

# 模具 CAD\_CAM

[HotMold.com](http://HotMold.com) 收集整理 欢迎转载

# 目 录

前言			
第一章 概论	1		
第一节 CAD/CAM 的基本概念	1		
第二节 模具 CAD/CAM 技术的应用	3		
第三节 建立 CAD/CAM 系统的过程和方法	6		
第四节 CAD/CAM 的发展趋势	10		
习题	11		
第二章 模具 CAD/CAM 系统的组成	12		
第一节 模具 CAD/CAM 系统的硬件	12		
第二节 模具 CAD/CAM 系统的软件	18		
习题	21		
第三章 数据的处理方法	22		
第一节 数表和线图的处理方法	22		
第二节 用文件系统管理数据的方法	27		
第三节 数据库及其应用	30		
习题	38		
第四章 图形变换	39		
第一节 二维图形变换	39		
第二节 三维图形变换	42		
习题	46		
第五章 几何造型	48		
第一节 几何造型的一般概念	48		
第二节 几何造型中的形体表示模式与数据结构	54		
第三节 一个用于冲压件的几何造型系统	59		
习题	69		
第六章 自动绘图	70		
第一节 绘图系统	70		
第二节 自动绘图机	71		
第三节 绘图软件	74		
第四节 Auto CAD 绘图软件包及其应用	75		
习题	83		
第七章 数控加工原理与程序编制	84		
第一节 概述	84		
第二节 数控编程中的工艺处理	97		
第三节 数控加工程序的编制	104		
第四节 数控自动编程技术	113		
第五节 数控电火花线切割加工的程序编制	124		
习题	129		
第八章 冲模与挤压模 CAD/CAM	131		
第一节 冲裁模 CAD/CAM 系统的结构与功能	131		
第二节 毛坯排样的优化设计	134		
第三节 冲裁工艺方案的设计	139		
第四节 冲裁模结构设计	143		
第五节 挤压模 CAD/CAM 系统的结构	149		
第六节 组合挤压凹模的优化设计	151		
第七节 挤压模具的结构设计	155		
习题	160		
第九章 锻模 CAD/CAM	161		
第一节 利用成组技术建立锻模 CAD/CAM 系统的方法	161		
第二节 轴对称锻件锻模的 CAD/CAM 系统	164		
第三节 长轴类锻模的 CAD/CAM 系统	168		
第四节 形状复杂性和飞边槽的有关算法	176		
第五节 预锻型槽的设计	179		
习题	182		
第十章 注塑模具 CAD/CAM	183		
第一节 注塑模 CAD/CAE/CAM 概			

述 .....	183	附录 A dBASE II 的常用命令 .....	204
第二节 注塑模结构 CAD .....	186	附录 B Auto CAD 绘图软件的一些	
第三节 注塑成型流动模拟 .....	192	命令 .....	209
第四节 注塑模冷却系统模拟 .....	198	参考文献 .....	213
习题 .....	203		

# 第一章 概 论

## 第一节 CAD/CAM 的基本概念

### 一、概念

CAD (计算机辅助设计) 和 CAM (计算机辅助制造) 是 60 年代以来迅速发展起来的一门新兴的综合性计算机应用技术。计算机辅助设计和制造, 简称 CAD/CAM, 指的是以计算机作为主要技术手段, 处理各种数字信息与图形信息, 辅助完成产品设计和制造中的各项活动。

计算机辅助设计是人和计算机相结合、各尽所长的新型设计方法。从思维的角度看, 设计过程包含分析和综合两个方面的内容。人可以进行创造性的思维活动, 将设计方法经过综合、分析, 转换成计算机可以处理的数学模型和解析这些模型的程序。在程序运行过程中, 人可以评价设计结果, 控制设计过程; 计算机则可以发挥其分析计算和存储信息的能力, 完成信息管理、绘图、模拟、优化和其他数值分析任务。人和计算机相结合, 在设计过程中两者发挥各自的优势, 有利于获得最优设计结果, 缩短设计周期。

计算机辅助制造是利用计算机对制造过程进行设计、管理和控制。一般说来, 计算机辅助制造包括工艺设计、数控编程和机器人编程等内容。工艺设计主要是确定零件的加工方法、加工顺序和所用设备。近年来, 计算机辅助工艺设计 (CAPP) 已逐渐形成了一门独立的技术分支。当采用 NC (Numerical Control 数控) 机床加工零件时, 需要编制 NC 机床的控制程序。计算机辅助编制 NC 程序, 不但效率高, 而且错误率很低。在自动化的生产线上, 采用机器人完成装配和传送等项任务。利用计算机也可以实现机器人编程。在本书的 CAM 部分, 主要阐述 NC 加工原理与程序编制, 而不涉及机器人编程问题。

计算机辅助设计和计算机辅助制造关系十分密切。开始, 计算机辅助几何设计和数控加工自动编程是两个独立发展的分支。但是随着它们的推广应用, 二者之间的相互依存关系变得越来越明显了。设计系统只有配合数控加工, 才能充分显示其巨大的优越性。另一方面, 数控技术只有依靠设计系统产生的模型才能发挥其效率。所以, 在实际应用中二者很自然地紧密结合起来, 形成了计算机辅助设计与制造集成系统。通常, CAD/CAM 系统指的就是这种集成系统。在 CAD/CAM 系统中, 设计和制造的各个阶段可利用公共数据库中的数据。公共数据库将设计与制造过程紧密联系为一个整体。数控自动编程系统利用设计的结果和产生的模型, 形成数控加工机床所需的信息。CAD/CAM 可大大缩短产品的制造周期, 显著提高产品质量, 从而产生巨大的经济效益。

CAD/CAM 系统可以从不同的角度加以分类。

按系统的功能范围, CAD/CAM 系统可分为通用系统和专用系统两类。通用的 CAD/CAM 系统功能全面, 适用范围较广。例如, CATIA、I-DEAS、CADD5、Pro/Engineer 和 EUCLID 等系统均属此类。这类 CAD/CAM 系统通常包括线框、实体和曲面造型模块、绘图

模块、装配与零件设计模块、有限元分析模块、数据交换与传输模块和 NC 加工模块。专用的 CAD/CAM 系统指的是那些为特定的应用而开发的系统。这类系统通常只能适用于一定的专业，或用于解决某一类问题。例如，冲模 CAD/CAM 系统和注塑模 CAD/CAM 系统皆属此类。

按运行方式，CAD/CAM 系统可分为交互式系统和自动化系统。虽然人们正在研究以人工智能方法为基础的 CAD/CAM 系统，但在目前的技术发展水平方面计算机尚难以自动地完成设计和制造中的全部工作。因此，绝大多数 CAD/CAM 系统都属于交互式系统。这种系统以交互方式运行，由计算机检索数据，分析计算，并将运算结果以图形或数据的形式显示在屏幕上，用户可利用键盘和图形板等交互设备输入参数，选择方案，修改设计，控制运行的进程。

另外，CAD/CAM 系统从硬件角度可分为主机系统、工作站系统和微机系统；按软件的开放性可分为交钥匙系统（Turn-Key System）和可编程系统（Programmable System）。

CAD/CAM 技术随着计算机硬件和软件技术的迅速发展日趋完善，在机械、电子、宇航和建筑等部门得到广泛应用。CAD/CAM 技术使产品的设计制造和组织生产的传统模式产生了深刻的变革，成为产品更新换代的关键技术，被人们称为产业革命的发动机。在工业发达国家，CAD/CAM 已经形成了一个推动各行业技术进步的、具有相当规模的新兴产业部门。

模具的设计、制造水平和产品的质量、成本及生产周期息息相关。随着制造业的发展，产品对模具的要求越来越高。传统的模具设计与制造方式已无法适应工业发展的需要，CAD/CAM 技术成为解决模具设计与制造中的薄弱环节的有效途径。随着模具 CAD/CAM 技术的广泛应用，必将给模具行业的技术改造和发展带来深刻影响，从而大大促进制造业的发展。

## 二、计算机在设计和制造中的辅助作用

计算机辅助设计与制造这一术语本身包含了这样的意思，即在人能有效发挥作用的地方不用计算机，反之在计算机可被有效利用的场合不用人。计算机在设计和制造过程中起重要的辅助作用，但不是取代人的作用。为了弄清二者的作用，使人和计算机更好地结合，共同完成产品的设计与制造，有必要比较一下人和计算机的特点。表 1-1 为人机特点的比较，由表中可以看出人和计算机的能力在绝大多数方面是互补的。在某些地方人胜过计算机，在另一些地方计算机则优于人。

表 1-1 人机特点的比较

项目	人	计算机	项目	人	计算机
推理与逻辑判断	通过经验、想象进行直觉的逻辑推理	模拟的、系统的逻辑推理	提取重要信息的能力	强	差
信息的组织	非格式的、直觉的	格式化的、详细的	出错机会	多	少
信息存储能力	差、且与时间有关	强、与时间无关	分析能力	直觉分析能力强，数值分析能力差	无直觉分析能力，数值分析能力极强
对重复工作的耐力	差	强			

计算机在设计和制造中的辅助作用主要体现在数值计算、数据存储与管理、图样绘制三个方面。

计算机作为计算工具使用的优越性显而易见。人工计算容易发生错误的问题在这里得到了完全的克服。许多需要多次迭代的复杂运算，只有用计算机才能完成。一些设计分析方法，例如优化方法、有限元分析，离开计算机便难以实现。计算机作为计算工具提高了计算精度，保证了结果的正确性。

计算机可靠的记忆能力，使其能够在数据存储与管理方面发挥重要作用。例如，常规设计时，设计人员必须从有关的技术文件或设计手册中查找数据，不但费时，而且容易出错。使用CAD/CAM系统时，标准的数据存放在统一的数据库中，检索存储方便迅速。有了数据库，设计人员便不再需要记忆具体的数据，也不必关心数据的存储位置，可以全神贯注于创造性的工作。

图样是工程的语言，是人们交流思想的工具。虽然CAM将使图样在制造中的作用逐渐消失，但图样在审查设计方案、检验产品等方面的作用仍将存在。图样的绘制工作约占整个设计工作量的60%以上，因此计算机绘图是对设计工作的有力辅助。这就是为什么计算机绘图被广泛使用的原因。另外，实际设计中很大一部分图样只是在现有设计的基础上加以局部修改。一旦图形数据存储于图库之中，它们可以重复使用，可以进行修改与编辑，以产生新的图形。

人和计算机相结合，恰当地发挥二者的作用对CAD/CAM十分重要。在建立一个CAD/CAM系统时，应在以下几个方面考虑人机特点。

经验与判断相结合在产品 and 工艺过程设计中是不可缺少的，所以设计过程必须由人控制。设计人员应能在设计的各个阶段行使控制权，应能利用其直觉进行设计，而不一定要遵循计算机的设计逻辑。计算机的学习能力很差，学习的任务应由人来完成。人可以从过去的设计中学习，总结经验。

对于费时费力的数值分析工作，计算机可以高速精确地完成。在设计中应尽可能多地让计算机完成数值分析工作，使人有更多的时间利用数值分析的结果和他本身的直觉分析能力完成决策性的工作。

计算机具有永久存储信息的能力，对重复性工作有极强的耐力。所以，在设计和制造过程中，信息的存储管理应在人的指导下由计算机完成。像绘制图样之类繁琐的、令人疲倦的工作，适合于计算机去完成，将人从重复劳动中解放出来。

计算机具有系统检错的能力，人则可用直觉方式检错。一般说来，让计算机自动改正错误是困难的。因此，改正错误、修改设计的任务应由人来完成。

总之，在设计和制造中计算机可以起到重要的辅助作用，正确地处理人机关系，发挥二者各自的优势，是CAD/CAM中的一个重要问题。

## 第二节 模具CAD/CAM技术的应用

### 一、CAD/CAM技术在模具行业的应用状况

随着工业技术的发展，产品对模具的要求愈来愈高。传统的模具设计与制造方法不能适应工业产品及时更新换代和提高质量的要求。因此，国外先进工业国家对模具CAD/CAM技

术的开发非常重视。早在 60 年代初期,国外一些飞机和汽车制造公司就开始了 CAD/CAM 的研究工作,投入了大量人力和物力。各大公司都先后建立了自己的 CAD/CAM 系统,并将其应用于模具的设计与制造。

这些公司采用模具 CAD/CAM 技术的主要理由是:

- 1) 利用几何造型技术获得的几何模型,可供后续的设计分析和数控编程等方面使用。
- 2) 可以缩短新产品的试制周期,例如在汽车工业中,可缩短模具的设计制造周期。
- 3) 提高产品质量的需要,如汽车车身表面等形状,需要利用计算机准备数据和完成随后的制造工作。
- 4) 模具制造厂和用户对 CAD/CAM 的需要增加,例如,利用磁盘进行数据传送,用户要求模具制造单位能够交换信息和处理这些数据。
- 5) 模具加工设备的效率不断提高,需要计算机辅助处理数据,以提高设备利用率。
- 6) 在企业中建立联系各个部门的信息处理系统。

模具 CAD/CAM 技术发展很快,应用范围日益扩大。在冲模、锻模、挤压模、注塑模和压铸模等方面都有比较成功的 CAD/CAM 系统。采用 CAD/CAM 技术是模具生产革命化的措施,是模具技术发展的一个显著特点。

工业国家较大的模具生产厂家在 CAD/CAM 上进行了较大的投资,正大力开发这一技术。如法国 FOS 模具公司已购买了大型 CAD/CAM 系统,日本黑田精工株式会社已大力投资开发 CAD/CAM 系统,瑞士法因图尔公司采用大型 CAD/CAM 系统设计加工模具已占 30%。目前,应用 CAD/CAM 技术较普遍的为美、日、德等国。

例如,日本丰田汽车公司于 1965 年将数控用于模具加工。80 年代初期开始采用覆盖件冲模 CAD/CAM 系统。该系统包括设计覆盖件的 NTDFB 和 CADETT 软件和加工凸、凹模的 TINCA 软件。利用三坐标测量仪测量粘土模型,并将数据送入计算机。将所得图形经平滑处理后,再把这些数据用于覆盖件设计、冲模的设计与制造。该系统有较强的三维图形功能,可在屏幕上反复修改曲面形状,使工件在冲压成形时不致产生工艺缺陷,从而保证了模具和工件的质量。模具型面的模型保存在数据库中,TINCA 软件可利用这些数据,进行模具型面的数控加工。

模具 CAM 在国外应用较广,计算机控制的数控机床加工模具约 20%~30%。此外,加工中心(MC)、柔性制造系统(FMS)已开始用于模具制造。一般说来,CAM 比 CAD 的应用更为广泛。在欧洲,用传统的机加工方法生产的模具和用 NC 加工方法生产的模具之比为 70:30。在日本,这一比值为 40:60。

我国模具 CAD/CAM 的开发开始于 70 年代末,发展也很迅速。到目前为止,先后通过国家有关部门鉴定的有精冲模、普通冲裁模、辊锻模、锤模和注塑模等 CAD/CAM 系统。但是,直到现在这些系统仍处于试用阶段,尚未在生产中推广应用。为迅速改变我国模具生产的落后面貌,今后应继续加速模具 CAD/CAM 的研究开发和推广应用工作。

## 二、模具 CAD/CAM 的优越性

模具 CAD/CAM 的优越性赋予了它无限的生命力,使其得以迅速发展和广泛应用。无论在提高生产率、改善质量方面,还是在降低成本、减轻劳动强度方面,CAD/CAM 技术的优越性是传统的模具设计制造方法所不能比拟的。

第一,CAD/CAM 可以提高模具的质量。在计算机系统内存储了各有关专业的综合性的

技术知识，为模具的设计和工艺的制定提供了科学的依据。计算机与设计人员交互作用，有利于发挥人机各自的特长，使模具设计和制造工艺更加合理化。系统采用的优化设计方法有助于某些工艺参数和模具结构的优化。

第二，CAD/CAM 可以节省时间，提高生产率。设计计算和图样绘制的自动化大大缩短了设计时间。CAD 与 CAM 的一体化可显著缩短从设计到制造的周期。例如，采用冲裁模 CAD/CAM 系统设计制造模具，比传统方法提高效率 5 倍以上。由于模具质量提高，可靠性增加，装修时间明显减少，模具的交货时间大大缩短。

第三，CAD/CAM 可以较大幅度地降低成本。计算机的高速运算和自动绘图大大节省了劳动力。优化设计带来了原材料的节省，例如，冲压件的毛坯优化排样可使材料利用率提高 5%~7%。采用 CAM 可加工传统方法难以加工的复杂模具型面，可减少模具的加工和调试工时，使制造成本降低。CAD/CAM 的经济效益有些可以估算，有些则难以估算。由于采用 CAD/CAM 技术，生产准备时间缩短，产品更新换代加快，大大增强了产品的市场竞争能力。

第四，CAD/CAM 技术将技术人员从繁冗的计算、绘图和 NC 编程工作中解放出来，使其可以从事更多的创造性劳动。

模具 CAD/CAM 的优越性还可以列举不少。所有这些，将使 CAD/CAM 逐步取代传统的模具设计制造方法，最终将在模具设计制造中居统治地位。

### 三、模具 CAD/CAM 的特点

#### 1. 模具 CAD/CAM 系统必须具备描述物体几何形状的能力

有些设计过程最初提出的要求是一些参数或性能指标。例如，设计锻压设备提出的要求是吨位、行程、封闭高度或其他使用性能，并不规定设备的形状如何。但是，模具设计则不同，因为模具的工作部分（如拉深模、锻模和注塑模的型腔）是根据产品零件的形状设计的，所以无论设计什么类型的模具，开始阶段必须提供产品零件的几何形状。这就要求模具 CAD 系统具备描述物体几何形状的能力，即几何造型的功能。否则，就无法输入关于产品零件的几何信息，设计程序便无法运行。另外，为了编制 NC 加工程序，计算刀具轨迹，也需要建立模具零件的几何模型。因此，几何造型是模具 CAD/CAM 中的一个重要问题。

#### 2. 标准化是实现模具 CAD 的必要条件

模具设计一般不具有唯一性。对于同一产品零件，不同设计人员设计的模具不尽相同。为了便于实现模具 CAD，减少数据的存储量，在建立模具 CAD 系统时首先要解决的问题便是标准化问题，包括设计准则的标准化、模具零件和模具结构的标准化。有了标准化的模具结构，在设计模具时可以选用典型的模具组合，调用标准模具零件，需要设计的只是少数工作零件。标准化工作涉及的问题较多，有技术问题，也有管理问题。目前我国已颁布“标准化法”，对于已公布的模具标准，模具 CAD 中应予贯彻使用。

模具 CAD 由于其自身的特点，要求采用系统的、定量的设计方法。因此，种类繁多的成形零件和成形工艺，以及缺乏系统的、定量的设计方法，是建立模具 CAD 系统时遇到的一个突出矛盾，解决这一矛盾的有效途径便是成组技术（Group Technology，简称 GT）。

成组技术用于塑性加工，就是按照成形零件的形状、尺寸和材料的不同，将其加以分类，根据各类成形零件的不同特点，采用不同的生产工艺和模具设计方法。成组技术有助于以定量的方式表述现有的设计经验，建立系统的设计方法。这样，就使得在现有技术发展水平上



较容易建立模具 CAD 系统。

本书第九章将较具体地讲述成组技术的应用实例。

### 3. 设计准则的处理是模具 CAD 中的一个重要问题

人工设计模具所依据的设计准则大部分是以数表和线图形式给出的。在编制设计程序时，必须对这些数表和线图进行恰当的处理，将其变为计算机能够处理的表达形式。程序化和公式化是处理数表或线图形式设计准则的基本方法。对于某些定性的设计准则，计算机程序无法采用，需要深入研究，总结出便于使用的定量的设计准则。有些经验准则难以程序化或公式化，这时就需要通过人机交互方式发挥经验的作用。

### 4. 模具 CAD/CAM 系统应具有充分的柔性

模具的结构随产品的不同而变化，模具型面的几何形状复杂。现阶段，模具的设计方式基本上属于经验设计，设计质量在很大程度上取决于设计者的技巧。模具的生产方式为单件的或小批量的，大量生产模具的情况极为少见。所有这些，要求模具 CAD/CAM 系统具有充分的柔性，即可以根据不同产品的特点和生产条件，灵活地作出抉择，方便地修改设计，因此，在开发模具 CAD/CAM 系统时，不仅要考虑全面的功能、较高的效率，还应提供充分的柔性。这是实用化的模具 CAD/CAM 系统所应具备的基本条件之一。

## 第三节 建立 CAD/CAM 系统的过程和方法

随着 CAD/CAM 技术的发展，软件系统的规模越来越大，复杂程度也越来越高。如果在建立 CAD/CAM 系统的过程中不遵循科学的方法，便难以保证所开发软件的质量。70 年代以来，软件开发已经由个体作业方式发展成为工程化，逐渐形成了一门新的技术学科——软件工程学。

根据软件工程学的方法，CAD/CAM 系统的生命期可分为系统分析、系统设计、程序设计、系统调试和系统维护等五个阶段。前四个阶段称为开发期，最后一个阶段称为维护期。

CAD/CAM 系统的生命期划分为上述五个阶段，这就为工程化研制 CAD/CAM 系统提供了一个框架。但是必须指出，实际的系统研制工作不可能是直线进行的，常常存在着反复。研制人员往往需要从后面的阶段回复到前面阶段，进行再分析或再设计。

下面对系统研制中各阶段的任务和方法作些扼要说明。

### 一、系统分析

系统分析阶段的主要任务是对现行的工作流程进行调查，收集并分析有关资料，了解用户的需求。在此基础上，确定系统的总目标、功能、性能和接口，建立系统的总体逻辑模型。

数据流程图 (Data Flow Diagram, 简称 DFD) 是系统分析常用的主要工具。它不但可以表达数据在系统内部的逻辑流向，而且还可以表达系统的逻辑功能和数据的逻辑转换。数据流程图既能表达现行的设计制造系统的数据流程和逻辑处理功能，也能表达 CAD/CAM 系统的数据流程和逻辑处理功能。

数据流程图的基本形式如图 1-1 所示。数据流程图中有四种基本符号，即外部项、数据流、处理逻辑和数据存储。

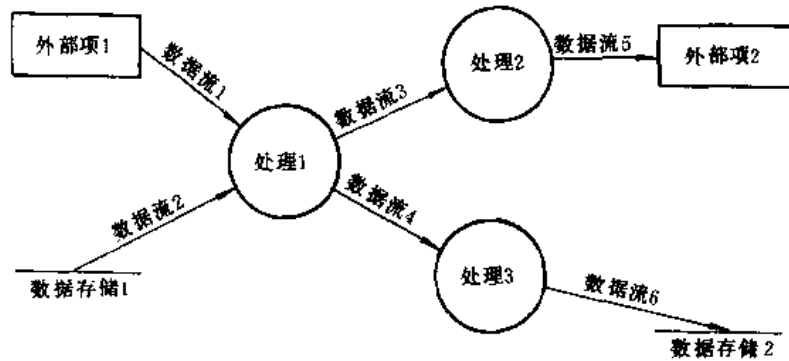


图 1-1 数据流程图的基本符号

外部项是不受系统控制的、在系统以外的事物或人，它表达了系统数据的外部来源或去处。外部项也可以是其他的 CAD/CAM 系统或信息处理系统，它向系统提供数据或接收系统输出的数据。在数据流程图中外部项用方框表示。

数据流在图中用箭头表示，指出了数据的流动方向。数据流可以由某一个外部项产生，也可以由某一个处理逻辑产生，或者来自某一数据存储。一般来说，对每一个数据流都要加以简单地描述，并将这种描述写在数据流箭头旁。

数据流程图中的处理逻辑表达了对数据的逻辑处理功能，即对数据的变换功能。处理逻辑对数据的变换方式有两种：它可以变换数据的结构，例如将输入数据的格式重新排列；也可以在原有数据内容的基础上，产生新的数据内容，例如，在刀位文件的基础上编制数控程序。在图中，处理逻辑用圆圈表示，处理逻辑的功能描述一般由一个动词和名词组成，例如计算压力中心、设计凹模等。通常，在数据流程图定稿后，需对每一个处理逻辑加以编号。

在数据流程图中，数据存储用直线段表示，它指出了数据保存的地方。这里所说的地方，不是指数据的物理地点，也不是文件、磁盘或磁带，而是对数据存储的逻辑描述，例如工艺方案、排样参数等。一个处理逻辑可以从数据存储中读取某些数据，也可以将一些数据存入某个数据存储中，甚至可以修改数据存储中的某些数据内容。

系统分析阶段的文档包括以下内容：

- 1) 系统的目标：说明系统的目标，所需硬件、软件以及其他方面的限制。
- 2) 信息描述：描述系统的输入和输出信息、系统与其他部分（硬件、其他软件、用户）之间的接口。
- 3) 功能描述：描述系统的功能细节、功能之间以及功能与数据之间的关系。
- 4) 质量评审要求：规定软件功能和性能的正式确认需求和测试限值。

需要强调的是，在需求分析中应建立和保持与用户的联系，因为开发是为用户服务的，自始至终要得到用户的支持与合作。

## 二、系统设计

过去，系统设计时利用系统流程图作为工具。系统流程图表达了系统的执行过程、输入/输出操作和有关的处理，也表达了数据在系统中的流向。但是，系统流程图无法表示系统的结构和每一模块的功能，因而无法评价系统是否符合用户的逻辑要求，也不可能知道系统的大小，以及是否易于维护和修改。

70 年代中期，结构化系统设计思想得到发展。所谓结构化系统设计，指的是用一组标准

的工具和准则进行系统设计。其中，结构图是一个主要工具，用于表达系统内各部分的组织结构和相互关系，解决了传统方法所不能解决的问题。

用结构化的方法设计较复杂的 CAD/CAM 系统时，设计过程可分为概要设计和详细设计两个阶段。概要设计是在系统分析的基础上，确定软件系统的总体结构和模块间的关系，定义各模块间的接口，设计全局数据结构，确定系统与其他软件及用户之间界面的详细内容。详细设计主要是描述概要设计产生的功能模块，设计功能模块的内部细节，包括算法和数据结构。

结构化的系统设计强调“自顶向下”的分解，即将系统逐级向下分解成模块和子模块。在划分模块时，应尽可能地降低模块之间的耦合程度，增加每一模块的内聚性。模块间的耦合程度低，说明相互间的依赖程度低，模块的独立性好。模块间耦合程度越低，相互影响就越小，在修改一个模块时，可使修改范围控制在最小限度内；在对一个模块进行维护时，不必担心其他模块是否会受到影响。模块的内聚性指的是其内部各个部分的组合强度。一个模块的内聚性往往决定了它和其他模块之间的耦合程度。降低模块之间的耦合程度和提高模块的内聚性是两个相辅相成的设计原则。

图 1-2 所示为一结构图，结构图指出了系统由哪些模块组成，以及模块间的调用关系。模块用一个方框表示，模块的名称写在方框内。连接模块间的箭头，表示了模块间的调用关系。

系统设计完成以后形成的文档资料是系统设计说明书。

### 三、程序设计

程序设计阶段的主要任务是把系统设计方案加以具体实施，根据系统设计说明书进行程序设计，将功能模块用某种语言实现。系统结构图中的各个模块都有模块说明，内容包括模块名称、输入数据、输出数据和转换过程等，程序员根据模块说明的要求进行程序设计。

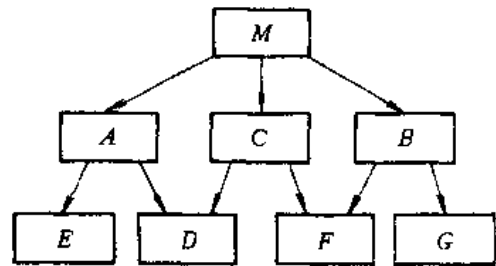


图 1-2 结构图

在系统开发的全过程始终贯穿着结构化技术。结构化程序设计是程序设计阶段的基本技术，其目的在于编写出结构清晰、易于理解、也易于测试的程序。

结构化程序设计指的是“用一组标准的准则和工具从事程序设计”。这些准则和工具包括一组基本控制结构、自顶向下的扩展原则、模块化和逐步求精的方法。

结构化程序设计理论认为，任何一个程序都可以用三种基本逻辑结构来编制。这三种结构是顺序处理结构、判断结构和循环结构（图 1-3）。这三种基本结构又促使人们采用模块化思想编制程序。一个系统（程序）可分成若干个功能模块，用作业控制语句或程序内部的过程调用语句将这些模块联结起来。

自顶向下的程序设计，就是先把一个程序高度抽象，看作是一个功能结构。为了完成这个功能，需要进一步分解成若干较低一层的模块，实现一些较小的功能。如此逐步扩展，直到最低一层的每一个模块都非常简单，功能最小，能够很容易地用程序语句实现为止。

逐步求精指的是把一个模块的功能一步一步地分解成一组子功能，而这一组子功能可以通过执行若干个程序步来完成。自顶向下的程序设计过程只表达了各个功能之间的关系，却不能表达模块的内部逻辑。采用逐步求精的方法所分解出来的内部逻辑，即程序的执行步骤，

能够完成预期的程序功能。

结构化程序设计方法可大大改进程序的质量，提高编程的效率，而且增强了程序的可读性和可修改性。结构化程序设计方法便于发现错误和纠正错误，在修改程序的某一部分时，对其他部分影响不大。

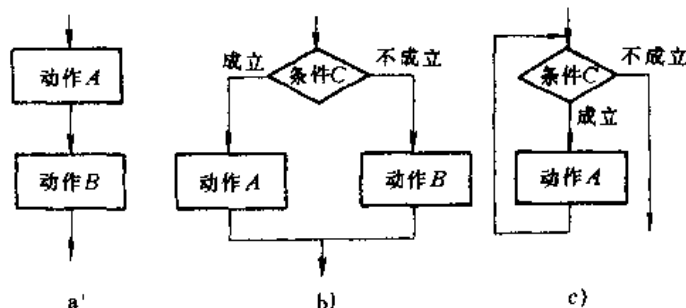


图 1-3 结构化程序设计的基本结构

a) 顺序结构 b) 判断结构 c) 循环结构

#### 四、系统测试

在开发 CAD/CAM 系统时，总是不可避免地会出现错误。系统测试是对系统分析、系统设计和程序设计的最后审查，是保证软件质量的关键。为了保证系统的可靠性，必须对系统进行尽可能完全的测试。因此，在有的系统开发中，测试的工作量占到整个开发工作量的 40%。软件测试和纠错是密切相关的两个问题，通常所说的调试，实际上包括测试和纠错两方面的工作内容。

