当的转换、删除、添补和修改等工作,绘制出待加工的曲线、曲面以及实体。

### (3) 确定工艺步骤并选择合适的刀具

一般来说,可根据加工方法和加工表面及其约束面的几何形态选择合适的刀具类型

及刀具尺寸。但对于某些复杂曲面零件,则需要对加工表面及其约束面的几何形态进行数值计算,根据计算结果才能确定刀具类型和刀具尺寸,这是因为,对于一些复杂曲面零件的加工,希望所选择的刀具加工效率高,同时又希望所选择的刀具符合加工表面的要求,且与非加工表面不发生干涉或碰撞。但在某些情况下,加工表面及其约束面的几何形态数值计算很困难,只能根据经验和直觉选择刀具,这时,便不能保证所选择的刀具是合适的,在刀具路径生成之后,需要进行刀具路径验证。

#### (4) 刀具路径生成及刀具路径编辑

对于 CAD/CAM 集成数控编程系统来说,一般可在所定义加工表面及其约束面(或加工单元)上确定其外法矢方向,并选择一种走刀方式,根据所选择的刀具(或定义的刀具)和加工参数,系统将自动生成所需的刀具路径。所要求的加工参数包括:安全高度、主轴转速、进给速度、线性逼近误差、刀具路径间的残留高度、切削深度、加工余量、进刀/退刀方式等。当然,对于某一加工方式来说,可能只要求其中的部分加工参数。一般来说,数控编程系统对所要求的加工参数都有一个缺省值。

刀具路径生成以后,如果系统具备刀具路径显示及交互编辑功能,则可以将刀具路径显示出来,如果有不合适的地方,可以在人工交互方式下对刀具路径进行适当的编辑与修改。刀具路径计算的结果存放在刀位源文件之中。

#### (5) 刀具路径验证

如果系统具有刀具路径验证功能,可以对可能过切、干涉与碰撞的刀位点,采用系统提供的刀具路径验证手段进行检验。一般有刀具路径模拟和实体切削验证两种检验方式。

#### (6) 后置处理

根据数控机床所选用的数控系统,选择、运行相应的后处理程序,将刀位源文件转换成 G 代码格式的数控加工程序。值得说明的是,自动编程软件最后生成的加工程序,有些程序段是供用户选用的,要根据数控系统、数控机床使用说明书规定的代码格式以及当前数控装置内存文件情况作相应的修改和调整。

以上简要叙述了自动编程的主要步骤,在零件加工之前,根据以上的工艺分析和刀具选择,制订一个加工用的工艺卡片和刀具卡片,内容包括所使用的数控机床和数控系统型号、刀具数量、刀具规格、材料、加工步骤、切削用量、主轴转速、进给速度和对刀位置等内容,便于操作者正确加工。

## 三、常用的 CAD/CAM 集成数控编程系统简介

### (1) CAXA 制造工程师

CAXA 制造工程师是由我国北京北航海尔软件有限公司研制开发的全中文、面向数控铣床和加工中心的三维 CAD/CAM 软件。它基于微机平台,采用原创 Windows 菜单和交互方式,全中文界面,便于轻松地学习和操作。它全面支持图标菜单、工具条、快捷键。用

户还可以自由创建符合自己习惯的操作环境。它既具有线框造型、曲面造型和实体造型的设计功能,又具有生成二至五轴的加工代码的数控加工功能,还可用于加工具有复杂三维曲面的零件。其特点是易学易用、价格较低,已在国内众多企业和研究院所得应用。

### (2) UG II CAD/CAM 系统

UG II 由美国 UGS(Unigraphics Solutions)公司开发经销,不仅具有复杂造型和数控加工的功能,还具有管理复杂产品装配、进行多种设计方案的对比分析和优化等功能。该软件具有较好的二次开发环境和数据交换能力。其庞大的模块群为企业提供了从产品设计、产品分析、加工装配、检验,到过程管理、虚拟运作等全系列的技术支持。由于软件运行对计算机的硬件配置有很高要求,其早期版本只能在小型机和工作站上使用。随着微机配置的不断升级,已开始在上使用。目前该软件在国际 CAD/CAM/CAE 市场上占有较大的份额。UG II CAD/CAM 系统具有丰富的数控加工编程能力,是目前市场上数控加工编程能力最强的 CAD/CAM 集成系统之一,其主要功能包括:车削加工编程;型芯和型腔铣削加工编程;固定轴铣削加工编程;清根切削加工编程;可变轴铣削加工编程;顺序铣削加工编程;线切割加工编程;刀具路径编辑;刀具路径干涉处理;刀具路径验证;切削加工过程仿真与机床仿真;通用后置处理。

### (3) Pro/Engineer

Pro/Engineer 是美国 PTC 公司研制和开发的软件,它开创了三维 CAD/CAM 参数化的先河。该软件具有基于特征、全参数、全相关和单一数据库的特点,可用于设计和加工复杂的零件。另外,它还具有零件装配、机构仿真、有限元分析、逆向工程、同步工程等功能。该软件也具有较好的二次开发环境和数据交换能力。

