

立体化教材使用指南（扫描过程中禁止移动）



打开扫码

扫描书中二维码

播放视频



「十四五」职业教育国家规划教材



“十四五”职业教育国家规划教材

数控加工技术

SHUKONG JIAGONG JISHU

赵军华 肖 龙 主编

数控加工技术

赵军华 肖 龙 主编

策划编辑 孙 彤
责任编辑 卢正阳
责任校对 牛燕春
封面设计 张 伟
责任印制 朱 飞



ISBN 978-7-5349-9587-3



9 787534 995873 >

定价：52.00 元

河南科学技术出版社

中原出版传媒集团
中原传媒股份公司

河南科学技术出版社





“十四五”职业教育国家规划教材

数控加工技术

赵军华 肖 龙 主编

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

数控加工技术 / 赵军华, 肖龙主编. — 郑州: 河南科学技术出版社, 2021.9 (2023.5 重印)

ISBN 978-7-5349-9587-3

I. ①数… II. ①赵…②肖… III. ①数控机床—加工—高等职业教育—教材 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 109473 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市郑东新区祥盛街 27 号 邮编: 450016

电话: (0371) 65788859 65788639

网址: www.hnstp.cn

策划编辑: 孙 彤

责任编辑: 卢正阳

责任校对: 牛艳春

封面设计: 张 伟

责任印制: 朱 飞

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 787mm×1 092mm 1/16 印张: 21.5 字数: 544 千字

版 次: 2021 年 9 月第 1 版 2023 年 5 月第 4 次印刷

定 价: 52.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

编委名单

主 编 赵军华 肖 龙

副主编 冯金广 刘世平 董 延 谢 芳

编 者 李太祥 张新军 童建伟 程改兰

张存鹰 李智明

河南科学技术出版社

河南科学技术出版社

《数控加工技术》是结合数控技术专业人才培养目标和职业岗位要求,根据高职高专数控技术专业课程标准,并参照国家职业标准《数控车工》《数控铣工》《加工中心》的理论知识要求和技能要求编写的。

本书是以“工学结合”为切入点,通过企业项目转化来的典型工作任务规划教材内容,开发符合我国制造业实际生产过程的项目,培养学生的爱国情怀和民族使命感;教材内容采用标准化图纸、规范化程序代码,培养学生严谨的学习态度以及实事求是的工作作风;内容组织适合小组合作完成,共同讨论最佳加工方案,锻炼学生的沟通能力,培养团队意识;通过练习与提高部分,融入新技术、新工艺,创新方案制订,培养学生善思、明辨、笃行、精益求精的工匠精神,形成创新创造能力。每个任务包括任务描述及目标、任务资讯、任务实施、任务评价与总结提高四个基本部分。通过一体化教学,培养学生的专业能力、方法能力以及社会能力。

本书编委会借鉴德国“双元制”先进职业教育理念,对传统学科型教材进行整合,淡化学科体系,以工作过程为导向,达到“教—学—做”一体化。在任务选取上,通过资讯、决策、计划、实施、检查及评估六步法,选择企业中普遍应用或较先进的课题,确定适合教学应用的任务内容。任务实施过程中注重安全意识,保护设备,培育学生管理意识及节约资源的习惯;教材中融入了动画、视频等融媒体技术,学生可利用网络、电子手册等查阅资料,培养学生适应数字化时代的工具应用能力。

本书在内容上力求做到理论与实际相结合,体例设置循序渐进,由简单到复杂,图文并茂,通俗易懂,资源丰富,实用性强。全书共14个任务:任务1 数控车削加工工艺制定;任务2 典型零件的数学处理;任务3 简单零件的数控车削编程;任务4 复杂零件的数控车削编程;任务5 非圆曲线变量编程;任务6 简单轴类零件的数控车削加工;任务7 复杂零件的数控车削加工;任务8 配合零件的数控车削加工;任务9 数控铣削加工工艺制定;任务10 简单零件的数控铣削编程;任务11 复杂零件的数控铣削编程;任务12 简单零件的数控铣削加工;任务13 复杂零件的数控铣削加工;任务14 配合零件的数控铣削加工。

本书由河南职业技术学院赵军华、肖龙任主编,冯金广、刘世平、董延、谢芳为副主编。任务1由河南职业技术学院肖龙编写;任务2、11由河南职业技术学院冯金广编写;任务3由河南职业技术学院赵军华编写;任务4由郑州煤矿机械集团股份有限公司李智明编写;任务5、8由河南职业技术学院董延编写;任务6由河南职业技术学院刘世平编写;任务7由河南职业技术学院张新军编写;任务9由河南职业技术学院谢芳、张存鹰

编写；任务10由郑州信息科技职业学院程改兰编写；任务12由河南职业技术学院李太祥、童建伟编写；任务13由河南职业技术学院李太祥编写；任务14由河南职业技术学院谢芳编写。全书由赵军华统稿。

在本书的编写过程中，郑州煤矿机械集团股份有限公司、安阳鑫盛机床股份有限公司、郑州日新精工有限公司给予了大力支持，在此一并深表谢意。同时对有关参考资料、参考文献的作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限，对书中的疏漏、错误之处，恳请读者批评指正。

主 编

2018年5月

河南科学技术出版社

任务1 数控车削加工工艺制定	(1)
1.1 任务描述及目标	(1)
1.2 任务资讯	(1)
1.3 任务实施	(23)
1.4 任务评价与总结提高	(29)
任务2 典型零件的数学处理	(32)
2.1 任务描述及目标	(32)
2.2 任务资讯	(32)
2.3 任务实施	(38)
2.4 任务评价与总结提高	(44)
任务3 简单零件的数控车削编程	(47)
3.1 任务描述及目标	(47)
3.2 任务资讯	(47)
3.3 任务实施	(75)
3.4 任务评价与总结提高	(81)
任务4 复杂零件的数控车削编程	(85)
4.1 任务描述及目标	(85)
4.2 任务资讯	(85)
4.3 任务实施	(90)
4.4 任务评价与总结提高	(92)
任务5 非圆曲线变量编程	(96)
5.1 任务描述及目标	(96)
5.2 任务资讯	(97)
5.3 任务实施	(101)
5.4 任务评价与总结提高	(106)
任务6 简单轴类零件的数控车削加工	(110)
6.1 任务描述及目标	(110)
6.2 任务资讯	(110)
6.3 任务实施	(128)

6.4	任务评价与总结提高	(135)
任务7	复杂零件的数控车削加工	(140)
7.1	任务描述及目标	(140)
7.2	任务资讯	(141)
7.3	任务实施	(149)
7.4	任务评价与总结提高	(154)
任务8	配合零件的数控车削加工	(159)
8.1	任务描述及目标	(159)
8.2	任务资讯	(160)
8.3	任务实施	(163)
8.4	任务评价与总结提高	(170)
任务9	数控铣削加工工艺制定	(177)
9.1	任务描述及目标	(177)
9.2	任务资讯	(177)
9.3	任务实施	(185)
9.4	任务评价与总结提高	(191)
任务10	简单零件的数控铣削编程	(195)
10.1	任务描述及目标	(195)
10.2	任务资讯	(195)
10.3	任务实施	(213)
10.4	任务评价与总结提高	(214)
任务11	复杂零件的数控铣削编程	(218)
11.1	任务描述及目标	(218)
11.2	任务资讯	(218)
11.3	任务实施	(246)
11.4	任务评价与总结提高	(254)
任务12	简单零件的数控铣削加工	(260)
12.1	任务描述及目标	(260)
12.2	任务资讯	(260)
12.3	任务实施	(269)
12.4	任务评价与总结提高	(278)
任务13	复杂零件的数控铣削加工	(283)
13.1	任务描述及目标	(283)

13.2 任务资讯·····	(283)
13.3 任务实施·····	(286)
13.4 任务评价与总结提高·····	(296)
任务14 配合零件的数控铣削加工 ·····	(301)
14.1 任务描述及目标·····	(301)
14.2 任务资讯·····	(303)
14.3 任务实施·····	(306)
14.4 任务评价与总结提高·····	(323)
参考文献 ·····	(329)

河南科学技术出版社

河南科学技术出版社

任务1 数控车削加工工艺制定

1.1 任务描述及目标

当前我国制造业处于全球工业制造前列，拥有全球门类最为齐全的工业制造体系，经济高速发展使制造业从中国制造向中国智造迈进，提出了坚持科技是第一生产力的要求。数控机床是一种装有程序控制系统的自动化设备，较好地解决了复杂、精密、批量、多品种的零件加工问题，是我们亟待掌握的重要技能。

数控车床是数控机床中应用最为广泛的一种机床。数控车床在结构及其加工工艺上都与普通车床相似，但数控车床是由电子计算机数字信号控制的机床，所以在工艺特点上与普通车床有所不同。数控车削加工工艺是以普通车削加工工艺为基础，结合数控车床的特点，综合运用多方面的知识解决数控车削加工过程中面临的工艺问题。

学生通过学习本任务内容，能够分析零件图纸，确定工序、装夹方式，确定各表面的加工顺序、刀具的进给路线以及刀具、夹具和切削用量的选择等。

1.2 任务资讯

1.2.1 数控车削的概述

1. 数控车床的主要加工对象

数控车削是数控加工中用得最多的加工方法之一。由于数控车床具有加工精度高、具有直线和圆弧插补功能以及在加工过程中能自动变速等特点，因此其加工范围比普通车床更广。凡是能在数控车床上装夹的回转体零件都能在数控车床上加工。

与普通车床相比，数控车床比较适合车削具有以下要求和特点的回转体零件。

(1) 精度要求高的零件。零件的精度要求主要指尺寸、形状、位置和表面等精度要求，其中的表面精度主要指表面粗糙度。由于数控车床刚性好，制造和对刀精度高，并能方便、精确地进行人工补偿和自动补偿，所以能加工尺寸精度要求较高的零件。另外，数控车床的运动是通过高精度插补运算和伺服驱动来实现的，所以它能加工直线度、圆度、圆柱度等形状精度要求高的零件。由于数控车床一次装夹能完成加工的内容较多，所以它能有效提高零件的位置精度，并且加工质量稳定。一般数控车床的加工精度可达 0.001 mm ，表面粗糙度 Ra 可达 $0.16\ \mu\text{m}$ （精密数控车床可达 $0.02\ \mu\text{m}$ ）。

(2) 表面粗糙度值小的零件。数控车床具有恒线速度切削功能，可选用最佳线速度来切削锥面、球面和端面等，加工出表面粗糙度不但小而且又一致，适合车削各部位表面粗

精度要求不同的零件。

(3) 表面轮廓形状复杂的零件。由于数控车床具有直线和圆弧插补功能而且部分数控车床还有某些非圆弧曲线插补功能，所以它可以车削由任意直线和各类平面曲线组成的形状复杂的回转体零件，包括通过拟合计算处理后的和不能用方程式描述的列表曲线。如图 1-1 所示的壳体零件封闭内腔的成型面，在普通车床上是无法加工的，而在数控车床上则很容易加工出来。

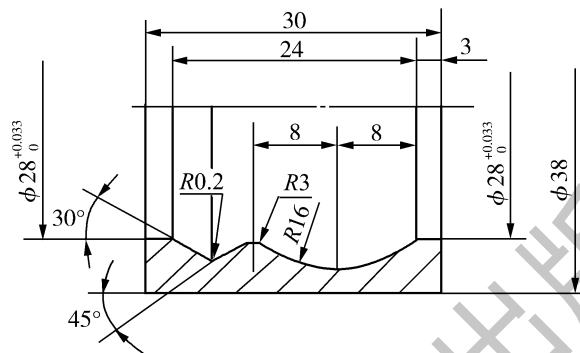


图 1-1 成型内腔零件示意图 (单位: mm)

(4) 带特殊螺纹的零件。数控车床具有加工各类螺纹的功能，包括任何等导程的直面、锥面和端面螺纹，增导程、减导程以及要求等导程与变导程之间平滑过渡的螺纹。通常在主轴箱内安装有脉冲编码器，主轴的运动通过同步带 1:1 地传到脉冲编码器。采用伺服电动机驱动主轴旋转，当主轴旋转时，脉冲编码器便向数控系统发出检测脉冲信号，使主轴电动机的旋转与刀架的切削进给保持同步关系，即实现加工螺纹时主轴转一周，刀架 Z 向移动工件一个导程的运动关系。数控车削出来的螺纹精度高，表面粗糙度值小。

2. 数控车削加工的主要内容

根据数控车床的工艺特点，数控车削加工主要有以下加工内容。

(1) 车削外圆。车削外圆是最常见、最基本的车削方法，工件外圆一般由圆柱面、圆锥面、圆弧面及回转槽等基本组成。图 1-2 所示为使用各种不同的车刀车削中小型零件外圆（包括车外回转槽）的方法。其中左偏刀主要用于从左向右进给，车削右边有直角轴肩的外圆以及右偏刀无法车削的外圆，如图 1-2 (c) 所示。

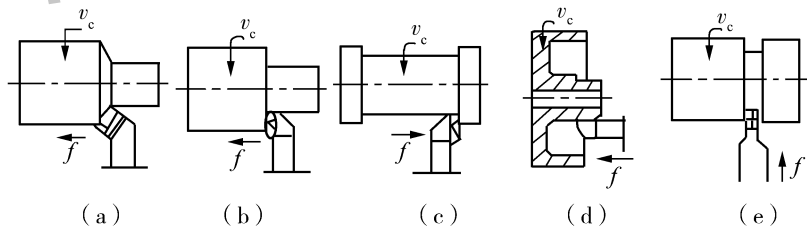


图 1-2 车削外圆示意图

- (a) 45°车刀车削外圆；(b) 90°右偏刀车削外圆；(c) 左偏刀车削外圆；
(d) 加工工件内部的外圆柱面；(e) 加工外沟槽

(2) 车削内孔。车削内孔是指用车削方法扩大工件的孔或加工空心工件的内表面，是常用的车削加工方法之一。常见的车孔方法如图 1-3 所示。在车削盲孔和台阶孔时，车刀要先纵向进给，当车到孔的根部时再横向进给车端面或台阶端面，如图 1-3 (b)、(c) 所示。

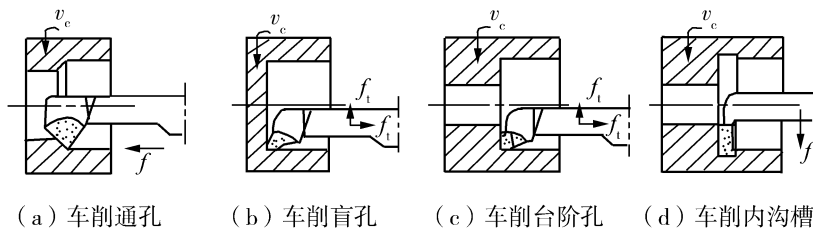


图 1-3 车削内孔示意图

(3) 车削端面。车削端面包括台阶端面的车削，常见的方法如图 1-4 所示。图 1-4 (a) 所示是使用 45° 偏刀车削端面，可采用较大背吃刀量，切削顺利，表面光洁，而且大、小端面均可车削；图 1-4 (b) 所示是使用 90° 右偏刀从外向工件中心进给车削端面，适用于加工尺寸较小的端面或一般的台阶端面；图 1-4 (c) 所示是使用 90° 右偏刀从工件中心向外进给车削端面，适用于加工工件中心带孔的端面或一般的台阶端面；图 1-4 (d) 所示是使用左偏刀车削端面，刀头强度较高，适宜车削较大端面，尤其是铸锻件的大端面。

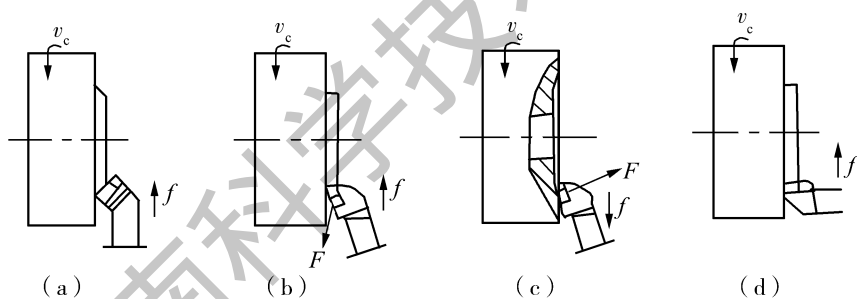


图 1-4 车削端面示意图

- (a) 45° 车刀车削端面；(b) 右偏刀车削端面（由外向中心进刀）；
(c) 右偏刀车削外圆（由中心向外进刀）；(d) 左偏刀车削端面

(4) 车削螺纹。车削螺纹是数控车床的特点之一。在普通车床上一般只能加工少量的等螺距螺纹，而在数控车床上，只要通过调整螺纹加工程序，指出螺纹终点坐标值及螺纹导程，即可车削各种不同螺距的圆柱螺纹、锥螺纹或端面螺纹等。螺纹的车削可以通过单刀切削的方式进行，也可进行循环切削。

