

第 3 章 数控加工编程

本章学习目标

本章主要介绍数控机床的坐标系统、数控加工程序格式及编制代码、数控加工的工艺特点、典型车/铣削零件的加工编程及加工工艺，对一些典型零件的编程进行了举例。最后，简要介绍了自动编程的基础知识。通过本章学习，读者应该掌握：

- 数控机床坐标系的确定和方向的判定
- 掌握加工程序的组成和格式
- 数控机床的工作原理、应用
- 熟悉数控加工程序的各种编制代码，主要包括 G、M、F、S、T 代码等，特别是准备功能 G 代码和辅助功能 M 代码，它是程序段的主要组成部分
- 在编程之前能对所加工的零件进行工艺分析，拟定好加工方案，并选择合适的刀具和确定切削用量等
- 了解自动编程的基本概念和基本原理

3.1 数控机床的坐标系统

3.1.1 数控机床坐标轴的命名和方向

数控机床坐标轴和方向的命名制订了统一的标准，目前国际上数控机床的坐标轴和运动方向均已标准化。我国也于 1982 年颁布了 JB3051—82《数控机床的坐标和运动方向的命名》标准。标准规定，在加工过程中无论是刀具移动、工件静止，还是工件移动、刀具静止，一般都假定工件相对静止不动，而刀具在移动，并同时规定刀具远离工件的方向作为坐标轴的正方向。

数控机床上的坐标系是采用右手直角笛卡儿坐标系。规定直线进给运动的坐标轴用 X、Y、Z 表示，常称基本坐标轴。围绕 X、Y、Z 轴旋转的圆周进给坐标轴用 A、B、C 表示，常称旋转轴。如图 3-1 所示，X、Y、Z 直线进给坐标系按右手定则规定，而围绕 X、Y、Z 轴旋转的圆周进给坐标轴 A、B、C 则按右手螺旋定则判定。

机床各坐标轴及其正方向的确定原则是：

(1) 先确定 Z 轴。在确定数控机床坐标轴时，一般先确定 Z 轴。以平行于机床主轴的刀具运动坐标为 Z 轴。当机床有几个主轴时，则选一个垂直于工件装夹面的主轴为 Z 轴；若没有主轴，则规定垂直于工件装夹面的坐标轴为 Z 轴。规定刀具远离工件的方向作为 Z 轴正方向。

(2) X 轴的确定。X 轴是水平的、平行于工件装卡平面的轴。对于刀具旋转的机床，若

Z轴为水平时，由刀具主轴的后端向工件看，X轴正方向指向右方；若Z轴为垂直时，由主轴向立柱看，X轴正方向指向右方。对无主轴的机床（如刨床），X轴正方向平行于切削方向。

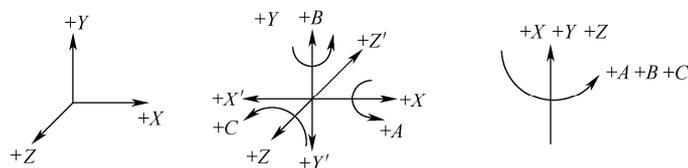


图 3-1 右手直角笛卡儿坐标系

(3) Y轴的确定。X、Z轴的正方向确定后，垂直于X及Z轴，按右手定则确定其正方向。

(4) 旋转轴的确定。根据右手螺旋定则，如图3-1所示，以大拇指指向+X、+Y、+Z方向，则食指、中指等的指向是圆周进给运动的+A、+B、+C方向。

(5) 附加坐标轴的确定。在基本的线性坐标轴X、Y、Z之外的附加线性坐标轴指定为U、V、W和P、Q、R。这些附加坐标轴的运动方向可按决定基本坐标轴运动方向的方法来决定。

3.1.2 机床坐标系与工件坐标系

机床坐标系是机床上固有的坐标系，用于确定被加工零件在机床中的坐标、机床运动部件的位置以及运动范围。机床参考点是确立机床坐标系的参照点，机床坐标系通过回参考点操作来确立。机床原点就是机床坐标系的原点，也称机械原点、参考点或零点。它是机床上固定的一个点，也是工件坐标系和机床参考点的基准点，机床一经设计和制造出来，机床原点就已经被确定下来。图3-2所示为几种典型机床的坐标系。机床启动时，通常要进行机动或手动回零，就是回到机床原点。数控机床的机床原点一般在直线坐标或旋转坐标回到正向的极限位置。

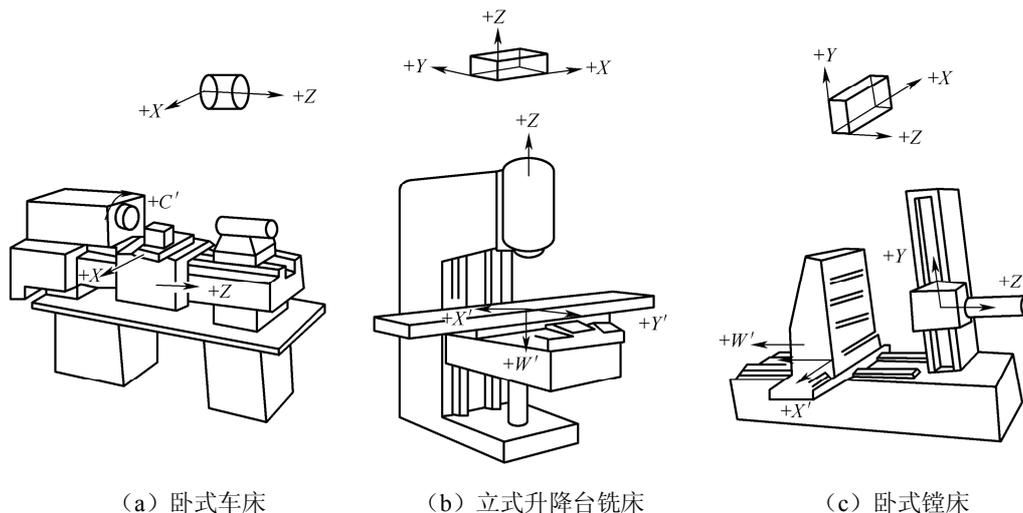


图 3-2 几种典型机床的坐标系

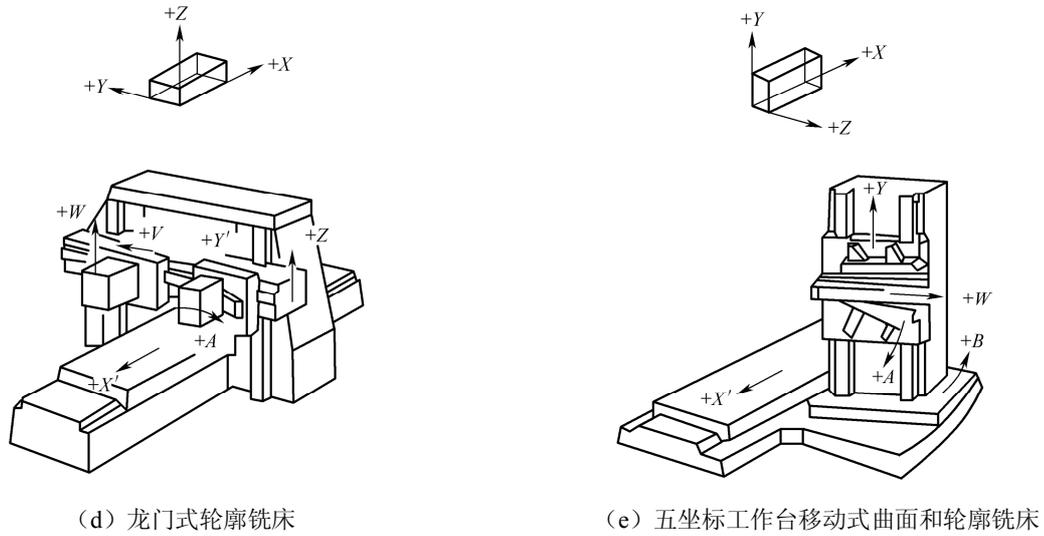


图 3-2 几种典型机床的坐标系（续图）

工件坐标系亦称编程坐标系，是编程人员在编制加工程序时使用的坐标系，用来确定刀具和程序的起点，编程人员可根据具体情况自行确定。但坐标轴的方向应与机床坐标系一致，并且与之有确定的尺寸关系。机床坐标系与工件坐标系的关系如图 3-3 所示。不同的工件建立的坐标系也可有所不同，有的数控系统允许一个工件可建立多个工件坐标系，或者在一个工件坐标系下再建立一个坐标系称之为局部坐标系。局部坐标系原点的坐标值应是相对于工件坐标系，而不是相对于机床坐标系。通过建立多个坐标系或局部坐标系可大大简化零件的编程工作。工件坐标系的原点称为工件原点或编程原点。

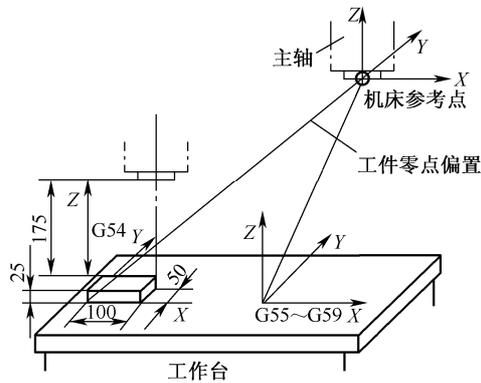


图 3-3 工件坐标系与机床坐标系的位置关系

3.2 数控加工程序格式及编制代码

在数控机床上加工零件时，要把加工零件的全部工艺过程、工艺参数和位移数据以信息的形式记录在控制介质上，用控制介质上的信息来控制机床，实现零件的全部加工过程。生成用数控机床进行零件加工的数控程序的过程，称为数控编程。编程就是将加工零件的加工顺序、

刀具运动轨迹的尺寸数据、工艺参数加工信息，用规定的文字、数字、符号组成的代码按一定格式编写成加工程序。数控程序的编制方法一般分为手工编程和自动编程两大类。手工编程是指整个程序的编制过程是由人工完成的。自动编程是用计算机把人们输入的零件图纸信息生成数控机床能执行的数控加工程序，数控编程的大部分工作由计算机来完成。

3.2.1 数控加工程序格式

1. 程序的组成

一个完整的加工程序由程序头、程序主干、程序尾三部分组成。下面是一个车削轮廓加工程序实例。工件如图 3-4 所示，其加工程序如下：

O0001	程序名
N10 G92 X70.0 Z150.0;	建立工件坐标系
N20 S630 M03;	让主轴以 630 r/min 正转
N30 G90 G00 X20.0 Z88.0 M08;	刀具快速移到毛坯的右端
N40 G01 Z78.0 F100;	工进车外圆 F20
N50 G02 Z64.0 R12.0;	车 R12 圆弧成型面
N60 G01 Z60.0;	车外圆 F20
N70 G04 X2.0;	转角处暂停
N80 G01 X24.0;	车端面
N90 G03 X44.0 Z50.0 R10.0;	车转角圆弧 R10
N100 G01 Z20.0;	车外圆 F44
N110 X55.0;	车端面并退出到工件外
N120 G00 X70.0 Z150.0 M09;	返回起刀点
N130 M05;	主轴停转
N140 M30;	程序结束

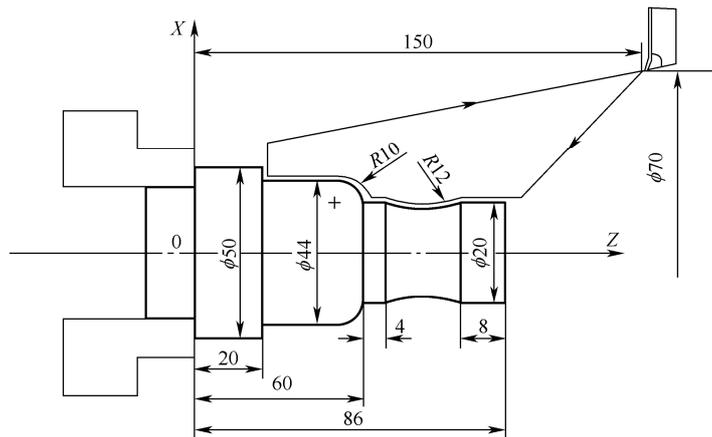


图 3-4 车削工件图

(1) 程序头。包括程序名、建立工件坐标系、启动主轴、开启切削液、从起刀点快速进到工件要加工的部位附近等准备工作。程序名就是给零件数控加工程序一个编号，以便进行程序

X、Z 为坐标功能字；F 为进给功能字；S 为主轴转速功能字；T 为刀具功能字；M 为辅助功能字。常用地址码及其含义如表 3-1 所示。

表 3-1 常用地址码及其含义

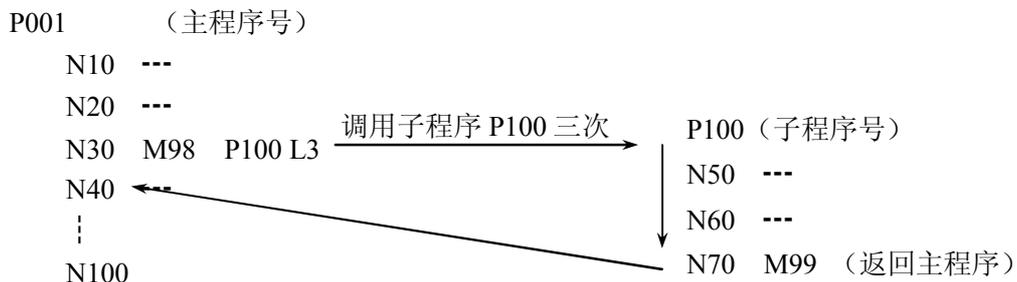
机能	地址码	说明
程序段号	N	程序段顺序编号地址
坐标字	X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R	直线坐标轴
	A、B、C、D、E	旋转坐标轴
	R	圆弧半径
	I、J、K	圆弧圆心相对起点坐标
准备功能	G	准备功能
切削用量	F	进给量或进给速度
	S	主轴转速
刀具号	T	刀库中的刀具编号
辅助功能	M	辅助功能
补偿值	H 或 D	补偿值地址