在对系统进行测试时，通常按照以下原则进行：

- 1) 设计测试例题时，要给出测试的预期结果，以便做到有的放矢。
- 2) 为保证测试的质量，开发和测试小组分立。
- 3) 要设计非法输入的测试用题，保证程序能够拒绝接受非法输入，并给出提示信息。
- 4) 在对程序修改之后，要进行回归测试，以免由于修改程序而引入新的错误。
- 5) 在进行深入的测试时，要集中测试容易出错的部分。

测试所用的方法有两种，一种是黑盒法，另一种为白盒法。

黑盒法着眼于程序的外部特性，而不考虑程序的内部逻辑结构。测试人员将程序视为一个黑盒子，不关心其内部结构与特点，只检查程序是否符合它的功能说明。

与黑盒法不同，测试人员采用白盒法测试时需了解程序的内部结构，对程序的所有逻辑进行测试，在不同点检查程序的状态。

按照软件工程的方法，测试过程可分为单元测试、整体测试和有效性测试。单元测试即模块测试，就是对模块逐个进行测试，对模块的接口、数据结构、执行路径等方面进行考察。整体测试是将模块逐个装配在一起进行测试，其目的在于考察经过单元测试的模块，是否能组装成一个符合设计要求的系统。有效性测试的目的是证实软件的功能与用户要求是否一致，有效性测试一般采用黑盒法进行。

#### 五、系统维护

CAD/CAM 系统生命期的最后一个阶段是维护阶段。系统的维护往往要消耗大量的精力和费用。系统维护的内容很广泛，但最主要的是改正性维护、适应性维护和完善性维护。

软件测试往往不可能找出一个大型系统中所有潜伏的错误。所以,在系统使用期间仍有可能发现错误,诊断和改正这类错误的过程称为改正性维护。

由于计算机技术日新月异的发展,新的计算机硬件和操作系统新版本会经常出现。为了适应环境的变化,要对 CAD/CAM 系统进行修改,这类维护称为适应性维护。

当系统投入使用后,用户有时会提出增加新功能、修改已有功能或其他改进要求。为了满足或部分满足这类要求,要进行完善性维护,这类维护占系统维护工作的大部分。

如果仅有源程序,而缺乏文档资料,会因为软件结构、数据结构、系统接口和性能要求等方面不清楚,使维护工作十分困难。为了减少维护工作量,提高维护质量,必须在系统开发过程中遵循软件工程方法,保证文档齐全,格式规范。

## 第四节 CAD/CAM 的发展趋势

### 一、集成化

80 年代以来,计算机集成制造 (CIM: Computer Integrated Manufacture) 技术已成为制造工业应用计算机技术的主要发展方向。利用 CIM 技术建立的计算机集成制造系统 (CIMS),将制造工厂的产品设计、加工制造和经营管理等项活动集成起来,其目的是在计算机辅助下,利用最小的制造和管理资源,最优地实现企业的发展目标,获得最大的总体效益。

计算机集成制造系统一般由技术信息系统 (TIS)、制造自动化系统 (MAS) 和管理信息系统 (MIS) 组成。CAD/CAM 系统为技术信息系统的主要部分。CIM 的核心技术是集成,包括物理集成、信息集成和功能集成等方面的内容,其中信息集成是实现 CIM 的基础和关键。

共享的产品模型、统一的数据库和网络环境是实现信息集成的必要条件。为解决产品数据的交换和共享问题,国际标准化组织 (ISO) 根据各国有关标准制定了产品模型数据交换标准 STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data)。STEP 不仅是产品数据交换标准,而且是信息集成技术,为开发新一代 CAD/CAM 系统提供了基础。

CIM 的产生反映了人们对制造有了更深刻的认识。从广义上讲,制造包括从产品概念形成、设计、开发、生产、销售及售后服务全过程中的一系列活动。过去将制造仅看作是物料的转换过程,即由原材料加工、装配成产品的过程。实际上,制造是一个复杂的信息流动和交换的过程,因此信息集成起着十分关键的作用。

80 年代后期,并行工程的方法受到广泛的重视。并行工程是一种以集成的、并行的方式设计产品及其相关过程的系统方法。这种方法使产品开发人员,从一开始就考虑产品从概念形成,到报废处理的整个生命期中的所有因素,包括质量、成本、进度和用户需求等各个方面。并行工程赋予 CIMS 信息集成新的内容,是 CIMS 的一种有效的优化运行模式。并行工程也将对 CAD/CAM 技术的发展产生重大影响。

CIMS 被认为是 21 世纪制造工业的生产模式,工业发达国家把发展和应用 CIM 技术作为制造工业的发展战略,投入了大量资金,用以推动 CIMS 的开发应用。我国也十分重视发展 CIM 技术,已把它列入我国高技术发展计划。

### 二、微型化

CAD/CAM 正转向采用超级微型计算机。32 位超级微型计算机在单机功能上将达到小型机和中型机的水平,多 CPU 并行处理时的功能将达到大型机的水平。以超级微机为基础的

CAD/CAM 系统不断增多, 功能也在不断扩大。

### 三、网络化

微型计算机 CAD/CAM 系统发展的一条主要途径是网络化。由于微型机价格低廉, 功能较强, 可将多台微机工作站连成分布式 CAD/CAM 系统。在分布式系统中, 客户/服务器 (Client/Server) 结构得到普遍采用, 这种结构中, 一台服务器可为多台工作站提供服务。分布式 CAD/CAM 系统结构灵活, 功能强。每台工作站可以单独使用, 也可以联合使用。整个网络还可与大型、巨型机相连, 以解决更复杂的问题。

### 四、智能化

设计制造中全盘自动化固然理想, 但在今天还只能是一个追求的目标, 近期难以实现。人工智能技术是通向设计制造自动化的重要途径。近年来, 人工智能的应用主要集中在引入知识工程, 发展专家系统。专家系统的发展可扩大 CAD/CAM 的功能, 有利于创造更高级的 CAD/CAM 系统。专家系统具有逻辑推理和决策判断能力, 它将许多事实和有关专业的经验、准则结合在一起, 应用这些事实和启发规则, 根据设计目标不断缩小搜索的范围, 使问题得到解决, 专家系统是当前研究相当活跃的一个课题。

### 五、最优化

产品设计和工艺过程设计的最优化始终是人们追求的目标, 采用传统的方法设计制造模具可靠性较差。目前, 大多数模具 CAD/CAM 系统中使用的设计方法和手工设计时的方法基本相同, 系统采用交互方式运行, 当遇到一些复杂问题时, 由设计人员加以选择和判断。因此, 模具的可靠性仍然存在问题, 难以保证一次成功。

发展塑性成形过程的计算机模拟技术是解决模具可靠性问题的重要途径。利用有限元和边界元等方法分析塑性成形过程及模拟材料的流动, 从而可以检验设计的模具是否可以制造出合乎质量要求的产品。用计算机模拟技术检验设计结果, 排除不可行方案, 有助于获得较佳的设计, 提高模具的可靠性。现在已研究出模拟平面应变和轴对称变形的分析软件。发展三维流动的模拟技术仍是一个值得大力研究的课题。只有当完全能够模拟塑性成形过程的时候, 模具 CAD 的优越性才能得到完全的发挥。

在 NC 编程时, 利用仿真技术模拟加工过程, 分析加工情况, 判断干涉和碰撞, 有利于确定最佳进给路径, 保证加工质量, 避免发生意外事故, 近年来, 加工仿真技术已得到很大发展。

### 六、新型化

用于 CAD/CAM 的新型外部设备将不断问世。作为计算机外部存储器的磁盘将被存储密度为几百倍甚至几千倍的光盘所代替。不久, 光栅扫描显示器的分辨率可达  $4000 \times 4000$ 。其他外部设备, 如图形输入装置、声音识别装置、视觉追踪装置和激光打印机等, 亦将迅速发展, 日新月异。

## 习 题

1. 人和计算机各自具有哪些特点? 在 CAD/CAM 中如何恰当地发挥二者的作用?
2. 在设计和制造中计算机的辅助作用体现在哪些方面?
3. 模具 CAD/CAM 有哪些优越性?
4. 开发一个 CAD/CAM 系统分为哪几个阶段? 各个阶段的主要任务是什么?
5. CAD/CAM 技术有哪些发展方向?

## 第二章 模具 CAD/CAM 系统的组成

### 第一节 模具 CAD/CAM 系统的硬件

#### 一、计算机及常用外围设备

##### (一) 计算机

计算机在模具 CAD/CAM 系统中执行运算和逻辑分析任务,并控制和指挥系统的所有活动。这些活动包括内存和外存之间的信息交换、终端设备的管理和在绘图机上输出图样等。主机由运算器、内部存储器和控制器组成。运算器和控制器合称为中央处理机 (CPU)。

以前,模具 CAD/CAM 所使用的计算机为大、中型计算机或小型计算机。70 年代末,国外相继推出了性能优良的 16 位微处理机。80 年代初,以这种微处理机为核心的、种类繁多的 16 位微型计算机在市场上出现。通用的 16 位微型计算机具有较强的功能,可达到高档的小型计算机的水平。这时,微型计算机已开始涉足传统上属于小型计算机,甚至中型计算机的模具 CAD/CAM 领域。IBM-PC 计算机作为 16 位微型机的代表,应用已十分广泛。国内有不少模具 CAD/CAM 系统,例如冲裁模 CAD/CAM 系统,就是在 IBM-PC 和长城 0520 等微型计算机上开发的。

正当 16 位微型机开始普及的时候,市场上又推出了功能更为强大的 32 位超级微型计算机。这类计算机的内存和外存的容量大,内存容量一般为 4~32MB,磁盘容量可达数百兆字节以上;运算速度高;可带高分辨率的彩色光栅扫描显示器和多种外部设备;配有 FORTRAN、PASCAL、C 和 BASIC 等高级程序设计语言。32 位微型计算机可与一般的超级小型机和中型机相匹敌,以 32 位微型机为基础的模具 CAD/CAM 系统也越来越多,例如冲模和注塑模 CAD 系统等。

##### (二) 外部存储器

模具 CAD/CAM 系统使用外部存储器的目的在于扩大存储能力,弥补内存的不足。外部存储器可用于存储程序、图形文件、NC 代码和其他软件。用于较复杂模具的 CAD/CAM 系统,要求容量为几百 MB 以上的外部存储器。

常用的外部存储器有磁盘和磁带。由于磁盘具有随机存取的特点,在模具 CAD 系统中应用较广。磁带仅能顺序存取,存取所需的时间较长,所以它一般作为磁盘的后备品,用以保存永久性的档案文件。

磁盘分为硬盘和软盘两种。磁盘上的一系列的同心圆周称为磁道 (图 2-1)。在多数情况下,以磁道作为存储单位太大,因此磁道又可分为盘区 (弧段)。盘区是可编地址号的最小存储单位,一般可存储 256、512 或 1024 个字节。

磁盘的存取过程如下:

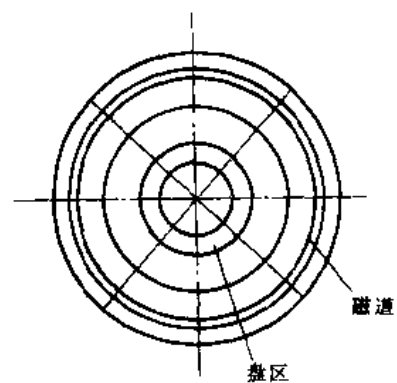


图 2-1 磁道与盘区

- 1) 移动存取机构，使磁头处于特定的磁道位置。
- 2) 激化磁头，使之处于工作状态。
- 3) 在磁盘旋转的过程中，当磁道的起点处于磁头下时，机器就存取该磁道中的数据。

磁带是涂有磁性材料的塑料带。常用的磁带宽度有两种，分别为  $1/2\text{in}$  和  $1/4\text{in}$ <sup>①</sup>。当要读写带上的存储信息时，须用磁带机。磁带机具有输入、输出两种功能。磁带机读写信息时，依靠静止的读写磁头与匀速移动的磁带间的电磁作用，完成信息的读写。磁带机有两个磁头，即清除磁头和读写磁头。在写入时磁带先经过清除磁头，使磁带面上的磁层去磁，然后经过读写磁头。若这时在读写磁头的线圈中通一脉冲电流，磁带的这一部分磁层被磁化，信息就被写入。要读出时，先把磁带倒卷回去，然后再按原来的方向移动，此时清除磁头在控制电路的控制下已不起作用，以免所记录的信息遭到破坏。当载有信息的磁带通过读写磁头时，就会在磁头线圈中引起感应电动势，感应电动势的极性对应着所记录的代码“0”或“1”。

磁带可以分为若干段，段间留有间隙并有地址标志。这些地址是顺序排列的，因而磁带必须按顺序存取，不能直接随机存取。

### (三) 输入设备

模具 CAD/CAM 系统的输入设备主要包括光标控制设备、数字化仪和键盘三大类。

#### 1. 光标控制设备

光标是屏幕上的一个亮点，常用于交互设计中。例如，画直线时定起点、终点位置；画圆时指出圆心位置等。光标控制设备包括手动轮、操纵杆、轨迹球、圆形板和光笔等。

(1) 手动轮 手动轮由两个转轮组成，一个控制水平线，一个控制垂直线，两线相交处为光标。手动轮可以安装在键盘上，也可以安在一个小盒子上（手动盒）。两个轮子的轴相互垂直，各与一个轴编码器相连。轮子每作一次增量转动，轴编码器就发一个脉冲。当鼠标器在平面上移动时，它在两个正交方向上的运动被转换为轮子的转动。

(2) 操纵杆和轨迹球 操纵杆和轨迹球的原理和手动轮类似(图 2-2)。球体安装在凹坑的滚子上，滚子与编码器相连。球体部分外露，转动球时带动滚子旋转，产生控制电脉冲。使用者很容易操纵光标在屏幕上移动。

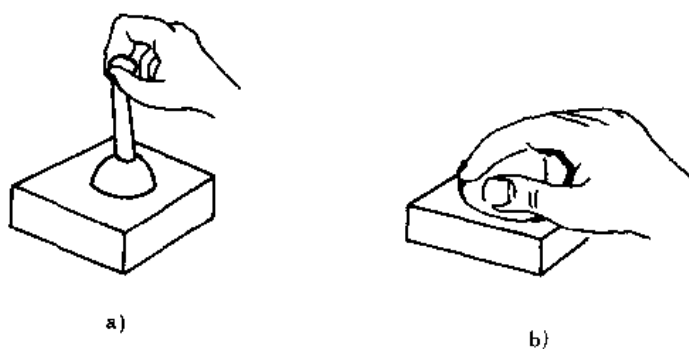


图 2-2 操纵杆和轨迹球

a) 操纵杆 b) 轨迹球

① 此为英制，非法定计量单位， $1\text{in}=0.0254\text{m}$ 。



(3) 图形板 图形板是一个与显示器分离的平板(图 2-3),用触笔或鼠标器在上面书写或绘画时,屏幕上显示的光标反映了触笔或鼠标在图形板上的坐标位置。图形板和图形显示器配合使用,成为模具 CAD/CAM 系统的一种主要的对话装置。

图形板最初是由兰德公司研制的。早期的图形板在 25cm 见方的板面上,于  $x$  和  $y$  方向各嵌有 1024 根金属线。在  $x$ 、 $y$  方向各有一个 10 位二进制编码装置和 10 路同步脉冲序列,因此每一根金属线都有其唯一的脉冲序列组合信号。这个信号可被触笔拾取,从而计算机可识别触笔所在的位置。后来,又相继研制成功利用电压梯度原理、超声波传输原理和电磁感应原理的图形板。

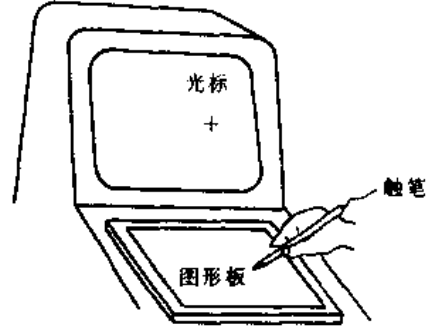


图 2-3 图形板的使用

图形板的一些典型用途包括点菜单和定位图形元素。图形板特别适合于交互设计,因为使用者可以一面手执触笔或鼠标器操作,一面观察屏幕上的光标位置。设计中的许多功能选择可以点菜单的方式实现。当触笔点了某方块中的一点,那么计算机就会执行相应的程序,实现这一方块所指明的功能。

(4) 光笔 光笔作为光标控制设备,在 60 年代末至 70 年代前期流行一时。光笔是一种笔状的光检测器,用于从显示屏幕上拾取部分图形,或对图形进行操纵,完成对图形的增添、删除或修改。在图形交互中,光笔曾经是一种非常有用的设备。因为其操作方式不符合人的习惯,长时间使用容易疲劳,所以现已少用。

## 2. 数字化仪

数字化仪是一种坐标输入设备,其工作原理和图形板相同,外形也相似,只是尺寸较大。高精度的数字化仪分辨率可达 0.02 左右。数字化仪的电子跟踪设备可以记录所需点的  $x$ 、 $y$  坐标,所以可用来输入图样上点的坐标。在要求不高的情况下,数字化仪可以完成图形的输入。应当指出,数字化仪并不是模具 CAD/CAM 系统必需的设备。它不能完成精确的图形输入工作。

## 3. 键盘

键盘是一种最基本的输入设备,其主要功能是输入命令或数据。键盘上设有功能键和数字字符键。功能键通常由 16 至 32 个按键组成。这些按键可事先加以定义,使其对应于一定的功能。由于程序中已把这些键一个个地定义成某种功能,依据功能键进行操作时,按下某个键即意味着调用相应的子程序。数字字符键用以输入数字和字符。键盘和其他输入设备配合使用,可以实现人机对话,或修改、编辑字符和图形。

## 4. 其他输入设备

图形的语言输入设备和扫描输入设备是两种新型的输入设备。语言输入是用自然语言输入图形特征参数和属性参数,产生用户要求的图形。图形扫描输入是将已有的图形(例如工程图)放置在图形输入板上,经过光电扫描转换装置的作用,即可把图形的像素特征,乃至几何特征输入到计算机中。这种输入方式在对已有图样建立图形库方面有重要意义。

## (四) 输出设备

### 1. 图形显示器

图形显示器用于显示图形,也可显示字符。常用的三种阴极射线管(CRT)显示器是随

机扫描显示器、直视存储管显示器和光栅扫描显示器。

作为显示器主要部件的阴极射线管内，装有电子枪，由它发射高速、精细聚焦的电子束。在阴极射线管的另一端是较为扁平的屏面，其上涂敷着一层荧光粉，当电子束轰击在上面时会发光。控制电子束的能量可以使输出光的亮度变化，需要时可以完全使光截止。流过偏转线圈的电流会使电子束偏转到屏面的各部分。阴极射线管的基本结构示于图 2-4。

在 CRT 上显示图像的方法，按扫描方式大致可分为两种。第一种是普通电视所用的方法，通常是从左到右，从上到下在全画面上扫描。这种方法叫光栅扫描或 TV 扫描。在光栅扫描产生图像的方法中，屏幕被分成许多象素。这些象素形成了光栅点阵，光点数为  $(256 \times 256) \sim (1280 \times 1240)$ ，甚至更多。每个象素可有不同的颜色和亮度。第二种方法是把屏面分成纵横适当的格子，把格子点的坐标记入计算机内。当电子束根据计算机送来的信号向各坐标点处随机地移动时，该电子束的轨迹就形成所显示的图像。这种方法叫随机扫描（图 2-5）。

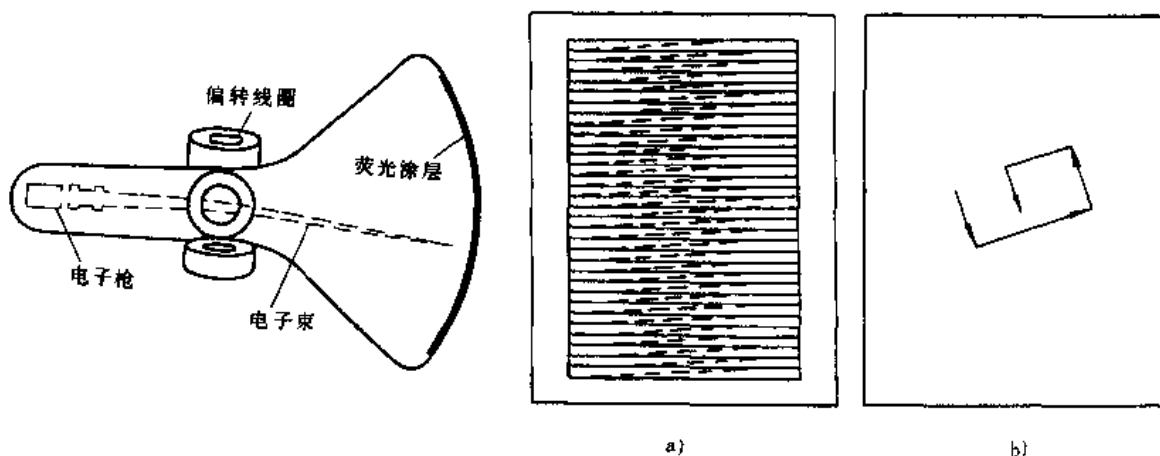


图 2-5 显示图像的两种方法

a) 光栅扫描 b) 随机扫描

图 2-4 阴极射线管的基本结构

在电子束扫过 CRT 的表面后，荧光粉的光会迅速衰减，需要迅速并反复地扫描才能保持稳定的画面。CRT 显示器每秒钟更新整个图形至少 30 次，否则将产生闪烁现象。

随机扫描显示器中电子束的偏转和定位具有随机性。在某一时刻，只有一点发光，因而可以画出很细的线条，故又称为画线式显示器。这种显示器显示图形所需的全部指令按顺序存储在显示缓冲器中，显示控制器按更新的速度，周期地存取这些指令。随机扫描显示器的局限性，在于图形的复杂性受到显示缓冲器大小和显示控制器速度的限制。这种显示器的优点是图像的余辉时间短，有利于显示动态的画面。任何图形元素均可被改变、删去，或者增加新的图形元素，从而可实现选择性删除的功能。

由于随机扫描显示器成本高，当显示的图形很复杂时会发生闪烁，所以导致了研制具有存储图像能力的显示器，直视存储管显示器就是用得较多的一种。

直视存储管也采用电子枪和涂敷了荧光粉的屏面。电子束不是直接写在荧光屏上，而是写在紧挨着屏、后面涂有介质的细网格栅极上。正电荷的图案沉积在这个栅极上，然后由读数电子枪发射的连续电子泛流将图案复制到荧光屏上。图 2-6 为直视存储管的示意图。紧挨着

存储栅极后面的是第二栅极（集电极），其主要作用是使电子泛流均匀分布。直视存储管显示器无需更新画面，因而可以显示稳定的无闪烁的复杂图形，其缺点是不能作局部删除，不能作动态图形显示。

光栅扫描显示器采用光栅扫描方法产生图形。这些图形是由一系列的点组成的，在光栅扫描显示器上显示图形时，必须先将线条及字符信息转换为适合光栅显示的形式，这一过程叫做扫描转换。因为光栅扫描显示图形需存储每个象素的信息，所以需要较大的存储量。光栅扫描显示器的优缺点和随机扫描显示器类似。

绝大多数模具 CAD/CAM 系统以交互方式运行，用户可交互地输入命令，选择参数，修改设计。这就要求图形显示器具有选择性删除的功能。因为光栅扫描显示器显示图形的逼真性较好，价格也不甚昂贵，所以在模具 CAD/CAM 系统中得到广泛的应用。

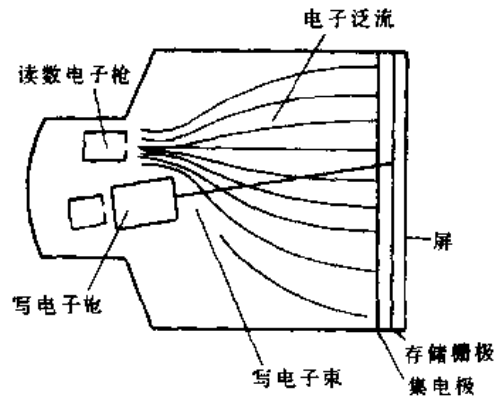


图 2-6 直视存储管示意图

有些模具 CAD/CAM 系统除图形终端外，还配有字符终端。这样，键入的命令、系统的响应和结果的信息可以显示在字符终端上。这种做法的优点在于不必经常转换屏幕工作方式，图形和文字互不干扰，有利于提高工作效率。

## 2. 绘图设备

在模具 CAD/CAM 系统中，最常用的绘图设备是笔式绘图机。另外，还有用喷墨、静电或激光技术实现的绘图机。笔式绘图机可分为卷筒式和平台式两类。

卷筒式绘图机靠笔在横梁上的运动和卷筒带动绘图纸的运动，完成线条的绘制。卷筒式绘图机价格便宜，绘制的图形不受长度的限制，绘制图形的质量也比较好。

平台式绘图机可以绘制精度较高的图形。笔的运动步距可达 0.001mm，这已远远超过一般应用的要求。不同颜色的笔装在笔架上，需要时可以从固定位置取出。常用的固定纸的方法有静电吸附、真空吸附或者机械压紧。一般绘图机都装有微处理器，给操作者以附加的控制，如定比例、控制速度等。

卷筒式和平台式绘图机将在第五章详细介绍。

此外，用于产生图形硬拷贝的设备还有硬拷贝机。这种设备可以将显示在屏幕上的图形复制下来，作为设计过程的中间步骤的记录。绘图纸的尺寸一般限制在 215~280mm。因为图形终端分辨率的限制，显示的图形质量远不如绘图机上绘制的图形。所以，用它的复制品作为最终的图样是不适合的。常见的硬拷贝机的工作原理是电子摄影技术，所用的拷贝纸不但价格贵，而且在正常光线的长时间作用下会变暗。

## 3. 其他输出设备

宽行打印机可用来打印输出计算结果，打印表格和程序等。纸带穿孔机可以输出数控加工用的控制纸带。

## 二、硬件系统的配置

模具 CAD/CAM 系统的配置形式，按照所用计算机类型的不同，可分为大型主机系统、小型机系统、工作站系统和微机系统；按照是否连网，可以分为集中式系统和分布式系统。

集中式 CAD/CAM 系统的硬件配置如图 2-7 所示。在这种系统中, 如果计算机仅与一台图形终端相连, 则为单用户系统。此时, 用户拥有系统的全部资源, 不会发生与其他用户争夺资源的问题。但是, 因为整个计算机资源在某一时间内只为一个用户所占有, 所以会造成资源的浪费。

在集中式的 CAD/CAM 系统中, 如果计算机与多台图形终端相连, 则为分时系统。采用大型主机的分时系统具有很强的计算能力和比较完备的外部设备, 为多用户提供了共享硬件和软件资源的环境。但是, 这种系统与用户的交互能力很差, 有时用户需等待较长时间才能得到系统的响应。

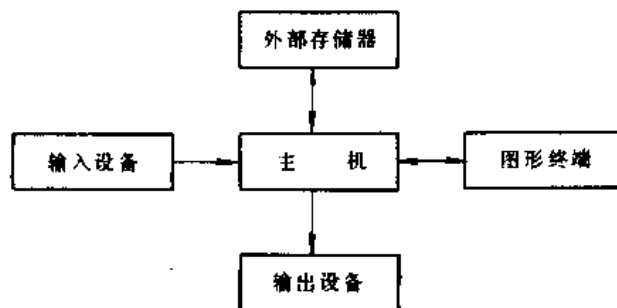


图 2-7 集中式 CAD/CAM 系统

80 年代以来, 随着计算机网络的发展, 分布式的 CAD/CAM 系统得到了发展。利用局域网技术, 可以将多个独立工作的模具 CAD/CAM 工作站组织在局域网中。这种局域网具有良好的交互性能, 可快速响应用户的要求, 使多用户共享软件和硬件资源。局域网还可以通过网关与其他局域网或大型主机相连, 构成远程广域网。

局域网是由电缆连接起来的许多计算机、外围设备和通信设备组成的, 连接距离一般在 1~2km 之内。组织局部网的方式很多, 但采用最多的是总线和环形网络结构。

以太网是总线结构的局部网。以太网现已成为一种工业标准 (IEEE802.3)。在这类网络中, 所有工作站都连接在具有双向传输能力的电缆上, 由工作站共同管理对总线上的信息存取, 按争用方式操作。图 2-8 是用以太网连接的分布式 CAD/CAM 系统。

以太网具有很高的数据传送速度, 但信息流量超过一定值时, 其传输速度会大大降低。当网中的工作站都有自己的磁盘, 且网中信息流量不大时, 以太网能保持良好的工作性能。以太网的另一个优点是网中可带的工作站多, 存取方式不受工作站的位置和数量的影响。

在环形网络结构中, 所有的工作站都连接在一个封闭环中 (图 2-9)。在环中流动着称为“标志” (有时也称为“令

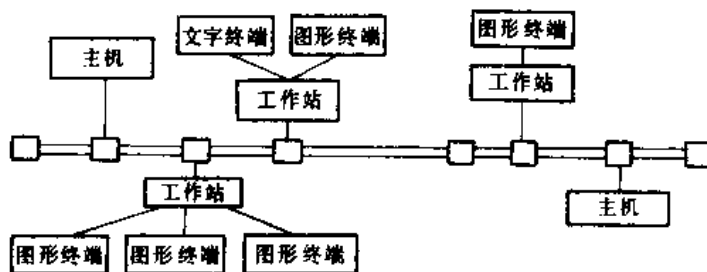


图 2-8 以太网连接的分布式 CAD/CAM 系统

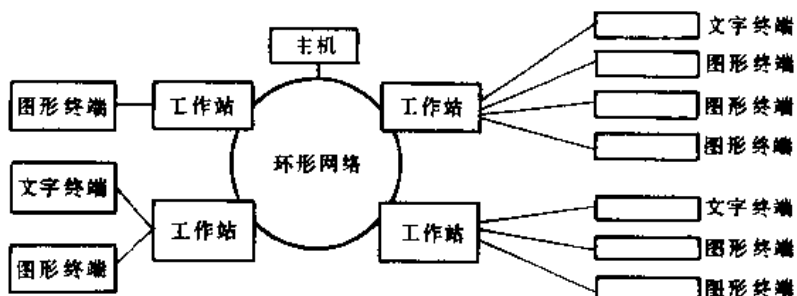


图 2-9 环形网连接的分布式 CAD/CAM 系统

牌”)的特殊位串,它表示信息的发送权。获得“标志”的工作站,有权把要发送的信息附在“标志”之后发送出去。标志环局部网的优点是传输距离长,传输速率高,即使在重载时也不会发生在以太网中出现的那种冲突。环形网的缺点是,当一个工作站发生故障时容易影响整个网络的工作。