1.2.2 数控车削工艺分析

工艺分析是数控车削加工的前期工艺准备工作。工艺制定得合理与否，对程序编制、机床的加工效率和零件的加工精度等都有重要影响。因此，编制加工程序前，应遵循一般的工艺原则并结合数控车床的特点，认真而详细地考虑零件图的工艺分析，确定工件在数控车床上的装夹，刀具、夹具和切削用量的选择等。制定车削加工工艺之前，必须首先对

被加工零件的图样进行分析，它主要包括以下内容。

1. 结构工艺性分析

零件的结构工艺性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型。在数控车床上加工零件时，应根据数控车削的特点，认真审视零件结构的合理性。例如图 1-5 (a) 所示零件，需用三把不同宽度的切槽刀切槽，如无特殊需要，显然是不合理的；若改成图 1-5 (b) 所示结构，只需一把刀即可切出三个槽。这样既减少了刀具数量，少占刀架刀位，又节省了换刀时间。

在结构分析时若发现问题，应向设计人员或有关部门提出修改意见。

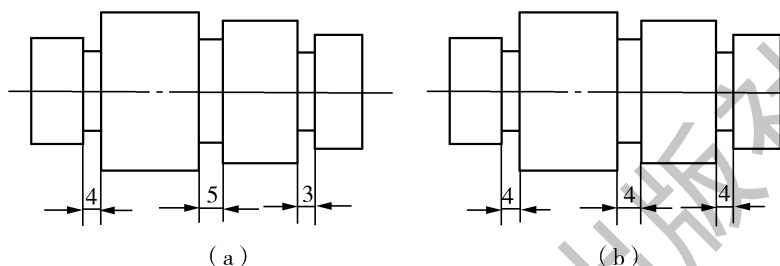


图 1-5 结构工艺性示例

2. 构成零件轮廓的几何要素

由于设计等各种原因，在图纸上可能出现加工轮廓的数据不充分、尺寸模糊不清及尺寸封闭等缺陷，从而增加编程的难度，有时甚至无法编写程序，如图 1-6 所示。

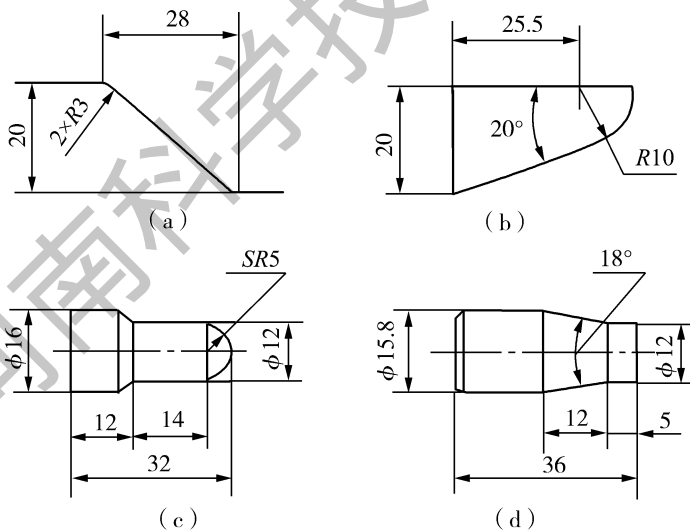


图 1-6 几何要素缺陷示意图

在图 1-6 (a) 中，圆弧的圆心位置是不确定的，不同的理解将得到完全不同的结果。在如图 1-6 (b) 中，圆弧与斜线的关系要求为相切，但经计算后的结果却为相交割关系，而非相切。这些问题由于图样上的图线位置模糊或尺寸标注不清，导致编程工作无从下手。在图 1-6 (c) 中，标注的各段长度之和不等于其总长，而且漏掉了倒角尺寸。在图 1-6 (d) 中，圆锥体的各尺寸已经构成封闭尺寸链。这些问题都给编程计算造成困难，甚至产生不必要的误差。

当发生以上缺陷时，应向图样的设计人员或技术管理人员及时反映，解决后方可进行程序的编制工作。

3. 尺寸公差要求

在确定控制零件尺寸精度的加工工艺时，必须分析零件图样上的公差要求，从而正确选择刀具及确定切削用量等。

在尺寸公差要求的分析过程中，还可以同时进行一些编程尺寸的简单换算，如中值尺寸及尺寸链的换算等。在数控编程时，常常对零件要求的尺寸取其最大和最小极限尺寸的平均值（即“中值”）作为编程的尺寸依据。

4. 形状和位置公差要求

图样上给定的形状和位置公差是保证零件精度的重要要求。在工艺准备过程中，除了按其要求确定零件的定位基准和检测基准，并满足其设计基准的规定外，还可以根据机床的特殊需要进行一些技术性处理，以便有效地控制其形状和位置误差。

5. 表面粗糙度要求

表面粗糙度是保证零件表面微观精度的重要要求，也是合理选择机床、刀具及确定切削用量的重要依据。

6. 材料要求

图样上给出的零件毛坯材料及热处理要求，是选择刀具（材料、几何参数及使用寿命），确定加工工序、切削用量及选择机床的重要依据。

7. 加工数量

零件的加工数量对工件的装夹与定位、刀具的选择、工序的安排及走刀路线的确定等都是不可忽视的参数。

1.2.3 工艺装备及夹具的设计和选择

1. 车床夹具的定义和分类

在车床上用来装夹工件的装置称为车床夹具。车床夹具可分为通用夹具和专用夹具两大类。通用夹具是指能够装夹两种或两种以上工件的同一夹具，如车床上的三爪卡盘、四爪卡盘、弹簧卡套和通用心轴等；专用夹具是专门为加工某一特定工件的某一工序而设计的夹具。

如按夹具元件组合特点划分，可分为不能重新组合的夹具和能够重新组合的夹具，后者称为组合夹具。

数控车床通用夹具与普通车床相同。夹具的作用是装夹被加工工件以完成加工过程，同时要保证被加工工件的定位精度，并使装卸尽可能方便快捷。

选择夹具时通常先考虑选用通用夹具，这样可避免制造专用夹具。

专用夹具是针对通用夹具无法装夹的某一工件或工序而设计的。

2. 圆周定位夹具

在车床加工中，大多数情况是使用工件或毛坯的外圆定位。

(1) 三爪卡盘。三爪卡盘如图 1-7 所示，

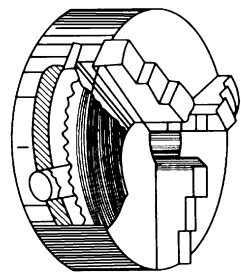


图 1-7 三爪卡盘示意图



是最常用的车床通用夹具，三爪卡盘最大的优点是可以自动定心，夹持范围大，但定心精度存在误差，不适于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。数控车床经常采用液压卡盘，液压卡盘特别适用于批量加工。

(2) 软爪。由于三爪卡盘定心精度不高，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夹爪。通常，三爪卡盘为保证刚度和耐磨性，要进行热处理，硬度较高，很难用常用刀具切削。软爪是在使用前配合被加工工件特别制造的，加工软爪时要注意以下几方面的问题。

1) 软爪要在与使用时相同的夹紧状态下加工，以免在加工过程中松动和由于反向间隙而引起定心误差。加工软爪内定位表面时，要在软爪尾部夹紧一适合的棒料，以消除卡盘端面螺纹的间隙，如图 1-8 所示。

2) 当被加工件以外圆定位时，软爪内圆直径应与工件外圆直径相同，略小更好，如图 1-9 所示，其目的是消除夹盘的定位间隙，增加软爪与工件的接触面积。软爪内径大于工件外径会导致软爪与工件形成三点接触，如图 1-10 所示，此种情况接触面积小，夹紧牢固程度差，应尽量避免。软爪内径过小，如图 1-11 所示，会形成六点接触，一方面会在被加工表面留下压痕，同时也使软爪接触面变形。

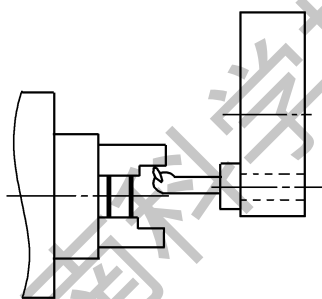


图 1-8 加工软爪

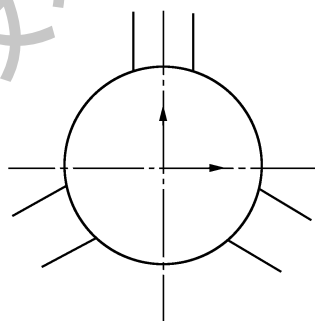


图 1-9 理想的软爪内径

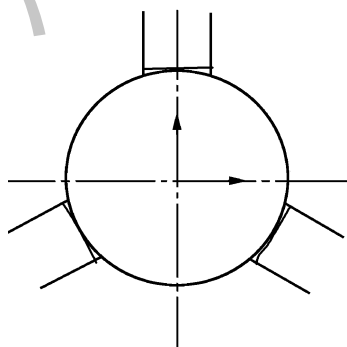


图 1-10 软爪内径过大

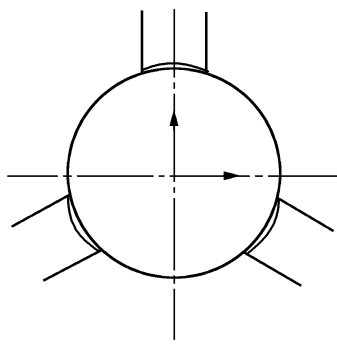


图 1-11 软爪内径过小

软爪也有机械式和液压式两种。软爪常用于加工同轴度要求较高的工件的二次装夹。

(3) 弹簧夹套。弹簧夹套定心精度高，装夹工件快捷方便，常用于精加工的外圆表面定位。弹簧夹套特别适用于尺寸精度较高、表面质量较好的冷拔圆棒料，若配以自动送料器，可实现自动上料。弹簧夹套夹持工件的内孔是标准系列，并非任意直径。

(4) 单动卡盘。加工精度要求不高、偏心距较小、零件长度较短的工件时，可采用单动卡盘，如图 1-12 所示。

3. 中心孔定位夹具

(1) 两顶尖拨盘。两顶尖定位的优点是定心正确可靠，安装方便。顶尖的作用是定心，承受工件的重量和切削力。顶尖分前顶尖和后顶尖。

前顶尖有两种安装方法：一种前顶尖插入主轴锥孔内，如图 1-13 (a) 所示；另一种夹在卡盘上，如图 1-13 (b) 所示。前顶尖与主轴一起旋转，与主轴中心孔不产生摩擦。

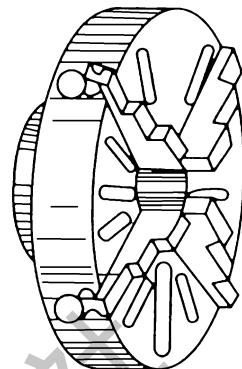


图 1-12 单动卡盘

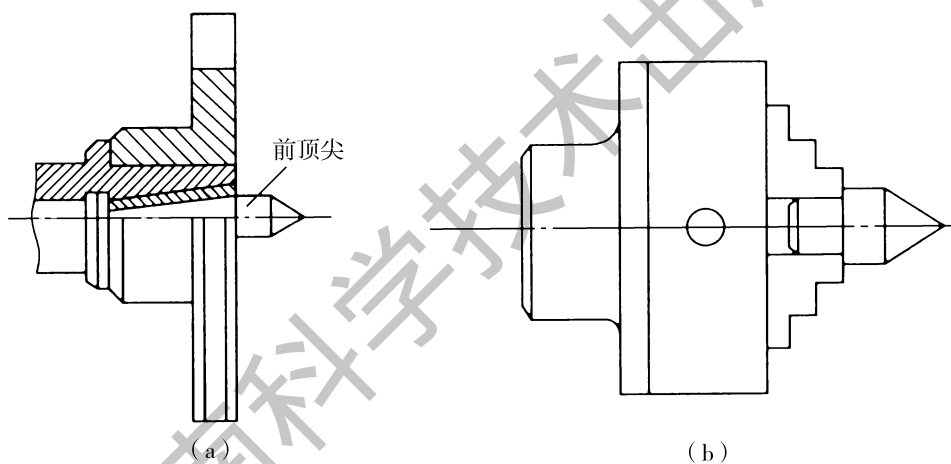


图 1-13 前顶尖

后顶尖插入尾座套筒。有两种情况：一种后顶尖是固定的，如图 1-14 (a) 所示；另一种是回转的，如图 1-14 (b) 所示。回转顶尖使用较为广泛。

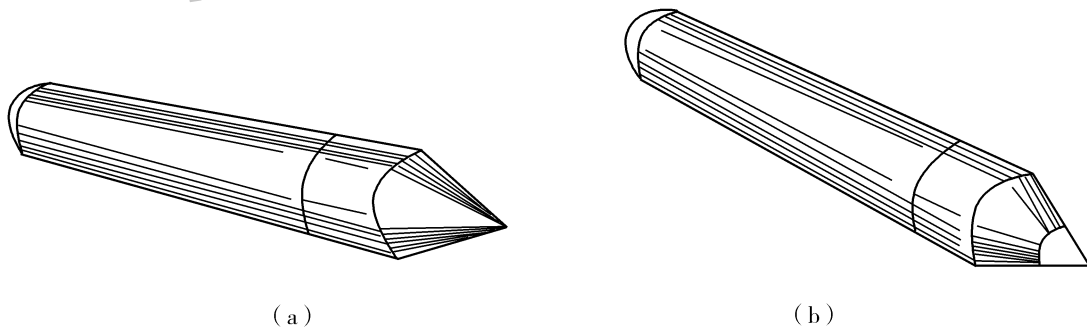


图 1-14 后顶尖

工件安装时用对分夹头或鸡心夹头夹紧工件一端，拨杆伸向端面。两顶尖只对工件有定心和支撑作用，必须通过对分夹头或鸡心夹头的拨杆带动工件旋转，如图 1-15 所示。

利用两顶尖定位还可以加工偏心工件，如图 1-16 所示。

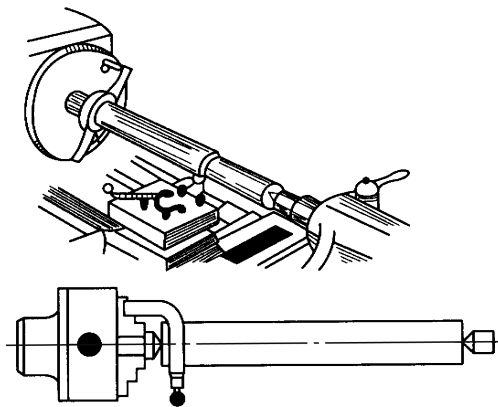


图 1-15 两顶尖装夹工件

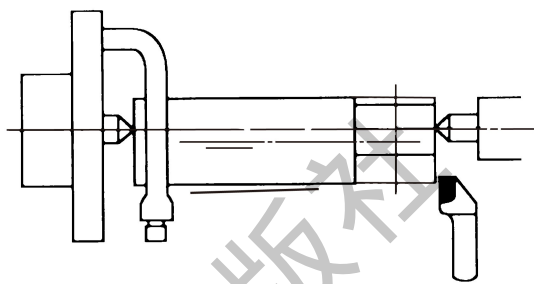


图 1-16 两顶尖定位车偏心轴

(2) 拨动顶尖。常用的拨动顶尖有内、外拨动顶尖和端面拨动顶尖两种。

1) 内、外拨动顶尖。内、外拨动顶尖如图 1-17 所示，这种顶尖的锥面带齿，能嵌入工件，拨动工件旋转。

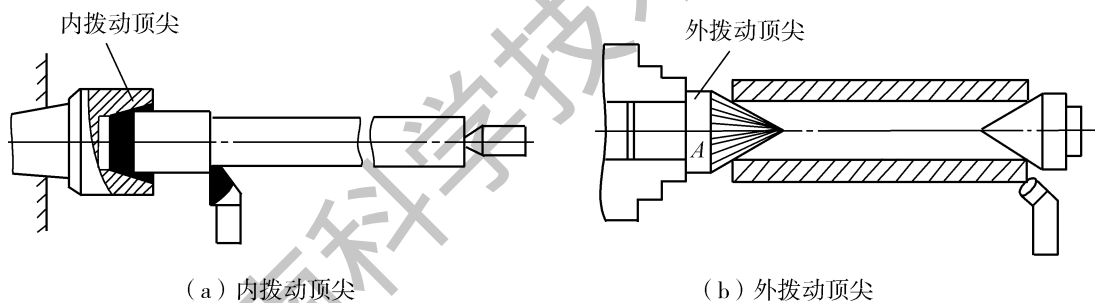


图 1-17 内、外拨动顶尖

2) 端面拨动顶尖。端面拨动顶尖如图 1-18 所示。这种顶尖利用端面拨爪带动工件旋转，适合装夹工件的直径为 50~150 mm。

数控车床常用的装夹方法见表 1-1。

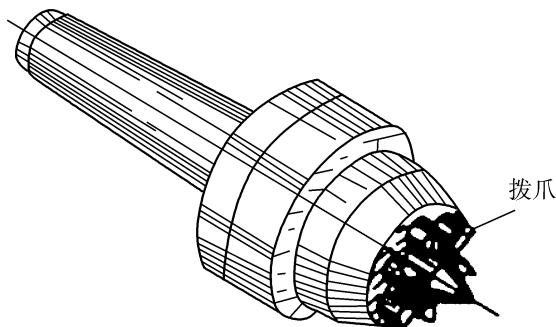


图 1-18 端面拨动顶尖

表 1-1 数控车床常用装夹方法

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

1.2.4 切削用量的选择

1. 切削用量的基本概念



切削用量是表示主运动及进给运动大小的参数。它包括背吃刀量、进给量和切削速度三要素。

(1) 背吃刀量 a_p 。工件上已加工表面和待加工表面间的垂直距离, 如图 1-19 所示。

车外圆时, 背吃刀量计算公式为

$$a_p = \frac{d_w - d_m}{2}$$

式中, a_p ——背吃刀量 (mm);