3. 主程序与子程序

在一个加工程序中，如果有几个一连串的程序段在多处出现，则可将这些重复的程序段按规定的格式单独抽出，独立编号成一个子程序以备调用。在执行主程序的过程中，子程序可以被主程序多次重复调用。还有一些数控系统，在调用子程序的过程中子程序同时也可调用其他的子程序。通过采用子程序，可以加快程序的编制和简化程序，同时也利于程序的检验和修改。主程序调用子程序可以用 M98 指令，从子程序返回主程序可以用 M99 指令。子程序的程序段格式和主程序的程序段格式相同。子程序也有自己的程序名，主程序通常引用子程序的程序名来调用子程序。调用子程序的编程格式为：M98 P_L_

其中 P 表示被调用的子程序号，L 表示调用子程序的次数。

主程序调用子程序的例子如下：



主程序执行到 N30 程序段时，开始调用子程序 P100，重复调用三次后程序执行返回主程序指令 N70 M99，程序回到主程序后结束子程序的调用接着执行主程序段号 N40 的内容。如果返回指令用 M99 P_，例如 M99 P100，则在调用了子程序后，将返回到主程序段号为 N100 的程序段去执行。

3.2.2 数控加工程序编制代码

数控加工程序的编制代码主要包括准备功能 G 代码、辅助功能 M 代码、进给功能 F 代码、主轴功能 S 代码、刀具功能 T 代码等。其中准备功能 G 代码和辅助功能 M 代码是程序段的主要组成部分。

1. 准备功能 G 代码

准备功能 G 代码用来规定刀具和工件的相对运动轨迹（即指令插补功能）、机床坐标系、坐标平面、刀具补偿、坐标偏置等多种加工操作，可称为 G 功能或 G 代码。G 代码由地址 G 和后面的二位数字组成，G00~G99 共有 100 种。这些代码中一些常用的准备功能代码的定义对于不同的机床定义几乎相同，但也有很多代码其含义及应用格式并不一致，因此在编程前必须熟悉和了解机床使用说明书或编程手册。常用的准备功能 G 代码如表 3-2 所示。

表 3-2 常用准备功能 G 代码

代码	组	功能	代码	组	功能	代码	组	功能
G00	a	快速点定位	G20	b	英制单位	G80	e	固定循环取消
G01		直线插补	G21		公制单位	G81		固定循环
G02		顺圆插补	G27	g	回参考点检查	~G89		
G03		逆圆插补	G28		回参考点	G90	i	绝对坐标编程
G32		螺纹切削	G29		参考点返回	G91		增量坐标编程
~G33			G40	d	刀补取消	G92	00	预置寄存
G04	00	暂停延时	G41		左刀补			
G17	c	XY 平面选择	G42		右刀补			
G18		ZX 平面选择	G54	f	零点偏置			
G19		YZ 平面选择	~G59					

注：①表中组别中凡有小写字母 a、b、c、d、e 等指示的 G 代码为同一组代码，称为模态指令。

②表中组别为“00”的属非模态代码；其余为模态代码，同组可相互取代。

G 代码按功能类别分为模态代码和非模态代码。模态代码指的是在一个程序段中一经指定，其功能一直保持有效到被以后的程序段中出现同组其他的任一代码所代替。所以在后续的程序段中若需要使用同样的 G 代码可以省略书写这一功能代码。例如连续几段直线加工的程序编制，只需要在第一段直线加工中书写 G01 代码，后面几段的直线加工可以省略书写 G01 代码，直到出现同组其他代码如 G02 顺圆弧加工代码或 G00 快速点定位等代码，这样可以简化加工程序的编制。非模态代码只在当前程序段中有效，下一程序段若需要用到此功能则需要重新书写，不能省略。

2. 辅助功能 M 代码

辅助功能 M 代码是加工过程中对一些辅助器件进行操作控制用的工艺性代码，可称为 M 功能或 M 代码。M 代码也是由地址 M 和两位数字组成。该代码与控制系统插补器运算无关，一般书写在程序段的后面。例如，机床启动主轴的正、反转和停止；冷却液的开关；刀具的更换；程序结束；部件的夹紧或松开等。M00~M99 这 100 种代码中，同样也有一些代码因机

床系统不同而不同，也有相当一部分代码是不指定的。常用的辅助功能 M 代码如表 3-3 所示。

表 3-3 常用辅助功能 M 代码

代码	作用时间	组别	意义	代码	作用时间	组别	意义	代码	作用时间	组别	意义
M00	★	00	程序暂停	M06		00	自动换刀	M19	★		主轴准停
M01	★	00	条件暂停	M07	#		开切削液 1	M30	★	00	程序结束并返回
M02	★	00	程序结束	M08	#	b	开切削液 2	M60	★	00	更换工件
M03	#		主轴正转	M09	★		关切削液	M98		00	子程序调用
M04	#	a	主轴反转	M10			夹紧	M99		00	子程序返回
M05	★		主轴停转	M11		c	松开				

注：①组别为“00”的属非模态代码；其余为模态代码，同组可相互取代。

②作用时间为“★”号者表示该指令功能在程序段指令运行完成后开始作用，“#”号者则表示该指令功能与程序段指令运行同时开始。

3. F、S、T 代码

(1) F 进给功能指令 F 代码。进给功能指令 F 代码指定为刀具向工件进给的相对速度。进给量的单位用 G94 或 G95 来指定。一般表示为 mm/min，即用 G94 来指定进给速度与主轴速度无关的每分钟进给量。当进给速度与主轴转速有关（如车螺纹、攻丝）时单位为 mm/r，用 G95 指定。进给速度有直接指定法和代码法两种表示方法。直接指定法指的是 F 后面跟的数字直接表示进给速度的大小。如 F80 表示进给速度是 80mm/min。目前大多数数控机床在进给速度范围内都实现了无级变速，都采用此方法，这种方法较为直观。代码法指的是 F 后面跟的二位数字并不直接表示进给速度的大小，而是机床进给速度序列的代号，可以是算术级数，也可以是几何级数，用 F00~F99 表示 100 种进给速度，低档数控系统大多数采用此方法。

(2) 转速功能指令 S 代码。转速功能指令 S 代码用来指定主轴的转速，单位为 r/min 或 m/min。同样也有直接指定法和代码法两种表示方法。如 S1000 表示主轴转速为 1000r/min，中档以上的数控机床采用直接指定法的方式来指定主轴转速。而大多数经济型数控机床仍采用代码法来指定。

(3) 刀具功能指令 T 代码。刀具功能指令 T 代码用来选择刀具或刀具偏置。在加工中心机床中，该指令用以自动换刀时选择所需的刀具。在车床中，常用 T 后面跟 4 位数字，如 T0101，前两位 01 为刀具号，后两位 01 为刀具补偿号，在铣镗床中 T 后常跟两位数，用于表示刀具号，刀补号则用 H 代码或 D 代码表示。

上述 F、S 代码和部分 G、M 指令代码都属于模态代码。

3.3 数控加工的工艺特点

不论是手工编程还是自动编程，在 CNC 机床上加工零件，编程之前都要对所加工的零件进行工艺分析，并拟定加工方案，选择合适的刀具，确定切削用量。在编程中，对一些工艺问题（如对刀点、加工路线等）也需要做出处理。因此，程序编制中的工艺分析是一项十分重要的工作。

3.3.1 数控加工工艺的基本特点

在普通机床上零件加工的工序卡片内容比较简单，机床加工走刀路线的安排、切削用量的大小、工序内的工步安排等可由操作者自行决定。而在数控机床上加工零件时，加工零件的全部工艺过程、工艺参数、刀具参数、切削用量及位移参数等都应包含在工序卡片中，在编制程序时预先确定好并编入其中，以此按照程序来控制数控机床自动完成加工。

3.3.2 数控加工工艺的主要内容

数控加工工艺的内容主要包括以下几个方面：

- (1) 适合在数控机床上加工零件的选择。
- (2) 数控加工工艺分析。通过分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯形状、热处理要求等，明确加工内容和技术要求，从而确定零件的加工方案。
- (3) 设计数控加工工艺路线。具体为设计数控加工工序，如工步的划分、零件的定位与夹具/刀具的选择、切削用量的确定等。
- (4) 调整数控加工工序的程序。如工步内容、对刀点、换刀点的选择、走刀路线的确定、刀具的补偿等。

3.3.3 数控加工零件的选定

从零件加工成本出发，从数控机床的使用合理性和经济性并充分发挥数控机床的功能等方面考虑，一般来说只安排零件加工的一部分工序在数控机床上完成。原则上数控机床仅进行较复杂零件重要基准的加工和零件的精加工。可以根据零件图和毛坯来选择适合加工该零件的数控机床；也可根据数控机床来选择适合在该机床上加工的零件。数控加工零件的选择具有以下几个特点：

- (1) 多品种、小批量生产的零件或短期内急需的零件。
- (2) 新产品试制中的零件或需要多次改型的零件。
- (3) 轮廓形状复杂，对加工精度要求较高的零件。
- (4) 用普通机床加工较困难或无法加工（需要昂贵的工艺装备）的零件。
- (5) 价值昂贵，加工中不允许报废的关键零件。

1. 加工方法的选择原则

加工方法的选择原则是保证加工表面的加工精度和表面粗糙度的要求。由于获得同一级精度与表面粗糙度的加工方法有多种，无论是哪种情况，进行选择时要结合零件的轮廓形状复杂程度、尺寸大小、加工精度、零件的数量和热处理要求以及毛坯的材料和类型等。例如对 IT7 级精度的孔采用镗削、铰削、磨削等加工方法均可达到要求。一般小尺寸的箱体孔选择铰孔，孔径较大时选择镗孔，箱体上的孔不宜用磨削，可采用镗削或铰削。此外，应结合工厂实际现有生产设备，合理提高生产率以及降低生产成本等。一般而言，形状比较复杂的轴类零件和由复杂曲线回转形成的模具内型腔选择数控车床加工较好；平面凸轮、样板、形状复杂的平面或立体零件以及模具的内、外型腔等选择在立式数控铣床上加工；卧式数控铣床则适合于加工箱体、泵体、壳体类零件；而大型非圆曲线、曲面、叶轮或者是不仅需要铣削还伴有孔加工的零件适宜在加工中心上加工。常用的加工方法的加工精度与表面粗糙度可查阅有关工艺手册。

2. 加工方案的确定原则

确定加工方案时，零件上比较精确表面的加工首先应根据主要表面的精度和表面粗糙度的要求，初步确定加工方法。同时要结合质量要求、机床情况和毛坯条件来确定最终的加工方案。常常是通过精加工、半精加工和粗加工逐步达到的。例如对于小尺寸的 IT7 级精度的箱体孔，最终的加工方案为精铰。而进行精铰之前需要经过钻孔、扩孔和粗铰等工序的加工。

3.3.4 加工工序的划分

零件加工工序的划分指的是加工零件尽可能被安排在一台数控机床上完成整个零件的加工。如若不能，则应决定其中哪些加工在数控机床上完成，哪些加工在其他机床上完成。工序的划分一般有以下几种方式：

(1) 以零件装夹定位方式与加工部位划分。

由于每个零件结构形状不同，对于加工内容很多的零件可根据零件结构将加工部位分成内形、外形、曲面或平面等几个部分。由于各个部分的技术要求不同，因此零件的装夹定位方式也产生差异。加工外形时以内形定位，加工内形时则以外形定位。根据定位方式的不同来划分工序。一般来说，先平面，再定位面，后加工孔；先形状简单的几何形状加工，再形状复杂的几何形状加工；先精度低的部位加工，再精度高的部位加工。

(2) 按粗、精加工方式划分。

根据零件的形状、尺寸精度、刚度和变形等因素来划分工序，可按粗、精加工分开的原则来划分工序，先粗加工，再精加工。对于易发生变形的零件，为减少粗加工后零件的变形，粗精加工之间最好隔一段时间，以提高零件的加工精度；通常在一次安装中，为防止因切削力太大而引起已精加工表面变形，不允许将零件的某一部分表面加工完毕后，再加工零件的其他表面；否则可能会在对新的表面造成变形以后，再进行精加工。

(3) 按所用刀具划分工序。

为了减少换刀次数，压缩空行程运行时间，减少不必要的定位误差，可按相同刀具集中工序的方法来进行零件加工的工序划分，即在一次装夹中，尽可能使用同一把刀具加工出所有可能加工到的部位，然后更再换另一把刀具加工其他部位。在专用数控机床和加工中心上常采用此法。

3.3.5 工件的安装与夹具的选择

1. 定位装夹的基本原则

在数控机床上加工零件时，定位安装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。为提高数控机床的效率，在确定定位基准与夹紧方案时应注意以下 3 点：

(1) 力求设计、工艺与编程计算的基准统一。

(2) 尽量减少装夹次数，尽可能在一次定位装夹后，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. 选择夹具的基本原则

数控加工的特点对夹具提出了两个基本要求：一是要保证夹具的坐标方向与机床的坐标方向相对固定；二是要协调零件和机床坐标系的尺寸关系。除此之外，还要考虑以下几点：

(1) 当零件加工批量不大时，应尽量采用组合夹具、可调式夹具及其他通用夹具，以缩

短生产准备时间,节省生产费用。当达到一定批量生产时才考虑用专用夹具,并力求结构简单。

(2) 零件的装卸要快速、方便、可靠,以缩短机床的停顿时间。

(3) 夹具上各零部件应不妨碍机床对零件各表面的加工。即夹具要开敞,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)。

此外,为提高数控加工的效率,在成批生产中,还可采用多位、多件夹具。例如在数控铣床或立式加工中心的工作台上,可安装一块与工作台大小一样的平板,既可用它作为大工件的基础板,也可作多个中小工件的公共基础板,依次加工并排装夹的多个中小工件。

3.3.6 对刀点与换刀点的确定

在进行数控加工编程时,往往是将整个刀具浓缩视为一个点,那就是“刀位点”,它是在刀具上用于表现刀具位置的参照点。一般来说,立铣刀、端铣刀的刀位点是刀具轴线与刀具底面的交点;球头铣刀刀位点为球心;镗刀、车刀刀位点为刀尖或刀尖圆弧中心;钻头是钻尖或钻头底面中心;线切割的刀位点则是线电极的轴心与零件面的交点。

对刀操作就是要测定出在程序起点处刀具刀位点(即对刀点,也称起刀点)相对于机床原点以及工件原点的坐标位置。如图3-5所示,对刀点相对于机床原点为 (X_0, Y_0) ,相对于工件原点为 (X_1, Y_1) ,据此便可明确地表示出机床坐标系、工件坐标系和对刀点之间的位置关系。