随着分布式计算机系统的发展和完善,其应用愈来愈广。多个模具 CAD/CAM 工作站可以连成局部网络,以共享软硬件资源。在更多的情况下,模具 CAD/CAM 工作站作为一个结点,连在本企业或本部门的计算机网络中使用。

## 第二节 模具 CAD/CAM 系统的软件

模具 CAD/CAM 系统除必要的硬件设备外,还必须配备相应的软件。如无软件的支持,硬件设备便不能发挥其作用。软件是决定模具 CAD/CAM 系统功能强弱、效率高低和使用是否方便的关键因素。在购置模具 CAD/CAM 系统时,软件部分的投资往往超过硬件部分的投资。

模具 CAD/CAM 系统的软件多种多样,其作用亦各不相同。一般说来,模具 CAD/CAM 的软件可分为系统软件、支撑软件和应用软件三类。

### 一、系统软件

系统软件指的是在计算机运行状态下,保证用户正确而方便地工作的那一部分软件,包括操作系统、汇编系统、编译系统和诊断系统等。

操作系统是用户和计算机之间的接口,使用户能有效地使用计算机。操作系统全面管理计算机资源,合理地组织计算机的工作流程。操作系统的管理包括 CPU 管理、存储管理、文件管理、输入输出管理和作业管理等。操作系统是每一计算机系统都具有的系统软件。

80 年代以来,窗口软件得到了较大的发展。以集成操作环境为特点的窗口系统,被誉为新一代操作系统。

窗口是屏幕上的一个矩形区域,较常用的窗口形式有重叠型和瓦片型两种,前者窗口彼此重叠,后者窗口相互分离。窗口系统的基本窗口管理功能包括:①创建一个窗口;②删除一个窗口;③窗口尺寸的变换(放大或缩小);④窗口的可见性操作;⑤窗口的布置(如新开的窗口放在何处)。

窗口管理系统的特点是:①在同一屏幕上支持多个窗口,窗口可互相重叠,并可输出不可见窗口的内容;②一个应用程序可用同一屏幕上的多个窗口,在不同的窗口上可执行多个应用程序;③可在多种显示器上执行,使应用程序与设备无关;④具有集成化的操作环境和统一的用户界面,操作系统本身就是窗口化的;⑤窗口系统具有网络透明性,即可在操作系统和系统结构都不同的计算机上运行应用程序。

目前,在微机上运行的窗口管理系统中,比较常用的有 MS-Windows 和 Macintosh 等。在分布式系统和工作站上最流行的窗口管理系统是 X-Window。现在,窗口软件几乎已成为工作站的标准软件。

在开发模具 CAD/CAM 系统时,还需要用到编译系统和汇编系统。编写应用程序是模具 CAD/CAM 人员的一项经常性的工作,程序设计语言是必须掌握的基本工具。在模具 CAD/CAM 中常用的高级语言有 C、FORTRAN、PASCAL, BASIC 等。在开发 CAD/CAM 软件

中，有时也用到汇编语言。有些用汇编语言编写的程序可在高级语言程序中调用。因此，编译系统和汇编系统也是开发模具 CAD/CAM 系统所必需的系统软件。

## 二、支撑软件

模具 CAD/CAM 系统的支撑软件主要包括图形处理软件、几何造型软件和数据库管理系统等。

### 1. 图形处理软件

图形软件是模具 CAD/CAM 系统中的重要支撑软件。它可使用户方便地在屏幕上建立和修改图形，在绘图机上输出图形。

图形软件按应用范围可分为二维图形软件和三维图形软件。常用的二维图形软件包的基本功能包括：①产生各种图形元素，如点、线、圆等；②图形变换，如放大、平移、旋转等；③控制显示、开窗口、局部放大；④局部删除图形元素，修改、编辑图形；⑤输入和输出功能。除上述基本功能外，二维图形软件包提供的功能还有尺寸标注、书写文字、画剖面线等。

由于计算机和图形设备发展迅速，更新换代速度很快，图形软件的开发需要耗费大量的人力物力，如果图形软件随硬件的变化而修改，不仅非常困难，而且也是极大的浪费。为了使图形软件能够方便地在不同计算机和图形设备之间移植，国际标准化组织（ISO）制定了一些图形软件标准，美国等一些国家的标准化机构也都研究、制定了一些标准。

例如，国际标准化组织提出和制定了计算机图形设备接口标准 CGI (Computer Graphics Interface)、图形交换规范 IGES (Initial Graphics Exchange Specification) 和图形核心系统 GKS (Graphics Kernel System)。美国国家标准化委员会 (ANSI) 颁布了图形软件系统标准 PHIGS (Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System)。

CGI 是一种图形设备驱动程序的标准，提供了一种控制图形硬件的与设备无关的方法。IGES 定义了一套几何和非几何数据的格式及相应的文件结构，解决了在不同的 CAD/CAM 系统之间交换图形数据的问题。GKS 定义了一个独立于语言的图形系统的核心。在具体应用中，按照所使用语言的约定方式，把 GKS 嵌入到相应的语言中。

图形软件系统的层次可用图 2-10 表示。GKS 是图形系统的核心部分，提供了应用程序和图形输入、输出设备之间的功能接口。它包含了基本的图形处理功能，处于与语言无关的层次。在图 2-10 中，每一层次可以调用相邻的较低的层次。

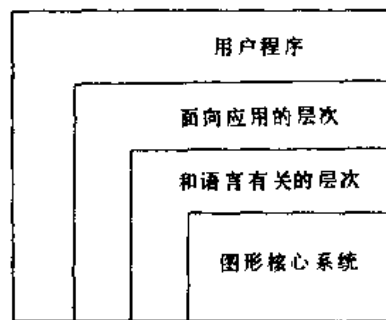


图 2-10 图形软件系统的层次

### 2. 几何造型软件

几何造型软件是用于建立物体几何模型的软件。利用其造型功能，可以定义物体的几何形状及其相互关系，在计算机内建立的几何模型可为设计、图形显示和 NC 编程等方面提供必要的信息。要实现模具 CAD/CAM，首先必须完成产品零件的几何造型，建立产品零件的模型，后续的一切处理和操作皆在此模型的基础上完成。因此，几何造型软件是模具 CAD/CAM 系统必不可少的支撑软件。

按照产生的几何模型的不同，几何造型方法可分为线框造型、表面造型和实体造型，产

生的模型分别为线框模型、表面模型和实体模型。目前,有些造型软件可以产生上述三种模型,并可使之相互转换。这种集成化的造型软件增强了几何造型的功能,扩大了其应用范围。

80年代以来,特征造型技术成为人们研究的一个热点,其目的是提供一套完整地描述物体特征信息的方法,为实现CAD/CAM的集成创造更有利的条件。利用特征造型技术可定义零件的形状特征、精度特征、材料特征和其他工艺特征,从而可为计算机辅助工艺设计(CAPP)提供所需的信息。特征造型软件发展很快,功能也越来越完善。关于几何造型问题,将在第六章介绍。

### 3. 数据库管理系统

模具CAD/CAM是一个信息分析、处理和传递的过程。在模具设计制造过程中,需要对大量的数据进行处理和操作。这些数据中有静态的数据,如标准设计数据、标准图形文件等,也有动态的数据。动态数据主要用于描述设计结果和用于各子系统之间的信息交换。数据管理是模具CAD/CAM中的一个非常重要的问题。设计、查询、对话和图形显示等项活动都和数据库有着密切的关系。

有些模具CAD/CAM系统利用操作系统的文件管理功能管理设计过程中的数据。各种标准数据均以数据文件形式存放在磁盘上;各模块之间的信息交换也利用数据文件。

使用文件系统管理信息的优点是简单易行,只要利用操作系统的功能就可以实现,不需要附加的管理软件。但是,文件系统的缺点是不能以记录或数据项为单位共享数据,导致数据的大量冗余,增加新数据和删除旧数据都很困难。为克服这些缺点,人们发展了数据库技术。

采用数据库系统管理设计数据时,数据按一定数据结构存放在数据库中,由数据库管理系统(DBMS)统一管理。数据库管理系统提供了各种管理功能,例如存放数据、删除数据和查找数据等。利用数据库管理系统的命令,可以完成各种数据操作。

数据库系统有如下优点:①编制应用程序时不必考虑各种标准数据的管理;②数据独立于程序,数据存储结构的变化不会影响应用程序;③减少了数据的冗余,提高了共享程度;④保证了数据的一致性;⑤便于修改与扩充。

### 三、应用软件

应用软件是在模具设计制造过程中用于特定目的的软件,例如冲裁模设计软件、注塑模设计软件和NC编程软件等。编制应用软件的过程就是将模具设计和制造工艺设计计算法化、程序化的过程。在开发的过程中,需要建立数学模型,用计算机可以处理的方式表述设计准则。开发模具CAD/CAM的过程及各阶段的任务,在第一章已经阐述。

目前,绝大多数模具CAD/CAM系统为交互式系统。交互式的模具CAD/CAM系统必须允许用户能方便地输入数据、选择功能,因而需要有一个用户界面。友好的用户界面可以使系统易学易用,不仅能提高工作效率,而且可减少错误率。

菜单作为用户界面的一个重要方面,在交互式的模具CAD/CAM系统中作用十分显著。用户通过点菜单可以完成输入命令和参数、动态编辑图形等工作。菜单按照在屏幕上的出现方式,可分为固定式菜单、下拉式菜单、弹出式菜单和翻页式菜单等类型;根据菜单项目的表达方式,又可分为文字菜单和图形菜单。

通常,将屏幕分为四个区,图2-11所示为一种分区布置方式。工作区用来显示图形和其

他工作内容；菜单区用以显示可供选择的菜单项目；状态区用以显示光标点的坐标值和其他状态信息；交互区显示用户输入的命令和参数。

菜单项目的位置一般由所在区域的左上角和右下角点的坐标定义。当用户利用图形交互设备将光标移至此区域，即表明选择此项目，控制程序便会调用相应的功能子程序。

当模具 CAD/CAM 作业采用菜单驱动时，要调用的功能项目很多。以图形编辑为例，作图时需要有画点、画直线和画圆等功能。画圆弧时又可以采用不同的方式，如起点、终点和圆心方式，起点、圆心和夹角方式等。这些功能在逻辑上是从属关系，与此对应的是分级菜单系统，如图 2-12 所示。主控程序首先显示主菜单，然后根据操作过程中光标击中的位置，显示不同级别的子菜单。

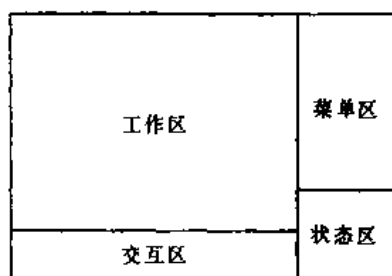


图 2-11 屏幕的分区布置

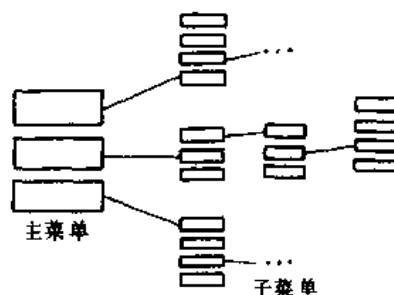


图 2-12 分级菜单

和开发其他软件系统一样，提高软件的开发效率和可靠性是模具 CAD/CAM 系统开发中的一个重要问题。为了解决这一问题，人们提出了计算机辅助软件工程（CASE: Computer Aided Software Engineering）的概念，并开发了一些 CASE 工具。利用 CASE 软件工具可以提高程序设计和调试的效率，大大减少错误率。

为了提高应用软件的开发效率，常将实现系统基本功能的算法程序建成程序库（又称方法库）。在开发应用程序时，可以直接调用程序库中的通用程序。

例如，可将常用的计算程序，如矩阵基本运算、解线性方程组、微分方程求解等程序存放在程序库中。应用程序可按系统规定的方式调用这些程序。

程序库中包括哪些程序可根据通用性和调用的频繁程度决定。建库的具体方法可在操作系统的使用手册中查到。

## 习 题

1. 模具 CAD/CAM 系统常用的计算机外部设备有哪些？各起什么作用？
2. 模具 CAD/CAM 系统的硬件配置有哪几种形式？分布式模具 CAD/CAM 系统有什么优点？
3. 模具 CAD/CAM 系统由哪些软件组成？它们各自的作用是什么？



## 第三章 数据的处理方法

在模具设计和制造工艺设计中，只有为数不多的设计准则和规范是以公式表达的，大量的则是以数表和线图的形式给出的。在建立模具 CAD/CAM 系统时，必须将这些数表和线图以计算机能处理的方式表达。

模具 CAD/CAM 的过程就是信息处理的过程，包括信息的输入、产生、转换、存储和输出等方面。通常，模具 CAD/CAM 系统的程序规模很大，结构相当复杂。要提高系统的效率，不仅涉及到程序的结构和算法，同时也涉及数据结构与管理方法。在应用程序的执行过程中，经常需要利用一些标准数据或其他程序的运行结果，系统各部分是通过交换数据相互联系的，因此，数据管理在模具 CAD/CAM 中的作用十分重要。

### 第一节 数表和线图的处理方法

#### 一、数表的程序化

设计手册中有不少设计准则是以数表的形式给出的。表中为一些离散的数据点，即与一些离散点  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 相对应的函数值  $y_i$ 。这样的数表实际上就是列表函数。数表的程序化是指用数组或数据文件形式表示数表中数据的方法。这种方法处理的数表在本质上和设计手册中的数表没有什么区别，只是作了方便程序检索或调用的处理。

##### (一) 以数组的形式存放数表

这种方法是将数表存放在数组中，数据的检索直接编在解题的程序中。下面以一维数组和二维数组存放数表为例说明这一方法。

##### 1. 一维数表

一维数表是最简单的一种数表，其数据可存放在一维数组中。如表 3-1 所示的数表为各种材料的密度，可在程序中用下面的语句将其存放在 GAMMA 数组内。

```
DIMENSION GAMMA (4)
DATA GAMMA/7.87, 7.85, 8.30, 7.75/
```

当然也可用赋值语句实现数表的存放。在这里，四种材料的密度分别以数组元素 GAMMA ( $I$ )， $I=1, 2, 3, 4$  来标识。在程序中，只要给定有关材料的代码  $I$ ，即可用以 GAMMA ( $I$ ) 表示的密度值参加运算。

##### 2. 二维数表

表 3-2 表示的为冲裁凹模孔口工作部分的尺寸。图 3-1 为几种常用的凹模工作部分形式。在程序化时，可以用一个二维数组存放这张数表。另外，我们还注意到表中列出的是几种材料厚度范围内所对应的  $h$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  值，也就是说自变量材料厚度有一定的范围。因此，在查表

表 3-1 材料的密度

材料	密度(g/cm <sup>3</sup> )
工业纯铁	7.87
钢材	7.85
高速钢	8.30
不锈钢	7.75

时应先判断材料厚度属于哪一组，然后才有可能找到  $h$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  的值。根据上面的分析，可以编出如下查表程序。

表 3-2 冲裁凹模孔口工作部分尺寸

材料厚度 (mm)	$h$ (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)
<0.5	5	15	2
0.5~1.0	6	15	2
1.0~2.5	7	15	2
2.5~6.0	8	30	3
$\geq 6.0$	10	30	3

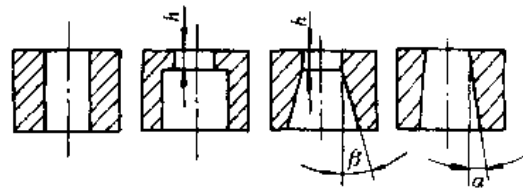


图 3-1 凹模工作部分形式

程序中的参数说明如下：

T——板厚数组；

AH——尺寸数组；

TA——板厚；

H—— $h$ ；

ALPHA—— $\alpha$ ；

BETA—— $\beta$ 。

SUBROUTINE HAB (TA, H, ALPHA, BETA)

DIMENSION T (4), AH (5, 3)

DATA T/0.5, 1.0, 2.5, 6.0/

DATA AH/5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 10.0, 0.25, 0.25, 0.25, 0.5, 0.5, 2.0, 2.0, 2.0,  
3.0, 3.0/

DO 100 I=1, 4

IF (TA.LE.T (I)) GO TO 150

100 CONTINUE

I=5

150 H=AH (I, 1)

ALPHA=AH (I, 2)

BETA=AH (I, 3)

RETURN

END

在设计程序中，当已知材料的厚度要查找  $h$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  的数值时，可以调用上述子程序：

CALL HAB (TA, H, ALPHA, BETA)

这样就可获得所需的数值。

设计手册中的大部分数表在程序中都可以用一个二维数组来代表，上面的方法是处理数表时较常使用的方法。与此类似地，在有些场合也可以用三维数组来存放数表。在掌握了上面的方法后，三维数表的查找程序不难自行编出。

(二) 以数据文件形式存放数表

将数表以数组的形式程序化的方法适用于一些数表较少、数据不多的情况。在设计手册

中数表很多,而且不少数表中的数据也很多,所以常将数据与程序分开,单独建立数据文件,存放在外部存储器中。当程序需要用有关数据时,可以使用文件操作语句打开文件,将数据读入内存。

这里仍以上面讲到的凹模孔口尺寸数表为例,说明如何将数表存放于数据文件,以及如何调用有关数据的方法。首先,利用操作系统的文件管理功能在磁盘上建立存放表中数据的文件。比如,可以建立文件名为 AOMO.DAT 的数据文件,以五个记录存放数表。形成的文件中包括如下数据:

```
5.00 0.25 2.00
6.00 0.25 2.00
7.00 0.25 2.00
8.00 0.50 3.00
10.00 0.50 3.00
```

存放数据所用的格式为 3F8.2。建立文件时所用到的编辑命令随不同的操作系统而异,使用时可参阅有关的使用说明书。

文件建成后,当程序中需要用到 AOMO.DAT 中的数据,只要打开文件将数据读入即可。例如,

```
DIMENSION A (5, 3), T (4), B (10), C (2, 5)
      :
OPEN (2, FILE= 'AOMO.DAT')
READ (2, 100) ( (A (I, J), J=1, 3), I=1, 5)
100 FORMAT (3F8.2)
CLOSE (2)
      :
STOP
END
```

上面的程序语句可以实现打开文件、读入数据,其中 OPEN 和 CLOSE 语句分别为打开和关闭文件。

## 二、函数插值

用数表表示的列表函数,只能给出结点  $x_i$  上的函数值  $y_i$ 。如果要求不在结点上的函数值,当精度要求较低时可用附近结点上的函数值来近似代替;如果要求较高,则须用插值的方法求得。

插值的基本思想是,设法构造一个函数  $y=p(x)$  作为列表函数的近似表达式,然后计算  $p(x)$  的值以得到  $f(x)$  的值。最常用的近似函数类型为代数多项式。代数插值的数学含义可表述如下:

设  $y=f(x)$  是区间  $[a, b]$  上的连续函数,已知它在  $[a, b]$  上的几个互不相同的点  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  上的函数值  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 。若代数多项式  $p(x)$  满足  $p(x_i) = y_i$ , ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 则称  $p(x)$  为函数  $y=f(x)$  的插值多项式,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为插值结点,区间  $[a, b]$  为插值区间,  $y=f(x)$  称为被插值函数。

插值问题的几何意义是,通过给定的几个点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  作一条

$n-1$  次的代数曲线  $y=p_{n-1}(x)$ ，用以近似地表示曲线  $y=f(x)$ 。所以，当数表中的变量之间存在确定的函数关系时，可以用代数插值的方法求得它们之间的近似关系式。

### (一) 线性插值与二次插值

最简单的插值为两点插值，即用一个一次多项式  $y=p_1(x)$  作为插值多项式，使两个插值点满足此式。其几何意义就是求通过两点  $(x_1, y_1)$ ， $(x_2, y_2)$  的直线。由图 3-2 可知，通过这两点的直线方程为

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) = p_1(x)$$

上式经过整理，可改写成：

$$p_1(x) = \frac{x - x_2}{x_1 - x_2} y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} y_2 \quad (3-1)$$

一次插值又称线性插值，常用来求两个数据点之间的  $x$  的函数值。例如，当需要求表 3-3 中温度为  $t$  ( $t_i < t < t_{i+1}$ ) 时的线膨胀系数  $\alpha$  时，就可按线性插值公式求取。

$$\alpha = \frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \alpha_i + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \alpha_{i+1}$$

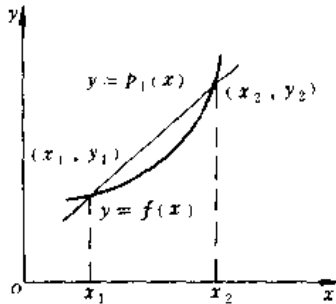


图 3-2 两点插值的几何意义

表 3-3 线膨胀系数

温度 $t$ (°C)	线膨胀系数 $\alpha$
0	0
100	$1.22 \times 10^{-5}$
200	$1.28 \times 10^{-5}$
300	$1.34 \times 10^{-5}$
⋮	⋮
700	$1.54 \times 10^{-5}$

线性插值只用到两个数据点的信息，计算简单，但求得的  $y=f(x)$  误差较大。如果多用一些数据点来求  $y=f(x)$  的近似值，其结果的精确程度就会改善。设已知  $y=f(x)$  在  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  上的值为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ ，这时求作一个二次多项式  $y=p_2(x)$ ，使  $p_2(x_i) = y_i$ ， $i=1, 2, 3$ 。其几何意义是通过三点作一条曲线来近似曲线  $y=f(x)$ 。如果三个点不在一直线上，作出的曲线就是抛物线。

因为点  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  满足方程  $y=p_2(x)$ ，故可设

$$p_2(x) = p_1(x) + a(x-x_1)(x-x_2)$$

即

$$p_2(x) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + a(x - x_1)(x - x_2)$$

式中  $a$  为待定系数。由上式不难看出： $p_2(x_1) = y_1$ ， $p_2(x_2) = y_2$  的条件显然满足。只要再利用条件  $p_2(x_3) = y_3$  就可以确定系数  $a$ 。将  $x=x_3$  代入式中，得

$$p_2(x_3) = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x_3 - x_1) + a(x_3 - x_1)(x_3 - x_2) = y_3$$

从上式中解出  $a$ ，然后代入原式，经整理可得

$$p_2(x) = \frac{(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)}y_1 + \frac{(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)}y_2 + \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)}y_3 \quad (3-2)$$

$p_2(x)$  叫做二次插值多项式。这种插值称为二次插值或抛物线插值。一般地说，二次插值的近似程度比线性插值要好些。

### (二) 拉格朗日插值公式

将线性插值和二次插值的方法推而广之，可以求得  $n$  个结点的  $n-1$  次插值多项式为

$$p_{n-1}(x) = \sum_{K=1}^n \frac{(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_{K-1})(x-x_{K+1})\cdots(x-x_n)}{(x_K-x_1)(x_K-x_2)\cdots(x_K-x_{K-1})(x_K-x_{K+1})\cdots(x_K-x_n)}y_K = \sum_{K=1}^n \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^n \frac{x-x_j}{x_K-x_j} \right) y_K \quad (3-3)$$

式中， $\Pi$  表示累乘， $\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq K}}^n$  表示乘积遍取  $j$  从 1 到  $n$  除  $j=K$  以外的全部整数。公式 (3-

3) 就是拉格朗日插值公式。该式在逻辑结构上表现为二重循环，内循环计算累乘，再用外循环求代数和。所以，根据式 (3-3) 可编出如下程序。

参数含义：

X (N) —— 存放结点处自变量值的数组；

Y (N) —— 存放结点处函数值的数组；

XO —— 插值点的自变量值；

YO —— 插值点处的函数值；

N —— 结点个数。

```
SUBROUTINE INTP1 (X, Y, N, XO, YO)
```

```
DIMENSION X (N), Y (N)
```

```
YO=0.0
```

```
DO 200 K=1, N
```

```
P=1.0
```

```
DO 100 J=1, N
```

```
IF (J.EQ.K) GO TO 100
```

```
P=P * (XO-X (J)) / (X (K) -X (J))
```

```
100 CONTINUE
```

```
YO=YO+P * Y (K)
```

```
200 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

适当提高插值公式的阶数可以改善插值精度，但阶数太高的插值公式效果并不好。在实际进行插值时，通常采用分段插值方法，将插值范围划分为若干段，在每一分段上用低阶插值（如线性插值或抛物线插值）。

### 三、线图的程序化

在设计手册中，有些参数之间的函数关系是用线图表示的，包括直线、折线和各种曲线图。线图的特点是鲜明直观，变化趋势显而易见。但是，线图本身不能直接存储在计算机中，因此在计算机辅助设计时，必须将线图变换成相应的数据形式存储，供设计时检索调用。处理线图时，可先将其转换为数表，然后用前面讲过的数表程序化方法将其程序化；也可以将线图公式化，在设计程序中直接调用。

无论用何种方法处理线图，都必须首先将线图离散化。图 3-3 所示为 15 钢实心件正挤压时模具单位面积上挤压力与变形程度的关系图。为了把此线图变换成数表，可在曲线上取一些结点，把这些点的坐标值列成一张一维数表，如表 3-4 所示。

结点的选取随曲线的形状而异，选取的基本原则是使各结点函数值之间相差不致很大。

由上可知，一条曲线可变换为一张一维数表。上述线图是 15 钢的变形程度与挤压力的关系，对于其他材料也有类似的曲线。于是，可以将各种材料的表组合成一张二维数表，经程序化处理后便可在设计程序中调用。

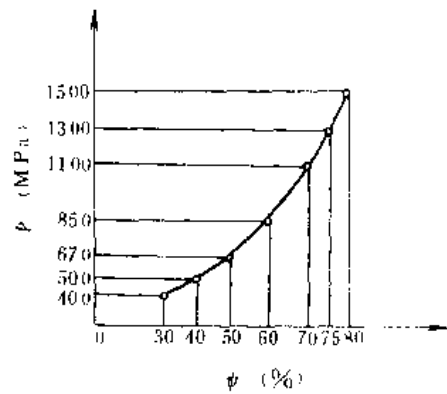


图 3-3 15 钢实心件正挤压时单位面积上挤压力与变形程度的关系

表 3-4

$\Psi$ (%)	30	40	50	60	70	75	80
$p$ (MPa)	400	500	670	850	1100	1300	1500

图 3-4 为凹模、凸模的圆角半径对黄铜极限拉伸系数的关系。横坐标为凹模圆角半径和板厚之比，纵坐标为极限拉伸系数。图中的四条曲线分别代表凸模圆角半径和板厚之比为 1、2.5、6、10 时的关系，这四条曲线可以用二维数表表示。当用数组结合这个数表时，二维数组的行可以表示  $r_d/t$ ，列可以表示  $r_p/t$ ，数组元素就是极限拉伸系数  $m$ 。

除可将线图程序化外，还可以将其公式化，即用插值方法或最小二乘法将离散化的线图转换为公式。关于最小二乘法，本书不作详述。

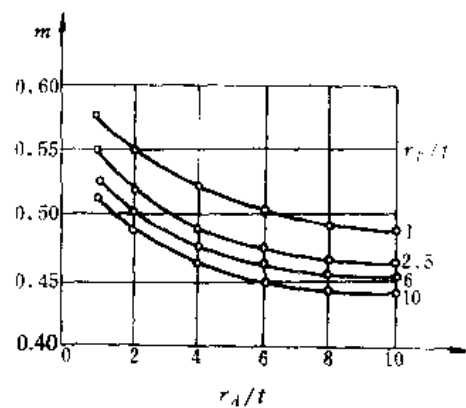


图 3-4 黄铜的极限拉伸系数与凸、凹模圆角半径的关系

## 第二节 用文件系统管理数据的方法

有一些模具 CAD/CAM 系统利用文件系统管理数据，这时用文件存储标准设计数据和设计结果，并作为各模块之间交换信息的手段。在操作系统的文件系统支持下，只要给出文件

的名字，便可存取文件中的数据。

### 一、文件及其操作

文件是一个具有名字的信息集合。有时，可根据文件内容的逻辑关系将其划分为若干逻辑记录。所谓记录就是逻辑上相关的一组信息。因此，也可以说文件是若干逻辑记录组成的信息集合。

每一个文件都有其名字，文件名由若干字符组成。文件名可以带有后缀，亦称扩展名。例如，BCD.FOR, LTS.BAS 和 BC12.DAT 等都可以作为文件名。

文件系统给用户提供了多种文件操作命令。这些文件操作可分为三类：用于目录管理的，如建立目录、列出目录；用于文件管理的，如建立文件、打开文件、关闭文件、删除文件；用地文件传输的，如读文件、写文件、复制文件。下面为 DOS 操作系统提供的一些文件操作命令。

MD [d:] path 在指定盘上建立一个子目录；  
 RD [d:] path 删除指定盘上的一个子目录；  
 CD [ [d:] path] 改变或显示当前目录；  
 DIR [path] 列出目录；  
 COPY file 1 file 2 复制文件；  
 DEL file 删除文件；  
 REN file 1 file 2 改变文件的名称；  
 TYPE file 在屏幕上显示文件内容。

为了能在程序中操作文件，程序语言必须提供文件操作语句。现对 FORTRAN 语言中的 OPEN 语句和 CLOSE 语句作一简要说明。

OPEN (打开) 语句的功能是打开一个已经存在的文件，将其与一个通道号连接起来；对一个尚不存在的文件，则建立一个新文件，将其连接到指定的通道上。

OPEN 语句的格式

```
OPEN (n, FILE='filename', STATUS=st,
      ACCESS=ac, FORM=fm, RECL=rl)
```

其中，n——设备通道号，整型数；

filename——文件名，如前述；

st——'NEW' 或 'OLD' (可省缺)，'NEW' 用于新文件，'OLD' 用于已有的文件；

ac——'SEQUENTIAL' (可省缺) 为顺序存取文件，'DIRECT' 为直接存取文件；

fm——'FORMATTED' (可省缺) 表示有格式方式读写，'UNFORMATTED' 表示无格式方式读写；

rl——整型表达式，表示记录长度，仅用于直接存取文件。

CLOSE (关闭) 语句的作用是关闭通道，从而关闭文件。

CLOSE 语句的格式