d_w ——工件待加工表面直径 (mm); d_m ——工件已加工表面直径 (mm)。

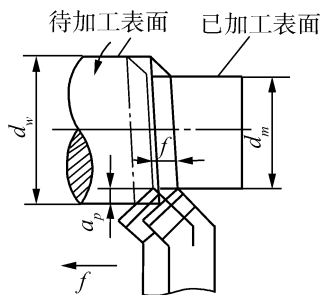


图 1-19 背吃刀量和进给量

(2) 进给量 f 。工件每转一周时, 刀具在进给方向上相对工件的位移量, 如图 1-19 所示。单位是 mm/r。

(3) 切削速度 v_c 。切削刃选定点相对于工件的主运动的瞬时速度。

1) 光轴车削时主轴转速。光轴车削时主轴转速应根据零件上被加工部位的直径, 并按零件、刀具的材料、加工性质等条件所允许的切削速度来确定。切削速度除了计算和查表选取外, 还可根据实践经验确定。需要注意的是, 交流变频调速数控车床低速输出力矩小, 因而切削速度不能太低。切削速度确定之后, 就用下式计算主轴转速。

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

式中, v_c ——切削速度 (m/min);

d_w ——工件待加工表面直径 (mm)；

n ——工件转速 (r/min)。

表 1-2 为硬质合金外圆车刀切削速度的参考值，选用时可参考选择。

表 1-2 硬质合金外圆车刀切削速度的参考数值

工件材料	热处理状态	$a_p = 0.3 \sim 2.0 \text{ mm}$	$a_p = 2 \sim 6 \text{ mm}$	$a_p = 6 \sim 10 \text{ mm}$
		$f = 0.08 \sim 0.30 \text{ mm/r}$	$f = 0.3 \sim 0.6 \text{ mm/r}$	$f = 0.6 \sim 1.0 \text{ mm/r}$
		$v_c \text{ (m/min)}$		
低碳钢、易切钢	热轧	140~180	100~120	70~90
中碳钢	热轧	130~160	90~110	60~80
	调质	100~130	70~90	50~70
合金结构钢	热轧	100~130	70~90	50~70
	调质	80~110	50~70	40~60
工具钢	退火	90~120	60~80	50~70
灰铸铁	<190HBW	90~120	60~80	50~70
	190~225HBW	80~110	50~70	40~60
高锰钢 Mn13%			10~20	
铜、铜合金		200~250	120~180	90~120
铝、铝合金		300~600	200~400	150~200
铸铝合金		100~180	80~150	60~100

注：①切削钢、灰铸铁时的刀具耐用度约为 60 min。②HBW（布氏硬度）。

2) 车螺纹时的主轴转速。切削螺纹时，数控车床的主轴转速将受到螺纹螺距（或导程）的大小、驱动电动机的升降频率特性、螺纹插补运算速度等多种因素的影响，故对于不同的数控系统，推荐不同的主轴转速选择范围。例如，大多数经济型数控车床的数控系统，推荐切削螺纹时的主轴转速为

$$n \leq \frac{1200}{p} - k$$

式中， p ——工件螺纹的螺距或导程 (T) (mm)；

k ——保险系数，一般取 80。

2. 选择切削用量的一般原则



(1) 粗车时切削用量的合理选择：

1) 粗车时切削用量的选择原则。粗车时，毛坯余量较大，工件的加工精度和表面粗糙度等技术要求较低，应以提高生产率为主，考虑经济性和加工成本。

2) 粗车时切削用量的选择步骤。首先选择一个尽量大的背吃刀量，然后选择一个较大的进给量，最后根据已选定的背吃刀量和进给量，在工艺系统刚性，刀具寿命和机床功率允许的范围内选择一个合理的切削速度。

选择背吃刀量时，尽量将粗加工余量一次切完。当余量过大或工艺系统刚性差时，可分两次切除余量，第一次切除余量的 $2/3 \sim 3/4$ 。

选择进给量时，应不超过刀具的刀片和刀柄强度、不大于机床进给机构强度、在不产生振动的条件下，选取一个最大的进给量。硬质合金车刀、高速钢车刀粗车外圆和端面时的进给量，见表1-3。

背吃刀量和进给量确定后，按刀具寿命确定切削速度，计算工件转速，选择车床相近的较低档的车床转速。外圆车刀的切削速度，见表1-4。

粗车时，背吃刀量、进给量、切削速度确定后，还需校验车床功率。

表1-3 硬质合金车刀、高速钢车刀粗车外圆和端面时的进给量

加工材料	车刀刀柄尺寸 $B \times H$ (mm×mm)	工件直径 (mm)	背吃刀量 a_p (mm)			
			<3	>3~5	>5~8	>8~12
			进给量 f (mm/r)			
碳素结构钢和 合金结构钢	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
	20×30	20	0.3~0.4			
		40	0.4~0.5	0.3~0.4		
		60	0.6~0.7	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
铸铁和 铜合金	16×25	40	0.4~0.5			
		60	0.6~0.8	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	40	0.4~0.5			
		60	0.6~0.9	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加工时，表内的进给量应乘系数 $K=0.75 \sim 0.85$ 。

(2) 加工耐热钢及其合金时，不采用大于 1.0 mm/r 的进给量。

(3) 加工淬硬钢，当材料硬度为 $44 \sim 56\text{HRC}$ （洛氏硬度）时，表内进给量应乘系数 $K=0.8$ ；当材料硬度为 $57 \sim 62\text{HRC}$ 时，表内进给量应乘系数 $K=0.5$ 。

表 1-4 外圆车刀的切削速度

工件材料	刀具材料	背吃刀量 a_p (mm)			
		0.13~0.38	0.38~2.4	2.4~4.7	4.7~9.5
		进给量 f (mm/r)			
		0.05~0.13	0.13~0.38	0.38~0.76	0.76~1.3
		切削速度 v_c (m/min)			
低碳钢	高速钢		70~90	40~60	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
不锈钢	高速钢		30~45	25~30	15~20
	硬质合金	115~150	90~115	75~90	55~75
灰铸铁	高速钢		35~45	25~35	20~25
	硬质合金	135~185	105~135	75~105	60~75
黄铜及青铜	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) 半精车、精车时切削用量的合理选择:

1) 半精车、精车时切削用量的选择原则。半精车、精车时, 工件的加工余量不大, 加工精度要求较高, 表面粗糙度值要求较小, 应以提高加工质量作为选择切削用量的主要依据, 然后尽可能提高生产率。

2) 半精车、精车时切削用量的选择步骤。半精加工、精加工的背吃刀量较小, 原则上一次进给切除全部余量。

半精加工、精加工的进给量主要受表面粗糙度的限制, 可在预定切削速度、刀尖圆弧半径的情况下, 查询有关表格, 确定进给量。硬质合金外圆车刀半精车时的进给量, 见表 1-5。

表 1-5 硬质合金外圆车刀半精车时的进给量

工件材料	表面粗糙度 Ra (μm)	切削速度范围 (m/min)	刀尖圆弧半径 r_e (mm)		
			0.5	1.0	2.0
			进给量 f (mm/r)		
铸铁、青铜、铝合金	3.2	不限	0.12~0.25	0.25~0.40	0.40~0.60
	1.6		0.10~0.15	0.15~0.20	0.20~0.35
碳钢、合金钢	3.2	<50	0.20~0.25	0.25~0.30	0.30~0.40
		>50	0.25~0.30	0.30~0.35	0.35~0.50
	1.6	<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	

1.2.5 数控车刀的选择

选择数控车削刀具通常要考虑数控车床的加工能力、工序内容及工件材料等因素。与普通车削相比，数控车削对刀具的要求更高，不仅要求精度高、刚度好、耐用度高，而且要求尺寸稳定、安装调整方便。

1. 常用车刀类型

(1) 焊接式车刀。焊接式车刀是将硬质合金刀片用焊接的方法固定在刀体上，形成一个整体。此类刀具结构简单，制造方便，刚性较好。但由于受焊接工艺的影响，刀具的使用性能受到影响。另外，由于刀杆不能重复使用，会造成刀具材料的浪费。

根据工件加工表面的形状以及用途不同，焊接式车刀可分为外圆车刀、内孔车刀、切断（切槽）刀、螺纹车刀及成型车刀等，具体如图 1-20 所示。

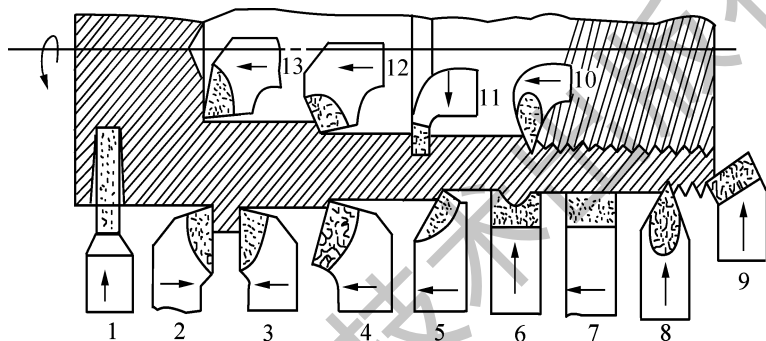


图 1-20 常用焊接式车刀的种类

1-切断刀；2-90°左偏刀；3-90°右偏刀；4-弯头车刀；5-直头车刀；6-成型车刀；7-宽刃车刀；8-外螺纹车刀；9-端面车刀；10-内螺纹车刀；11-内沟槽刀；12-通孔车刀；13-盲孔车刀

(2) 机械夹固式可转位车刀。  机械夹固式（简称机夹）可转位车刀

是已经实现机械加工标准化、系列化的车刀。数控车床常用的机夹可转位车刀结构形式如图 1-21 所示，主要由刀杆 1、刀片 2、刀垫 3 及夹紧元件 4 组成。刀片每边都有切削刃，当某切削刃磨损钝化后，只需松开夹紧元件，将刀片转一个位置便可继续使用，这减少了换刀时间和方便对刀，便于实现机械加工的标准化。数控车削加工时，应尽量采用机夹刀和机夹刀片。

2. 车刀的类型及选择

数控车削常用的车刀一般分为三类，即尖形车刀、圆弧车刀和成型车刀。

(1) 尖形车刀。尖形车刀的刀尖（也称为刀位点）由直线形的主、副切削刃构成，切削刃为一直线形。如 90°内、外圆车刀，端面车刀，切断（槽）车刀等。

尖形车刀是数控车床加工中应用最为广泛的一类车刀。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。尖形车刀的选择方法与普通车削时基本相同，主要根据工件的表面形状、加工部位及刀具本身的强度等选择合适的刀具几何角度，并应适合数控加工的特点（如加工路线、加工干涉等）。

(2) 圆弧车刀。圆弧车刀的切削刃是一圆度误差或轮廓误差很小的圆弧，该圆弧上每

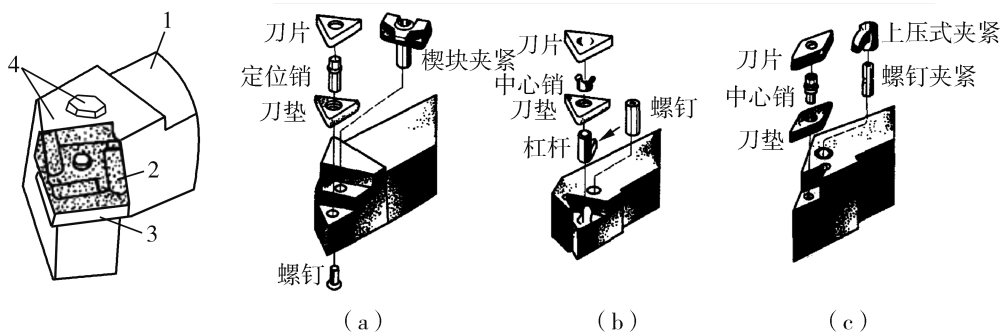


图 1-21 机夹可转位车刀

(a) 楔块-压式夹紧; (b) 杠杆-压式夹紧; (c) 螺钉-压式夹紧
1-刀杆; 2-刀片; 3-刀垫; 4-夹紧元件

一点都是圆弧形车刀的刀尖，其刀位点不在圆弧上，而在该圆弧的圆心上（图 1-22）。

当某些尖形车刀或成型车刀（如螺纹车刀）的刀尖具有一定的圆弧形时，也可作为这类车刀使用。

圆弧车刀是较为特殊的数控车刀，可用于车削工件内、外表面，特别适合于车削各种光滑连接（凸凹形）成型面。

圆弧车刀的选择，主要是选择车刀的圆弧半径，具体应考虑两点：一是车刀切削刃的圆弧半径应小于零件凹形轮廓上的最小曲率半径，以免发生加工干涉；二是该半径不宜太小，否则不但制造困难，还会削弱刀具强度，降低刀体散热性能。

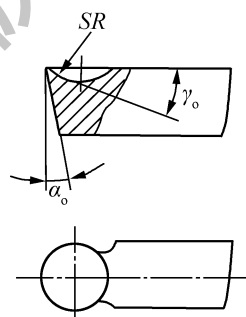


图 1-22 圆弧车刀

(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、非矩形切槽刀和螺纹车刀等。在数控加工中，应尽量少用或不用成型车刀，当确有必要选用时，应在工艺文件或加工程序单上进行详细说明。

3. 机夹可转位车刀的选用

(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。选择刀片材质主要依据被加工工件的材料、被加工表面的精度、表面质量要求、切削载荷的大小以及切削过程有无冲击和振动等。

(2) 刀片形状的选择。刀片形状主要依据被加工工件的表面形状、切削方法、刀具寿命和刀片的转位次数等因素选择。

刀片是机夹可转位车刀的重要组成元件，刀片大致可分为三大类 17 种，图 1-23 所示为常见的可转位车刀刀片。

表 1-6 所示为车削加工时被加工表面与适用的主偏角 $15^\circ \sim 95^\circ$ 的刀片形状。具体使用时可查阅有关刀具手册选取。

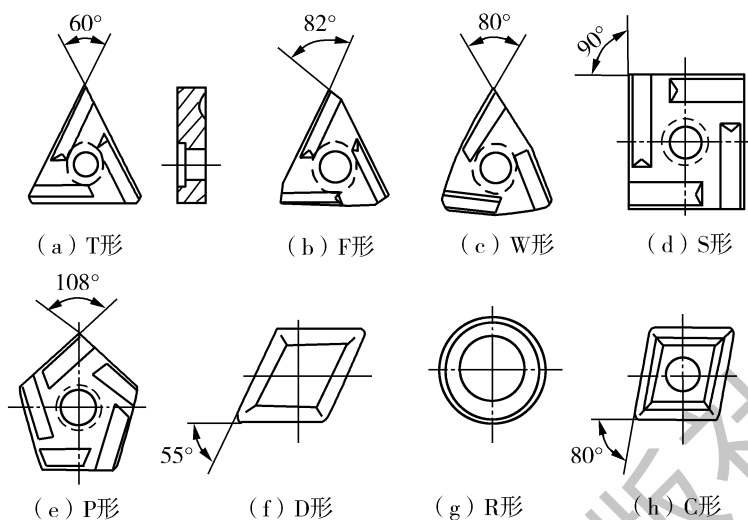


图 1-23 常见可转位车刀刀片

表 1-6 被加工表面与适用的刀片形状

车削外圆表面	主偏角	45°	45°	50°	75°	95°
	刀片形状及加工示意图					
	推荐选用刀片	SCMA SPMR SCMM SNMM-8 SPUN SNMM-9	SCMA SPMR SCMM SNMG SPUN SPGR	TCMA TNMM-8 TCMM TPUN	SCMM SPUM SCMA SPMR SNMA	CCMA CCMM CNMM-7
车削端面	主偏角	75°	90°	90°	95°	
	刀片形状及加工示意图					
	推荐选用刀片	SCMA SPMR SCMM SPUR SPUN CNMG	TNUN TNMA TCMA TPUM TCMM TPMR	CCMA	TPUN TPMR	
车削成形面	主偏角	15°	45°	60°	90°	93°
	刀片形状及加工示意图					
	推荐选用刀片	RCMM	RNNG	TNMM-8	TNMG	TNMA

