

安徽省高等学校质量工程项目立项一流教材
安徽省职业教育提质培优行动教材项目成果
安徽省高等学校课程思政示范课程配套教材

数控加工编程与操作

主编◎祁琦 张涛 孙晓东

SHUKONG JIAGONG BIANCHENG YU CAOZUO

航空工业出版社

安徽省高等学校质量工程项目立项一流教材
安徽省职业教育提质培优行动教材项目成果
安徽省高等学校课程思政示范课程配套教材

数控加工编程与操作

主编◎祁琦 张涛 孙晓东

SHUKONG JIAGONG BIANCHENG YU CAOZUO

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书由知识库和工作页两部分构成。工作页中涉及的知识点，在知识库中均有提及。数控车削工作页包括数控车床的基本操作、轴类零件加工、盘套类零件加工和零件综合加工 4 个情境模块 14 个任务，数控铣削工作页包括数控铣床的基本操作、轮廓零件加工和零件综合加工 3 个情境模块 12 个任务。每个情境模块中的任务由易到难，注重学生解决问题的锻炼和学习方法的掌握。

本书既可用于机械类和近机械类专业师生使用，也可供企业和社会人士参考使用。教师可以根据学时和学生的学习程度自主选择所学习的项目和任务，使用灵活方便。

图书在版编目 (CIP) 数据

数控加工编程与操作 / 祁琦, 张涛, 孙晓东主编

. 一 北京: 航空工业出版社, 2024.3

ISBN 978-7-5165-3703-9

I . ①数… II . ①祁… ②张… ③孙… III . ①数控机床 - 程序设计②数控机床 - 操作 IV . ① TG659

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2024) 第 056529 号

数控加工编程与操作

Shukong Jiagong Biancheng yu Caozuo

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区京顺路 5 号曙光大厦 C 座四层 100028)

发行部电话: 010-85672666 010-85672683

北京荣玉印刷有限公司印刷

2024 年 3 月第 1 版

开本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印张: 20.5

全国各地新华书店经售

2024 年 3 月第 1 次印刷

字数: 473 千字

定价: 59.80 元

前言

本书以数控编程与加工课程标准以及数控车削、数控铣削加工职业技能等级标准为依据，遵循学生职业能力培养的基本规律，按照数控加工领域工作岗位能力要求设置教材内容，突出行动能力本位的教学理念，注重对学生的知识、技能和职业素养的培养。

本书引进“双元制”教学模式，在职业技能培养方式上，以现代“学徒制”为载体，提倡行动导向教学法。这种教学方式将课堂还给学生，以完成任务为目标，通过任务这一载体，使学生在完成任务的过程中掌握相关知识和技能。本书还结合“双元制”培训的经验，以学生自主学习为导向，以“工作页”为呈现形式，体现“六步教学法”的教学过程。

本书是安徽省高校优秀青年人才基金（gxyq2020117）和安徽省职业教育提质培优行动——职业教育规划教材项目成果，以及安徽省质量工程高水平教材建设项目（2022gspjc062）。本书以培养学生的数控加工工艺与程序编制技能为核心，结合现代机械装备制造业“数控编程和数控机床操作”的核心岗位要求，融合数控车铣加工“1+X”证书中级要求，以行业常用零件为载体，以FANUC数控系统为基本教学环境，按照“以学生为中心、学习成果为导向、促进自主学习”的思路进行教材开发设计。

本书特色如下。

（1）采用“双元制”教学模式，对接数控车铣加工职业技能等级标准，参照数控车削、数控铣削操作工（高级）的要求和“1+X”数控车铣加工职业技能等级的要求，按技能考核鉴定点编排设计。按照岗课赛证综合育人培养要求，培养符合数控车铣机械工要求的技能人才。训练内容首先对图样进行分析，然后按照“六步教学法”进行编排，学生通过六个步骤完成整个工作任务。

（2）改变传统的知识点和例题混合在一起编写的模式，将专业知识按照工艺、刀具、编程指令、测量和生产维护五个方向，单独编写成工作手册式知识库，知识库中列出了工作任务中涉及的相关理论知识，供学生在自主学习的过程中查阅。

（3）教学内容模块化，工作页部分都是以活页式呈现的，教师可以根据自己的教学要求和课时分配，自由安排工作任务。

（4）本书落实“立德树人”的根本任务，贯彻《高等学校课程思政建设指导纲要》和党的二十大精神，以科技报国的家国情怀和精益求精的大国工匠精神为主线，挖掘思政内容，全书融入职业素养元素，将专业知识与思政教育有机结合，推动价值引领、

知识传授和能力培养紧密结合, 践行“立德树人”的教育理念。

此外, 本书编者还为广大一线教师提供了服务于本书的教学资源库, 有需要者可致电 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com。

本书由祁琦、张涛、孙晓东担任主编, 胡艳担任副主编, 温莉敏、王红、黄遵文、罗勇、卞士军参与编写, 全书由祁琦负责统稿。

本书的编写得到了苏州健雄职业技术学院岳向阳教授的大力支持, 淮河能源集团正高级工程师罗勇、淮南平安开诚智能安全装备有限责任公司高级工程师黄遵文、卞士军也对本书提出了很多宝贵的意见, 在此表示衷心感谢。

本书的编写和研究工作, 还得到了安徽省自然科学基金面上项目(2108085ME155)资助。

由于时间仓促, 编者水平有限, 书中存在的疏漏之处, 敬请广大读者批评、指正。

知识库目录

上篇 数控车削篇

1

知识一 数控车床工艺知识	1
一、数控车床类型	1
二、数控车床结构	3
三、数控车床加工范围	4
四、数控机床控制面板	4
五、机床坐标系	8
六、机床原点与机床参考点	9
七、工件坐标系与工件原点	9
八、对刀	10
九、工件的装夹	10
十、切削用量的选择	11
十一、螺纹加工	14
十二、外圆柱面加工方案	17
十三、孔加工方案	17
十四、套类工件加工方案	18
十五、切槽加工方案	19
知识二 数控车床刀具知识	20
一、刀具材料	20
二、刀具的切削刃几何形状	24
三、可转位刀片型号表示规则	26
四、可转位车刀型号编制规则	29
五、数控车刀的结构形式	29
六、可转位车刀的刀片与刀杆的固定方式	30

知识三 数控车床编程知识·····	31
一、数控装置初始状态的设置·····	31
二、指令·····	31
三、宏程序·····	48
学思践悟·····	53

