

第 2 章 数控车削加工工艺

本章知识点

- ① 数控车削加工工艺的主要内容;
- ② 分析零件图样的内容和分析的方法;
- ③ 如何选择和确定数控车床加工内容;
- ④ 拟定数控车削加工工艺方案的任务和方法;
- ⑤ 数控车削加工工序划分方法以及工序设计的任务 (包括装夹方案的制订、刀具的选用和切削用量确定等);
- ⑥ 数控车削加工工艺文件。

2.1 数控车削加工工艺概述

数控车削加工是数控加工中最常用的加工方法之一,其加工工艺与普通车床的加工工艺有相似之处,但由于数控车床具有直线、圆弧插补功能,许多数控系统还具有非圆曲线的编程功能等,工艺范围较普通车床宽得多,因此,数控车床加工零件往往比普通车床加工零件的工艺规程要复杂。数控加工前要编写数控加工程序,编制数控程序实际包括工件的加工工艺过程、刀具选用、切削用量和走刀路线等,所以,如果对相关数控加工工艺不熟悉,就无法合理地编制零件的加工程序。

1. 数控车削加工工艺主要内容

数控车床的加工工艺主要包括如下内容。

- ① 通过对数控车削加工的适应性分析,确定进行数控加工的零件内容 (即加工对象)。
- ② 分析零件图,明确加工内容和技术要求。
- ③ 确定加工方案,制定数控加工工艺路线,如划分工序、安排加工顺序、处理与非数

控加工工序的衔接等。

④ 数控加工工序的设计,如选择定位基准、确定装夹方案、选用刀具、确定切削用量等。

⑤ 编制数控加工程序。

⑥ 填写数控加工工艺技术文件。

2. 数控车削加工工艺特点

工艺规程是操作人员在加工时的指导性文件。由于普通车床受控于操作工人,因此,在普通车床上用的工艺规程实际上只是一个工艺过程卡,车床的切削用量、走刀路线、工序的工步往往都是由操作工人自行选定。数控车床的加工程序是数控车削加工的指令性文件。数控车床运行受控于程序指令,加工的全过程都是按照程序指令自动执行的。因此,数控车床与普通车床相比,工艺规程有较大的差别,涉及的内容也较为广泛。

数控车床的加工程序不仅包括零件的工艺过程,而且还包括切削用量、走刀路线、刀具选用以及车床的运动过程等,这些具体的问题,不仅是在数控加工工艺设计时要认真考虑的问题,而且还必须作出合理选择并编入到数控加工程序中,这就要求编程人员对数控车床的性能、特点、刀具系统、运动方式、加工范围以及工件的装夹方法等都要非常熟悉。

因此,数控车床加工工艺的制定时工艺内容是非常具体的,工艺设计是很严密的。数控车削加工工艺合理与否不仅会影响车床效率的发挥,而且将直接影响到零件的加工质量。

2.2 数控车削加工工艺制定

数控车削加工工艺制定得合理与否,对数控加工程序编制、数控车床加工效率以及工件的加工精度都有重要的影响。因此,根据车削加工的一般工艺原则并结合数控车床的特点,制订零件的数控车削加工工艺显得非常重要。其主要内容有:分析被加工零件图样,确定在数控车床上加工内容,在此基础上确定在数控车床上的工件装夹方式、加工顺序、刀具的进给路线以及刀具、夹具、切削用量的选择等。

1. 分析零件图样

分析零件图样是工艺准备中的首要工作。内容包括零件轮廓的组成要素,尺寸、形状、位置公差要求,表面粗糙度要求,材料及热处理、毛坯以及生产批量等,这些都是制定合理工艺方案的依据。对于适合数控车削加工内容,要结合数控车削加工特点,在分析零件图样时,还应注意以下几点分析。

(1) 尺寸标注方法分析

在数控车床的编程中,点、线、面的位置一般都是以工件坐标原点为基准的,因此零件图中尺寸标注根据数控车床编程特点尽量直接给出坐标尺寸,或采用同一基准标注尺寸,减

少编程辅助时间, 容易满足加工要求。

(2) 零件轮廓几何要素分析

在手工编程时需要知道几何要素各节点坐标, 在 CAD/CAM 编程时, 要对轮廓所有的几何要素进行定义, 因此, 在分析零件图样时, 要分析几何要素给定条件是否充分。尽量避免由于参数不全或不清, 增加编程计算难度, 甚至无法编程。对于配合类零件不仅要个体零件进行分析, 而且要对装配体进行分析, 确保加工后满足要求。

(3) 精度和技术要求分析

保证零件精度和各项技术要求是最终目标, 只有在分析零件有关精度要求和技术要求的基础上, 才能合理选择加工方法、装夹方法、刀具及切削用量等。如对于表面粗糙度要求高的表面, 应采用恒线速度切削, 若还要采用其他措施(如磨削)弥补, 则应给后续工序留有余量。对于零件图上位置精度要求高的表面, 应尽量把这些表面在同一次装夹中完成。

(4) 结构工艺性分析

零件结构工艺性分析是指零件对加工方法的适应性, 即所设计的零件结构应便于加工成形。在数控车床上加工零件时, 应根据数控车床的特点, 认真分析零件结构的合理性。在结构分析时, 若发现问题应及时与设计人员或有关部门沟通并提出相应修改意见和建议。

2. 确定数控车削加工内容

在分析零件形状、精度和其他技术要求的基础上, 考虑零件或零件的某些部位是否适合在数控车床上加工。对于一个零件来讲, 并非全部的加工内容都适合在数控车床上完成, 这就要对零件图样进行全面分析, 选择出那些最需要、最适合在数控车床上加工的内容, 充分发挥数控车床作用, 提高经济效益。选择数控车床加工的内容, 应注意以下几个方面。

① 优先考虑普通车床无法加工的内容作为数控车床加工内容。如组成零件轮廓的曲线为数学方程式描述的曲线(如椭圆曲线、抛物线等), 普通车床无法加工, 在数控车床上利用宏程序或应用直线、圆弧逼近方法很容易实现。

② 重点选择普通车床难加工、质量也很难保证的内容作为数控车床加工内容。如精度要求高的回转曲面、表面粗糙度要求高的面等。

③ 在普通车床上加工效率低, 工人操作劳动强度大的加工内容, 可以考虑在数控车床上加工。

相比之下, 下面的加工内容就不适合在数控车床上加工。

① 需要较长的占机时间调整的内容, 如以毛坯的粗基准定位来加工第一个精基准的工序。

② 加工部位分散, 不能在一次装夹中加工完成的零星部位的加工内容。

③ 必须按专用工装协调的孔及其他加工内容, 主要原因是采集编程用的数据有困难, 协调效果不一定理想。

此外, 在选择和决定加工内容时, 也要考虑到生产批量、生产周期、工序间周转情况

等。总之,要尽量做到合理,充分发挥数控车床的效率,防止把数控车床当普通车床用。

3. 数控车削加工方案的拟订

数控车削加工方案的拟订是制定数控车削加工工艺的重要内容之一,其主要内容包括:选择各加工表面的加工方法、安排工序的先后顺序、确定刀具的走刀路线等。技术人员应根据从生产实践中总结出来的一些综合性工艺原则,结合现场的实际生产条件,提出几种方案,通过对比分析,从中选择最佳方案。

(1) 拟定工艺路线

1) 加工方法的选择

回转体零件的结构形状虽然是多种多样的,但它们都由平面、内圆柱面、外圆柱面、曲面、螺纹等组成。每一种表面都有多种加工方法,实际选择时应结合零件的加工精度、表面粗糙度、材料、结构形状、尺寸及生产类型等因素全面考虑。

2) 加工顺序的安排

在选定加工方法后,就是划分工序和合理安排工序的顺序。零件的加工工序通常包括切削加工工序、热处理工序和辅助工序。合理安排好切削加工、热处理和辅助工序的顺序,并解决好工序间的衔接问题,可以提高零件的加工质量、生产效率,降低加工成本。工序安排一般有两种原则,即工序分散和工序集中。在数控车床上加工零件,应按工序集中的原则划分工序。安排零件车削加工顺序一般遵循下列原则。

① 先粗后精。按照粗车→半精车→精车的顺序进行,逐步提高零件的加工精度。粗车将在较短的时间内将工件表面上的大部分加工余量切掉,这样既提高了金属切除率,又满足了精车余量的均匀性要求。若粗车后所留余量的均匀性满足不了精加工的要求,则要安排半精车,以便使精加工的余量小而均匀。精车时,刀具沿着零件的轮廓一次走刀完成,以保证零件的加工精度。如图2-1所示,首先进行粗加工,将虚线包围部分切除,然后进行半精加工和精加工。

② 先近后远。这里所说的远与近,是按加工部位相对于换刀点的距离大小而言的。通常在粗加工时,离换刀点近的部位先加工,离换刀点远的部位后加工,以便缩短刀具移动距离,减少空行程时间,并且有利于保持坯件或半成品件的刚性,改善其切削条件。

如图2-2所示,对这类直径相差不大的台阶轴,当第一刀的切削深度未超限时,刀具宜按 $\phi 40\text{ mm} \rightarrow \phi 42\text{ mm} \rightarrow \phi 44\text{ mm}$ 的顺序加工。如果按 $\phi 44\text{ mm} \rightarrow \phi 42\text{ mm} \rightarrow \phi 40\text{ mm}$ 的顺序安排车削,不仅会增加刀具返回换刀点所需的空行程时间,而且还可能使台阶的外直角处产生毛刺。

③ 内外交叉。对既有内表面(内型、内腔),又有外表面的零件,安排加工顺序时,应先粗加工内外表面,然后精加工内外表面。加工内外表面时,通常先加工内型和内腔,然后加工外表面。原因是控制内表面的尺寸和形状较困难,刀具刚性相应较差,刀尖(刃)的耐用度易受切削热的影响而降低,以及在加工中清除切屑较困难等。

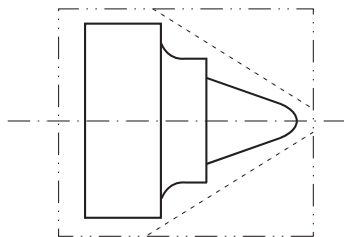


图 2-1 先粗后精

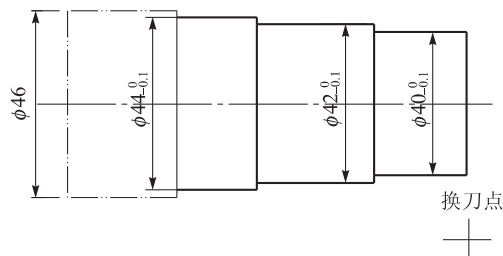


图 2-2 先后后远

④ 刀具集中。尽量用一把刀加工完相应各部位后，再换另一把刀加工相应的其他部位，以减少空行程和换刀时间。

⑤ 基面先行。用作精基准的表面应优先加工出来，原因是作为定位基准的表面越精确，装夹误差就越小。例如加工长轴类零件时，一般是先加工中心孔，再以中心孔为精基准加工外圆表面。

(2) 确定走刀路线

确定走刀路线的主要工作在于确定粗加工及空行程的进给路线等，因为精加工的切削过程的进给路线基本上是沿着零件轮廓顺序进给的。

走刀路线一般是指刀具从起刀点开始运动起，直至返回该点并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、切出等非切削空行程。

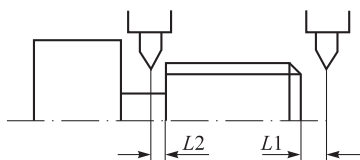


图 2-3 引入、引出

1) 刀具引入、切出

在数控车床上进行加工时，尤其是精车时，要妥当考虑刀具的引入、切出路线，尽量使刀具沿轮廓的切线方向引入、切出，以免因切削力突然变化而造成弹性变形，致使光滑连接轮廓上产生表面划伤、形状突变或滞留刀痕等疵病。如图 2-3 所示，车螺纹时，必须设置升速段 $L1$ 和降速段 $L2$ ，这样可避免因车刀升降速而影响螺距的稳定。

图 2-3 所示，车螺纹时，必须设置升速段 $L1$ 和降速段 $L2$ ，这样可避免因车刀升降速而影响螺距的稳定。

2) 确定最短的空行程路线

确定最短的走刀路线，除了依靠大量的实践经验外，还应善于分析，必要时可辅以一些简单计算。

① 灵活设置程序循环起点。在车削加工编程时，许多情况下采用固定循环指令编程，图 2-4 所示是采用矩形循环方式进行外轮廓粗车的一种情况示例。考虑加工中换刀的安全，常将起刀点设在离坯件较远的位置 A 点处，同时将起刀点和循环起点重合，其走刀路线如图 2-4 (a) 所示。若将起刀点和循环起点分开设置，分别在 A 点和 B 点处，其走刀路线如图 2-4 (b) 所示。显然，图 2-4 (b) 所示的走刀路线短。

