

2

数控编程与加工工艺

2.1 关于数控编程

数控加工程序编制简称数控编程。在第 1 章中介绍了数控机床的工作及原理，现代数控机床是按照事先编制好的加工程序自动对工件进行加工的高效设备，因此理想的加工程序不仅应保证加工出符合图样要求的合格工件，同时应能使数控机床的功能得到合理的应用与充分的发挥，以使数控机床能安全、可靠和高效地工作。

在数控机床上加工工件时，首先要将被加工工件的全部工艺过程及其他辅助动作（如变速、换刀、冷却、夹紧等）按运动顺序，用规定的指令代码程序格式记录在控制介质上，通过人一机交互设备送入数控装置，以此为根据自动控制机械加工部件完成工件的全部加工过程。从工件图样开始，到获得数控机床所需控制介质（如穿孔带）的过程称为程序编制。

2.2 数控编程的内容及要求

UG NX 8.5 数控模块提供了多种加工类型，用于各种复杂零件的粗精加工，用户可以根据零件结构、加工表面形状和加工精度要求选择合适的加工类型。

数控编程的主要内容有：图样分析及工艺处理、数值处理、编写加工程序单、输入数控系统、程序检验及试切。

（1）图样分析及工艺处理。在确定加工工艺过程时，编程人员首先应根据零件图样对工件的形状、尺寸和技术要求等进行分析，然后选择合适的加工方案，确定加工顺序和路线、装夹方式、刀具以及切削参数。为了充分发挥机床的功用，还应该考虑所用机床的指令功能，选择最短的加工路线，选择合适的对刀点和换刀点，以减少换刀次数。

(2) 数值处理。根据图样的几何尺寸、确定的工艺路线及设定的坐标系, 计算工件粗、精加工的运动轨迹, 得到刀位数据。零件图样坐标系与编程坐标系不一致时, 需要对坐标进行换算。对形状比较简单的零件的轮廓进行加工时, 需要计算出几何元素的起点、终点及圆弧的圆心, 及两几何元素的交点或切点的坐标值, 有的还需要计算刀具中心运动轨迹的坐标值。对于形状比较复杂的零件, 需要用直线段或圆弧段逼近, 根据要求的精度计算出各个节点的坐标值。

(3) 编写加工程序单。确定加工路线、工艺参数及刀位数据后, 编程人员可以根据数控系统规定的指令代码及程序段格式, 逐段编写加工程序单。此外, 还应填写有关的工艺文件, 如数控刀具卡片、数控刀具明细表和数控加工工序卡片等。随着数控编程技术的发展, 现在大部分的机床已经直接采用自动编程。

(4) 输入数控系统。即把编制好的加工程序, 通过某种介质传输到数控系统。过去我国数控机床的程序输入一般使用穿孔纸带, 穿孔纸带的程序代码通过纸带阅读器输入到数控系统。随着计算机技术的发展, 现代数控机床主要利用键盘将程序输入到计算机中。随着网络技术进入工业领域, 通过 CAM 生成的数控加工程序可以通过数据接口直接传输到数控系统中。

(5) 程序检验及试切。程序单必须经过检验和试切才能正式使用。检验的方法是直接将加工程序输入到数控系统中, 让机床空运转, 即以笔代刀, 以坐标纸代替工件, 画出加工路线, 以检查机床的运动轨迹是否正确。若数控机床有图形显示功能, 可以采用模拟刀具切削过程的方法进行检验。但这些过程只能检验出运动是否正确, 不能检查被加工零件的精度, 因此必须进行零件的首件试切。试切时, 应该以单程序段的运行方式进行加工, 监视加工状况, 调整切削参数和状态。

从以上内容来看, 作为一名数控编程人员, 不但要熟悉数控机床的结构、功能及标准, 而且必须熟悉零件的加工工艺、装夹方法、刀具以及切削参数的选择等方面的知识。

2.3 数控编程的方法

数控编程一般可以分为手工编程和自动编程两大类。

手工编程是指从零件图样分析、工艺处理、数值计算、编写程序单到程序校核等各步骤的数控编程工作均由人工完成。该方法适用于零件形状不太复杂、加工程序较短的情况, 而复杂形状的零件, 如具有非圆曲线、列表曲面和组合曲面的零件, 或形状虽不复杂但是程序很长的零件, 则比较适合于自动编程。

自动数控编程是从零件的设计模型(即参考模型)直接获得数控加工程序, 其主要任

务是计算加工进给过程中的刀位点（Cutter Location Point, CLP），从而生成 CL 数据文件。自动编程技术可以帮助人们解决复杂零件的数控加工编程问题，其大部分工作由计算机来完成，使编程效率大大提高，还能解决手工编程无法解决的许多复杂形状零件的加工编程问题。

2.4 数控编程坐标系

在 CAM 中，为了方便编制加工程序，确定被加工零件的位置，通常使用加工坐标系（MCS）。加工坐标系决定了刀轨的零点，刀轨中的坐标值均相对于加工坐标系。另外，在定义轴方向时，默认的刀轴方向为 MCS+ZM。在每个被加工工件中可以定义多个 MCS。

MCS 原点在机床坐标系中称为调整点。加工时，工件随夹具在机床上安装后，测量加工原点与机床原点之间的距离，这个距离称为加工原点偏置。该偏置值需要预存到数控系统中，加工时，工作原点偏置值能自动附加到加工坐标系上，使数控系统可按机床坐标系确定加工时的坐标值。因此，编程人员可以不考虑工件在机床上安装位置和安装精度，直接利用数控系统的原点偏置功能，通过工作原点偏置来补偿工件的安装误差，这样使用起来非常方便。

2.5 数控加工程序

2.5.1 数控加工程序结构

数控加工程序由为使机床运转而给予数控装置的一系列指令的有序集合所构成。一个完整的程序由程序起始符、程序号、程序内容、程序结束和程序结束符五部分组成。例如：

程序起始符	%
程序号	O 0001
程序内容	{ N01 G92 X30 Y30; N02 G90 G00 X30 T01 M03; N03 G01 X8 Y8 F200; N04 XO YO; N07 G00 X40; N08 M30 }
程序结束	N08 M30
程序结束符	%

- 程序起始符。程序起始符位于程序的第一行，一般是“%”、“\$”等。不同的数控机床，起始符也有可能不同，应根据具体数控机床说明书使用。

- 程序号。程序号也称为程序名，是每个程序的开始部分。为了区别存储器中的程序，每个程序都要有程序编号。程序号单列一行，一般有两种形式：一种是以规定的英文字母（通常为 O）为首，后面接若干位数字（通常为 2 位或 4 位），如 O 0001；另一种是以英文字母、数字和符号“_”混合组成，比较灵活。程序名具体采用何种形式，由数控系统决定。
- 程序内容。程序内容是整个程序的核心，由多个程序段（Block）组成。程序段是数控加工程序中的一句，单列一行，用于指挥机床完成某一个动作。每个程序段又由若干个指令组成，每个指令表示数控机床要完成的动作。指令由字（word）和“;”组成。而字由地址符和数值构成，如 X（地址符）100.0（数值）、Y（地址符）50.0（数值）。字首是一个英文字母，称为字的地址，它决定了字的功能类别。一般字的长度和顺序不固定。
- 程序结束。在程序末尾一般有程序结束指令，如 M30 或 M02，用于停止主轴、切削液和进给，并使控制系统复位。M30 还可以使程序返回到开始状态，一般在换工件时使用。
- 程序结束符。程序结束符是指程序结束的标记符，一般与程序起始符相同。

根据系统本身的特点及编程的需要，每种数控系统都有一定的程序格式。对于不同的机床，其程序格式也不同。因此编程人员必须严格按照机床说明书规定的格式进行编程，靠这些指令使刀具按直线、圆弧或其他曲线运动，控制主轴的回转和停止、切削液的开关、自动换刀装置和工作台自动交换装置等动作。

2.5.2 数控指令

数控加工程序的指令由一系列的程序字组成，而程序字通常由地址（address）和数值（number）两部分组成，地址通常是某个大写字母。数控加工程序中地址代码的意义如表 2.5.1 所示。

表 2.5.1 地址代码的意义

功能	地址	意义
程序号	O(EIA)	程序序号
顺序号	N	顺序序号
准备功能	G	动作模式
尺寸字	X、Y、Z	坐标移动指令
	A、B、C、U、V、W	附加轴移动指令
	R	圆弧半径
	I、J、K	圆弧中心坐标

续表

功能	地址	意义
主轴旋转功能	S	主轴转速
进给功能	F	进给速率
刀具功能	T	刀具号、刀具补偿号
辅助功能	M	辅助装置的接通和断开
补偿号	H、D	补偿序号
暂停	P、X	暂停时间
子程序重复次数	L	重复次数
子程序号指定	P	子程序序号
参数	P、Q、R	固定循环

一般的数控机床可以选择米制单位毫米（mm）或英制单位英寸（in）为数值单位。米制可以精确到 0.001mm，英制可以精确到 0.0001in，这也是一般数控机床的最小移动量。表 2.5.2 列出了一般数控机床能输入的指令数值范围，而数控机床实际使用范围受到机床本身的限制，因此需要参考数控机床的操作手册而定。例如，表 2.5.2 中的 X 轴可以移动 $\pm 99999.999\text{mm}$ ，但实际上数控机床的 X 轴行程可能只有 650mm；进给速率 F 最大可输入 10000.0mm/min，但实际上数控机床的进给速率可能限制在 3000mm/min 以下。因此，在编制数控加工程序时，一定要参照数控机床的使用说明书。