中篇 数控铣削篇

55

知识一 数控铣床工艺知识·····	56
一、数控铣床类型·····	56
二、数控铣床结构·····	56
三、数控铣床 / 加工中心坐标系·····	57
四、数控铣削加工的主要对象·····	58
五、数控铣削加工方式·····	59
六、数控铣削工艺的制订·····	60
七、数控铣削切削液的选择·····	65
知识二 数控铣床刀具知识·····	67
一、刀柄系统·····	67
二、铣刀类型·····	70
三、刀具材料·····	75
四、刀具装夹·····	76
知识三 数控铣床夹具知识·····	76
一、平口钳·····	76
二、三爪卡盘·····	77
三、压板·····	77
四、万能夹具组、组合压板·····	78
知识四 数控铣床编程知识·····	79
学思践悟·····	92

下篇 综合篇

94

知识一 测量知识.....	94
一、尺寸检测.....	94
二、形状和位置检测.....	99
三、螺纹检测.....	103
四、表面粗糙度检测.....	104
五、对刀工具.....	105
知识二 生产与维护.....	106
一、健康安全环境.....	106
二、车间的安全生产与防护.....	108
三、典型案例及注意事项.....	112
四、6S 管理.....	112
五、TPM 管理.....	114
学思践悟.....	115

参考文献

117

上篇

数控车削篇

学习目标

知识目标

- ① 了解数控车床的分类和结构。
- ② 熟悉数控车削加工的工作步骤。
- ③ 掌握数控车削加工程序的编制方法。
- ④ 掌握数控车削加工工艺参数和工艺路线选择的原则。

能力目标

- ① 能正确判断数控车床的坐标系。
- ② 会根据零件的技术要求合理制订零件的数控加工工艺，具备较复杂零件数控车削加工工艺安排能力。
- ③ 会车削加工基本指令、固定循环指令、复合循环指令等数控指令的格式及应用，能编制较复杂零件的数控加工程序。
- ④ 会正确选用刀具和夹具。
- ⑤ 会编制数控车削较复杂零件的工艺文件。

素质目标

- ① 具备积极进取的工作态度和职业操守，爱护设备，保证工作质量。
- ② 能够与他人良好沟通，共同完成任务，具备团队合作精神。
- ③ 有自我学习和自我提高的意识，具备持续学习的能力。
- ④ 具备安全意识，遵守安全操作规程，确保工作过程中的安全。

知识一 数控车床工艺知识

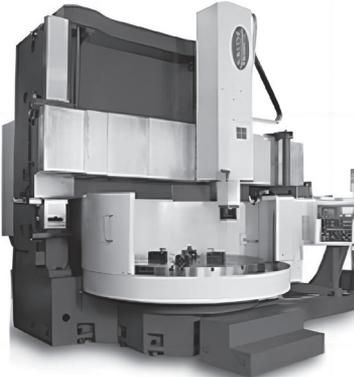
一、数控车床类型

数控车床有多种分类方法，最常见的分类方法有以下四种。

（一）按主轴布置方式分类

按主轴布置方式分类，数控车床可分为卧式数控车床、立式数控车床两大类（见表 1-1）。卧式数控车床又分为水平导轨式和倾斜导轨式两种。

表 1-1 数控车床按主轴布置方式分类

类别		图片	特点
卧式数控车床	水平导轨式		卧式数控车床的主轴水平放置，主要用来车削轴类、套类零件
	倾斜导轨式		导轨倾斜放置，车床刚性大，加工时容易排屑
立式数控车床			立式数控车床的主轴垂直放置，主要用来车削大型的盘类零件。一般工作台的直径大于 1000 mm

（二）按数控系统分类

按数控系统分类，常见的数控车床有 FANUC（发那科）数控系统车床、SINUMERIK（西门子）数控系统车床、华中数控系统车床、广州数控系统车床等。每种数控系统又有多种型号，每种型号会有细微差别，在使用前请查阅车床使用手册。

（三）按控制方式分类

按控制方式分类，数控车床可分为开环控制系统数控车床、半闭环控制系统数控车床、闭环控制系统数控车床。

（四）按功能分类

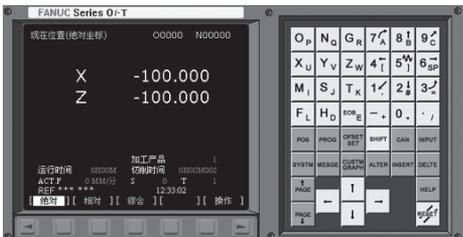
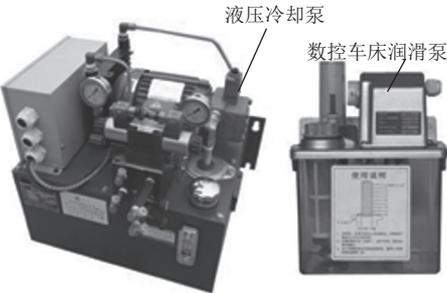
按功能分类，数控车床可分为经济型数控车床、全功能数控车床、车削加工中心

和柔性制造单元。

二、数控车床结构

数控车床主要由机床主体、控制系统、伺服系统和测量调节系统、辅助系统等组成（见表 1-2）。

表 1-2 数控车床的结构

组成部分	图片	说明
数控车床		机床主体包括床身、底座、立柱、横梁、滑座、工作台、主轴箱、进给机构、刀架及自动换刀装置等机械部件
		控制系统是数控车床的核心，其功能是接受输入的加工信息，经过系统软件和逻辑电路的译码、运算和逻辑处理，向伺服系统发出相应的脉冲，通过伺服系统控制车床运动部件按加工程序指令运动
		伺服系统包括伺服驱动装置和执行机构两大部分。驱动装置由主轴驱动单元、进给驱动单元、主轴伺服电动机和进给伺服电动机组成。测量调节系统将数控车床各坐标轴的实际位移值检测出来，通过反馈系统输入车床的数控装置中
		辅助系统包括气动、液压装置，排屑装置，冷却、润滑装置，防护、照明装置

三、数控车床加工范围

数控车床主要用于轴类、套类、盘类等回转体零件的加工（如各种内外圆柱面、内外圆锥面、螺纹的加工，以及切槽等工序），还可用于普通车床上很难完成的各种曲线构成的回转面、非标准螺纹、变螺距螺纹等的表面加工。

四、数控机床控制面板

数控机床控制面板（见图 1-1）是数控机床的重要组成部分，是操作人员与数控机床（系统）进行交互的工具，操作人员可以通过它对数控机床（系统）进行操作、编程、调试，对机床参数进行设定和修改，还可以通过它了解、查询数控机床（系统）的运行状态，是数控机床特有的一个输入、输出部件。其主要由显示装置、NC 键盘（数字控制键盘，功能类似于计算机键盘的按键阵列）、控制键盘等部分组成。