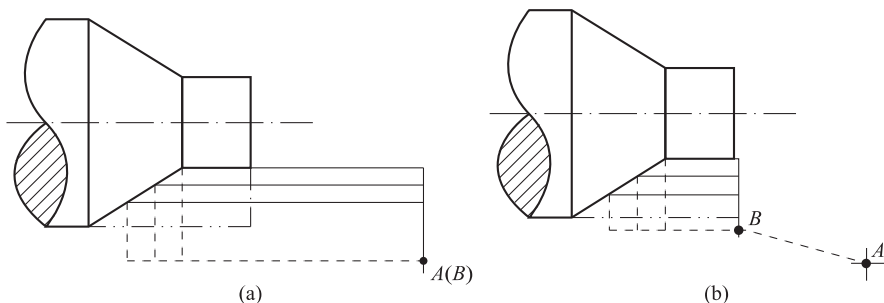


图 2-4 起刀点和循环起点

(a) 起刀点和循环起点重合; (b) 起刀点和循环起点分离

② 合理安排返回换刀点。在手工编制较复杂轮廓的加工程序时, 编程者 (特别是初学者) 有时将每一刀加工完后的刀具通过执行返回换刀点, 使其返回到换刀点位置, 然后再执行后续程序。这样会增加走刀路线的距离, 从而大大降低生产效率。因此, 在不换刀的前提下, 执行退刀动作时, 应不用返回到换刀点。安排走刀路线时, 应尽量缩短前一刀终点与后一刀起点间的距离, 方可满足走刀路线为最短的要求。

(3) 确定最短的切削进给路线

切削进给路线短, 可有效地提高生产效率, 降低刀具的损耗。在安排粗加工或半精加工的切削进给路线时, 应同时兼顾到被加工零件的刚性及加工的工艺性等要求, 不要顾此失彼。

图 2-5 所示是几种不同切削进给路线的安排示意图。其中, 图 2-5 (a) 表示利用数控系统具有的封闭式复合循环功能而控制车刀沿着工件轮廓进行走刀的路线; 图 2-5 (b) 为“三角形”走刀路线; 图 2-5 (c) 为“矩形”走刀路线。

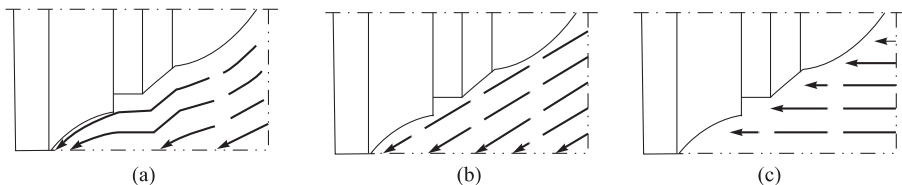


图 2-5 走刀路线

(a) 沿工件轮廓走刀; (b) 三角形走刀; (c) 矩形走刀

经过对以上三种切削进给路线的分析和判断可知: 矩形循环进给路线的走刀长度总和为最短, 即在同等条件下, 其切削所需时间 (不含空行程) 为最短, 刀具的损耗小。另外, 矩形循环加工的程序段格式较简单, 所以在制定加工方案时, 建议采用“矩形”走刀路线。

(4) 零件轮廓精加工一次走刀完成

在安排可以一刀或多刀进行精加工工序时,零件轮廓应由最后一刀连续加工而成,此时,加工刀具的进、退刀位置要考虑妥当,尽量不要在连续轮廓中安排切入、切出、换刀及停顿,避免因切削力突然变化而造成弹性变形,致使光滑连续的轮廓上产生表面划伤、形状突变或滞留刀痕等缺陷。

总之,在保证加工质量的前提下,使加工程序具有最短的进给路线,不仅可以节省整个加工过程的执行时间,还能减少不必要的刀具耗损及机床进给滑动部件的磨损等。

2.3 数控车削加工工序划分与设计

数控车削加工工序划分常有以下几种方法。

① 按安装次数划分工序。以每一次装夹作为一道工序。这种方法划分主要适用于加工内容不多的零件。

② 按加工部位划分工序。按零件的结构特点分成几个加工部分,每个部分作为一道工序。

③ 按所用刀具划分工序。这种方法用于工件在切削过程中基本不变形,退刀空间足够大的情况。此时可以着重考虑加工效率、减少换刀时间和尽可能缩短走刀路线。刀具集中分序法是按所用刀具划分工序,即用同一把刀或同一类刀具加工完成零件所有需要加工的部位,以达到节省时间、提高效率的目的。

④ 按粗、精加工划分工序。对易变形或精度要求较高的零件常用这种方法。这种划分工序一般不允许一次装夹就完成加工,而是粗加工时留出一定的加工余量,重新装夹后再完成精加工。

数控车削加工工序划分后,对每个加工工序都要进行设计。数控车削加工工序设计主要包括选择定位基准、确定装夹方案、选用刀具、确定切削用量等内容。

1. 确定装夹方案

数控车削加工在零件加工定位基准的选择上相对比较简单。定位基准的选择包括定位方式的选择和被加工零件定位面的选择。在数控车削中,应尽量让零件在一次装夹下完成大部分甚至全部表面的加工,既要保证被加工工件的定位精度,又要保证装卸方便、快捷。对于轴类零件,通常以零件自身的外圆柱面作定位基准;对于套类零件,则以内孔作定位基准。在装夹方式允许的条件下,定位面尽量选择几何精度较高的表面。

在数控车床上根据工件结构特点和工件加工要求,确定合理的装夹方式,选用相应的夹具。如轴类零件的定位方式通常是一端外圆固定,即用三爪自定心卡盘、四爪单动卡盘或弹簧套固定工件的外圆表面,但此定位方式对工件的悬伸长度有一定限制。若工件的悬伸长度过长,则在切削过程中会产生较大的变形,严重时将无法切削。对于切削长度过长的工件,

可以采用一夹一顶或两顶尖装夹。

数控车床常用的装夹方法有以下几种。

(1) 三爪自定心卡盘装夹

三爪自定心卡盘是数控车床最常用的夹具。它的特点是可以自定心，夹持工件时一般不需要找正，装夹速度较快，但夹紧力较小，定心精度不高。适用于装夹中小型圆柱形、正三边或正六边形工件，不适合同轴度要求高的工件的二次装夹。

三爪卡盘常见的有机械式和液压式两种。液压卡盘装夹迅速、方便，但夹持范围变化小，尺寸变化大时需要重新调整卡爪位置。数控车床上经常采用液压卡盘，液压卡盘特别适合于批量生产。

(2) 软爪装夹

由于三爪自定心卡盘定心精度不高，当加工同轴度要求高的工件二次装夹时，常常使用软爪。软爪是一种具有切削性能的卡爪。软爪是在使用前配合被加工工件特别制造的。加工软爪时要特别注意下面几个方面。

① 软爪要在与使用条件相同的夹紧状态下加工，以免在加工过程中的松动和反向间隙而引起的定心误差。加工软爪的内定心表面时，要在软爪的尾部夹紧适当直径的棒料，如图2-6所示，以消除卡盘端面螺纹的间隙。

② 当被加工工件以外圆定位时，软爪内圆直径与工件外圆直径相同，略小更好，如图2-7(a)所示，其目的是增加软爪与工件外圆的接触面积，消除卡盘的定位间隙。如果软爪的内径过小，装夹工件时会形成六点接触，如图2-7(b)所示，就使得软爪接触面变形，被加工工件装夹面留有压痕等。如果软爪的内径大于工件装夹面直径，软爪与工件面形成三点接触，如图2-7(c)所示，这样装夹接触面小，夹紧牢固程度较差，应尽量避免。

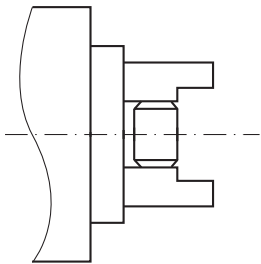


图 2-6 软爪

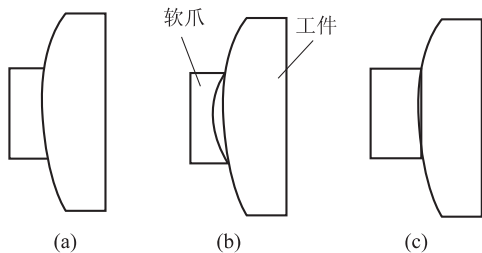


图 2-7 软爪内径

(a) 软爪内径与工件外径相同或略小；(b) 软爪内径过小；(c) 软爪内径大于工件外径

③ 软爪常用于加工同轴度要求较高的工件的二次装夹。软爪也有机械式和液压式两种形式。

(3) 四爪单动卡盘装夹

用四爪单动卡盘装夹时,夹紧力较大,装夹精度较高,不受卡爪磨损的影响,但夹持工件时需要找正。适于装夹偏心距较小、形状不规则或大型的工件等。

(4) 中心孔定位装夹

1) 两顶尖拨盘

顶尖分为前顶尖和后顶尖。前顶尖有两种形式,一种是插在主轴锥孔内,另一种是夹在卡盘上。后顶尖是插在尾座套筒内的,也有两种形式,一种是固定式,另一种是回转式。两顶尖只对工件起定心和支撑作用,工件安装时要用鸡心夹头或对分夹头夹紧工件一端,必须通过鸡心夹头或对分夹头带动工件旋转。这种方式适于装夹轴类零件,利用两顶尖定位还可以加工偏心工件。

2) 拨动定尖

拨动定尖有内、外拨动顶尖和端面拨动顶尖两种。内、外拨动顶尖是通过带齿的锥面嵌入工件,拨动工件旋转。端面拨动顶尖是利用端面的拨爪带动工件旋转,适合装夹直径在 $\phi 50 \sim \phi 150$ mm 之间的工件。

用两端中心孔定位,容易保证定位精度,但由于顶尖细小,装夹不够牢靠,不宜用大的切削用量进行加工。

3) 一夹一顶

一端用三爪或四爪卡盘,通过卡爪夹紧工件并带动工件转动,另一端用尾顶尖支撑。这种方式定位精度较高,装夹牢靠。

(5) 心轴与弹簧卡头装夹

以孔为定位基准,用心轴装夹来加工外表面。以外圆为定位基准,采用弹簧卡头装夹来加工内表面。用心轴或弹簧卡头装夹工件的定位精度高,装夹工件方便、快捷,适用于装夹内外表面位置精度要求较高的套类零件。

(6) 利用其他工装夹具装夹

数控车削加工中有时会遇到一些形状复杂和不规则的零件,不能用三爪或四爪卡盘等夹具装夹,需要借助其他工装夹具装夹,如花盘、角铁等。批量生产时,还要采用专用夹具装夹。

2. 选用刀具

刀具选择是数控加工工序设计中的重要内容之一。常用数控车刀的种类、形状和用途如图2-8所示。

刀具选择合理与否不仅影响到机床加工效率,而且还直接影响到加工质量。选择刀具通常考虑机床的加工能力、工序内容、工件材料等因素。选择刀具主要考虑如下几方面的因素:

- ① 一次连续加工的表面尽可能多;
- ② 在切削加工过程中,刀具不能与工件轮廓发生干涉;
- ③ 有利于提高加工效率和加工表面质量;

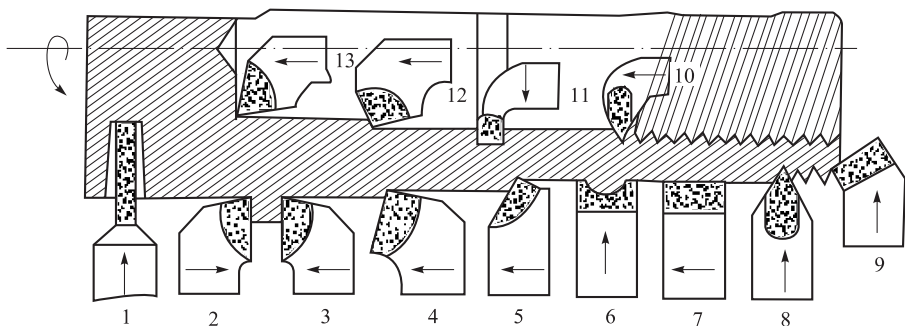


图 2-8 常用数控车刀的种类、形状和用途

1—切断刀；2—右偏刀；3—左偏刀；4—弯头车刀；5—直头车刀；6—成形车刀；7—宽刃精车刀；
8—外螺纹车刀；9—端面车刀；10—内螺纹车刀；11—内切槽刀；12—通孔车刀；13—盲孔车刀