4. 车削工具系统

为了提高效率，减少换刀辅助时间，数控车削刀具已经向标准化、系列化、模块化方向发展，目前常用的数控车床的刀具系统有两类。

一类是刀块式车刀系统，结构是用凸键定位、螺钉夹紧，如图 1-24 (a) 所示。该结构定位可靠，夹紧牢固、刚性好，但换装刀具费时，不能自动夹紧。

另一类是圆柱齿条式车刀系统，其结构是在圆柱柄上铣有齿条，如图 1-24 (b) 所示，该结构可实现自动夹紧，换装比较快捷，刚性较刀块式差。

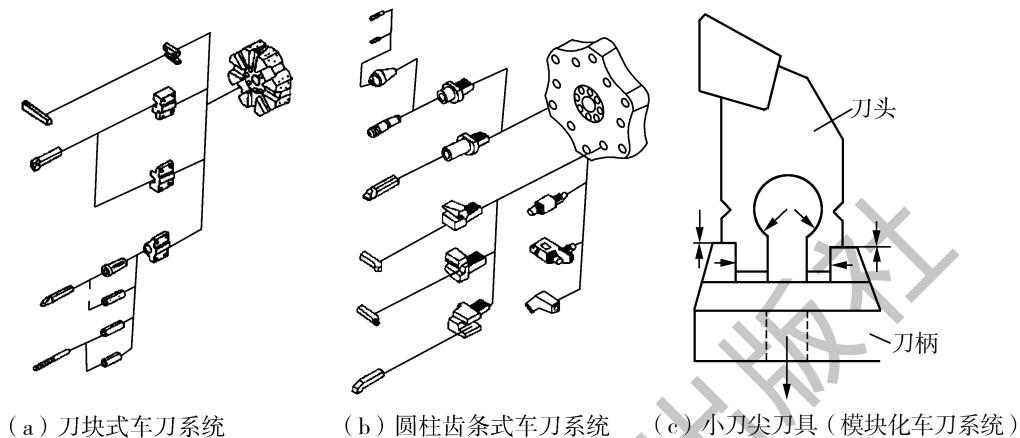


图 1-24 车削刀具系统

瑞典山特维克公司推出了一套模块化的车刀系统，刀柄是一样的，仅需更换刀头和刀柄即可用于各种加工，如图 1-24 (c) 所示，该结构刀头很小，更换快捷，定位精度高，也可自动更换。

1.2.6 车削加工顺序的确定

如图 1-25 (a) 所示手柄零件，批量生产，加工时用一台数控车床，该零件加工所用坯料为 $\phi 32$ mm 的棒料。加工顺序如下。

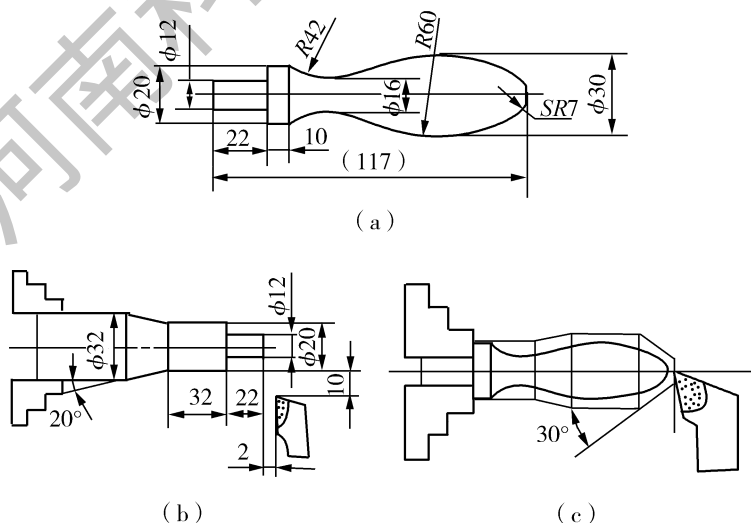


图 1-25 手柄加工工序示意图

第一道工序：如图 1-25 (b) 所示，将一批工件全部车出，工序内容有，先车出 $\phi 12$ mm 和 $\phi 20$ mm 两圆柱面及 20° 圆锥面（粗车掉 $R42$ mm 圆弧的部分余量），换刀后按总长要求留下加工余量。

第二道工序（调头）：如图 1-25 (c) 所示，用 $\phi 12$ mm 外圆及 $\phi 20$ mm 端面装夹工件，工序内容有：先车削包络 $SR7$ mm 球面的 30° 圆锥面，然后对全部圆弧表面进行半精车（留少量的精车余量），最后换精车刀，将全部圆弧表面一刀精车成型。

在分析了零件图样和确定了工序、装夹方式后，接下来即要确定零件的加工顺序。制定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，逐步提高加工精度。粗车将在较短的时间内将工件表面上的大部分加工余量（如图 1-26 中的双点划线内所示部分）切掉，一方面提高金属切除率，另一方面满足精车的余量均匀性要求。若粗车后所留余量的均匀性满足不了精加工的要求，则要安排半精车加工，为精车做准备。精车要保证加工精度，按图样尺寸，一刀车出零件轮廓。

2. 先近后远

这里所说的远和近是按加工部位相对于对刀点的距离大小而言的。在一般情况下，离对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。而且对于车削而言，先近后远还有利于保持坯件或半成品的刚性，改善其切削条件。

例如，当加工如图 1-27 所示零件时，如果按 $\phi 38$ mm→ $\phi 36$ mm→ $\phi 34$ mm 的次序安排车削，不仅会增加刀具返回对刀点所需的空行程时间，而且一开始就削弱了工件的刚性，还可能使台阶的外直角处产生毛刺。对这类直径相差不大的台阶轴，当第一刀的背吃刀量（图中最大背吃刀量可为 3 mm 左右）未超过限时，宜按 $\phi 34$ mm→ $\phi 36$ mm→ $\phi 38$ mm 的次序先近后远地安排车削。

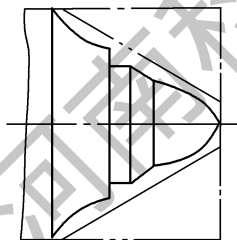


图 1-26 先粗后精示例

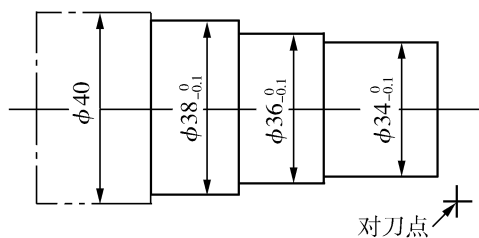


图 1-27 先近后远示例

3. 内外交叉

对既有内表面（内型、腔），又有外表面需加工的零件，安排加工顺序时应先进行内外表面粗加工，后进行内外表面精加工。切不可将零件上一部分表面（外表面或内表面）加工完毕后，再加工其他表面（内表面或外表面）。

1.2.7 对刀点与换刀点的确定

对于数控机床来说，在加工开始时，确定刀具与工件的相对位置是很重要的，它是通过对刀点来实现的。对刀点是指通过对刀确定刀具与工件相对位置的基准点。在程序编制

时,不管实际上是刀具相对工件移动,还是工件相对刀具移动,都把工件看作静止,而刀具在运动。对刀点往往也是零件的加工原点。

选择对刀点的原则:

- (1) 方便数学处理和简化程序编制。
- (2) 在机床上容易找正,便于确定零件的加工原点的位置。
- (3) 加工过程中便于检查。
- (4) 引起的加工误差小。

对刀点可以设在零件上、夹具上或机床上,但必须与零件的定位基准有已知的准确关系。当对刀精度要求较高时,对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上。对于以孔定位的零件,可以取孔的中心作为对刀点。

对刀时应使对刀点与刀位点重合。所谓刀位点,是指确定刀具位置的基准点,如90°车刀的刀位点一般为端刀尖;圆弧车刀的刀位点取为圆心;钻头为钻尖。

换刀点应根据工序内容来做安排,其位置应根据换刀时刀具不碰到工件、夹具和机床的原则而定。换刀点往往是固定的点,且设在距离工件较远的地方。

1.2.8 加工工序的划分

在数控机床上特别是在加工中心上加工零件,工序十分集中,许多零件只需在一次装卡中就能完成全部工序。但是零件的粗加工,特别是铸、锻毛坯零件的基准平面、定位面等的加工应在普通机床上完成之后,再装卡到数控机床上进行加工。这样可以发挥数控机床的特点,保持数控机床的精度,延长数控机床的使用寿命,降低数控机床的使用成本。在数控机床上加工零件,其工序划分的方法如下。

1. 刀具集中分序法

这种分序法即按所用刀具划分工序,用同一把刀加工完零件上所有可以完成的部位后,再用第二把刀、第三把刀完成它们可以完成的其他部位。这种分序法可以减少换刀次数,压缩空程时间,减少不必要的定位误差。

2. 粗、精加工分序法

这种分序法是根据零件的形状、尺寸精度等因素,按照粗、精加工分开的原则进行分序。对单个零件或一批零件先进行粗加工、半精加工,而后精加工。粗、精加工之间,最好间隔一段时间,以使粗加工后零件的变形得到充分恢复,再进行精加工,以提高零件的加工精度。

3. 按加工部位分序法

这种分序法即先加工平面、定位面,再加工孔;先加工简单的几何形状,再加工复杂的几何形状;先加工精度比较低的部位,再加工精度要求较高的部位。

总之,在数控机床上加工零件,其加工工序的划分要视加工零件的具体情况具体分析。许多工序的安排需综合上述各分序方法。

1.2.9 进给路线的确定

刀具对刀点相对于工件的运动轨迹和方向称为进给路线,即刀具从对刀点开始运动起直至加工结束所经过的路径,包括切削加工的路径及刀具切入、切出等切削空行程。在数

控车削加工中，因精加工的进给路线基本上都是沿零件轮廓的顺序进行，因此确定进给路线的工作重点主要在于确定粗加工及空行程的进给路线。加工路线的确定必须在保证被加工零件的尺寸精度和表面质量的前提下，按最短进给路线的原则确定，以减少加工过程的执行时间，提高工作效率。在此基础上，还应考虑数值计算的简便，以方便程序的编制。

下面是数控车削加工零件时常用的加工路线。

1. 轮廓粗车进给路线

在确定粗车进给路线时，根据最短切削进给路线的原则，同时兼顾工件的刚性和加工工艺性等要求，来选择确定最合理的进给路线。

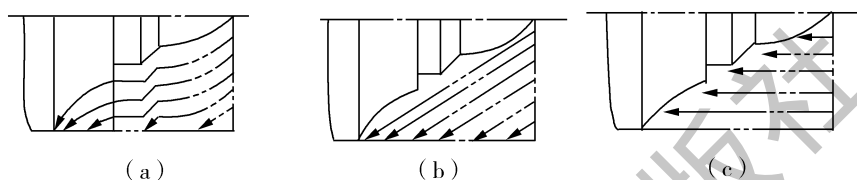


图 1-28 粗车进给路线示意图

图 1-28 给出了 3 种不同的轮廓粗车切削进给路线，其中图 1-28 (a) 表示利用数控系统的循环功能控制车刀沿着工件轮廓线进行进给的路线；图 1-28 (b) 为三角形循环（车锥法）进给路线；图 1-28 (c) 为矩形循环进给路线，其路线总长最短，因此在同等切削条件下的切削时间最短，刀具损耗最少。

2. 车削圆锥的加工路线

在数控车床上车削外圆锥可以分为车削正圆锥和车削倒圆锥两种情况，而每一种情况又有两种加工路线。图 1-29 所示为车削正圆锥的两种加工路线。按图 1-29 (a) 车削正圆锥时，需要计算终刀距 S 。设圆锥大径为 D ，小径为 d ，锥长为 L ，背吃刀量为 a_p ，则由相似三角形可知：

$$\frac{D-d}{2L} = \frac{a_p}{S}$$

根据上面公式，便可计算出终刀距 S 的大小。

当按图 1-29 (b) 的走刀路线车削正圆锥时，则不需要计算终刀距 S ，只要确定背吃刀量 a_p ，即可车出圆锥轮廓。

按第一种加工路线车削正圆锥，刀具切削运动的距离较短，每次切深相等，但需要通过计算。按第二种方法车削，每次切削背吃刀量是变化的，而且切削运动的路线较长。

图 1-30 (a) (b) 为车削倒圆锥的两种加工路线，分别与图 1-29 (a) (b) 相对应，其车锥原理与正圆锥相同，有时在粗车圆弧时也会使用。

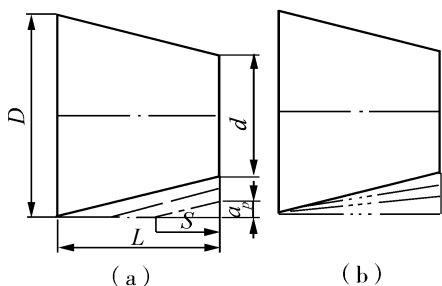


图 1-29 粗车正锥进给路线示意图

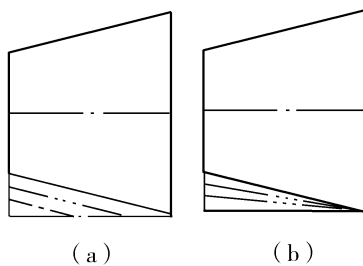


图 1-30 粗车倒锥进给路线示意图

3. 车削圆弧的加工路线

在粗加工圆弧时，因其切削余量大，且不均匀，经常需要进行多刀切削。在切削过程中，可以采用多种不同的方法，常用方法如下。

(1) 车锥法粗车圆弧。图 1-31 所示为车锥法粗车圆弧的切削路线，即先车削一个圆锥，再车圆弧。在采用车锥法粗车圆弧时，要注意车锥时的起点和终点的确定。若确定不好，则可能会损坏圆弧表面，也可能将余量留得过大。确定方法是连接 OB 交圆弧于点 D ，过 D 点作圆弧的切线 AC 。由几何关系得

$$BD = OB - OD = 0.414R$$

此为车锥时的最大切削余量，即车锥时，加工路线不能超过 AC 线。由 BD 和 $\triangle ABC$ 的关系即可算出 BA 、 BC 的长度，即圆锥的起点和终点。当 R 不太大时，可取 $AB = BC = 0.5R$ ，此方法数值计算较为烦琐，但其刀具切削路线较短。

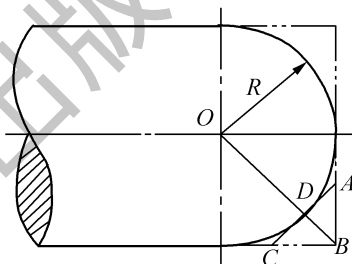


图 1-31 车锥法粗车圆弧示意图

(2) 车矩形法粗车圆弧。不超过 $1/4$ 的圆弧，当圆弧半径较大时，其切削余量往往较大，此时可采用车矩形法粗车圆弧。在采用车矩形法粗车圆弧时，关键要注意每刀切削所留的余量应尽可能保持一致，严格控制后面的切削长度不超过前一刀的切削长度，以防崩刀。图 1-32 是车矩形法粗车圆弧的两种进给路线，图 1-32 (a) 是错误的进给路线，图 1-32 (b) 按 1→5 的顺序车削，每次车削所留余量基本相等，是正确的进给路线。