图 1-1 数控机床控制面板

（一）显示装置

数控系统通过显示装置为操作人员提供必要的信息。根据系统所处的状态和操作命令，显示的信息可以是正在编辑的程序、正在运行的程序、机床的加工状态、机床坐标轴的指令、实际坐标值、加工轨迹的图形仿真、故障报警信号等。FANUC 0i 系统 CRT（阴极射线管）界面如图 1-2 所示。

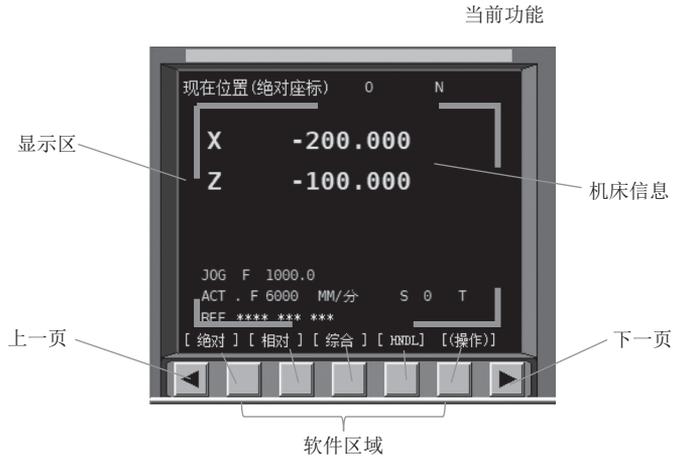


图 1-2 FANUC Oi 系统 CRT 界面

(二) NC 键盘

NC 键盘包括 MDI (手动输入模式) 键盘及软键功能键等, MDI 键盘如图 1-3 所示。通过 MDI 键盘可以实现数控加工程序的输入与编辑、刀补参数输入、工件坐标系设定等操作。按键功能说明如表 1-3 所示。

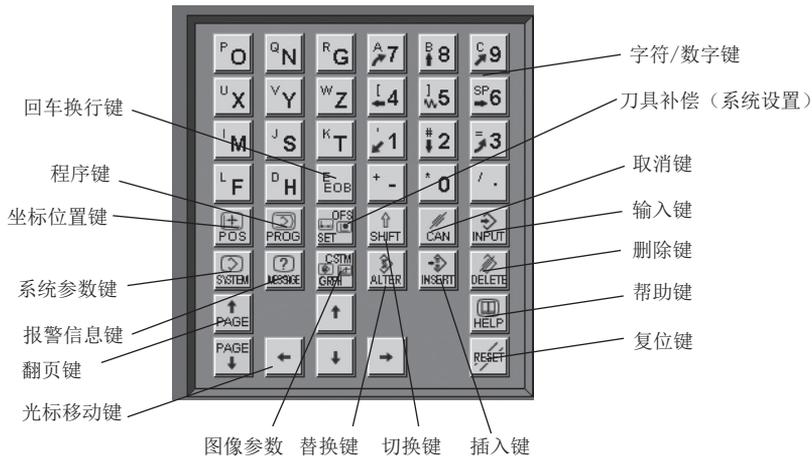


图 1-3 MDI 键盘

表 1-3 MDI 键盘中各按键的功能说明

按键	中文名	功能说明
RESET	复位键	按下此键, 复位 CNC (数控机床) 系统, 包括取消报警、主轴故障复位、中途退出自动操作循环和输入、输出过程等
INPUT	输入键	除程序编辑方式以外的情况, 当面板上按下一个字母或数字键以后, 必须按下此键才能输入 CNC 内
CURSOR	光标移动键	用于在 CRT 页面移动当前光标

续表

按键	中文名	功能说明	
PAGE	翻页键	用于 CRT 屏幕选择不同的页面	
POS	坐标位置键	在 CRT 上显示机床当前的坐标位置	
PROG	程序键	在编辑模式下，编辑和显示系统的程序；在 MDI 模式下，输入和显示 MDI 数据	
OFFSET/ SETTING	刀具补偿 (系统设置)	坐标系设置和刀具补偿参数设置	
DGNOS/ PRARM	自诊断参数键	设定和显示参数表及自诊表的内容	
MESSAGE	报警信息键	按下此键显示报警信息	
CUSTOM / GRAPH	图像参数	图像显示功能，用于显示加工轨迹	
SYSTEM	参数信息键	显示系统参数信息	
MESSAGE	错误信息键	显示系统错误信息	
ALTER	编辑 键	替换键	用输入域内的数据替代光标所在的数据
DELET		删除键	删除光标所在的数据
INSRT		插入键	将输入域之中的数据插入到当前光标之后的位置
CAN		取消键	取消输入域内的数据
EOB		回车换行键	结束一行程序的输入并且换行

(三) 控制键盘

控制键盘集中了系统的所有按钮，如图 1-4 所示。这些按钮用于直接控制机床的动作或加工过程，如启动、暂停零件程序的运行，手动进给坐标轴，调整进给速度等。按键功能说明如表 1-4 所示。