表 2.5.2 编码字符的数值范围

功能	地址	米制单位	英制单位
程序号	: (ISO), O(ETA)	1~9999	1~9999
顺序号	N	1~9999	1~9999
准备功能	G	0~99	0~99
尺寸字	X、Y、Z、Q、R、I、J、K	$\pm 99999.999\text{mm}$	$\pm 9999.9999\text{in}$
	A、B、C	$\pm 99999.999^\circ$	$\pm 9999.9999^\circ$
进给功能	F	1~10000.0mm/min	0.01~400.0in/min
主轴转速功能	S	0~9999	0~9999
刀具功能	T	0~99	0~99
辅助功能	M	0~99	0~99
子程序号	P	1~9999	1~9999
暂停	X、P	0~99999.999s	0~99999.999s
重复次数	L	1~9999	1~9999
补偿号	D、H	0~32	0~32

下面简要介绍各种数控指令的意义。

1. 语句号指令

语句号指令也称程序段号，用以识别程序段的编号。它位于程序段之首，以字母 N 开头，其后为一个 2~4 位的数字。需要注意的是，数控加工程序是按程序段的排列次序执行的，与顺序段号的大小次序无关，即程序段号实际上只是程序段的名称，而不是程序段执行的先后次序。

2. 准备功能指令

准备功能指令以字母 G 开头，后接一个两位数字，因此又称为 G 代码，它是控制机床运动的主要功能类别。G 指令从 G00~G99 共 100 种，如表 2.5.3 所示。

表 2.5.3 JB/T 3208—1999 准备功能 G 代码

G 代码	功能	G 代码	功能
G00	点定位	G01	直线插补
G02	顺时针方向圆弧插补	G03	逆时针方向圆弧插补
G04	暂停	G05	不指定
G06	抛物线插补	G07	不指定
G08	加速	G09	减速
G10~G16	不指定	G17	XY 平面选择
G18	ZX 平面选择	G19	YZ 平面选择
G20~G32	不指定	G33	螺纹切削，等螺距
G34	螺纹切削，增螺距	G35	螺纹切削，减螺距
G36~G39	永不指定	G40	刀具补偿/刀具偏置注销
G41	刀具半径左补偿	G42	刀具半径右补偿
G43	刀具正偏置	G44	刀具负偏置
G45	刀具偏置+/-	G46	刀具偏置+/-
G47	刀具偏置-/-	G48	刀具偏置-/+
G49	刀具偏置 0/+	G50	刀具偏置 0/-
G51	刀具偏置+/-0	G52	刀具偏置-0
G53	直线偏移，注销	G54	直线偏移 X
G55	直线偏移 Y	G56	直线偏移 Z
G57	直线偏移 XY	G58	直线偏移 XZ
G59	直线偏移 YZ	G60	准确定位 1（精）
G61	准确定位 2（中）	G62	快速定位（粗）
G63	攻螺纹	G64~G67	不指定
G68	刀具偏置，内角	G69	刀具偏置，外角
G70~G79	不指定	G80	固定循环注销
G81~G89	固定循环	G90	绝对尺寸

续表

G 代码	功能	G 代码	功能
G91	增量尺寸	G92	预置寄存
G93	时间倒数, 进给率	G94	每分钟进给
G95	主轴每转进给	G96	恒线速度
G97	每分钟转数	G98~G99	不指定

3. 辅助功能指令

辅助功能指令也称作 M 功能或 M 代码, 一般由字符 M 及随后的两位数字组成。它是控制机床或系统辅助动作及状态的功能。JB/T 3208—1999 标准中规定的 M 代码从 M00~M99 共 100 种。表 2.5.4 所示的是部分辅助功能的 M 代码。

表 2.5.4 部分辅助功能的 M 代码

M 代码	功能	M 代码	功能
M00	程序停止	M01	计划停止
M02	程序结束	M03	主轴顺时针旋转
M04	主轴逆时针旋转	M05	主轴停止旋转
M06	换刀	M08	切削液开
M09	切削液关	M30	程序结束并返回
M74	错误检测功能打开	M75	错误检测功能关闭
M98	子程序调用	M99	子程序调用返回

4. 其他常用功能指令

- 尺寸指令——主要用来指令刀位点坐标位置。如 X、Y、Z 主要用于表示刀位点的坐标值, 而 I、J、K 用于表示圆弧刀轨的圆心坐标值。
- F 功能——进给功能。以字符 F 开头, 因此又称为 F 指令, 用于指定刀具插补运动 (切削运动) 的速度, 称为进给速度。在只有 X、Y、Z 三坐标运动的情况下, F 代码后面的数值表示刀具的运动速度, 单位是 mm/min (数控车床还可为 mm/r)。如果运动坐标有转角坐标 A、B、C 中的任何一个, 则 F 代码后的数值表示进给率, 即 $F=1/\Delta t$, Δt 为走完一个程序段所需要的时间, F 的单位为 1/min。
- T 功能——刀具功能。以字符 T 开头, 因此又称为 T 指令, 用于指定采用的刀具号, 该指令在加工中心上使用。Tnn 代码用于选择刀具库中的刀具, 但并不执行换刀操作, M06 用于启动换刀操作。Tnn 不一定要放在 M06 之前, 只要放在同一程序段中即可。T 指令只有在数控车床上, 才具有换刀功能。
- S 功能——主轴转速功能。以字符 S 开头, 因此又称为 S 指令, 主轴的转速, 以其后的数字给出, 要求为整数, 单位是 r/min。速度范围从 1 r/min 到最大的

主轴转速。对于数控车床，可以指定恒表面切削速度。

2.6 数控加工工艺

2.6.1 数控加工工艺的特点

数控加工工艺与普通加工工艺基本相同，在设计零件的数控加工工艺时，首先要遵循普通加工工艺的基本原则与方法，同时还需要考虑数控加工本身的特点和零件编程的要求。由于数控机床本身自动化程度较高，控制方式不同，设备费用也高，所以使数控加工工艺具有以下几个特点。

1. 工艺内容具体、详细

数控加工工艺与普通加工工艺相比，在工艺文件的内容和格式上都有较大区别，如加工顺序、刀具的配置及使用顺序、刀具轨迹和切削参数等方面，都要比普通机床加工工艺中的工序内容更详细。在用通用机床加工时，许多具体的工艺问题，如工艺中各工步的划分与顺序安排、刀具的几何形状、走刀路线及切削用量等，在很大程度上都是由操作工人根据自己的实践经验和习惯自行考虑决定的，一般无需工艺人员在设计工艺规程时进行过多的规定。而在数控加工时，上述这些具体的工艺问题，必须由编程人员在编程时给予预先确定。也就是说，在普通机床加工时，本来由操作工人在加工中灵活掌握并可通过适时调整来处理的许多具体工艺问题和细节，在数控加工时就转变为必须由编程人员事先设计和安排的内容。

2. 工艺要求准确、严密

数控机床虽然自动化程度较高，但自适性差。它不能像通用机床那样在加工时根据加工过程中出现的问题，自由地进行人为调整。例如，在数控机床上进行深孔加工时，它就不知道孔中是否已挤满了切屑，何时需要退刀，也不能待清除切屑后再进行加工，而是一直加工到结束为止。所以在数控加工的工艺设计中，必须注意加工过程中的每一个细节，尤其是对图形进行数学处理、计算和编程时，一定要力求准确无误，以使数控加工顺利进行。在实际工作中，由于一个小数点或一个逗号的差错就可能酿成重大机床事故和质量事故。

3. 应注意加工的适应性

由于数控加工自动化程度高、可多坐标联动、质量稳定、工序集中，但价格昂贵、操作技术要求高等特点均比较突出，因此要注意数控加工的特点，在选择加工方法和对象时更要特别慎重，甚至有时还要在基本不改变工件原有性能的前提下，对其形状、尺寸和结

构等做适应数控加工的修改，这样才能既充分发挥出数控加工的优点，又达到较好的经济效益。

4. 可自动控制加工复杂表面

在进行简单表面的加工时，数控加工与普通加工没有太大的差别。但是对于一些复杂曲面或有特殊要求的表面，数控加工就表现出与普通加工根本不同的加工方法。例如，对一些曲线或曲面的加工，普通加工是通过画线、靠模、钳工和成型加工等方法进行加工，这些方法不仅生产效率低，而且还很难保证加工精度；而数控加工则采用多轴联动进行自动控制加工，用这种方法所得到的加工质量是普通加工方法所无法比拟的。

5. 工序集中

由于现代数控机床具有精度高、切削参数范围广、刀具数量多、多坐标以及多工位等特点，因此，在工件的一次装夹中可以完成多道工序的加工，甚至可以在工作台上装夹几个相同的工件进行加工，这样就大大缩短了加工工艺路线和生产周期，减少了加工设备和工件的运输量。