```
CLOSE (n, STATUS=st)
```

其中 n——通道号；

st——'DELETE' 表示与 n 号通道相连的文件被关闭后不再保存，'KEEP' 表示该文件被关闭后要保存起来。

## 二、模具 CAD/CAM 系统模块间的数据传递

前面已经讲过用文件管理标准设计数据的方法，这里介绍的是如何用文件在设计过程中传递数据。

一个模具 CAD/CAM 系统常由数百甚至更多个子程序组成。这样庞大的系统通常采用模块化结构，即将系统分解为具有不同功能、结构上相对独立的若干部分。例如，冲裁模 CAD/CAM 系统可以分为图形输入、排样、凸模设计、凹模设计和 NC 编程等模块，每一模块完成特定的功能。

每一模块必须得到所需的数据才能运行。这些数据有的是标准数据，有的是其他模块的运行结果。当系统划分为若干模块后，就产生了模块间的联系问题，亦即模块间的数据传递问题。因此，各个模块都有将运行结果传递给其他模块，或输出给用户的任务。

图 3-5 为利用文件系统实现数据管理与传递的模具 CAD/CAM 系统的示意图。系统由  $m$  个模块组成，文件系统管理着  $n$  个数据文件。有些数据文件保存着标准数据，例如标准模架、标准模板尺寸等；有些文件保存的内容为各模块的运行结果。

一个模块在运行中，可以从标准数据文件中检索数据，或从其他模块输出的数据文件中取得数据。

现以冲裁模 CAD/CAM 系统的凹模设计模块和凸模设计模块之间的数据联系为例，说明文件的使用。在下面的程序段中，凹模设计模块将设计结果写入名为 AOMO.DAT 的文件

：（进行凹模设计）

```
OPEN (2, FILE='AOMO.DAT',
STATUS='NEW')
WRITE (2, 1000) D, L, B, T, X, Y, PHA

WRITE (2, 1010) M, IH, N, LB, LC
WRITE (2, 1020) HD, BETA
1000 FORMAT (1X, 7F8.3)
1010 FORMAT (1X, 5I3)
1020 FORMAT (1X, 2F8.3)
CLOSE (2)
STOP
END
```

因为在设计凸模时需要用到凹模的设计结果，所以凸模设计模块要利用凹模设计模块产生的数据文件。在下面的程序段中，凸模设计模块打开 AOMO.DAT 文件，从中读取所需数

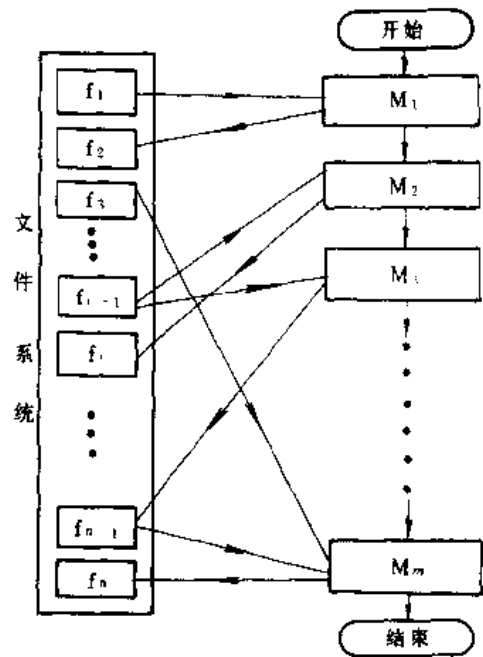


图 3-5 利用文件系统实现数据管理与传递



据。

：（从其他文件中输入数据）

```

OPEN (2, FILE='AOMO.DAT')
READ (2, 90) D, L, B, T, X, Y, PHA
READ (2, 100) M, IH, N, LB
90  FORMAT (1X, 7F8.3)
100 FORMAT (1X, 4I3)
CLOSE (2)

```

：（进行凸模设计）

### 第三节 数据库及其应用

目前，文件系统还在一些模具 CAD/CAM 系统中采用。利用文件系统管理数据的优点是简单易行，可直接利用操作系统的文件管理功能，不需要额外的软件投资，也不会因为数据管理软件占用过多的内存。

但是，利用文件系统管理数据存在以下问题。

1) 因为文件是根据应用程序的需要而建立的，不同应用程序需要有各自的文件，数据不能共享，因而造成数据冗余。这既占用了大量的存储空间，也使得数据的修改变得十分困难，很容易造成数据的不一致，从而降低了数据的正确性。

2) 由于数据的逻辑结构是适应于应用程序的，这就使得数据和应用程序相互依赖，要想对现有的数据进行一些新的应用是很困难的。一旦数据的结构需要修改，应用程序也必须自应地进行修改。反之，应用程序的改变也将影响到数据结构的变化。数据缺乏对程序的独立性。

3) 文件系统缺乏对数据进行控制的统一方法，使得应用程序的编制相当繁琐。另外，这种方法缺乏对数据的正确性、保密性等方面的统一有效的控制手段。

4) 数据不能共享，难以适应多用户环境。

另外，CAD/CAM 的目的不仅是实现某些设计过程和制造过程的自动化，而且还在于实现设计和制造之间的信息传递与共享，即实现信息集成。由于文件系统的上述问题，妨碍了 CAD 和 CAM 的集成，很难实现信息共享。

数据库技术的发展为 CAD/CAM 的集成创造了有利条件。实践证明，以数据库为中心的 CAD/CAM 系统是实现 CAD/CAM 集成的最佳方案。

#### 一、数据库与数据库管理系统

以数据库为中心的模具 CAD/CAM 集成系统可用图 3-6 表示。其中，公用的数据库保存着产品零件模型、模具设计结果、物料清单以及设计和

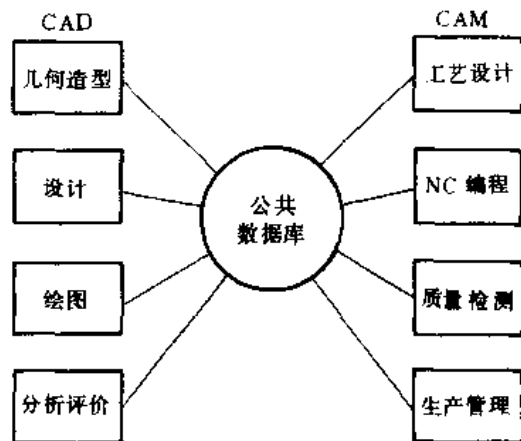


图 3-6 以数据库为中心的模具 CAD/CAM 系统

制造所需的其他数据。数据库中的数据可为各个子系统或模块共享，从而实现了系统的集成。

和文件系统相比，数据库系统具有一些明显的优点：

- 1) 可以实现数据共享，大大减少了数据的冗余。
- 2) 数据独立于应用程序，应用程序的改变不会影响数据结构，数据结构的改变也不会影响应用程序。
- 3) 应用程序的编制者可以不考虑存储管理和访问的效率问题。
- 4) 数据库系统实现了对数据的统一控制，保证了数据的正确性和保密性。

数据库系统包括数据库和数据库管理系统两部分。数据库指的是所存储的关联数据的集合。例如，数据库中可保存模具标准和工艺数据等内容。数据库管理系统 (DBMS: Data Base Management System) 是管理数据库的软件。它提供了对数据的定义、建立、查询和修改等功能，对数据的安全性、完整性和保密性进行统一控制。数据库管理系统起着应用程序与数据库之间的接口作用。用户通过数据库管理系统对数据库中的数据进行处理，而不必了解数据库的物理结构。

在数据库中信息是按一定的数据模型存储的。数据模型是对客观事物及其联系的数据描述。根据数据模型的不同，数据库可分为关系型数据库、层次型数据库和网络型数据库。

关系型数据库采用的数据模型为关系模型。关系模型是若干“关系框架”组成的集合。一个关系可以看作是由行和列组成的矩形表。行称为记录，列称为字段或域。关系数据库的信息组织与设计手册中常用的二维数表极为相似。

层次型数据库采用的数据模型为层次模型。层次模型是以记录类型为结点的树状结构。这种层次结构中，除根结点外任何结点都只有一个父结点。父结点与子结点是一对多的联系。例如，模具与部件、零件之间的关系可用这种模型表示。

网络型数据库采用的数据模型为网络模型。网络模型是以记录类型为结点的网络结构，网络与树不同，一个

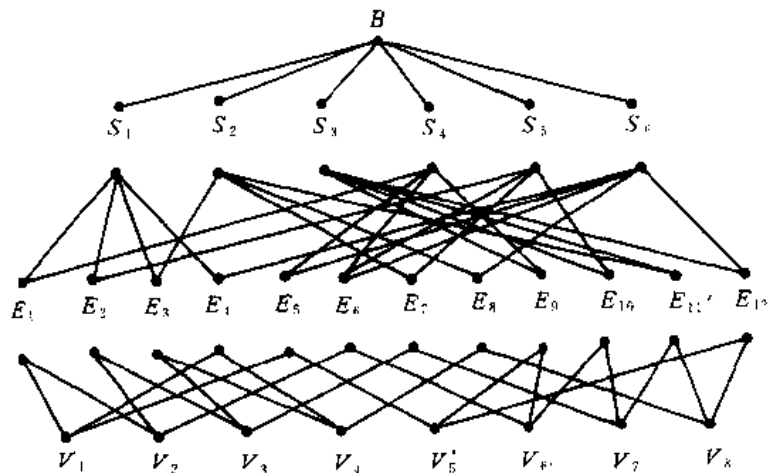


图 3-7 长方体的数据结构

子结点可以有多个父结点，在两个结点之间可以有多种联系。网络模型可以较好地描述图形数据结构。例如，长方体  $B$  由六个边界面  $S_1, S_2, \dots, S_6$  封闭而成。各个面均由四条棱线围成，每条棱线可通过两个端点定义。因此，长方体的数据结构可用图 3-7 所示的网络模型表示。

## 二、工程数据库管理系统

目前，商用数据库管理系统已较成熟，应用也较广泛。但是，商用数据库管理系统并不完全适合工程数据管理的需要。这是因为商用数据和工程数据之间存在着许多差别。商用数

据类型简单,各种类型的数据量大;工程数据类型复杂,但各种类型的数据量并不大。商用数据关系简单,基本上是静态数据模式;工程数据关系复杂,属于动态数据模式。

例如,模具CAD/CAM涉及的数据可分为图形数据和非图形数据。图形数据中既有绘制工程图的二维数据,又有造型所需要的三维数据。非图形数据中,一部分为标准数据,包括设计规范、标准公差、材料性能和模型标准等;另一部分是管理信息,如产品性能、用户需求、工艺规范和生产计划等。模具加工所用的NC代码也是一种非图形的数据,而且是一种非结构化的数据。

商用数据库系统所采用的关系、层次和网络数据模型在CAD/CAM应用环境下暴露出一些不足。例如,层次模型无法实现同层间的相互调用和低层对高层的调用。网络模型可较好地描述图形数据结构,但使用复杂。程序员要了解其结构,才能写出效率较高的程序。关系模型简单,而且存取数据的路径对用户是透明的,但描述图形数据的能力差。因此,有必要针对工程应用的特点,发展工程数据库管理系统(EDBMS; Engineering Data Base Management System)。

CAD/CAM对工程数据库的主要要求可归纳为以下几个方面:

1) EDBMS必须能管理多种类型的数据,包括图形数据和非图形数据、结构化的数据和非结构化的数据。

2) 发展传统的数据模型,使之适合CAD/CAM的应用要求。

3) 因为设计过程是一个逐步完善的过程,设计对象的信息也随之不断变化,所以要求数据库模式具有动态变化的能力。

4) EDBMS应具有存储和管理多种设计方案和工艺方案的能力,即应能支持设计的版本化。

除以上几条外,还要求EDBMS具有交互用户接口、适合分布式的工作环境、支持工程性的事务处理等。

要满足上述所有要求是十分困难的,需要继续研究开发。工程数据库目前尚不很成熟,研究工作十分活跃。例如,在发展新的数据模型方面,有的扩充关系模型,建立具有关系和网络两种模型特点的混合模型;有的采用面向对象的关系数据模型;还有的提出新的语义模型,即在模型中既包括实体的属性描述,也包括有关操作的信息和语义信息。当前,开发工程数据库管理系统,通常的做法有以下三种:

1. 将商用数据库管理系统与图形文件相结合

这种做法是利用商用数据库管理系统的优点,加上图形处理功能,集成为工程数据库管理系统。在这种系统中,非图形的数据由商用数据库系统管理,而图形数据则利用图形文件管理,其系统结构如图3-8所示。

2. 扩展已有的数据库管理系统

利用已有的DBMS的核心,根据工程应用的要求扩展成为一个EDBMS。例如,Computervision公司的EDM就是在ORACLE数据库管理系统的核心基础上开发的。这种方法可利用已有的一些比较成熟的技术,避免了许多重复性的设计开发工作。

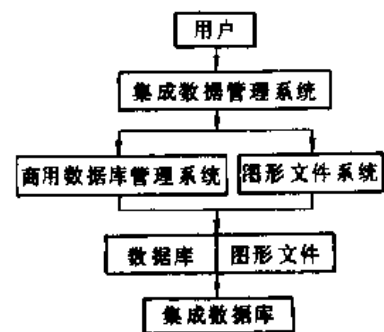


图 3-8 商用数据库管理系统与图形文件相结合

### 3. 自行开发新的 EDBMS

这是一种比较彻底地解决工程数据管理问题的方法，即将工程应用的需求体现在 DBMS 内部，用统一的方式管理图形的和非图形的数据、结构化的和非结构的数据。当然，自行开发较完善的 EDBMS 需要大量的人力和较长的时间。

### 三、dBASE III 数据库管理系统及其应用

可用于 CAD/CAM 的数据库管理系统有许多种。dBASE III 是一种可在微机上运行的数据库管理系统。这里，作为一个例子介绍 dBASE III 的主要结构，说明数据库管理系统在模具 CAD/CAM 中的应用。dBASE III 的一些常用命令见附录 A。

#### (一) dBASE III 数据库的主要结构

dBASE III 属于关系型数据库管理系统。一个 dBASE III 数据库可以由任意数目的数据库文件组成，每个文件称为一个关系。一个关系由行和列组成，行称为记录，列称为字段或域。每个记录指定一个记录号，每个字段必须有一个字段名。

dBASE III 整个系统较大，运行时至少需要 256KB 内存，其中常驻内存的 DBASE.EXE 文件大约占 113KB。dBASE III 具有以下主要性能：

- 1) 数据库文件可容纳 10 亿个以上的记录。
- 2) 每个记录可有 128 个字段，可容纳 4000 个字符。
- 3) 可同时使用 10 个数据库文件。
- 4) 一个数据库中的文件个数没有限制。
- 5) 存储器变量的个数为 256。
- 6) 存储器变量的最大字节数为 6000。
- 7) 既可交互运行，也可自动运行，具有完整的关系运算和可编程特性。

dBASE III 用九种格式的文件存储信息，每种文件具有其特定的作用，文件的类型用扩展名来确定。这里，介绍一下 dBASE III 数据库的文件。

#### 1. 数据库文件 (.dbf)

数据库文件用记录和字段存储数据。数据库文件是组成数据库的基本文件，允许用户建立、修改和删除数据库文件。

#### 2. 数据库备注文件 (.dbt)

数据库备注文件是数据库文件的辅助文件，用以存储备注字段的内容。同一数据库文件中的所有备注字段都存储在同一个备注文件中。

#### 3. 索引文件 (.ndx)

索引文件给出了按逻辑顺序，而不是按物理顺序使用数据库的方法。物理顺序是记录键入的次序，逻辑顺序是根据一个或多个字段的内容决定的。这是一种用于快速数据操作的辅助文件，文件中包含排了序的字段名及对应的记录号。

#### 4. 命令文件 (.prg)

命令文件又称为 dBASE III 的应用程序文件，包含若干 dBASE III 命令。用户可以用 DO 命令执行应用程序。

#### 5. 格式文件 (.fmt)

格式文件允许用户在输入、输出数据时使用自己安排的屏幕格式。

#### 6. 标签文件 (.lbl)

标签文件含有打印标签的 LABEL 命令所需的信息。

#### 7. 存储器变量文件 (.mem)

处理数据时，常使用一些存储器变量来存放常数、中间变量和最终结果。存储器变量文件可含有 256 个存储器变量。存储器变量文件可用 SAVE 命令建立，也可用 RESTORE 命令将其读入内存。

#### 8. 报表格式文件 (.frm)

报表格式文件中包含有准备报表的 REPORT 命令所需的信息。

#### 9. 文本输出文件 (.txt)

文本输出文件为 ASCII 码形式，为 dBASE III 和其他软件的接口。

### (二) dBASE III 数据库的应用

如当前驱动器为 A 驱动器时，为了运行数据库，则在 A>提示符下键入

```
A>dBASE
```

dBASE III 以开始标识和版权说明作为响应，然后在圆点提示符后面显出光标，等待命令。圆点表示 dBASE III 处于交互运行方式。此时，只要输入一个命令，便可即时得到响应。

如要中止 dBASE III 的工作，返回操作系统，则只要在圆点提示符下键入

```
• QUIT
```

#### 1. 数据库文件的建立和修改

在模具 CAD/CAM 中要用到大量的标准数据，包括国家标准、部颁标准和企业标准。为此，须将这些标准以一定形式存放在系统中。当采用 dBASE III 时，可以将这些数据组织为一个一个的数据库文件。

建立数据库文件可使用 CREATE 命令，其格式为

```
CREATE <文件名>
```

其中，文件名是用户指定的新建数据库文件的名称。对文件中包含的每一个字段应指定字段名、类型、宽度和小数位。对于字符字段、数字字段、逻辑字段、日期字段或备注字段，只要输入一个英文字母（依次为 C、N、L、D 和 M）便可确定其类型。CREATE 是一条全屏幕工作方式的命令，可移动光标修改或删除已定义的字段，也可插入新字段。所有字段定义完毕后，可键入 CTRL-END 或 CTRL-W，并以回车结束 CREATE 过程。

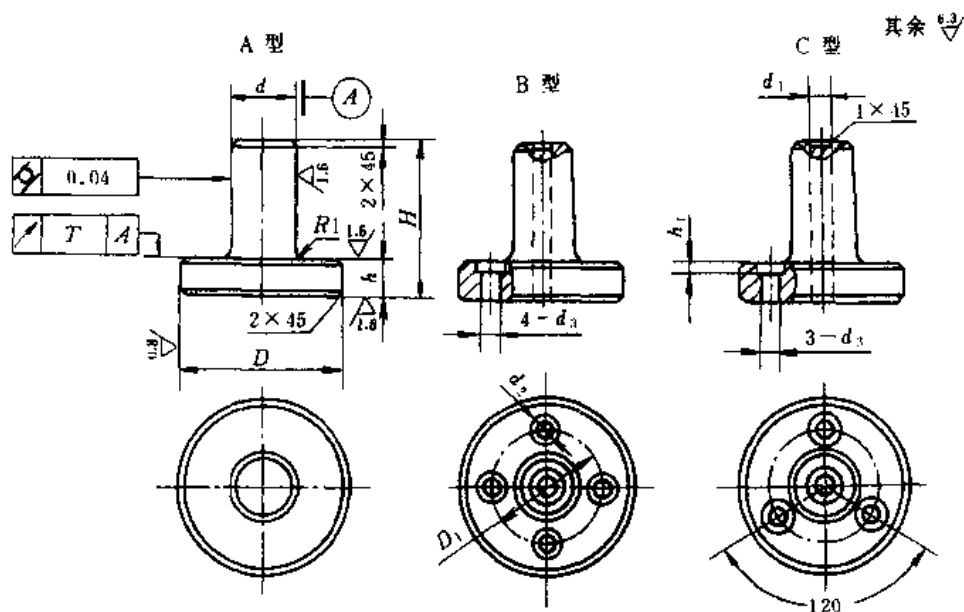
现以凸缘模柄 (GB2862.3—81) 为例，说明建立数据库文件的方法。在 DOS 操作系统状态下键入

```
A>dBASE
```

当 dBASE III 的提示符圆点出现后，键入命令

```
• CREATE GB623
```

GB623 为要建立的保存凸缘模柄国家标准的数据库文件名。这时可逐项输入字段名、类型、字段宽度和小数位。例如，可以用 DD11 为名的字段表示模柄的小端直径，其类型为数字型，字段宽度定为 3，其基本尺寸为整数，所以不必规定小数位。其他项目的规定方法类似。最后，键入 CTRL-END，并按回车键，便完成了数据库文件的结构定义。系统接着问是否输入数据，回答 Y，可输入有关数据，形成完整的数据库文件。数据库文件建立之后，还可用有关的修改命令对其结构或数据进行修改，因此便于系统的更新和扩充。图 3-9 为凸缘模柄的国家标准。



(mm)

$d$ (d11)		$D$ (h6)		$H$	$h$	$d_1$	$D_1$	$d_3$	$d_2$	$h_1$
基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差							
30	-0.065 -0.195	75	0 -0.019	64	16	11	52	9	15	9
40	-0.080	85	0	78	18	13	62	11	18	11
50	-0.240	100	-0.022							
60	-0.100	115	0	90	20	17	87	13.5	22	13
76	-0.290	136	0 -0.025	98	22	21	102			

图 3-9 凸缘模柄国家标准

保存凸缘模柄国家标准的数据库文件 GB623.DBF 的结构如下:

STRUCTURE FOR FILE: GB623.DBF

NUMBER OF RECORDS: 00005

DATE OF LAST UPDATE: 01/01/80

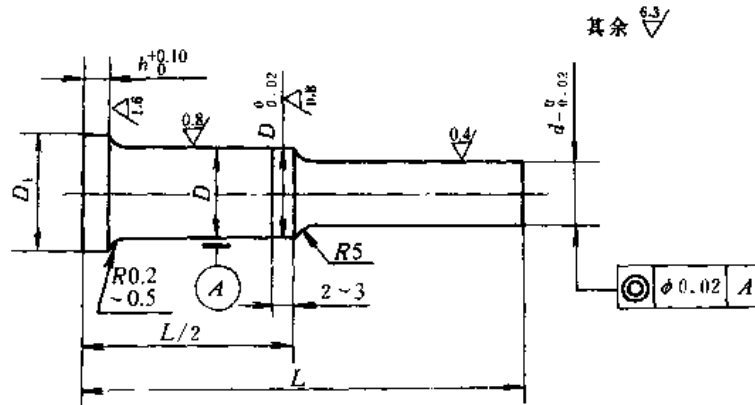
PRIMARY USE DATABASE

FLD	NAME	TYPE	WIDTH	DEC
001	DD11	N	003	
002	DD11S	N	006	3
003	DD11X	N	006	3
004	DH6	N	003	
005	DH6S	N	005	3
006	DH6X	N	006	3
007	H	N	003	

008	HO	N	002	
009	DO	N	002	
010	D1	N	003	
011	D3	N	004	1
012	D2	N	002	
013	H1	N	002	

\*\* TOTAL \*\* 00048

对照图 3-9 可知, 利用 dBASE 数据库文件可方便地存放模具标准数据。



(mm)

d	D (m5)		D <sub>1</sub>	h		L								
	基本尺寸	极限偏差		1 型	1 型	36	38	40	42	45	48	50	52	55
3.0	6	+0.012 +0.004	9	3										
3.1														
3.15														
3.2														
∴	∴	∴	∴	∴	∴									

图 3-10 B 型圆凸模国家标准

下面给出的是图 3-10 所示的 B 型圆凸模 (GB2863.2-81) 的数据库结构及部分数据。

STRUCTURE FOR FILE: GB632.DBF

NUMBER OF RECORDS: 00084

DATE OF LAST UPDATE: 01/01/80

PRIMARY USE DATABASE

FLD	NAME	TYPE	WIDTH	DEC
001	D	N	006	002
002	DD	N	003	
003	DDS	N	007	003
004	DDX	N	007	003
005	D1	N	003	
006	H1	N	002	

007	H2	N	002						
008	LX	N	003						
009	LD	N	003						
* * TOTAL * *			00037						
00001	3.00	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00002	3.10	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00003	3.15	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00004	3.20	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00005	3.30	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00006	3.50	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00007	3.70	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00008	3.80	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00009	3.90	6	0.012	0.004	9	3	0	36	50
00010	4.10	8	0.015	0.006	11	3	0	40	55
00011	4.15	8	0.015	0.006	11	3	0	40	55
00012	4.20	8	0.015	0.006	11	3	0	40	55
00013	4.30	8	0.015	0.006	11	3	0	40	55
00014	4.60	8	0.015	0.006	11	3	0	40	55

## 2. 数据的查询

模具 CAD/CAM 中需经常查找数据, 例如设计计算时要查找有关参数, 自动绘图时需调用一些标准数据等。因此, 需要以程序方式即自动方式从数据库中查询所需的数据, 尽量减少人工干预。

除交互方式外, dBASE ■ 允许用户以程序方式运行。用户可以将一系列命令保存在扩展名为 PRG 的命令文件中。在操作系统下, 键入 dBASE <命令文件名>, 或者在点提示符下键入 DO <命令文件名>, 便可自动执行文件中的全部 dBASE ■ 命令。

例如, 需查找国家标准 B 型圆凸模的数据时, 可编写名字为 GETGB.PRG 的命令文件。该文件中包含如下命令:

```
USE GB632
COPY TO GB632 SDF
RETURN
```

此命令文件中的第一条命令是打开数据库文件 GB632.DBF, 第二条命令是将此数据库文件拷贝成名为 GB632.TXT 的文本输出文件, 第三条命令是返回。

在操作系统下, 键入 dBASE GETGB, 便可使命令文件自动执行, 结果形成 GB632.TXT 文件, 可供以后调用。

如果在命令文件中使用的命令为

```
COPY TO GB632 SDF FOR D=5.0
```

则形成的 .TXT 文件中, 包含的是直径为 5.0 的 B 型圆凸模的数据。

为了将设计、数据查询和绘图等部分连接起来, 可以编写一个在 DOS 状态下运行的批命令文件。例如, 名字为 AUTO.BAT 的批命令文件包含如下命令:



```

:
TMSJ
:
dBASE GETGB
:
DWTM
:

```

其中, TMSJ 为设计凸模的程序; dBASE GETGB 为查找凸模的标准数据, 由于批命令作用, 命令文件 GETGB.PRG 执行完毕后, 可从 dBASE II 回到 DOS 状态; DWTM 程序可根据设计结果和国家标准的数据, 形成绘制凸模的图形文件。

### 习 题

1. 在模具 CAD/CAM 中处理数表和线图有哪些方法?

2. 用二维数组将下面的数表程序化, 并写出查表程序。如果  $D$  超出表中范围, 显示 "D IS BEYOND THE RANGE"。

$D$	$A$	$B$	$D$	$A$	$B$
>0.5~1	3	0.5	>2~3	7	0.85
>1~2	5	0.7	>3~10	10	1.10

3. 利用文件系统管理数据存在哪些问题? 与文件系统相比, 数据库系统有哪些优点?

4. 工程数据和商用数据有什么区别? CAD/CAM 对工程数据库管理系统有什么要求?

5. 熟悉 dBASE 数据库系统的使用方法。试建立一个保存标准数据的数据库文件。

## 第四章 图形变换

图形变换是计算机图形学的重要基础，也是模具 CAD/CAM 的基础知识。无论是几何造型，还是自动绘图，均要用到图形变换。例如，通过图形变换可用二维图形来表示某些三维形体。在图形显示中，可以放大图形使细节更加清楚；缩小图形使更多的部分成为可见。

本章将讨论图形变换的原理、二维图形和三维图形的基本变换。

### 第一节 二维图形变换

#### 一、变换原理

##### (一) 平移变换

$x$ - $y$  平面上的点  $P(x, y)$ ，在其坐标方向上增加平移量  $T_x$  和  $T_y$ ，可变换至新位置  $(x', y')$ 。平移变换的关系式为

$$x' = x + T_x, \quad y' = y + T_y$$

平移使图形相对于原坐标系由一个位置移动至另一个位置，而图形本身不发生变化。

##### (二) 比例变换

若点的  $x$ 、 $y$  坐标分别乘以  $S_x$  和  $S_y$ ，可得到新的点(图 4-1)。这种变换称为比例变换， $S_x$  和  $S_y$  为两坐标方向上的比例系数。比例变换的关系式为

$$x' = xS_x, \quad y' = yS_y$$

比例变换有多种用途，当  $S_x = S_y$  时，可把图形放大或缩小；当  $S_x \neq S_y$  时，产生的效果相当于把图形沿平行于坐标轴的方向拉伸或压缩，使图形发生变形(图 4-2)；当  $S_x$  或  $S_y$  为负值时，变换后的图形与变换前的图形对称于  $x$  轴或  $y$  轴，即可产生图形的镜象。

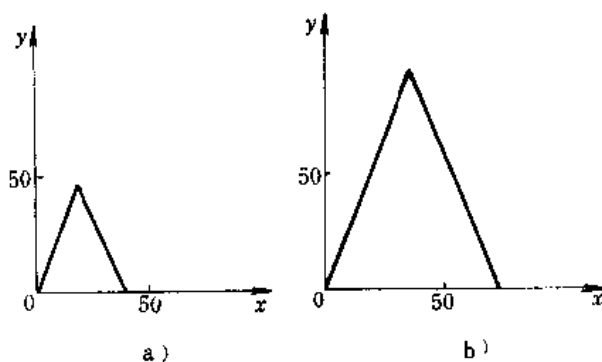


图 4-1 图形的比例变换

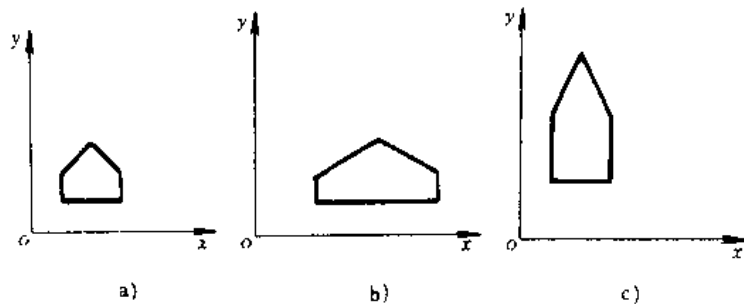


图 4-2 利用比例变换使图形发生变形  
a) 变换前 b) 沿  $x$  向拉伸 c) 沿  $y$  向拉伸

图 4-3 为当  $S_x = -1, S_y = 1$  时, 产生对  $y$  轴的镜象。当  $S_x = S_y = -1$  时, 镜象对称于坐标系原点。通过变换产生原图形镜象的变换又称反射变换。

(三) 旋转变换

图形绕坐标原点旋转某一角度生成变换后的图形, 这种变换称为旋转变换。

设点  $P(x, y)$  绕原点  $o$  顺时针方向旋转  $\theta$  角后到达  $P'(x', y')$ , 则

$$x' = x\cos\theta + y\sin\theta, \quad y' = -x\sin\theta + y\cos\theta$$

图 4-4 为三角形绕坐标原点顺时针旋转  $45^\circ$  的变换情况。三角形的顶点坐标分别由原来的  $(20, 0), (60, 0), (40, 100)$  变为  $(14.14, -14.14), (42.43, -42.43), (98.99, 42.43)$ 。

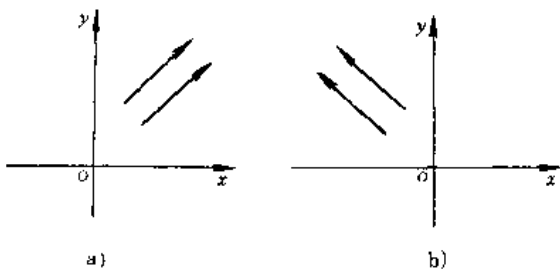


图 4-3 利用比例变换产生对称图形  
a) 变换前 b) 对  $y$  轴的反射变换

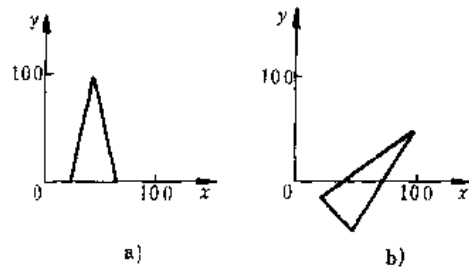


图 4-4 图形的旋转变换  
a) 变换前 b) 变换后

二、变换的矩阵表示

(一) 齐次坐标

对点向量  $[x \ y]$  和  $[x' \ y']$  引入第三分量, 使它们成为  $[x \ y \ 1]$  和  $[x' \ y' \ 1]$ 。位置向量  $[x \ y \ 1]$  和  $[x' \ y' \ 1]$  中的第三元素 1, 可看作是一个附加坐标, 即平面上的一个点 (二维向量) 用三个坐标 (三维向量) 来表示。这种用三维向量表示二维位置向量, 或用  $n+1$  维向量表示  $n$  维向量的方法称为齐次坐标表示法。在齐次坐标表示法中,  $n$  维向量的变换是在  $n+1$  维空间内实现的。在  $n+1$  维齐次空间中的一个向量可看作一个  $n$  维空间中的向量多了一个比例因子  $H$ 。通常笛卡尔坐标系中的二维点  $[x \ y]$  的齐次表达式是  $[Hx \ Hy \ H]$ , 其中  $H \neq 0$ 。于是, 给出点的齐次表达式  $[X \ Y \ H]$ , 就可求得其二维笛卡尔坐标, 即

$$[X \ Y \ H] \rightarrow \left[ \frac{X}{H} \ \frac{Y}{H} \ \frac{H}{H} \right] = [x \ y \ 1]$$

这个过程称为正常化处理。

用齐次坐标时不存在位置向量的唯一表示。例如齐次坐标  $[15 \ 9 \ 3], [-30 \ -18 \ -6]$  和  $[5 \ 3 \ 1]$  都表示笛卡尔坐标点  $(5, 3)$ 。在二维变换中, 为简单起见, 令  $H=1$ 。此时, 二维点  $(x \ y)$  的齐次坐标表示为  $[x \ y \ 1]$ , 其中  $x, y$  坐标没有变化, 只是增加了  $H=1$  的一个附加坐标。在几何意义上, 相当于把发生在三维空间的变换限制在  $H=1$  的平面内。

(二) 变换矩阵

如果点的位置向量用齐次坐标表示, 那么平移变换矩阵、比例变换矩阵和旋转变换矩阵将取如下形式:

平移变换矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix}$$

比例变换矩阵

$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

旋转变换矩阵

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

若对点  $[x \ y \ 1]$  进行平移变换, 则有

$$[x \ y \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix} = [x+T_x \ y+T_y \ 1] = [x' \ y' \ 1]$$

当  $S > 1$  时, 对点的位置向量进行如下变换, 可使两个坐标同时缩小。

$$[x \ y \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & S \end{bmatrix} = [x \ y \ S] = \left[ \frac{x}{S} \ \frac{y}{S} \ 1 \right] = [x' \ y' \ 1]$$

以上三种变换都具有可逆性, 即

$$[x \ y \ 1] = [x' \ y' \ 1] T^{-1}$$

$$[x \ y \ 1] = [x' \ y' \ 1] R^{-1}$$

$$[x \ y \ 1] = [x' \ y' \ 1] S^{-1}$$

### 三、变换的级联

图形除了需要进行以上所讨论的一些简单变换外, 通常需要进行更复杂的变换。例如, 图形绕任意点旋转, 可以通过三个简单变换来实现, 即平移—旋转—平移。一系列的简单变换(变换序列)可以通过级联组合成为一个变换。

在对变换序列进行级联时, 顺序问题十分重要。例如, 将图 4-5a) 所示三角形旋转  $90^\circ$ , 然后平移  $T_x = -80$ ,  $T_y = 0$ , 变换后的情形如图 4-5b) 所示。若将变换次序颠倒, 则得到的

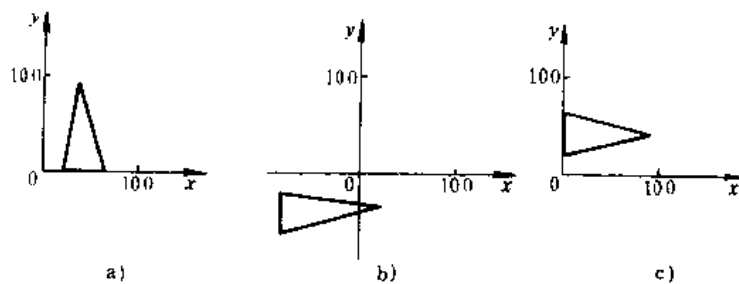


图 4-5 不同变换顺序产生的结果  
a) 变换前 b) 旋转—平移 c) 平移—旋转

图形就如图 4-5c) 所示。

级联的目的是将一个变换序列表示成一个变换。设一点  $P$  经过  $n$  次变换  $T_1, T_2, T_3 \cdots T_n$ , 则总的变换结果为

$$P' = PT_1 T_2 \cdots T_{n-1} T_n = PT$$

所以, 总的变换矩阵

$$T = T_1 T_2 \cdots T_{n-1} T_n$$

例 求绕平面上任意点旋转的变换矩阵 (图 4-6)。

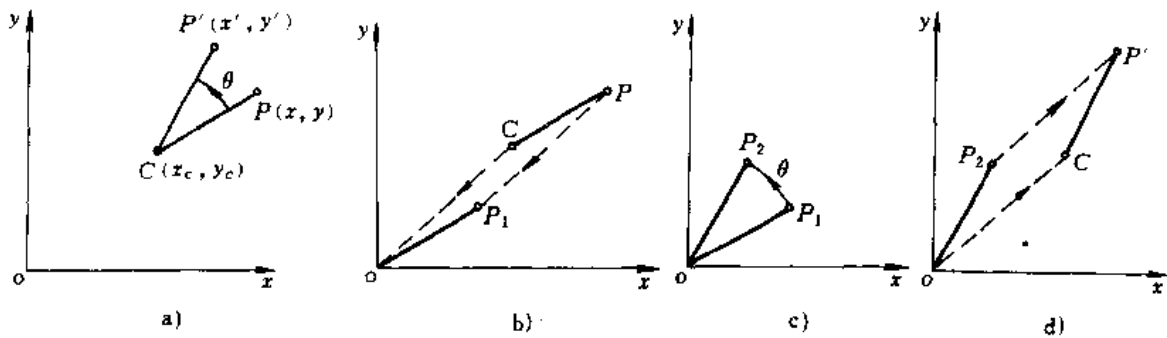


图 4-6 绕平面上任意点的旋转变换

a) 绕  $c$  点旋转  $\theta$  角 b) 平移 c) 旋转 d) 平移

绕平面上任意点  $C(x_c, y_c)$  的旋转是一个组合变换。可以通过下列步骤实现: 首先将旋转中心平移到坐标原点; 然后进行旋转变换; 最后再平移变换, 恢复原坐标系。通过以上三种变换的有序级联, 可求得其组合结果, 即总的变换矩阵

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_c & -y_c & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_c & y_c & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -x_c \cos\theta + y_c \sin\theta + x_c & -x_c \sin\theta - y_c \cos\theta + y_c & 1 \end{bmatrix}$$

## 第二节 三维图形变换

前面所讨论的二维变换扩展到三维时, 三维点的位置向量齐次坐标表示为  $[x \ y \ z \ 1]$ , 齐次变换矩阵是  $4 \times 4$  方阵:

$$T = \begin{bmatrix} a & b & c & p \\ d & e & f & q \\ h & m & n & r \\ i & j & k & s \end{bmatrix}$$

因此, 三维空间点的变换可写为

$$[X \ Y \ Z \ H] = [x \ y \ z \ 1] T$$

正常化后的坐标为

$$[X' \ Y' \ Z' \ 1] = \left[ \begin{array}{ccc|c} X & Y & Z & 1 \\ \hline H & H & H & 1 \end{array} \right]$$

下面介绍一些基本的三维变换。

### 一、平移变换

把点  $(x, y, z)$  平移到新点  $(X \ Y \ Z)$  的变换为

$$[X \ Y \ Z \ H] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix}$$

其中,  $T_x, T_y, T_z$  分别为在  $x, y, z$  坐标轴方向上的平移分量。

### 二、比例变换

用比例变换可以分别调节每个坐标方向上的大小。

$$[X \ Y \ Z \ H] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

均匀缩放图形大小的变换为

$$[X \ Y \ Z \ H] = [x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S \end{bmatrix} = [x \ y \ z \ S]$$

正常化处理

$$[X \ Y \ Z \ H] \rightarrow \left[ \begin{array}{ccc|c} X & Y & Z & H \\ \hline \frac{X}{H} & \frac{Y}{H} & \frac{Z}{H} & \frac{H}{H} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{ccc|c} x & y & z & 1 \\ \hline \frac{x}{S} & \frac{y}{S} & \frac{z}{S} & 1 \end{array} \right]$$

若  $S > 1$ , 则整个图形缩小; 若  $S < 1$ , 则整个图形放大。

### 三、旋转变换

(一) 绕坐标轴旋转变换矩阵

绕  $z$  轴旋转  $\theta_z$  角 (图 4-7a), 变换矩阵  $R_z$  为

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

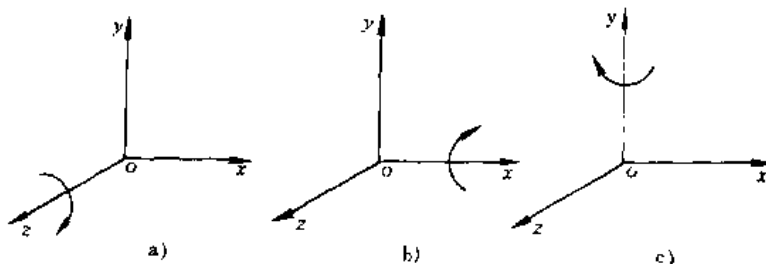


图 4-7 绕三个坐标轴的旋转

绕  $y$  轴旋转  $\theta_y$  角 (图 4-7c), 变换矩阵  $R_y$  为

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

绕  $x$  轴旋转  $\theta_x$  角 (图 4-7b), 变换矩阵  $R_x$  为

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## (二) 绕空间任意轴的旋转变换

图形绕空间任意轴 (不通过坐标原点) 的旋转, 可以用组合变换实现。首先把坐标原点移到旋转轴上; 然后绕  $x$  和  $y$  轴旋转, 使旋转轴与  $z$  轴重合, 这样图形绕任意轴旋转  $\theta$  角就转化为绕  $z$  轴旋转  $\theta$  角; 最后, 绕  $y$  和  $x$  轴作相反方向的旋转以及平移, 恢复原坐标系 (图 4-8)。

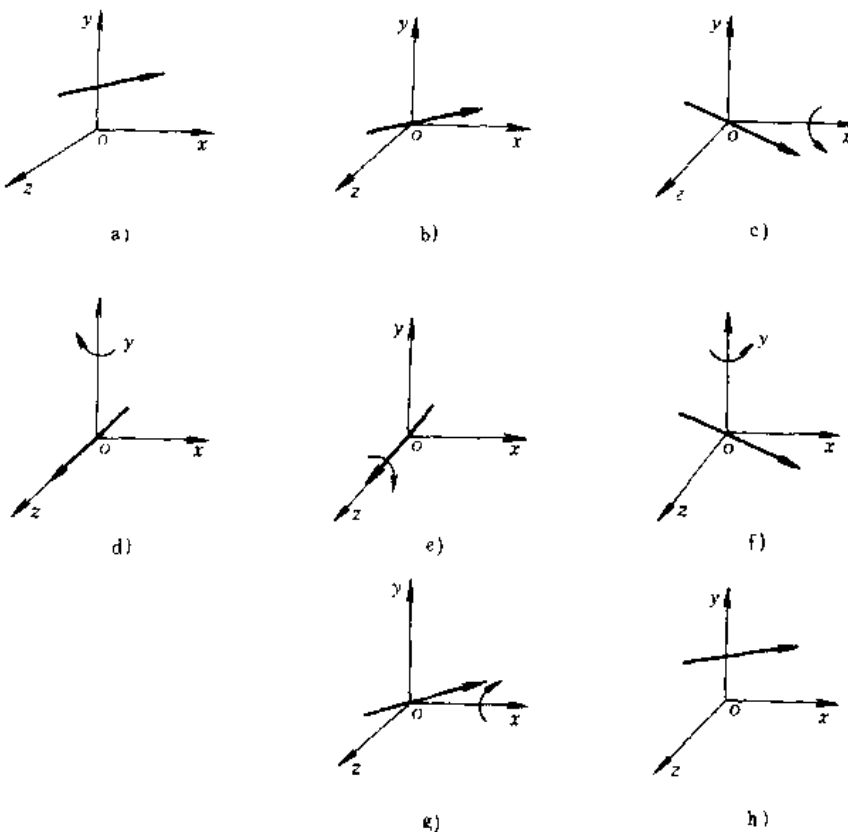


图 4-8 绕空间任意轴的旋转变换

- a) 原状 b) 平移至原点 c) 绕  $x$  轴旋转至  $xz$  平面 d) 绕  $y$  轴旋转, 使旋转轴与  $z$  轴重合  
e) 绕  $z$  轴旋转 f) 绕  $y$  轴旋转返回 g) 绕  $x$  轴旋转返回 h) 平移返回

用直线上的一点和该直线的方向来定义空间任意轴, 这样, 点的位置向量可提供平移信息, 而直线的方向可提供使它旋转到与  $z$  轴重合的正确角度。设给定直线的参数方程为

$$x = Au + x_1$$

$$y = Bu + y_1$$

$$z = Cu + z_1$$

在直线上的一点是  $(x_1, y_1, z_1)$ ，直线的方向由  $[A \ B \ C]$  向量定义。其变换序列如下：

1) 移动原点到旋转轴上的平移变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x_1 & -y_1 & -z_1 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 绕  $x$  轴旋转直到旋转轴位于  $x-z$  平面内。为了确定所需要的旋转角度，把直线的方向向量置于新坐标系的原点上（图 4-9），研究它在  $y-z$  平面上的投影。因平移的结果使原点  $(0, 0, 0)$  处于旋转轴上，所以在  $(0, 0, 0)$  和  $(A, B, C)$  之间的线段  $L$  必在旋转轴上。 $L$  在  $y-z$  坐标面上的投影是从  $(0, 0, 0)$  到  $(0, B, C)$  之间的线段  $l'$ 。

若绕  $x$  轴旋转直到旋转轴在  $x-z$  坐标面内，则  $l'$  将与  $z$  轴重合。使  $l'$  与  $z$  轴重合，需逆时针旋转  $I$  角。因为

$$l' = (B^2 + C^2)^{1/2}$$

$$\sin I = B/l'$$

$$\cos I = C/l'$$

因此绕  $x$  轴旋转变换矩阵应为

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & \sin I & 0 \\ 0 & -\sin I & \cos I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C/l' & B/l' & 0 \\ 0 & -B/l' & C/l' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因为绕  $x$  轴旋转时， $x$  坐标不变；线段长度  $L$  不变， $L = (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}$ ； $z$  坐标为

$$(L^2 - A^2)^{1/2} = (B^2 + C^2)^{1/2} = l'$$

所以经  $R_x$  变换后，就可画出位于  $x-z$  坐标面内的旋转轴（图 4-10）。

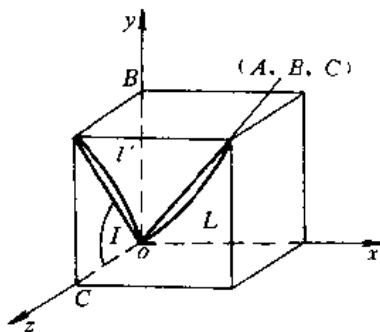


图 4-9 绕  $x$  轴转角的确定

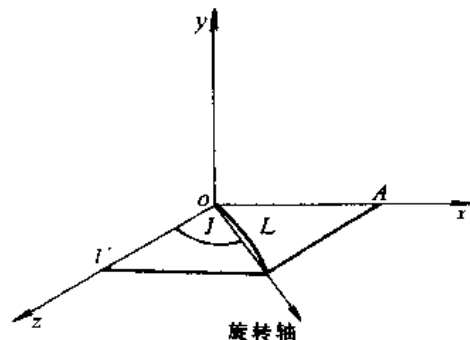


图 4-10 位于  $x-z$  平面内的旋转轴

3) 绕  $y$  轴顺时针旋转  $J$  角，使旋转轴与  $z$  轴重合，因为

$$\sin J = A/L,$$

$$\cos J = l'/L$$



所以绕  $y$  轴旋转变换矩阵为

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos J & 0 & \sin J & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin J & 0 & \cos J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U/L & 0 & A/L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -A/L & 0 & U/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4) 绕  $z$  轴旋转  $\theta$  角, 变换矩阵为

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

然后进行恢复原坐标系的变换。

5) 绕  $y$  轴顺时针旋转  $J$  角, 变换矩阵为

$$R_y^{-1} = \begin{bmatrix} U/L & 0 & -A/L & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ A/L & 0 & U/L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

6) 绕  $x$  轴顺时针旋转  $I$  角, 变换矩阵为

$$R_x^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C/U & -B/U & 0 \\ 0 & B/U & C/U & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

7) 平移使坐标原点返回到它原来的位置。

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \end{bmatrix}$$

绕任意轴旋转  $\theta$  角的变换矩阵  $R_\theta$  是以上给出的变换矩阵之乘积, 即

$$R_\theta = TR_x R_y R_z R_y^{-1} R_x^{-1} T^{-1}$$

## 习 题

- 编写实现二维平移、旋转和比例变换的子程序。
- 编写实现三维平移、旋转和比例变换的子程序。
- 试证明下列图形变换的矩阵运算具有互换性:
  - 两个连续的旋转变换。
  - 两个连续的平移变换。
  - 两个连续的比例变换。
- 在  $x$ - $y$  平面内, 过原点的直线  $L$  与  $x$  轴夹角为  $\alpha$  (图 4-11)。试推导相对于直线  $L$  作对称变换的变换矩阵。