④ 有合理的刀具强度和寿命。

(1) 车刀的类型

数控车削用的车刀一般分为三类，即尖形车刀、圆弧形车刀和成型车刀，如图 2-9 所示。

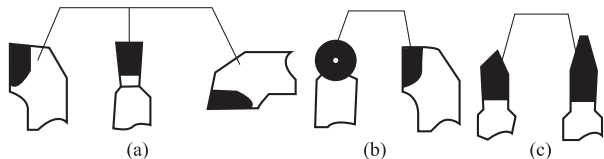


图 2-9 数控车刀类型

(a) 尖形车刀；(b) 圆弧形车刀；(c) 成型车刀

1) 尖形车刀

以直线形切削刃为特征的车刀一般称为尖形车刀。这类车刀的刀尖（同时也为其刀位点）由直线形的主、副切削刃构成，如 90° 内、外圆车刀，左、右端面车刀，切槽（断）车刀及刀尖倒棱很小的各种外圆和内孔车刀。

用这类车刀加工零件时，其零件的轮廓形状主要由一个独立的刀尖或一条直线形主切削刃位移后得到。尖形车刀主要用于车削内外轮廓、直线沟槽等直线形表面。

2) 圆弧形车刀

圆弧形车刀的特征是：构成主切削刃的刀刃形状为一圆度误差或线轮廓度误差很小的圆弧。该圆弧刃上每一点都是圆弧形车刀的刀尖，因此，刀位点不在圆弧上，而在该圆弧的圆心上，编程时要进行刀具半径补偿。

圆弧形车刀可以用于车削内、外圆表面，主要用于加工光滑连接的成形表面以及精度、表面质量要求高的表面。如精度要求高的内外圆锥面、内外圆弧面等。由尖形车刀自然或经

修磨而成的圆弧刃车刀也属于这一类。

3) 成型车刀

成型车刀俗称样板车刀,其加工零件的轮廓形状完全由车刀刀刃的形状和尺寸决定。

数控车削加工中,常见的成型车刀有小半径圆弧车刀、非矩形车槽刀和螺纹车刀等。在数控加工中,除螺纹车刀外应尽量少用或不用成型车刀,当确有必要选用时,则应在工艺准备的文件或加工程序单上进行详细说明。

(2) 常用车刀的几何参数

刀具切削部分的几何参数对零件的表面质量及切削性能影响极大,应根据零件的形状、刀具的安装位置以及加工方法等,正确选择刀具的几何形状及有关参数。

1) 尖形车刀的几何参数

尖形车刀的几何参数主要指车刀的几何角度。选择方法与使用普通车削时基本相同,但应结合数控加工的特点,如走刀路线及加工干涉等进行全面考虑。

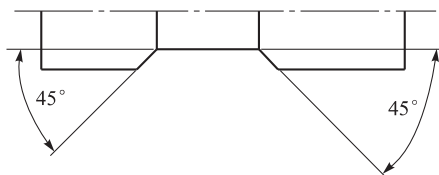


图 2-10 锥面车削

例如,在加工图 2-10 所示的零件时,要使其左右两个 45° 锥面由一把车刀加工出来,则车刀的主偏角应取 $50^\circ \sim 55^\circ$,副偏角取 $50^\circ \sim 52^\circ$,这样既保证了刀头有足够的强度,又利于主、副切削刃车削圆锥面时不致发生加工干涉。

选择尖形车刀不发生干涉的几何角度,可用作图或计算的方法。如副偏角的大小,大于作图或计算所得的不发生干涉的极限角度值 $6^\circ \sim 8^\circ$ 即可。当确定几何角度困难或无法确定(如尖形车刀加工接近于半个凹圆弧的轮廓等)时,则应考虑选择其他类型车刀后,再确定其几何角度。

2) 圆弧形车刀的几何参数

① 圆弧形车刀的选用。圆弧形车刀具有宽刃切削(修光)性质,能使精车余量相当均匀而改善切削性能,还能一刀车出跨多个象限的圆弧面。

例如,图 2-11 所示零件,当曲面精度要求不高时,可以选择用尖形车刀进行加工;当曲面形状精度和表面粗糙度均有要求时,选择尖形车刀加工就不合适了,因为车刀主切削刃的实际吃刀深度在圆弧轮廓段总是不均匀的,如图 2-12 所示。当车刀主切削刃靠近其圆弧终点时,该位置上的切削深度(a_{p1})将大大超过其圆弧起点位置上的切削深度(a_p),致使切削阻力增大,可能产生较大的线轮廓度误差,并增大其表面粗糙度数值。

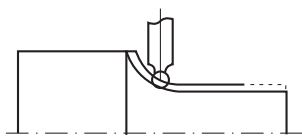


图 2-11 曲面车削

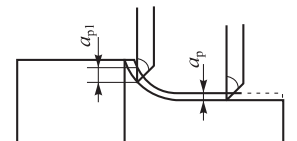


图 2-12 切削深度不均匀

② 圆弧形车刀的几何参数。圆弧形车刀的几何参数除了前角及后角外，主要几何参数为车刀圆弧切削刃的形状及半径。选择车刀圆弧半径的大小时，应考虑两点：第一，车刀切削刃的圆弧半径应当小于或等于零件凹形轮廓上的最小曲率半径，以免发生加工干涉；第二，该半径不宜选择太小，否则既难于制造，还会因其刀头强度太弱或刀体散热能力差，使车刀容易受到损坏。

（3）机夹可转位车刀的选用

为了减少换刀时间和方便对刀，便于实现机械加工的标准化。在数控车削加工时，应尽量采用机夹可转位车刀。如图 2-13 所示，这种车刀就是把经过研磨的可转位多边形刀片用夹紧组件夹在刀杆上。车刀在使用过程中，一旦切削刃磨钝后，通过刀片的转位，即可用新的切削刃继续切削，只有当多边形刀片所有的刀刃都磨钝后，才需要更换刀片。

1) 刀片材质的选择

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。选择刀片材质的主要依据是被加工工件的材料、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。

2) 可转位车刀的选用

由于刀片的形式多种多样，并采用多种刀具结构和几何参数，因此，可转位车刀的品种越来越多，使用范围很广，下面介绍与刀片选择有关的几个问题。

① 刀片的紧固方式。在国家标准中，一般紧固方式有压板压紧式（代码为 C）、复合压紧式（代码 M）、杠杆夹紧式（代码 P）和螺钉夹紧式（代码 S）4 种，如图 2-14 所示。但这仍没有包括可转位车刀所有的夹紧方式，而且，各刀具商所提供的产品并不一定包括了所有的夹紧方式，因此选用时要查阅产品样本。

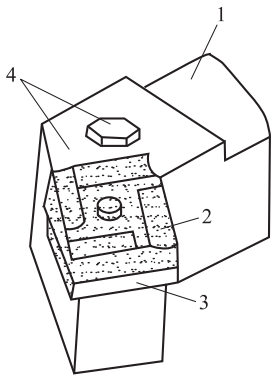


图 2-13 机夹可转位车刀

1—刀杆；2—刀片；3—刀垫；4—夹紧元件

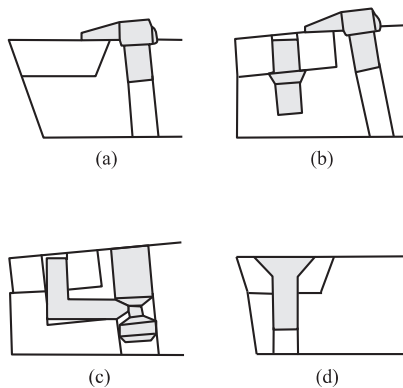


图 2-14 刀片的夹紧方式

② 刀片形状的选择。刀片的形状主要与被加工工件表面形状、切削方法、刀具寿命和有效刃数等有关。一般外圆车削常用 60° 凸三角形（T型）、四方形（S型）和 80° 棱形（C型）刀片。仿形加工常用 55° （D型）、 35° （V型）菱形和圆形（R型）刀片，常见几种刀片形状和角度如图2-15所示。

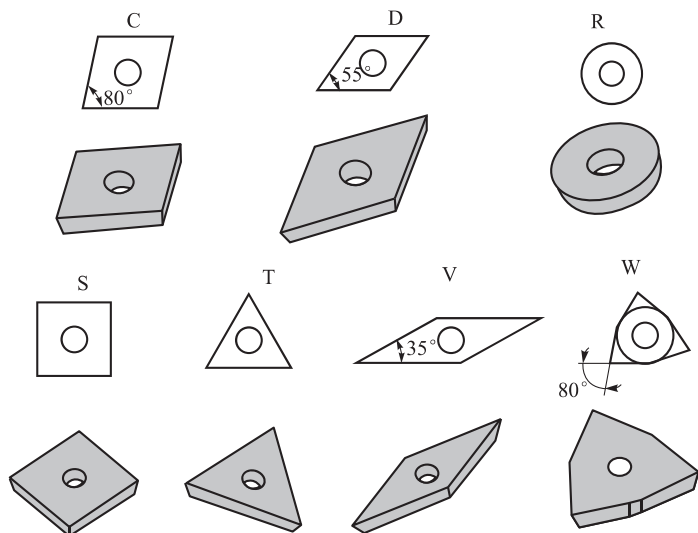


图2-15 常用刀片外形

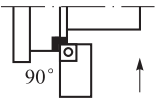
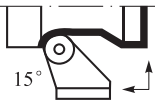
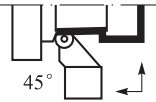
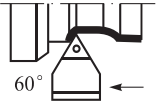
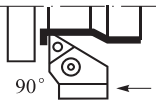
不同的刀片形状有不同的刀尖强度，一般刀尖角越大，刀尖强度越大，反之亦然。圆刀片（R型）刀尖角最大， 35° 菱形刀片（V型）刀尖角最小。在选用时，应根据加工条件恶劣与否，按重、中、轻切削有针对性地选择。在机床刚性和功率允许的条件下，大余量、粗加工应选用刀尖角较大的刀片，反之，在机床刚性和功率较小时，小余量、精加工时宜选用较小刀尖角的刀片。

表2-1 为被加工表面及适用的刀片形状。

表2-1 被加工表面及适用的刀片形状

切削 外圆	主偏角	45°	45°	60°	75°	95°
	加工 示意图					

续表

切削端面	主偏角	75°	90°	90°	95°	
	加工示意图					
切削成形面	主偏角	15°	45°	60°	90°	
	加工示意图					

③ 刀片后角的选择。常用的刀片后角有N(0°)、C(7°)、P(11°)、E(20°)等。一般粗加工、半精加工可用N型；半精加工、精加工可用C、P型，也可用带断屑槽形的N型刀片；加工铸铁、硬钢可用N型；加工不锈钢可用C、P型；加工铝合金可用P、E型等；加工弹性恢复性好的材料可选用较大一些的后角；一般孔加工刀片可选用C、P型，大尺寸孔可选用N型。

④ 刀尖圆弧半径的选择。刀尖圆弧半径不仅影响切削效率，而且关系到被加工表面的粗糙度及加工精度。从刀尖圆弧半径与最大进给量关系来看，最大进给量不应超过刀尖圆弧半径尺寸的80%，否则将恶化切削条件，甚至出现螺纹状表面和打刀等问题。

刀尖圆弧半径还与断屑的可靠性有关，为保证断屑，切削余量和进给量有一个最小值。当刀尖圆弧半径减小，所得到的这两个最小值也相应减小，因此，从断屑可靠出发，通常对于小余量、小进给车削加工，应采用小的刀尖圆弧半径；反之，宜采用较大的刀尖圆弧半径。

粗加工时，注意以下几点。

- 为提高刀刃强度，应尽可能选取大刀尖半径的刀片，大刀尖半径可允许大进给。
- 在有振动倾向时，则选择较小的刀尖半径，常用刀尖半径为1.2~1.6 mm。
- 粗车时进给量不能超过表2-2给出的最大进给量，作为经验法则，一般进给量可取为刀尖圆弧半径的一半。

表2-2 不同刀尖半径时最大进给量

刀尖半径/mm	0.4	0.8	1.2	1.6	2.4
推荐进给量/(mm·r ⁻¹)	0.25~0.35	0.4~0.7	0.5~1.0	0.7~1.3	1.0~1.8

精加工时,注意以下几点。

- 精加工的表面质量不仅受刀尖圆弧半径和进给量的影响,而且受工件装夹稳定性、夹具和机床的整体条件等因素的影响。

- 在有振动倾向时选较小的刀尖半径。
- 非涂层刀片比涂层刀片加工的表面质量高。

⑤ 刀杆头部形式的选择。刀杆头部形式按主偏角和直头、弯头分有 15 ~ 18 种,各形式规定了相应的代码,国家标准和刀具样本中都一一列出,可以根据实际情况选择。有直角台阶的工件,可选主偏角大于或等于 90° 的刀杆。一般粗车可选主偏角 $45^\circ \sim 90^\circ$ 的刀杆;精车可选 $45^\circ \sim 75^\circ$ 的刀杆;中间切入、仿形车则选 $45^\circ \sim 107.5^\circ$ 的刀杆;工艺系统刚性好时可选较小值,工艺系统刚性差时可选较大值。当刀杆为弯头结构时,则既可加工外圆,又可加工端面。