6. 采用先进的工艺装备

数控加工中广泛采用先进的数控刀具和组合夹具等工艺装备，以满足数控加工中高质量、高效率和高柔性的要求。

2.6.2 数控加工工艺的主要内容

工艺安排是进行数控加工的前期准备工作，它必须在编制程序之前完成，因为只有确定工艺设计方案以后，编程才有依据，否则，如果加工工艺设计考虑不周全，往往会成倍增加工作量，有时甚至出现加工事故。可以说，数控加工工艺分析决定了数控加工程序的质量。因此，编程人员在编程之前，一定要先把工艺设计做好。

概括起来，数控加工工艺主要包括如下内容：

- 选择适合在数控机床上加工的零件，并确定零件的数控加工内容。
- 分析零件图样，明确加工内容及技术要求。
- 确定零件的加工方案，制定数控加工工艺路线，如工序的划分及加工顺序的安排等。
- 数控加工工序的设计，如零件定位基准的选取、夹具方案的确定、工步的划分、刀具的选取及切削用量的确定等。
- 数控加工程序的调整，对刀点和换刀点的选取，确定刀具补偿，确定刀路轨迹。
- 分配数控加工中的容差。
- 处理数控机床上的部分工艺指令。

- 数控加工专用技术文件的编写。

数控加工专用技术文件不仅是进行数控加工和产品验收的依据,同时也是操作者遵守和执行的规程,还为产品零件重复生产积累了必要的工艺资料,并进行了技术储备。这些由工艺人员做出的工艺文件,是编程人员在编制加工程序单时依据的相关技术文件。

不同的数控机床,其工艺文件的内容也有所不同。一般来讲,数控铣床的工艺文件应包括如下几项:

- 编程任务书。
- 数控加工工序卡片。
- 数控机床调整单。
- 数控加工刀具卡片。
- 数控加工进给路线图。
- 数控加工程序单。

其中最为重要的是数控加工工序卡片和数控加工刀具卡片。前者说明了数控加工的顺序和加工要素,后者是刀具使用的依据。

为了加强技术文件管理,数控加工工艺文件也应向标准化、规范化方向发展。但目前尚无统一的国家标准,各企业可根据本部门的特点制订上述有关工艺文件。

2.6.3 数控加工工艺参数

加工工艺参数的选择是数控加工的关键因素之一,它直接影响到加工效率、刀具寿命或零件精度等问题。初步选择切削用量要根据经验和刀具切削用量的推荐值确定,而最终的切削用量要根据数控程序调试的结果和实际加工情况来确定。

合理确定加工工艺参数的原则是:粗加工时,为了提高效率,在保证刀具、夹具和机床刚性足够的条件下,首先把切削深度选大一些,其次选择较大的进给量,然后选择适当的切削速度;精加工时,加工余量小,为了保证工件的表面粗糙度,尽可能增加切削速度,可适当减少进给量。

粗加工:大体积切除工件材料,表面质量要求很低。工件表面粗糙度 Ra 要达到 $12.5 \sim 25 (\mu m)$,切削深度可为 $3 \sim 6 (mm)$,径向切深为 $2.5 \sim 5 (mm)$,为后续半精加工留 $1 \sim 2 (mm)$ 的加工余量。如果粗加工后直接精加工,则留 $0.5 \sim 1 (mm)$ 的加工余量。

半精加工:把粗加工后的表面加工得光滑一点,同时切除凸角的残余材料,给精加工留厚度均匀的加工余量。半精加工后工件表面的粗糙度 Ra 要达到 $3.2 \sim 12.5 (\mu m)$,轴向切削深度和径向切削深度可取 $1.5 \sim 2 (mm)$,给后续精加工留 $0.3 \sim 0.5 (mm)$ 的加工余量。

精加工:是指最后达到尺寸精度和表面粗糙度要求的加工。工件的表面粗糙度 Ra 要

达到 $0.8\sim 3.2\ (\mu\text{m})$ ，轴向切削深度可取 $0.5\sim 1\ (\text{mm})$ ，径向切削深度可取 $0.3\sim 0.5\ (\text{mm})$ 。

2.7 数控加工工艺分析与规划

数控加工工艺路线的设计思路为：首先找出零件所有的加工表面并逐一确定各表面的加工方法，其每一步相当于一个工步；其次将所有工步内容按一定原则排列出先后顺序；规划哪些相邻工步可以划分一个工序，即进行工序的划分；最后再将所需的其他工序如常规工序、辅助工序、热处理工序等插入，衔接于数控加工工序序列之中，即可得到所需的工艺路线。

1. 工序划分的原则

在数控机床上加工零件，工序可以比较集中，尽量一次装夹完成全部工序。与普通机床加工相比，加工工序划分有其自身的特点，常用的工序划分有以下两项原则。

- 保证精度的原则：数控加工要求工序尽可能集中，通常粗、精加工在一次装夹下完成，为减少热变形和切削力变形对工件的形状精度、位置精度、尺寸精度和表面粗糙度的影响，应将粗、精加工分开进行。对轴类或盘类零件，应该先粗加工，留少量余量精加工，来保证表面质量要求。同时，对一些箱体工件，为保证孔的加工精度，应先加工表面而后加工孔。
- 提高生产效率的原则：数控加工中，为减少换刀次数、节省换刀时间，应将需用同一把刀加工的加工部位全部完成后，再换另一把刀来加工其他部位。同时应尽量减少空行程，用同一把刀加工工件的多个部位时，应以最短的路线到达各加工部位。

实际生产中，数控加工工序要根据具体零件的结构特点和技术要求等情况综合考虑。

2. 工序划分的方法

在数控机床上加工零件，工序应比较集中，在一次装夹中应该尽可能完成尽量多的工序。首先应根据零件图样，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工作。若不能，则应该选择哪一部分零件表面需要用数控机床加工。根据数控加工的特点，一般工序划分可按如下方法进行：

- 按零件装卡定位方式进行划分。

对于加工内容很多的零件，可按其结构特点将加工部位分成几个部分，如内形、外形、曲面或平面等。一般加工外形时，以内形定位；加工内形时，以外形定位。因而可以根据定位方式的不同来划分工序。

- 按同一把刀具加工的内容划分。

为了减少换刀次数,压缩空程时间,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。虽然有些零件能在一次安装加工出很多待加工面,但考虑到程序太长,会受到某些限制,如控制系统的限制(主要是内存容量)、机床连续工作时间的限制(如一道工序在一个班内不能结束)等,此外,程序太长会增加出错率,查错与检索也相应比较困难,因此程序不能太长,一道工序的内容也不能太多。

- 按粗、精加工划分。

根据零件的加工精度、刚度和变形等因素划分工序时,可按粗、精加工分开的原则来进行工序划分,即先进行粗加工再进行精加工。特别对于易发生加工变形的零件,由于粗加工后可能发生较大的变形而需要进行校形,因此一般来说,凡要进行粗、精加工的工件都要将工序分开。此时可用不同的机床或不同的刀具进行加工。通常在一次装夹中,不允许将零件某一部分表面加工完后,再加工零件的其他表面。

综上所述,在划分工序时,一定要根据零件的结构与工艺性、机床的功能、零件数控加工的内容、装夹次数及本单位生产组织状况等灵活协调。

3. 加工工序安排

对于加工顺序的安排,还应根据零件的结构和毛坯状况,以及定位安装与夹紧的需要来考虑,重点是工件的刚性不被破坏。顺序安排一般应按下列原则进行。

(1) 要综合考虑上道工序的加工是否影响下道工序的定位与夹紧,中间穿插有通用机床加工工序等因素。

(2) 先安排内形加工工序,后安排外形加工工序。

(3) 在同一次安装中进行多道工序时,应先安排对工件刚性破坏小的工序。

(4) 在安排以相同的定位和夹紧方式或用同一把刀具完成加工工序时,最好连续进行,以减少重复定位次数、换刀次数与挪动压板次数。

4. 数控加工工序与普通工序的衔接

这里所说的普通工序是指常规的加工工序、热处理工序和检验等辅助工序。数控加工工序前后一般都穿插其他普通工序,若衔接不好就容易产生矛盾,因此需要建立工序间的相互状态联系,例如是否预留加工余量,留多少、定位基准的要求、零件的热处理等,这些问题都需要前后衔接、统筹兼顾。

5. 工件的定位和夹紧

(1) 工件的定位。

精基准方案的确定应遵循以下原则:相互位置要求原则、加工余量合理分配原则、重要表现原则、不重复使用原则及便于装夹原则。精基准的选择原则:精准重合原则、基准

统一原则、自为基准原则、互为基准反复加工原则及便于装夹原则。辅助基准：辅助基准是为了便于装夹或易于实现基准统一而人为制成的一种定位基准。

（2）工件的夹紧。

夹紧装置由力源部分和夹紧机构两部分组成。

（3）夹紧力方向的确定。

夹紧力的作用方向应垂直指向主要的定位基准；应使所需夹紧力尽可能小；应使工件变形尽可能小。夹紧力作用点的选择：夹紧力的作用点应施加于工件刚性较好的部位上；应尽量靠近工件加工面；应落在定位元件的支撑范围内。一般按静力平衡原理，计算所需的理论夹紧力，乘上安全系数即为实际所需夹紧力。