Pro/Engineer 系统的核心技术具有以下特点:

- ①基于特征。将某些具有代表性的平面几何形状定义为特征,并将其所有尺寸存为可变参数,进而形成实体,以此为基础进行更为复杂的几何形体的构建。
- ②全尺寸约束。将形状和尺寸结合起来考虑,通过尺寸约束实现对几何形状的控制。
- ③尺寸驱动设计修改。通过编辑尺寸数值可以改变几何形状。
- ④全数据相关。尺寸参数的修改导致其他模块中的相关尺寸得以更新。如果要修改零件的形状,只需修改一下零件上的相关尺寸。

Pro/Engineer 已广泛应用于模具、工业设计、汽车、航天、玩具等行业,并在国际 CAD/CAM/CAE 市场上占有较大的份额。

### (4) CATIA

CATIA 是最早实现曲面造型的软件,它开创了三维设计的新时代,它的出现,首次实现了计算机完整描述产品零件的主要信息,使 CAM 技术的开发有了现实的基础。目前 CATIA 系统已发展成从产品设计、产品分析、加工、装配和检验,到过程管理、虚拟运作等众多功能的大型 CAD/CAM/CAE 软件。

CATIA(NC MILL)系统具有菜单接口和刀具路径验证能力,其主要编程功能除了常用的多坐标点位加工编程、表面区域加工编程、轮廓加工编程、型腔加工编程外,还有以下特点:

①在型腔加工编程功能上,采用扫描原理对带岛屿的型腔进行行切法编程,对不带岛屿的任意边界型腔(即不限于凸边界),进行环切法编程。

②在雕塑曲面区域加工编程功能上,可以连续对多个零件面编程,并增加了截平面法生成刀具路径的功能。

### (5) Master CAM

Master CAM是由美国 CNC Software 公司推出的基于 PC 平台上的 CAD/CAM 软件,它具有很强的加工功能,尤其在对复杂曲面自动生成加工代码方面,具有独到的优势。由于 MasterCAM 主要针对数控加工,零件的设计造型功能不强,但对硬件的要求不高,且操作灵活、易学易用、价格较低,受到中小企业的欢迎。因此该软件被认为是一个图形交互式 CAM 数控编程系统。

Master CAM6.0 以上版本的数控加工编程能力较强,其功能有:点位加工编程;二维轮廓加工编程;二维型腔加工编程;三维曲线加工编程;三维曲面加工编程,可按线框和曲面两种方法进行编程;参数线法加工编程;截平面法加工编程;投影法加工编程;刀具路径编辑;刀具路径干涉处理功能;多曲面组合编程,包括曲面交线及曲面间过渡区域编程;刀具路径验证与切削加工过程仿真;整个系统的不同模块之间采用文件传输数据,具有 IGES 标准接口,通用后置处理功能。

### (6) CIMATRON

CIMATRON 是以色列 Cimatron 公司提供的 CAD/CAM/CAE 软件,是较早能在微机平台上实现三维 CAD/CAM 的全功能系统。它具有三维造型、生成工程图、数控加工等功能,具有各种通用和专用的数据接口及产品数据管理(PDM)等功能。该软件较早在我国得到全面汉化,已积累了一定的应用经验。

## 第二节 CAD/CAM 集成数控编程系统的加工造型

CAD/CAM 集成数控编程系统的加工造型与机械设计的设计造型不同,二者存在着一定的差距。设计造型的目的是为了将产品的形状和配合关系表达清楚,它要求的几何表达方式比较统一且必须是完整的,一般是三维实体或纯二维工程图纸,加工造型目的是为了给加工轨迹提供几何依据,虽然加工造型的基础是设计造型,但是它的造型表现形式不一定使用统一的几何表达方式,可以是二维线框、三维曲面、三维实体或它们的混合体。下面以 CAXA 制造工程师 XP 为例,简要说明加工造型的主要功能。

### 一、CAXA 制造工程师 XP 造型功能

#### (1) 特征实体造型

采用特征实体造型技术,可将设计信息用特征术语来描述,简便而准确。通常的特征包括孔、槽、型腔、凸台、圆柱体、圆锥体、球体、管子等,CAXA 制造工程师可以方便地建立和管理这些特征信息,使整个设计过程直观、简单。

实体模型的生成可以用增料方式,通过拉伸、旋转、导动、放样或加厚曲面来实现,也可以通过减料方式,从实体中减掉实体或用曲面裁剪来实现。还可以用等半径过渡、变半径过渡、倒角、打孔、增加拔模斜度和抽壳等高级特征功能来实现。

### (2) NURBS 自由曲面造型

CAXA 制造工程师从线框到曲面,提供了丰富的建模手段。可通过列表数据、数学模型、字体文件及各种测量数据生成样条曲线,通过扫描、放样、拉伸、导动、等距、边界网格等多种形式生成复杂曲面,并可对曲面进行任意裁剪、过渡、拉伸、缝合、拼接、相交、变形等,建立任意复杂的零件模型。通过曲面模型生成的真实感图形,可直观显示设计结果。