⑥ 断屑槽形的选择。断屑槽的参数直接影响着切屑的卷曲和折断,目前刀片的断屑槽形式较多,各种断屑槽刀片使用情况不尽相同。槽形根据加工类型和加工对象的材料特性来确定,各供应商表示方法不一样,但思路基本一样:基本槽形按加工类型有精加工(代码 F)、普通加工(代码 M)和粗加工(代码 R);加工材料按国际标准有加工钢的 P 类、不锈钢、合金钢的 M 类和铸铁的 K 类。这两种情况一组合就有了相应的槽形,比如 FP 就指用于钢的精加工槽形, MK 是用于铸铁普通加工的槽形等。如果加工向两方向扩展,如超精加工和重型粗加工,以及材料也扩展,如耐热合金、铝合金、有色金属等,就有了超精加工、重型粗加工和加工耐热合金、铝合金等补充槽形,选择时可查阅具体的产品样本。一般可根据工件材料和加工的条件选择合适的断屑槽形和参数,当断屑槽形和参数确定后,主要靠进给量的改变控制断屑。

3) 刀夹的选择

数控车刀一般通过刀夹(座)装在刀架上。刀夹的结构主要取决于刀体的形状、刀架的外形和刀架对主轴的配置 3 种因素。刀架对主轴的配置形式只有几种,而刀架与刀夹联结部分的结构形式多,致使刀夹的结构形式很多,用户在选型时,除满足精度要求外,应尽量减少种类和形式,以利于管理。

3. 确定切削用量

数控车削加工中的切削用量包括背吃刀量、主轴转速或切削速度、进给速度或进给量。在编制加工程序的过程中,选择合理的切削用量,使背吃刀量、主轴转速和进给速度三者间能互相适应,以形成最佳切削参数,这是工艺处理的重要内容之一。

(1) 选择切削用量的一般原则

1) 粗车切削用量选择

粗车时一般以提高生产效率为主,兼顾经济性和加工成本。提高切削速度、加大进给量和背吃刀量都能提高生产效率,由于切削速度对刀具使用寿命影响最大,背吃刀量对刀具使

用寿命影响最小,所以,考虑粗车切削用量时,首先,尽可能选择大的背吃刀量;其次,选择大的进给速度;最后,在保证刀具使用寿命和机床功率允许的条件下选择一个合理的切削速度。

2) 精车、半精车切削用量选择

精车和半精车的切削用量选择要保证加工质量、兼顾生产效率和刀具使用寿命。精车和半精车的背吃刀量是根据零件加工精度和表面粗糙度要求,以及精车后留下的加工余量决定的,一般情况一刀切去余量。精车和半精车的背吃刀量较小,产生的切削力也较小,所以在保证表面粗糙度的情况下,适当加大进给量。

(2) 背吃刀量 (a_p) 的确定

在车床主体、夹具、刀具和零件这一系统刚性允许的条件下,尽可能选取较大的背吃刀量,以减少走刀次数,提高生产效率。当零件的精度要求较高时,则应考虑留出精车余量,常取 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ 。

(3) 进给速度的确定

进给速度是指在单位时间里,刀具沿进给方向移动的距离 (mm/min)。进给速度的大小直接影响表面粗糙度的值和车削效率,因此,进给速度的确定应在保证表面质量的前提下,选择较高的进给速度。一般应根据零件的表面粗糙度、刀具及工件材料等因素,查阅切削用量手册选取。需要说明的是,切削用量手册给出的是每转进给量,因此要根据 $v_f = f \times n$ 计算进给速度。

有些数控车床规定可以进给量 (mm/r) 表示进给速度。进给量是指工件每转一周,车刀沿进给方向移动的距离 (mm/r),它与背吃刀量有着较密切的关系。粗车时一般取为 $0.3 \sim 0.8 \text{ mm/r}$,精车时常取 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm/r}$,切断时宜取 $0.05 \sim 0.2 \text{ mm/r}$ 。

表 2-3 和表 2-4 分别给出了硬质合金车刀粗车外圆、端面的进给量和半精车、精车的进给量参考值。

表 2-3 硬质合金车刀粗车外圆及端面的进给量

工件材料	车刀刀杆尺寸 $B \times H$ / ($\text{mm} \times \text{mm}$)	工件直径 d/mm	背吃刀量 a_p/mm			
			≤ 3	$> 3 \sim 5$	$> 5 \sim 8$	$> 8 \sim 12$
碳素钢、 合金钢	16 × 25	20	0.3 ~ 0.4	—	—	—
		40	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4	—	—
		60	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.6	0.3 ~ 0.5	—
		100	0.6 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.6	0.4 ~ 0.5
		400	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.6

续表

工件材料	车刀刀杆尺寸 $B \times H$ / (mm $\times$ mm)	工件直径 d/mm	背吃刀量 a_p/mm			
			≤ 3	$>3 \sim 5$	$>5 \sim 8$	$>8 \sim 12$
碳素钢、 合金钢	20×30 25×25	20	0.3 ~ 0.4	—	—	—
		40	0.4 ~ 0.5	0.3 ~ 0.4	—	—
		60	0.5 ~ 0.7	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.6	—
		100	0.8 ~ 1.0	0.7 ~ 0.9	0.5 ~ 0.7	0.4 ~ 0.7
		400	1.2 ~ 1.4	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.9
铸铁及 铜合金	16×25	40	0.4 ~ 0.5	—	—	—
		60	0.5 ~ 0.8	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	—
		100	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.5 ~ 0.7
		400	1.0 ~ 1.4	1.0 ~ 1.2	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8
	20×30 25×25	40	0.4 ~ 0.5	—	—	—
		60	0.5 ~ 0.9	0.5 ~ 0.8	0.4 ~ 0.7	—
		100	0.9 ~ 1.3	0.8 ~ 1.2	0.7 ~ 1.0	0.5 ~ 0.8
		400	1.2 ~ 1.8	1.2 ~ 1.6	1.0 ~ 1.3	0.9 ~ 1.1
注：① 加工断续表面及有冲击的工件时，表内进给量应乘以系数 $k=0.75 \sim 0.85$ ； ② 在无外皮加工时，表内进给量应乘以系数 $k=1.1$ ； ③ 加工耐热钢及其合金时，进给量不大于 1 mm/r ； ④ 加工淬硬钢时，进给量应减少。当钢的硬度为 $44 \sim 56 \text{ HRC}$ 时，乘以系数 $k=0.8$ ；当钢的硬度为 $57 \sim 62 \text{ HRC}$ 时，乘以系数 $k=0.5$ 。						

表 2-4 按表面粗糙度选择进给量的参考值

工件材料	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	切削速度范围 $v_c/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	刀尖圆弧半径 r/mm		
			0.5	1.0	2.0
碳钢及合金钢	$> 1.25 \sim 2.5$	< 50	0.10	0.11 ~ 0.15	0.15 ~ 0.22
		50 ~ 100	0.11 ~ 0.16	0.16 ~ 0.25	0.25 ~ 0.35
		> 100	0.16 ~ 0.20	0.20 ~ 0.25	0.25 ~ 0.35
碳钢及合金钢	$> 2.5 \sim 5$	< 50	0.18 ~ 0.25	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.40
		> 50	0.25 ~ 0.30	0.30 ~ 0.35	0.30 ~ 0.50
	$> 5 \sim 10$	< 50	0.30 ~ 0.50	0.45 ~ 0.60	0.55 ~ 0.70
		> 50	0.40 ~ 0.55	0.55 ~ 0.65	0.65 ~ 0.70

续表

工件材料	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	切削速度范围 $v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	刀尖圆弧半径 r/mm		
			0.5	1.0	2.0
铸铁、青铜、 铝合金	$>5\sim10$	不限	0.25~0.40	0.40~0.50	0.50~0.60
	$>2.5\sim5$		0.15~0.25	0.25~0.40	0.40~0.60
	$>1.25\sim2.5$		0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.35
注： $r=0.5\text{ mm}$ ，用于 $12\text{ mm}\times12\text{ mm}$ 以下刀杆； $r=1.0\text{ mm}$ ，用于 $30\text{ mm}\times30\text{ mm}$ 以下刀杆； $r=2.0\text{ mm}$ ，用于 $30\text{ mm}\times45\text{ mm}$ 及以上刀杆。					

(4) 主轴转速的确定

1) 光车时主轴转速

光车时，主轴转速的确定应根据零件上被加工部位的直径，并按零件和刀具的材料及加工性质等条件所允许的切削速度来确定。在实际生产中，主轴转速计算公式为

$$n = 1\,000v_c/\pi d \tag{2-1}$$

式中 n ——主轴转速， r/min ；
 v_c ——切削速度， m/min ；
 d ——零件待加工表面的直径， mm 。

切削速度又称为线速度，是指车刀切削刃上某一点相对于待加工表面在主运动方向上的瞬时速度。

在确定主轴转速时，首先需要确定其切削速度，而切削速度又与背吃刀量和进给量有关。切削速度确定方法有计算、查表和根据经验确定。切削速度参考值见表 2-5。

表 2-5 切削速度参考表

零件材料	刀具材料	a_p/mm			
		0.38~0.13	2.40~0.38	4.70~2.40	9.50~4.70
		$f/(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$			
		0.13~0.05	0.38~0.13	0.76~0.38	1.30~0.76
		$v_c/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$			
低碳钢	高速钢	—	70~90	45~60	20~40
	硬质合金	215~365	165~215	120~165	90~120
中碳钢	高速钢	—	45~60	30~40	15~20
	硬质合金	130~165	100~130	75~100	55~75

续表

零件材料	刀具材料	a_p/mm			
		0.38 ~ 0.13	2.40 ~ 0.38	4.70 ~ 2.40	9.50 ~ 4.70
		$f / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$			
		0.13 ~ 0.05	0.38 ~ 0.13	0.76 ~ 0.38	1.30 ~ 0.76
		$v_c / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$			
灰铸铁	高速钢	—	35 ~ 45	25 ~ 35	20 ~ 25
	硬质合金	135 ~ 185	105 ~ 135	75 ~ 105	60 ~ 75
黄铜 青铜	高速钢	—	85 ~ 105	70 ~ 85	45 ~ 70
	硬质合金	215 ~ 245	185 ~ 215	150 ~ 185	120 ~ 150
铝合金	高速钢	105 ~ 150	70 ~ 105	45 ~ 70	30 ~ 45
	硬质合金	215 ~ 300	135 ~ 215	90 ~ 135	60 ~ 90

2）车螺纹时主轴转速

车削螺纹时，车床的主轴转速将受到螺纹的螺距（或导程）大小、驱动电机的升降频特性及螺纹插补运算速度等多种因素影响，故对于不同的数控系统，推荐有不同的主轴转速选择范围。如大多数经济型车床数控系统，推荐车螺纹的主轴转速计算公式为

$$n \leqslant \frac{1\,200}{p} - k \tag{2-2}$$

式中 p ——工件螺纹的导程，mm，英制螺纹为相应换算后的毫米值；
 k ——保险系数，一般取为 80。

2.4 数控车削加工工艺文件

数控加工工艺文件不仅是进行数控加工和产品验收的依据，也是操作者遵守和执行的规程，同时还为产品零件重复生产积累了必要的工艺资料，进行技术储备。这些由工艺人员制订的工艺文件是程序员在编制数控加工程序时所依据的相关技术文件。编制数控加工工艺文件是数控加工工艺设计的重要内容之一。

不同的数控机床，工艺文件的内容有一定的差异。一般来说，数控车床所需工艺文件应包括以下几种。

- ① 编程任务书。
- ② 数控加工工序卡片。
- ③ 数控机床调整卡。
- ④ 数控加工刀具卡。
- ⑤ 数控加工进给路线图。
- ⑥ 数控加工程序单。

其中以数控加工工序卡片和数控加工刀具卡最为重要，这些卡片暂无国家标准，前者是说明数控加工顺序和加工要素的文件，后者为刀具使用依据。表 2-6 和表 2-7 是两种参考卡片。

表 2-6 数控加工工艺卡片表

(厂名)	数控加工工艺卡片		产品代号		零件名称		零件图号	
工艺序号	程序编号		夹具名称		使用设备		车间	
工步号	工步内容		刀具号	刀具规格	主轴转速	进给速度	背吃刀量	
编 制		审 核		批 准		共 页	第 页	

表 2-7 刀具卡

产品名称或代号		零件名称		零件图号	
序号	刀具号	刀具规格名称	数量	加工表面	备注

2.5 数控车削加工工艺制定实例

制定图 2-16 所示零件数控车削加工工艺。毛坯材料 45 号钢，尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 85\text{ mm}$ 。