6. 铣削刀具

铣刀是一种在回转体表面上或端面上分布有多个刀齿的多刃刀具。铣刀在金属切削加工中是应用很广泛的一种刀具。它的种类很多，主要用于在卧式铣床、立式铣床、数控铣床、加工中心机床上加工平面、台阶面、沟槽、切断、齿轮和成型表面等。铣刀是多齿刀具，每一个刀齿相当于一把刀，因此采用铣刀加工工件的效率高。目前铣刀是属于粗加工和半精加工刀具，其加工精度为 IT8、IT9，表面粗糙度能达到 $Ra1.6\sim6.3\mu\text{m}$ 。

按用途分类，铣刀大致可分为：面铣刀、立铣刀、键槽铣刀、盘形铣刀、锯片铣刀、角度铣刀、模具铣刀和成型铣刀。下面对部分常用的铣刀进行简要的说明，供读者参考。

（1）面铣刀。

面铣刀又称端铣刀，主要用于在立式铣床上加工平面以及台阶面等。面铣刀的主切削刃分布在铣刀的圆锥面上或圆柱面上，副切削刃分布在铣刀的端面上。

面铣刀按结构可以分为硬质合金整体焊接式面铣刀、硬质合金机夹焊接式面铣刀、硬质合金可转位式面铣刀以及整体式面铣刀等形式。图 2.7.1 所示为硬质合金整体焊接式面铣刀。这种铣刀是由合金钢刀体与硬质合金刀片经焊接而成，其结构紧凑、切削效率高，并且制造比较方便。但是，刀齿损坏后很难修复，所以这种铣刀应用不多。

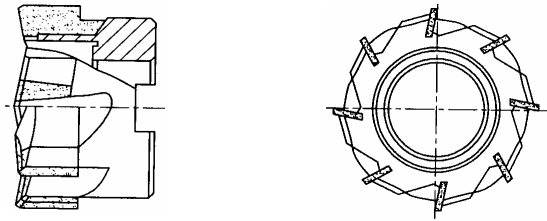


图 2.7.1 硬质合金整体焊接式面铣刀

（2）圆柱铣刀。

圆柱铣刀主要用于在卧式铣床加工平面，圆柱铣刀一般为整体式，材料为高速钢，主

切削刃分布在圆柱上，无副切削刃，如图 2.7.2 所示。该铣刀有粗齿和细齿之分。粗齿铣刀齿数少，刀齿强度大，容屑空间大，重磨次数多，适用于粗加工；细齿铣刀齿数多，工作较平稳，适用于精加工，也可在刀体上镶焊硬质合金刀条。

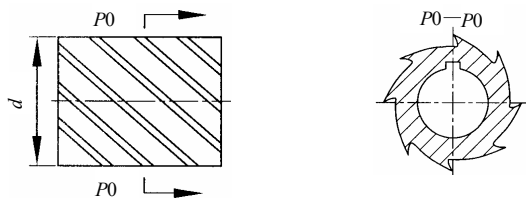


图 2.7.2 圆柱铣刀

圆柱铣刀直径范围为 $\phi 50 \sim \phi 100\text{mm}$ ，齿数 $z=6 \sim 14$ ，螺旋角 $\beta=30^\circ \sim 45^\circ$ 。当螺旋角 $\beta=0^\circ$ 时，螺旋刀齿即为直刀齿，目前很少应用于生产。

(3) 键槽铣刀。

键槽铣刀主要用于在立式铣床上加工圆头封闭键槽等，如图 2.7.3 所示。该铣刀只有两个刀瓣，端面无顶尖孔，端面刀齿从外圆开至轴心，且螺旋角较小，增强了端面刀齿强度。加工键槽时，每次先沿铣刀轴向进给较小的量，此时端面刀齿上的切削刃为主切削刃，圆柱面上的切削刃为副切削刃。然后再沿径向进给，此时端面刀齿上的切削刃为副切削刃，圆柱面上的切削刃为主切削刃，这样反复多次，就可完成键槽的加工。这种铣刀加工键槽精度较高，铣刀寿命较长。键槽铣刀的直径范围为 $\phi 2 \sim \phi 63\text{mm}$ ，柄部有直柄和莫氏锥柄两种形式。

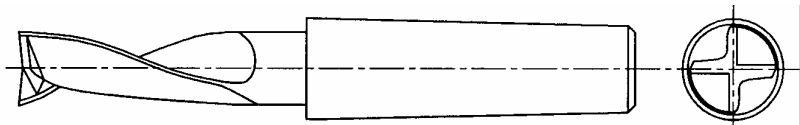


图 2.7.3 键槽铣刀

(4) 立铣刀。

立铣刀主要用于在立式铣床上加工凹槽、台阶面和成型面（利用靠模）等。图 2.7.4 所示为立铣刀，其主切削刃分布在铣刀的圆柱面上，副切削刃分布在铣刀的端面上，且端面中心有顶尖孔。该立铣刀有粗齿和细齿之分，粗齿齿数为 $3 \sim 6$ ，适用于粗加工；细齿齿数为 $5 \sim 10$ ，适用于半精加工。该立铣刀的直径范围是 $\phi 2 \sim \phi 80\text{mm}$ ，其柄部有直柄、莫氏锥柄和 7:24 锥柄等多种形式。该立铣刀应用较广，但切削效率较低。

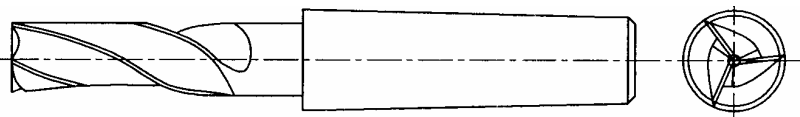


图 2.7.4 高速钢立铣刀

加工中心上用的立铣刀主要有三种形式：球头刀（ $R=D/2$ ）、端铣刀（ $R=0$ ）和 R 刀（ $R<D/2$ ）（俗称“牛鼻刀”或“圆鼻刀”），其中 D 为刀具的直径， R 为刀角半径。某些刀具还可能带有一定的锥度 A 。

（5）盘形铣刀。

盘形铣刀包括槽铣刀、两面刃铣刀和三面刃铣刀。槽铣刀仅在圆柱表面上有刀齿，此种铣刀只适用于加工浅槽。两面刃铣刀在圆柱表面和一个侧面上做有刀齿，适用于加工台阶面。三面刃铣刀在两侧面都有刀齿，主要用于在卧式铣床上加工槽和台阶面等。三面刃铣刀的主切削刃分布在铣刀的圆柱面上，副切削刃分布在两端面上。三面刃铣刀按刀齿结构可分为直齿、错齿和镶齿三种形式。图 2.7.5 所示为直齿三面刃铣刀。该铣刀结构简单，制造方便，但副切削刃前角为零度，切削条件较差。该铣刀直径范围是 $\phi 50 \sim \phi 200\text{mm}$ ，宽度 $B=4 \sim 40\text{mm}$ 。

（6）角度铣刀。

角度铣刀主要用于在卧式铣床上加工各种斜槽和斜面等。根据本身外形不同，角度铣刀可分为单角铣刀、不对称双角铣刀和对称双角铣刀三种。图 2.7.6 所示为单角铣刀。圆锥面上的切削刃是主切削刃，端面上的切削刃是副切削刃。该铣刀直径范围是 $\phi 40 \sim \phi 100\text{mm}$ ，角度 $\theta=18^\circ \sim 90^\circ$ 。角度铣刀的材料一般是高速钢。

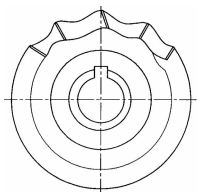


图 2.7.5 直齿三面刃铣刀

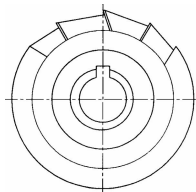


图 2.7.6 单角铣刀

（7）模具铣刀。

模具铣刀主要用于在立式铣床上加工模具型腔。按工作部分形状不同，模具铣刀可分为圆柱形球头铣刀（如图 2.7.7 所示）、圆锥形球头铣刀（如图 2.7.8 所示）和圆锥形立铣刀（如图 2.7.9 所示）三种形式。在前两种铣刀的圆柱面、圆锥面和球面上的切削刃均为主切削刃，铣削时不仅能沿铣刀轴向做进给运动，也能沿铣刀径向做进给运动，而且球头与工件接触往往为一点，这样在数控铣床的控制下，该铣刀就能加工出各种复杂的成型表面，所以其用途独特，很有发展前途。



图 2.7.7 圆柱形球头铣刀



图 2.7.8 圆锥形球头铣刀

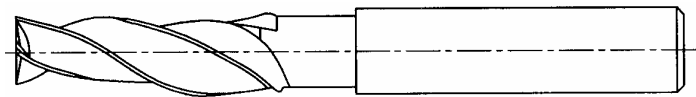


图 2.7.9 圆锥形立铣刀

圆锥形立铣刀的作用与立铣刀基本相同，只是该铣刀可以利用本身的圆锥体，方便地加工出模具型腔的拔模斜度。

（8）成型铣刀。

成型铣刀的切屑刃廓形是根据工件轮廓形状来设计的，其主要在通用铣床上用于工件形状复杂表面的加工，成型铣刀还可用来加工直沟和螺旋沟成型表面。使用成型铣刀加工可保证加工工件尺寸和形状的一致性，生产效率高，使用方便，目前广泛应用于生产加工中。常见的成型铣刀（如凸半圆铣刀和凹半圆铣刀）已有通用标准，但大部分成型铣刀属于专用刀具，需自行设计。