### (3) 曲面实体复合造型

基于实体的特征造型技术,使曲面融合进实体中,形成统一的曲面实体复合造型模式。利用这一模式,可实现曲面裁剪实体、曲面生成实体、曲面约束实体等混合操作。

## 二、CAXA 制造工程师 XP 界面介绍

用户界面(简称界面)是交互式 CAD/CAM 软件与用户进行信息交流的中介。系统通过界面反映当前信息状态将要执行的操作,用户按照界面提供的信息作出判断,并经由输入设备进行下一步的操作。CAXA 制造工程师操作界面如图 8-3 所示。

CAXA 制造工程师的用户界面的各种应用功能通过菜单和工具条驱动。状态栏指导用户进行操作并提示当前状态和所处位置,特征树记录了历史操作和相互关系,绘图区显示各种功能操作的结果,同时,绘图区和特征树为用户提供了数据的交互功能。工具条中每一个按钮都对应一个菜单命令,单击按钮和单击菜单命令完全一样。

### (1) 主菜单

菜单包括文件、编辑、显示、应用、工具、设置和帮助。每个菜单项都含有若干个下拉菜单。

### (2) 立即菜单

描述了该项命令执行的各种情况和使用条件。用户根据当前的作图要求,正确地选择某一选项,即可得到准确的响应。图 8-3 所示为画直线的立即菜单。

### (3) 快捷菜单

光标处于不同的位置,按鼠标右键会弹出不同的快捷菜单。熟练使用快捷菜单,可以提高绘图速度。

### (4) 对话框

某些菜单选项要求用户以对话框的形式予以回答,用户可根据单前操作作出响应。

### (5) 工具条

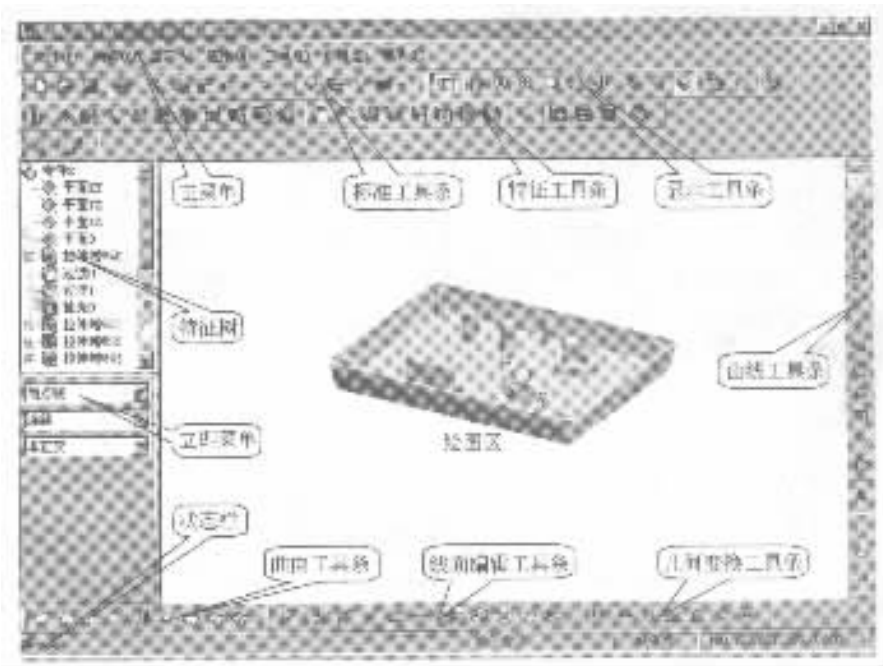


图 8-3 CAXA 制造工程师操作界面

在工具条中,可以通过鼠标左键单击相应的按钮进行操作。工具条可以自定义,界面上的工具条包括:标准工具、显示工具、状态工具、曲线工具、几何变换、线面编辑、曲面工具和特征工具。

#### (6) 矢量工具

矢量工具主要是用来选择方向,在曲面生成时经常要用到。

#### (7) 选择集拾取工具

拾取图形元素(点线面)的目的就是根据作图的需要,在已经完成的图形中,选取作图所需的某个或某几个元素。选择集拾取工具就是用来方便地拾取需要的元素的工具。

## 三、零件的加工造型

零件加工造型的方法可以归纳为线框造型、曲面造型和实体造型三个基本类型。

#### (1) 线框造型

在 CAXA 制造工程师软件中,线框造型实际就是先绘制曲线,再对曲线进行编辑和修改以及进行空间几何变换,从而完成加工造型。

① 曲线绘制 曲线绘制包括绘制直线、圆弧、圆、椭圆、样条线、点、文字、公式曲线、多边形、二次曲线、等距线、草图、曲线投影和相关线等。这里仅介绍曲线投影和相关线概念。草图绘制见实体造型一节。