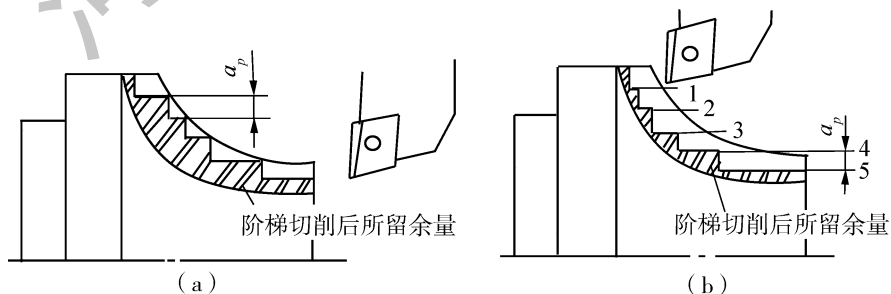


图 1-32 车矩形法粗车圆弧示意图

(3) 车圆法粗车圆弧。前面两种方法粗车圆弧，所留的加工余量都不能达到一致，用 G02 (或 G03) 指令粗车圆弧，若一刀就把圆弧加工出来，这样吃刀量太大，容易打刀。

所以，实际切削时，常常采用多刀粗车圆弧，先将大部分余量切除，最后才车到所需圆弧，如图 1-33 所示。此方法的优点在于每次背吃刀量相等，数值计算简单，编程方便，所留的加工余量相等，有助于提高精加工质量。缺点是加工的空行程时间较长。加工较复杂的圆弧常常采用此类方法。

4. 车螺纹时的加工路线分析

在数控车床上车螺纹时，沿螺距方向的 Z 向进给应和车床主轴的转速保持严格的速比例关系，因此应避免在进给机构加速或减速的过程中切削。为此，要有升速进刀段和降速进刀段，如图示 1-34 所示， δ_1 一般为 2~5 mm， δ_2 一般为 1~2 mm。这样在切削螺纹时，能保证在升速后使刀背接触工件，刀具离开工件后再降速。

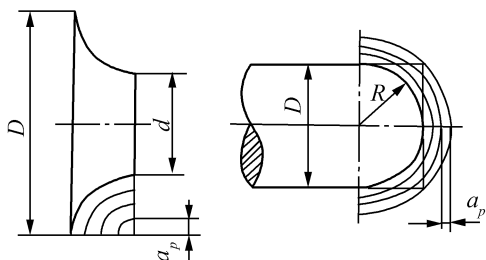


图 1-33 车圆法车圆弧示意图

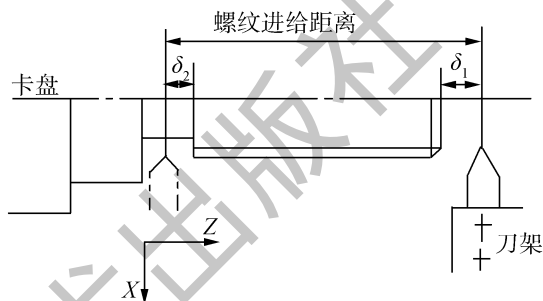


图 1-34 车螺纹时的引入距离和超越距离

5. 车槽加工路线分析

(1) 对于宽度、深度值相对不大，且精度要求不高的槽，可采用与槽等宽的刀具，用直接切入一次成型的方法加工，如图 1-35 所示。刀具切入到槽底后可利用延时指令使刀具短暂停留，以修整槽底圆度，退出过程中可采用工进速度。

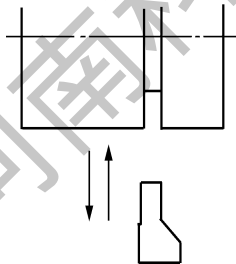


图 1-35 简单槽类零件的加工方式

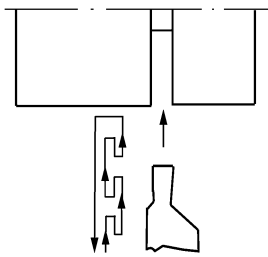


图 1-36 深槽零件的加工方式

(2) 对于宽度值不大，但深度较大的深槽零件。为了避免切槽过程中由于排屑不畅，使刀具前部压力过大出现扎刀和折断刀具的现象，应采用分次进刀的方式，刀具在切入工件一定深度后，停止进刀并退回一段距离，达到排屑和断屑的目的，如图 1-36 所示。

(3) 宽槽的切削。通常把大于一个切刀宽度的槽称为宽槽，对宽槽的宽度、深度的精度及表面质量要求相对较高。在切削宽槽时常采用排刀的方式进行粗切，然后用精切槽刀沿槽的一侧切至槽底，精加工槽底至槽的另一侧，再沿侧面退出，切削方式如图 1-37 所示。

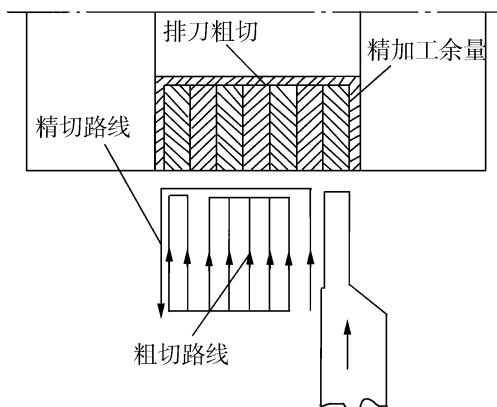


图 1-37 宽槽切削方法示意图

6. 空行程进给路线

(1) 合理安排“回零”路线。合理安排退刀路线时，应使其前一刀终点与后一刀起点间的距离尽量减短，或者为零，以满足进给路线最短的要求。另外，在选择返回参考点指令时，在不发生加工干涉现象的前提下，宜尽量采用 X 、 Z 坐标轴同时返回参考点指令，该指令的返回路线将是最短的。

(2) 巧用起刀点和换刀点。图 1-38 (a) 为采用矩形循环方式粗车的一般情况。考虑到精车等加工过程中换刀的方便，故将对刀点 A 设置在离坯件较远的位置处，同时将起刀点与对刀点重合在一起，按三刀粗车的进给路线安排如下。

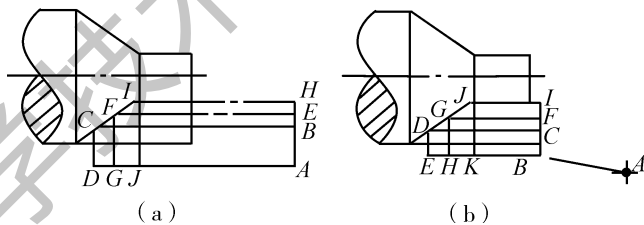


图 1-38 巧用起刀点

- 第一刀为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$;
- 第二刀为 $A \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow A$;
- 第三刀为 $A \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow A$ 。

图 1-38 (b) 则是将起刀点与对刀点分离，并设于 B 点位置，仍按相同的切削用量进行三刀粗车，其进给路线安排如下。

- 车刀先由对刀点 A 运行至起刀点 B 。
- 第一刀为 $B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow B$;
- 第二刀为 $B \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow B$;
- 第三刀为 $B \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow B$ 。

显然，图 1-38 (b) 所示的进给路线短。该方法也可用在其他循环（如螺纹车削）的切削加工中。

为考虑换刀的方便和安全，有时将换刀点也设置在离坯件较远的位置处（图 1-38 中的 A 点），那么，当换刀后，刀具的空行程路线也较长。如果将换刀点都设置在靠近工件处，则可缩短空行程距离。换刀点的设置，必须确保刀架在回转过程中，所有的刀具不与工件发生碰撞。

7. 轮廓精车进给路线

在安排轮廓精车进给路线时，应妥善考虑刀具的进、退刀位置，避免在轮廓中安排切入和切出，避免换刀及停顿，以免因切削力突然发生变化而造成弹性变形，致使在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。合理的轮廓精车进给路线应是一刀连续加工而成。

零件加工的进给路线，应综合考虑数控系统的功能、数控车床的加工特点及零件的特点等多方面的因素，灵活使用各种进给方法，从而提高生产效率。

1.3 任务实施

下面以图 1-39 (a) 所示轴套类零件为例，分析并制定其数控加工工序的工艺流程。该零件材料为 45 钢，图 1-39 (b) 为该零件前工序简图。本工序加工部位为图中端面 A 以右的内外表面。

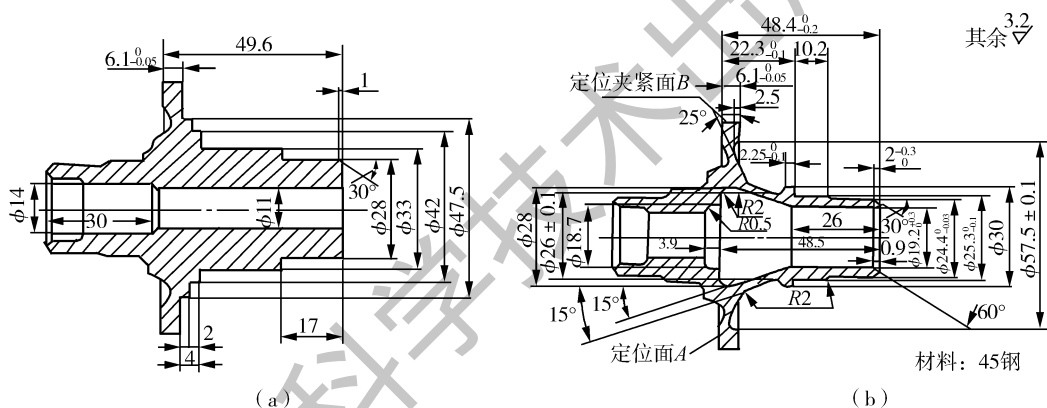


图 1-39 零件工序简图

1.3.1 零件工艺分析

图 1-39 中零件由内、外圆柱面，内、外圆锥面，平面及圆弧等组成，结构形状复杂，加工部位多，非常适合数控车削加工，但工件壁厚易变形，装夹时需采取特殊工艺措施。精度上，该零件的 $\phi 24.4_{-0.03}^0$ 外圆和 $6.1_{-0.05}^0$ 端面两处尺寸精度要求较高。此外，工件圆锥面上有几处 $R2$ 圆弧面，由于圆弧半径较小，可直接用成型刀车削而不用圆弧插补程序切削，这样既可减小编程工作量，又可提高切削效率。

1.3.2 确定装夹方案

为了使工序基准与定位基准重合，并敞开所有的加工部位，选择 A 面和 B 面分别为轴向和径向定位基准，限定 5 个自由度。由于该工件属薄壁易变形件，为减少夹紧变形，选工件上刚度最大的部位 B 面为夹紧表面，采用如图 1-40 所示包容式软爪夹紧。该软爪以其底部的端齿在卡盘（通常是液压或气动卡盘）上定位，能保证较高的重复安装精度。为

(2) 半精车 25° 、 15° 两外圆锥面及三处 $R2$ 的过渡圆弧。选用直径为 $\phi 6$ 的圆形刀片进行外锥面的半精车，走刀路线如图 1-42 所示。

(3) 粗车内孔端部。本工步的进给路线如图 1-43 所示。选用三角形刀片进行内孔端部的粗车。此加工共分 3 次走刀，依次将距内孔端部 10 mm 左右的一段车至 $\phi 13.3$ 、 $\phi 15.6$ 和 $\phi 18$ 。

(4) 钻削内孔深部。进给路线见图 1-44，选用 $\phi 18$ 钻头，顶角为 118° ，进行内孔深部的钻削。与内孔车刀比，钻头的切削效率较高，切屑的排除也比较容易，但孔口一段因远离工件的夹持部位，钻屑不宜过大、过长，安排一个车削工步可减小切削变形，因为车削力比钻削力小，因此前面安排孔口端部车削工步。

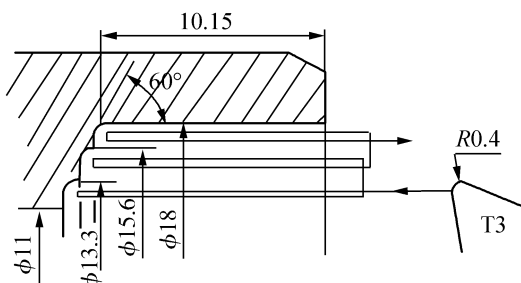


图 1-43 内孔端部粗车走刀路线

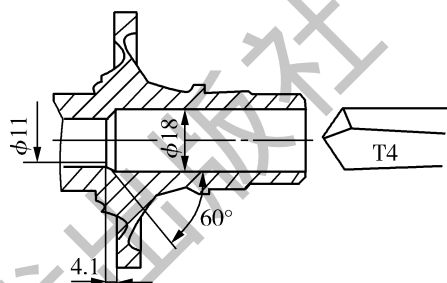


图 1-44 钻削内孔走刀路线

(5) 粗车内锥面及半精车其余内表面。选用 55° 菱形刀片，进行 $\phi 19.2$ 内孔的半精车及内锥面的粗车，以留有精加工余量 0.15 mm 的外端面为对刀基准。由于内锥面需切除余量较多，故刀具共走刀 4 次，走刀路线及切削部位如图 1-45 所示。每两次走刀之间都安排一次退刀停车，以便操作者及时清除孔内的切屑。主轴旋向为逆时针方向，具体加工内容为半精车 $\phi 19.2^{+0.3}$ 内孔（前序尺寸为 $\phi 18$ ）至 $\phi 19.05$ 、粗车 15° 内圆锥面、半精车 $R2$ 圆弧面及左侧内表面。

(6) 精车外圆柱面及端面。选用 80° 菱形刀片，精车图 1-46 中的右端面及 $\phi 24.38$ 、 $\phi 25.25$ 、 $\phi 30$ 外圆及 $R2$ 圆弧和台阶面。由于是精车，刀尖圆弧半径选取较小值 $R0.4$ 。

(7) 精车 25° 外圆锥面及 $R2$ 圆弧面。用带 $R2$ mm 的圆弧车刀，精车外圆锥面，其进给路线如图 1-47 所示。

(8) 精车 15° 外圆锥面及 $R2$ 圆弧面。用带 $R2$ 的圆弧车刀，精车 15° 外圆锥面，其进给路线如图 1-48 所示。程序中同样安排在软爪基准面进行选择对刀。但应注意受刀具圆 $R2$ mm 制造误差的影响，对刀后不一定能满足该零件尺寸 $2.25_{-0.1}^0$ 的公差要求。该刀具

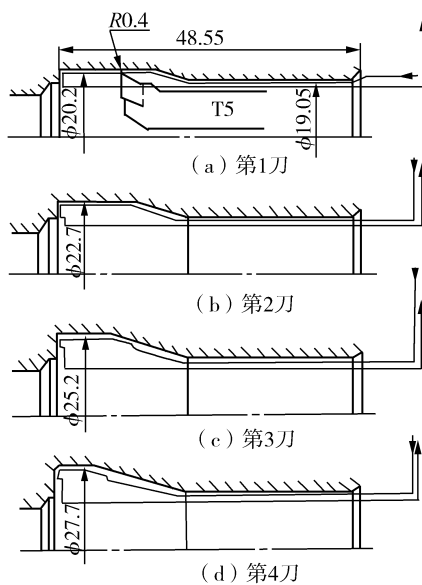


图 1-45 内表面粗车、半精车走刀路线

的轴向刀补还应根据刀具圆弧半径的实际值进行处理，不能完全由对刀决定。

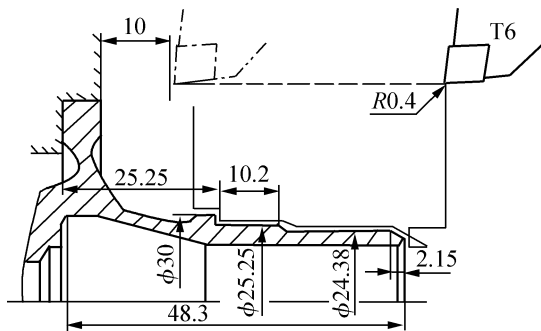


图 1-46 精车外圆柱面及端面走刀路线

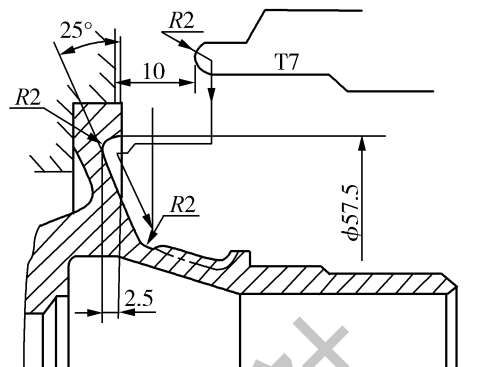


图 1-47 精车 25°外圆锥面及 R2 圆弧面走刀路线

(9) 精车内表面。选用 55°菱形刀片，精车 $\phi 19.2^{+0.3}_0$ 内孔、15°内锥面、R2 圆弧及锥孔端面，进给路线如图 1-49 所示。该刀具在工件外端面上进行轴向对刀，此时外端面上已无加工余量。