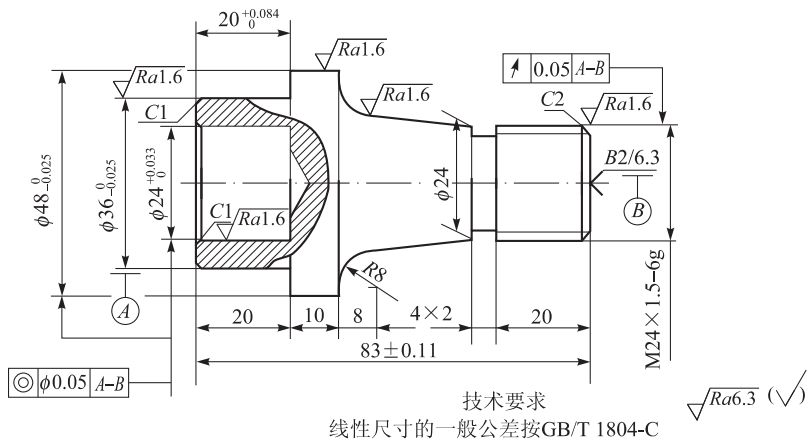


图 2-16 零件图

(1) 零件轮廓几何要素分析

零件加工面主要有内外圆柱面、圆锥面、圆弧面、切槽、倒角和外螺纹等。

（2）精度分析

1) 尺寸精度分析

该零件精度要求较高的尺寸主要有：外圆 $\phi 48 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$ 、 $\phi 36 \begin{smallmatrix} 0 \\ -0.025 \end{smallmatrix}$ ，内孔 $\phi 24 \begin{smallmatrix} +0.033 \\ 0 \end{smallmatrix}$ ，长度 $10 \begin{smallmatrix} +0.084 \\ 0 \end{smallmatrix}$ 、 83 ± 0.11 和螺纹的中径 $[d_2 \begin{smallmatrix} -0.032 \\ -0.182 \end{smallmatrix})]$ 等。

2) 形位精度分析

主要的形位精度有：外圆 $\phi 48$ 轴线对组合基准轴线 $A-B$ 的同轴度公差及螺纹线对 $A-B$ 轴线的圆跳动公差。

3) 表面粗糙度分析

零件加工后的表面粗糙度要求为 $Ra1.6 \mu\text{m}$ ，螺纹的粗糙度为 $Ra3.2 \mu\text{m}$ ，切槽与其他表面的粗糙度为 $Ra6.3 \mu\text{m}$ 。

要保证零件加工精度和表面粗糙度，就要通过制定合适的加工工艺，选择工件的装夹方法，通过选用合适的刀具及其几何参数，正确的粗、精加工路线，合理的切削用量及冷却液等措施来保证。

（3）加工工艺分析

1) 制定加工方案与加工路线

采用两次装夹后完成粗、精加工的加工方案，先加工左端内、外形，完成粗、精加工后，掉头加工工件右端。进行数控加工时尽可能采用沿轴向切削的方式进行加工，以提高加工过程中工件与刀具的刚性。

2) 工件的定位及装夹

工件采用三爪卡盘进行定位与装夹。当掉头加工右端时，采用一夹一顶的装夹方式。工件装夹过程中，应对工件进行找正，以保证工件轴线与主轴轴线同轴。

3) 刀具的选用

根据零件加工要求，需要选用外圆车刀（加工外轮廓、端面）、内孔车刀（加工内孔）、切槽刀（加工退刀槽）、螺纹刀（加工螺纹）、钻头和中心钻。除钻头和中心钻外，其他刀片材料均选用硬质合金。刀具卡见表2-8。

表2-8 刀具卡

产品名称或代号		刀具规格名称	零件名称	轴	零件图号	Z-01
序号	刀具号		数量	加工表面	刀具半径/mm	备注
1	T01	90°外圆粗车刀	1	端面、粗车外轮廓	1.2	
2	T02	90°外圆精车刀	1	精粗车外轮廓	0.5	
3	T03	95°内孔粗车刀	1	粗车内孔	1.0	
4	T04	95°内孔精车刀	1	精车内孔	0.5	

续表

产品名称或代号			零件名称	轴	零件图号	Z-01
序号	刀具号	刀具规格名称	数量	加工表面	刀具半径/mm	备注
5	T05	切槽刀	1	退刀槽		$B=4\text{ mm}$
6	T06	普通外螺纹车刀	1	螺纹		
7		$\phi 20$ 钻头	1	预钻孔		
8		中心钻	1	顶尖孔		

4) 确定切削用量

加工参数的确定取决于实际加工经验、工件的加工精度及表面质量、工件的材料性质、刀具的种类及形状、刀柄的刚性等诸多因素。

① 主轴转速。硬质合金刀具材料切削钢件时，切削速度 v 取 $80 \sim 220\text{ m/min}$ ，根据公式 $n = 1\,000v/\pi D$ 及加工经验，并根据实际情况，本工件粗加工主轴转速在 $400 \sim 1\,000\text{ r/min}$ 内选取，精加工的主轴转速在 $800 \sim 2\,000\text{ r/min}$ 内选取。

② 进给速度。粗加工时，为提高生产效率，在保证工件质量的前提下，可选择较高的进给速度，一般取 $100 \sim 200\text{ mm/min}$ 。精加工的进给速度一般取粗加工进给速度的 $1/2$ 。切槽、切断、车孔加工或采用高速钢刀具进行加工时，应选用较低的进给速度，一般在 $50 \sim 100\text{ mm/min}$ 内选取。

③ 背吃刀量。背吃刀量根据机床与刀具的刚性以及加工精度来确定，粗加工的背吃刀量一般选取 $2 \sim 5\text{ mm}$ （直径量），精加工的背吃刀量等与精加工余量，精加工余量一般取 $0.2 \sim 0.5\text{ mm}$ （直径量）。

（4）加工工艺制定

通过以上分析，该零件的加工工艺见表 2-9。

表 2-9 加工工艺卡

(厂名)	数控加工工艺卡片	产品代号		零件名称		零件图号	
				轴		Z-01	
工艺序号	程序编号	夹具名称		使用设备		车间	
001		三爪卡盘				数控实训中心	
工步号	工步内容	刀具号	刀具规格	主轴转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	进给速度 /($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	背吃刀量 /mm	
1	手动加工左端面	T01	90°外圆车刀	500			

续表

工步号	工步内容			刀具号	刀具规格	主轴转速 /(r · min ⁻¹)	进给速度 /(mm · min ⁻¹)	背吃刀量 /mm
2	手动钻孔				φ20 钻头	300		
3	粗加工左端内轮廓			T03	95°内孔 车刀	600	100	1
4	精加工左端内轮廓			T04		1 000	60	0.15
5	粗加工左端外圆轮廓			T01	90°外圆 车刀	600	180	1.0
6	精加工左端外圆轮廓			T02		1 200	80	0.15
7	掉头手动加工右端面			T01		500		
8	手动钻中心孔				中心钻	300		
9	粗加工右端外圆轮廓			T01	90°外圆 车刀	600	180	1.0
10	精加工右端外圆轮廓			T02		1 200	80	0.15
11	切槽			T05	4 mm 宽切槽刀	600	60	
12	车螺纹			T06	普通外 螺纹车刀	400	1.5 mm/r	
编 制		审 核		批 准		共 1 页 第 1 页		

本章小结

数控车削加工工艺是对从事数控车编程工作的人员的基本能力要求。工作人员须会分析零件图样，选择合理加工方法，能拟定加工工艺方案，设计加工工序内容，最后填写工艺卡片，形成工艺文件，指导程序编制和工件生产。在工序设计中刀具选择和切削用量的确定对于初学者相对比较困难，在平时学习过程中要多看、多练。多看就是通过刀具事物、刀具图册和机械加工工艺手册以及参考一些成熟产品案例；多练就是在实训中用，并在此基础上不断总结，逐步形成自己的经验，这个积累过程是非常重要的。

思考与练习题

- 1. 简述数控车床加工工艺主要内容和工艺特点。

2. 结合数控车削加工特点, 分析零件图样主要从哪几个方面进行?
3. 安排零件车削加工顺序一般遵循哪些基本原则?
4. 在数控车床上加工零件, 确定粗加工和精加工的走刀路线应注意哪些方面的问题?
5. 在数控车床上装夹工件常用有哪些方法? 各有何特点? 主要适合装夹对象有哪些?
6. 数控车刀一般分为哪三种类型? 各有何特点? 主要适合加工对象是哪些?
7. 机夹可转位车刀的选用主要考虑哪些方面?
8. 数控车削加工的切削用量的选择的一般原则是什么?
9. 数控车削加工中, 粗加工和精加工切削用量的选择各有什么不同特点?
10. 数控车削加工所需工艺文件主要包括哪几种?
11. 制定图 2-17 所示的零件数控车削加工工艺。毛坯材料 45 号钢, 尺寸为 $\phi 55 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 。

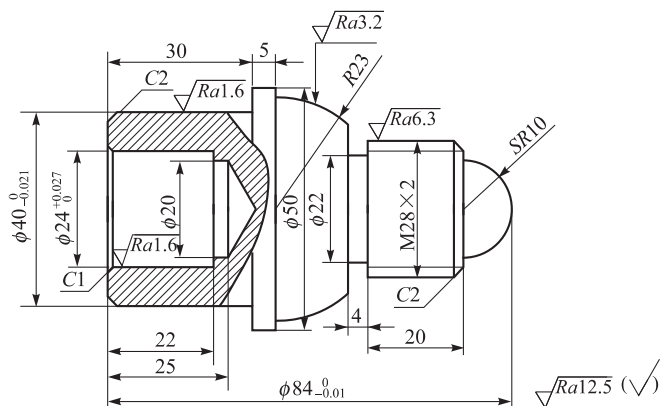


图 2-17 思考题 11 图

第 3 章 数控车床编程基础

本章知识点

- ① 数控编程方法和手工编程的基本步骤；
- ② 常见数控系统概况和数控系统主要功能；
- ③ 数控车床坐标系：包括建立数控机床坐标系的原则和机床原点及参考点；
- ④ 数控编程基本概念：工件坐标系与工件原点、绝对坐标与增量坐标，以及节点与基点；
- ⑤ FANUC 数控系统程序组成与程序段格式；
- ⑥ 模态指令与非模态指令；
- ⑦ FANUC 数控系统准备功能（G 指令）、辅助功能（M 指令）、主轴功能指令（S 指令）、进给功能指令（F 指令）和刀具功能指令（T 指令）的基础知识。

3.1 数控车床程序编制概述

数控编程就是数控机床加工程序的编制，它是数控机床使用中最重要的一环。数控加工是一种在数控机床上进行零件加工的工艺方法。

在数控机床上加工零件时，首先要根据零件图，按规定的代码及程序格式将加工零件的全部工艺过程、工艺参数等以数字信息的形式记录在控制介质上，然后输入到数控装置，数控装置再将输入的信息进行运算处理后，转换成驱动伺服机构的指令信号，最后由伺服机构控制机床的各种动作，自动地加工出零件来。

3.1.1 程序编制方法和步骤

1. 程序编制的方法

目前数控程序编制的方法主要有手工编程和自动编程。

(1) 手工编程

手工编程是指利用一般的计算工具,通过各种数学方法,人工进行刀具轨迹的计算,并进行指令编程的方法。当零件形状不十分复杂或数控程序不太长时,采用手工编程方便、经济。这种方法比较简单,对机床操作人员来讲必须掌握。

(2) 自动编程

1) 自动编程软件编程

利用通用的计算机和专用的自动编程软件。编程人员首先利用数控语言编写一个描述零件形状、尺寸和几何要素间的相互关系及进给路线、工艺参数等“源程序”,相应的自动编程系统对源程序进行编译、计算、处理得出加工程序。使用较多的是 APT (Automatically Programmed Tools) 语言编程。

2) CAD/CAM 计算机辅助编程

利用 CAD/CAM 计算机辅助编程是以零件 CAD 模型为基础的一种加工工艺规划及数控编程为一体的自动编程方法。CAD/CAM 软件采用人机交互方式,进行零件几何建模,对车床刀具进行定义和选择,确定刀具相对于零件的运动方式、切削参数、自动生成刀具轨迹,再经过后置处理,最后按照数控车床的数控系统要求生成数控加工程序。目前正被广泛应用,编程效率高,程序质量好。

由于篇幅的限制,同时为了叙述方便,本书主要围绕手工编程内容展开。

2. 程序编制的步骤

数控编程中手工编程的步骤一般分为以下几个过程,如图 3-1 所示。

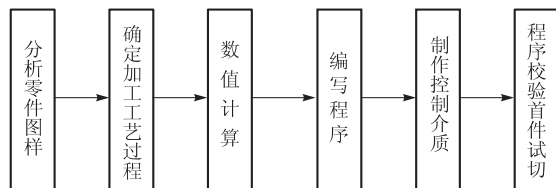


图 3-1 数控编程的步骤

(1) 分析零件图样

首先应正确分析零件图,确定零件的加工部位,根据零件的技术要求,分析加工零件的形状、基准面、尺寸公差和粗糙度的要求,还有加工面的种类、零件的材料、热处理等其他技术要求。