a. 曲线投影 指定一条曲线沿某一方向向一个实体的基准面作投影,得到曲线在该基准面上的投影线。投影的前提:只有在草图状态下,才具有投影功能。投影的对象:空间曲线、实体的边和曲面的边。

b. 相关线 相关线包括曲面或实体的交线、边界线、参数线、法线、投影线和边界线。

②曲线编辑 包括曲线剪裁、曲线拉伸、曲线组合、曲线打断和曲线过渡五种功能。

③几何变换 几何变换共有七种功能:平移、平面旋转、旋转、平面镜像、镜像、阵列和缩放。几何变换对实体造型无效。

## (2) 曲面造型

CAXA 制造工程师提供了丰富的曲面造型手段,构造完决定曲面形状的关键线框后,就可以在线框基础上,选用各种曲面的生成和编辑方法,在线框上构造所需定义的曲面来描述零件的外表面。

①曲面生成方式 根据曲面特征线的不同组合方式,可以组织不同的曲面生成方式。曲面生成方式共有直纹面、旋转面、扫描面、边界面、放样面、网格面、导动面、等距面、平面和实体表面十种。

②曲面编辑 包括曲面裁剪、曲面过渡、曲面缝合、曲面拼接和曲面延伸五种功能。曲面裁剪有五种方式:投影线裁剪、等参数线裁剪、线裁剪、面裁剪和裁剪恢复。曲面过渡有七种方式:两面过渡、三面过渡、系列面过渡、曲线曲面过渡、参考线过渡、曲面上线过渡和两线过渡。曲面缝合有两种方式:通过曲面1的切矢进行光滑过渡连接和通过两曲面的平均切矢进行光滑过渡连接。曲面拼接有三种方式:两面拼接、三面拼接和四面拼接。

## (3) 实体造型

实体造型一般先要在一个平面上绘制二维草图,然后再运用各种方式生成三维实体。

①草图曲线绘制 草图是为实体(特征)造型准备的一个平面封闭图形,也称为轮廓。绘制草图的过程可分为:确定草图基准平面;选择草图状态;图形的绘制;图形的编辑;草图参数化修改等五步。

草图中的曲线必须绘制在一个基准面上,开始一个新草图前必须先选择一个基准面。基准面可以是特征树中已有的坐标平面(如XY、XZ、YZ坐标平面),也可以是实体中生成的某个平面,还可以是构造出的平面。在CAXA制造工程师中共提供了“等距平面确定基准平面”、“过直线与平面成夹角确定基准平面”、“生成曲面上某点的切平面”、“过点且垂直于曲线确定基准平面”、“过点且平行平面确定基准平面”、“过点和直线确定基准平面”和“三点确定基准平面”等七种构造基准平面的方式。

②实体造型 实体造型也称为特征生成或轮廓特征,在已绘制的草图基础上通过拉伸增料、拉伸除料、旋转增料、旋转除料、放样增料、放样除料、导动增料、导动除料、曲面加厚增料、曲面加厚除料和曲面裁剪等方式生成三维实体。

③处理特征 特征生成后,可以运用处理特征的手段对实体进行修饰,包括以给定半径或以半径规律在实体间作光滑过渡、对实体的棱边进行倒角过渡、打孔、拔模、抽壳、筋板等处理。



④阵列特征 通过线性阵列可以沿一个方向或沿多个方向快速进行特征的复制,通过环形阵列可以绕空间直线快速进行特征的复制,达到特征的快速生成目的。

## 第三节 CAXA 制造工程师的数控加工

用 CAXA - ME 实现加工的过程:首先,在后置设置中须配置好机床。这是正确输出代码的关键;其次,看懂图纸,用曲线、曲面和实体对需要数控加工的部分造型;然后,根据工件形状,选择合适的加工方式,生成刀具路径(包括粗加工、半精加工、精加工路径),并进行路径的仿真检验,必要时修改刀具路径;最后,生成 G 代码(加工程序),传给机床。

### 一、刀具路径的生成

#### (1)刀具库设置

刀具库用来定义、确定刀具的有关数据,以便用户从刀具库中调用信息和对刀具库进行维护。刀具参数设置和刀具库管理如图 8-4 所示。

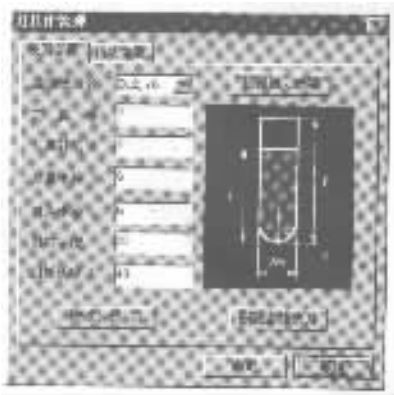


图 8-4 刀具库管理对话框

#### (2)生成刀具路径的通用参数设置

刀具轨迹生成模块中有如下一些功能:平面轮廓加工、平面区域加工、导动加工、参数线加工、限制线加工、曲面轮廓加工、曲面区域加工、投影加工、曲线加工、等高粗加工、等高精加工、自动区域加工、钻孔、轨迹生成批处理等。