2.8 加工刀具的选择和切削用量的确定

加工刀具的选择和切削用量的确定是数控加工工艺中的重要内容，它不仅影响数控机床的加工效率，而且直接影响加工质量。CAD/CAM 技术的发展，使得在数控加工中直接利用 CAD 的设计数据成为可能，特别是微机与数控机床的连接，使得设计、工艺规划及编程的整个过程可以全部在计算机上完成，一般不需要输出专门的工艺文件。

现在，许多 CAD/CAM 软件包都提供自动编程功能，这些软件一般是在编程界面中提示工艺规划的有关问题，比如刀具选择、加工路径规划和切削用量设定等。编程人员只要设置了有关的参数，就可以自动生成 NC 程序并传输至数控机床完成加工。因此，数控加工中的刀具选择和切削用量的确定是在人机交互状态下完成的，这与普通机床加工形成鲜明的对比，同时也要求编程人员必须掌握刀具选择和切削用量确定的基本原则，在编程时充分考虑数控加工的特点。

2.8.1 数控加工常用刀具的种类及特点

数控加工刀具必须适应数控机床高速、高效和自动化程度高的特点，一般应包括通用刀具、通用连接刀柄及少量专用刀柄。刀柄要连接刀具并装在机床动力头上，因此已逐渐

标准化和系列化。数控刀具的分类有多种方法。根据切削工艺可分为：车削刀具（分外圆、内孔、螺纹和切割刀具等多种）、钻削刀具（包括钻头、铰刀和丝锥等）、镗削刀具、铣削刀具等。根据刀具结构可分为：整体式、镶嵌式、采用焊接和机夹式连接，机夹式又可分为不转位和可转位两种。根据制造刀具所用的材料可分为：高速钢刀具、硬质合金刀具、金刚石刀具及其他材料刀具（如陶瓷刀具、立方氮化硼刀具等）。为了适应数控机床对刀具耐用、稳定、易调、可换等的要求，近几年机夹式可转位刀具得到了广泛的应用，在数量上达到全部数控刀具的 30%~40%，金属切削量占总数的 80%~90%。

数控刀具与普通机床上所用的刀具相比，有许多不同的要求，主要有以下特点。

- 刚性好、精度高、抗振及热变形小。
- 互换性好，便于快速换刀。
- 寿命高，切削性能稳定、可靠。
- 刀具的尺寸便于调整，以减少换刀调整时间。
- 刀具应能可靠地断屑或卷屑，以利于切屑的排除。
- 系列化、标准化，以利于编程和刀具管理。

2.8.2 数控加工刀具的材料

刀具材料对刀具使用寿命、加工效率、加工质量和加工成本都有很大影响，因此需要合理选择刀具材料。常用的刀具材料主要包括以下几种。

（1）高速钢。

高速钢全称高速合金工具钢，也称为白钢，19 世纪研制而成。高速钢是含有较多钨、钼、铬、钒等元素的高合金工具钢。其具有较高的硬度（热处理硬度达 HRC62-67）和耐热性（切削温度可达 550℃~600℃），切削速度比碳素工具钢和合金工具钢高 1~3 倍，刀具耐用度高 10~40 倍，甚至更多，可以加工从有色金属到高温合金的范围广泛的材料。

（2）硬质合金。

硬质合金是用高耐热性和高耐磨性的金属碳化物（碳化钨、碳化铁、碳化钼、碳化铌等）与金属粘结剂（钴、镍、钼等）在高温下烧结而成的粉末冶金制品。常用的硬质合金有钨、钴（YG）类、钨钛钴（YT）类和通用硬质合金（YW）类 3 类。

钨钴类硬质合金（YG）类：主要由碳化钨和钴组成，抗弯强度和冲击韧性比较好，不易崩刃，很适宜切削切屑呈崩碎状的铸铁等脆性材料。YG 类硬质合金的刃磨性好，刃口可以磨得比较锋利，故切削有色金属及合金的效果也较好。

钨钛钴硬质合金（YT）类：主要由碳化钨、碳化钛和钴组成。由于 YT 类硬质合金的

抗弯强度和冲击韧性比较差，主要用于切削一般呈带状的普通碳钢及合金钢等塑性材料。

钨钛钽（铌）类硬质合金（YW）类：在普通硬质合金中加入了碳化钽或碳化铌从而提高了硬质合金的韧性和耐热性，使其具有较好的综合切削性能，主要用于不锈钢、耐热钢、高锰钢的加工，也适用于普通碳钢和铸铁的加工，因此被称为通用型硬质合金。

（3）陶瓷材料。

陶瓷材料是以氧化铝为主要成分，经压制成型后烧结而成的一种刀具材料。它的硬度可达 HRA91-95，在 1200℃ 的切削温度下仍可保持 HRA80 的硬度。另外，它的化学惰性大、摩擦系数小、耐磨性好，加工钢件时的寿命为硬质合金的 10~12 倍。其最大缺点是脆性大，抗弯强度和冲击韧性低。因此，主要用于半精加工和精加工高硬度、高强度钢和冷硬铸铁等材料。常用的陶瓷刀具材料有氧化铝、复合氧化铝以及复合氧化硅等。

（4）人造金刚石。

人造金刚石是通过合金触媒的作用，在高温高压下由石墨转化而成。人造金刚石具有极高的硬度（显微硬度可达 HV10000）和耐磨性，其摩擦系数小，切削刃可以做得非常锋利。因此，用人造金刚石做刀具可以获得很高的加工表面质量，多用于在高速下精细车削或镗削有色金属及非金属材料。尤其是用它切削加工硬质合金、陶瓷、高硅铝合金及耐磨塑料等高硬度、高耐磨性的材料时，具有很大的优越性。

2.8.3 数控加工刀具的选择

刀具的选择是在数控编程的人机交互状态下进行的。应根据机床的加工能力、加工工序、工件材料的性能、切削用量以及其他相关因素正确选用刀具和刀柄。刀具选择的总原则是：适用、安全和经济。适用是指要求所选择的刀具能达到加工的目的，完成材料的去除，并达到预定的加工精度。安全是指在有效去除材料的同时，不会产生刀具的碰撞和折断等，要保证刀具及刀柄不会与工件相碰撞或挤擦，造成刀具或工件的损坏。经济是指能以最小的成本完成加工。在同样可以完成加工的情形下，选择相对综合成本较低的方案，而不是选择最便宜的刀具；在满足加工要求的前提下，尽量选择较短的刀柄，以提高刀具加工的刚性。

选取刀具时，要使刀具的尺寸与被加工工件的表面尺寸相适应。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，选用高速钢立铣刀；加工毛坯表面或粗加工孔时，可选取镶硬质合金刀片的玉米铣刀；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、盘形铣刀和锥形铣刀。

在生产过程中，铣削零件周边轮廓时，常采用立铣刀，所用的立铣刀的刀具半径一定要小于零件内轮廓的最小曲率半径。一般取最小曲率半径的 0.8~0.9 倍即可。零件的加工

高度（Z 方向的背吃刀量）最好不要超过刀具的半径。

平面铣削时，应选用不重磨硬质合金端铣刀、立铣刀或可转位面铣刀。一般采用二次进给，第一次进给最好用端铣刀粗铣，沿工件表面连续进给。选好每次进给的宽度和铣刀的直径，使接痕不影响精铣精度。因此，加工余量大且不均匀时，铣刀直径要选得小些。精加工时，一般用可转位密齿面铣刀，铣刀直径要选得大些，最好能够包容加工面的整个宽度，可以设置 6~8 个刀齿，密布的刀齿使进给速度大大提高，从而提高切削效率，同时可以达到理想的表面加工质量，甚至可以实现以铣代磨。

加工凸台、凹槽和箱口面时，选取高速钢立铣刀、镶硬质合金刀片的端铣刀和立铣刀。在加工凹槽时应采用直径比槽宽小的铣刀，先铣槽的中间部分，然后再利用刀具半径补偿（或称直径补偿）功能对槽的两边进行铣加工，这样可以提高槽宽的加工精度，减少铣刀的种类。

加工毛坯表面时，最好选用硬质合金波纹立铣刀，它在机床、刀具和工件系统允许的情况下，可以进行强力切削。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、锥形铣刀和盘形铣刀。加工孔时，应该先用中心钻打中心孔，用以引正钻头。然后再用较小的钻头钻孔至所需深度，之后用扩孔钻头进行扩孔，最后加工至所需尺寸并保证孔的精度。在加工较深的孔时，特别要注意钻头的冷却和排屑问题，可以利用深孔钻削循环指令 G83 进行编程，即让钻头攻进一段后，快速退出工件进行排屑和冷却；再攻进，再进行冷却和排屑，循环直至孔深钻削完成。

在进行自由曲面加工时，由于球头刀具的端部切削速度为零，因此，为保证加工精度，切削行距一般取得很密，故球头常用于曲面的精加工。而平头刀具在表面加工质量和切削效率方面都优于球头刀，因此只要在保证不过切的前提下，无论是曲面的粗加工还是精加工，都应优先选择平头刀。另外，刀具的耐用度和精度与刀具价格关系极大，必须引起注意的是，在大多数情况下，虽然选择好的刀具增加了刀具成本，但由此带来的加工质量和加工效率的提高，则可以使整个加工成本大大降低。