(2) 确定加工工艺过程

在分析零件图的基础上,确定加工工序、加工路线及装夹方法,选择刀具、工装及切削用量等工艺参数。同时充分利用数控机床的指令功能的特点,简化程序,缩短加工路线,充分发挥机床的效能。

（3）数值计算

根据已确定的加工路线和零件的加工公差的要求，计算编程时需要的数据。数据计算的复杂程度取决于零件的复杂程度和数控系统的功能。对于由直线和圆弧组成的较简单零件，一般只需计算零件轮廓的相邻几何要素的交点或切点、起点、终点和圆弧圆心坐标值等。对于形状比较复杂的零件并且组成该零件的几何要素与数控系统插补功能不一致时，就需要较复杂的数据计算。如对非圆曲线（如渐开线）需要用直线或圆弧逼近，在满足其精度要求的前提下计算其节点坐标。对于这种情况，一般采用计算机辅助计算。

（4）编写程序

根据数控系统具有的功能指令代码和程序段格式，编写加工程序。必要时还应该填写数控加工工序卡片、数控刀具卡片等有关的工艺文件。

（5）制作控制介质

就是把编写好的程序单上的内容记录在控制介质上，通过数控机床的输入装置，将控制介质上的数控加工程序输入到机床的数控装置。

（6）程序校验和首件试切

为了保证零件加工的正确性，数控加工程序必须经过校验和试切才能用于正式加工。一般通过图形显示和动态模拟功能或空进给校验等方法检查机床的运动轨迹与动作的正确性。通过对首件的试切削，检验加工零件的加工精度。若发现加工精度达不到要求，应分析误差产生的原因，采取措施加以纠正。

3.1.2 常用数控系统

数控车床在配置数控系统时，可根据其功能和性能要求，选用不同的数控系统。系统不同，其指令代码也有差异。目前，常用的数控系统主要有 FANUC、SIEMENS、华中数控等。

1. FANUC 数控系统简介

FANUC 数控系统是由日本富士通公司研制开发的。FANUC 公司创建于 1956 年，1959 年首先推出电液步进电机。20 世纪 70 年代，FANUC 公司一方面从 Gettes 公司引进直流伺服电机制造技术，一方面与西门子合作，1976 年成功开发出 5 系统，后与西门子联合开发出 7 系统。FANUC 公司目前生产的 CNC 装置有：F0，F10，F11，F12，F15，F16，F18。F00，F100，F110，F120，F150 系列是在 F0，F10，F11，F12 和 F15 的基础上加了 MMC 功能，即 CNC，PMC 和 MMC 三位一体的 CNC。

FS6 是 FANUC 早期代表性产品之一。在 20 世纪 70 年代末与 20 世纪 80 年代初期的数控机床得到了广泛应用。我国 20 世纪 80 年代进口的数控机床均大量配套采用 FS6 系统，直到目前仍然有较多配套 FS6 的机床在使用中。

F11 系列是 FANUC 公司 20 世纪 80 年代初期开发并得到广泛应用的 FANUC 代表性产品之一，在 20 世纪 80 年代进口的高档数控机床上广为采用。同系列的产品有 F10/F11/F12 三

种基本规格,其基本结构相似,性能与使用场合有所区别。

F0 系列是 FANUC 公司 20 世纪 80 年代中后期开发的产品,是 FANUC 代表性产品之一,是中国市场上销售量最大的一种系统 (F0C 系列, F0D 系列),产品目标是体积小、价格低,其中 F0-MC/TC 是其代表性产品, F0-MD 和 F0-TD 为 F0-MA 和 F0-TA 的简化版 (经济型)。

F15/16/18/16i/18i 系列系统有 F-15/16/18, F-15i/16i/18i, FS-150/160/180 和 F160i/180i 等型号,该系统系统是专门为工厂自动化设计的数控系统,是目前国际上工艺与性能最先进的数控系统之一,在美国、日本和欧洲的制造业中已普遍使用。

FANUC30i-MODEL A 是 FANUC 最新的高档控制器,是当前配置最高的数控系统。

FANUC 在我国应用比较广泛,目前,在中国市场上,应用于车床的数控系统主要有 FANUC 18-TA/TB、FANUC 0i-TA/TB 和 FANUC 0-TD 等。

2. SIEMENS 数控系统

SIEMENS 数控系统是德国西门子公司开发研制的,SIEMENS 公司是生产数控系统的著名厂家,SINUMERIK 的 CNC 数控装置主要有: SINUMERIK 3/8/810/820/850/805/840 系列等。

SIEMENS 3 系统是西门子公司于 20 世纪 80 年代初期开发出来的中档全功能数控系统,是西门子公司销售量最大的系统,是 20 世纪 80 年代欧洲的典型系统。

SIEMENS 810/820 是西门子公司 20 世纪 80 年代中期开发的 CNC、PLC 一体型控制系统,它适合于普通车、铣、磨床的控制,系统结构简单,体积小,可靠性高,在 20 世纪 80 年代末及 20 世纪 90 年代初的数控机床厂上使用较广。

SIEMENS 850/880 是西门子公司于 20 世纪 80 年代末期开发的机床及柔性制造系统,具有机器人功能。适合高性能复杂机床 FMS、CIM 的需要,是一种多 CPU 轮廓控制的 CNC 系统。

SIEMENS 802 系列系统包括 802S/Se/Sbase line、802C/Ce/Cbase line、802D 等型号,它是西门子公司 20 世纪 90 年代末开发的集 CNC、PLC 于一体的经济型控制系统。近年来在国产经济型和普及型数控机床上有较大量的使用。802 系列数控系统的共同特点是结构简单,体积小,可靠性较高。

该系统在我国数控机床中的应用也相当普及。目前,在中国市场上,常用的数控除 SIEMENS 810、SIEMENS 840 等型号外,还有专门针对我国市场开发的,并在南京生产的车床数控系统 SINUMERIK 802S/C base line、802D 等型号。其中,802S 系统采用步进电机,802C 和 802D 系统采用伺服驱动。

3. 国产数控系统

我国数控系统研制和生产自 20 世纪 80 年代初开始发展很快。目前,常用于车床的数控系统有华中数控系统 (如 HNC21/22T)、广州数控系统 (如 GSK980T)、广泰数控以及航天

数控系统等。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，采用开放式体系结构，内置嵌入式工业PC。

除此之外，国内使用较多的数控系统还有西班牙的FAGOR、日本三菱、美国A-B数控系统等。

3.1.3 数控系统主要功能

数控系统可以通过硬件和软件的结合，实现许多功能，其中包括以下功能。

(1) 准备功能

准备功能也称G功能，用来指挥机床动作方式，包括基本移动、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) 插补功能

CNC装置通过软件插补，其中数据采样插补是当前应用的主要方式。一般数控装置都有直线插补和圆弧插补，高档的数控系统还具有抛物线插补、螺旋线插补、极坐标插补、正弦插补和样条插补等功能。

(3) 主轴速度功能

CNC装置可以控制主轴的运动，也可以实现主轴速度的控制和准确定位。

(4) 进给功能

用F代码可以直接控制各轴的进给速度，同时可以通过主轴上的位置编码器实现同步进给。

(5) 补偿功能

补偿功能包括刀具长度补偿、刀具半径补偿和刀尖圆弧半径补偿；坐标轴的反向间隙补偿；进给传动件的传动误差补偿，如丝杠螺距补偿。

(6) 辅助功能(M功能)

辅助功能是数控加工中不可缺少的功能。数控系统常用的辅助功能有程序结束、主轴正反转/停止、冷却液开/关等。

(7) 字符图形显示功能

CNC装置可配置不同尺寸的单色或彩色显示器，通过软件和接口实现字符显示和图形显示。可以显示数控程序、机床参数、各种补偿量、故障信息、动态刀具轨迹等。

(8) 输入、输出和通信功能

一般CNC装置可以接多种输入、输出外部设备，实现程序及参数的输入、输出和存储。CNC还具有RS-232C和网络功能等接口，实现通信功能。

(9) 自诊断功能

CNC中设置各种诊断程序，可以防止故障发生和扩大。在故障出现后可以提供相关信息，为迅速查明故障类型和部位提供帮助，减少故障停机时间。

以上是机床数控系统的基本功能。其中,准备功能、控制功能、插补功能、主轴功能、进给功能、辅助功能、字符显示功能、刀具功能、自诊断功能等属于基本功能。而图形显示功能、网络功能和人机对话功能等则属于选择功能。数控车床的数控系统还具有自己的特点。数控车床一般只需控制两坐标轴(X 、 Z 轴),对于车削中心也只控制三轴或四轴(X 、 Z 、 C 等轴);数控车床对可以联动的坐标轴数目要求也比较少,一般为两轴联动或三轴联动。其他功能与其他类型数控机床没有太大区别,只是要求具备恒线速度功能。总之,CNC数控装置功能多种多样,而且随着技术的发展,功能越来越丰富。

3.1.4 数控车床坐标系

数控加工是建立在工件轮廓点坐标计算的基础上的。准确把握数控机床坐标轴的定义、运动方向的规定,根据不同坐标原点建立不同坐标系的方法,是正确计算工件轮廓点坐标的关键,并会给程序编制和机床操作带来方便。

1. 数控车床坐标系

在数控机床上加工零件,机床的动作是由数控系统发出的指令来控制的。为了确定数控机床的运动方向和移动距离,需要在机床上建立一个坐标系,这就是机床坐标系。也就是说,机床坐标系是为了确定工件在机床上的位置,机床运动部件的特殊位置(如换刀点、参考点等)以及运动范围(如行程范围)等而建立的几何坐标系,是机床固有的坐标系。

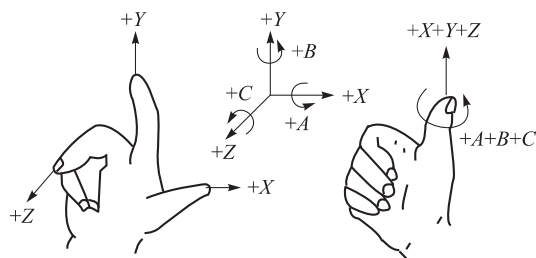


图 3-2 机床坐标系

(1) 坐标系建立的基本原则

① 采用右手笛卡儿直角坐标系来命名数控机床的坐标轴。如图 3-2 所示,大拇指的指向为 X 轴的正方向,食指的指向为 Y 轴的正方向,中指的指向为 Z 轴的正方向。

② 采用假设工件固定不动,刀具相对工件移动的原则。数控车床的加工操作分为刀具运动和工件运动两部分,在确定机床坐

标系方向时规定:永远假设刀具是相对于静止工件的运动,以便编程人员在编程时,可不考虑数控机床的实际运动形式。

③ 对于数控机床坐标系的方向,统一规定刀具与工件之间距离增大的方向为该坐标轴的正向。

(2) 数控机床坐标系的建立

确定数控机床坐标系,一般先确定 Z 轴,然后确定 X 轴和 Y 轴。

① Z 轴及其正向。一般以传递切削力的主轴为 Z 轴。车床主轴的轴线方向是 Z 轴,并以增大工件和刀具距离的方向为其正向。

② X 轴及其正向。 X 轴一般为水平方向并垂直于 Z 轴。对于车床, X 轴方向是工件的径

向并平行于导轨。同时也规定刀具远离工件的方向为其正向。

③ Y 轴及其正向。根据 X 轴和 Z 轴的方向,按右手笛卡儿直角坐标系确定 Y 轴。

④ 旋转轴方向。在确定由 X 、 Y 、 Z 轴构成的直角坐标系的基础上,有些机床还带有标识回转运动的坐标。围绕 X 、 Y 、 Z 轴旋转的圆周进给坐标轴分别用 A 、 B 、 C 表示。如图 3-2 所示,根据右手法则,若用大拇指指向 X 、 Y 、 Z 轴的正方向,则其余手指的指向是 A 、 B 、 C 的正方向。数控车床坐标系如图 3-3 和 3-4 所示。