在各种轨迹生成功能中,要设置一些通用的选项,如刀具参数、机床参数、进退刀参数、下刀参数、清根参数等。每个刀位轨迹生成方式均涉及这些参数中的一部分或全部,机床控制参数即切削用量的参数表如图 8-5 所示,进退刀参数如图 8-6 所示。

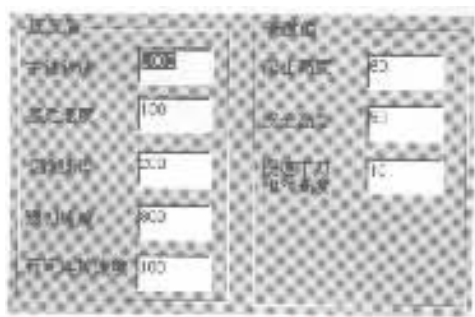


图 8-5 机床控制参数

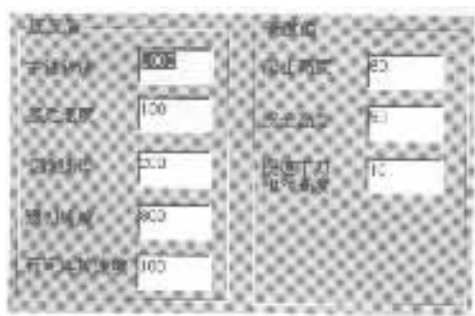


图 8-6 进退刀参数

### (3) 平面轮廓加工

属于二轴加工方式,由于它可以指定拔模斜度,所以也可以做二轴半加工。主要用于加工封闭的和封闭的轮廓。平面轮廓加工菜单项如图 8-7 所示。

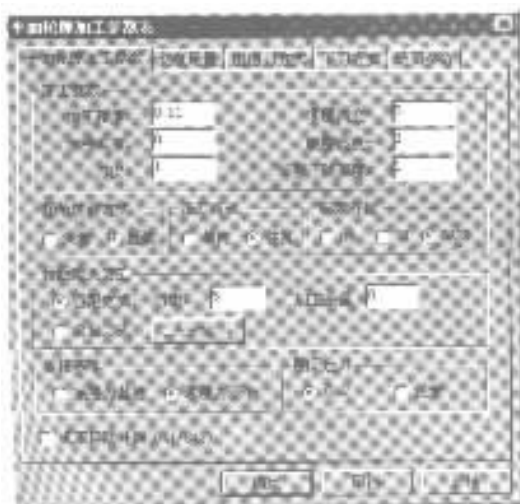


图 8-7 平面轮廓加工参数

其中,当前高度:被加工工件的最高高度;底面高度:加工的最后一层所在高度;每层

下降高度 :每层之间的间隔高度( Z 轴方向 );拔模斜度 :加工完成后 ,轮廓所具有的倾斜度 ;行距 :每一行刀位之间的距离( XY 方向 );刀次 :生成的刀位的行数( XY 方向的分层 );加工余量 :给轮廓留出的预留量 ;加工误差 :对由样条曲线组成的轮廓系统按给定的误差把样条转化成直线段 ,用户可按需要来控制加工的精度 ;拔模基准 :当加工的工件带有拔模斜度时 ,工件顶层轮廓与底层轮廓的大小不一样。用平面轮廓功能生成加工轨迹时 ,只需画出工件顶层或底层的一个轮廓形状即可 ,无需画出两个轮廓 ,拔模基准用来确定轮廓是工件的顶层轮廓还是底层轮廓。

#### (4) 平面区域加工

平面区域加工用来生成具有多个岛屿的平面区域的刀具路径。其参数设置如图8-8所示。

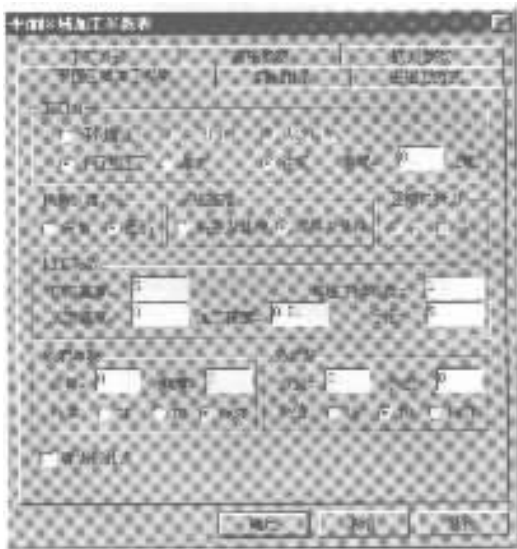


图 8-8 平面区域加工参数

其中 标识钻孔点 :当轨迹形成很多封闭区域而无法进行绕岛加工时 ,系统需要进行抬刀 ,移动到下一个封闭区域下刀。这样会形成一些下刀点 ,如果使用的是平底端铣刀 ,需要在这些下刀点处预钻下刀孔。选择标示钻孔点 ,系统会自动将此类下刀点标识出来。如果使用渐切下刀方式 ,可以取消此类预钻孔 ,但是一定要注意渐切角度。