- 求相对于定位点  $(x_0, y_0)$  的比例变换矩阵, 使变换后定位点的位置保持不变 (图 4-12)。

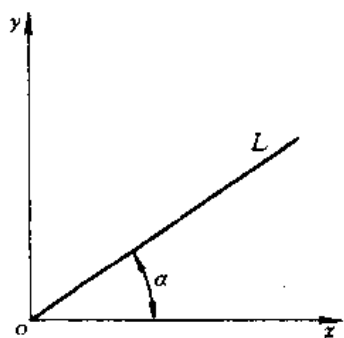


图 4-11

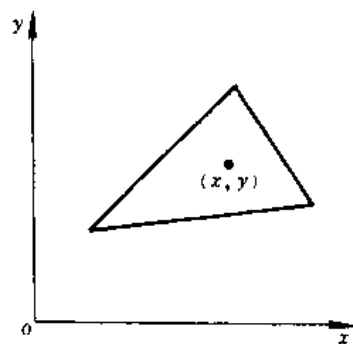


图 4-12

## 第五章 几何造型

几何造型是利用计算机系统描述物体的几何形状,建立产品几何模型的技术。自60年代几何造型技术出现以来,其理论和方法得到不断丰富和发展。

模具的工作部分,例如冷冲模、注塑模和锻模的型腔,是根据产品零件的形状设计的。模具CAD/CAM的第一步就是输入产品零件形状信息,在计算机内建立产品零件的几何模型。

模具CAD/CAM涉及确定工艺方案、设计模具结构和编制NC程序等内容。产品零件的工艺性分析和工艺方案的确定,是以零件的几何形状和工艺特征为依据完成的。模具结构设计特别是模具工作零件的设计,有赖于产品零件的形状。在模具结构设计时,根据几何造型系统所建立的产品几何模型,可以完成凹模型腔和凸模形状的设计,产生的模具型面为模具的NC加工提供了基础。除了工作部分形状的设计外,模具结构零件的形状设计同样要用到几何造型技术。编制模具零件的NC加工程序,确定加工的走刀轨迹,也需要建立模具零件的几何模型。因此几何造型是模具CAD/CAM中的一个关键问题,是实现模具CAD/CAM的基础。

通常,几何造型系统是作为模具CAD/CAM系统的一个子系统使用的。几何造型子系统提供了输入、存储和编辑零件几何形状的功能,用于描述和定义零件的形状。所建立的几何模型可用于模具CAD和CAM,为二者的集成创造了条件。

本章将围绕几何造型的一般概念、表示模式,造型方法及其在模具设计与制造中的应用等,阐述几何造型的有关问题。

### 第一节 几何造型的一般概念

#### 一、几种几何造型方法

几何造型技术大致经历了图5-1所示几个发展阶段。随着几何造型技术的发展,使产品的信息描述更加完备,造型理论和方法更加充实。下面将对发展过程中出现的几种造型方法加以讨论。

##### (一)线框造型(Wireframe Modelling)

所谓线框造型,就是利用产品形体的棱边和顶点表示产品几何形状的一种造型方法。在计算机内,形体采用线框模型表示,即采用顶点和棱边来表示。图5-2为一长方体的线框模型。它是利用8个顶点 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $\dots$ 、 $V_8$ 及12条棱边 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\dots$ 、 $E_{12}$ 来表示的。

线框造型的方法及其模型都较简单,便于处理,具有图形显示速度快、容易修改等优点。但是,在某些情况下,这种造型方法

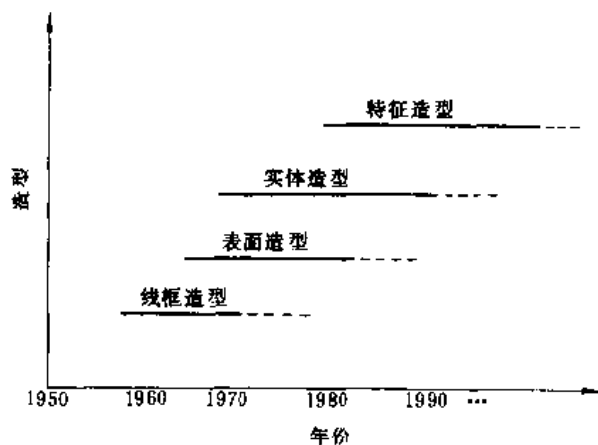


图 5-1 几何造型的发展过程

会产生二义性，即不能唯一地确定其所代表的形体，例如，图 5-3 所示的模型，就可能代表三种不同的形体。另外，由于仅存储了顶点和棱边的信息，因而难以进行形体表面交线计算、物性计算和消隐处理。目前，线框造型主要用于二维绘图或作为其它造型方法的一种辅助工具。

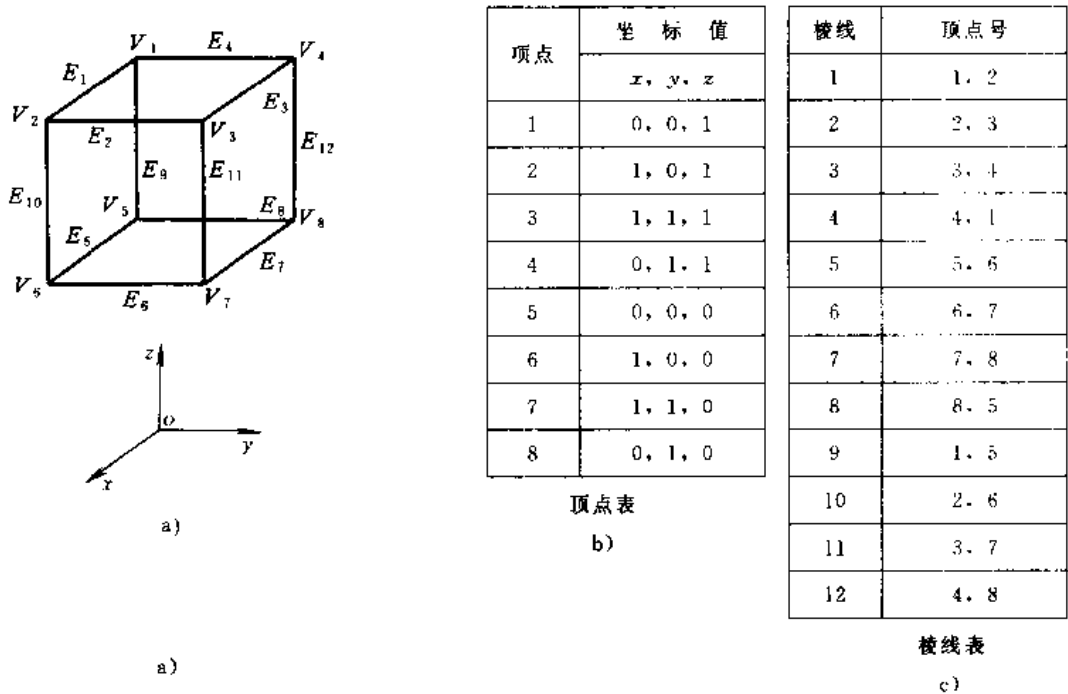


图 5-2 线框模型

### (二) 表面造型 (Surface Modelling)

表面造型是在线框造型基础上发展起来的、利用形体表面描述物体形状的造型方法。它通过有向棱边构成形体的表面，用面的集合表达相应的形体，图 5-4 所示为一长体的表面模型。在表面造型中，一个重要的方面是自由曲面的造型。自由曲面造型主要用于飞机、汽车、船舶和模具等复杂曲面的设计。常采用的曲面有贝塞尔曲面和 B 样条曲面等。

在表面造型的发展过程中，人们对隐藏线、面的处理提出了大量的算法，对自由曲面从设计到数控加工进行了深入的研究，使表面造型在工程中得到广泛应用。但是，由于表面造型仍不能完全全面地表达物体形状，例如没有明确定义实体存在侧，也未给出表面间的相互关系等拓扑信息。因而，表面造型所产生的形体描述难以直接用于物性计算，并难以保证物体描述的一致性和有效性。

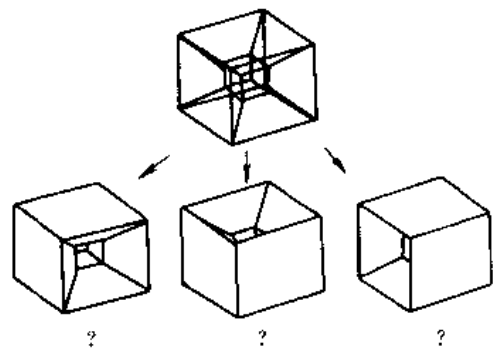


图 5-3 线框表示的二义性

### (三) 实体造型 (Solid Modelling)

要完整全面地描述一形体，除了描述其几何信息外，还应描述它各部分之间联系信息以及表面的哪一侧存在实体等信息。实体造型就是基于这一思想认识发展起来的，它克服了线框造型和表面造型的局限性。

我们所研究的形体可用一个具有边界子集和内部子集的封闭点集来定义。在实体造型中，

常定义一些基本体素，并通过集合运算将它们组合成复杂的几何形体。为了描述形体的几何信息和拓扑信息，人们提出了多种表示模式及相应的数据结构。

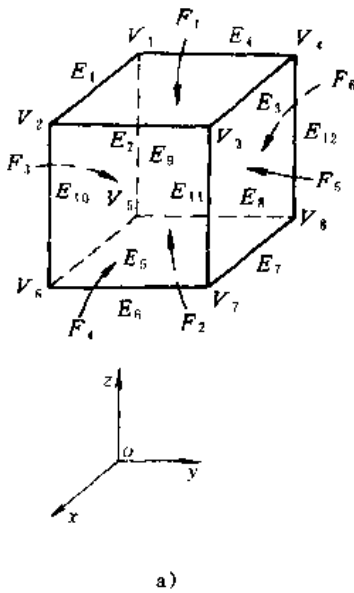


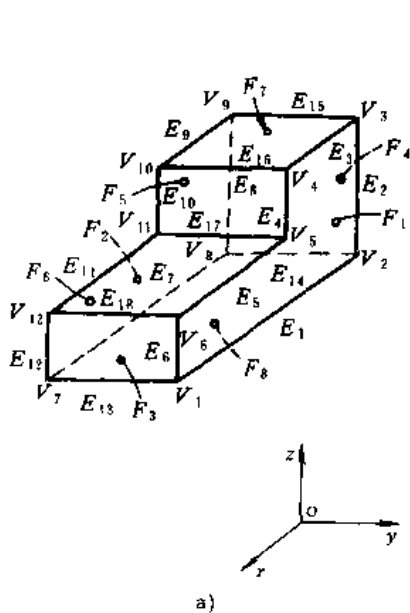
表 面	棱 线 号
1	1, 2, 3, 4
2	5, 6, 7, 8
3	1, 10, 5, 9
4	2, 11, 6, 10
5	3, 12, 7, 11
6	4, 9, 8, 12

面表  
b)

图 5-4 表面模型 (顶点表与棱线表从略)

实体造型可全面完整地描述形体，具有完备的信息，可自动地计算物性、检测干涉、消除隐藏线(面)和剖切形体等，因此实体造型可较好地满足 CAD/CAM 的要求，并得到了广泛应用，图 5-5 为一立方体的实体模型。

在实体模型中，为表示实体的存在侧，可用定义面的正法向的方法实现。如图 5-5 所示，



顶点	x, y, z
1	7, 4, 0
2	0, 4, 0
3	0, 4, 4
4	3, 4, 4
5	3, 4, 2
6	7, 4, 2
7	7, 0, 0
8	0, 0, 0
9	0, 0, 4
10	3, 0, 4
11	3, 0, 2
12	7, 0, 2

b)

棱线	顶点号
1	1, 2
2	2, 3
3	3, 4
4	4, 5
5	5, 6
6	6, 1
7	7, 8
8	8, 9
9	9, 10
10	10, 11
11	11, 12
12	12, 7
13	1, 7
14	2, 8
15	3, 9
16	4, 10
17	5, 11
18	6, 12

c)

面	棱 线 号
1	1, 2, 3, 4, 5, 6
2	-12, -11, -10, -9, -8, -7
3	6, 18, 12, 13
4	-2, -14, -8, -15
5	4, 16, 10, 17
6	5, 17, 11, 18
7	3, 15, 9, 16
8	-1, -13, -7, -14

d)

图 5-5 实体模型

面的正法向由围成面的棱边按右手定则确定。棱线前面的负号，表示该棱线的方向与棱线表中定义的方向相反。

#### (四) 特征造型 (Feature Modelling)

在几何造型技术的发展中，人们一方面致力于加强几何造型系统的能力，扩大造型覆盖域，并将传统的 2D 绘图、3D 线框、曲面造型、实体造型等功能集成起来，另一方面引入特征概念来描述更高抽象层次的几何实体与非几何信息（尺寸、公差、材料和热处理等），发展了特征造型方法。

前面所述的三种造型方法，都只是从几何的角度定义物体的形状，不能全面地描述物体的特征。所谓特征，指的是反映产品零件特点的、可按一定原则加以分类的产品描述信息。将特征概念引入几何造型系统的目的是增加几何实体的工程意义，为各种工程应用提供更丰富的信息。基于特征的造型把特征作为产品零件定义的基本单元，将产品零件描述为特征的集合。

目前，对特征的分类有多种方法，其中最主要的是按几何形状分类、按功能分类、按制造方法分类和按产品定义数据的性质分类。按产品定义数据的性质，可将产品的特征分为形状特征、精度特征、工艺特征、材料特征和装配特征等。在特征模型中，形状特征是非几何特征信息的载体，非几何特征信息一般是作为属性或约束附加在形状特征上的。

特征表达模式主要分为集成模式和分离模式两种。前者是将特征模型和实体模型集成在同一内部数据结构中，后者则是将特征表达在附加的外部结构中。目前，许多研究者倾向于采用集成模式。

至今，已经提出的特征造型方法可归为以下三类：

##### 1. 人工辅助特征标识

这种方法首先建立产品的几何模型，然后由用户直接通过图形来检取定义特征所需要的几何要素，并将特征信息作为属性添加到特征模型中。

##### 2. 自动特征识别

在建立几何模型后，通过启动专门的程序，自动地处理几何数据库，搜索并提取特征信息，产生特征模型。

##### 3. 基于特征的设计

预先将一些标准的特征或用户自定义的特征存储在特征库中，造型时，以特征库中的特征为基本造型单元，建立特征模型。

特征造型使所描述的形体信息更具工程意义，如利用孔、槽、凸台等来描述形体的形状。特征造型可定义产品的形状特征（具有一定工程意义的形状）、精度特征（尺寸公差、表面精度等）、材料特征和其它工艺特征（材料类型、材料性能、表面处理、工艺要求等），从而为工艺设计和制造过程的各个环节提供充分的信息。目前，特征造型技术发展很快，已有商品化软件在市场上出现，其功能也越来越完善。

实践表明，实体造型为 CAD/CAM 系统的发展提供了良好的基础，但是仅仅使用实体造型并不是最佳方案。这是因为实体造型难以满足各个方面的需要，例如，汽车车身、飞机机身等壳体类零件的形状描述采用实体造型方法就难以实现。因此，几何造型系统应能处理二维、三维、曲面、实体、特征等不同形式的信息，应是将线框、表面、实体、特征等造型方法融为一体的集成造型系统。目前，国际上一些比较流行的几何造型系统如 CADD5、Pro/

Engineer、IDEAS、DUCT 等都是这类集成的造型系统，它们在机械、电子、建筑等各个领域得到了广泛的应用。

### 二、几何造型中的基本概念

在讨论几何造型时，常用到形体定义，集合运算等概念。下面将对这些概念作一简要说明。

#### (一) 形体的信息结构

形体在计算机内通常采用五层信息结构来定义，如果考虑形体的外壳，则为六层结构(图 5-6)。

(1) 体 体是由封闭表面围成的有效空间。一个形体是欧氏三维空间 ( $R_3$ ) 中非空、有界的封闭子集，其边界是有限个面的并集。

(2) 面 面是形体表面的一部分，具有方向性，它由一个外环和若干内环界定其有效范围，一个面可以无内环，但必须有外环。

(3) 环 环是由若干条有向边组成的面的封闭边界。环中各条边顺序相连不能自交。

(4) 边 边是形体两个相邻面的交界，一条边只能有两个相邻的面。

(5) 顶点 顶点是边的端点，顶点不允许出现在边的内部，也不允许孤立地存在面内和物体内部或外部。

(6) 几何信息 几何信息是描述上述元素的几何性质和度量关系的信息。

(7) 拓扑信息 拓扑信息是描述上元素间连接关系的信息。

(8) 体素 体素是由有限个尺寸参数定义的基本形体，如长方体、圆柱体、球体等。

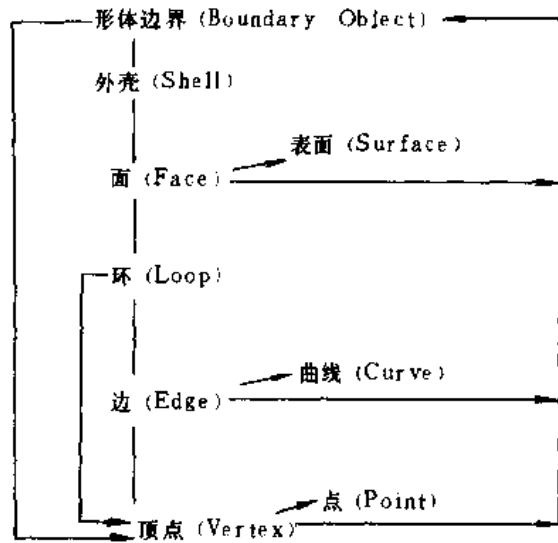


图 5-6 形体的信息结构

#### (二) 布尔运算

在实体造型中，通过布尔运算将一些基本体素组合成复杂的形体。布尔运算是一种正则化的集合运算，它保证两个基本体素经过运算后所得结果是有意义的，并可进一步参与布尔运算。

如图 5-7a) 所示的 A、B 两形体，对于一般的集合差运算，其交如图 5-7b)，而经布尔差运算，其交结果如图 5-7c) 所示。常用的布尔运算有并、交、差、补等。在布尔运算中，关键的问题是表面求交及拓扑信

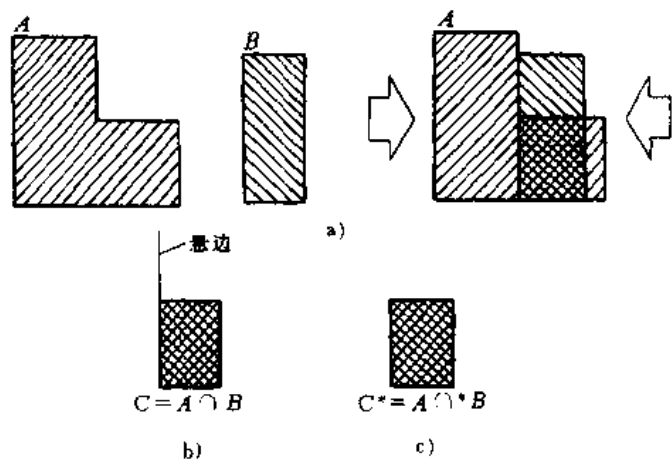


图 5-7 布尔运算与一般集合运算的区别  
a) A、B 两形体 b) 一般集合运算 c) 布尔运算

信息的分类处理。

### (三) 欧拉公式

欧拉公式常用于检验几何造型中所产生形体的合法性及一致性，以保证产生的形体有意义。对于多面体，欧拉公式为：

$$F + V - E = 2 + R - 2H$$

其中， $F$ 、 $V$ 、 $E$  分别表示面，顶点、边的数目， $R$  为多面体表面不相连通的内环数， $H$  为穿孔数。

## 三、几何造型系统的功能

### 1. 几何造型系统功能

一个完整的几何造型系统，一般应具有以下功能：

(1) 输入形体（形体定义） 即通过计算机的输入设备，将形体的几何信息输入计算机。常用的输入方式有交互方式和文本方式两种。

(2) 形体的计算机内部表示数据的存储、处理与管理 输入的信息在计算机内进行处理后，将以适当的数据结构表示，对这些信息应有相应的处理与管理。

(3) 形体的变换处理 由于形体的空间位置和空间形状可能存在变化，因此应提供变换功能，可使系统对形体的处理更加方便。

(4) 形体的显示和输出 设计的好坏和正确与否通常需要经过视觉来判断，在交互定义形体时，输入的信息是否正确，应能实时反馈给用户。显示处理包括增加视觉效果的消息显示，浓淡图显示和透视等功能。造型系统还应能将造型结果以一定的格式输出，以供其它应用程序使用。

(5) 形体的编辑处理 主要用于对已定义的形体进行局部或整体的修改。

(6) 查询功能 使用户在设计时，能方便地查看已设计形体的有关信息，如形状参数等。

用户在几何造型时，就是利用上述功能表达自己的设计意图，定义相应的形体。并为后续应用（如模具设计、数控加工和有限元分析等）准备数据。

### 2. 模具 CAD/CAM 理想几何造型系统特点

由于模具自身的特点，用于模具 CAD/CAM 的理想几何造型系统，除上述基本功能外，还应具有以下特点：

(1) 便于提取信息 在模具设计和制造过程中，特别是成形工艺的设计中，经常需要从零件几何模型中提取有关信息，加以分析处理，因此，信息的提取应方便。

(2) 造型的覆盖面广 用模具生产的产品零件千差万别，有时形状非常复杂，除包括解析面外，还包括自由曲面，因此，几何造型系统应有很强的造型功能，覆盖面要广。

(3) 便于形状的修改 当零件采用多道工序成形时，需要定义中间毛坯的形状。另外，由于工件成形后会产生收缩、回弹等变形，所以需要改变模具相应部位的形状加以补偿，这些都要求几何造型系统具有便于修改形状的特点。

(4) 参数化设计 模具的装配结构和模具零件是在设计过程中逐步确定的。模具结构的改变会引起模具零件的修改；反之，模具零件的变化，也将会影响模具的装配结构，参数化设计功能可以较好地满足模具设计的这一特点。



## 第二节 几何造型中的形体表示模式与数据结构

几何造型是利用计算机系统描述物体形状的技术。如何利用一组数据表示形体，如何控制与处理这些数据，是几何造型中的关键问题。本节将讨论形体的表示模式和常用的数据结构。

### 一、形体的表示模式

在几何造型中往往采用一些抽象的几何实体去代表实际的形体。形体的表示模式就是确定采用什么形式的抽象几何实体去代表实际形体。目前，常用的形体表示模式有体素调用、空间点列、单元分解、扫描变换、构造体素 (CSG) 和边界表示 (B-Rep) 等六种，其中后两种模式使用的最为普遍。

#### (一) 体素调用表示

这种表示模式采用规范化的几何形体及其形状参数描述形体，对这些规范化的几何形体作变换或者定义不同的参数值，将可产生不同的形体 (图 5-8)。

这种表示模式最初用于成组技术，以便按照零件的形状和性质分类，采用相应的制造工艺。通常，由于受到初始形状的限制，体素调用不能产生比较复杂的形体，因此它很少作为独立的表示模式使用，而是在几何造型中用于定义体素。

#### (二) 空间点列表示

这种表示模式将形体所在空间分割成具有固定形状 (如立方体)、彼此相连的一系列单元，每个单元可用其形心坐标  $(x, y, z)$  表示。通过记录形体对单元的占据状态可描述形体的几何形状。这种表示模式是坐标参数的有序集合，即空间点列。用空间点列表示形体，需要大量的存储空间，并且形体各部分之间的关系不明确。图 5-9 为一空间点列表示形体的例子。

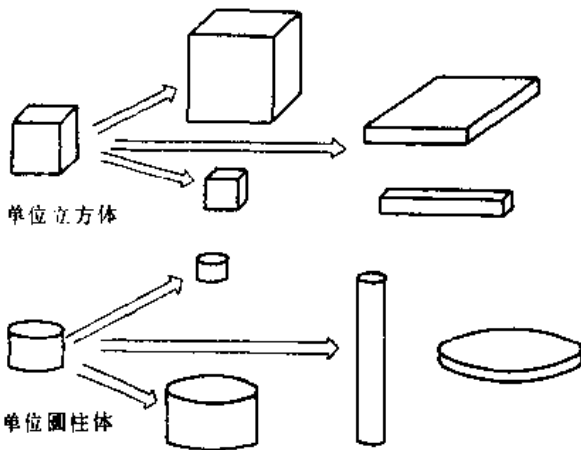


图 5-8 体素调用表示

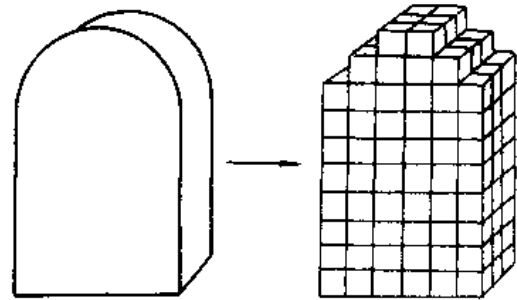


图 5-9 空间点列表示

#### (三) 单元分解表示

对一般的形体，总可以分解成一系列容易描述的形状单元 (图 5-10)。用单元分解模式表示一形体，就是首先将形体分解为一系列单元，然后表示这些单元及其相互间的连接关系。理论上，利用这种方法可以描述任何形体，但实际上存在很多困难，并且表示不唯一。上述的

空间点列表示模式可作为这种模式的一个特例。单元分解表示模式主要用于有限元的单元划分。

(四) 扫描变换表示

扫描变换表示模式是通过一个二维图形或一个形体沿某一路径扫描、产生新形体的一种表示模式。用这种表示模式描述形体时，需要定义扫描的图形或形体（也称基体），另外还要规定基体运动的轨迹。

最常用的扫描方式有平移扫描和旋转扫描。在平移扫描中，运动轨迹为一直线，在旋转扫描中，运动轨迹为一圆或圆弧（图 5-11）。平移扫描适用于描述具有平移对称性的形体，即所谓 2.5D 形体，旋转扫描则可用于表示具有轴对称性的形体。

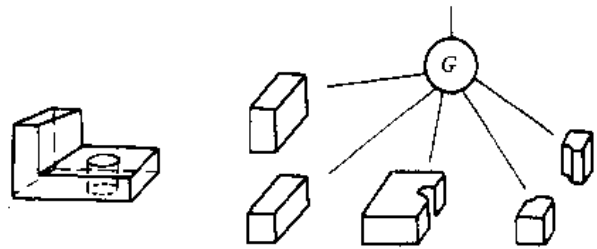


图 5-10 单元分解表示

(五) 构造体素表示 (CSG)

这是一种利用一些简单形状的体素，经变换和布尔运算构成复杂形体的表示模式。在这种表示模式中，采用二叉树结构来描述体素构成复杂的形体的关系（图 5-12）。图 5-12 中，树根表示定义的形体；叶为体素或变换量（平移量，旋转量）；结点表示变换方式或布尔运算的算子。对体素施以变换，例如平移或旋转，可使之产生刚体运动，将其定位于空间中的某一位置。布尔算子可以是并、交、差等集合运算（分别用  $U^*$ 、 $\cap^*$ 、 $-^*$  表示）。

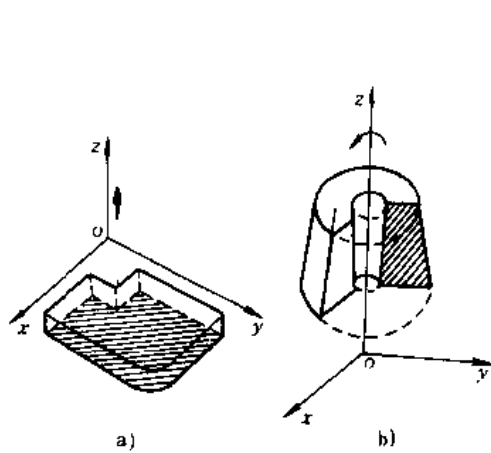


图 5-11 扫描变换表示的形体

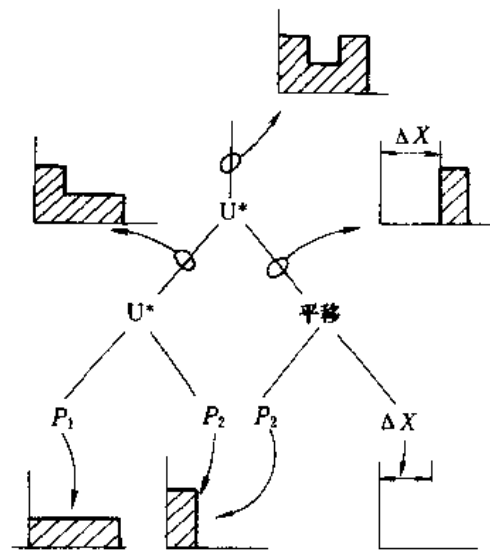


图 5-12 CSG 的二叉树结构

在 CSG 表示模式中，常用的体素有长方体、圆柱体、球、圆锥、圆环和楔块等，对这些体素都可用一组参数表示，如图 5-13 所示。

CSG 表示无二义性，但表示不是唯一的，即一个形体可能有几种 CSG 表示。这种表示模式的优点是比较紧凑，但是，当要产生图形显示时就需要计算形体的边界，计算量较大。

(六) 边界表示 (B-Reps)

边界表示模式是以形体表面的细节，即以顶点、边、面等几何元素及其相互间的连接关系来表示形体的。在边界表示模式中，边界表面必须是连续的，因此物体的边界是所有面的并集（图 5-14）。每个面又可通过边和顶点来表示，图 5-15 为一四棱锥的边界表示。

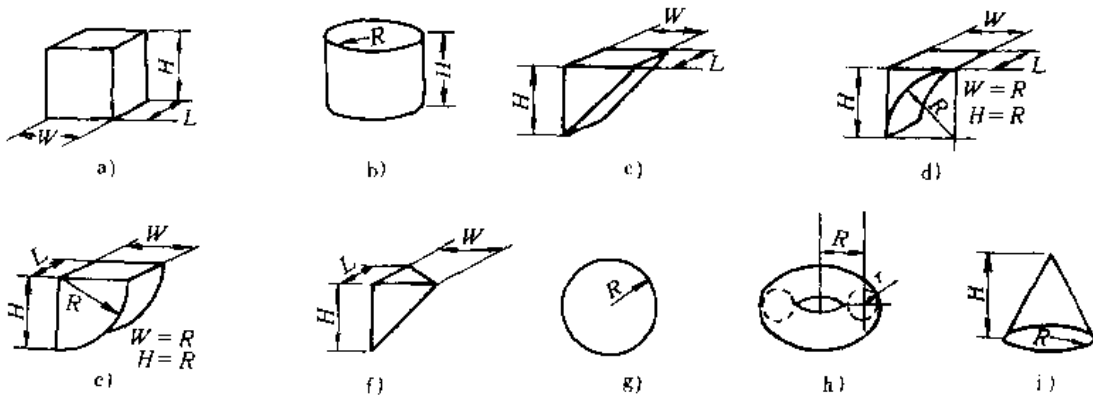


图 5-13 常用体素

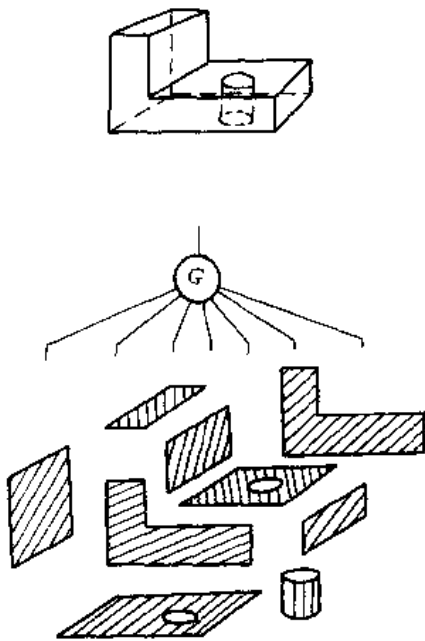


图 5-14 形体表面集

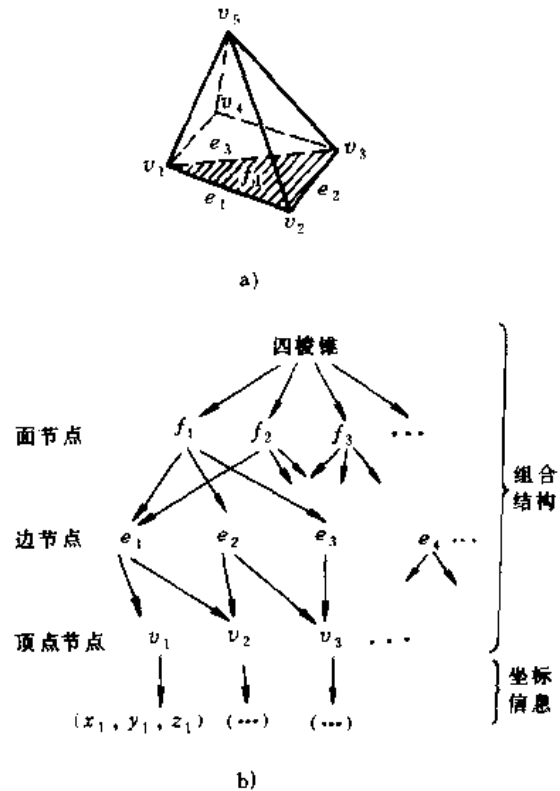


图 5-15 一个四棱锥的边界表示

由于边界表示模式详细记录了构成形体边界的所有几何元素的几何信息和拓扑信息，从而使得图形显示，有限元网格划分，表面积计算和数控加工等功能更易实现。

构造体素和边界表示两种模式在几何造型系统中应用最为普遍。目前，国际上比较流行的一些商用几何造型系统，大都采用 CSG/Breps 混合表示模式。这样可使两者取长补短，使系统的信息更加完备，操作处理更加方便。

## 二、几何造型中常用的数据结构

形体的表示模式必须以一定的数据结构实现，因此数据结构的设计与实现是几何造型中关键问题之一。

要完整地表示一形体的几何形状，需要两方面信息，即几何信息和拓扑信息。这里，将以平面多面体为例，分析其边界表示模式的几何信息、拓扑信息及相应的数据结构。

### (一) 几何与拓扑信息

在平面多面体情况下，形体包含三类几何元素即顶点、边和面，分别以  $v$ 、 $e$ 、 $f$  表示，每类几何元素都能形成平面多面体的完整表示，即每类几何元素都能给出足够的几何信息。因此，用所有这三种元素的几何信息来表示模型，存在相当的信息冗余，如一个顶点可由两边相交而得，或由三个面相交而成。一条边可由两个面相交求得，或由两个顶点相连形成。图 5-16 表示了三种几何信息之间的映射关系。由图中可看出，三种几何信息之间是可相互转化的，并不是互相独立的。但是，几何信息之间的转换需要花费计算时间，因而，有时存贮冗余的几何信息又是必需的。这需要在时间和空间之间折衷考虑。

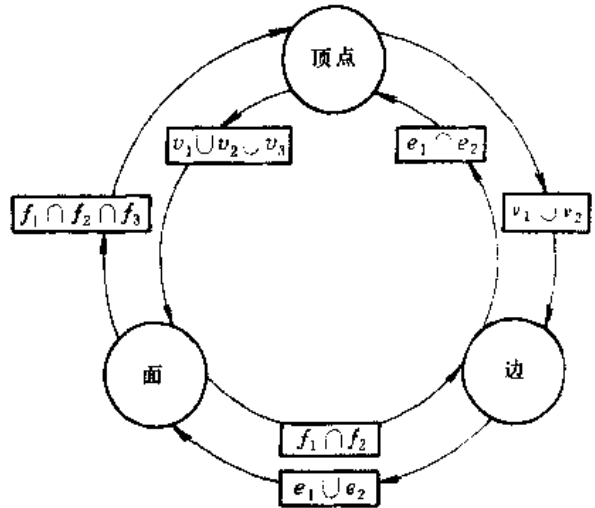


图 5-16 不同几何信息间的映射关系

在上述三种几何信息之间，存在图 5-17 所示的九种拓扑关系。同样地，存储所有这九种拓扑关系也是冗余的。事实上，只要知道一种拓扑关系，其它拓扑关系皆可由此导出。

存储何种拓扑信息，一般取决于应用场合。例如，对于图形显示来说，因为要知道顶点是如何连接的，所以保存  $V: \{v\}$ 、 $E: \{v\}$  和  $F: \{v\}$  中的一种较为合适，而对于形体的布尔运算，存贮  $V: \{f\}$  则较为方便。