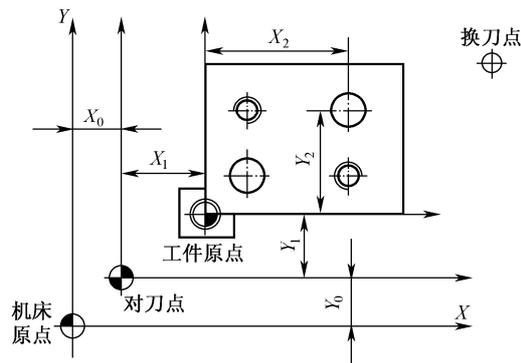


图 3-5 对刀点与换刀点

数控机床对刀时常采用千分表、对刀测头或对刀瞄准仪进行找正对刀,具有很高的对刀精度。对有原点预置功能的 CNC 系统,设定好后,数控系统即将原点坐标存储起来。即使你不小心移动了刀具的相对位置,也可很方便地令其返回到起刀点处。有的还可分别对刀后,一次预置多个原点,调用相应部位的零件加工程序时,其原点自动变换。在编程时,应正确地选择“对刀点”的位置。其大致选择原则是:

- (1) 便于数学处理和简化程序编制。
- (2) 在机床上找正容易,加工中便于检查。
- (3) 引起的加工误差小。

对刀点可以设置在零件、夹具或机床上,为提高零件的加工精度,尽可能设在零件的设计基准或工艺基准上,或与零件的设计基准有一定的尺寸关系。对于以孔定位的零件,可以取孔的中心作为对刀点。成批生产时,为减少多次对刀带来的误差,常将对刀点既作为程序的起

点，也作为程序的终点。

换刀点则是指加工过程中需要换刀时刀具的相对位置点。换刀点往往设在工件的外部，以能顺利换刀、不碰撞工件及其他部件为准。如在铣床上，常以机床参考点为换刀点；在加工中心上，以换刀机械手的固定位置点为换刀点；在车床上，则以刀架远离工件的行程极限点为换刀点。选取的这些点，都是便于计算的相对固定点。

3.3.7 工艺加工路线的确定

在数控加工中，工艺加工路线是指刀具刀位点相对于工件运动的轨迹和方向。编程时，其主要确定原则如下：

(1) 加工方式、路线应保证零件的加工精度和表面粗糙度。如铣削轮廓时，应尽量采用顺铣方式，可减少机床的“颤振”，提高加工质量。

(2) 尽量减少空运行行程，尽量缩短加工路线。

(3) 进、退刀位置应选在不太重要的位置，并且使刀具尽量沿切线方向进、退刀，避免采用法向进、退刀和进给中途停顿而产生刀痕。

在确定工艺加工路线时，还需要考虑零件的加工余量以及机床、刀具的刚度，确定整个的切削是一次走刀还是多次来完成，并且确定是采用逆铣加工还是顺铣加工等。

对点位控制机床，只要求定位精度较高、定位过程尽可能快，而刀具相对于工件的运动路线无关紧要。因此，这类机床应按加工路线最短来安排。但对孔位精度要求较高的孔系加工，还应注意在安排孔加工顺序时，防止将机床坐标轴的反向间隙带入而影响孔位精度。如图 3-6 所示的零件，若按图 (a) 所示路线加工时，由于 5、6 孔与 1、2、3、4 孔定位方向相反，Y 方向反向间隙会使定位误差增加，影响 5、6 孔与其他孔的位置精度。按图 (b) 所示路线，加工完 4 孔后往上多移动一段距离到 P 点，然后再折回来加工 5、6 孔，使方向一致，可避免引入反向间隙。

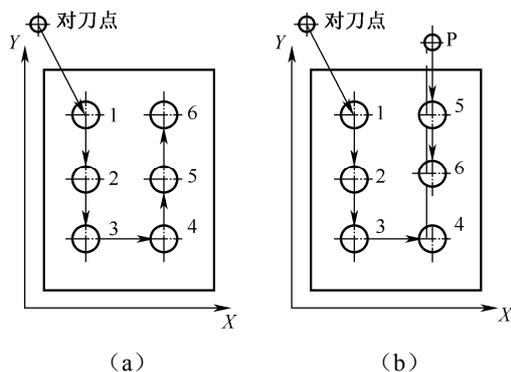


图 3-6 点位加工路线

对于车削，可考虑将毛坯件上过多的余量，特别是含铸、锻硬皮层的余量安排在普通车床上加工。如必须用数控车床加工时，则要注意程序的灵活安排。可以用一些子程序（或粗车循环）对余量过多的部位先作一定的切削加工。在安排粗车路线时，应让每次切削所留的余量相等。如图 3-7 所示，若以 90° 主偏刀分层车外圆，合理的安排应是每一刀的切削终点依次提前一小段距离 e (e 可取 0.05mm)。这样即可防止主切削刃在每次切削终点处受到瞬时重负

荷的冲击。当刀具的主偏角大于但仍接近 90° 时，也宜作出层层递退的安排，经验表明，这对延长粗加工刀具的寿命是有利的。

铣削平面零件时，一般采用立铣刀侧刃进行切削。为减少接刀痕迹，保证零件表面质量，应对刀具的切入和切出程序精心设计。如图 3-8 (a) 所示，铣削外表面轮廓时，铣刀的切入、切出点应沿零件轮廓曲线的延长线上切向切入和切出零件表面，而不应该法向直接切入零件，引入点选在尖点处较妥。如图 3-8 (b) 所示，铣削内轮廓表面时，切入和切出无法外延，这时铣刀可沿法线方向切入和切出或加引入引出弧改向，并将其切入、切出点选在零件轮廓两几何元素的交点处。但是，在法向切入切出时，还应避免产生过切的可能性。

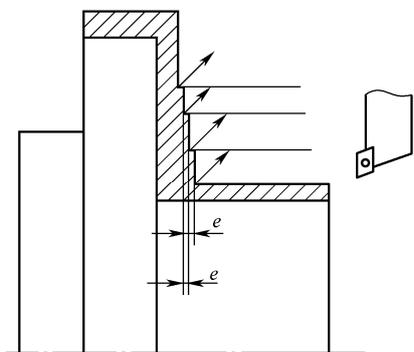


图 3-7 90° 主偏刀车外圆的情况

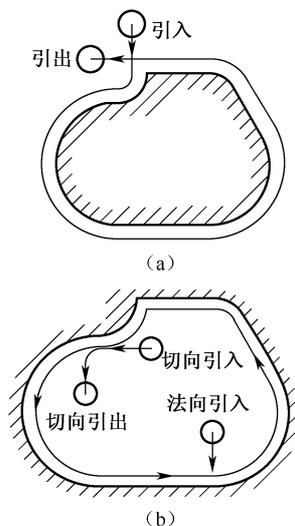


图 3-8 切入和切出

对于槽形铣削，若为通槽，可采用行切法来回铣切，走刀换向在工件外部进行，如图 3-9 (a) 所示。若为封闭凹槽，可有图示 (b)、(c)、(d) 3 种走刀方案。图 (b) 为行切法，图 (c) 为环切法，图 (d) 为先用行切法，最后用环切法一刀光整轮廓表面。这 3 种方案中，(b) 图方案最差，(d) 图方案最好。如图 3-10 所示，若封闭凹槽内还有形状凸起的岛屿，则以保证每次走刀路线与轮廓的交点数不超过两个为原则，按图 (a) 方式将岛屿两侧视为两个内槽分别进行切削，最后用环切方式对整个槽形内外轮廓精切一刀。若按图 (b) 方式，来回地从一侧顺次铣切到另一侧，必然会因频繁地抬刀和下刀而增加工时。如图 (c) 所示，当岛屿间形成的槽缝小于刀具直径时，必然将槽分隔成几个区域，若从最短工时考虑，可将各区视为一个独立的槽，先后完成粗、精加工后再去加工另一个槽区。若从预防加工变形考虑，则应在所有的区域完成粗铣后再统一对所有的区域先后进行精铣。

对于曲面铣削，常用球头铣刀采用“行切法”进行加工。如图 3-11 所示的大叶片类零件，当采用图 3-11 (a) 所示沿纵向来回切削的加工路线时，每次沿母线方向加工，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 3-11 (b) 所示沿横向来回切削的加工路线时，符合这类零件数据给出情况，便于加工后的检验，叶形准确度高，但程序较多。

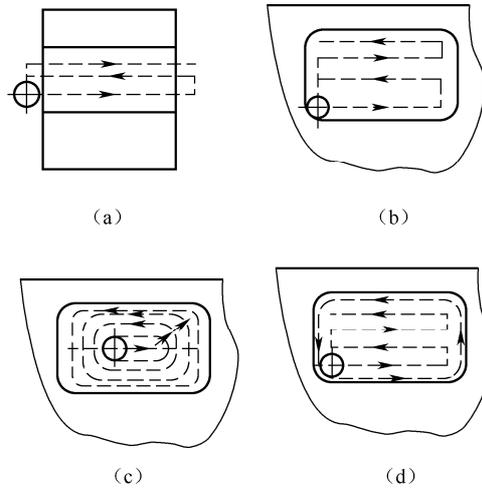


图 3-9 铣槽方案

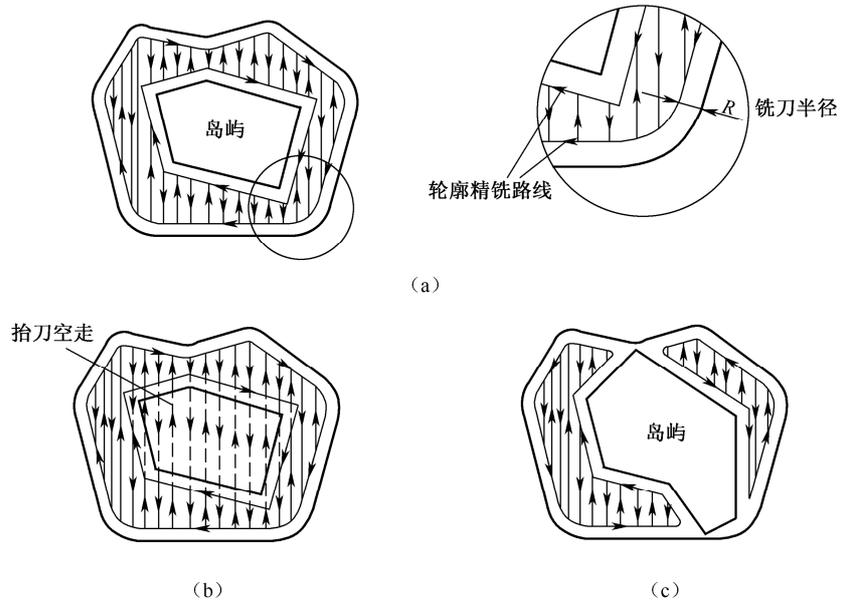


图 3-10 带岛屿的槽形铣削

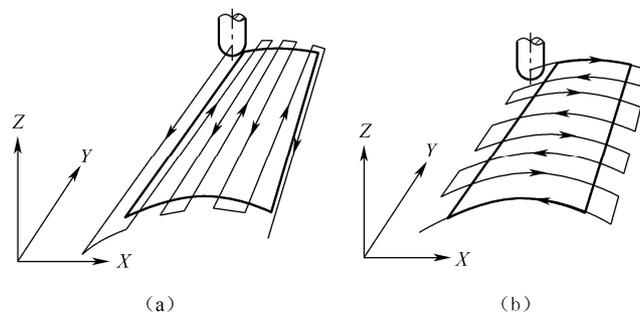


图 3-11 大叶片加工

对边界敞开的曲面，球头刀可由边界外开始加工。曲面加工若用两坐标联动的三坐标铣床，则采用任意两轴联动插补，第三轴作单独的周期性进刀的“两维半”联动加工方法，如图 3-12 (a) 所示。此时刀具中心轨迹为等距曲面与行切面的交线，是一条平面曲线，编程计算比较简单，因此这种方法常用于曲率变化不大及精度要求不高的粗加工中。若用三坐标联动插补的行切加工方法，如图 3-12 (b) 所示，切削刃形成的轨迹为曲面与行切面的交线即平面曲线，但此时刀具中心轨迹则是一空间曲线，其编程计算较为复杂，且要求机床必须具备三轴联动功能。有些空间曲面零件的曲面形成较为复杂，即使采用三轴联动的机床，其编程加工亦很复杂。但根据其曲面形成规律，旋转变动一下坐标方向后其轨迹曲线则比较简单，如图 3-12 (c) 所示，据此可采用能进行相应调整的四坐标或五坐标联动的数控机床进行加工控制，以获得较高的加工质量。当然，这种刀具中心轨迹必须依赖自动编程软件来进行计算。

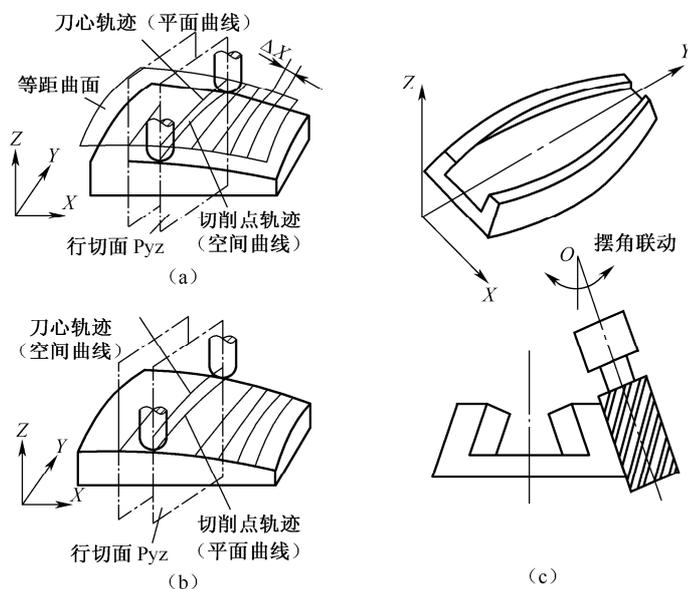


图 3-12 空间曲面的加工

3.3.8 刀具与切削用量的选择

1. 刀具的选择

选择刀具通常要考虑机床的加工能力、工序内容、工件材料等因素。数控加工不仅要求刀具的精度高、刚度好、耐用度高，而且要求尺寸稳定、安装调整方便。

由于数控加工一般不用钻模，钻孔刚度较差。所以要求孔的高径比应不大于 5，钻头两主刀刃应刃磨得对称以减少侧向力。钻孔前应用大直径钻头先镗一个内锥坑或顶窝，作为钻头切入时的定心锥面，同时也作为孔口的倒角。钻大孔时，可采用刚度较大的硬质合金扁钻，钻浅孔时宜用硬质合金的浅孔钻，以提高效率和质量。用加工中心铰孔可达 IT7~IT9 级精度，表面粗糙度 $Ra1.6\sim 0.8\mu\text{m}$ 。铰前要求小于 $Ra6.3\mu\text{m}$ 。精铰可采用浮动铰刀，但铰前孔口要倒角。铰刀两刀刃对称度要控制在 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ 之内。镗孔则是悬臂加工，应采用对称的两刃或两