清根参数选项卡 ! 此参数可对轮廓和岛屿分别作清根或不清根的选择 ,系统默认为不清根 ,如选择清根 ,刀具将在每层加工完毕后 ,再沿轮廓或岛绕切一遍进行清根。作清根加工时 ,还可选择清根的进退刀方式。一般来说 ,由于刀具刚度的影响 ,当加工较深型腔且吃刀量较大时 ,会在轮廓及岛屿处形成不必要的斜度 ,此时就需要进行清根处理。

#### (5) 导动加工

导动加工是二维加工的扩展 ,它是用轮廓线沿导动线平行运动生成轨迹的方法。相当于平行导动曲面的算法 ,只不过生成的不是曲面而是轨迹。其截面轮廓可以是开放的

也可以是封闭的,导动线必须是开放的。该轨迹是二轴半轨迹。如图 8-9 所示。

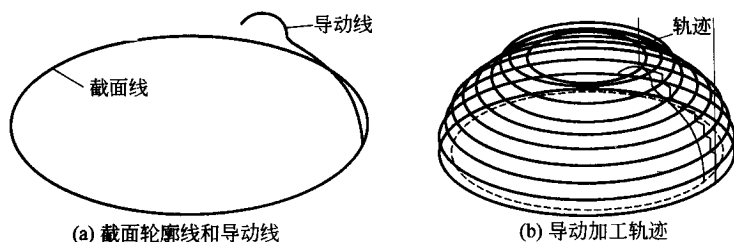


图 8-9 导动加工的轨迹生成

导动加工的特点如下:

①做造型时,只作平面轮廓线和截面线,不用作曲面,简化了造型。

②作加工轨迹时,因为它的每层轨迹都是用二维的方法来处理,所以拐角处如果是圆弧,那么它生成的 G 代码中就是 G02 或 G03,充分利用了机床的圆弧插补功能。因此它生成的代码最短,并且加工效果最好。

③生成轨迹的速度非常快。

④能够自动消除加工的刀具干涉现象。无论是自身干涉还是面干涉,都可以自动消除,因为它的每一层轨迹都是按二维平面轮廓加工来处理的。

#### (6) 参数线加工

参数线加工也称为流线加工,它是沿曲面的参数线方向产生三轴刀具路径,可以对单个或多个曲面进行加工,生成多个按曲面参数线行进的刀具路径。其参数设置如图 8-10 所示。

步长定义方式可以选择加工精度或步长,用来控制沿刀具行进方向的加工误差,加工精度与步长的关系如图 8-11 所示。

行距定义有三种方式:残留高度、行距和刀次,可以定义其中一种。用来控制截面方向的加工误差,行距与残留高度的关系如图 8-12 所示。刀次是指刀具路径的行数。

第一系列限制曲面和第二系列限制曲面专门用来限制刀位路径,如图 8-13 所示。第一系列限制曲面是指刀具路径的每一行,在刀具恰好碰到限制面时(已考虑干涉余量)停止。即限制刀具轨迹每一行的尾。限制面可以由多个面组成。第二系列限制面是指限制每一行刀具轨迹的头。同时用第一系列限制面和第二系列限制面,可以得到刀具轨迹每行的中间段。系统对限制面与干涉面的处理不同,碰到干涉面,刀具路径让刀,碰到限制面,刀具路径的该行就停止,在不同的场合,应该灵活运用,以达到更好的切削质量。