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动作。因此必须采用标准刀柄，以便使钻、镗、扩、铣等工序用的标准刀具迅速、准确地装到机床主轴或刀库中去。编程人员应了解机床上所用刀柄的结构尺寸、调整方法以及调整范围，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，其刀柄分为直柄（三种规格）和锥柄（四种规格）两类，共包括十六种不同用途的刀柄。

在经济型数控加工中，由于刀具的刃磨、测量和更换多为人工手动进行，占用辅助时间较长，因此必须合理安排刀具的排列顺序。一般应遵循以下原则：尽量减少刀具数量；一把刀具装夹后，应完成其所能进行的所有加工；粗精加工的刀具应分开使用，即使是相

同尺寸规格的刀具；先铣后钻；先进行曲面精加工，后进行二维轮廓精加工；在可能的情况下，应尽可能利用数控机床的自动换刀功能，以提高生产效率等。

2.8.4 切削用量的确定

合理选择切削用量的原则如下：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；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。具体数值应根据机床说明书和切削用量手册，并结合经验而定。

1. 背吃刀量 a_p

背吃刀量 a_p 也称为切削深度，在机床、工件和刀具刚度允许的情况下，其就等于加工余量，这是提高生产率的一个有效措施。为了保证零件的加工精度和表面粗糙度，一般应留一定的余量进行精加工。数控机床的精加工余量可略小于普通机床。

2. 切削宽度 L

切削宽度称为步距，一般切削宽度 L 与刀具直径 D 成正比，与背吃刀量成反比。在经济型数控加工中，一般 L 的取值范围为 $L=(0.6\sim0.9)D$ 。在粗加工中，大步距有利于加工效率的提高。使用圆鼻刀进行加工，实际参与加工的部分是刀具直径扣除刀尖的圆角部分，即实际加工宽度 $d=D-2r$ (D 为刀具直径， r 为刀尖圆角半径)， L 可以取 $(0.8\sim0.9)d$ 。使用球头刀进行精加工时，步距的确定应首先考虑所能达到的精度和表面粗糙度。

3. 切削线速度 v_c

切削线速度 v_c ，单位为 m/min 。提高 v_c 值也是提高生产率的一个有效措施，但 v_c 与刀具寿命的关系比较密切。随着 v_c 的增大，刀具寿命急剧下降，故 v_c 的选择主要取决于刀具寿命。另外，切削速度与加工材料也有很大关系，例如用立铣刀铣削合金钢 30CrNi2MoVA 时， v_c 可采用 8m/min 左右；而用同样的立铣刀铣削铝合金时， v_c 可选 200m/min 以上。一般好的刀具供应商都会在其手册或刀具说明书中提供刀具的切削速度推荐参数 v_c 。

此外，在确定精加工、半精加工的切削速度时，应注意避开积屑瘤和鳞刺产生的区域；在易发生振动的情况下，切削速度应避开自激振动的临界速度；在加工带硬皮的铸锻件时或加工大件、细长件和薄壁件，以及断切削时，应选用较低的切削速度。

4. 主轴转速 n

主轴转速的单位是 r/min ，一般应根据切削速度 v_c ，刀具或工件直径来选定。计算公式为

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D_c}$$

式中， D_c 是刀具直径，单位为 mm。在使用球头铣刀时要做一些调整，球头铣刀的计算直径 D_{eff} 要小于铣刀直径 D_c ，故其实际转速不应按铣刀直径 D_c 计算，而应按计算直径 D_{eff} 计算。

$$D_{eff} = [D_c^2 - (D_c - 2t)^2] \times 0.5$$

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D_{eff}}$$

数控机床的控制面板上一般备有主轴转速修调（倍率）开关，可在加工过程中对主轴转速进行整倍数调整。

5. 进给速度 v_f

进给速度 v_f 是指机床工作台在做插位时的进给速度，单位为 mm/min。 v_f 应根据零件的加工精度和表面粗糙度要求以及刀具和工件材料来选择。 v_f 的增加可以提高生产效率，但是刀具寿命也会降低。加工表面粗糙度要求低时， v_f 可选择得大些。在加工过程中， v_f 也可通过机床控制面板上的修调开关进行人工调整，但是最大进给速度要受到设备刚度和进给系统性能等的限制。进给速度可以按以下公式进行计算：

$$v_f = n z f_z$$

式中， v_f 是工作台进给速度，单位为 mm/min； n 表示主轴转速，单位为 r/min； z 表示刀具齿数； f_z 表示进给量，单位为 mm/齿， f_z 值由刀具供应商提供。

在数控编程中，还应考虑在不同情形下选择不同的进给速度。如在初始切削进给时，特别是在 Z 轴下刀时，因为进行端铣，受力较大，同时考虑程序的安全性问题，所以应以相对较慢的速度进给。

随着数控机床在实际生产中的广泛应用，数控编程已经成为数控加工中的关键问题之一。在数控加工程序的编制过程中，要在人机交互状态下及时选择刀具、确定切削用量。因此，编程人员必须熟悉刀具的选择方法和切削用量的确定原则，从而保证零件的加工质量和加工效率，充分发挥数控机床的优点，提高企业的经济效益和生产水平。

2.9 高度与安全高度

安全高度是为了避免刀具碰撞工件或夹具而设定的高度，即在主轴方向上的偏移值。在铣削过程中，如果刀具需要转移位置，将会退到这一高度，然后再进行 G00 插补到下一个进刀位置。一般情况下这个高度应大于零件的最大高度（即高于零件的最高表面）。起止高度是指在程序开始时，刀具将先到达这一高度，同时在程序结束后，刀具也将退回到这一高度。起止高度大于或等于安全高度，如图 2.9.1 所示。

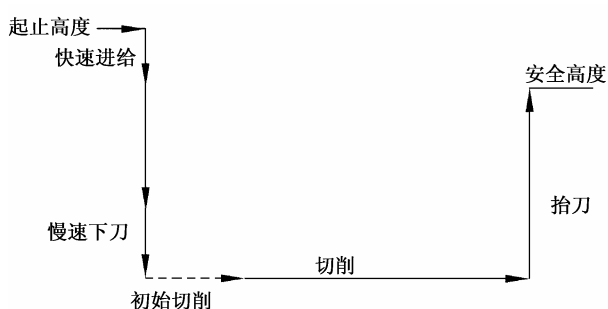


图 2.9.1 起止高度与安全高度示意图

刀具从起止高度到接近工件开始切削，需要经过快速进给和慢速下刀两个过程。刀具先以 G00 快速进给到指定位置，然后慢速下刀到加工位置。如果刀具不是经过先快速再慢速的过程接近工件，而是以 G00 的速度直接下刀到加工位置，这样就很不安全。因为假使该加工位置在工件内或工件上，在采用垂直下刀方式的情况下，刀具很容易与工件相碰，这在数控加工中是不允许的。即使是在空的位置下刀，如果不采用先快后慢的方式下刀，由于惯性的作用也很难保证下刀所到位置的准确性。但是慢速下刀的距离不宜取得太大，因为此时的速度往往比较慢，太长的慢速下刀距离将影响加工效率。

在加工过程中，当刀具在两点间移动而不切削时，如果设定为抬刀，刀具将先提高到安全高度平面，再在此平面上移动到下一点，这样虽然延长了加工时间，但比较安全。特别是在进行分区加工时，可以防止两区域之间有高于刀具移动路线的部分与刀具碰撞事故的发生。一般来说，在进行大面积粗加工时，通常建议使用抬刀，以便在加工时可以暂停，对刀具进行检查；在精加工或局部加工时，通常使用不抬刀以提高加工速度。

2.10 走刀路线的选择

在数控加工中，刀具（严格说是刀位点）相对于工件的运动轨迹和方向称为加工路线，即刀具从对刀点开始运动起，直至结束加工程序所经过的路径，包括切削加工的路径及刀具引入、返回等非切削空行程。走刀路线是刀具在整个加工工序中相对于工件的运动轨迹，不但包括了工序的内容，而且也反映出工序的顺序。走刀路线是编写程序的依据之一。确定加工路线时首先必须保证被加工零件的尺寸精度和表面质量，其次应考虑数值计算简单、走刀路线尽量短、效率较高等。

工序顺序是指同一道工序中各个表面加工的先后次序。工序顺序对零件的加工质量、加工效率和数控加工中的走刀路线有直接影响，应根据零件的结构特点和工序的加工要求等合理安排。工序的划分与安排一般可随走刀路线来进行，在确定走刀路线时，主要考虑

以下几点。

(1) 对点位加工的数控机床，如钻床、镗床，要考虑尽可能使走刀路线最短，减少刀具空行程时间，提高加工效率。

如图 2.10.1a 所示，按照一般习惯，总是先加工均布于外圆周上的八个孔，再加工内圆周上的四个孔。但是对点位控制的数控机床而言，要求定位精度高，定位过程应该尽可能快，因此这类机床应按空程最短来安排走刀路线，以节省时间，如图 2.10.1b 所示。