刃以上的镗刀头进行切削，以平衡径向力，减轻镗削振动。振动大时可采用减振镗杆。对阶梯孔的镗削加工采用组合镗刀，以提高镗削效率。精镗宜采用微调镗刀。

数控车兼作粗精车削，粗车时要选强度高、耐用度好的刀具，以便满足粗车时大吃刀量、大进给量的要求。精车时，要选精度高、耐用度好的刀具，以保证加工精度的要求。此外，为减少换刀时间和方便对刀，应尽可能采用机夹刀和机夹刀片。夹紧刀片的方式要选择得比较合理，刀片最好选择涂层硬质合金刀片。应根据零件的材料种类、硬度、加工表面粗糙度要求和加工余量的已知条件来决定刀片的几何结构（如刀尖圆角）、进给量、切削速度和刀片型号。具体选择可参考相关切削用量手册。

铣削加工选取刀具时，要使刀具的尺寸与被加工工件的表面尺寸和形状相适应。生产中，平面零件周边轮廓的加工常采用立铣刀。铣削平面时，应选硬质合金刀片铣刀；加工凸台、凹槽时，选高速钢立铣刀；加工毛坯表面或粗加工孔时，可选镶硬质合金的立铣刀或玉米铣刀；对一些立体型面和变斜角轮廓外形的加工，常采用球头铣刀、环形铣刀、鼓形刀、锥形刀和盘形刀。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，常采用鼓形刀或锥形刀来加工一些变斜角零件。若加镶齿盘铣刀，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十倍，并可获得好的加工精度，如图3-13所示。

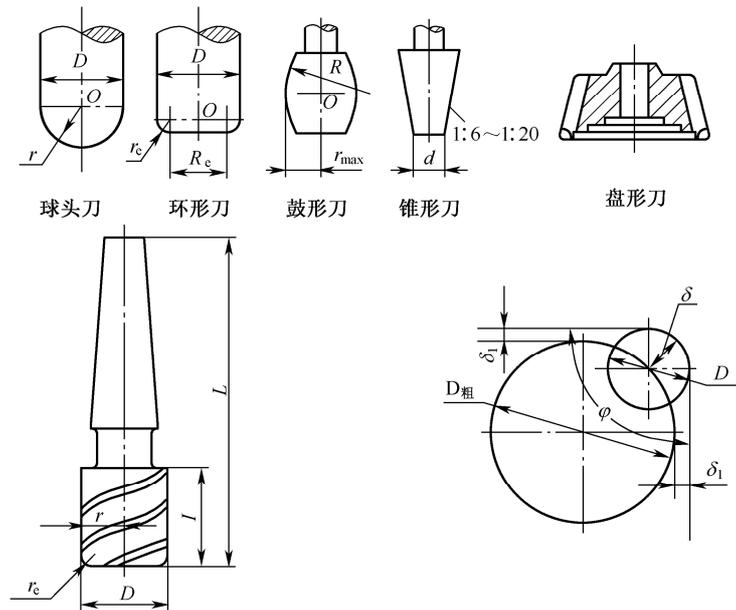


图3-13 铣刀类型及其尺寸关系

常用立铣刀具的有关参数可按下述经验数据选取：

- (1) 刀具半径 r 应小于零件内轮廓面的最小曲率半径 ρ ，一般取 $r = (0.8 \sim 0.9) \rho$ 。
- (2) 零件的加工高度 $H = (1/4 \sim 1/6) r$ ，以保证刀具有足够的刚度。
- (3) 对深槽孔，选取 $l = H + (5 \sim 10) \text{ mm}$ 。 l 为刀具切削部分长度， H 为零件高度。
- (4) 加工外形及通槽时，选取 $l = H + r_e + (5 \sim 10) \text{ mm}$ 。 r_e 为刀尖转角半径。

(5) 粗加工内轮廓面时, 铣刀最大直径 $D_{\text{粗}}$ 可按下式计算:

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

式中: D 为轮廓的最小凹圆角半径; δ 为圆角邻边夹角等分线上的精加工余量; δ_1 为精加工余量; φ 为圆角两邻边的最小夹角。

(6) 加工肋时, 刀具直径为 $D = (5 \sim 10) b$ (b 为肋的厚度)。

在加工中心上, 各种刀具分别安装在刀库上, 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 (3 种规格) 和锥柄 (4 种规格) 两类, 共包括 16 种不同用途的刀具。

2. 切削用量的确定

切削用量包括主轴转速 (切削速度)、背吃刀量、进给量。对于不同的加工方法, 需要选择不同的切削用量, 并应编入程序单内。

合理选择切削用量的原则是, 粗加工时, 一般以提高生产率为主, 但也应考虑经济性和加工成本, 通常选择较大的背吃刀量和进给量, 采用较低的切削速度; 半精加工和精加工时, 应在保证加工质量的前提下, 兼顾切削效率、经济性和加工成本, 通常选择较小的背吃刀量和进给量, 并选用切削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。具体数值应根据机床说明书、切削用量手册, 并结合经验而定。

(1) 背吃刀量 a_P (mm), 亦称切削深度。主要根据机床、夹具、刀具和工件的刚度来决定。在刚度允许的情况下, 应以最少的进给次数切除加工余量, 最好一次切除余量, 以便提高生产效率。精加工时, 则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。在数控机床上, 精加工余量可小于普通机床, 一般取 (0.2~0.5) mm。

(2) 主轴转速 n (r/min) 主要根据允许的切削速度 v_c (m/min) 选取。

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}$$

式中, v_c 为切削速度, 由刀具的耐用度决定; D 为工件或刀具直径 (mm)。

主轴转速 n 要根据计算值在机床说明书中选取标准值, 并填入程序单中。

(3) 进给量 f (mm/r) 和进给速度 F (mm/min) 是数控机床切削用量中的重要参数, 主要根据零件的加工精度和表面粗糙度要求以及刀具、工件材料性质选取。

车削时: $F = f \cdot n$

铣削时: $F = f_z \cdot z \cdot n$ 其中 z 为铣刀齿数, f_z 为每齿进给量 (mm/z)。

当加工精度、表面粗糙度要求高时, 进给速度 (进给量) 应选小些, 一般在 20~50mm/min 范围内选取。粗加工时, 为缩短切削时间, 一般进给量就取得大些。工件材料较软时, 可选用较大的进给量, 反之, 应选较小的进给量。

车、铣、钻等加工方式下的切削用量可参考表 3-4 至表 3-7 选取。

表 3-4 数控车削用量推荐表

工件材料	加工方式	背吃刀量 mm	切削速度 m/min	进给量 mm/r	刀具材料
碳素钢 $\sigma_b > 600\text{MPa}$	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	0.2~0.3	120~150	0.1~0.2	
	车螺纹		70~100	导程	
	钻中心孔		500~800r/min		W18Cr4V
	钻孔		25~30	0.1~0.2	
	切断 (宽度<5mm)		70~110	0.1~0.2	YT 类
合金钢 $\sigma_b = 1470\text{MPa}$	粗加工	2~3	50~80	0.2~0.4	YT 类
	精加工	0.1~0.15	60~100	0.1~0.2	
	切断 (宽度<5mm)		40~70	0.1~0.2	
铸铁 200HBS 以下	粗加工	2~3	50~70	0.2~0.4	YG 类
	精加工	0.1~0.15	70~100	0.1~0.2	
	切断 (宽度<5mm)		50~70	0.1~0.2	
铝	粗加工	2~3	600~1000	0.2~0.4	YG 类
	精加工	0.2~0.3	800~1200	0.1~0.2	
	切断 (宽度<5mm)		600~1000	0.1~0.2	
	粗加工	2~4	400~500	0.2~0.4	
黄铜	精加工	0.1~0.15	450~600	0.1~0.2	YG 类
	切断 (宽度<5mm)		400~500	0.1~0.2	

表 3-5 铣刀的切削速度 (m/min)

工件材料	铣刀材料					
	碳素钢	高速钢	超高速钢	Stellite	YT	YG
铝	75~150	150~300		240~460		300~600
黄铜	12~25	20~50		45~75		100~180
青铜 (硬)	10~20	20~40		30~50		60~130
青铜 (最硬)		10~15	15~20			40~60
铸铁 (软)	10~12	15~25	18~35	28~40		75~100
铸铁 (硬)		10~15	10~20	18~28		45~60
铸铁 (冷硬)			10~15	12~28		30~60
可锻铸铁	10~15	20~30	25~40	35~45		75~110
铜 (软)	10~14	18~28	20~30		45~75	
铜 (中)	10~15	15~25	18~28		40~60	
铜 (硬)		10~15	12~20		30~45	

表 3-6 铣刀进给量 (mm/每齿)

工件材料 \ 铣刀类别	圆柱铣刀	面铣刀	立铣刀	杆铣刀	成形铣刀	高速钢嵌齿铣刀	硬质合金嵌齿铣刀
铸铁	0.2	0.2	0.07	0.05	0.04	0.3	0.1
软(中硬)钢	0.2	0.2	0.07	0.05	0.04	0.3	0.09
硬钢	0.15	0.15	0.06	0.04	0.03	0.2	0.08
镍铬钢	0.1	0.1	0.05	0.02	0.02	0.15	0.06
高镍铬钢	0.1	0.1	0.04	0.02	0.02	0.1	0.05
可锻铸铁	0.2	0.15	0.07	0.05	0.04	0.3	0.09
铸铁	0.15	0.1	0.07	0.05	0.04	0.2	0.08
青铜	0.15	0.15	0.07	0.05	0.04	0.3	0.1
黄铜	0.2	0.2	0.07	0.05	0.04	0.3	0.21
铝	0.1	0.1	0.07	0.05	0.04	0.2	0.1
Al-Si 合金	0.1	0.1	0.07	0.05	0.04	0.18	0.08
Mg-Al-Zn 合金	0.1	0.1	0.07	0.04	0.03	0.15	0.08
Al-Cu-Mg 合金 Al-Cu-Si	0.15	0.1	0.07	0.05	0.04	0.2	0.1

表 3-7 高速钢钻头的切削用量 (切削速度 v: m/min, 进给量 f: mm/r)

工件材料	σ_b (MPa)	钻头直径 (mm)									
		2~5		6~11		12~18		19~25		26~50	
		v	f	v	f	v	f	v	f	v	f
钢	<490	20~25	0.1	20~25	0.2	30~35	0.2	30~35	0.3	25~30	0.4
	490~686	20~25	0.1	20~25	0.2	20~25	0.2	25~30	0.2	25	0.2
	686~882	15~18	0.05	15~18	0.1	15~18	0.2	18~22	0.3	15~20	0.35
	882~1078	10~14	0.05	10~14	0.1	12~18	0.15	16~20	0.2	14~16	0.3
铸	118~176	25~30	0.1	30~40	0.2	25~30	0.35	20	0.6	20	1.0
铁	176~294	15~18	0.1	14~18	0.15	16~20	0.2	16~	0.3	16~18	0.4
黄铜	软	<50	0.05	<50	0.15	<50	0.3	<50	0.45	<50	--
青铜	软	<35	0.05	<35	0.1	<35	0.2	<35	0.35	<35	--

实际上现代数控机床的操作面板上一般都有主轴转速和进给速度等修调(倍率)开关,可在加工过程中人工随时调整修正,有较大的灵活性。

数控加工工艺的主要内容有:

(1) 选择适合在数控机床上加工的零件,并确定其加工的工序内容。

(2) 通过分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯形状、热处理要求等,明确加工内容和技术要求,从而确定零件的加工方案。

3.3.9 数控加工的工艺文件

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,

同时还为产品零件重复生产做了技术上的必要工艺资料积累和储备。目前数控加工工艺文件尚未制定国家统一标准,各企业一般都根据本单位的特点制定了一些必要的工艺文件,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。

1. 工序卡

由编程员根据图纸和加工任务书编制数控加工工艺和作业内容,并反映使用的辅具、刀具和切削参数、切削液等,工序卡中应按已确定的工步顺序填写。如果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。不同的数控机床,其工序卡也有差别。

上述座架零件在数控机床上的加工安排是:先用端面铣刀铣出上表面,再用立铣刀铣四周侧面及A、B工作面,最后用钻头分别钻6个小孔和两个大孔。填写工序卡如表3-8所示。

表 3-8 数控加工工序卡片

xxx 厂		数控加工工序卡片		产品名称代号		零件名称		零件图号	
						座架		WD-9901	
工艺序号		程序编号	夹具名称	夹具编号		使用设备		车间	
			台钳			XH713A		数控	
工步号	工步作业内容		加工面	刀具号	刀具规格	主轴转速	进给速度	切削深度	备注
1	φ40 面铣刀铣上表面		上表面	T01	φ40 面铣刀	500	200	+15	
2	φ20 立铣刀铣四周侧面		四侧面	T02	φ20 立铣刀	600	200	-11	
3	φ20 立铣刀铣 A、B 台阶面		A、B 面	T02	φ20 立铣刀	600	200	0	
4	φ6 钻头钻6个小孔		小孔 6	T03	φ6 钻头	800	100	-27	
5	φ14 钻头钻2个大孔		大孔 2	T04	φ14 钻头	600	80	-28	
编制		审核		批准		年月日		共页	第页