### (二) 常用的数据结构

在几何造型中，常用的表示形体几何信息和拓扑信息的数据结构可分为三类，即单链三表结构、双链翼边结构和双链三表结构。

在单链三表结构中，需要面、棱边和顶点三张表，用单链来指示它们之间的连接关系。例如，根据形体中面、边和顶点之间的拓扑关系，可以构造如图 5-18 所示数据结构。图中，面 1 是由 (1) (5) (6) (2) 四条边按顺时针方向定义的；棱边相应的顶点在边表中按逆时针方向来编号。在这种结构中给出了每个面的方程系数，同时也存放了变换矩阵。

在单链三表数据结构中，由面表的指针可以检索到该面的边表，由边表的指针可以检索到形成该边的顶点。这种数据结构关系清楚，节省存储空间，查找也不很麻烦。但是，当形体比较复杂时，查表和改表的时间是不可忽视的。

在几何造型中，修改形体常常需要改变其拓扑结构。如能在数据结构中分别处理形体的几何信息和拓扑信息，则可以克服改变形体拓扑关系的困难，有利于提高数据结构的灵活性，双链翼边结构可以有效地解决这些问题。

图 5-19 给出了翼边结构中边、面和顶点之间的关系。在翼边结构中，每条边都有指针。指向它们左右两个邻面和构成两个邻面周界的四条邻边。从外面观察时，这种结构就像翅膀一

样 (图 5-19a), 故称为翼边结构。这种结构是以边作为检索形体拓扑关系的中心环节的。

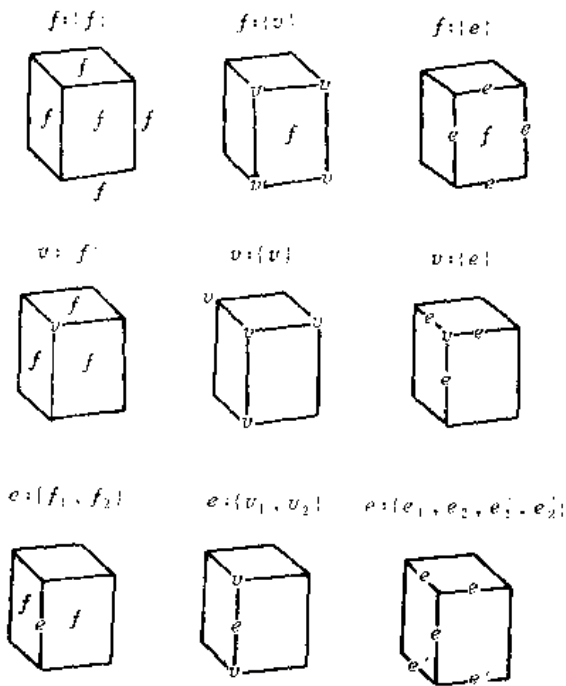


图 5-17 九种拓扑关系

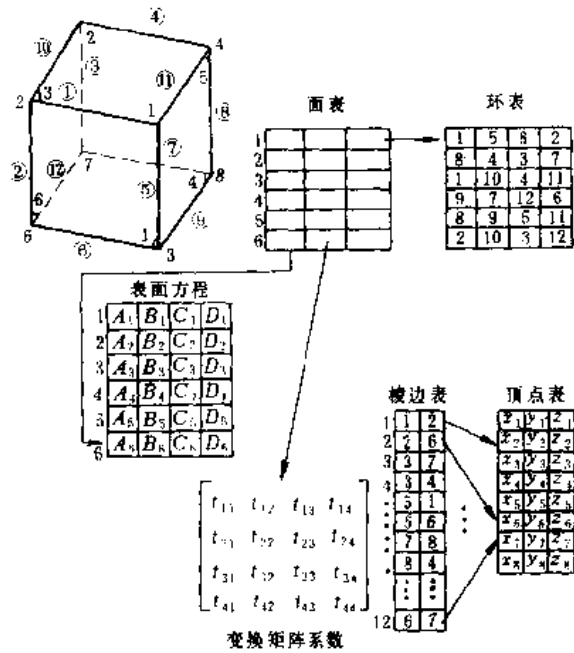


图 5-18 单链三表数据结构

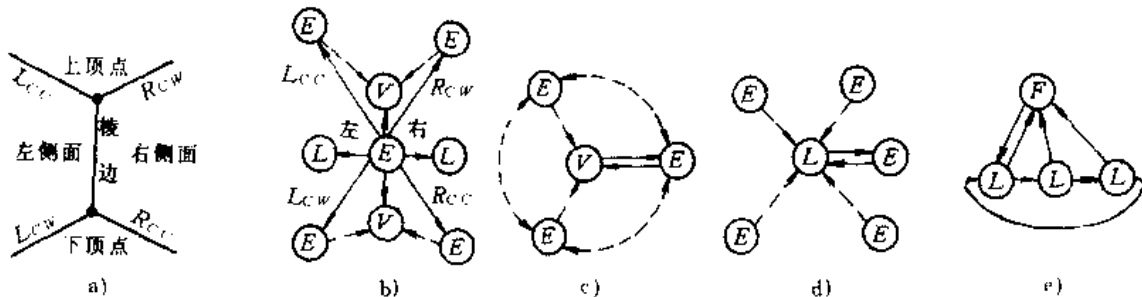


图 5-19 翼边结构

a) 翼边结构 b) 棱边结构 c) 顶点指针 d) 环指针 e) 面、环表

翼边结构的存储形式如图 5-20 所示。每个形体的有关信息分为五层存储, 即形体表、面表、环表、边表和顶点表。每个面有一个外环和若干个内环。因为面表、边表和顶点表查找和修改频繁, 故采用了双链表结构。每个存储单元都有指针分别指向下一个和前一个单元。双链表结构便于边和顶点的插入和删除, 可以提高查找和修改的速度。

双链翼边结构的信息冗余较大, 需要较多的存储空间, 所以目前多数几何造型系统采用的是变异的翼边结构。

上述两种数据结构中, 单链三表结构节省存储空间, 但不便于查找和修改; 双链翼边结构便于查找和修改, 但是占用较大的存储空间。为解决这一对矛盾, 提出了双链三表结构。在这种结构中设有点表、面表和体表三张表, 每张表都设有双链分别指向它的前趋和后继结点。关于双链三表结构的细节, 在此不作详述。

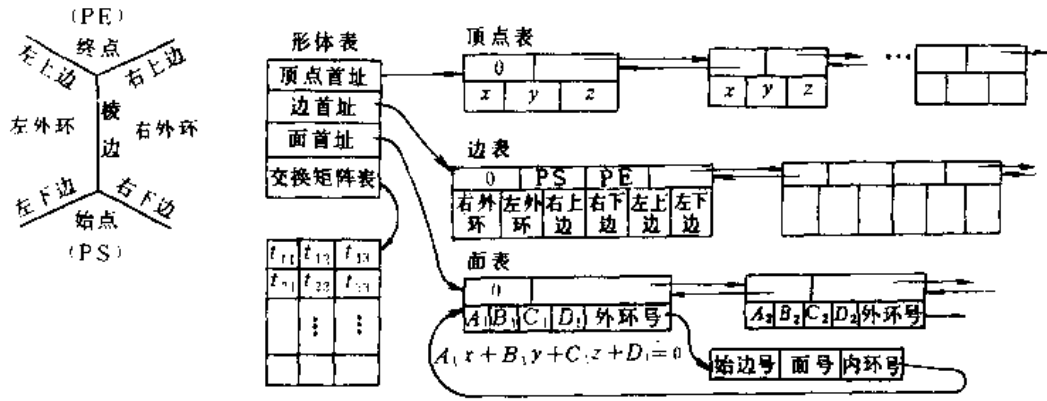


图 5-20 翼边结构的存储形式

### 第三节 一个用于冲压件的几何造型系统

本节将在前两节阐述的几何造型的概念和理论的基础上，介绍一个用于冲压件的几何造型系统 SGM。以冲压件的形状定义与描述为例，说明几何造型技术在模具 CAD/CAM 中的应用。

#### 一、系统的特点与结构

冲压件属于壳体类零件，在建立它的几何模型时，采用一般的实体造型或表面造型方法都存在一定的困难。为此，SGM 系统根据冲压件的形状特点，对组成冲压件形状的体素作了相应的分类，并针对这些体素建立了相应的拼合算法。

目前 SGM 系统仅提供四种体素，用户利用这四种体素可方便地定义由弯曲、拉深和局部成形等加工方式产生的冲压件形状，并可描述其尺寸信息。该系统可在 IBM-FC286/386 和兼容机上运行。

系统的总体结构如图 5-21 所示。利用该系统定义冲压件形状时，用户首先用 3D 线框造型方法构造出冲压件的体素定义几何元素，然后再由这些体素定义几何元素逐步构造出冲压件的形状，系统内部自动建立其几何模型。该模型可通过输出模块以一定的格式输出，以供工艺设计等模块使用。

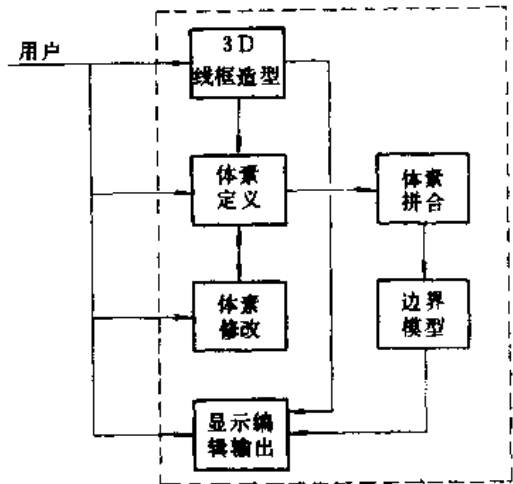


图 5-21 系统的总体结构

#### 二、描述冲压件形状的几何模型

##### (一) 体素的分类与定义

##### 1. 分类

通过分析冲压件的形状及其成形工艺的特点，可将组成冲压件形状的体素分为以下四类：

(1) PLANE (平面) 用于描述冲压件中与弯曲区相连的平直部分、法兰或其它平面形状。

(2) BENDING (弯曲面) 对应于冲压件中通过弯曲成形方法产生的弯曲区。

(3) SHAPING (成形面) 描述冲压件中由拉延、翻边或局部成形等方法形成的形状。

(4) CUTTING (冲切面) 对应于冲压件上的孔、缺口和支条等形状。

体素的这种分类既便于冲压件形状的定义, 又便于后继的工艺设计等模块对冲压件形状的识别和处理。例如, 当在描述冲压件形状的几何模型中含有 BENDING 体素时, 工艺设计模块就可知道需要采用弯曲成形工艺, 并提取出有关信息。

## 2. 定义

由于用户主要是根据冲压件的产品图, 定义冲压件的形状。为便于用户输入, SGM 系统按照产品图描述冲压件形状的特点, 将上述四种体素分别采用下述方法定义。

PLANE 可由在同一平面内的封闭轮廓  $C$  与两条空间平行线  $P_1$ 、 $P_2$  (其中一条在  $C$  所在平面) 描述 (图 5-22a)。

SHAPING 是通过扫描方式描述的 (图 5-22b)。对于轴对称的形状, 采用旋转扫描方式, 由扫描边界  $B$  与旋转轴  $AX$  描述。对于非轴对称形状, 采用轨迹扫描方式, 由扫描边界  $B$  与扫描轨迹  $T$  描述。

BENDING 由空间的两条同心圆弧  $A_1$ 、 $A_2$  及相应的参数描述 (图 5-22c)。

CUTTING 由所要定义的孔、缺口等局部形状在冲切方向上的投影轮廓形状  $C$  描述 (图 5-22d)。

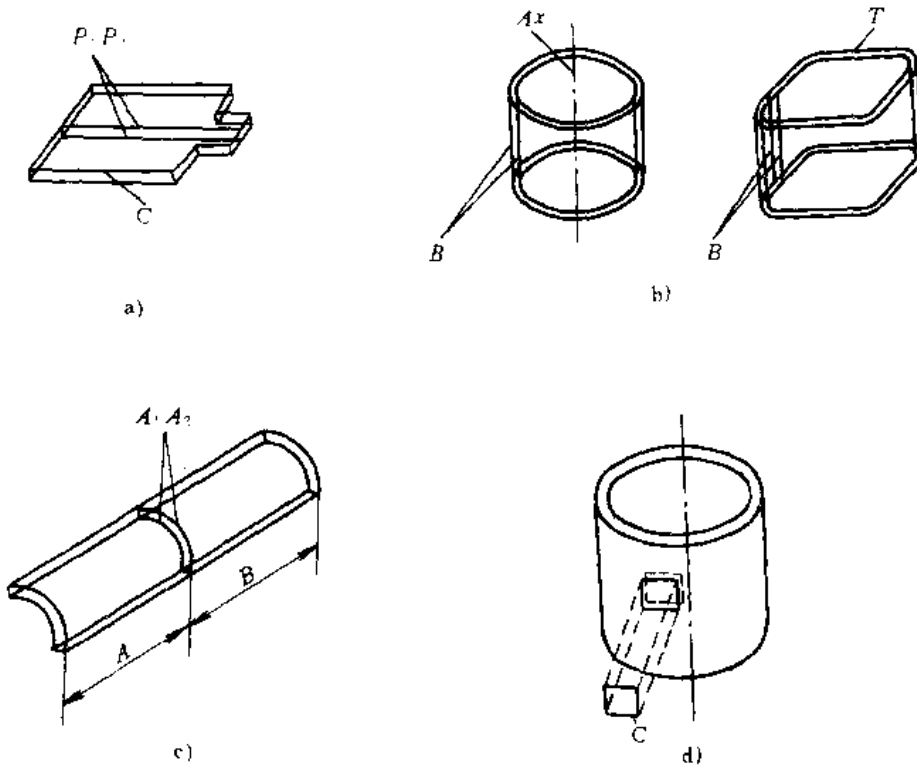


图 5-22 基本体素的定义

a) PLANE 体素的定义 b) SHAPING 体素的定义 c) BENDING 体素的定义 d) CUTTING 体素的定义

由上述体素定义方式可知, 各体素的形状是由空间上的线、圆 (弧) 等几何元素确定的。我们称这些确定体素形状的几何元素为体素定义几何元素。

按照上述体素的分类与定义, 可将图 5-23 所示的冲压件, 分解为三个 PLANE 体素、二

个 BENDING 体素和一个 SHAPING 体素。

## (二) 基本体素的拼合

### 1. 体素边界模型的生成

体素的拼合，需要各体素的边界信息。在建立体素的边界模型时，首先要判断体素定义的有效性，根据前述体素的分类与定义，各体素定义的有效性判断规则如下：

对于 PLANE 体素：

- 1)  $C$  在同一平面上。
- 2)  $P_1$  平行  $P_2$ 。
- 3)  $P_1$  与  $P_2$  构成的平面与  $C$  垂直。
- 4)  $P_1$  或  $P_2$  在  $C$  所在的平面上。

对于 BENDING 体素：

- 1)  $A_1, A_2$  在同一平面上。
- 2)  $A_1, A_2$  同心。
- 3)  $A_1, A_2$  对应端点的连线通过圆心。

对于 SHAPING 体素：

- 1)  $AX$  与  $B$  必须在同一平面上。
- 2)  $AX$  与  $B$  不能相交。
- 3)  $T$  在同一平面上，且封闭。
- 4)  $T$  与  $B$  所在平面垂直。

对于 CUTTING 体素：

- 1)  $C$  必须在同一平面上。
- 2)  $C$  封闭。

如果体素定义有效，则可根据它的类型和体素定义几何元素分别求出它的表面和边线，并建立这些表面和边线连结关系，从而得到各体素的边界表示模型。

在 SGM 系统中，体素的表面分为两类：一类是形面，另一类是侧面，如图 5-24 所示。形面可以是平面、圆柱面、球面、圆锥面和圆环面等，侧面一般为平面或圆柱面。下面以 PLANE 体素为例，说明体素边界模型建立过程。

- 1) 首先根据  $C$  建立 PLANE 的一个形面  $S_1$ 。
- 2) 根据  $P_1$  和  $P_2$  确定另一形面  $S_2$  的位置，然后将  $S_1$  扫描到该位置得  $S_2$ 。

3) 将  $S_1$  与  $S_2$  对应的顶点连接起来，建立 PLANE 的所有侧面。

4) 建立各个面及其边线的连接关系。

5) 结束。

### 2. 拼合运算

体素的边界模型建立后，系统将根据体素的类型和它的位置，确定各体素间的连接关系，并判断是否存在孤立的体素，即不能与其它体素有效连接的体素。如果存在，则说明冲压件形状定义无效，应重新定义。体素间主要存在以下连接关系：

(1) 弯曲连接(BR) 它用于描述 PLANE 与 BENDING 之间的连结关系。如果一 PLANE

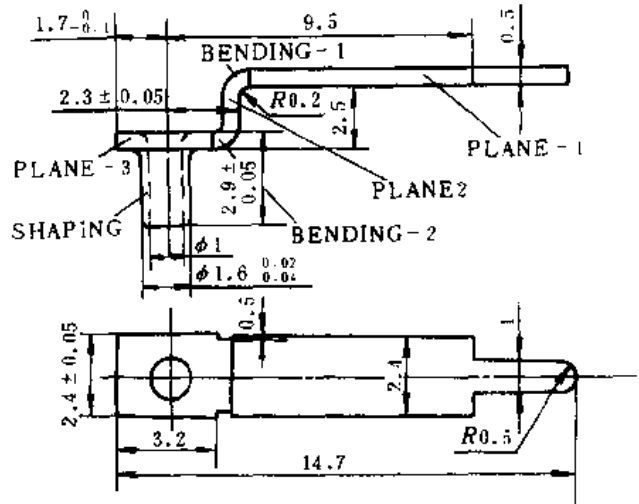


图 5-23 体素定义示例

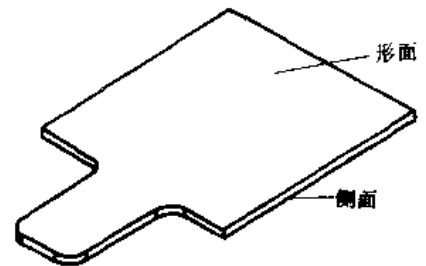


图 5-24 体素的形面与侧面



体素与一 BENDING 体素间存在 BR 关系, 则表明 BENDING 的一侧面与 PLANE 的某一侧面重合。

(2) 过渡连接(TR) 它用于描述 PLANE 与 SHAPING 之间的连结关系。如果一 PLANE 体素与一 SHAPING 体素存在 TR 关系, 则表明该 SHAPING 的端部侧面的两组边界分别在 PLANE 的相应的两个形面上。

(3) 在某一面上 (FR) 用于描述 CUTTING 与其它体素间的连接关系。这种关系是由用户交互定义的, 它表示要在某一体素上产生一孔、缺口或枝条等。

图 5-25 是图 5-23 所示冲压件各组成体素间的连接关系图。

对于 (1) (2) 两种连接关系只需进行匹配处理, 因为它实际上是一种粘贴运算 (一种特殊的端面重合的并运算)。对于第 (3) 种连接关系, 需进行如下处理:

- 1) 确定作用在体素哪一个面上。
- 2) 判断产生结果的类型。

①若 C 沿其法失方向的投影完全包含在其作用的面内, 则结果为孔; ②若 C 沿其法失方向的投影除部分边界在体素的边界上外, 其余完全包含在其作用的面内, 则结果为缺口; ③若 C 沿其法失方向的投影除部分边界在体素的边界上, 其他完全在体素之外, 则结果为枝条。

3) 将 CUTTING 的 C 沿其投影方向扫描形成一棱柱体表面。

- 4) 离散化该棱柱体表面。
- 5) 将离散化的柱体表面与其作用的形面求交。
- 6) 按结果类型将交线转化为孔、枝条或缺口。

根据上述关系, 对各体素进行相应处理后, 即可建立冲压件的几何模型。其对应的数据结构如图 5-26 所示。在该数据结构中包含有三层信息, 即实体层信息 (由零件表、体素表和关系表组成)、边界层信息 (由面表、环表、边链表、边表及点表组成) 和定义层信息 (由尺寸模型表和构造平面表组成)。各表以指针表达相互间连接关系, 它们所包含的数据项含义如下:

零件表

- name: 存储冲压件名;
- P-Pr: 指向体素定义链表首部的指针;
- P-F: 指向面链表首部的指针。

体素表

- Ptyp: 表示体素类型, 1=PLANE、2=BENDING 3=SHAPPING 4=CUTTING
- PP-R: 指向体素关系链表首部的指针;
- PP-F: 指向体素表面的面链表首部的指针;
- PP-EL: 指向构成体素定义几何元素边链表首部的指针。

关系表

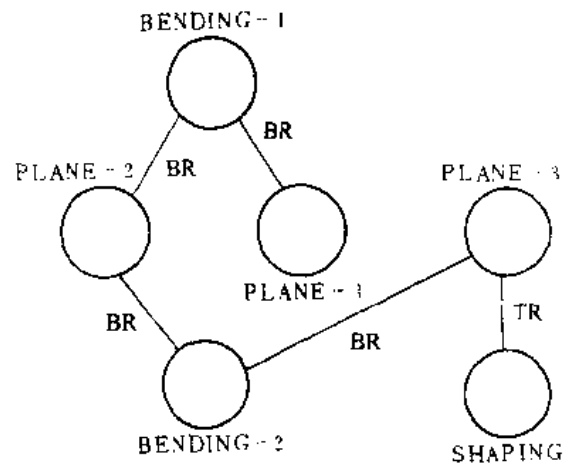


图 5-25 一冲压件的连接关系图

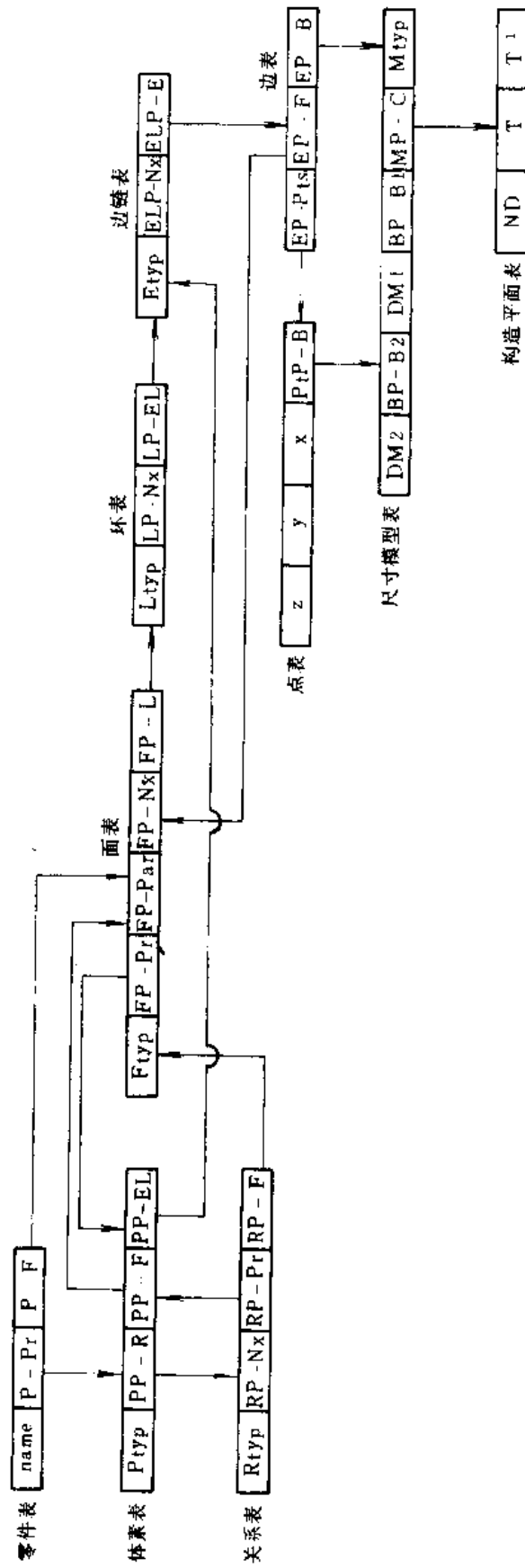


图 5-26 冲压件几何模型的数据结构

Rtyp: 体素间连接类型, 1=弯曲连接、2=过渡连接、3=在面上;

RP-Pr: 指向相关连体素的指针;

RP-F: 指向相关连的面;

RP-Nx: 指向与同一体素相关的下一关系单元。

#### 面表

Ftyp: 面的类型, 1=形面 2=侧面;

Fpar: 面的定义参数;

FP-Pr: 指向面所属的体素;

FP-L: 指向环链表首部的指针;

FP-Nx: 指向属于同一体素的下一个面单元。

#### 环表

Ltyp: 环的类型, 1=外环 2=孔 3=缺口 4=支条;

LP-EL: 指向组成环的边链表的首部;

LP-Nx: 指向属于同一面的下一个环单元。

#### 边链表

Etyp: 边的类型, 1=直线 2=圆弧 3=圆;

ELP-E: 边在边表中的位置;

ELP-Nx: 指向相邻的下一个边。

#### 边表

EP-F: 指向该边所属的两个面;

EP-B: 指向定义该边的尺寸模型表;

EP-Pts: 指向该边的相关点, 对于直线为起点和终点, 对于圆弧为起点、终点和圆心点。  
对于圆则为圆心。

#### 点表

PtP-B: 指向定义该点的尺寸模型表;

X Y Z: 坐标值;

#### 尺寸模型表

Mtyp: 点、线或圆(弧)的定义类型;

BP-B1/分别表示作为基准的两个几何元素在边表或点表中的位置;

BP-B2;

DM1/DM2: 分别表示相对于两个基准的尺寸及上下偏差;

MP-C: 指向定义几何元素的构造平面。

#### 构造平面表

NO: 构造平面的编号;

T/T<sup>-1</sup>: 构造平面的变换矩阵。

有关尺寸模型和构造平面的内容见下一小节。

### 三、冲压件造型的实现方法

#### (一) 基于尺寸模型的 3D 线框造型

SGM 系统对冲压件形状的定义是在 3D 线框造型基础上, 通过逐步构造冲压件各部分的

形状而实现的。3D 线框造型主要用于构造定义体素的有关点、线、圆等体素定义几何元素。

3D 线框造型中运用了构造平面和深度两个概念。所谓构造平面是指空间中的一个平面，在该平面上用户可以定义点、线、圆等几何元素。深度指的是空间中的某一点距构造平面的距离。利用构造平面和深度，可将 3D 空间中几何元素的定义转化为 2D 空间中的几何元素的定义。定义 3D 空间的几何元素包括以下步骤：

1) 在 3D 空间中选定一构造平面。根据这一平面的空间位置，用变换矩阵  $T$  将其变换到与  $XOY$  平面重合。

2) 在  $XOY$  平面上定义几何元素，并可为其规定深度值，该值即代表了几何元素的  $Z$  坐标。

3) 将在  $XOY$  平面上定义的几何元素，通过  $T^{-1}$  矩阵变换到对应的空间位置，从而实现了在 3D 空间中定义几何元素。

SGM 系统的 3D 线框造型模块可处理点、线、圆（弧）三种基本的几何元素。几何元素的定义是基于冲压件的尺寸模型实现的。根据冲压件产品图上尺寸公差标注的特点，系统采用图 5-27 至图 5-29 所示的三种几何元素的尺寸模型，这一尺寸模型既完整地表达了冲压件的尺寸信息，又方便了用户定义冲压件的形状。

### 1. 点的尺寸模型

(1) 光标定点 在当前构造平面上光标处定点。

(2) 坐标定点 直接键入当前构造平面下  $X$ 、 $Y$  坐标及深度值。

(3) 交点 将两相交几何元素  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  的交点定义为点实素（图 5-27a）。

(4) 圆弧上点 在圆或弧上定一点。其中  $E_{b1}$  为当前构造平面上的圆或圆弧， $E_{b2}$  为当前构造平面上的一直线。 $D$  为角度尺寸（图 5-27b）。

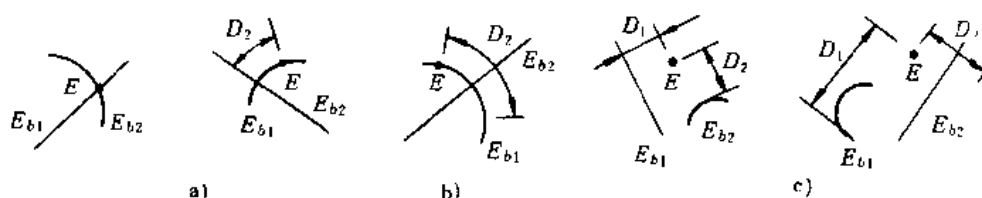


图 5-27 点的尺寸模型

(5) 相离点 在距两个几何元素一定距离处定义一点（图 5-27c）。其中  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  为当前构造平面上的点、直线或圆（弧）。 $D_1$ 、 $D_2$  分别为所定义点距  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  的距离。

(6) 端点 将直线或圆弧的一个端点定义为点实素。

(7) 圆心点 将圆（弧）的圆心定义为点元素。

### 2. 线的尺寸模型

(1) 两点连线 在两点  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  之间连一条线（图 5-28a）。

(2) 平行线 平行线有三种定义方法，它们分别是：①过一点  $E_{b2}$ ，与直线  $E_{b1}$  平行（图 5-28b）；②与直线  $E_{b1}$  平行且相距  $D_1$ （图 5-28c）；③与直线  $E_{b1}$  平行，对称分布在  $E_{b1}$  两侧，相距  $D_1$  的两条平行线（图 5-28d）。

(3) 垂线 过点  $E_{b2}$  与直线  $E_{b1}$  垂直的直线（图 5-28e）。

(4) 切线 点和圆（弧）或两圆（弧）（ $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$ ）间的切线（图 5-28f）。

(5) 点斜线 过一点  $E_{b2}$ ，与直线  $E_{b1}$  夹角为  $D_1$  的直线 (图 5-28g)。

(6) 水平/垂直线 过任一点  $E_{b1}$ ，在当前构造平面上定义水平线、垂直线或水平垂直线 (图 5-28h)。

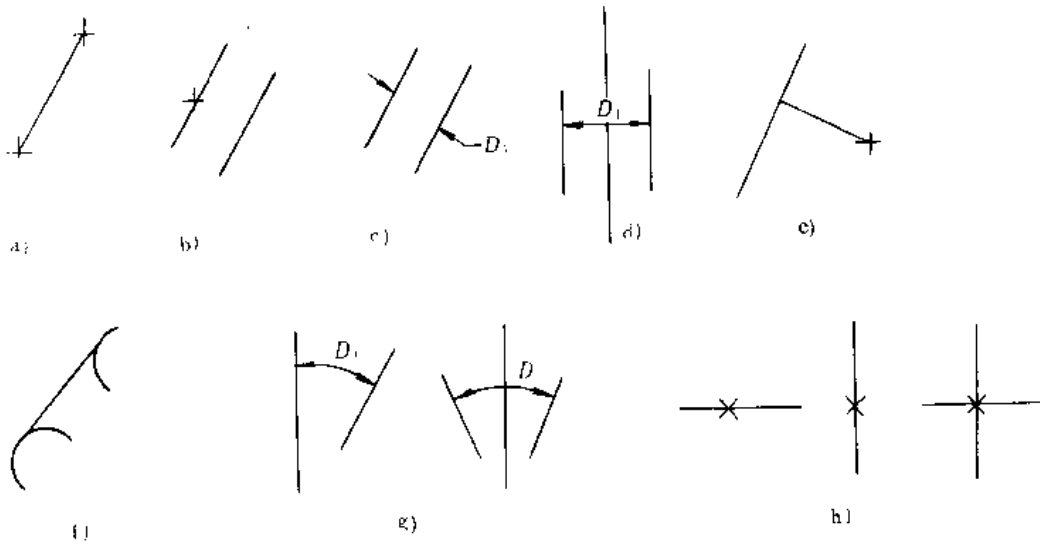


图 5-28 线的尺寸模型

### 3. 圆的尺寸模型

(1) 中心点定圆 以点  $E_{b1}$  为圆心，在当前构造平面上定义一半径或直径为  $D_1$  的圆 (图 5-29a)。

(2) 两点定圆 以当前构造平面上具有相同深度值的两点  $E_{b1}$ 、 $E_{b2}$  连线为直径定圆 (图 5-29b)。

(3) 点和切边定圆 以点  $E_{b1}$  为圆心，与一直线或圆 (弧)  $E_{b2}$  相切的圆 (图 5-29c)，其中  $E_{b1}$  与  $E_{b2}$  必须在同一构造平面上。

(4) 过渡圆弧 在当前构造平面上的两几何元素 (直线或圆弧)  $E_{b1}$  与  $E_{b2}$  间，产生一半径为  $D_1$  的圆滑过渡的圆弧 (图 5-29d)。

#### (二) 冲压件形状的定义

定义冲压件的形状时，首先利用上述方法在 3D 空间建立用于定义各体素的几何元素。然后，根据体素定义的要求，交互地选择相应的体素定义几何元素，输入必要的参数，完成各体素的定义。体素定义完后，系统自动进行各体素的拼合处理，建立冲压件的几何模型。对于图 5-23 所示冲压件，它的形状定义过程如下。

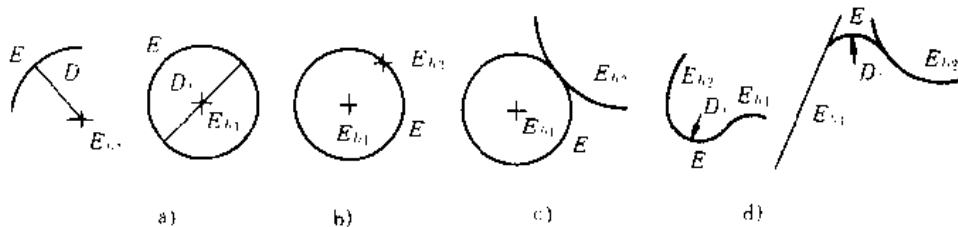


图 5-29 圆的尺寸模型

首先选择一构造平面  $CP_1$ ，如  $ZOX$  平面，在该构造平面上定义图 5-30a) 所示的点、线、

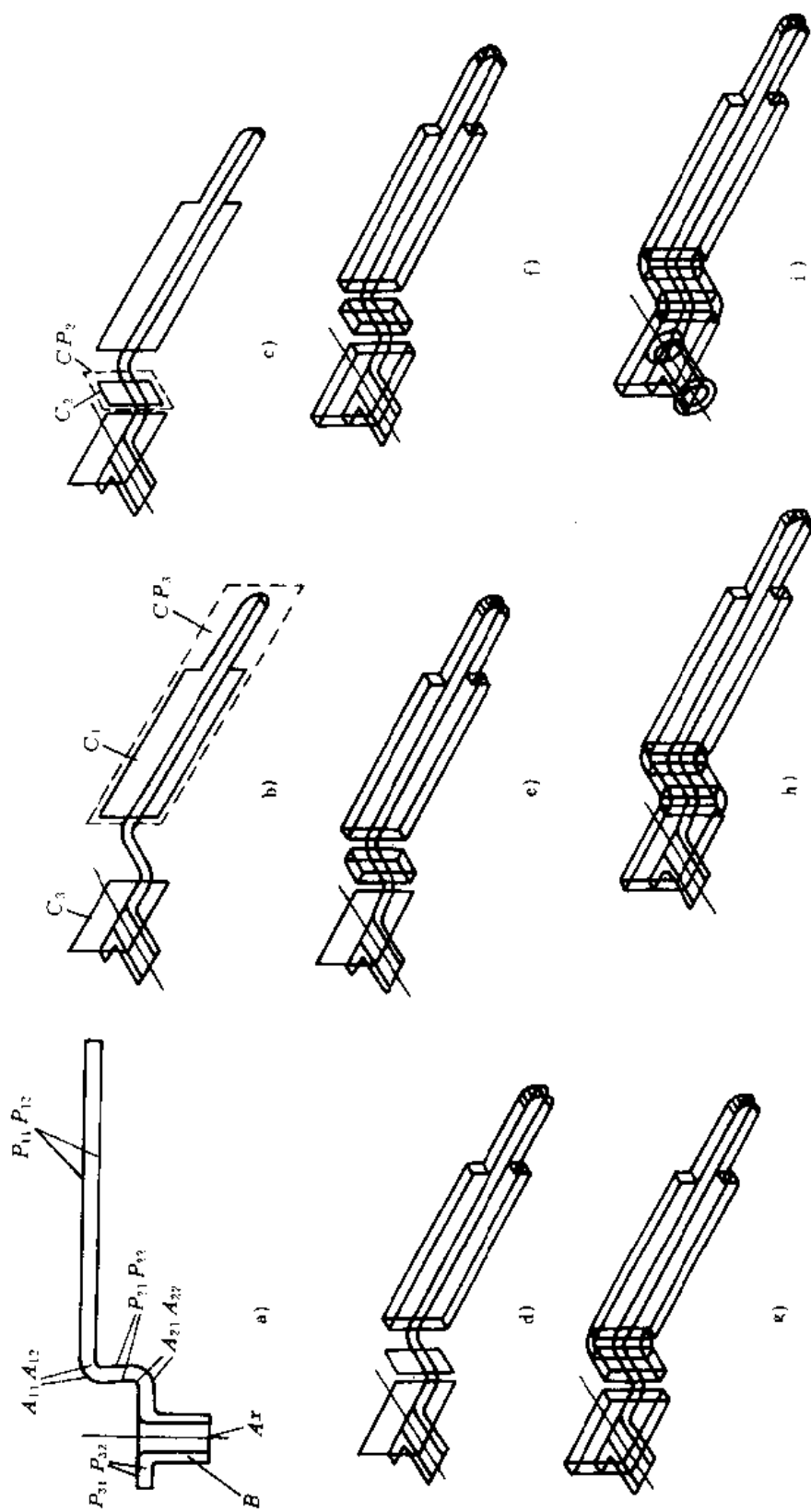


图 5-30 一伸压件的形状定义过程

圆等几何元素。接着，定义构造平面  $CP_3$ ，在  $CP_3$  上定义 PLANE-1 的体素定义几何元素  $C_1$  及 PLANE-3 体素定义几何元素  $C_3$ （注意：此时应设置相应的深度值）（图 5-30b）。然后，定义构造平面  $CP_2$ ，在  $CP_2$  上定义 PLANE-2 的体素定义几何元素  $C_2$ （图 5-30c）。最后，分别选择  $C_1$ 、 $P_{11}$ 、 $P_{12}$  定义 PLANE-1，选择  $C_2$ 、 $P_{21}$ 、 $P_{22}$  定义 PLANE-2，选择  $C_3$ 、 $P_{31}$ 、 $P_{32}$  定义 PLANE-3，选择  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  定义 BENDING-1，选择  $A_{21}$ 、 $A_{22}$  定义 BENDING-2，选择  $B$ 、 $AX$  定义 SHAPING（图 5-30d~i）。上述定义完成后，SGM 系统即可自动进行相应的拼合处理，建立该冲压件的完整的表示。

#### 四、系统的主要功能

SGM 系统采用菜单方式驱动各功能模块的执行，用户若要调用某项功能，只需选择相应的菜单项即可。

##### （一）点、线、圆几何元素的定义

系统根据用户所选择的几何元素的类型，显示其尺寸模型菜单，用户选择相应的菜单项即可定义该几何元素。此外，还可利用已定义的几何元素，通过系统提供的旋转、平移、对称和变比等变换功能，产生新的几何元素。

##### （二）构造平面的定义

SGM 系统提供了两种定义构造平面的方法，一种是采用三点法定义，其中第一点表示其原点，第二点和第三点分别规定  $X$  轴方向和  $Y$  轴方向，系统根据这三点可自动计算出变换矩阵  $T$  及  $T^{-1}$ 。另一种是通过选定某一构造平面上的直线定义，所定义的构造平面通过该直线，并垂直该直线所在的构造平面。