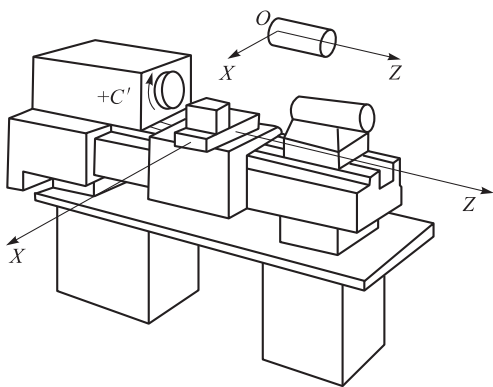


图 3-3 水平床身前置刀架数控车床坐标系

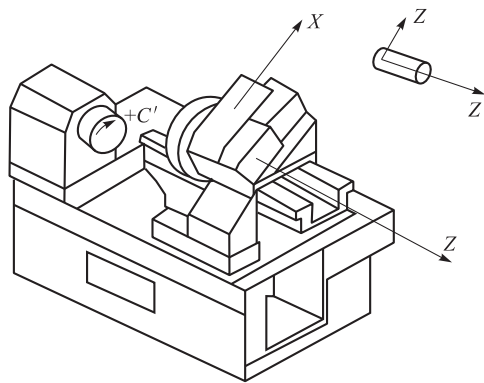


图 3-4 斜床身后置刀架数控车床坐标系

2. 机床原点和参考点

(1) 机床原点

机床原点(亦称机床零点)是机床上设置好的一个固定点,用于确定机床坐标系的原点,如图 3-5 所示。机床原点在机床装配和调试时就已设置好,一般不容许用户进行更改。数控车床的原点为主轴轴线与卡盘端面的交点,它是车床参考点及工件坐标系的基准点。

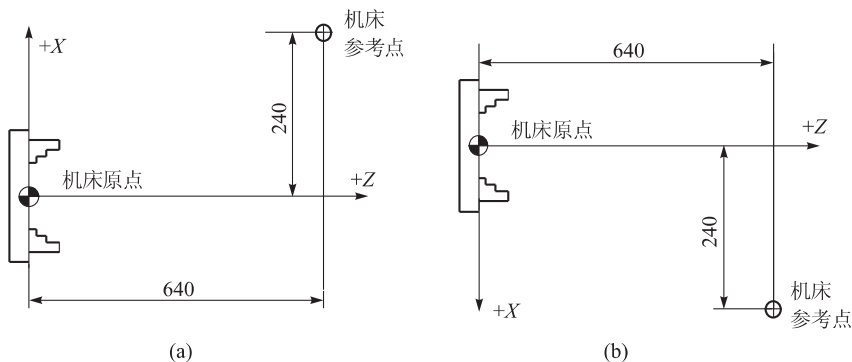


图 3-5 数控车床机床原点与参考点

(a) 后置刀架; (b) 前置刀架

（2）机床参考点

机床参考点是机床上一个特殊位置的点，与机床原点的相对位置是固定的，如图 3-5 所示，在机床出厂之前由机床制造商精密测量确定。

对大多数数控车床，开机第一步总是进行返回机床参考点的操作。开机回参考点的目的就是建立机床坐标系，并确定机床坐标系的原点。该坐标系一经建立，在机床不断电的前提下，将保持不变，并且不能通过编程对它进行修改。

3. 工件坐标系与工件原点

（1）工件坐标系

工件坐标系（亦称编程坐标系）是以工件设计尺寸为依据建立的坐标系。该坐标系的原点可由编程人员根据具体情况设置，其坐标轴的方向与机床坐标系一致。建立工件坐标系的目的主要是方便编程。

（2）工件原点

工件原点亦称编程原点或程序零点，可由编程人员根据具体情况设置，一般是在工件装夹完毕后通过对刀来确定。

从理论上讲，工件原点设在任何位置都可以，但实际上，在加工过程中为了使工件的设计基准与工艺基准统一，即为了使各尺寸直观，从而方便编程，应尽可能把工件原点选得合理些。如图 3-6 所示，工件原点可选在主轴回转中心与工件右端面的交点 O 上，也可选在主轴回转中心与工件左端面的交点 O' 上。当工件原点确定后，工件坐标系也随之确定下来。FANUC 系统数控车床工件原点一般用 G50 或 G54 ~ G59 设置。

4. 绝对坐标与增量坐标

在编程时，刀具或机床运动位置的坐标值通常有两种表达方式，即绝对坐标和增量坐标。

绝对坐标是指刀具或机床运动位置的坐标值是相对于坐标系原点给出的。如图 3-7 所示的 A 、 B 两点，若以绝对坐标表示， A 点的坐标为 $(10, 10)$ ， B 点的坐标为 $(40, 30)$ 。

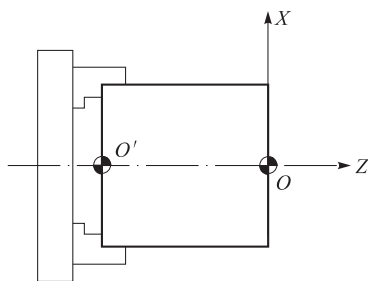


图 3-6 工件坐标原点

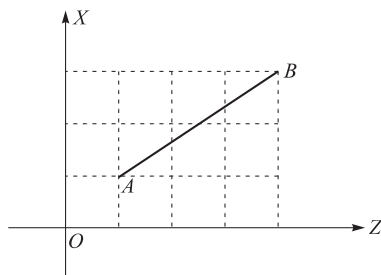


图 3-7 绝对坐标与增量坐标

增量坐标是指刀具或机床运动位置的坐标值相对前一位置,而不是坐标系原点给出的。如图3-7所示, B 点相对于 A 点以增量坐标表示, B 点的坐标为 $(30, 20)$; A 点相对于 B 点以增量坐标表示, A 点的坐标为 $(-30, -20)$ 。

3.1.5 数控车床编程特点

① 在一个程序段中,根据图纸上标注的尺寸编写运动坐标值,既可采用绝对坐标,也可采用增量坐标,有时还可采用二者混合编程。

② 为了增加程序的可读性, X 坐标采用直径编程,即程序中 X 坐标采用直径值表示。若以增量坐标编程,以径向实际位移的2倍值表示,并附以方向符号。

③ 为了提高工件的径向尺寸精度, X 向的脉冲当量取 Z 向的一半。

④ 由于车削加工常用的毛坯为棒料或锻件,加工余量较大,为了简化编程,数控系统常具备不同的固定循环,可进行多次重复循环切削。

⑤ 编程时,常认为车刀刀尖为一个点。而实际上,为了提高刀具寿命和工件表面质量,车刀刀尖常为一个半径不大的圆弧。因此,为提高加工精度,当用圆头车刀加工编程时,需要对刀具半径进行补偿。

3.1.6 数控程序编制中的数值计算

根据被加工零件图样,按照已经确定的加工路线和允许的编程误差,计算编程时所需要的数据,称为数控编程的数值计算。

手工编程时,在完成工艺分析和确定加工路线以后,数学处理是程序编制中不可缺少的一个环节。数控编程的数值计算可分为基点坐标计算和节点坐标计算两种情况。

1. 基点坐标计算

(1) 基点

一个零件的轮廓可能由许多不同的几何要素所组成,如直线、圆弧、二次曲线等,各几何要素之间的连接点称为基点。基点坐标是编程中重要数据,可以直接作为其运动轨迹的起点和终点。

(2) 基点坐标的计算

基点坐标值一般根据零件图样给出的形状、尺寸和公差直接通过数学方法(如解析几何法、三角函数法)计算出的。

如图3-8所示的零件,其轮廓由直线和圆弧组成,数控编程时,必须要知道圆弧的圆心和基点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 的坐标值。由图可知,欲求坐标,先建立坐标系 XOY ,基点 B 、 C 、 D 、 E 的坐标通过图上尺寸很容易得到,基点 A 的坐标需要通过平面解析几何方法列方程联立求解。方程如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 20^2 \\ y = 10 \end{cases}$$

联立求得 $A(17.321, 10)$ 。

2. 节点坐标计算

(1) 节点

当被加工零件轮廓形状与车床插补功能不一致时, 如在只有直线和圆弧插补功能的数控车床上加工椭圆、抛物线或用一系列坐标点表示的列表曲线等时, 就要用直线或圆弧去逼近被加工曲线。此时, 逼近线段与被加工曲线的交点称为节点。图 3-9 所示的曲线是用直线逼近的, 其交点 A 、 B 、 C 即为节点。

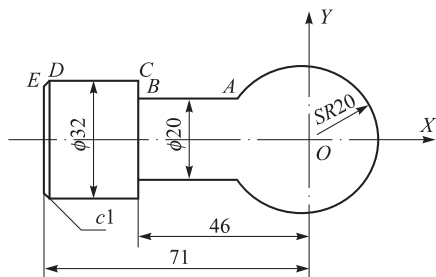


图 3-8 零件基点计算

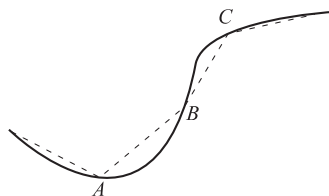


图 3-9 零件轮廓的节点

(2) 节点坐标的计算

非圆曲线上的节点坐标的计算, 如果纯粹用手工计算既复杂又烦琐, 所以一般可以采用计算机辅助计算, 甚至直接采用 CAD/CAM 编程。下面是用直线和圆弧逼近方法的简单介绍。

1) 直线逼近法

直线逼近法中用得较多的是弦线法。由于弦线法的插补点均在曲线上, 容易计算, 编程也简便, 所以常用弦线法逼近非圆曲线, 其缺点是插补误差较大, 但只要处理得当可以满足加工需要的, 关键在于插补长度及插补误差控制。由于各种曲线上各点曲率不同, 要保证插补精度, 常有以下几种处理方法。

① 等间距法。将非圆曲线在 X 方向分成等间距 ΔX 。如图 3-10 所示, 根据曲线方程和 X_i 求出 Y_i , 这样求出的一系列点的坐标即为节点坐标。通常还要验证最大实际误差应在允许误差的 $1/3 \sim 1/2$ 范围内。

② 等长度法。使用该方法时每个插补段的长度均相等, 如图 3-11 所示。关键是确定允许插补线段长度, 一般先求出曲线的最小曲率半径 $R_{\min}$, 由最小曲率半径和允许误差确定允许插补线段长度, 然后按确定的插补长度截取曲线, 得到各节点。

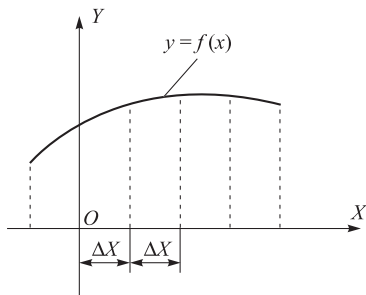


图 3-10 等间距法

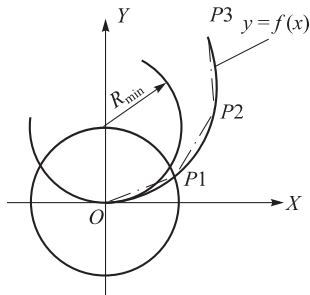


图 3-11 等长度法

③ 等误差法。该方法是使各插补段的误差相等，如图 3-12 所示。曲线的轮廓方程是 $Y=f(X)$ ，以起点 A 为圆心，以允许误差为半径画圆，作出该圆与曲线的公切线 PT_1 ，再过 A 点作一条与公切线平行的直线，该直线与曲线的交点 B 为第一个节点，依次作出 C 等节点。这种方法的优点是插补线段较少。

2) 圆弧逼近法

用圆弧逼近非圆曲线，常用的方法是三点圆法。三点圆法是在等误差直线逼近法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弧的半径，如图 3-13 所示。

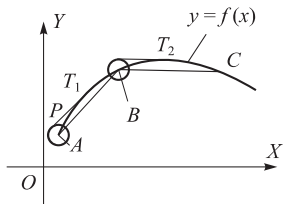


图 3-12 等误差法

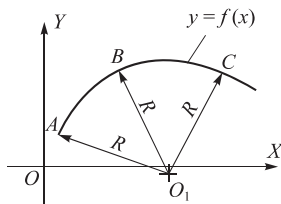


图 3-13 三点圆法

3.2 FANUC 系统数控车床编程

3.2.1 程序结构与格式

1. 程序的组成

由于数控车床控制系统不同，数控加工程序的格式存在一定差异，因此，编程人员必须严格按照数控车床有关说明书的规定格式进行编程。

一个完整的数控程序,一般是由程序号、程序内容和程序结束3个部分组成。下面是一个数控加工程序。

```

O1111 ————— 程序号
N5 G50 X100 Z100;
N10 M03 S600 T0101;
G00 X50 Z2;
N15 G01 Z-80;
      :
N45 G00 X100 Z100; ———— 程序内容
N50 M30; ————— 程序结束
    
```

(1) 程序号

其格式为 $O \times \times \times \times$, 它是由地址“O”紧跟4位数字(1~9999)组成,放在程序的开头。为了识别在存储器中的程序,应给每个程序分配一个程序号。

(2) 程序内容

程序内容为整个程序的核心,由若干程序段组成,主要来表示数控机床要完成的全部动作。

(3) 程序结束

常以程序结束指令 M02 或 M30 构成最后程序段,表示程序运行结束。

2. 程序段格式

程序段格式是指程序书写的规则。可分为字地址格式、分格顺序格式。根据程序段的长度和每个字的位数是否相同,又分为固定程序段格式和可变程序段格式,其中最常用的是字地址可变程序段格式,其结构如下。