#### (7) 曲面轮廓加工

曲面轮廓加工能够生成沿一轮廓线(其投影在加工的曲面内)加工曲面的刀具路径。其参数设置如图 8-14 所示。

在其他的加工方式里,刀次和行距是单选,最后生成的刀具轨迹只使用其中的一个

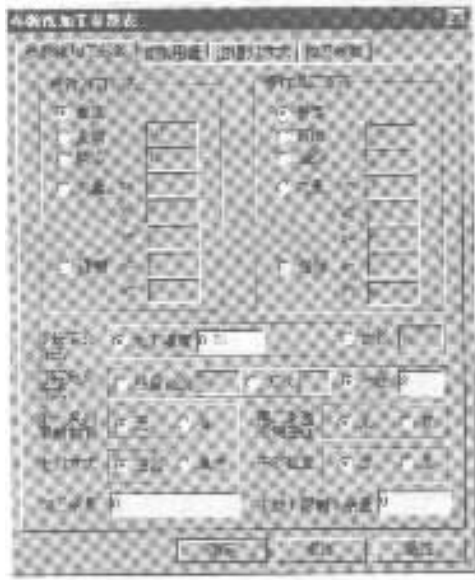


图 8-10 参数线加工参数

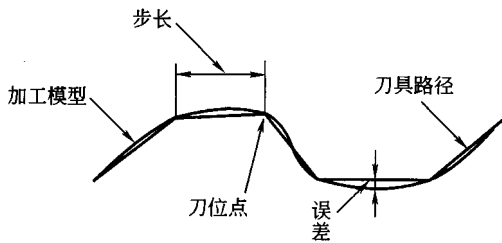


图 8-11 加工精度与步长

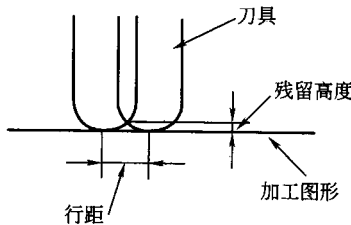


图 8-12 行距与残留高度

参数,而在曲面轮廓加工里刀次和行距是关联的,生成的刀具轨迹由刀次和行距两个参数决定,如图 8-15 所示,此图刀次为 4,行距为 5mm。如果想将轮廓内的曲面全部加工,又无法给出合适的刀次数,可以给一个大的刀次数,系统会自动计算并将多余的刀次删除。

以上简要介绍了几种加工方式的参数设置,在 CAXA 制造工程系统中还有其他多种加工方式,如曲面区域加工、限制线加工、投影加工、曲线加工、等高粗加工、等高精加工、

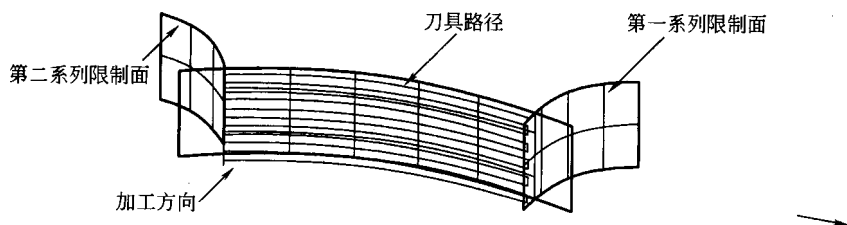


图 8-13 两限制面同时应用



图 8-14 曲面轮廓加工参数

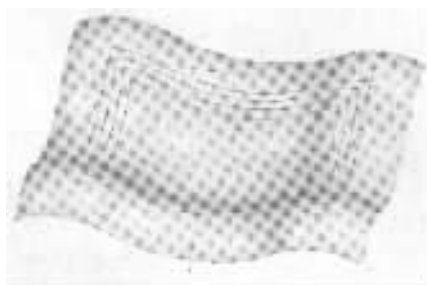


图 8-15 给定刀次 4 时曲面轮廓刀具路径

自动区域加工、钻孔、路径批处理等。在刀具路径生成之后,利用系统的加工路径仿真功能,可以对两轴或三轴刀具路径进行具有真实感的切削加工仿真,检查刀具路径是否正确、优劣。利用这些加工方式生成刀具路径的同时,还可以生成加工工艺明细单(HTML格式),便于机床操作者对G代码程序的使用。由于篇幅所限,这里不做一一介绍。

## 二、知识库加工

为了方便更容易地使用和掌握利用CAXA制造工程师软件进行加工生产,同时也

为了新的技术人员容易入门,不需要掌握多种加工功能的具体应用和参数设置,CAXA 制造工程师专门提供了知识加工功能,针对复杂曲面的加工,为用户提供一种零件整体加工思路,用户只需观察出零件整体模型是平坦或者陡峭,运用知识库的参数,就可以快速地完成加工编程过程。知识库参数的设置应由有编程和加工经验丰富的工程师来完成,设置好后可以存为一个文件,文件名可以根据自己的习惯任意设置。有了知识库加工功能,可以使老的编程者工作起来更轻松,新的编程者直接利用已有的加工工艺和加工参数,很快地学会编程。具体操作请参考 CAXA 制造工程师用户手册

### 三、刀具路径编辑

刀具路径编辑是对已生成的刀具路径和刀具路径中的刀位行或刀位点进行增加、删减等。系统提供多种刀具轨迹编辑和仿真手段,主要用于对生成的刀位进行必要的调整和裁剪。系统提供包括刀位裁剪、刀位反向、插入刀位、删除刀位、两点间抬刀、清除抬刀、路径打断、路径连接、路径仿真、参数修改等九项功能。

### 四、后置处理与加工代码

后置处理就是结合特定机床把系统生成的刀具路径转化成机床能够识别的 G 代码指令,用于加工,这是最终的目的。考虑到生成程序的通用性,CAXA - ME 软件针对不同的机床,可以设置不同的机床参数和特定的数控代码程序格式,同时还可以对生成的机床代码的正确性进行校核。

后置处理模块包括后设置、生成 G 代码、校核 G 代码和生成工序卡功能。

#### (1) 后设置

后设置功能包括两方面的功能:增加机床和后置处理设置,其选项卡如图 8-16 和图 8-17 所示。

①增加机床 增加机床就是针对不同的机床,不同的数控系统,设置特定的数控代码、数控程序格式及参数,并生成配置文件。生成数控程序时,系统根据该配置文件的定义生成用户所需要的特定代码格式的加工指令。