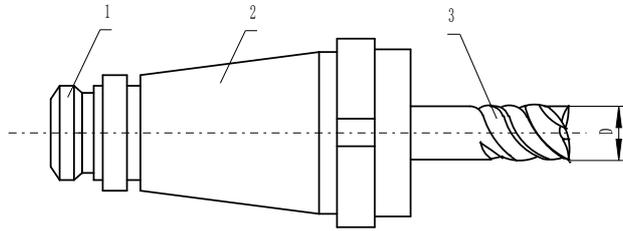
2. 数控刀具调整单

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。其格式如表3-9所示。

表 3-9 数控刀具卡片

零件图号		WD-9901		数控刀具卡片			使用设备	
刀具名称		立铣刀					XH713A	
刀具编号		T02		换刀方式	自动	程序编号	O0002	
刀 具 组 成	序号	编号		刀具名称	规格	数量	备注	
	1	vfd.17550 x 4		拉钉				
	2	GB1106-85		刀柄				
	3			铣刀	φ20 X 80	1		
	4			筒夹	ER40-20	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输入的主要依据，其格式如表 3-10 所示。

表 3-10 数控刀具明细表

零件图号		零件名称		材 料	数 控 刀 具			程 序 编 号		车 间	使 用 设 备
WD-9901		座架		20#	明 细 表					数 控	XH713A
刀 号	刀 位 号	刀 具 名 称	刀 具 图 号	刀 具			刀 补		换 刀	加 工 部 位	
				直 径 (mm)		长 度	地 址		方 式		
				实 用	补 偿	设 定	直 径	长 度	自 动 / 手 动		
T01		面铣刀		$\phi 40$		-310		H01	自动	上表面	
T02		立铣刀		$\phi 20$	R10	-295	D02	H02	自动	侧面/A、B 面	
T03		钻头		$\phi 6$		-255		H03	自动	小孔	
T04		钻头		$\phi 14$		-230		H04	自动	大孔	
编 制		审 核		批 准		年 月 日		共 页		第 页	

3.4 典型零件的加工编程

3.4.1 数控车削加工编程实例

1. 零件加工工艺分析和处理

工艺性分析通常从零件结构形状的复杂程度、位置及尺寸精度的可控制程度、材料难加工程度几个方面进行分析说明。

(1) 零件的结构形状：图 3-14 所示零件属简单轮廓回转体轴类零件，整体结构清晰简单。工件大体由轴向台阶、圆锥面、圆弧成型面等轮廓要素组成，无薄壁窄槽等难加工的特殊部位，工艺性良好，可以通过车削加工来完成。因其轮廓要素中具有锥面和圆弧成型面，普通车床加工比较困难，需要采用数控车床。需要调头加工。

(2) 零件的尺寸精度要求：从图可以看出零件的总体尺寸精度要求不是很高。有右端径向尺寸 $\phi 27_{-0.08}^0$ (IT10 级)、径向尺寸 $\phi 35_{-0.15}^0$ (IT11 级)、左端轴 $\phi 40_{-0.15}^0$ (IT11 级)、轴向尺寸 38.5 ± 0.05 (IT10 级)、 $18_{-0.1}^0$ (IT11 级)；有几处表面粗糙度要求为 $1.6\mu\text{m}$ 和 $3.2\mu\text{m}$ ，采用

粗车半精车即可达到零件加工的要求。

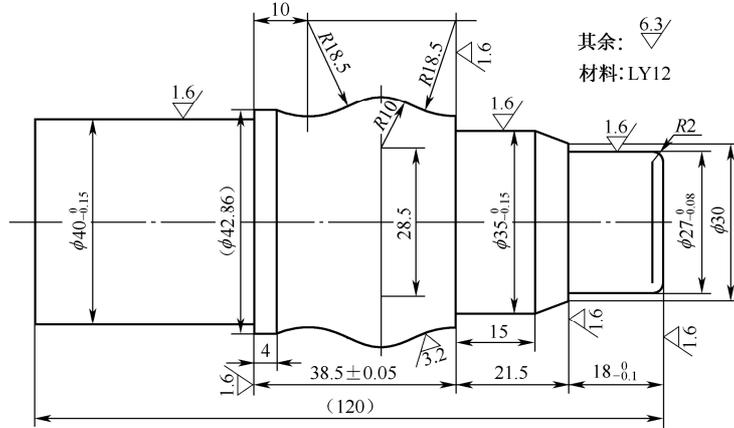


图 3-14 车削零件图

(3) 零件的材料性能：该零件材料为硬铝 LY12，切削加工性能良好。由于铝材塑性好，在加工过程中易粘刀而形成积屑瘤，故加工过程中要求刀具要锋利、冷却充分。

(4) 加工方案的设计：该零件的结构形状是中间大、两头小，可以从以下两个方案中进行选择：

方案 1：采用锯床下料、锯切长度超过 125mm、 $\phi 50$ 以上的圆棒料作毛坯，先加工一端后再调头加工另一端。

方案 2：采用直径 $\phi 50$ 以上的长圆棒料，穿越主轴孔后一端夹持，使用左右偏刀分别车削左右两端，最后由切断刀切断得到总长。继续送料后可接着加工下一件。

对以上两个方案进行比较，方案 1 在使用普通三爪装夹的情形下，总长及两端轴向相对位置不容易保证，调头装夹也会使得两端轴颈同轴度降低，但需要使用的刀具较少。若为大批量生产类型要求，则需要制作精密软爪定位或进行装夹定位方案的设计，以减少调头对刀的麻烦和由此引起的总长尺寸误差。方案 2 是一次装夹加工左右两端，总长及两端轴向相对位置容易保证，两端轴颈同轴度较高，但需要使用多把车刀（左右偏刀和切断刀），较适合于精度要求较高或大批量生产类型。

该零件的总体加工工艺方案如表 3-11 和表 3-12 所示。

表 3-11 总体加工工艺方案（1）

序号	工序名称	工序内容	刀具/量具	夹具	设备
1	备料	$\phi 50 \times 125$ 冷轧圆棒料	带锯/锯条		锯床
2	车左端	车左端 $\phi 40 \times 42$ 台肩	焊接外圆车刀	三爪卡盘	数控车床/普通车床
3	检	检验 $\phi 40_{-0.15}^0$	游标卡尺		
4	调头车右端	车右端各台肩及轮廓成型面	焊接外圆车刀	三爪卡盘	数控车床
5	检	检验 $\phi 27_{-0.08}^0$ 、 $\phi 35_{-0.15}^0$ 、 $18_{-0.15}^0$ 、 38 ± 0.05	游标卡尺、深度尺		
6	入库				

表 3-12 总体加工工艺流程方案 (2)

序号	工序名称	工序内容	刀具/量具	夹具	设备
1	备料	$\phi 50 \times 2500$ 圆棒料			冷轧
2	车一端	车右端 $\phi 40 \times 42$ 台肩	左偏外圆车刀	三爪卡盘	数控车床
	车另一端	车左端各台肩及轮廓成型面	右偏外圆车刀	三爪卡盘	数控车床
	切断	按总长分割切断	切断刀	三爪卡盘	数控车床
3	检	检验 $\phi 27_{-0.08}^0$ 、 $\phi 35_{-0.15}^0$ 、 $18_{-0.15}^0$ 、 38 ± 0.05	游标卡尺、深度尺		
4	入库				

由于该零件属单件小批量生产类型, 图纸中对总长尺寸及两端同轴度也没有提出特别高的要求, 因此选择方案 1 进行工艺设计。

(5) 加工路线的确定。由于零件加工精度要求不是太高, 采用粗、精车即可保证。按照“先粗后精、先易后难”的工序划分原则, 因零件左端结构简单, 且轴颈尺寸较大, 先粗、精加工左端 $\phi 40 \times 42$ 的台肩作调头加工时装夹定位的精基准, 再粗、精加工右端复杂台肩及圆弧成型面。左端加工时可将左端圆弧曲面部分粗加工完成, 调头加工右侧时可连续走刀将圆弧成型面一起精加工出来, 以减少使用刀具数量并保证圆弧面的完整, 避免对接加工产生接刀痕。先加工左端尺寸较大的 $\phi 40$ 长轴颈部分, 可确保调头夹持时获得较好的刚性。

该零件加工顺序及装夹方案如图 3-15 和图 3-16 所示。

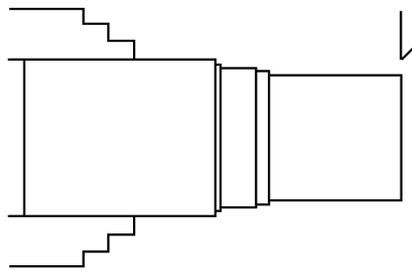


图 3-15 左端简单台肩加工

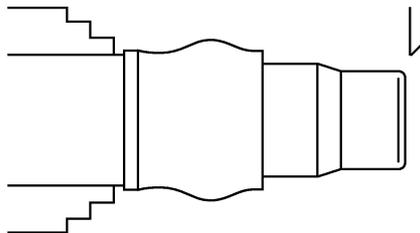


图 3-16 右端复杂台肩及圆弧面加工

(6) 刀具及设备的选用。由于采用调头分别车削两端，完成零件的加工只需要用一把外圆车刀即可。毛坯材料为硬铝 LY12，选择高速钢材质的刀具即可，刀具必须刃磨锋利，前角约 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。由于零件中有半径为 R10 和 R18.5 的凹凸圆弧成型面，从交接处切线角度分析，外圆车刀的副偏角必须大于 30° ，如图 3-17 所示。若使用副偏角小于 30° 的外圆车刀，则必须在两端调头加工前后分别进行粗、精车对接加工，在一般三爪卡盘装夹定位的条件下，容易产生接痕。该零件结构简单且具有一定长度的稳定夹持表面，不需要特殊的夹具，使用三爪卡盘即可。

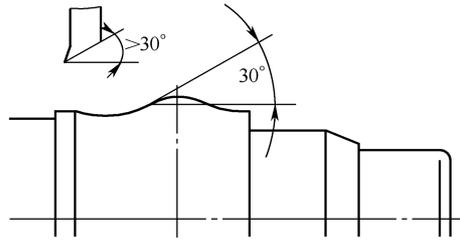


图 3-17 外圆车刀的副偏角必须大于 30°

如果使用机夹车刀，以副偏角要大于 30° 的要求，应选用 J 形刀杆、V 形刀片，参照 CK616I 机床刀架允许装刀要求，可选用 16×16 或 20×20 刀片的刀杆，因此最后应选用的机夹车刀型号为 SVJCR1616-H16、SVJCR2020-K16，刀片型号为 VC 1604。

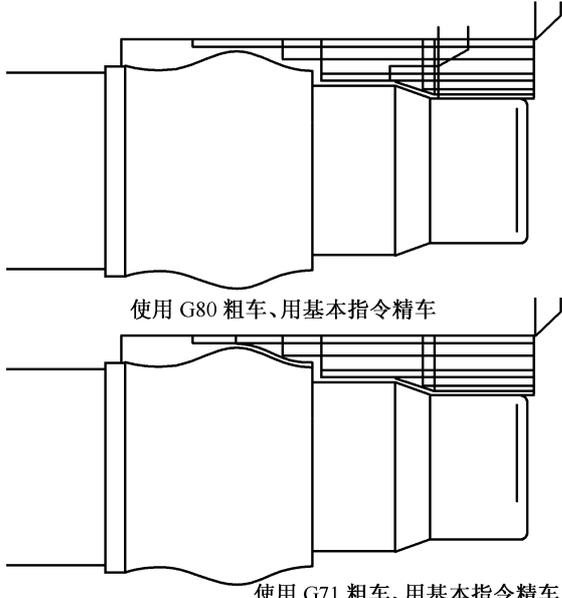
(7) 起刀位置及走刀路线。左端车削加工除 $\Phi 40$ 的轴颈需要精车到尺寸外，其余仅作台肩粗车。车削的走刀路线如表 3-13 所示。

表 3-13 左端台肩车削走刀路线图

数控加工走刀路线图	零件图号	C01	工序号	2	工步号		程序号		
机床型号	CK616i	程序号	加工内容	车左端台肩			第 页	共 页	
							<p>编程说明： 在考虑余量的基础上，使用 G80 循环作粗车，根据背吃刀量为分层，每层切削终点的 Z 向应保留精切余量；最后使用基本指令作连续轮廓精修编程</p>		
							编程		
							校对		
							审批		
节点：0 (52, 2) 1 (44.5, -60) 2 (42.86, -57) 3 (40, -42)									
符号									
含义	抬刀	下刀	编程原点	起刀点	走刀方向	刀路相交	爬斜坡	钻孔	行切

调头装夹车右端时可使用 G80 粗车后直接进行轮廓精车（包括圆弧成型面）。使用 G80 对锥面作半精车时，要考虑外偏和延伸量后进行节点计算。右端台肩及圆弧成型面车削加工的走刀路线如表 3-14 所示。

表 3-14 右端台肩及圆弧成型面车削走刀路线图

数控加工走刀路线图	零件图号	C01	工序号	2	工步号		程序号		
机床型号	CK616i	程序号	加工内容	车左端台肩			第 页	共 页	
							编程说明： 在考虑余量的基础上，使用 G80 循环作粗车，根据背吃刀量人为分层，每层切削终点的 Z 向应保留精切余量；最后使用基本指令作连续轮廓精修编程。 也可使用 G71 粗车复合循环指令作粗车，编程更简单		
							编程		
							校对		
							审批		
符号									
含义	拾刀	下刀	编程原点	起刀点	走刀方向	刀路相交	爬斜坡	钻孔	行切

(8) 切削用量的选用。由切削参数资料查得，高速钢刀具车削铝合金材料时推荐 $v_c=15\sim 200\text{m/min}$ ，按车削 $\phi 40$ 直径计算，其主轴转速 $N=1000v_c/\pi D$ 为 $120\sim 1600\text{r/min}$ ，考虑机床刚性问题，粗车时 $S=600\text{r/min}$ ， $a_p=2\text{mm}$ ，精车时 $S=800\text{r/min}$ ， $a_p=0.1\sim 0.2\text{mm}$ 。切削用量如表 3-15 所示。

表 3-15 切削用量选用数据

工件材料	加工方式	背吃刀量 (mm)	主轴转速 (r/min)	进给量 (mm/r)	进给速度 (mm/min)
硬铝 LY12	粗加工	1~2	600	0.2~0.4	
	精加工	0.1~0.2	800	0.1~0.2	