图 2.10.1 走刀路线示意图

(2) 应能保证零件的加工精度和表面粗糙度要求。

当铣削零件外轮廓时，一般采用立铣刀侧刃切削。刀具切入工件时，应沿外轮廓曲线延长线的切向切入，避免沿零件外轮廓的法向切入，以免在切入处产生刀具的刻痕而影响表面质量，保证零件外轮廓曲线平滑过渡。同理，在切离工件时，应该沿零件轮廓延长线的切向逐渐切离工件，避免在工件的轮廓处直接退刀影响表面质量，如图 2.10.2 所示。

铣削封闭的内轮廓表面时，如果内轮廓曲线允许外延，则应沿切线方向切入或切出。若内轮廓曲线不允许外延，则刀具只能沿内轮廓曲线的法向切入或切出，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。若内部几何元素相切无交点时，刀具切入切出点应远离拐角，以防刀补取消时在轮廓拐角处留下凹口，如图 2.10.3 所示。

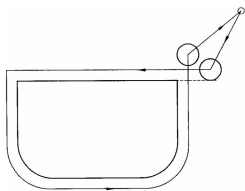


图 2.10.2 外轮廓铣削走刀路线

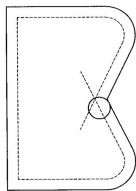


图 2.10.3 内轮廓铣削走刀路线

对于边界敞开的曲面加工，可采用两种走刀路线。第一种走刀路线如图 2.10.4a 所示，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，以保证母线的直线度。第二种走刀路线如图 2.10.4b 所示，便于加工后检验，曲面的准确度较高，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

头铣刀应由边界外开始加工。



图 2.10.4 曲面铣削走刀路线

图 2.10.5a、b 所示分别为用行切法加工和环切法加工凹槽的走刀路线，而图 2.10.5c 为先用行切法，最后环切一刀光整轮廓表面的走刀路线。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；环切法则是指刀具与零件轮廓的切点轨迹是一圈一圈的。图 2.10.5 三种方案中，图 2.10.5a 所示方案在周边留有大量的残余，表面质量最差；图 2.10.5b 所示方案和图 2.10.5c 所示方案都能保证精度，但图 2.10.5b 所示方案走刀路线稍长，程序计算量大。

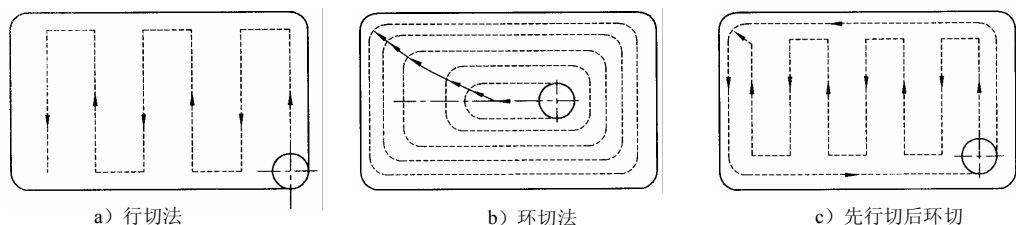


图 2.10.5 凹槽的走刀路线

此外，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表面粗糙度，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。

2.11 对刀点与换刀点的选择

“对刀点”是数控加工时刀具相对零件运动的起点，又称“起刀点”，也是程序的开始。在加工时，工件可以在机床加工尺寸范围内任意安装，要正确执行加工程序，必须确定工件在机床坐标系的确切位置。确定对刀点的位置，也就确定了机床坐标系和零件坐标系之间的相互位置关系。对刀点是工件在机床上定位装夹后，再设置在工件坐标系中的。

对于数控车床、加工中心等多刀具加工的数控机床，在加工过程中需要进行换刀，所以在编程时应考虑不同工序之间的换刀位置，即“换刀点”。换刀点应选择在工件的外部，避免换刀时刀具与工件及夹具发生干涉，损坏刀具或工件。

对刀点的选择原则，主要是考虑对刀方便，对刀误差小，编程方便，加工时检查方便、可靠。对刀点的设置没有严格规定，可以设置在工件上，也可以设置在夹具上，但在编程坐标系中必须有确定的位置，如图 2.11.1 所示的 X_1 和 Y_1 。对刀点既可以与编程原点重合，也可以不重合，主要取决于加工精度和对刀的方便性。当对刀点与编程原点重合时， $X_1=0$ ， $Y_1=0$ 。

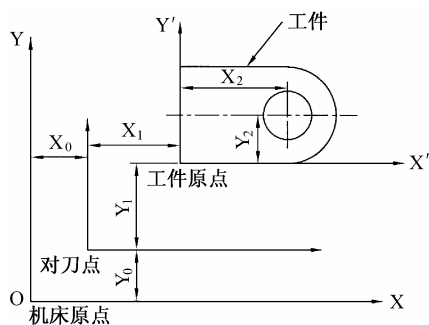


图 2.11.1 对刀点选择示意图

为了提高零件的加工精度，对刀点要尽可能选择在零件的设计基准或工艺基准上。例如，零件上孔的中心点或两条相互垂直的轮廓边的交点都可以作为对刀点，有时零件上没有合适的部位，可以加工出工艺孔来对刀。生产中常用的对刀工具有百分表、中心规和寻边器等，对刀操作一定要仔细，对刀方法一定要与零件的加工精度相适应。

2.12 数控加工的补偿

在二十世纪六七十年代的数控加工中没有补偿的概念，所以编程人员不得不围绕刀具的理论路线和实际路线的相对关系来进行编程，容易产生错误。补偿的概念出现以后，大大地提高了编程的工作效率。

在数控加工中有刀具半径补偿、刀具长度补偿和夹具补偿。这三种补偿基本上能解决在加工中因刀具形状而产生的轨迹问题。下面简单介绍一下这三种补偿在一般加工编程中的应用。

2.12.1 刀具半径补偿

在数控机床进行轮廓加工时，由于刀具具有一定的半径（如铣刀半径），因此在加工时，

刀具中心的运动轨迹必须偏离实际零件轮廓一个刀具半径值, 否则实际需要的尺寸将与加工出的零件尺寸相差一个刀具半径值或一个刀具直径值。此外, 在零件加工时, 有时还需要考虑加工余量和刀具磨损等因素的影响。有了刀具半径补偿后, 在编程时就可以不考虑太多刀具的直径大小了。刀具半径补偿一般只用于铣刀类刀具, 当铣刀在内轮廓加工时, 刀具中心向零件内偏离一个刀具半径值; 在外轮廓加工时, 刀具中心向零件外偏离一个刀具半径值。当数控机床具备刀具半径补偿功能时, 数控编程只需按工件轮廓进行, 然后再加上刀具半径补偿值, 此值可以在机床上设定。程序中通常使用 G41/G42 指令来执行, 其中 G41 为刀具半径左补偿, G42 为刀具半径右补偿。根据 ISO 标准, 沿刀具前进方向看去, 当刀具中心轨迹位于零件轮廓右边时, 称为刀具半径右补偿; 反之, 称为刀具半径左补偿。

在使用 G41/G42 进行半径补偿时, 应采取如下步骤: 设置刀具半径补偿值; 让刀具移动来使补偿有效 (此时不能切削工件); 正确地取消半径补偿 (此时也不能切削工件)。当然要注意的是, 在切削完成而刀具补偿结束时, 一定要用 G40 使补偿无效。G40 的使用同样遇到和使补偿有效相同的问题, 一定要等刀具完全切削完毕并安全地退出工件后, 才能执行 G40 命令来取消补偿。

2.12.2 刀具长度补偿

根据加工情况, 有时不仅需要对刀具半径进行补偿, 还要对刀具长度进行补偿。程序员在编程的时候, 首先要指定零件的编程中心, 然后才能建立工件编程的坐标系, 而此坐标系只是一个工件坐标系, 零点一般在工件上。长度补偿只是和 Z 坐标有关, 因为刀具由主轴锥孔定位而不改变, 对于 Z 坐标的零点就不一样了。每一把刀的长度都是不同的, 例如, 要钻一个深为 60mm 的孔, 然后攻螺纹长度为 55mm, 分别用一把长为 250mm 的钻头和一把长为 350mm 的丝锥。先用钻头钻深 60mm 的孔, 此时机床已经设定了工件零点。当换上丝锥攻螺纹时, 如果两把刀都设定从零点开始加工, 丝锥因为比钻头长而攻螺纹过长, 会损坏刀具和工件。这时就需要进行刀具长度补偿, 铣刀的长度补偿与控制点有关。一般用一把标准刀具的刀头作为控制点, 则该刀具称为零长度刀具。长度补偿的值等于所换刀具与零长度刀具的长度差。另外, 当把刀具长度的测量基准面作为控制点, 则刀具长度补偿始终存在。无论用哪一把刀具都要进行刀具的绝对长度补偿。

在进行刀具长度补偿前, 必须先进行刀具参数的设置。设置的方法有机内试切法、机内对刀法和机外对刀法。对数控车床来说, 一般采用机内试切法和机内对刀法。对数控铣床而言, 采用机外对刀法为宜。不管采用哪种方法, 所获得的数据都必须通过手动输入数据方式将刀具参数输入到数控系统的刀具参数表中。