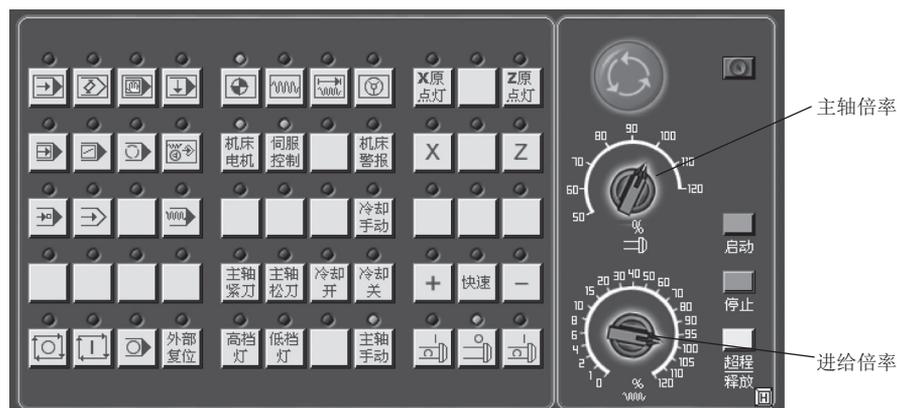


图 1-4 控制键盘

表 1-4 控制键盘主要按键功能说明

类别	图标	含义	功能说明
模式选择按键		自动运行模式 (AUTO)	按下此键, 机床进入自动加工模式
		编辑模式 (EDIT)	按下此键, 机床进入程序编辑状态
		MDI 模式 (MDI)	按下此键, 机床进入 MDI 模式, 手动输入并执行指令
		文件传输键	通过 RS232 接口把数控系统与计算机相连并传输文件
		回零模式 (REF)	按下此键, 机床进入回零模式
		手动进给模式 (JOG)	按下此键, 机床进入手动模式, 通过手动连续移动各轴
		增量进给模式 (INC)	按下此键, 机床进入手动脉冲控制模式
		手轮控制模式 (HANDL)	按下此键, 机床进入手轮控制模式
自动运行模式下的按键		单段执行键	按下此键, 运行程序时每次执行一条数控指令
		程序跳段键	按下此键, 程序运行时跳过符号“/”有效, 该行不执行
		选择停止键	按下此键, 程序中 M01 代码有效
		示教键	按下此键, 可进行示教
		机床锁定键	按下此键, 机床各轴被锁定
		空运行	按下此键, 各轴以固定的速度运动
加工控制键		进给保持键	数控程序在运行时, 按下此键, 程序停止执行; 再单击循环启动键, 程序从暂停位置开始执行
		循环启动键	按下此键, 程序开始运行, 仅在自动运行或 MDI 模式下有效
		循环停止键	数控程序在运行时, 按下此键, 程序停止执行; 再单击循环启动键, 程序从开头重新执行
主轴控制键		主轴正转键	手动模式下按下此键, 主轴正转
		主轴停转键	手动模式下按下此键, 主轴停转

类别	图标	含义	功能说明
主轴控制键		主轴反转键	手动模式下按下此键，主轴反转
		X方向键	手动模式下按下此键，机床将向X轴方向移动
		Y方向键	手动模式下按下此键，机床将向Y轴方向移动
		Z方向键	手动模式下按下此键，机床将向Z轴方向移动
		快速移动键	手动模式下，同时按住此键和一个坐标轴方向键，坐标轴以快速进给速度移动

五、机床坐标系

右手笛卡尔坐标系：在数控编程中，机床坐标系采用右手笛卡尔坐标系原则，如图 1-5 所示，右手拇指、食指和中指相互垂直，拇指指向 +X 方向，食指指向 +Y 方向，中指指向 +Z 方向。

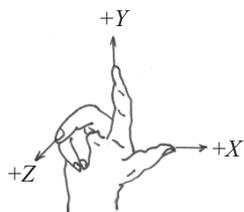


图 1-5 右手笛卡尔坐标系

机床坐标轴确定原则如下。

(1) 我们规定在数控机床上，不论是刀具运动还是工件运动，一律看作工件相对静止，刀具运动。

(2) 各坐标轴确定顺序为 Z、X、Y。

① 与机床主轴轴线平行的坐标轴为 Z 轴，正方向为刀具远离工件的方向。

② X 轴平行于工件的装夹平面且垂直于 Z 轴，正方向为刀具远离工件的方向。

③ 最后根据右手笛卡尔坐标系原则确定 Y 轴。

卧式数控车床机床坐标系如下。

(1) 前置刀架坐标系：刀架与操作者在同一侧，水平导轨的经济型数控车床常采用前置刀架坐标系，X 轴正方向指向操作者，如图 1-6 所示。

(2) 后置刀架坐标系：刀架与操作者不在同一侧，倾斜导轨的全功能型数控车床和车削中心常采用后置刀架坐标系，X 轴正方向背向操作者，如图 1-7 所示。

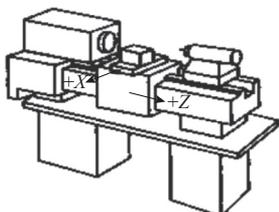


图 1-6 前置刀架坐标系



图 1-7 后置刀架坐标系

六、机床原点与机床参考点

(一) 机床原点

机床原点又称为机械原点，是机床坐标系的原点。该点是机床上一个固定的点，其位置是由机床设计单位和机床制造单位确定的，通常不允许用户改变。机床原点是工件坐标系和机床参考点的基准点，也是制造和调整机床的基础。其作用是使机床与控制系统同步，建立测量机床运动坐标的起始点。

数控车床的机床原点一般位于卡盘端面与主轴中心线的焦点上，或离卡爪端面一定距离处，或机床参考点处。数控铣床的机床原点一般设在各坐标轴的极限位置处，即各坐标轴的正向极限位置或负向极限位置。

(二) 机床参考点

机床参考点也是机床上一个固定的点，它与机床原点之间有一确定的相对位置，其位置由机械挡块确定。机床参考点已由机床制造厂测定后输入数控系统，并且记录在机床说明书中，用户不得更改。

我们在操作大多数数控机床上电时并不知道机床原点的位置，所以开机第一步总是先进行返回参考点（即所谓的机床回零）操作，使刀具或工作台退回到机床参考点。开机后先回参考点是为了建立机床坐标系，并确定机床坐标系原点的位置，即机床原点是通过机床参考点间接确定的。

当机床回零操作完成后，显示器即显示出机床参考点在机床坐标系中的坐标值，表明机床坐标系已自动建立。该坐标系一经建立，只要不断电，将永久保持不变。

机床参考点与机床原点的距离由系统参数设定，其值可以是零。如果其值为零，则表示机床参考点和机床原点重合，回零操作完成后，显示坐标值为(0,0,0)。也有些数控机床的机床原点与机床参考点不重合，则回零操作完成后显示的坐标值是系统中设定的距离值。

七、工件坐标系与工件原点

(一) 工件坐标系

机床坐标系的建立保证了刀具在机床上正确运动。但是，由于加工程序的编制通常是针对某一工件根据零件图样进行的，为便于编程，加工程序的坐标原点一般都与零件图样的尺寸基准相一致，因此，编程时还需要建立工件坐标系。

所谓工件坐标系，是由编程人员根据零件图样及加工工艺，以零件上某一固定点为原点建立的坐标系，又称为编程坐标系或工作坐标系。工件坐标系各坐标轴的方向与机床坐标系一致。

工件坐标系一般供编程使用，确定工件坐标系时不必考虑工件在机床上的实际装夹位置。工件坐标系一旦建立便一直有效，直到被新的工件坐标系取代。

(二) 工件原点

工件原点即工件坐标系的原点，其位置根据工件的特点人为设定，也称编程原点。工件坐标系的原点选择要尽量满足编程简单、尺寸换算少、引起的加工误差小等条件。

数控车床的工件原点一般选在工件右端面或左端面与主轴轴线的交点上。

在数控铣床上加工零件时，工件原点应选在零件的尺寸基准上，以便于坐标值的计算。对于对称零件一般以对称中心作为 XY 平面的工件原点；对于非对称零件，一般取进刀方向一侧零件外轮廓的某个垂直交角处作为工件原点，以便于计算坐标值； Z 轴方向的工件原点通常设在零件的上表面，并尽量选在精度较高的零件表面上，如图 1-8 所示。