(9) 数控加工工序卡片，如表 3-16 和表 3-17 所示。

表 3-16 左端车削加工工序卡片

产品名称	数控加工工序卡片	零(部)件图号	零(部)件代号	工序名称	工序号	
成型轴	卡片	01	WTC-C01	左端车削		
材料名称	材料牌号					
硬铝	LY12					
机床名称	机床型号					
数控车床	CK616i					
夹具名称	夹具编号					
工步	工作内容	刀具	量具	主轴转速 N (r/min)	背吃刀量 (mm)	进给速度 F (mm/min)
1	车左端台肩 $\Phi 44.5$	外圆刀	游标卡尺	600	2.25	80
2	精车左端台肩 $\Phi 42.86$	外圆刀		800	1mm	80
3	精车左端台肩 $\Phi 40$	外圆刀		800	1.43mm	30
4	检验					
5						

表 3-17 右端车削加工工序卡片

产品名称	数控加工工序卡片	零(部)件图号	零(部)件代号	工序名称	工序号	
成型轴	卡片	01	WTC-C01	右端车削		
材料名称	材料牌号					
硬铝	LY12					
机床名称	机床型号					
数控车床	CK616i					
夹具名称	夹具编号					
工步	工作内容	刀具	量具	主轴转速 N (r/min)	背吃刀量 (mm)	进给速度 F (mm/min)
1	粗车右端台肩	外圆刀	游标卡尺	600	1.2mm	80
2	精车右端轮廓	外圆刀		800	0.2mm	30
3	检验					
4						

2. 零件加工程序设计

程序编制，如表 3-18 和表 3-19 所示。

表 3-18 零件左端加工程序

程序	释义
O0001	程序序号
T0101	选刀，建立坐标系
G94G90G00X52Z2S600M3	快速定位到起刀点
M08	打开切削液
G80X44.5Z-59F80M08	车左端台肩 $\Phi 44.5$
X42.86Z-57S800	车左端台肩 $\Phi 42.86$
X40Z-42	精车左端台肩 $\Phi 40$
M9	关闭切削液
M5	停止主轴
M30	程序结束

表 3-19 零件右端

程序	释义
O0001	程序序号
T0101	选刀，建立坐标系
G90G00X52Z5S600M3	快速定位到起刀点
M8	打开切削液
G71U1.5R2P100Q200E0.2F80	粗车右端阶梯
N100G01X0F30S800	精车程序起始行
Z0	
X27Z0R2	
X27Z-17.95	
X30	
X34.925Z-24.45	
Z-39.45	
X40.86	
G02X45.82Z-48.75R18.5	
G03X48.82Z-58.75R10	
G02X42.86Z-74R18.5	
N200 G01X52	精车程序终止行
G0 Z5 M9	返回起刀点、关闭切削液
M5	关闭主轴
M30	程序结束

3.4.2 数控铣削加工编程实例

1. 零件加工分析

(1) 零件的结构形状。该零件属典型的轮廓加工阶台类零件，轮廓描述清晰。工件大体

结构是由3个轮廓凸台和矩形台阶所组成。最上层为一柱台，第二层为五边形凸台，第三层为带凸凹转角的正方形阶台，右侧为一矩形台肩，如图3-18所示。

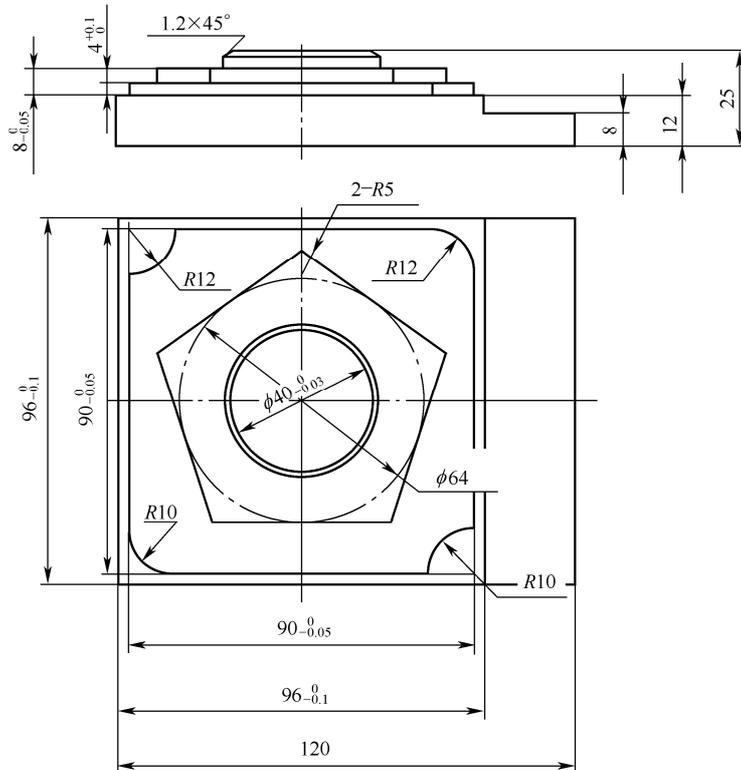


图 3-18 铣削零件图

(2) 零件的尺寸精度要求：零件的尺寸标注完整，从基座零件图可以看出，该零件有几处尺寸精度要求较高，它们分别是 $90_{-0.05}^0$ (IT 7~8)、 $40_{-0.03}^0$ (IT 7~8)、深度 $8_{-0.05}^0$ (IT 9~10)、顶部直径 $\phi 40_{-0.03}^0$ (IT 7~8)。精度要求较高的部位要合理地分配精加工余量；一般情况硬铝精加工余量为单边 0.2~0.3mm。

(3) 零件的材料性能及装夹：该零件材料为硬铝 LY12，切削加工性能良好。工艺过程主要涉及轮廓铣削，由于毛坯面简单规则，铣削加工时利用通用的装夹定位工具——平口钳即可。

固定钳口边可限制 Y 向移动、Z 向旋转自由度。

等高垫铁可限制 Z 向移动和 X、Y 向旋转自由度。

批量加工时可增设一个横向定位的挡块来限制 X 向移动自由度。

(4) 加工方案及加工路线的确定。该零件整体结构较简单，主要是轮廓铣削和矩形台肩面铣削。总体加工工艺方案可以采用：①铣六面：上下平面、前后侧平面和左右侧平面，可用面铣刀在普通铣床上铣出；②正面台阶轮廓数控铣削：各轮廓阶台因有一定的斜线和圆弧要素，且尺寸精度相对较高，需要在数控铣床或加工中心上实现，如图 3-19 所示。主要有以下两个方案进行选择：

方案 1：由上而下逐层铣削，按先粗后精原则先铣削去除柱台周边余料，后铣削柱台；再

同样地铣削出五边形轮廓、正方形带转角轮廓；最后铣削右侧矩形台肩。

方案 2：由外向内逐次铣削，先铣削右侧矩形台肩；再铣削正方形带转角轮廓、铣削五边形轮廓；最后铣削柱台。

对以上两个方案进行比较，方案 1 每层都需要从外向内作大余量的粗切，程序处理较复杂，但按自上而下的切削顺序，每层吃刀深度容易控制；方案 2 采用由外向内逐步减少余量的方法，后续加工的切削范围逐步变小，程序处理相对简单，但外圈轮廓的切深较大，需要分层重复轮廓切削，到内圈后深度逐步减少。

从减少程序的处理量出发，在这里我们选择方案 2。按照先粗后精的原则，以充分释放因加工产生的残余应力带来的不利影响，应将所有部位先粗切完成后，再进行各轮廓的精修加工，特别是有精度要求的轮廓部位。

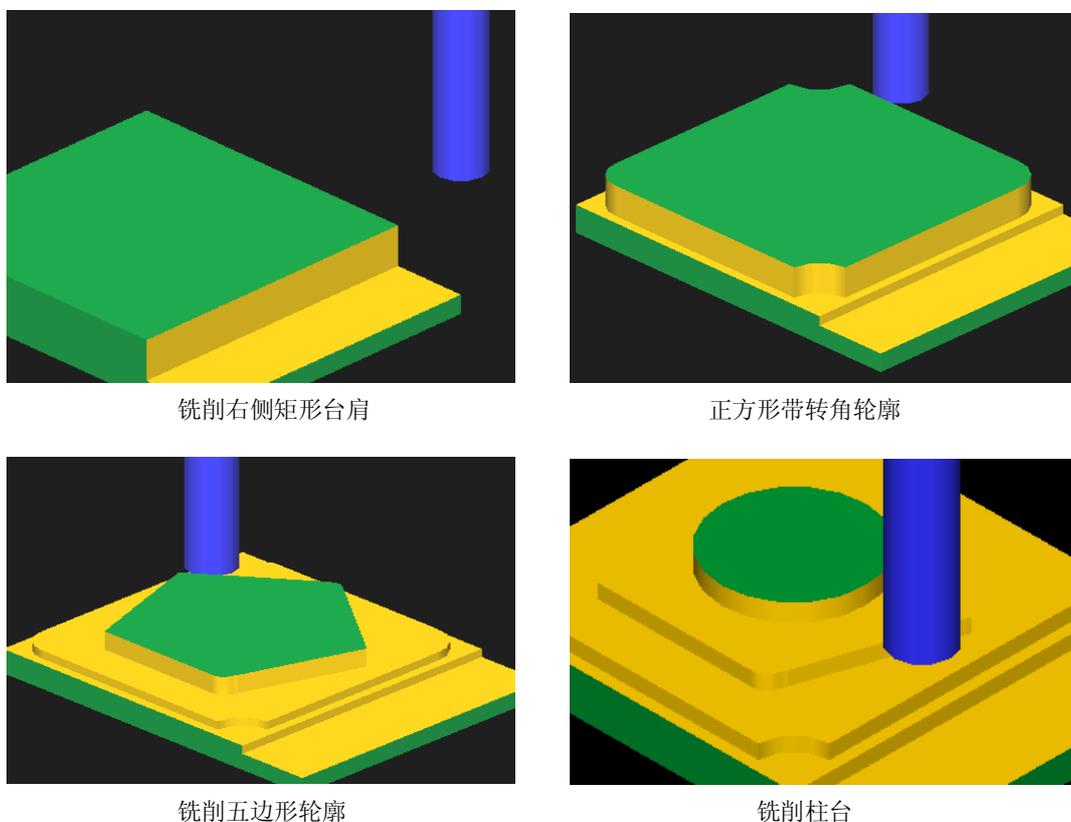


图 3-19 铣削工艺示意图

(5) 刀具及设备的选用。正面各轮廓阶台加工需要用到的刀具包括以下几个方面的考虑：

- 铣削右侧矩形台肩：台肩面宽 24，可以使用 $\phi 25$ 及以上的铣刀走一段直线，相对于小尺寸铣刀可避免来回走刀，以简化程序并提高效率。
- 正方形台阶：可以使用 $\phi 14$ 及以上的铣刀沿轮廓作一圈的粗铣，精铣时刀具尺寸不得超过 $\phi 20$ 。
- 五边形台阶及柱台：需要使用 $\phi 30$ 及以上的铣刀一圈铣出，避免小尺寸铣刀多圈铣削的编程处理并提高效率。

综括上述刀具尺寸要求,粗铣时可以使用 $\phi 32$ 的立铣刀,精铣时可选用 $\phi 16$ 的合金立铣刀。

(6) 数控加工工序卡片,如表 3-20 所示。

表 3-20 阶台零件数控加工工艺卡片

产品名称	数控加工	零件图号	零件代号	工序名称	工序号	
阶台零件	工序卡片	L01	M-01			
材料名称	材料牌号					
硬铝	LY12					
机床名称	机床型号					
数控铣床						
夹具名称	夹具编号					
零件紧靠定位装置装紧,轻轻敲平						
工步	工作内容	刀具	量具	主轴转速 N r/min	吃刀深度 mm	进给速度 F (mm/min)
1	铣右边台肩	$\phi 32$	游标卡尺	1500	-17	600
2	铣正方形凸台	$\phi 32$		1500	-13	600
3	铣正五边形凸台	$\phi 32$		1500	-9	600
4	铣圆柱台	$\phi 32$		1500	-5	600
5	精加工各部分	$\phi 16$		2000		400

2. 零件加工程序设计

(1) 程序编制。

基本编程方法有手工编程、自动编程,下面介绍手工编程的要点。

右侧台肩面:刀具从毛坯外右下角下刀,沿+Y向走直线至刀心超出上边线,分层下刀后沿-Y回切。

正方形轮廓:从右边线毛坯外延长线处下刀,沿轮廓逆时针走一圈后切出,使用机床自动刀补 G42,分层切削采用主子程序调用。

五边形轮廓:从下边线左侧毛坯外延长线下刀,逆时针走一圈后从延长线切出,使用 G42,分层切削采用主子程序调用。

柱台:可以使用整圆编程处理,使用 G42。

(2) 程序代码。

O0001

G0G17G40G49G80G90

G0G90G54X-60.0Y45.S2200M3

G0Z20.M8

Z5.

G1Z0F200.

M98P1001L3 分三层粗切外圈,带凸凹转角的正方形阶台

M98P1002 精切外圈
 G0G90Z20.
 X-70.Y0
 Z5.
 G1Z-4.5F200.
 M98P1003 粗切五边形凸台, 第一层大圈
 X-54.442Y0
 M98P1004 粗切五边形凸台, 第一层内圈
 X-70.Y0
 G1Z-9.F200.
 M98P1003 粗切五边形凸台, 第二层大圈
 X-54.442Y0
 M98P1004 粗切五边形凸台, 第二层内圈
 X-54.442Y0
 M98P1005 精修五边形凸台, 第二层
 G0G90Z20.
 X40.Y0.
 Z5.
 G1Z-5.F200. 铣圆柱台
 G41D2X24.F600.
 G2I-24.J0. 柱台外圈
 G1G40X30.
 G41D2X20.F600.
 G2I-20.J0. 柱台内圈
 G1G40X30.M9
 G0Z50.M5
 M30

 O1001 粗铣带凸凹转角的正方形阶台
 G91G1Z-4.333F200.
 G90G41D1X-33.F600.;D1=8.5
 ;X33.
 G1X45.R12.
 ;G2X45.Y33.R12.
 G1Y-35.
 G3X35.Y-45.R10.
 ;G1X-35.
 G1X-45.R10.
 ;G2X-45.Y-35.R10.