程序中通常使用指令 G43/G44 和 H3 来执行刀具长度补偿。使用指令 G49 可以取消刀

具长度补偿，其实不必使用这个指令，因为每把刀具都有自己的长度补偿。当换刀时，利用 G43/G44 和 H3 指令同样可以赋予刀具自身刀长补偿而自动取消前一把刀具的长度补偿。在加工中心上，刀具长度补偿的使用，一般是将刀具长度数据输入到机床的刀具数据表中，当机床调用刀具时，自动进行长度的补偿。刀具的长度补偿值也可以在设置机床工作坐标系时进行补偿。

2.12.3 夹具偏置补偿

刀具半径补偿和刀具长度补偿一样，让编程人员可以不用考虑刀具的长短和大小，夹具偏置补偿可以让编程人员不考虑工件夹具的位置。当用加工中心加工小型工件时，工装上一次可以装夹几个工件，编程人员可以不用考虑每一个工件在编程时的坐标零点，而只需按照各自的编程零点进行编程，然后使用夹具偏置来移动机床在每一个工件上的编程零点。夹具偏置是使用夹具偏置指令 G54~G59 来执行或使用 G92 指令设定坐标系。当一个工件加工完成之后，加工下一个工件时使用 G92 来重新设定新的工件坐标系。

上述三种补偿是在数控加工中常用的，它给编程和加工带来很大的方便，能大大地提高工作效率。

2.13 轮廓控制

在数控编程中，有时候需要通过轮廓来限制加工范围，而某些刀轨的生成中，轮廓是必不可少的因素，缺少轮廓将无法生成刀路轨迹。轮廓线需要设定其偏置补偿的方向，对于轮廓线会有三种参数选择，即刀具在轮廓上、轮廓内或轮廓外。

(1) 刀具在轮廓上：刀具中心线始终完全处于轮廓上，如图 2.13.1a 所示。

(2) 刀具在轮廓内：刀具中心线与轮廓边，相差一个刀具半径，如图 2.13.1b 所示。

(3) 刀具在轮廓外：刀具完全越过轮廓线，超过轮廓线一个刀具半径，如图 2.13.1c 所示。

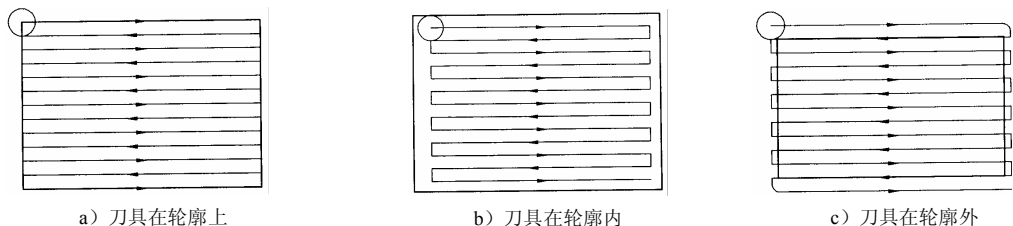


图 2.13.1 轮廓控制

2.14 顺铣与逆铣

在加工过程中,铣刀的进给方向有两种,即顺铣和逆铣。对着刀具的进给方向看,如果工件位于铣刀进给方向的左侧,则进给方向称为顺时针,当铣刀旋转方向与工件进给方向相同,即为顺铣,如图 2.14.1a 所示。如果工件位于铣刀进给方向的右侧时,则进给方向定义为逆时针,当铣刀旋转方向与工件进给方向相反,即为逆铣,如图 2.14.1b 所示。顺铣时,刀齿开始和工件接触时切削厚度最大,且从表面硬质层开始切入,刀齿受到很大的冲击载荷,铣刀变钝较快,刀齿切入过程中没有滑移现象。逆铣时,切削由薄变厚,刀齿从已加工表面切入,对铣刀的磨损较小。逆铣时,铣刀刀齿接触工件后不能马上切入金属层,而是在工件表面滑动一小段距离,且在滑动过程中,由于强烈的摩擦产生大量的热量,同时在待加工表面易形成硬化层,降低了刀具的耐用度,影响工件表面粗糙度,给切削带来不利因素。因此一般情况下应尽量采用顺铣加工,以降低被加工零件表面粗糙度,保证尺寸精度,并且顺铣的功耗要比逆铣小,在同等切削条件下,顺铣功耗比逆铣功耗要低 5%~15%,同时顺铣也更有利于排屑。但是在切削面上有硬质层、积渣以及工件表面凹凸不平较显著的情况下,应采用逆铣法,例如加工锻造毛坯。

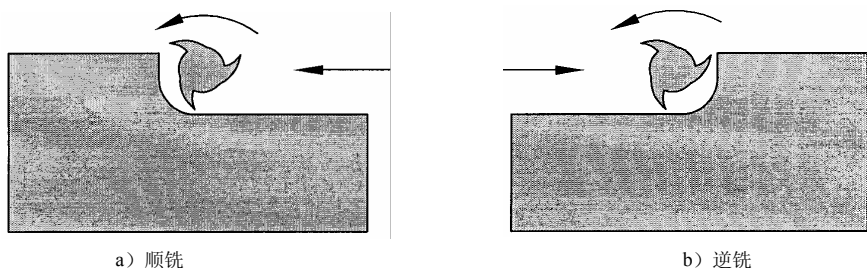


图 2.14.1 顺铣和逆铣示意图

2.15 切削液

合理地选用切削液,可以带走大量的切屑,降低切削温度,减少刀具磨损,抑制积屑瘤和鳞刺产生,降低功耗,提高加工表面的质量。因而合理选用切削液是提高金属切削效率既经济又简单的一种方法。

切削液主要有润滑、冷却、清洗和防锈作用;切削液主要可分为水溶液、乳化液和切削油三大类;另外切削液开关在数控编程中可以自动设定,对自动换刀的数控加工中心,可以按需要开启切削液。

2.16 加工精度

机械加工精度是指零件加工后的实际几何参数（尺寸、形状及相互位置）与理想几何参数符合的程度，符合程度越高，精度愈高。两者之间的差异即加工误差。加工误差是指加工后得到的零件实际几何参数偏离理想几何参数的程度（图 2.16.1），加工后的实际型面与理论型面之间存在着一定的误差。“加工精度”和“加工误差”是评定零件几何参数准确程度这一问题的两个方面。加工误差越小，则加工精度越高。实际生产中，加工精度的高低往往是以加工误差的大小来衡量的。在生产过程中，任何一种加工方法所能达到的加工精度和表面粗糙度都是有一定范围的，不可能也没必要把零件做得绝对准确，只要把这种加工误差控制在性能要求的允许（公差）范围之内即可，通常称之为“经济加工精度”。

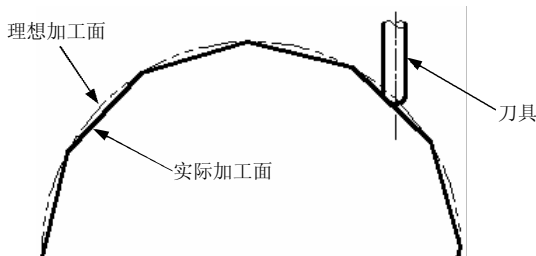


图 2.16.1 加工精度示意图

零件的加工精度包括尺寸精度、形状位置精度和表面粗糙度三个方面的内容。通常形状公差应限制在位置公差之内，而位置误差也应限制在尺寸公差之内。当尺寸精度高时，相应的位置精度、形状精度也高。但是当形状精度要求高时，相应的位置精度和尺寸精度不一定高，这需要根据零件加工的具体要求来决定。一般情况下，零件的加工精度越高，则加工成本相应地也越高，生产效率则会相应地越低。

数控加工的特点之一就是具有较高的加工精度，因此对于数控加工的误差必须加以严格控制，以达到加工要求。首先要了解在数控加工中可能造成加工误差的因素及其影响规律。

由机床、夹具、刀具和工件组成的机械加工工艺系统（简称工艺系统）会有各种各样的误差产生，这些误差在各种不同的具体工作条件下都会以各种不同的方式（或扩大或缩小）反映为工件的加工误差。工艺系统的原始误差主要有工艺系统的原理误差、几何误差、调整误差、装夹误差、测量误差、夹具的制造误差与磨损、机床的制造误差、安装误差及磨损、工艺系统的受力变形引起的加工误差、工艺系统的受热变形引起的加工误差以及工

件内应力重新分布引起的变形等。

在交互图形自动编程中，一般仅考虑两个主要误差：插补计算误差和残余高度。

刀轨是由圆弧和直线组成的线段集合近似地取代刀具的理想运动轨迹，两者之间存在着一定的误差，称为插补计算误差。插补计算误差是刀轨计算误差的主要组成部分，它与插补周期成正比，插补周期越大，插补计算误差越大。一般情况下，在 CAM 软件上通过设置公差带来控制插补计算误差，即实际刀轨相对理想刀轨的偏差不超过公差带的范围。

残余高度是指在数控加工中相邻刀轨间所残留的未加工区域的高度，它的大小决定了所加工表面的表面粗糙度，同时决定了后续的抛光工作量，是评价加工质量的一个重要指标。在利用 CAM 软件进行数控编程时，对残余高度的控制是刀轨行距计算的主要依据。在控制残余高度的前提下，以最大的行间距生成数控刀轨是高效率数控加工所追求的目标。