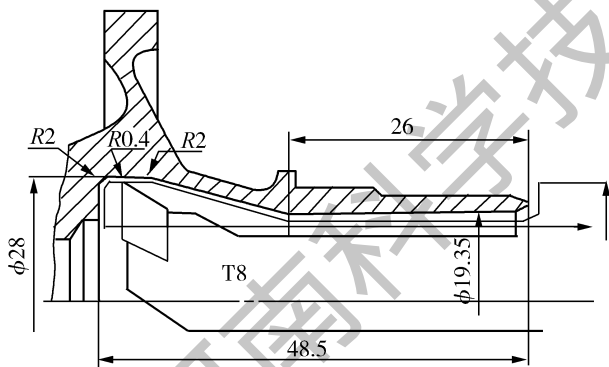


图 1-48 精车 15°外圆锥面及 R2 圆弧面走刀路线

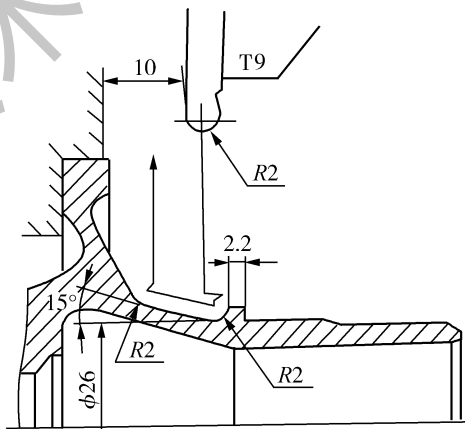


图 1-49 精车内表面走刀路线

(10) 加工最深处 $\phi 18.7^{+0.1}_0$ 内孔及端面。选用 80°菱形刀片加工，分 2 次走刀，中间退刀一次，以便清除切屑。该刀具的走刀路线如图 1-50 所示。对于这把刀具要特别注意妥善安排内孔根部端面车削时的走刀方向。因刀具伸入较多，刀具刚性欠佳，如采用与图示走刀路线相反的方向车削该端面，切削时容易产生振动，加工表面的质量很难保证。

在图 1-50 中可以看到两处 $0.1 \times 45^\circ$ 的倒角加工，类似这样的小倒角或小圆弧的加工，正是数控车削加工特点的突出体现，这样可使加工表面之间圆滑地转接过渡。只要图样上无“保持锐角边”的特殊要求，均可照此处理。

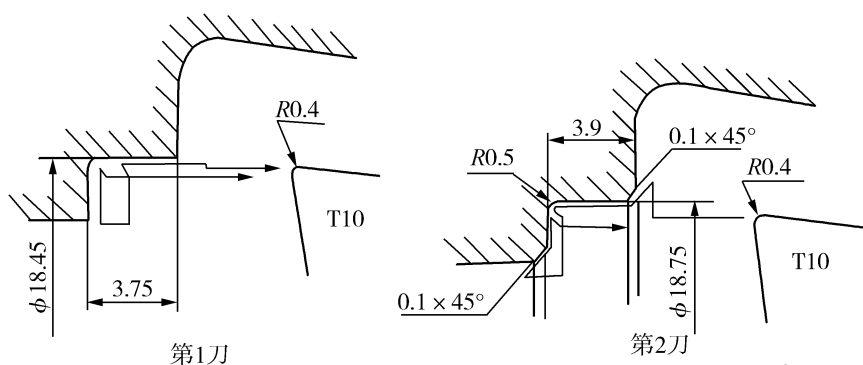


图 1-50 加工深处内孔及端面走刀路线

1.3.4 确定切削用量

根据加工要求经查表修整来确定切削用量，具体确定如下。

(1) 粗车外表面。车削端面时主轴转速 $S=1\,400\text{ r/min}$ ，其余部位 $S=1\,000\text{ r/min}$ ，端部倒角进给量 $f=0.15\text{ mm/r}$ ，其余部位 $f=0.2\sim0.25\text{ mm/r}$ 。

(2) 半精车 25° 、 15° 两外圆锥面及三处 $R2$ 的过渡圆弧。主轴转速 $S=1\,000\text{ r/min}$ ，切入时进给量 $f=0.1\text{ mm/r}$ ，进给时 $f=0.2\text{ mm/r}$ 。

(3) 粗车内孔端部。主轴转速 $S=1\,000\text{ r/min}$ ，切入时进给量 $f=0.1\text{ mm/r}$ ，进给时 $f=0.2\text{ mm/r}$ 。

(4) 钻削内孔深部。主轴转速 $S=550\text{ r/min}$ ，进给量 $f=0.15\text{ mm/r}$ 。

(5) 粗车内锥面及半精车其余内表面。主轴转速 $S=700\text{ r/min}$ ，车削 $\phi 19.05$ 内孔时进给量 $f=0.2\text{ mm/r}$ ，车削其余部位时 $f=0.1\text{ mm/r}$ 。

(6) 精车外圆柱面及端面。主轴转速 $S=1\,400\text{ r/min}$ ，进给量 $f=0.15\text{ mm/r}$ 。

(7) 精车 25° 外圆锥面及 $R2$ 圆弧面。主轴转速 $S=700\text{ r/min}$ ，进给量 $f=0.1\text{ mm/r}$ 。

(8) 精车 15° 外圆锥面及 $R2$ 圆弧面。切削用量与工步 (7) 相同。

(9) 精车内表面。主轴转速 $S=1\,000\text{ r/min}$ ，进给量 $f=0.1\text{ mm/r}$ 。

(10) 加工最深处 $\phi 18.7^{+0.1}$ 内孔及端面。主轴转速 $S=1\,000\text{ r/min}$ ，进给量 $f=0.1\text{ mm/r}$ 。

在确定了零件的进给路线，选择了切削刀具之后，视所用刀具多少，若使用刀具较多，可结合零件定位和编程加工的具体情况，绘制一份刀具调整图。图 1-51 所示为本例的刀具调整图。

1.3.5 填写工艺文件

按加工顺序将各工步的加工内容、所用刀具及切削用量等填入表 1-7 中。

将选定的各工步所用刀具的刀具型号、刀片型号、刀片牌号及刀尖圆弧半径填入表1-8中。

表 1-8 数控加工刀具卡片

产品名称 或代号		零件名称	零件图号	程序编号			
工步 号	刀具 号	刀具名称	刀具型号	刀片		刀尖半径 (mm)	备注
				型号	牌号		
1	T01	机夹可转位车刀	PCGCL2525-09Q	GC435	0.8		
2	T02	机夹可转位车刀	PRJCL2525-06Q	GC435	3		
3	T03	机夹可转位车刀	PTJCL1010-09Q	GC435	0.4		
4	T04	φ18 mm 钻头					
5	T05	机夹可转位车刀	PDJNL1515-11Q	GC435	0.4		
6	T06	机夹可转位车刀	PCGCL2525-08Q	GC435	0.4		
7	T07	成型车刀			2		
8	T08	成型车刀			2		
9	T09	机夹可转位车刀	PDJNL1515-11Q	GC435	0.4		
10	T10	机夹可转位车刀	PCJCL1515-06Q	GC435	0.4		
编制			审核		批准	共 1 页	第 1 页

1.4 任务评价与总结提高

1.4.1 任务评价

对本任务评价见表 1-9。本任务在该课程考核成绩中的比例为 15%。

表 1-9 考核标准

序号	工作过程	主要内容	建议考核方式	评分标准	配分
1	资讯 (10 分)	任务相关, 知识查找	教师评价 50%, 相互评价 50%	通过查找相关知识进行学习, 按任务知识、能力的掌握情况进行评分	20
2	决策计划 (10 分)	确定方案, 编写计划	教师评价 80%, 相互评价 20%	根据整体设计方案以及采用方法的合理性, 进行评分	20
3	实施 (10 分)	方法正确, 工艺合理, 工序制定	教师评价 20%, 自己评价 30%, 相互评价 50%	根据加工工艺制定的合理性及生产效率进行评价	30

续表

序号	工作过程	主要内容	建议考核方式	评分标准	配分
4	任务总结报告 (60分)	记录实施,过程步骤	教师评价 100%	根据零件加工的任务分析、实施、总结的过程和记录情况,提出新工艺等情况评分	10
5	职业素养 团队合作 (10分)	工作积极,主动性强,组织协调与合作	教师评价 30%, 自己评价 20%, 相互评价 50%	根据工作积极主动性及相互协作情况评分	20

1.4.2 任务总结

(1) 对刀点可以设在零件上、夹具上或机床上,但必须与零件的定位基准有已知的准确关系。当对刀精度要求较高时,对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上。对于以孔定位的零件,可以取孔的中心作为对刀点。

(2) 换刀点应根据工序内容来作安排,其位置应根据换刀时刀具不碰到工件、夹具和机床的原则而定。换刀点往往是固定的点,且设在距离工件较远的地方。

(3) 数控车削加工有自己的特点和适用对象,若要充分发挥数控铣床的优势和关键作用,就应当正确选择数控铣床类型、数控加工对象与工序内容。

(4) 在制定工艺前,注意检查零件图的完整性和正确性,尤其是各图形几何要素间的相互关系是否明确,各几何要素的条件是否充分,有没有引起矛盾的多余尺寸或影响工序安排的封闭尺寸等。

(5) 制定工艺时,要注意进行零件结构工艺性的分析,如零件轮廓内圆弧尺寸是否统一、转接圆弧半径值大小是否合理、能否保证基准统一等,若不能达到要求就必须进行一定的处理。

(6) 在数控机床操作中工序相对集中,尽量在一次装夹中完成全部工序内容。

(7) 确定走刀路线首先要保证零件的加工精度和表面粗糙度,其次要方便数值计算,减少编程工作量。

通过本任务学习,学生应该对数控车削加工中的确定走刀路线和加工参数的方法有一定的认识,使学生明白任何零件的加工都必须结合零件本身的结构、精度、用途以及各个企业设备、场地、材料等多方面的因素,才能制定较好的加工工艺。

1.4.3 练习与提高

1. 问答

- (1) 数控车削的主要加工对象有哪些?其特点是什么?
- (2) 如何确定对刀点?选择对刀点的原则是什么?换刀点一般设在什么地方?为什么?
- (3) 数控车削适合加工哪些特点的回转类零件?如何选择数控车削加工的内容?
- (4) 数控铣削加工工艺性分析包括哪些内容?
- (5) 制定工艺前为何要进行零件图形分析?零件图形分析包括哪些内容?

任务2 典型零件的数学处理

2.1 任务描述及目标

数控机床编程需要计算相关点在工件坐标系中的坐标值，这些点包括零件轮廓的各相邻几何元素的交点、切点，孔的中心，刀具运动轨迹的起点、终点，用直线段或圆弧线段逼近非圆曲线各线段的交点等。本任务就是计算这些点在工件坐标系中的坐标值，即对零件图形进行数学处理。数学处理提示了一种思维的方法和模式及思维合理性的标准，它的思维方法可以直接起到帮助思考解决数控编程中的相关问题，实现优化思考。

通过本任务内容的学习，学生了解数控编程前数学处理的主要内容和基本方法，掌握利用三角函数计算法和平面解析几何计算法计算基点坐标，为数控编程做准备。

2.2 任务资讯

2.2.1 数值计算内容

对零件图形进行数学处理是编程前的一个关键性的环节，数值计算主要包括以下内容。

1. 基点和节点的坐标计算

零件的轮廓是由许多不同的几何元素组成的，如直线、圆弧、二次曲线及列表点曲线等。各几何元素间的连接点（切点或交点）称为基点。

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

2. 刀位点轨迹的计算

刀位点是标志刀具所处不同位置的坐标点，不同类型刀具的刀位点不同。对于具有刀具半径补偿功能的数控机床，在编写程序时，只要在程序的适当位置写入建立刀具补偿的有关指令，就可以保证在加工过程中，刀位点按一定的规则自动偏离编程轨迹，达到正确加工的目的。这时可直接以零件轮廓形状计算出各基点和节点坐标，并作为编程时的坐标数据。

当机床所采用的数控系统不具备刀具半径补偿功能时，编程时，需对刀具的刀位点轨迹进行数值计算，按零件轮廓的等距线编程。

3. 辅助计算

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

2.2.2 基点坐标的计算

零件轮廓或刀位点轨迹的基点坐标计算，一般采用代数计算法和平面几何计算法，但手工编程时采用代数计算法和平面解析几何计算法进行数值计算比较烦琐。根据图形间的几何关系可利用三角函数计算法求解基点坐标，这是手工编程中进行数学处理时应重点掌握的方法之一。应用平面解析几何计算法可省掉一些复杂的三角关系，而用简单的数学方程即可准确地描述零件轮廓的几何图形，因此分析和计算的过程都能得到简化，减少了较多层次的中间运算，并且不易出错。因此，在数控机床加工的手工编程中，平面解析几何计算法是应用较普遍的计算方法之一。

直线与圆、圆与圆的关系有四种常见类型，即直线与圆相切、直线与圆相交、两圆相交以及直线与两圆相切。

1. 应用构造基点三角形，解直角三角形的方法求解基点的坐标

如图 2-1 所示，直线 CD 与圆 A 相切于 C 点，则点 C 为基点，过点 A 作平行于 X 轴的直线 AE ，过 C 作 AE 的垂线 CB ，垂足为 B ，则称 $\triangle ABC$ 为基点三角形。显然，基点三角形一定是直角三角形。圆心、基点和垂足是构成基点三角形的三个顶点，构造基点三角形的关键是作出垂足。一般方法是，过圆心作 X 轴的平行线，再过基点作这条平行线的垂线，便可以作出垂足。

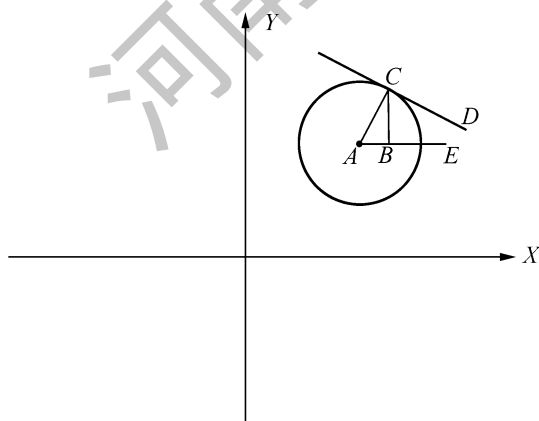


图 2-1 基点三角形图

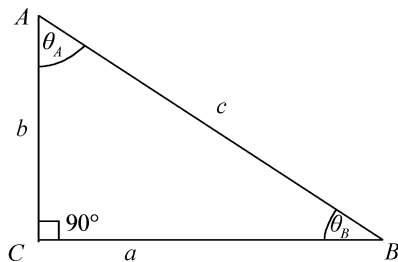


图 2-2 直角三角形的几何关系

图 2-2 为直角三角形的几何关系，三角函数计算公式列于表 2-1。

如图 2-1, 设 $\triangle ABC$ 为基点三角形, 点 A 为圆心, 坐标为 $A(x_A, y_A)$, 圆 A 的半径为 R_A , 点 $C(x_C, y_C)$ 为基点, 点 B 为垂足, 于是基点 C 的坐标公式可以表示为

$$\begin{cases} x_C = x_A \pm R_A \cos A \\ y_C = y_A \pm R_A \sin A \end{cases}$$

式中, “ \pm ” 符号由基点与圆心的相对位置所决定。如果把圆心 A 看成参照点的话, 基点的位置就有 4 种情形: 右上型、左上型、左下型、右下型, 相对应的符号应该是 $(+, +)$ $(-, +)$ $(-, -)$ $(+, -)$, 这和直角坐标系中处于 4 个象限的点的坐标符号相同。

由上面公式可知, 当 $A(x_A, y_A)$ 和 R_A 已知时, 求圆心角 θ_A 便成为计算基点坐标的关键。在不同条件下, 计算圆心角 θ_A 的方法通常可以从以下两个方面考虑: ①根据切线或者交线与 X 轴的夹角得出; ②若两圆的圆心坐标已知, 可以通过计算连心线与 X 轴的夹角而得出。

表 2-1 直角三角形中的几何关系

已知角	求相应的边	已知边	求相应的角
θ_A	$A / C = \sin(\theta_A)$	A, C	$\theta_A = \sin^{-1}(A / C)$
θ_A	$B / C = \cos(\theta_A)$	B, C	$\theta_A = \cos^{-1}(B / C)$
θ_A	$A / B = \tan(\theta_A)$	A, B	$\theta_A = \tan^{-1}(A / B)$
θ_B	$B / C = \sin(\theta_B)$	B, C	$\theta_B = \sin^{-1}(B / C)$
θ_B	$A / C = \cos(\theta_B)$	A, C	$\theta_B = \cos^{-1}(A / C)$
θ_B	$B / A = \tan(\theta_B)$	B, A	$\theta_B = \tan^{-1}(B / A)$
勾股定理	$C^2 = A^2 + B^2$	三角形内角和	$\theta_A + \theta_B + 90^\circ = 180^\circ$