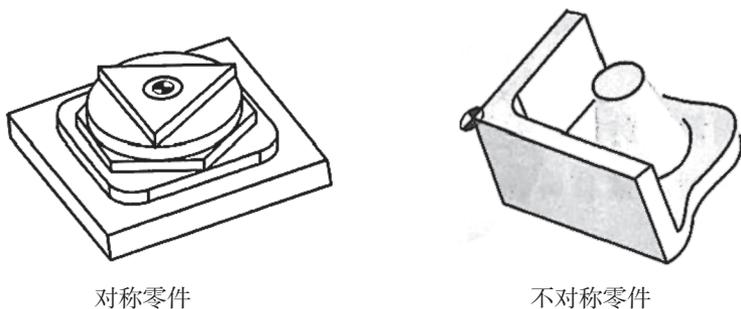


图 1-8 对称零件与不对称零件工件原点的选取

八、对刀

在加工前，首先应该确定工件原点在机床坐标系中的位置，即建立工件坐标系与机床坐标系之间的关系。工件原点的确定就是通过对刀操作完成的。对刀操作的过程如下。

(1) 刀具 Z 方向对刀。主轴正转，切换手动模式，移动刀具车削工件右端面，再按“+X”键退出刀具（刀具 Z 方向不能移动），按  键，再按“坐标系”软键，将光标移至 $G54$ 的 Z 轴数据，输入“ $Z0$ ”，按“测量”软键，完成 Z 轴对刀。

(2) 刀具 X 方向对刀。主轴正转，切换手动模式，移动刀具车削外圆（长 2~5 mm），切削厚度尽量小，再按“+Z”键退出刀具（刀具 X 方向不能移动）。停机测量车削后外圆直径，得到直径值。按  键，再按“坐标系”软键，将光标移至 $G54$ 的 X 轴数据，输入直径值，按“测量”软键，完成 X 轴对刀。

九、工件的装夹

(一) 定位基准的选择

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。对

于轴类零件，通常以零件自身的外圆柱面作为定位基准；对于套类零件，通常以内孔作为定位基准。

（二）常用车削夹具和装夹方法

在数控车床上装夹工件时，应使工件相对于车床主轴轴线有一个确定的位置，并且使工件在各种外力的作用下仍能保持其本来位置。数控车床常用装夹方法如表 1-5 所示。

表 1-5 数控车床常用装夹方法

序号	装夹方法	特点	适用范围
1	三爪卡盘	夹紧力较小，夹持工件时一般不需要找正，装夹速度较快	适用于装夹中小型圆柱形、正三角形或正六边形工件
2	四爪卡盘	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	适用于装夹形状不规则或大型的工件
3	两顶尖及鸡心夹头	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	适用于装夹轴类零件
4	一夹一顶	定位精度较高，装夹牢靠	适用于装夹轴类零件
5	中心架	配合三爪卡盘或四爪卡盘来装夹工件，可以防止工件弯曲变形	适用于装夹细长的轴类零件
6	心轴与弹簧卡头	以孔为定位基准，用心轴装夹工件来加工外表面，也可以以外圆为定位基准，采用弹簧卡头装夹工件来加工内表面，工件的位置精度较高	适用于装夹内、外表面的位置精度要求较高的套类零件

十、切削用量的选择

车削加工是通过切削运动和进给运动完成的，如图 1-9 所示。切削速度 V_c 的量实际上取决于工件材料的强度以及切削材料的耐磨强度和耐热强度。进给量 f 是刀具在工件旋转一周时前行的距离。粗加工时进给量大，精加工时进给量小。切削深度 a_p 可通过切削深度进给量进行调节。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、进给量或进给速度。切削用量在机床给定的允许范围内应按以下方法选取。

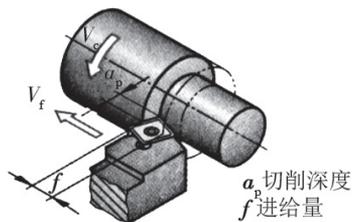


图 1-9 车削时的切削用量

（1）背吃刀量（切削深度） a_p 的确定：切削深度可由切削比例 $G = a_p/f$ 确定。但只在加入所使用刀具、切削方法、机床和待加工工件材料等具体内容后才能确定数值。当切削比例 $G = 2 : 1 \sim 10 : 1$ 时，才有利于切屑形成。切削材料专用切削比如表 1-6 所示。

表 1-6 切削材料专用切削比

切削材料	粗车	精车
硬质合金（焊接）	10 : 1	3 : 1
硬质合金（可转位刀片）	8 : 1	5 : 1
金属陶瓷	7 : 1	5 : 1
陶瓷	—	2 : 1

(2) 主轴转速 n 的确定:

$$n = \frac{1000V_c}{\pi \cdot d} \text{ (r/min)}$$

式中, V_c 为切削速度 (m/min), d 为零件待加工表面的直径 (mm)。

主轴转速的数值与工件直径及切削速度有关。在确定主轴转速时, 首先确定切削速度 V_c , 而切削速度 V_c 又与背吃刀量和进给量有关。车削加工时的切削速度如表 1-7 所示。

表 1-7 车削加工时的切削速度

零件材料	抗拉强度或硬度	刀具材料	粗加工时的切削速度 /m · min ⁻¹	精加工时的切削速度 /m · min ⁻¹
钢	350~400 Mpa	高速钢	40~50	60~75
		硬质合金	130~240	200~300
	430~500 Mpa	高速钢	30~35	50~70
		硬质合金	100~200	220~300
	600~700 Mpa	高速钢	22~28	30~40
		硬质合金	100~150	150~200
	700~850 Mpa	高速钢	18~24	35~40
		硬质合金	70~90	100~130
铸铁	140~190 HB	高速钢	18~25	30~35
		硬质合金	60~90	90~130
锡青铜	65~95 HB	高速钢	40~50	60~75
		硬质合金	250~300	300~400
	95~125 HB	高速钢	30~35	40~50
		硬质合金	150~200	220~300
铝	—	高速钢	150~200	200~250
		硬质合金	600~800	800~1000

(3) 进给量 f 的确定:

$$f = \sqrt{8 \cdot R_{th} \cdot r_e}$$

式中, R_{th} 为表面理论粗糙度 (mm), r_e 为车刀刀尖半径 (mm)。

除了用公式计算进给量, 也可以根据零件的表面粗糙度、刀具及工件材料等因素, 查阅切削用量表来选取进给量。需要说明的是, 切削用量表给出的是每转进给量。硬质合金车刀粗车外圆及端面的进给量如表 1-8 所示, 按表面粗糙度选择进给量的参考值如表 1-9 所示。