机床配置给用户提供了一种灵活方便的设置系统配置的方法。对不同的机床进行适当的配置,具有重要的实际意义。通过设置系统配置参数,后置处理所生成的数控程序可以直接输入数控机床或加工中心进行加工,而无需进行修改。

程序起始符号、程序结束符号、程序说明、程序头、程序尾换刀段的设置如下。

格式: \$ + 宏指令或字符串

或: @ \$ + 宏指令或字符串

部分宏指令及功能见表 8-1;@为换行符,在生成 G 代码时,程序另起一行;字符串可以是任意字符组合,在程序中照原样印出。

②后置处理设置 后设置就是针对特定的机床,结合已经设置好的机床配置,对后置输出的数控程序的格式如程序段行号、程序大小、数据格式、编程方式、圆弧控制方式等



图 8-16 增加机床选项卡

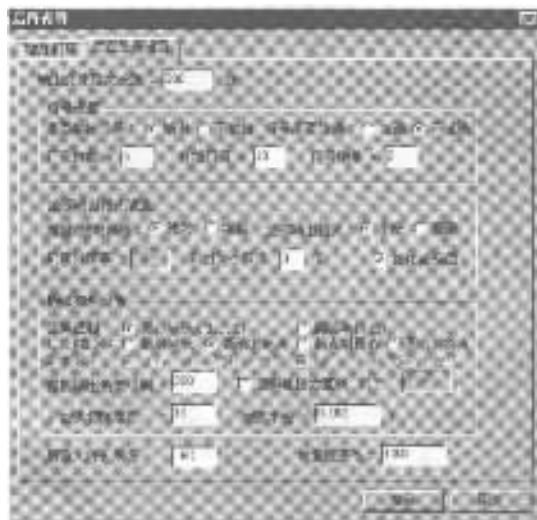


图 8-17 后置处理设置选项卡

进行设置。

在选项卡中,优化坐标值是指在输出的 G 代码中,若坐标值的某一分量与上一行相同,则此分量在 G 代码中不出现。

### (2)生成 G 代码

在后置设置完成以后,选择 G 代码生成功能,就可以把已生成的刀具路径转化成 G 代码数据文件,即 CNC 数控程序。

### (3)校核 G 代码

校核 G 代码就是把生成的 G 代码文件反读进来,生成刀具轨迹,以检查生成的 G 代



码的正确性。如果 G 代码文件中包含圆弧插补,则需用户指定相应的圆弧插补格式,若后置文件中的坐标输出格式为整数,且机床分辨率不为 1 时,反读的结果是不对的,亦即系统不能读取坐标格式为整数且分辨率为非 1 的情况。

表 8-1 CAXA 制造工程师所提供的部分宏指令及功能

宏指令	功 能	宏指令	功 能
POST NAME	当前后置文件名	G00	快速移动
POST DATE	当前日期,来自计算机当前日期	G90	绝对指令
POST TIME	当前时间,来自计算机当前时间	G91	相对指令
TOOLNO	系统规定的刀具号	ICMP—LEN( G43 )	刀具长度补偿
COORD—Z	当前 z 坐标值,来自参数表	LCMP—OFK( G49 )	刀具长度补偿取消
POST—CODE	当前程序号	WCOORD( G92、G54 )	坐标设置
TOOL—MSG	当前刀具信息	SPN—CW( M03 )	主轴正转
PARA—MSG	当前加工参数信息	SPN—OFK( M05 )	主轴停止
LINL - NO - ADD	行号指令	SPN—R( S )	主轴
BLOCK—END	行结束符	SPN - SPEED	主轴速度,来自参数表
SPEED	速度指令	PRO—STOP( M30 )	程序停止

注意:校核只用来进行对 G 代码的正确性进行检验,由于精度等方面的原因,应避免将反读出的刀位重新输出,因为系统无法保证其精度,校对刀具轨迹时,如果存在圆弧插补,则系统要求选择圆心的坐标编程方式,应正确选择对应的形式,否则会导致错误。

#### (4) 生成加工工艺单

选择此项功能,系统能够生成一个加工轨迹明细单,如图 8-18 所示,便于机床操作者对 G 代码程序的使用和对 G 代码程序的管理。

加工轨迹明细单

序号	代码名称	刀具号	刀具参数	切削速度	加工方式	加工时间
1	无	0	刀具直径 = 10.00 刀角半径 = 5.00 刀刃长度 = 30.00	10	等高线	906min

图 8-18 加工轨迹明细单

本章对自动编程技术结合 CAXA 制造工程师作了系统简要概述,目的是让读者有一个自动编程概念,了解常用 CAD/CAM 集成数控编程系统的功能,掌握自动编程技术的步骤以及涉及的一些概念,真正掌握一种 CAD/CAM 集成数控编程系统的使用还要参考其用户手册和在工作中不断实践。