2. 应用平面解析几何算法, 联立方程方法求解基点坐标

图 2-3、图 2-4 为直线与圆的关系, 常用平面解析几何法联立方程与公式列于表 2-2。

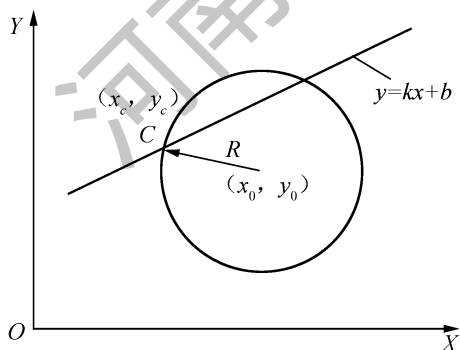


图 2-3 直线与圆弧相交

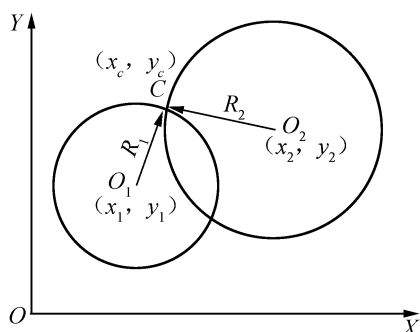


图 2-4 圆弧与圆弧相交

表 2-2 常用平面解析几何法

类型	已知条件	所求点	方程组	公式
直线与圆弧相交或相切	已知直线方程 $y=kx+b$	以点 (x_0, y_0) 为圆心, 半径为 R 的圆与该直线的交点坐标 (x_c, y_c)	$\begin{cases} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = R^2 \\ y=kx+b \end{cases}$	$A=1+k^2$ $B=2[k(b-y_0)-x_0]$ $C=x_0^2 + (b-y_0)^2 - R^2$ $x_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ (求 x_c 较大值时取“+”) $y_c = kx_c + b$
圆弧与圆弧相交或相切	两相交圆的圆心及半径分别为 $(x_1, y_1), R_1, (x_2, y_2), R_2$	求交点坐标 (x_c, y_c)	$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = R_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = R_2^2 \end{cases}$	$\Delta x = x_2 - x_1$ $\Delta y = y_2 - y_1$ $D = \frac{(x_2^2 + y_2^2 - R_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 - R_1^2)}{2}$ $A = 1 + \left(\frac{\Delta x}{\Delta y}\right)^2$ $B = 2 \left[\left(y_1 - \frac{D}{\Delta y}\right) \frac{\Delta x}{\Delta y} - x_1 \right]$ $C = \left(y_1 - \frac{D}{\Delta y}\right)^2 + x_1^2 + R_1^2$ $x_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ (求 x_c 较大值时取“+”) $y_c = \frac{D - \Delta x x_c}{\Delta y}$

在表 2-2 中, 当直线与圆相切时, 取 $B^2 - 4AC = 0$, 此时 $x_c = B / (2A)$, 其余计算公式不变; 当两圆相切时, $B^2 - 4AC = 0$, 其余计算公式不变。

2.2.3 非圆曲线节点坐标的计算

1. 非圆曲线节点坐标计算的主要步骤

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

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

(2) 确定编程允许误差, 即应使 $\Delta \leq \Delta_{\text{编}}$ 。

(3) 选择数学模型, 确定计算方法。在决定采取什么算法时, 主要应考虑的因素有两条, 其一是尽可能按等误差的条件, 确定节点坐标位置, 以便最大程度地减少程序段的数目; 其二是尽可能寻找一种简便的算法, 简化计算机编程, 省时快捷。

- (4) 根据算法，画出计算机处理流程图。
- (5) 用高级语言编写程序，上机调试程序，并获得节点坐标数据。

2. 常用的算法

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

(1) 等间距法直线段逼近。等间距法就是将某一坐标轴划分成相等的间距。如图 2-5 所示。

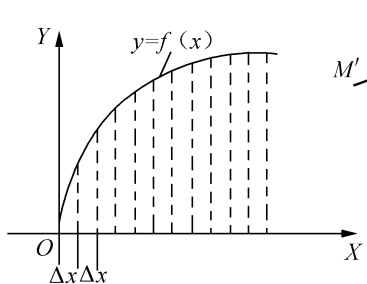


图 2-5 等间距法直线段逼近

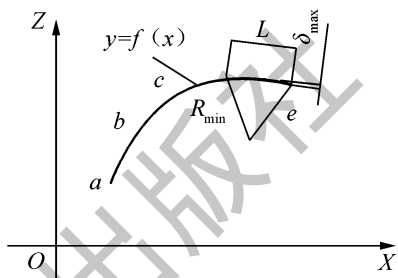


图 2-6 等程序段法直线段逼近

(2) 等程序段法直线段逼近的节点计算。等程序段法就是使每个程序段的线段长度相等。如图 2-6 所示。

(3) 等误差法直线段逼近的节点计算。任意相邻两节点间的逼近误差为等误差。各程序段误差 Δ 均相等，程序段数目最少。但计算过程比较复杂，必须由计算机辅助才能完成计算。在采用直线段逼近非圆曲线的拟合方法中，是一种较好的拟合方法。如图 2-7 所示。

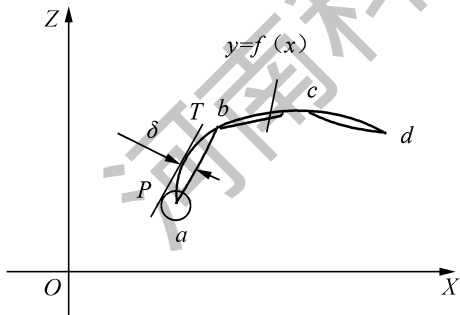


图 2-7 等误差法直线段逼近

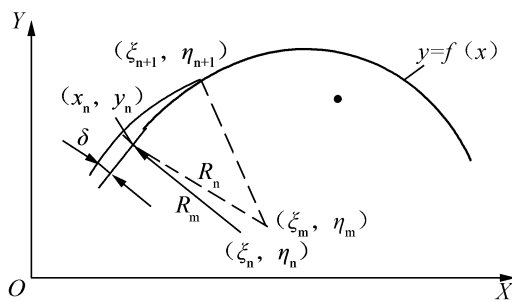


图 2-8 曲率圆法圆弧段逼近

(4) 曲率圆法圆弧段逼近的节点计算。曲率圆法是用彼此相交的圆弧逼近非圆曲线。其基本原理是从曲线的起点开始，作与曲线内切的曲率圆，求出曲率圆的中心。如图 2-8 所示。

(5) 三点圆法圆弧段逼近的节点计算。三点圆法是在等误差法直线段逼近求出各节点的基础上，通过连续三点作圆弧，并求出圆心点的坐标或圆的半径。如图 2-9 所示。

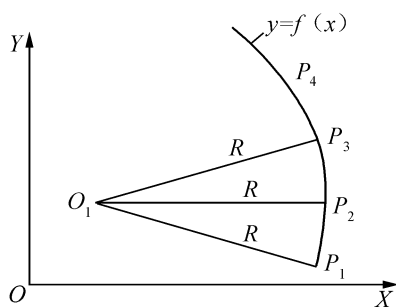


图 2-9 三点圆法圆弧段逼近

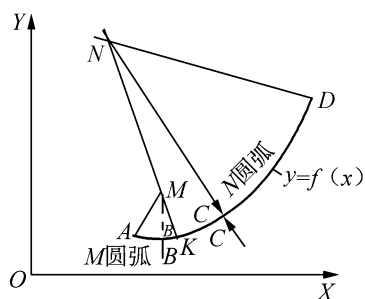


图 2-10 相切圆法圆弧段逼近

(6) 相切圆法圆弧段逼近的节点计算。如图 2-10 所示, 采用相切圆法, 每次可求得两个彼此相切的圆弧, 由于在前一个圆弧的起点处与后一个终点处均可保证与轮廓曲线相切, 因此, 整个曲线是由一系列彼此相切的圆弧逼近实现的。可简化编程, 但计算过程烦琐。

2.2.4 列表曲线型值点坐标的计算

实际零件的轮廓形状, 有的是由直线、圆弧或其他非圆曲线组成的, 还有些零件的轮廓形状是通过实验或测量的方法得到的。零件的轮廓数据在图样上是以坐标点的表格形式给出, 这种由列表点 (又称为型值点) 给出的轮廓曲线称为列表曲线。

在列表曲线的数学处理方面, 常用的方法有牛顿插值法、三次样条曲线拟合、圆弧样条拟合和双圆弧样条拟合等。由于以上各种拟合方法在使用时, 往往存在着某种局限性, 目前处理列表曲线的方法通常是采用二次拟合法。

为了在给定的列表点之间得到一条光滑的曲线, 对列表曲线逼近一般有以下要求。

- (1) 方程式表示的零件轮廓必须通过列表点。
- (2) 方程式给出的零件轮廓与列表点表示的轮廓凹凸性应一致, 即不应在列表点的凹凸性之外再增加新的拐点。
- (3) 为使数学描述不过于复杂, 通常一个列表曲线要用许多参数不同的相同方程式来描述, 以期望在方程式的两两连接处有连续的一阶导数或二阶导数, 若不能保证一阶导数连续, 则希望连接处两边一阶导数的差值应尽量小。

2.2.5 数控车床使用假想刀尖点时偏置计算

在数控车削加工中, 为了对刀的方便, 总是以“假想刀尖”点来对刀。所谓假想刀尖点, 是指如图 2-11 中 M 点的位置。由于刀尖圆弧的影响, 仅仅使用刀具长度补偿, 而不对刀尖圆弧半径进行补偿, 在车削锥面或圆弧面时, 会产生欠切或过切的情况, 如图 2-12 所示。

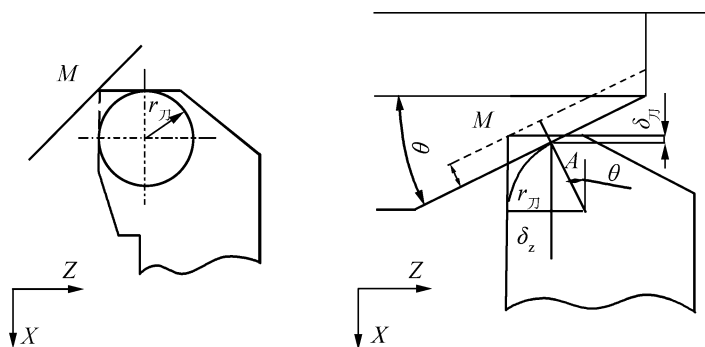


图 2-11 假想刀尖点编程时的补偿计算

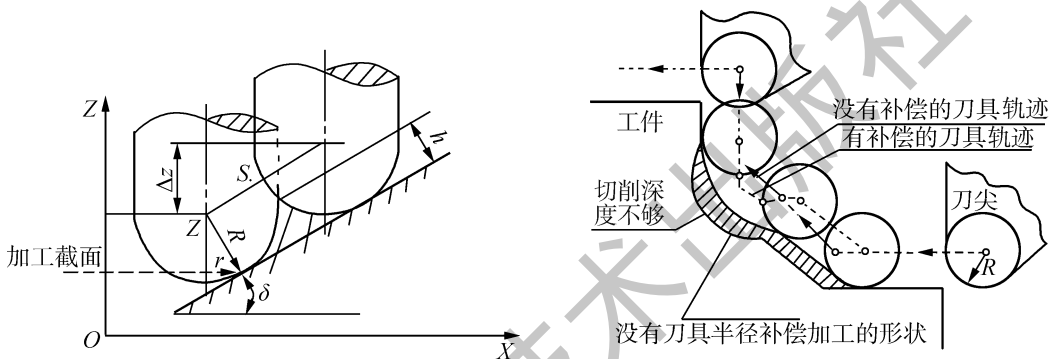


图 2-12 欠切与过切现象图

图 2-13 行距与切残量的关系

2.2.6 简单立体型面零件的数值计算

用球头刀或圆弧盘铣刀加工立体型面零件，刀痕在行间构成了被称为切残量的表面不平度 h ，又称为残留高度。残留高度对零件的加工表面质量影响很大，须引起注意。如图 2-13 所示。

数控机床加工简单立体型面零件时，数控系统要有三个坐标控制功能，但只要有两坐标连续控制（两坐标联动），就可以加工平面曲线。刀具沿 Z 方向运动时，不要求 X 、 Y 方向也同时运动。这种用行切法加工立体型面时，三坐标运动、两坐标联动的加工编程方法被称为两轴半联动加工。

节点计算一般都比较复杂，有时已不大可能靠手工处理，必须借助计算机处理，常采用计算机自动编程来编制加工程序。这里重点介绍手工编程中基点计算的常用方法。

2.3 任务实施

2.3.1 零件图上基点计算

1. 用三角形算法计算基点
准备计算器、计算机、零件图纸。

例 1-1 如图 2-14 所示。圆 $O_1(0, 40)$, $R=25$ mm; 圆 $O_2(50, 100)$, $R=55$ mm; 圆 $O_3(60, 20)$, $R=15$ mm, F 点坐标 $(65, 0)$, 试求基点 A 、 B 、 C 、 D 、 E 在工件坐标系中的值。

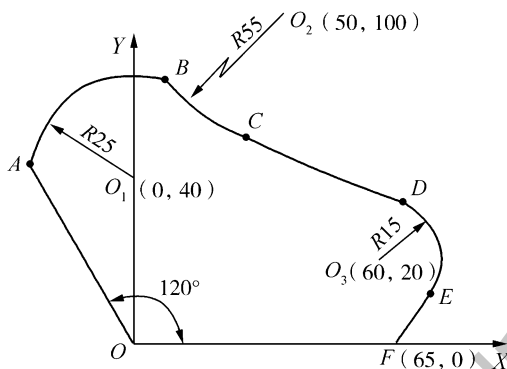


图 2-14 零件轮廓

求解过程如下。

(1) 按直线与圆相交法求 A 点坐标。

$$\Delta x = x_2 - x_1 = 0 \text{ mm}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = 40 \text{ mm}$$

$$a_2 = \arcsin \left| \frac{\Delta x \sin a_1 - \Delta y \cos a_1}{R} \right| = 53.1301^\circ$$

$$\beta = |a_1 + a_2| = |-60^\circ + 53.1301^\circ| = 6.869^\circ$$

$$x_c = x_2 - R |\cos \beta| = -24.8205 \text{ mm}$$

$$y_c = y_2 + R \sin \beta = 42.9904 \text{ mm}$$

求出 A 点坐标为 $(-24.821, 42.990)$ 。

(2) 按两圆相交法求 B 点坐标。

$$\Delta x = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 60 \text{ mm}$$

$$d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} = 78.1025 \text{ mm}$$

$$a_1 = \arccos \frac{R_1^2 + d^2 - R_2^2}{2R_1 d} = 18.65299^\circ$$

$$\beta = |a_1 + a_2| = 68.8474^\circ$$

$$x_c = x_1 + R_1 \cos |\beta| = 9.021 \text{ mm}$$

$$y_c = y_1 + R_1 \sin \beta = 63.316 \text{ mm}$$

求出 B 点坐标为 $(9.021, 63.316)$ 。

(3) 按求两圆公切线切点的方法求 C 、 D 两点坐标。

$$\Delta x = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 80 \text{ mm}$$

$$a_1 = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} = -82.875^\circ$$

$$a_2 = \arcsin \frac{R_{大} + R_{小}}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = 60.2551^\circ$$

$$\beta = |a_1 + a_2| = 22.6199^\circ$$

$$x_{c1} = x_1 - R_1 \sin \beta = 28.846 \text{ mm}$$

$$y_{c1} = y_1 - R_1 |\cos \beta| = 49.231 \text{ mm}$$

$$x_{c2} = x_2 - R_2 \sin \beta = 65.769 \text{ mm}$$

$$y_{c2} = y_2 - R_2 |\cos \beta| = 33.846 \text{ mm}$$

求出 C 点坐标为 (28.846, 49.231); D 点坐标为 (65.769, 33.846)。

(4) 按直线与圆相切求切点 E 坐标。

$$\Delta x = x_2 - x_1 = -5 \text{ mm}$$

$$\Delta y = y_2 - y_1 = 20 \text{ mm}$$

$$a_1 = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} = -75.96376^\circ$$

$$a_2 = \arcsin \frac{R}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} = 46.6861^\circ$$

$$\beta = |a_1 + a_2| = 122.6399^\circ$$

$$x_e = x_2 + R |\sin \beta| = 72.630 \text{ mm}$$

$$y_e = y_2 + R |\cos \beta| = 11.907 \text{ mm}$$

求出 E 点坐标为 (72.630, 11.907)。

2. 用平面解析几何算法计算基点

例 1-2 计算用四心法加工 $a=150 \text{ mm}$, $b=100 \text{ mm}$ 时的近似椭圆所用数值。

用四心法加工椭圆工件时, 一般选椭圆的中心为工件零点, 如图 2-15 所示。

(1) 四心法作近似画椭圆。用四心法加工椭圆工件时, 数值计算的基础就是用四心法作近似椭圆的方法, 如图 2-16 所示。

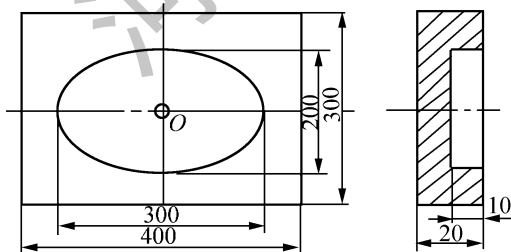


图 2-15 典型零件

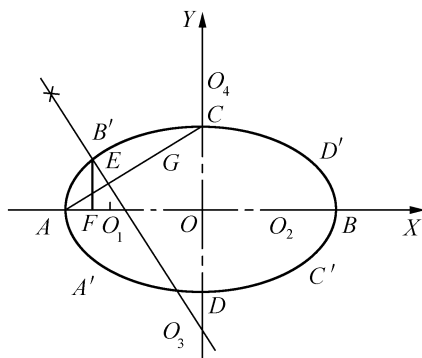


图 2-16 椭圆的近似作法

1) 作相互垂直平分的线段 AB 与 CD 交与 O, 其中 $AB=2a=300 \text{ mm}$ 为长轴, $CD=2b=200 \text{ mm}$ 为短轴。