表 1-8 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 ($B \times H$) / (mm × mm)	工件直径 (d) / mm	背吃刀量 / mm				
			≤ 3	3~5	5~8	8~12	>12
			进给量 (f) / mm·r ⁻¹				
碳素结构钢、合金结构钢及耐热钢	16 × 25	20	0.3~0.4	0.3~0.4	0.3~0.5	0.4~0.5	—
		40	0.4~0.5				
		60	0.5~0.7	0.4~0.6	0.5~0.6		
		100	0.6~0.9	0.5~0.7	0.6~0.8		
		400	0.8~1.2	0.7~1.0			
	20 × 30 25 × 25	20	0.3~0.4	0.3~0.4	0.4~0.6	0.4~0.7	0.4~0.6
		40	0.4~0.5				
		60	0.5~0.7	0.5~0.7	0.5~0.7		
		100	0.8~1.0	0.7~0.9	0.8~1.0		
		400	1.2~1.4	1.0~1.2			
铸铁及铜合金	16 × 25	40	0.4~0.5	0.5~0.8	0.4~0.6	0.5~0.7	—
		60	0.5~0.8				
		100	0.8~1.2	0.7~1.0	0.6~0.8		
		400	1.0~1.4	1.0~1.2	0.8~1.0		
		20 × 30 25 × 25	40	0.4~0.5	0.5~0.8	0.4~0.7	
	60		0.5~0.9				
	100		0.9~1.3	0.8~1.2	0.7~1.0	0.9~1.1	
	400		1.2~1.8	1.2~1.6	1.0~1.3		

注意事项:

- ①加工断续表面及有冲击的工件时, 表内进给量应乘系数 $k = 0.7 \sim 0.8$;
- ②在无外皮加工时, 表内进给量应乘系数 $k = 1.1$;
- 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, 系数 $k = 0.8$; 当钢的硬度为 $57 \sim 62 \text{ HRC}$ 时, 系数 $k = 0.5$ 。

表 1-9 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)/ μm	切削速度范围 (V_c)/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	刀尖圆弧半径 (r_ϵ)/mm		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 (f)/ $\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$		
铸铁、青铜、铝合金	5~10	不限	0.25~0.40	0.40~0.50	0.50~0.60
	2.5~5		0.15~0.25	0.25~0.40	0.40~0.60
	1.25~2.5		0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.35
碳钢及合金钢	5~10	<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
	2.5~5	<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
	1.25~2.5	<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		

注意事项:

- ① $r_\epsilon = 0.5\text{ mm}$, 用于 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 以下刀杆。
- ② $r_\epsilon = 1.0\text{ mm}$, 用于 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 以下刀杆。
- ③ $r_\epsilon = 2.0\text{ mm}$, 用于 $30\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 及以上刀杆。

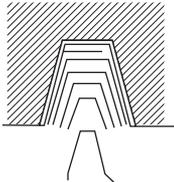
十一、螺纹加工

普通螺纹车削的进刀方法及进给次数如下:

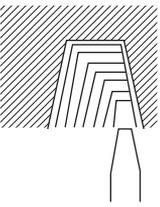
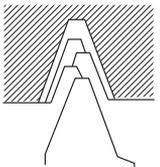
螺纹车刀属于成形车刀, 刀具切削面积大, 进给量大, 切削过程中切削力大, 不能一次加工完成, 需采用不同的进刀方法, 分多次进给切削。如果想提高螺纹表面质量, 可增加几次光整加工。

(1) 进刀方法。螺纹车削的进刀方法有直进法、斜进法、左右切削法。螺纹车削进刀方法如表 1-10 所示。

表 1-10 螺纹车削进刀方法

进刀方法	图示	特点及应用
直进法		切削力大, 易扎刀, 切削用量低, 牙型精度高, 适用于 $P < 3\text{ mm}$ 的普通螺纹的粗加工及 $P \geq 3\text{ mm}$ 的螺纹精加工。

续表

进刀方法	图示	特点及应用
斜进法		切削力小, 不易扎刀, 切削用量大, 牙型精度低, 表面粗糙度值大, 适用于 $P \geq 3 \text{ mm}$ 螺纹的粗加工
左右切削法		切削力小, 不易扎刀, 切削用量大, 牙型精度低, 表面粗糙度值小, 适用于 $P \geq 3 \text{ mm}$ 螺纹的粗、精加工

(2) 进给次数及背吃刀量的分配。车削常见螺距的螺纹时, 进给次数及背吃刀量的分配如表 1-11 所示。

表 1-11 常见螺距的螺纹切削进给次数及背吃刀量

单位: mm

普通螺纹 (牙深 $=0.6495P$, P 是螺纹螺距)								
螺距	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	
牙深	0.649	0.974	1.299	1.624	1.949	2.273	2.598	
进给次数和背吃刀量	1 次	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	1.5
	2 次	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8
	3 次	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	4 次		0.16	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6
	5 次			0.1	0.4	0.4	0.4	0.4
	6 次				0.15	0.4	0.4	0.4
	7 次					0.2	0.2	0.4
	8 次						0.15	0.3
	9 次							0.2

注: 表中的背吃刀量为直径值, 进给次数和背吃刀量根据工件材料及刀具的不同可酌情增减。

注意事项:

- ① 主轴转速使用 G97 控制, 不要使用 G96 控制, 以免产生乱牙;
- ② 车螺纹期间, 进给速度倍率、主轴速度倍率无效, 固定在 100%;
- ③ 车螺纹时, 为防止加工螺纹螺距不均匀, 车削螺纹前后, 必须设置升速段 L_1 和

降速段 L_2 ，如图 1-10 所示。

$$L_1 = n \times \frac{P}{400}$$

$$L_2 = n \times \frac{P}{1800}$$

式中， n 为主轴转速，单位为 r/min， P 为螺纹螺距。

L_1 和 L_2 是理论上所需的进刀量和退刀量，实际应用时取值可以比计算值略大。

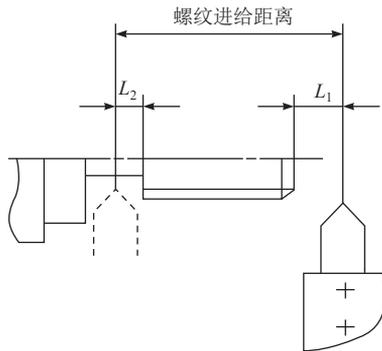


图 1-10 螺纹进给距离

④ 受机床结构和数控系统的影响，车螺纹时主轴的转速有一定的限制，因制造厂商而异。

(3) 车外螺纹各主要尺寸的计算如表 1-12 所示。

表 1-12 车外螺纹主要尺寸的计算

理论公式	经验公式	备注
$d_2 = d - 0.6495P$	$d_2 = d - 0.1P$	d 为公称直径； d_1 为外螺纹底径（小径）； d_2 为外螺纹中径； H 为牙深。 车螺纹时，通常采用经验公式
$d_1 = d - 1.0825P$	$d_1 = d - 1.3P$	
$H = 0.6495P$	$H = (d_2 - d_1) / 2$	