$\underline{N \times \cdots \times}$	$\underline{G \times \cdots \times}$	$\underline{X(U) \pm \times \cdots \times Z(W) \pm \times \cdots \times}$	$\underline{\times \cdots \times}$
程序段号	准备功能	坐标运动尺寸	其他尺寸
$\underline{F \times \cdots \times S \times \cdots \times T \times \times \times \times}$	$\underline{M \times \times}$	$\underline{\quad ; \quad}$	
工艺性指令	辅助功能	结束代码	

这种程序段中字的数量是变化的,程序段的长短随所选用的字数与字长而发生变化。程序段中每个字都以地址符开始,其后面跟上符号和数字,字的排列顺序没有严格要求。这种格式的特点是程序简单,可读性强,易于检查。

3.2.2 数控系统常用功能

数控系统常用的功能有准备功能、辅助功能和其他功能3种,这些功能是编程的基础。

1. 准备功能

准备功能也称为G功能或G代码,它是用来指令机床动作方式的功能。准备功能使用

地址 G 及其后面的数字来指令机床动作，如用 G00 来指令运动坐标快速定位。FANUC - 0i 系统常用的准备功能指令见表 3-1。

表 3-1 常用 G 功能表

G 代码	组 号	功 能	G 代码	组 号	功 能
☆G00	01	快速点定位	G66		宏程序模态调用
G01		直线插补	☆G67		宏程序模态调用取消
G02		顺时针圆弧插补	G70	00	精车循环
G03		逆时针圆弧插补	G71		粗车循环
G04	00	暂停	G72		端面粗车循环
☆G18	16	ZX 平面选择	G73		多重复合循环
G20	06	英制尺寸	G74		排屑钻端面孔
G21		公制尺寸	G75		外径/内径钻孔
G28	00	返回参考点	G76		螺纹复合循环
G32	01	螺纹切削	G90	01	内外圆切削循环
G34		变螺距螺纹切削	G92		螺纹切削循环
☆G40	07	刀尖半径补偿取消	G94		端面切削循环
G41		刀尖圆弧半径左补偿	G96	02	恒线速度
G42		刀尖圆弧半径右补偿	☆G97		每分钟转数
G50	00	坐标系设定 或最大主轴转速设定	G98	05	每分进给
☆G54 ~ G59	14	工件坐标系选择	☆G99		每转进给
G65	00	宏程序调用			

注：① 带 ☆ 的表示接通电源时的 G 代码状态，即开机默认指令；

② 不同组的 G 代码能够在同一段中指定，如果同一程序段中指定了同组 G 代码，则最后指定的 G 代码有效；

③ G 代码按组号显示；

④ G 代码系统有三种：A、B 和 C，本表列出的是 G 代码系统 A，绝对/增量编程是由地址字（X/U、Z/W）指定；

⑤ 指令固定循环 G 代码不影响 01 组的 G 代码。

（1）指令分组

指令分组就是将系统中不能同时执行的指令分为一组，并以编号区别。见表 3-1，如

G00、G01、G02、G03 属于 01 组，G96 和 G97 属于 02 组等。

对于不同组的 G 指令，在同一程序内可以进行不同组合。如 G98 G96 G41 G21，这段程序中的所有指令均不同组，是规范、正确的。

同组指令在一个程序段内只能有一个生效，在一个程序段内若出现多个同组指令时，只执行最后输入的指令。如 G00 G01 X50 Z80 F100，G00 与 G01 是同组指令，实际执行的是 G01，有些机床还会出现报警，编程时尽量避免。

（2）模态指令与非模态指令

模态指令又称续效指令，是指一个指令在某个程序段中一经指定，在接下来的程序段中一直有效，直到出现同组的另一个指令时，该指令才失效。见表 3-1，除 00 组以外的 G 指令都是模态指令。

非模态指令又称非续效指令，是指仅在编入的程序段内才有效的指令，程序段结束时就失效。见表 3-1，00 组的 G 指令都是非模态指令。

为了简化编程，在编写程序时，对于在上段程序中已经写明，而在本程序段（包括后面的程序段）里又不再变化的那些模态 G 功能指令及坐标运动尺寸指令，可以省略不写。

下例中程序 O1000 和 O1111 是等效的，但程序 O1111 避免了程序中出现大量的重复指令，程序清晰明了。

O1000	O1111
N5 G00 X100 Z120;	N5 G00 X100 Z120;
N10 G00 X50 Z2;	N10 X50 Z2;
N15 G01 X50 Z-58 F100;	N15 G01 Z-58 F100;
N20 G01 X80;	N20 X80;
N25 G00 X100 Z120;	N25 G00 X100 Z120;

2. 辅助功能

辅助功能也称 M 指令，主要用于指定主轴启动/停止、程序结束等。不同机床制造商对部分 M 指令定义了不同的功能，但多数常用的 M 指令，在所有的机床上都是通用的。FANUC 系统常用的 M 指令见表 3-2。

表 3-2 常用 M 指令表

指令	功 能	指令	功 能
M00	程序暂停	M08	冷却液开
M01	程序选择停止	M09	冷却液关
M02	程序结束	M30	主轴停转、程序结束
M03	主轴顺时针方向旋转	M98	调用子程序
M04	主轴逆时针方向旋转	M99	返回主程序
M05	主轴停止		

(1) M00 程序停止

执行 M00 后, 机床所有操作均被切断, 以便进行某种手动操作, 如精度的检测等, 重新按循环启动按钮后, 再继续执行 M00 指令后的程序。该指令常用于粗、精加工之间精度检测时的暂停。

(2) M01 程序选择停止

M01 的执行过程和 M00 相似, 不同的是只有按下机床控制面板上的“选择停止”开关后, 该指令才有效, 否则机床继续执行后面的程序。该指令主要用于检测工件的某些关键尺寸。

(3) M02 程序结束

M02 程序结束指令执行后, 表示本加工程序内所有内容均已完成, 但程序结束后, 机床显示屏上的执行光标不返回到程序开始段。

(4) M30 程序结束

M30 的执行过程与 M02 相似, 不同之处是当程序结束后, 随即主轴冷却液等所有机床操作停止, 机床显示屏上的执行光标返回到程序开始段, 为下一个工件的加工做好准备。

(5) M03/M04/M05 主轴功能

M03 用于机床主轴顺时针方向旋转 (CW), 一般称为正转。M04 用于机床主轴逆时针方向旋转 (CCW), 一般称为反转。M05 指令表示主轴停转。

(6) M08/M09 冷却液开/关

M08 表示冷却液开, M09 表示冷却液关。

(7) M98/M99 子程序调用指令

M98 被规定为子程序调用指令, 当调用的子程序结束后返回其主程序用 M99。

3. 其他功能

(1) 主轴功能指令 (S 指令) 和主轴转速控制指令 (G96、G97、G50)

主轴功能指令是用来指定主轴转速的功能, 由地址符 S 及其后面的一组数字组成, 通常称 S 功能。根据加工需要, 主轴转速分为转速 S 和恒线速度 v 两种, 分别用 G97 和 G96 来设定。

① 转速 S。用准备功能 G97 来设定, 单位是 r/min 。

其编程格式如: G97 M03 S800; (表示主轴正转, 转速为 800 r/min)。

② 恒线速度 v 。用准备功能 G96 来设定, 单位是根据采用公制或英制分别为 m/min 或 ft/min 。

其编程格式如: G21 G96 M04 S100; (表示主轴反转, 恒线速度为 100 m/min)

如图 3-14 所示, 转速 S 与线速度 v 之间的关系计算公式为

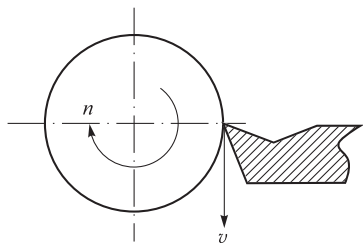


图 3-14 线速度与转速关系

$$S = 1000v/\pi D \quad (3-1)$$

式中 S ——主轴转速, r/min ;
 D ——工件直径, mm ;
 v ——切削线速度, m/min 。

用恒线速度进行编程时, 由式 (3-1) 可知, 当刀具切削直径较小或切端面靠近工件中心时, 其转速升得很高, 为防止事故的发生, 数控系统采用 G50 来限制其最高转速。其指令格式为: G50 S__; (如 G50 S2800; 表示主轴的最高转速为 2 800 r/min)

(2) 进给功能指令 (F 指令) 和进给速度控制指令 (G98、G99)

进给功能指令是用来指定刀具相对于工件运动速度的功能, 由地址符 F 和其后面的数字组成。根据加工需要, 进给功能分为每分进给和每转进给两种, 分别用 G98 和 G99 来设定。

① 每分进给。用准备功能 G98 来设定, 在 F 后面的数值直接指定刀具每分钟的进给量, 如图 3-15 (a) 所示, 单位是 mm/min 或 in/min 。

其编程格式如: G21 G98 G01 X100 F120; (表示进给速度为 100 mm/min)

② 每转进给。用准备功能 G99 来设定, 在 F 后面的数值直接指定机床主轴每转的刀具进给量, 如图 3-15 (b) 所示, 单位是 mm/r 或 in/r 。

其编程格式如: G21 G98 G01 X100 F0.3; (表示进给速度为 0.3 mm/r)

每转进给与每分进给之间可以进行换算, 假设主轴的转速为 500 r/min , 进给速度为 0.3 mm/r , 换算成每分进给为: $500 \times 0.3 = 150$ (mm/min)。

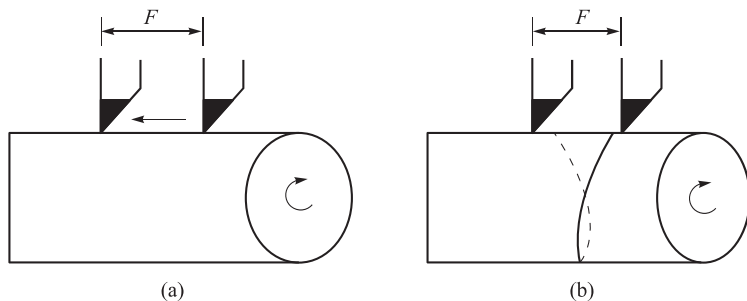


图 3-15 进给速度
 (a) 每分进给; (b) 每转进给

(3) 刀具功能指令 (T 指令)

刀具功能指令是用以让系统选刀的功能，由地址符 T 及其后面的一组数字组成，通常称 T 功能。根据数控系统不同，常用刀具功能的指定方法有 T4 位数法和 T2 位数法两种。

① T4 位数法。可以同时选择刀具和刀补。其编程格式为： $T \times \times \times \times$ ，4 位数中的前两位用于指定刀具号，后两位用于刀具补偿号。

例如：T0202 表示选用刀架或刀库中的 2 号刀具和数控系统刀具存储器中的 2 号补偿值。在使用过程中刀具号和补偿号可以不相同，如 T0102 也是合理的，但为了方便，在编程尽量一致。

取消刀具补偿的格式一般为： $T \times \times 00$ 。

FANUC 数控系统和部分国产数控系统多采用 T4 位数法。

② T2 位数法。其编程格式为： $T \times \times$ ，2 位数中的前一位用于指定刀具号，后一位用于刀具补偿号。部分国产经济型数控系统采用这种方法。

例如：T11 表示选用刀架或刀库中的 1 号刀具和数控系统刀具存储器中 1 号补偿值。

SIEMENS 系统也采用 T2 位数法，但 $T \times \times$ 中 2 位数仅指定刀具号，其刀具补偿号由 D 指令来指定，如 T01D02。

本章小结

本章主要介绍了数控车编程的基础常识，通过学习了解常见数控系统及其主要功能；了解数控编程方法和步骤；重点是数控车削编程基本概念（如数控车床坐标系、机床原点与参考点、工件坐标系与工件原点、绝对坐标与增量坐标、节点与基点等）、FANUC 系统数控程序的组成和 M、S、T 指令含义，在以后编程中使用频率高，所以要在记忆的基础上加强理解。

思考与练习题

1. 手工编程一般分为哪几步？
2. 如何确定数控车床坐标系？
3. 什么叫机床原点、机床参考点？
4. 什么叫工件坐标系、工件原点？工件坐标系与机床坐标系有什么关系？
5. 何谓基点和节点？何谓绝对坐标和增量坐标？
6. 何谓模态指令与非模态指令？在数控编程时有何不同？

7. 辅助功能指令作用是什么？M02 和 M30 有何区别？
8. 简述主轴转速控制指令 G96 和 G97 的区别与联系？试举例说明。
9. 简述进给速度控制指令 G98 与 G99 的区别与联系？试举例说明。
10. 常用刀具功能的指定方法有哪几种？试举例说明。