2) 连接 AC, 取 $CG=AO-OG=50 \text{ mm}$ 。

- 3) 作 AG 的垂直平分线分别交 AG 、 AO 、 OD 的延长线于 E 、 O_1 、 O_3 。
 4) 作 O_1 、 O_3 的对称点 O_2 、 O_4 。
 5) 分别以 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 为圆心, O_1A 、 O_2B 、 O_3C 、 O_4D 为半径作圆, 分别与 B' 、 A' 、 D' 、 C' 相切, 即得一近似椭圆。

(2) 数值计算。用四心法加工椭圆工件时, 数值计算就是求 B' 、 A' 、 D' 、 C' , 以及 O_1 、 O_2 、 O_3 、 O_4 的坐标, 由四心法作椭圆的画法可知:

B' 与 A' 、 D' 、 C' 是对称的, O_1 、 O_3 与 O_2 、 O_4 也是对称的, 因此只要求出 B' 、 O_1 、 O_3 点的坐标, 其他点的坐标也将迎刃而解。

$$AO = 150 \text{ mm} \quad OC = 100 \text{ mm}$$

$$AC = \sqrt{150^2 + 100^2} \text{ (mm)} = 180.2776 \text{ mm}$$

由用四心法作椭圆的方法可知:

$$GC = AO - OC = 50 \text{ mm}$$

$$\triangle B'FO_1 \cong \triangle AEO_1$$

$$B'F = AE = 65.1388 \text{ mm}$$

$$AO_1 = B'O_1$$

又 $\triangle B'FO_1 \sim \triangle AOC$

$$\frac{B'F}{AO} = \frac{B'O_1}{AC} = \frac{O_1F}{CO}$$

$$B'O_1 = 78.2871 \text{ mm}$$

$$O_1F = 43.4258 \text{ mm}$$

$$R_1 = AO_1 = B'O_1 = 78.2871 \text{ mm}$$

$$OO_1 = AO - O_1A = 71.7129 \text{ mm}$$

$$OF = O_1F + O_1O = 115.1387 \text{ mm}$$

O_1 点坐标为 $(-71.7129, 0)$, B' 点坐标为 $(-115.1387, 65.1388)$;

$$\triangle B'FO_1 \sim \triangle O_3OO_1$$

$$\frac{B'F}{OO_3} = \frac{O_1F}{O_1O}$$

$$OO_3 = 107.5695 \text{ mm}$$

$$R_3 = O_3C = 207.5695 \text{ mm}$$

O_3 点的坐标为 $(0, -107.5695)$ 。当然, 这些点的坐标也可以用解析法求得。

由 $\lambda = \frac{AE}{EC} = \frac{AE}{EG+GC} = 0.5655$ 与定比分点定理可得

E 点坐标为 $(-95.816, 36.1226)$;

又直线 AC 的斜率为 $K_{AC} = 100/150 = 0.667$;

且 $B'O_3 \perp AC$;

直线 $B'O_3$ 的方程为

$$y - 36.1226 = -1.5(x + 95.816)$$

即

$$1.5x + y + 107.6014 = 0$$

O_1 、 O_3 点的坐标为 $(-71.7129, 0)$, $(0, -107.5695)$

圆 O_1 、 O_3 的方程为

$$\begin{aligned}(x+71.7129)^2+y^2 &= (78.2871)^2 \\ x^2+(y+107.5695)^2 &= (207.5695)^2\end{aligned}$$

由 O_1 、 O_3 、 B' 点的坐标, 可以很容易地求出 O_2 、 O_4 、 A' 、 C' 、 D' 点的坐标。

3. 圆弧手柄基点计算

例 1-3 计算如图 2-17 所示圆弧手柄的基点。

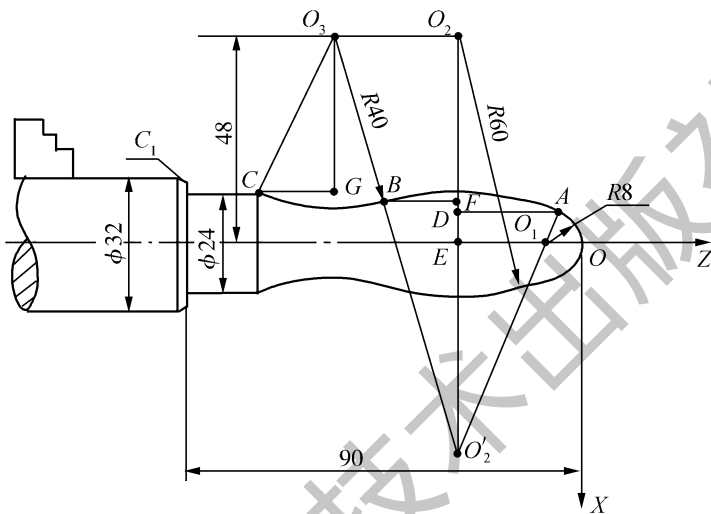


图 2-17 圆弧手柄的基点计算

其基点计算过程如下。

如图 2-17 所示, 作 O_2 关于 Z 轴的对称点 O'_2 , 可判断 $\odot O'_2$ 与 $\odot O_1$ 内切, 切点为 A , 与 $\odot O_3$ 外切, 切点为 B ; 圆 O_3 与 $\phi 24$ 外圆交于 C 。因此基点的计算, 主要就是计算出点 A 、 B 、 C 的坐标。

(1) 计算基点 A 。由于 $\odot O'_2$ 与 $\odot O_1$ 内切, A 为切点, 则可判断 O'_2 与 O_1 和 A 在一条直线上, 连此三点成一条直线。

由 A 作 $AD \perp O_2 O'_2$ 于 D , 由 O_1 作 $O_1 E \perp O_2 O'_2$ 于 E 。

其中 $|O'_2 A| = 60$, $|O_1 A| = 8$, 则 $|O'_2 O_1| = 60 - 8 = 52$

又 $|O'_2 E| = |O_2 E| = 48$ 。

$$\begin{aligned}\text{则在 } Rt\triangle O'_2 O_1 E \text{ 中, } |O'_2 O_1|^2 &= |O_1 E|^2 + |O'_2 E|^2 \Rightarrow |O_1 E| = \sqrt{|O'_2 O_1|^2 - |O'_2 E|^2} \\ &= \sqrt{52^2 - 48^2} \\ &= 20\end{aligned}$$

在 $Rt\triangle O'_2 AD$ 中,

$$\begin{aligned}\frac{|AD|}{|O_1 E|} &= \frac{|O'_2 A|}{|O'_2 O_1|} \Rightarrow |AD| = \frac{|O'_2 A| \cdot |O_1 E|}{|O'_2 O_1|} = \frac{60 \times 20}{52} = 23.077 \\ \frac{|O'_2 E|}{|ED|} &= \frac{|O'_2 O_1|}{|O_1 A|} \Rightarrow |ED| = \frac{|O'_2 E| \cdot |O_1 A|}{|O'_2 O_1|} = \frac{48 \times 8}{52} = 7.385\end{aligned}$$

若采用直径编程原则, 则 A 点的 X 坐标 $= 2 \times |ED| = 2 \times 7.385 = 14.77$

A 点的 Z 坐标 $= (8 + |O_1E|) = - (8 + 20 - 23.07) = -4.93$ 。

(2) 计算基点 B 。由于 $\odot O'_2$ 与 $\odot O_3$ 外切, B 为切点, 则可判断 O'_2 与 B 和 O_3 在一条直线上, 连此三点成一条直线。

由 B 作 $BF \perp O'_2O_2$ 于 F , 同时连接 O_3O_2 。

其中 $|O'_2B| = 60$, $|BO_3| = 40$, 则 $|O'_2O_3| = 60 + 40 = 100$

又易见 $|O'_2O_2| = |O'_2E| + |O_2E| = 48 + 48 = 96$

则在 $Rt\triangle O'_2O_3O_2$ 中,

$$\begin{aligned} |O'_2O_3|^2 &= |O_3O_2|^2 + |O'_2O_2|^2 \Rightarrow |O_3O_2| = \sqrt{|O'_2O_3|^2 - |O'_2O_2|^2} \\ &= \sqrt{100^2 - 96^2} \\ &= 28 \end{aligned}$$

$$\frac{|BF|}{|O_3O_2|} = \frac{|O'_2B|}{|O'_2O_3|} \Rightarrow |BF| = \frac{|O'_2B| \cdot |O_3O_2|}{|O'_2O_3|} = \frac{60 \times 28}{100} = 16.8$$

在 $Rt\triangle O'_2BF$ 中,

$$\begin{aligned} |O'_2B|^2 &= |BF|^2 + |O'_2F|^2 \Rightarrow |O'_2F| = \sqrt{|O'_2B|^2 - |BF|^2} \\ &= \sqrt{60^2 - (16.8)^2} \\ &= 57.6 \end{aligned}$$

则 $|EF| = |O'_2F| - |O'_2E| = 57.6 - 48 = 9.6$

若采用直径编程原则, 则 B 点的 X 坐标 $= 2 \times |EF| = 2 \times 9.6 = 19.2$

B 点的 Z 坐标 $= - (8 + |O_1E| + |BF|) = - (8 + 20 + 16.8) = -44.8$

(3) 计算基点 C 。连接 O_3C 并作 $Rt\triangle O_3CG$, 则 $|O_3C| = 40$, 得 $|O_3G| = 48 - 12 = 36$, 并可直接得到 C 点的 X 坐标。

若采用直径编程原则, 则 C 点的 X 坐标 $= 2 \times 12 = 24$

$$\begin{aligned} \text{在 } Rt\triangle O_3CG \text{ 中, } |O_3C|^2 &= |CG|^2 + |O_3G|^2 \Rightarrow |CG| = \sqrt{|O_3C|^2 - |O_3G|^2} \\ &= \sqrt{40^2 - 36^2} \\ &= 17.436 \end{aligned}$$

若 C 点的 Z 坐标 $= - (8 + |O_1E| + |O_3O_2| + |CG|) = - (8 + 20 + 28 + 17.436) = -73.436$

因此, 主要基点 A 、 B 、 C 的坐标值分别为 $(14.77, -4.93)$ $(19.2, -44.8)$ $(24, -73.436)$ 。

2.3.2 节点的计算

节点计算一般都比较复杂, 有时靠手工处理已不大可能, 必须借助计算机作辅助处理, 不用手工计算。

2.4 任务评价与总结提高

2.4.1 任务评价

对本任务评价见表 2-3。本任务在该课程考核成绩中的比例为 15%。

表 2-3 考核标准

序号	工作过程	主要内容	建议考核方式	评分标准	配分
1	资讯 (10 分)	任务相关, 知识查找	教师评价 50%, 相互评价 50%	通过查找相关知识进行学习, 按任务知识、能力的掌握情况进行评分	15
2	决策计划 (10 分)	确定方案, 编写计划	教师评价 80%, 相互评价 20%	根据整体设计方案以及采用方法的合理性进行评分	20
3	实施 (10 分)	方法合理, 计算快捷, 准确率高	教师评价 20%, 自己评价 30%, 相互评价 50%	根据计算的准确性, 结合三方面评价评分	30
4	任务总结报告 (60 分)	记录实施, 过程步骤	教师评价 100%	根据基点和节点计算的任务分析、实施、总结的过程和记录情况, 提出新建议等情况评分	15
5	职业素养, 团队合作 (10 分)	工作积极主动, 组织协调与合作	教师评价 30%, 自己评价 20%, 相互评价 50%	根据工作积极主动性, 文明生产情况以及相互协作情况评分	20

2.4.2 任务总结

根据零件图样要求, 按照已确定的加工路线和允许的编程误差, 计算出机床数控系统所需输入的数据, 这称为数控编程的数值计算。数值计算的内容有基点坐标的计算、节点坐标的计算、刀具中心轨迹的计算、辅助计算。

直线和圆弧组成的零件轮廓的基点计算采用初等几何的方法, 手工编程时, 常采用三角函数算法和平面解析几何算法来求解基点的坐标。

非圆曲线的节点计算有直线逼近法、圆弧逼近法。用直线逼近非圆曲线的常用数学方法有三种: 等间距法、等步长法和等误差法。常用的用圆弧逼近非圆曲线的节点计算方法有两种: 圆弧分割法和三点圆作图法。对列表曲线进行数学处理时, 常用数学拟合的方法逼近零件轮廓, 即根据已知列表点 (也称型值点) 来推导出用于拟合的数学模型。节点计算一般都比较复杂, 有时靠手工处理已不大可能, 必须借助计算机做辅助处理, 常采用计算机自动编程来编制加工程序。

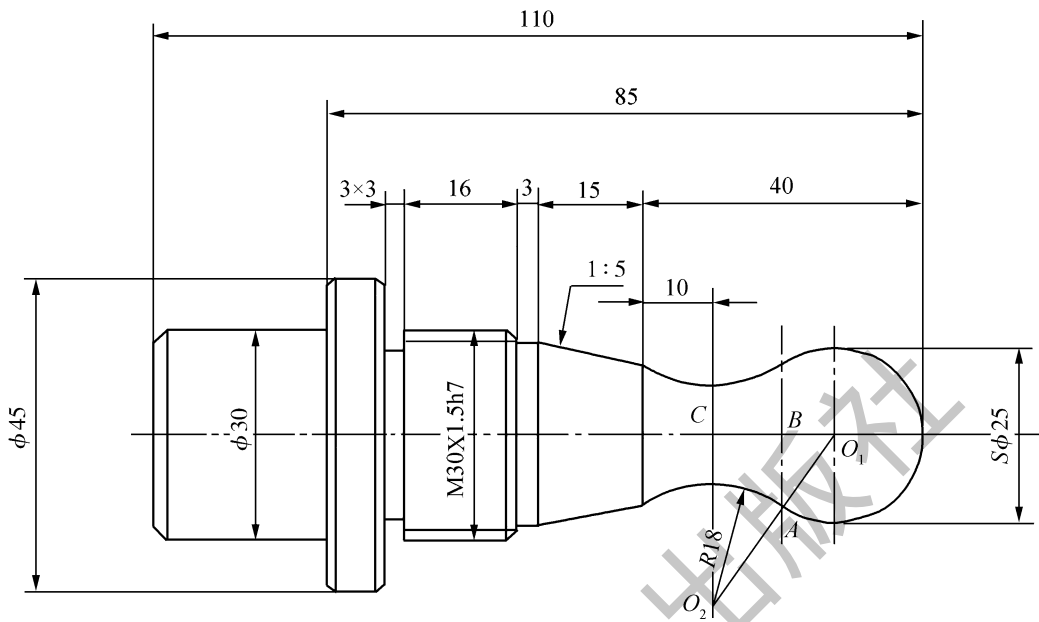


图 2-19 零件图