(4) 车螺纹时的主轴转速。主轴转速太低，易产生毛刺；主轴转速太高，挤压变形严重。一般情况下，用高速钢螺纹车刀切削时，主轴转速为 100~150 r/min；用硬质合金焊接式螺纹车刀、可转位式螺纹车刀切削时，主轴转速为 300~400 r/min。

(5) 螺纹切削注意事项。

① 螺纹切削时进给量大，切削力大，故工件和刀具装夹应牢固。

② 螺纹刀安装时，刀尖必须对准工件中心，必要时用样板对刀，以保证刀尖角平分线与工件的轴线垂直，螺纹牙型角不偏斜。

③ 螺纹加工时需多刀加工，为防止切削力过大损坏刀具，或者在切削过程中引起振颤，在导程小于 3 mm 时采用“直进法”加工，尽可能避免采用“斜进法”加工。

- ④ 为保证螺纹加工精度，应考虑螺纹加工的切入量和切出量。
- ⑤ 螺纹加工时需加冷却液进行冷却润滑。
- ⑥ 螺纹加工完毕，需用螺纹环规等进行检测。

十二、外圆柱面加工方案

根据毛坯的制造精度和工件的加工要求，外圆柱面车削一般可分为粗车、半精车、精车、精细车。粗车的目的是切去毛坯硬皮和大部分余量。加工后工件尺寸精度为 IT11~IT13 级，表面粗糙度 $Ra12.5\sim 50\ \mu\text{m}$ 。半精车的尺寸精度可达 IT8~IT10 级，表面粗糙度 $Ra3.2\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 。半精车可作为中等精度表面的终加工，也可作为磨削或精加工的预加工。精车后的尺寸精度可达 IT7~IT8 级，表面粗糙度 $Ra0.8\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 。精细车后的尺寸精度可达 IT6~IT7 级，表面粗糙度 $Ra0.025\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 。精细车尤其适合于有色金属加工，有色金属一般不宜采用磨削，所以常用精细车代替磨削。

因此，可选择以下加工方案。

(1) 加工精度为 IT8~IT10 级、 $Ra3.2\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 的除淬火钢以外的常用金属，可采用普通型数控车床，按粗车、半精车的方案加工。

(2) 加工精度为 IT7~IT8 级、 $Ra0.8\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 的除淬火钢以外的常用金属，可采用普通型数控车床，按粗车、半精车、精车的方案加工。

(3) 加工精度为 IT6~IT7 级、 $Ra0.025\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 的除淬火钢以外的常用金属，可采用精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、精细车的方案加工。

(4) 加工精度高于 IT5 级、 $Ra < 0.08\ \mu\text{m}$ 的除淬火钢以外的常用金属，可采用高档精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、精细车的方案加工。

(5) 对淬火钢等难车削材料，其淬火前可采用粗车、半精车的方法，淬火后安排磨削加工；对最终工序有必要用数控车削方法加工的难切削材料，可参考有关难加工材料的数控车削方法进行加工。

轴类工件的加工方法如下。

(1) 车短小的工件时，一般先车某一端面，以便于确定长度方向的尺寸；车铸锻件时，最好先适当倒角后再车削，以免刀尖轻易碰到型砂和硬皮而使车刀损坏。

(2) 轴类工件的定位基准通常选用中心孔。加工中心孔时，应先车端面后钻中心孔，以保证中心孔的加工精度。

(3) 工件车削后还需磨削时，只需粗车或半精车，注意留磨削余量。

十三、孔加工方案

内孔有不同的精度和表面质量要求，也有不同的结构尺寸，如通孔、盲孔、阶梯孔、深孔、浅孔、大直径孔、小直径孔等。常用的孔加工有钻孔、扩孔、铰孔、镗孔、拉孔、磨孔、研磨孔、珩磨孔、滚压孔等（本书对磨孔、研磨孔、珩磨孔和滚压孔不做讲解）。

（一）钻孔

用钻头在工件实体部位加工孔称为钻孔。钻孔属粗加工，可达到的尺寸公差等级为 IT11~IT12 级，表面粗糙度为 $Ra12.5\ \mu\text{m}$ 。钻孔的工艺特点：钻头容易偏斜，孔径容易扩大，孔的表面质量较差，钻削时轴向力大。因此，当钻孔直径 $d > 30\ \text{mm}$ 时，一般分两次进行钻削。第一次钻出 $(0.5\sim 0.7)d$ 的孔径，第二次钻到所需的孔径。

（二）扩孔

扩孔是用扩孔钻对已钻出的孔做进一步加工，以扩大孔径并提高精度和降低表面粗糙度。扩孔可达到的尺寸公差等级为 IT10~IT11 级，表面粗糙度为 $Ra6.3\sim 12.5\ \mu\text{m}$ ，属于孔的半精加工方法，常作为铰削前的预加工，也可作为精度不高的孔的终加工。扩孔与钻孔相比有以下特点：刚性较好，导向性好，排屑条件较好。

（三）铰孔

铰孔是对未淬硬孔进行精加工的一种方法。铰孔的尺寸公差等级可达 IT6~IT9 级，表面粗糙度可达 $Ra0.1\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 。铰孔的方式有机铰和手铰两种。铰削的余量很小，一般粗铰余量为 $0.15\sim 0.25\ \text{mm}$ ，精铰余量为 $0.05\sim 0.15\ \text{mm}$ 。铰削应采用低切削速度，以免产生积屑瘤和引起振动，一般粗铰 $V_c = 4\sim 10\ \text{m/min}$ ，精铰 $V_c = 1.5\sim 5\ \text{m/min}$ 。机铰的进给量可比钻孔时高 3~4 倍，一般可取 $0.5\sim 1.5\ \text{mm/r}$ 。

（四）镗孔

镗孔是一种很经济的孔加工方法，一般广泛应用于单件、小批量生产中。生产中的非标准孔、大直径孔、精确的短孔、不通孔和有色金属孔等，一般多采用镗孔。镗孔既可以作为粗加工，也可以作为精加工；镗孔是修正孔中心线偏斜的有效方法，也有利于保证孔的坐标位置。镗孔的尺寸精度一般可达 IT6~IT9 级，表面粗糙度为 $Ra0.4\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 。

（五）拉孔

拉孔是一种高效率的精加工方法。除拉削圆孔外，还可拉削各种截面形状的通孔及内键槽。拉削圆孔可达的尺寸公差等级为 IT7~IT9 级，表面粗糙度为 $Ra0.4\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 。