G1Y33.
 G3X-33.Y45.R12.
 G1G40Y65.
 X-60.0Y45.
 M99

O1002
 G90G41D2X-33.F600.;D2=8 精修带凸凹转角的正方形阶台
 G1X45.R12.
 G1Y-35.
 G3X35.Y-45.R10.
 G1X-45.R10.
 G1Y33.
 G3X-33.Y45.R12.
 G1G40Y65.
 X-60.0Y45.
 M99

O1003 粗铣五边形阶台
 G41D3X-37.618Y12.223F600.;D3=18
 ;X-2.939Y37.419
 G1X0Y39.554R5.
 ;G2X2.939R5.
 G1X37.618Y12.223
 ;X24.372Y-28.545
 G1X23.249Y-32.R5.
 ;G2X19.617Y-32.R5.
 G1X-23.249
 X-37.618Y12.223
 G40X-45.Y34.942
 M99

O1004 半精铣五边形阶台
 G41D1X-37.618Y12.223F600.;D1=8.5
 G1X0Y39.554R5.
 G1X37.618Y12.223
 G1X23.249Y-32.R5.
 G1X-23.249
 X-37.618Y12.223

G40X-45.Y34.942
M99

O1005 精铣五边形阶台
G41D2X-37.618Y12.223F600.;D2=8
G1X0Y39.554R5.
G1X37.618Y12.223
G1X23.249Y-32.R5.
G1X-23.249
X-37.618Y12.223
G40X-45.Y34.942
M99
%

3.5 自动编程简介

3.5.1 自动编程的产生与发展

20 世纪 50 年代初期，麻省理工学院研制成功了第一台三坐标数控铣床，并着手开发 APT (Automatically Programmed Tools) 系统，1955 年公布了研制成果。20 世纪 50 年代末，数控加工技术正式走向工业生产。

最初的 APT 系统，只能处理简单的曲线，如直线、圆弧等。20 世纪 60 年代初，升级的 APT-11 已能加工三维物体。20 世纪 70 年代初发展到 APT-W 版本。CAGD (计算机辅助几何设计) 技术的发展，以曲面造型为主要手段的造型，方便地解决了任意表面的数学描述，使得 CAM 技术也相应地发展到了能加工 3D 雕塑曲面的水平。以 APT 批处理语言系统为代表的数控加工编程技术，在 20 世纪 70 年代，已解决了复杂产品的加工问题。但是，使用这类语言编程系统有许多不便之处：采用语言定义零件几何形状，难以描述复杂的几何形状，缺乏几何直观性；缺乏对刀具轨迹正确性的有效检验手段；难以与 CAD 数据库和 CAP 系统进行有效的连接；不易做到高度的自动化、集成化。

20 世纪 70 年代以后，出现了小型计算机，由于其运算速度快、存储量大，特别是图形输入板、大容量磁盘的出现，使 CAD/CAM 一体化出现了可能，在美国，出现了最初的 CAD/CAM 一体化软件 CAD/CAM。由此，数控加工编程系统实现了交互式图形编程。它是通过与 CAD 集成，成为 CAD/CAM 系统的集成化应用模块，与 CAD 部分共享统一的数据结构。目前，交互式图形数控自动编程是使用最为广泛的自动编程方式。根据 CAD/CAM 软件系统流派，现代自动编程技术分为：基于特征的自动编程技术和基于曲面模型的自动编程技术，其编程过程相同。目前比较常见的软件有 MasterCAM、Pro/Engineer、UniGraphics、CAXA 制造工程师等。

3.5.2 自动编程的基本原理与步骤

1. 工作原理

手工编程对于编制外形不太复杂或计算工作量不大的零件程序时，简便、易行。但是，

对于一些复杂零件，特别是具有空间曲线、曲面的零件，如叶片、叶轮、复杂模具等，或者零件的几何形状虽不复杂但程序量很大的零件，由于这些零件的编程计算相当烦琐，程序量大，手工编程很难胜任，即使能够编出，往往耗费很长时间。据统计，一般手工编程所需时间与机床加工时间之比约为 30: 1。因此，这些工件的编程只能采用自动编程来完成。自动编程软件是专用的数控软件，只有在计算机内配备了这种自动编程软件，才能进行自动编程。

自动编程就是用电子计算机代替手工编程。其过程是：编程人员根据零件图和工艺要求，运用数控语言，编写零件加工的源程序，将该源程序输入通用计算机，在编译程序支持下，进行译码、计算和后置处理，自动生成出数控加工所需的二进制代码穿孔纸带（卡），或通过打印机打印成加工程序单，或通过计算机通信接口将加工程序直接输送给 CNC 存储器予以调用。所以，要实现自动编程，数控语言、编译程序、通用计算机三者缺一不可。

(1) 数控语言。它接近于工厂车间里使用的工艺用语和工艺规程。这样，用户在编写、阅读、修改零件程序时，变得直观、简便、易掌握。

应用数控语言编写的零件加工程序称为零件源程序，数控语言是一套规定好的基本符号和由基本符号描述零件加工程序的规则。数控语言又称“工艺语言”。该程序包含加工零件的形状、尺寸、刀具动作、切削条件、机床的辅助功能等项内容。编写零件源程序的数控语言由以下 3 种主要语句构成。几何定义语句（描述几何图形的语句），规定点、线、圆等定义的表达式；刀具运动语句：指定刀具运动轨迹和动作顺序的语句；控制语句：变更执行刀具运动语句的顺序和改变几何定义语句作用的语句。

(2) 编译程序。编译程序（又称为系统处理程序）是把输入计算机的源程序翻译成为等价的目标程序的程序。目标程序是源程序经过编译程序处理而获得的计算机可识别和直接执行的程序。

编译程序是根据数控语言的要求，结合生产对象和具体的计算机，由专家应用汇编语言或高级语言编好的一套庞大的程序系统。在编译程序的支持下，计算机就能对零件源程序进行翻译、计算、处理，最后获得某特定数控机床所需的一套加工指令代码，并能自动地将其制备到穿孔带或打印出程序清单。

(3) 自动编程流程。图3-20所示为自动编程流程图。

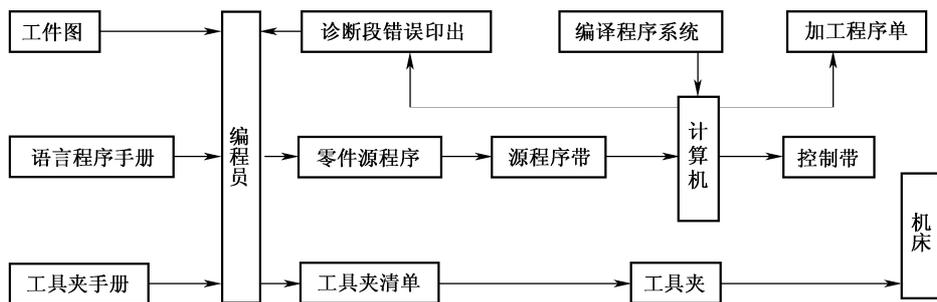


图 3-20 自动编程流程图

用数控语言编写的零件源程序经过如下 3 个阶段才能变为可供数控机床使用的加工程序和穿孔带：

1) 翻译阶段。识别语言，并理解其含义。

2) 运行阶段。执行各种语句,进行复杂的数值计算和逻辑运算,如求交点、作切线、圆弧等。

3) 后置处理阶段。把前面过程所得到的数据,按该机床数控系统的要求,转换成加工指令码程序。例如,把计算结果圆整到机床数控系统要求的位数;把程序段整理为某种固定格式的文字、数字、分隔符组成的指令序列;核对计算数据是否超出数控系统的容量;根据机床能力选择合理的切削用量等。

最后,根据需要可以通过打印机打印出程序单或制作穿孔带。

2. 自动编程系统的组成与功能

(1) 自动编程系统的组成。自动编程系统是由计算机、外围设备和自动编程软件等组成的。而自动编程软件由前置处理程序和后置处理程序两部分组成。

前置处理程序的功能是接收用户输入的信息,并对它进行编译、计算、处理,将其结果按一定格式放置在一专门文件中。这种文件称为刀位数据文件(CLD)。其格式已由ISO标准规定。这种格式不是数控加工程序的格式。

后置处理程序的功能是根据CLD文件的内容和数控机床的具体性能编制出符合要求的加工程序,并将该程序输出(即穿孔纸带孔、录入磁盘、通信输出到数控系统)。

一个自动编程软件,一般配有多个后置处理程序,以适用于多种型号的数控机床,没有配备相应后置处理程序的自动编程软件是无法使用的。

(2) 自动编程系统的输入方式。自动编程系统的输入方式有两类,即语言式输入和图形式输入。

1) 语言式输入方式首先要编写一个称为“源程序”的程序。源程序的书写格式类似于语言表达,描绘工件加工的全过程。相应的自动编程系统(也称为数控编程语言系统)对源程序进行编译、计算、处理,最后得出加工程序。世界上最早的自动编程系统——美国1955年研究成功的APT数控编程语言系统就是采用语言式输入的。40多年来,世界各国先后研制成功了许多各有特色的自动编程语言系统,例如德国的EXAPT、日本的FAPT和HAPT、法国的IFAPT、英国的PICNIC,以及我国的SAPT、SKC和TZ-APNS等。

2) 图形式输入方式是近几年来发展起来的系统。它不需要编写源程序,而是采用鼠标和键盘,通过激活屏幕上的相应菜单,画出工件图形,采用回答问题的方式输入刀具、进给速度、主轴转速、走刀路线等信息将工件加工程序编制出来。这种编程系统也称为会话型输入系统。这种编程系统的图形显示功能很强,在系统运行过程中,屏幕上可同时出现主视图、俯视图,甚至有刀具切削过程的实体图。具有形象、直观等优点。尤其是随着大容量、高速度的计算机的普及以及图形系统(软、硬件)功能的日益完善,使得零件设计和数控编程联成一体,称为CAD/CAM系统,因而可大大提高工作效率,缩短了设计和加工工件的周期。

(3) 自动编程系统的功能。由于数控机床的种类繁多,其加工对象的工艺要求又各不相同,因此相应发展起来的数控自动编程系统的种类也很多。例如铣床、车床、加工中心等均有相应的自动编程系统。

随着计算机技术和数控技术的迅速发展,自动编程系统的功能也由单一的编制加工程序扩大到加工管理。例如,有的系统建立了切削参数数据库,在程序中自动引入切削参数;有的优化加工程序并加入一些管理信息。例如火焰切割机的编程系统,还加入了套料功能,可最大限度地提高板材的利用率。

自动编程系统解决了一系列烦琐、复杂、难度大的工件加工，不仅可使数控机床的编程效率大大提高，而且还解决了手工编程无法解决的难题。自动编程系统的出现，使数控机床的应用水平得到了极大提高。随着科学技术的发展，自动编程系统将不断推陈出新，达到更高水平，促使数控机床的应用达到更高水平。

3. 利用 CAM 系统进行自动编程的基本步骤

(1) 加工工艺确定。加工工艺的确定目前主要依靠人工进行，其主要内容有：

- 1) 核准加工零件的尺寸、公差和精度要求。
- 2) 确定工件装夹位置。
- 3) 选择刀具。
- 4) 确定加工路线。
- 5) 选定工艺参数。

(2) 加工模型建立。利用 CAM 系统提供的图形生成和编辑功能将零件的被加工部位绘制在计算机屏幕上，作为计算机自动生成刀具轨迹的依据。

加工模型的建立是通过人机交互方式进行的。被加工零件一般用工程图的形式表达在图纸上，用户可根据图样建立三维加工模型。针对这种需求，CAM 系统应提供强大的几何建模功能，不仅应能生成常用的直线和圆弧，还应提供复杂的样条线、组合曲线、各种规则的和不规则的曲面等的造型方法，并提供各种过渡、裁剪、几何变换等编辑手段。

被加工零件数据也可由其他 CAD/CAM 系统传入，因此 CAM 系统针对此类需求应提供标准的数据接口，如 DXF、IGES、STEP 等。由于分工越来越细，企业之间的协作越来越频繁，这种形式目前越来越普遍。被加工零件的外形还可由测量机测量得到，针对此类需求，CAM 系统应提供读入测量数据的功能，按一定格式给出的数据，系统自动生成零件的外形曲面。

(3) 刀具轨迹生成。建立了加工模型后，即可利用 CAM 系统提供的多种形式的刀具轨迹生成功能进行数控编程。用户可以根据不同的工艺要求和精度要求，通过交互指定加工方式和加工参数等，方便快速地生成所需要的刀具轨迹即刀具的切削路径。

为满足特殊的工艺需要，CAM 系统应对已生成的刀具轨迹进行编辑。通常 CAM 系统还可通过模拟仿真检验生成的刀具轨迹的精度及进行加工过程干涉检查，并可通过代码校核，用图形方式检验加工代码的正确性。

(4) 后置代码生成。在屏幕上用图形形式显示的刀具轨迹要变成可以控制机床的代码，需要进行所谓后置处理。后置处理的目的是形成数控指令文件，利用 CAM 系统提供的后置处理器，用户按机床规定的格式进行定制，即可方便地生成和特定机床相匹配的加工代码。

(5) 加工代码输出。生成数控指令之后，可通过计算机的标准接口与机床直接连通。CAM 系统一般可通过计算机的串口或并口与机床连接，将数控加工代码传输到数控机床，控制机床各坐标的伺服系统，驱动机床。

3.5.3 国内、外主要的 CAM 软件介绍

1. MasterCAM 软件

MasterCAM 是美国 CNC 公司开发的一套适用于机械设计、制造，运行在 PC 平台上的 3DCAD/CAM 交互式图形集成系统。它可以完成产品的设计和各种类型数控机床的自动编程，包括数控铣床（2-5 轴）、车床（可带 C 轴）、线切割机（4 轴）、激光切割机、加工中心等的

编程加工。Master CAM 软件在使用线框造型方面较有代表性，而且它又是侧重于数控加工方面的软件，这样的软件在数控加工领域内占重要地位，有较高的推广价值。

产品零件的造型可以由系统本身的 CAD 模块来建立模型，也可以通过三坐标测量仪测得的数据建模。系统提供的 DXF、IGES、CADL、VDA、STL、PARASLD 等标准图形接口，可实现与其他 CAD 系统的双向图形传输，也可以通过专用 DWG 图形接口与 AutoCAD 进行图形传输。

系统具有很强的加工能力，可实现多曲面连续加工、毛坯粗加工、刀具干涉检查与消除、实体加工模拟、DNC 连续加工以及开放式的后置处理等功能。

2. UG II 软件

UG II 软件是美国 Unigraphics Solutions 公司的 CAD/CAM/CAE 产品。其核心 Parasolid 提供强大的实体建模功能和无缝数据转换能力。UG II 提供给用户一个灵活的复合建模，包括实体建模、曲面建模、线框建模和基于特征的参数建模。UG II 覆盖制造全过程，融合了工业界丰富的产品加工经验，为用户提供了一个功能强劲的、实用的、柔性的 CAM 软件系统。UG II 可以运行在工作站和微机、UNIX 或 Windows 操作环境下。