十四、套类工件加工方案

（1）一般把轴套、衬套等零件称为套类零件。为了与轴类工件相配合，套类工件上一般有加工精度要求较高的内轮廓，尺寸精度为 IT7~IT8 级，表面粗糙度要求达到 $Ra0.4\sim 3.2\ \mu\text{m}$ 。

（2）内轮廓加工刀具受到孔径和孔深的限制，刀杆细而长，刚性差。因此对于切削用量的选择，如进给量和背吃刀量的选择较切削外轮廓时的稍小。

（3）内轮廓切削时切削液不易进入切削区域，切屑不易排出，切削温度可能会较高，因此镗深孔时可以采用工艺性退刀，以促进切屑排出。

(4) 内轮廓加工工艺常采用钻—粗镗—精镗，孔径较小时也可采用手动方式或 MDI (手动输入模式) 方式“钻—铰”加工。

(5) 大锥度锥孔表面加工可采用固定循环编程或子程序编程，一般直孔和小锥度锥孔采用钻孔后镗削。

(6) 工件精度要求较高时，按粗、精加工交替进行内、外轮廓切削，以保证形位精度。

十五、切槽加工方案

(一) 槽类工件的加工方法

(1) 车槽的刀具，其主切削刃应安装在与车床主轴轴线平行且等高的位置上，过高过低都不利于切削。

(2) 切削过程出现切削平面呈凸形、凹形和因切断刀主切削刃磨损及“扎刀”等情况，要注意调整车床主轴转速和进给量。

(3) 对外圆切槽加工，如果槽宽比槽深小，宜采用多步切槽的方法。对内沟槽加工，与外圆切槽的方法相似，以确保排屑通畅和振动最小。切削时从底部开始向外进行切削有利于排屑。

(二) 外沟槽的车削方法

车削外沟槽时，主要有以下几种情况。切窄直槽的进、退刀方法与切断工件的进、退刀方法相同，采用一次进给切入、切出 (见图 1-11)。切宽直槽的进刀方法：用切槽刀沿纵向多次粗车，槽侧和槽底留精车余量，最后精车槽侧和槽底 (见图 1-12)。切 V (梯) 形槽时，V 形槽根据槽尺寸大小采用成形槽刀直进法、左右切削法切削。当 V 形槽尺寸较小时，用 V 形槽刀直进法。V 形槽也可用直槽刀分 3 次切削完成，第一刀车直槽，第二刀车右侧 V 形部分，第三刀车左侧 V 形部分 (见图 1-13)。

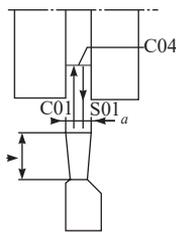


图 1-11 窄槽进、退刀方式

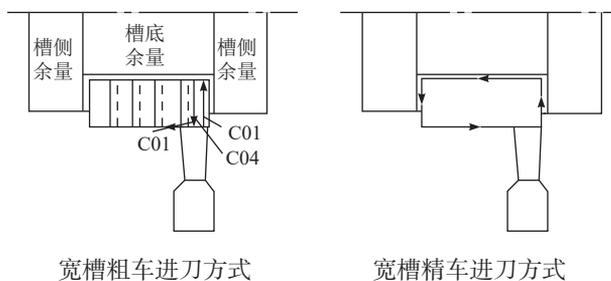
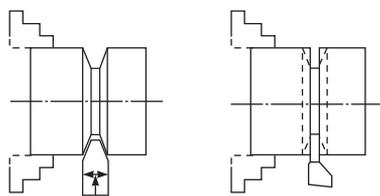


图 1-12 宽槽进刀方式



V 形槽刀 1 次直进方式 直槽刀分 3 次进刀切削方式

图 1-13 V(梯)形槽进刀方式

（三）内沟槽的车削方法

车削内沟槽时，刀杆直径受孔径和槽深的限制，排屑特别困难，断屑首先要从沟槽内出来，然后再从内孔排出，切屑的排出要经过 90° 的转弯。因此车削宽度较小和要求不高的内沟槽时，可用主切削刃宽度等于槽宽的内沟槽刀采用直进法一次车出；要求较高或较宽的内沟槽，可采用直进法分几次车出。粗车时，槽壁与槽底留精车余量，然后根据槽宽、槽深进行精车；若内沟槽深度较浅，宽度很大，可用内圆粗车刀先车出凹槽，再用内沟槽刀车沟槽两端垂直面。

1. 切削用量的选择

（1）背吃刀量。当横向切削时，切槽刀的背吃刀量等于刀的主切削刃宽度，所以只需确定切削速度和进给量。

（2）进给量 f 。由于刀具刚性、强度及散热条件较差，所以应适当减小进给量。进给量太大时，容易使刀具折断；进给量太小时，刀具与工件产生强烈摩擦会引起振动。一般当用高速钢切槽刀车钢料时， $f=0.05\sim 0.1\text{ mm/r}$ ；当用高速钢切槽刀车铸铁时， $f=0.1\sim 0.2\text{ mm/r}$ ；当用硬质合金刀加工钢料时， $f=0.1\sim 0.2\text{ mm/r}$ ；当用硬质合金刀加工铸铁料时， $f=0.15\sim 0.25\text{ mm/r}$ 。

（3）切削速度 V_c 。切断时的实际切削速度随刀具的切入越来越低，因此，切断时切削速度可选得高一些。用高速钢切削钢料时， $V_c=30\sim 40\text{ m/min}$ ；用高速钢加工铸铁时， $V_c=15\sim 25\text{ m/min}$ 。用硬质合金切削钢料时， $V_c=80\sim 120\text{ m/min}$ ；用硬质合金刀加工铸铁时， $V_c=60\sim 100\text{ m/min}$ 。

2. 刀头与槽深尺寸选择

刀头长度与槽的深度有关： $L=h+(2\sim 3)\text{ mm}$ 。其中： L 为刀头长度， h 为切入深度。

刀头宽度计算公式： $a=(0.5\sim 0.6)d$ 。其中： a 为刀头宽度， d 为待加工表面直径。加工槽宽小于 5 mm 的槽，刀头宽度取槽宽尺寸。

知识二 数控车床刀具知识

一、刀具材料

（一）切削刀具材料必备特性

为使切削刀具具有尽可能大的耐用度，它必须具备下列特性。

（1）耐热硬度高，即刀具的切削刃即使在高温下仍能保持足够高的硬度，以它能够切入工件材料。

（2）耐磨强度高，即对机械磨耗以及化学和物理影响因素具有高耐受能力。

（3）热疲劳强度高，即便工作温度剧烈变化，刀具也不会出现裂纹。