(1) UG II 的 CAD 功能主要是提供实体建模、自由曲面建模等造型手段，提供装配建模、标准件库建模等环境；可建立和编辑各种标准的设计特征，如孔、槽、型腔、凸台、倒角和倒圆等；可从实体模型生成完全相关的二维工程图；提供 IGES、STEP 等标准图形接口和大量的直接转换器，如与 CATIA、CADD5、I-DEAS、AutoCAD 等 CAD/CAM 系统直接高效地进行数据转换；具有有限元分析和机构分析模块；对二维、三维机构可进行复杂的运动学分析和设计仿真。

(2) UG II 的 CAM 功能主要是提供 2-4 轴车削加工，具有粗车、多次走刀、精车、车沟槽、车螺纹和中心钻孔等功能；提供 2-5 轴或更高的铣削加工，如型芯和型腔铣削；提供粗切单个或多个型腔，沿任意形状切去大量毛坯材料以及可加工出型芯的全部功能。这些功能对加工模具和冷冲模特别有用。

UG II 软件还具有固定轴铣削功能、Cut 清根切削功能、可变轴铣削功能、顺序铣切功能、切削仿真 (VERICUT) 功能、EDM 线切削功能、机床仿真功能 (包含整个加工环境——机床、刀具、夹具和工件，对数控加工程序进行仿真，检查相互间的碰撞和干涉情况) 等。它还提供非均匀 B 样条轨迹生成器：从 NC 处理器中直接生成基于 NURBS 的刀具轨迹数据，直接从 UG 的实体模型中产生新的刀具轨迹，其加工程序可比原来的程序减少 50%-70%，特别适用于高速加工。

3. Pro/Engineer 软件

Pro/Engineer 软件是美国 PTC 公司 1988 年推出的产品，是一整套机械设计自动化软件产品，它以参数化和基于特征建模的技术提供给工程师一个革命性的方法，去实现机械设计自动化。Pro/Engineer 是由一个产品系列组成的。它是专门应用于机械产品从设计到制造全过程的产品系列。

Pro/Engineer 产品系列的参数化和基于特征的建模给工程师提供了空前容易和灵活的环境。另外，Pro/Engineer 的唯一的结构提供了所有工程项目之间的集成，使整个产品从设计到制造紧密地联系在一起，这样，能使工程人员并行地开发和制造它的产品，可以很容易地评价多个设计的选择，从而使产品达到最好的设计、最快的生产和最低的造价。

(1) Pro/Engineer CAD 功能主要具有简单零件设计、装配设计、设计文档(绘图)和复杂曲面的造型等功能;具有从产品模型生成模具模型的所有功能;可直接从 Pro/Engineer 实体模型生成全关联的工程视图,包括尺寸标注、公差、注释等,还提供三坐标测量仪的软件接口,可将扫描数据拟合成曲面,完成曲面光顺和修改。

提供图形标准数据库交换接口,包括 IGES、SET、VDA、CGM、SIA 等,还提供 Pro/Engineer 与 CATIA 软件的图形直接交换接口。

(2) Pro/Engineer CAM 主要具有提供车加工、2-5 轴铣削加工、电火花线切割、激光切割等功能。加工模块能自动识别工件毛坯和成品的特征。当特征发生修改时,系统能自动修改加工轨迹。

4. “CAXA 制造工程师”软件

“CAXA 制造工程师”软件是由北京北航海尔软件有限公司开发的全中文 CAD/CAM 软件。

(1) CAXA 的 CAD 功能主要是提供用线框造型、曲面造型方法来生成 3D 图形;采用 NURBS 非均匀 B 样条造型技术,能更精确地描述零件形体;有多种方法来构建复杂曲面,包括扫描、放样、拉伸、等距、边界网格等;对曲面的编辑方法有任意裁剪、过渡、拉伸、变形、相交、拼接等;可生成真实感图形;具有 DXF 和 IGES 图形数据交换接口。

(2) CAXA 的 CAM 功能主要是支持车削加工,如轮廓粗车、精车、切槽、钻中心孔、车螺纹;可以对轨迹的各种参数进行修改,以生成新的加工轨迹;支持线切割加工,如快、慢走丝切割;可输出 3B 或 G 优码的后置格式;支持 2-5 轴铣削加工,提供轮廓、区域、3-5 轴加工;允许区域内有任意形状和数量的岛,分别指定区域边界和岛的起模斜度,自动进行分层加工;针对叶轮、叶片类零件提供 4-5 轴加工;可以利用刀具侧刃和端刃加工整体叶轮和大型叶片;支持带有锥度的刀具进行加工,任意控制刀轴方向。此外还支持钻削加工。

系统提供丰富的工艺控制参数、多种加工方式(粗加工、参数线加工、限制线加工、复杂曲线加工、曲面区域加工、曲面轮廓加工)、刀具干涉检查、真实感仿真、数控代码反读、后置处理等功能。

本章小结

为了简化编程以及保持程序的通用,数控机床坐标轴的命名和方向的判别制定了统一的标准,规定直线进给运动的坐标轴用 X、Y、Z 表示,常称为基本坐标轴。围绕 X、Y、Z 轴旋转的圆周进给坐标轴用 A、B、C 表示,常称为旋转轴。X、Y、Z 坐标轴的相互关系用右手定则决定。A、B、C 坐标轴的相互关系根据右手螺旋定则决定。机床坐标系是机床固有的坐标系,它是固定的点,机床坐标系的原点称为机床原点或机床零点,机床通过回参考点建立机床坐标系,也就知道了坐标轴的零点位置。一个数控加工程序是由若干个程序段组成的,每个程序段是由若干个指令字组成的,它遵循一定的结构和格式等。数控加工程序的编制代码主要有 G 代码、M 代码、F 代码、S 代码、T 代码等。G 代码和 M 代码是程序段的主要组成部分。G 代码由地址 G 和后面的二位数字组成,用来规定刀具和工件的相对运动轨迹(即指令插补功能)、机床坐标系、坐标平面、刀具补偿、坐标偏置等多种加工操作。M 代码主要是用于控制零件程序的走向以及对一些辅助器件进行操作控制用的工艺性代码,也是由地址 M 和两位数字组成。数控加工工艺的主要内容是选择适合零件加工的数控机床并确定其工序内容,通过

分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯形状、热处理等要求明确加工内容和技术要求，从而确定零件的加工方案。

对于一些复杂零件，特别是具有空间曲线、曲面的零件，如叶片、叶轮、复杂模具等，或者零件的几何形状虽不复杂但程序量很大的零件，它们的编程计算相当烦琐、程序量大，手工编程很难胜任，即使能够编出，往往耗费很长时间。这些工件的编程只能采用自动编程来完成。要实现自动编程，数控语言、编译程序、通用计算机三者缺一不可。自动编程系统的出现，使数控机床的应用水平得到了极大提高。按工作方式可以把当前的数控自动编程系统分为批处理语言系统和交互式图形编程系统两大类。批处理语言系统的代表是 20 世纪 50 年代末诞生的 APT，这种编程方法经历了数十年的发展，软件系统已相当成熟，但已逐渐淡出历史舞台。随着 CAD 技术的发展，数控加工编程系统实现了交互式图形编程。目前，图形数控自动编程是使用最为广泛的自动编程方式。比较常见的软件有 MasterCAM、Pro/Engineer、UniGraphics、CAXA 制造工程师等。

习题及思考题

1. NC 机床零件加工程序的编制方法有几种？试简述它们的特点。
2. 名词解释：对刀点、刀位点、坐标轴、坐标系、机床原点、工件原点、模态/非模态指令、联动、行切法
3. 试解释下列指令的意义：


```
G00 G01 G02 G03;G40 G41 G42;G04;G90 G91;G92;
      G54 G55;G17 G18 G19;M02;M03 M04 M05;M07 M08;
```
4. 试说明机床坐标系与工件坐标系各自的功用，以及它们的相互关系和如何确定它们的相互关系。
5. 请按 ISO 标准，判别数控机床的坐标系，并说明各坐标轴运动方向的确定原则（即说明所确定的方向是刀具还是工件的运动方向）。
6. 加工程序编制中首件试切的作用是什么？
7. 编程：自选零件形状编制零件加工程序。
8. 简述数控编程的内容和步骤。
9. 什么是右手直角坐标系？X 轴、Z 轴在数控机床上是怎样确定的？
10. 机床坐标系和工件坐标系有何不同。
11. 什么是机床原点、编程原点、工件原点、机床参考点？
12. 数控加工的特点是什么？数控加工的主要应用范围有哪些？
13. 数控加工工艺设计的主要内容有哪些？
14. 数控加工的工序可有哪几种划分方法？
15. 对刀点、换刀点指的是什么？一般应如何设置？常用刀具的刀位点是怎么规定的？
16. 加工路线的确定应遵循哪些主要原则？
17. 铣削如图 3-21 所示的零件轮廓，请选择合适的铣刀直径，并绘制其走刀进给路线。
18. 如图 3-22 所示的零件，试确定其加工工艺。
19. 程序中常用的工艺指令有哪些？什么叫模态指令和非模态指令？

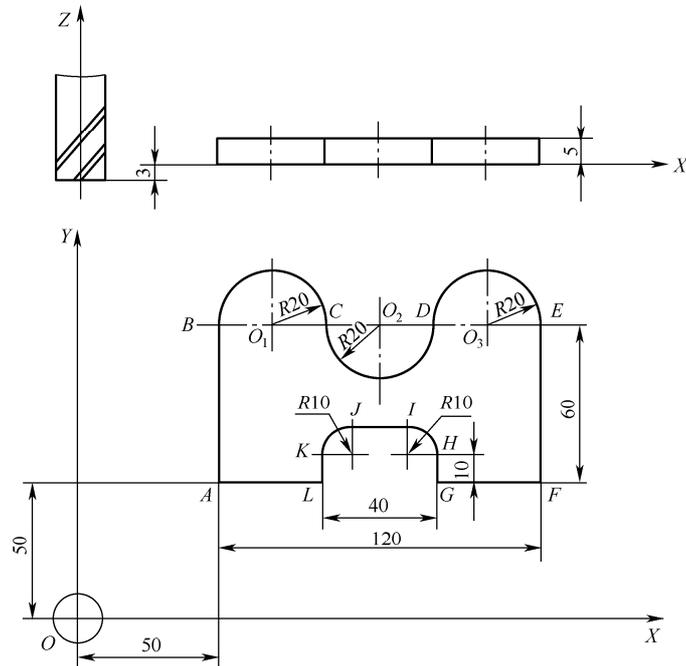


图 3-21 零件轮廓图

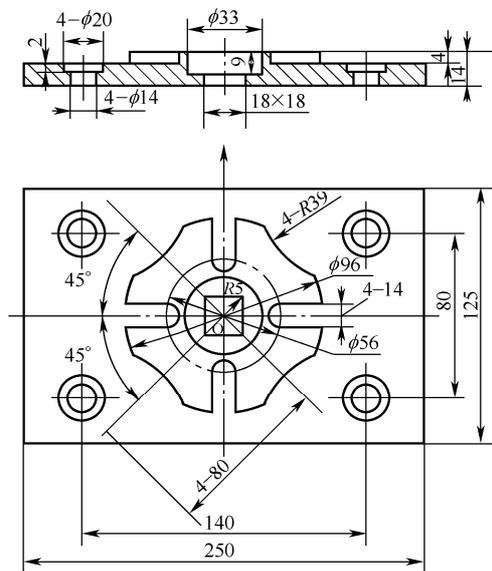


图 3-22 零件图

20. 数控加工常用的工艺文件有哪些?
21. 数控车削编程的特点是什么?
22. 数控铣床编程的特点是什么?
23. 加工中心编程的特点是什么?

24. 试编制如图 3-23 所示零件的车削加工程序。
25. 试编制如图 3-24 所示零件的铣削加工程序。
26. 试编制如图 3-25 所示零件铣削内表面的加工程序。

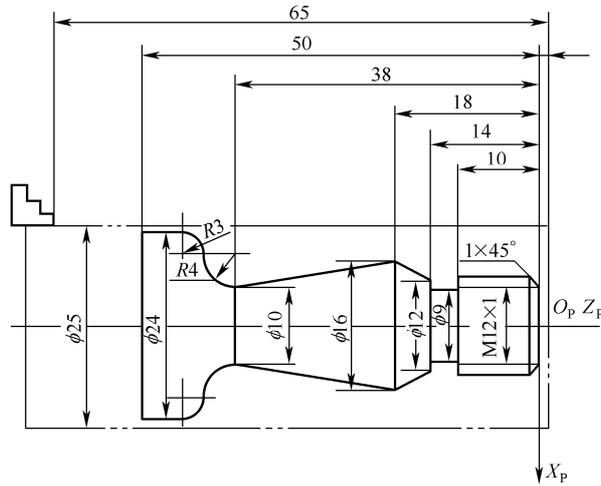


图 3-23 零件图

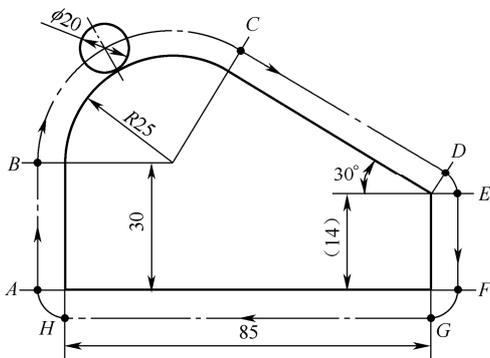


图 3-24 零件图

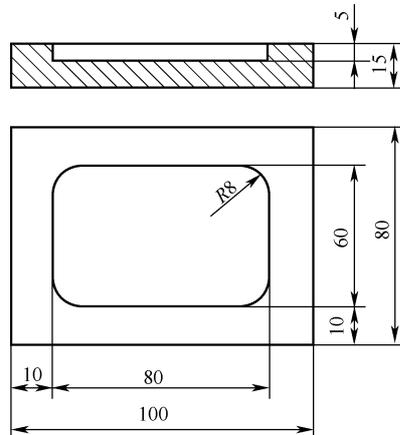


图 3-25 零件铣削内表面