系统除保存用户已定义的构造平面外，还提供了三个缺省的构造平面，即  $XOY$ 、 $ZOX$  和  $YOZ$ 。这些构造平面可重复使用，用户可根据需要选择。

##### （三）几何元素的编辑

用户按尺寸模型或通过变换方式创建的几何元素，有时需要修剪或延伸，以改变其端点，构成一封闭的轮廓。系统提供了两种编辑几何元素功能，如图 5-31 所示，用户可根据需要选择相应的编辑功能。

由于误操作等原因，有时可能会产生错误的或不需要的几何元素。此时用户可选择删除功能，删除这些几何元素。删除几何元素时，系统首先以将所选几何元素增亮方式响应，用户可选择所有要删除的元素，并确认是否删除。如其中存在不希望删除的几何元素，可重复选择该几何元素，它将恢复到正常显示状态，在最后确认时该几何元素不被删除。

##### （四）几何元素的显示

用户在任一命令状态下，都可选择该功能模块，执行完后再返回到以前的命令状态。显示功能模块包含以下命令：

ZOOM 放大一矩形窗口内的几何元素；

PAN 将几何元素从显示屏上某一处，移至另一处显示；

SCAL 按比例放大或缩小几何元素的显示；

VIEW 将几何元素平行投影到某一构造平面上显示，或产生其轴测投影；

MARK ON/OFF 为使画面清晰，选择此命令可使某一几何元素显示或不显示。

##### （五）体素定义

系统提供了前述四种基本体素的定义功能，它根据用户所选体素类型，提示用户选择相

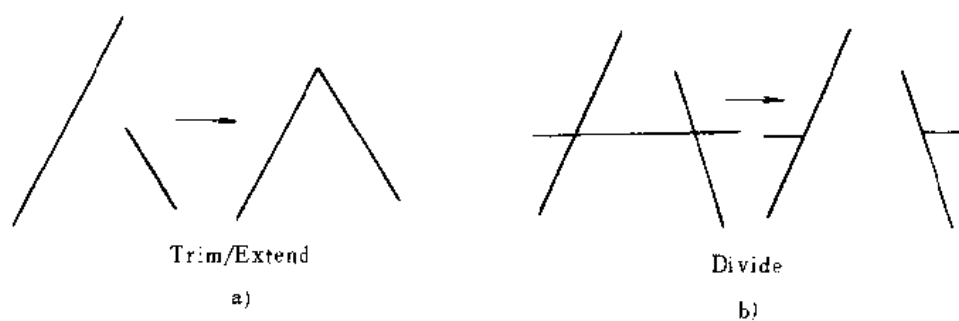


图 5-31 几何元素的编辑处理

应的体素定义几何元素。

#### (六) 体素的修改

用户首先拾取需被修改的体素，系统将取消该体素的定义，并删除建立体素边界模型时所产生的面、边几何元素，仅保留其定义几何元素。用户对定义几何元素作相应的修改即可完成对基本体素的修改。

#### (七) 冲压件产品信息输出

将定义好的冲压件产品信息按一定的格式输出到某一文件中，该信息可供后继的冲压工艺与模具设计等应用程序使用。

### 习 题

1. 几何造型在模具 CAD/CAM 系统中起何作用？它应满足哪些要求？
2. 几何造型中有哪些常用的造型方法？各有什么特点？
3. 几何造型中有哪些常用的表示模式？各有什么优缺点？
4. 试用 CSG 表示模式的二叉树结构表示图 5-32 所示的零件。
5. 试用翼边数据结构描述一正方体。
6. 什么是构造平面？试按三点定义构造平面的方法，计算其变换矩阵  $T$  及  $T^{-1}$ 。
7. 试设计一判断 PLANE 体素定义有效的算法流程。

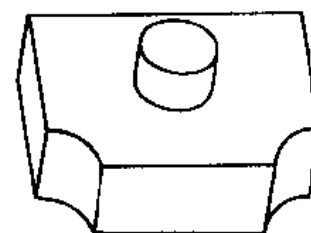


图 5-32



## 第六章 自动绘图

“图样”是工程界的技术语言，是表达设计意图的有效工具。模具零件图与装配图的绘制占整个模具设计工作量的一半以上。模具 CAD 中采用自动绘图系统，可将模具设计者从繁冗的绘图工作中解放出来，对于提高模具设计效率、改进模具设计质量十分重要。本章将讨论自动绘图的基本原理和在模具 CAD 中实现自动绘图的方法。

### 第一节 绘图系统

一个绘图系统，由硬件和软件两部分组成。硬件部分包括计算机、自动绘图机、图形显示器和其它输入、输出设备。软件部分包括实现自动绘图的程序库等软件。计算机是计算机绘图系统的中枢，接收输入设备传递来的数据、指令等，完成分析、判断和运算处理，并控制输出设备的显示和绘图。显示器可以真实地显示设计出的图形，并可根据需要进行修改和补充。设计的最后结果在自动绘图机上输出。

绘图系统按自动绘图机与中央处理机之间是否直接相连，可分为脱机系统和联机系统；按是否具有交互图形处理功能，可分为交互系统和非交互系统。

#### 1. 联机系统

在联机系统中，自动绘图机与中央处理机直接相连。中央处理机处理后的图形信息直接经接口输入绘图机，以控制自动绘图过程。图 6-1 中实线表示的路线代表联机方式。由于绘图机的速度跟不上中央处理机的运算速度，在联机系统绘图过程中必然会发生计算机等待绘图机的情况，致使中央处理机的使用效率大大降低。

#### 2. 脱机系统

在这种自动绘图系统中，绘图机与中央处理机是脱开的。用户的源程序经中央处理机处理后，图形信息存入中间载体——磁带或磁盘。绘图时，将中间介质上的图形信息通过输入设备输送给绘图机。这样，就大大节省了中央处理机的时间。图 6-1 中虚线所示的路线代表脱机方式。

#### 3. 交互系统

交互绘图系统和非交互系统在功能上很不相同。非交互系统在绘图过程中，操作者不能进行干预。必须等图形绘制完毕后，才能针对图形存在的问题修改绘图程序。交互绘图系统允许进行交互绘图，设计者可通过图形板、键盘和鼠标等输入设备和计算机对话。设计者将命令输入，处理后的结果显示在图形终端上。如果对产生的图形不满意，可在屏幕上进行修

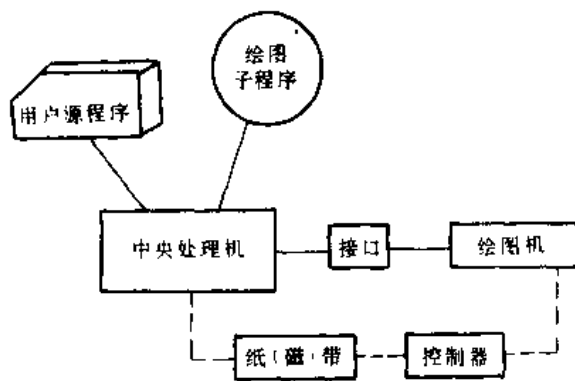


图 6-1 绘图系统的示意图

改。最后，完成的图形在绘图机上绘出。交互绘图系统综合了计算机的快速运算和人的判断能力两方面的优点，所以在模具 CAD 中一般都采用这种绘图方式。

## 第二节 自动绘图机

绘图机可根据计算机输出的信息，自动完成图形绘制和文字书写，有些绘图机还具有坐标读取功能。图 6-2 是绘图机的一般工作流程框图，经过计算机处理的绘图指令可直接输入绘图机，或者记录在磁带或磁盘上，再由磁带机等输入绘图机。接着，插补器对直线、圆弧或抛物线进行插补运算，将笔的位置同理想图线上的相应的点作比较进行判断，确定笔的下一步走向。伺服系统接到插补器输出的  $x$ 、 $y$  方向的指令脉冲后，进行放大转换，驱动  $x$ 、 $y$  方向的伺服电机，通过机械系统带动绘图笔运动，从而绘出所需要的图形。

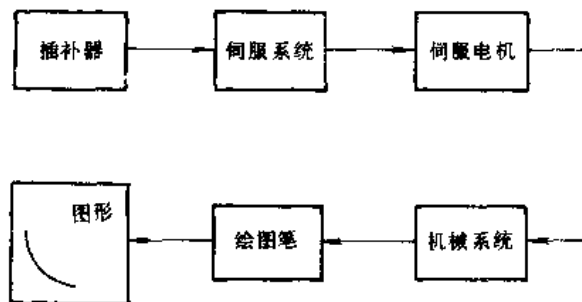


图 6-2 绘图机的工作流程图

绘图机按其控制系统的反馈形式，可分为开环系统、闭环系统和半闭环系统。按结构形式，绘图机又可分为平台式和卷筒式两类。

### 一、自动绘图机的主要技术指标

自动绘图机的技术指标包括有效绘图幅面、笔数、分辨率、精度、速度、使用环境、功率消耗和外形尺寸等。其中，绘图的精度和速度是两个重要的技术指标。

#### 1. 精度

绘图机的精度主要包括重复精度、定位精度和动态精度。精度指标一般以 mm 为单位。

(1) 重复精度 重复精度反映了绘图机在重复绘制图形时产生的误差大小。当一串指令脉冲输入绘图机时，绘图笔从一点移至另一点。当输入另一串方向相反的指令脉冲时，绘图笔应该返回起始点。但是，会发现绘图笔并不能精确地返回起始点，这样就形成了重复误差。重复误差主要是由机械传动链引起的。

(2) 定位精度 定位精度是衡量绘图机最大定位误差的指标。假设按绘图指令的要求，笔应从  $A$  点开始画直线至  $B$  点。但是，绘图笔实际上到达的是  $C$  点，距离  $BC$  便反映了绘图机的定位误差。定位误差主要是由检测元件的误差和机械传动链的误差决定的。

(3) 动态精度 绘图机的动态精度反映了绘图机在绘图过程中给图形带来的动态误差的大小。动态误差主要与输入信号的作用有关。通常，将在稳定的或缓慢变化的输入信号作用下，绘图机所产生的动态误差称为稳态误差；把突变性的或快速变化的输入信号作用下，所产生的动态误差称为瞬态误差。

(4) 综合精度 通常，采用综合精度来反映定位精度和动态精度的综合效果。设绘图机的定位精度为  $a_p$ ，动态精度为  $a_d$ ，则其综合精度  $a$  定义为

$$a = \sqrt{a_p^2 + a_d^2}$$

#### 2. 速度

绘图机的速度是反映绘图效率的技术指标。通常，绘图机的速度是可变的，可在较宽的

范围内调速。

(1) 额定速度 绘图机的额定速度是指其能正常工作的最大速度。它主要决定于电机的额定转矩、动力学特性以及机械传动比。

(2) 最大绘图速度 最大绘图速度是指自动绘图机绘制直线时，在允许精度范围内可以达到的最大速度。

(3) 爬行速度 当绘图机速度降低到一定值时，会发生所谓的“爬行”现象。爬行现象主要是由于机械传动链的摩擦力矩不均匀引起的。爬行速度是指绘图机能够稳定运动的最低速度。降低爬行速度对绘图机的低速操作意义很大。

在选择绘图机时，人们最关心的技术指标是其绘图的幅面、综合精度、重复精度和最大绘图速度。

## 二、平台式自动绘图机

这种绘图机的台面是平放或斜置的，所以称为平台式自动绘图机。它的台面可以做得很大，例如  $3000\text{mm} \times 10000\text{mm}$ ，绘图速度较高，为  $15 \sim 60\text{m}/\text{min}$  左右。平台式自动绘图机精度高，综合精度达  $\pm 0.15\text{mm}$ ，重复精度可达  $\pm 0.01\text{mm}$ 。平台式绘图机在绘制图形时能看到整个画面，便于监视绘图过程。

平台式自动绘图机常采用步进电机、伺服电机、平面电机等驱动方式。图 6-3 为平台式自动绘图机的结构示意图，主要包括如下几个部分。

### 1. 驱动电机

驱动电机将传来的脉冲信号转换为机械运动。

### 2. 机械传动系统

通过机械传动系统，将驱动电机的转动变为绘图笔的运动。常用传动方式有滚珠丝杠、齿轮齿条、钢丝绳带等。

高精度的滚珠丝杠，由于在丝杠和螺母之间放置滚珠，摩擦小，传动效率高，不易发生爬行现象。它适合于位移小、定位精度要求高的自动绘图机。因为细长丝杠加工困难，所以滚珠丝杠传动多用于中小型绘图机。

小模数齿轮齿条传动适用于大型绘图机。钢丝绳滑轮传动的优点是传动惯性小，可实现高速绘图，但是钢丝绳易损坏，常需更换。

### 3. 笔架

笔架上装有数支绘图笔，可用以绘制不同颜色、不同粗细的线条。根据指令可使所需的笔移到相应的位置。

笔的上下运动是按照指令，由电磁机构完成的。在高速绘图中笔的上下动作非常频繁，对使笔上下运动的线圈电流进行控制，可使高速下降的笔在接触纸面之前减速。

### 4. 绘图纸固定装置

常用的图纸固定装置有静电吸附、真空吸附、机械夹紧等类型。

静电吸附的原理如图 6-4 所示，金属基板上覆盖着感应导电层，在其表面上制有网格状的

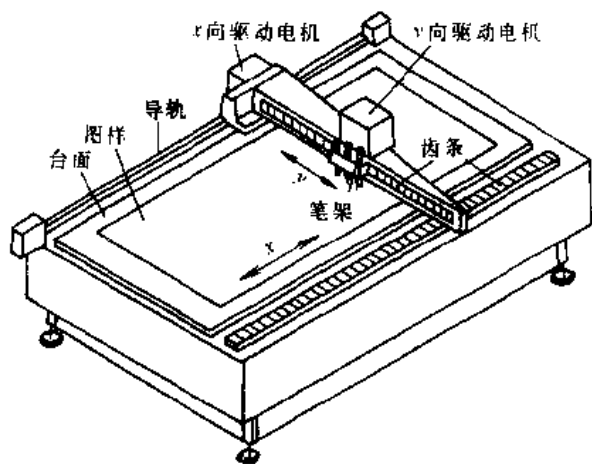


图 6-3 平台式自动绘图机的结构

电极。由于电极接地，所以与其相接触的图纸也具有相同的电位。当将正电位加于金属基板后，图纸便被吸附固定。这种吸附方式无噪声，耗电量少，但对周围环境要求较高。

采用真空吸附的方法固定图纸时，绘图台面上有许多小孔。当真空泵在台台下抽气时，图纸便会紧密地吸附在台面上。

#### 5. 插补器

它可对直线、圆弧和抛物线进行插补运算，输出  $x$ 、 $y$  方向的位置指令脉冲。插补器还有改变图形比例、控制速度、选择绘笔、控制抬、落笔以及强制绘笔自动到达终点等作用。

### 三、卷筒式绘图机

卷筒式绘图机因利用卷筒带动图纸作  $x$  方向运动而得名。图纸的卷动配合笔架的移动和抬、落笔运动，便可绘制出所需的图形(图 6-5)。

卷筒式绘图机与平台式绘图机相比具有结构简单、占地面积小、纸长几乎不受限制等优点，但绘图精度较低。然而，由于其结构简单、价格低廉，所以它在绘图精度要求不高的情况下应用十分广泛。

小型卷筒式绘图机一般称为  $x$ - $y$  绘图仪，可直接放置在桌面上。

卷筒式绘图机主要由下列部分组成：

#### 1. 步进电机

步进电机将传来的脉冲信号转换为机械运动，驱动卷筒和绘图笔。

#### 2. 卷筒传动机构

由送纸电机、卷纸用皮带轮和  $x$  向步进电机组成。送纸时，由送纸电机用皮带带动卷筒。绘图时，用  $x$  向步进电机驱动卷筒。

目前，有些公司生产的绘图机采用摩擦轮驱动图纸。这是对卷筒式绘图机卷纸机构的改进。此类绘图机已得到广泛的应用。

#### 3. 绘图笔移动部分

$y$  向步进电机通过小模数齿轮带动钢带，使笔架左、右运动，笔架上的滚轮可沿导轨滚动。

#### 4. 控制台部分

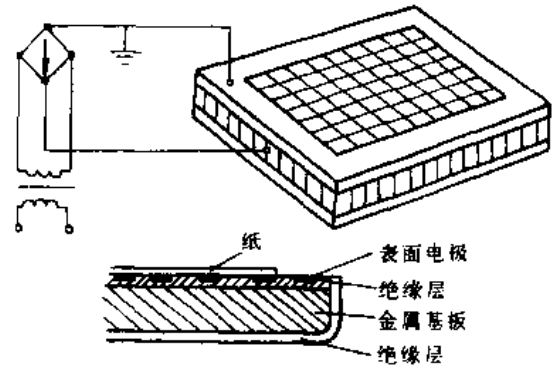


图 6-4 静电吸附固定图纸的原理

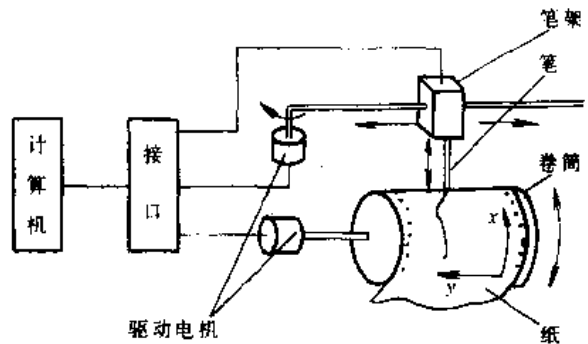


图 6-5 卷筒式自动绘图机的结构

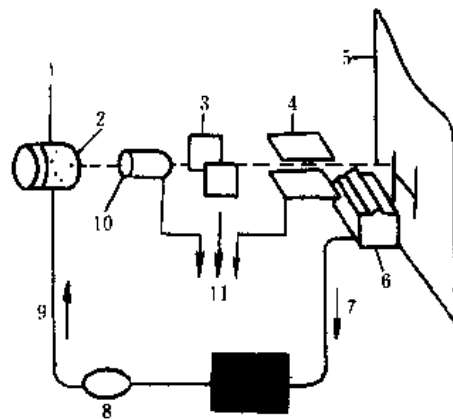


图 6-6 喷墨式绘图机

1—晶体 2—墨水喷嘴 3—水平偏转板 4—垂直偏转板 5—纸 6—墨水槽 7—墨水返回 8—泵 9—供给墨水 10—充电电极 11—传感器

其上安装有进行各种操作的按钮，包括启动、调整、停止等操作。

#### 四、其它类型的绘图机

除了上述的笔式绘图机以外，输出图形硬拷贝的设备还有静电绘图机和喷墨式绘图机等。静电绘图机有一块电子矩阵模板，此模板可以在电感纸上印出许多点。当纸经过模板下面时，用点阵方式来绘图。可以用相当高的密度打点，一般可达到每毫米约8个点，以一系列的点来形成直线。对于某些静电绘图机来说，可以绘制宽1.8m的图形。

喷墨式绘图机的工作原理如图6-6所示。由墨水供给泵输出的高压墨水经过一个喷嘴后，形成喷射流。射流依次经过充电电极、水平偏转和垂直偏转板。由传感器传来的信号控制射流，在图纸上绘出相应的图形。新型的喷墨式绘图机通过红、绿、蓝三种基本色的组合可以绘出彩色图。

和笔式绘图机相比，静电绘图机和喷墨式绘图机绘图速度要快得多。因此，在要求短时间内大量出图的应用中，这两种绘图机将得到越来越广泛地使用。

### 第三节 绘图软件

绘图程序的编制有两种方法，即手工编程和计算机辅助编程。手工编程时，首先根据图形计算出圆弧、直线间的切点、交点坐标，然后用绝对坐标值或增量坐标值按绘图路线，以绘图机的功能指令逐条编出绘图程序。因为手工编程时要算出图形的节点，对于复杂的图形编程工作量很大，所以这种编程方法不适合计算机辅助设计。

计算机辅助编程采用高级语言编写绘图程序。坐标值的计算可直接编在程序中，由计算机完成。将经常使用的字符、图形及线型等编成标准过程或子程序，在需要时加以调用。为实现自动绘图需要配置一定的绘图软件。它们具有绘制常用图形、字符等多方面的功能。绘图软件种类繁多，功能各不相同。常见的绘图软件形式有专用的图形语言、在高级语言中扩充图形功能、图形程序库等。

#### 一、专用的图形语言

专用的图形描述的分析语言象其它的程序设计语言一样，有自己的词法、语法规则、数据类型、关键字、表达式和程序过程。这类语言不仅具有描述图形的功能，可以对点、线和面等几何元素进行定义，而且还有设计和分析图形的功能，可以完成图形的缩放、平移和旋转等一系列变换操作。专用的图形语言使用灵活，处理图形的效率高，但需要单独的编译系统，并且很难做到与设备无关。

#### 二、在高级语言中扩充图形功能

这类绘图软件是选择一种高级程序设计语言，如FORTRAN、C、PASCAL、BASIC等，作为主语言。在它的基础上增加一些图形处理的语句，如图形定义语句和绘图动作语句，使其具有绘图能力。这种绘图语言不需要独立的编译系统，而是将绘图语句的编译功能嵌在原来的语言编译系统之中。因为要改动、扩充程序设计语言的编译系统，所以这种方法比下面讲的绘图子程序库要复杂些。

#### 三、绘图子程序库

前面介绍了专用图形语言和扩充高级程序设计语言，使其具有图形处理的功能。这二方面的工作都需要重写一个编译系统，或修改主语言的编译系统，工作量大。加上图形处理过

程还涉及数据结构和存储问题,使其工作的复杂性大大增加。因此,绘图软件常常用程序库的形式来实现。

绘图子程序库中包含许多与绘图有关的子程序。这些子程序多用高级语言写成,并可由高级语言调用。通过调用这些子程序,可以在绘图机或显示器上产生图形,并能处理图形交互作用。对于一个通用的绘图程序库应包含以下功能:

#### 1. 图素的定义和生成

一般至少应包括直线、圆和字符的定义和生成功能。图素是构成图形的最小单元,图素可组合形成各种复杂的图形。

#### 2. 几何变换功能

一般提供的几何变换包括窗口、视口以及平移、比例、旋转、透视、投影等变换。

#### 3. 图形文件的处理

对于一些比较复杂的图形,常将它们定义成图形文件。常用的图形文件处理功能包括:打开一个文件;关闭一个文件;把给定文件加到当前打开的文件中去等。

#### 4. 控制功能

控制功能是为了方便用户而提供的某些操作,最基本的控制功能包括询问、初始化、清除等。

#### 5. 输入功能

输入功能是指从各种输入设备上输入有关信息的功能。

绘图子程序库一般包括基本子程序和功能子程序,有的还包括应用子程序。

基本子程序又称基本软件或一级软件,包含最基本的作图子程序,例如绘图初始化、选笔、走纸控制、基本图形变换、画直线、圆及字符等。

功能子程序亦称二级软件,为一级软件的扩充。它主要包括画各种线型、各种基本的直线图形和曲线图形等子程序。

应用子程序又称三级软件,是在一、二级软件的基础上开发的,例如画轴测图、透视图和机械图的子程序。应用子程序通常是根据实际需要编制的。

目前国内外使用的多数绘图软件属于绘图子程序库类型,例如美国的 CALCOMP 绘图软件、日本 DAP 绘图软件和 XYNETICS 绘图软件、法国的 BENSON 绘图软件和我国的 HZK 绘图子程序库等。

## 第四节 Auto CAD 绘图软件包及其应用

可用于模具 CAD/CAM 的绘图软件种类很多,例如在工作站上运行的有 CADD5、EUCLID、PRO-ENGINEER、UG I 等,在微机上运行的有 PD、CADKEY、MICRO STATION、Auto CAD 等。上述软件都有 2D 绘图功能。下面以 Auto CAD 为例,介绍其在模具 CAD/CAM 中的应用。

Auto CAD 绘图软件包是由美国 Auto desk 公司于 1982 年推出的,它将过去只能在大中型或小型计算机上实现的绘图功能,在微机上实现了。Auto CAD 绘图软件包可在 IBM PC 及各种兼容机上运行,支持数十种外部设备,包括各种图形显示器、绘图机、打印机和数字化仪等。该软件包自问世以来,版本不断更新,由 1.30 版本发展到 11.0 版本,功能不断加强。

## 一、Auto CAD 绘图软件包的主要功能

Auto CAD 是功能较强的交互绘图软件包，其主要功能包括：

### 1. 二维图形设计和绘制

Auto CAD 可定义的基本图形元素包括点、线、弧、圆等。它还具有标注尺寸、文本说明、画剖面线等功能，并可根据制图标准选择各种线型绘图。这些基本功能可以满足一般工程制图的要求。

### 2. 图形的编辑、修改和显示

Auto CAD 具有擦除、恢复、移位、复制图形的功能，具有显示坐标网格、正文处理、窗口放大、以及使图形按矩形及圆周阵列排列等功能，便于图形的编辑和显示。

### 3. 图形的插入功能

Auto CAD 具有图块插入功能，允许将图形定义成图块，可将图块插入指定位置。用户可利用此功能建立图库，构造复杂图形。

### 4. 汉字处理功能

Auto CAD 软件包还提供了汉字库，利用汉字库可以显示和书写汉字，以满足工程图上汉字标注的要求。

### 5. 三维图形功能

Auto CAD 提供了在三维空间从任意角度观察图形的功能。利用此功能可以选择适当的观察点，显示立体图形。

### 6. 二次开发的功能

Auto CAD 10.0 以上的版本还提供了高级语言的接口，如 AUTOLISP、C 语言接口。用户可以用高级语言编制自己的应用程序，直接调用 AUTO CAD 的命令，也可以用高级语言编写 Auto CAD 的宏命令。这一功能可使用户根据自己的需要进行二次开发。

第一次运行 Auto CAD 时应按硬件环境进行配置，以后再次运行只需键入 ACAD 即可。运行 Auto CAD 软件包时，屏幕上首先显示出主菜单：

#### 0. Exit Auto CAD

#### 1. Begin a NEW drawing

#### 2. Edit an EXISTING drawing

#### 3. PLOT a drawing

#### 4. Printer Plot a drawing

#### 5. Configure Auto CAD

#### 6. File utilities

#### 7. Compile Shape/font description file

#### 8. Convert old drawing file

Enter Selection:

主菜单列出了软件包的主要功能，键入 0~8 中的一个数字，便可执行该编号下的任务。

选择 0 号任务，Auto CAD 结束运行，返回操作系统。

选择 1 号任务，可以编辑新的图形。系统首先询问图名，然后进入编辑状态。用户可在屏幕上作图，工作结束后，可将图存入磁盘或在绘图机绘出。

选择 2 号任务，可编辑已存在的旧图形，对原图作修改、增添或删除等。

3号任务用以产生一个图形文件的硬拷贝,在绘图机输出图形。当键入3后,系统提示用户输入图形文件名。此时,键入一现存图形文件名,系统便会将其从磁盘中调出,在绘图机上输出。

4号任务能够使用打印机打印图形。当AutoCAD提示输入图形文件名时,可键入需打印的图形的文件名,便会在打印机上打印出图形。

5号任务用以实现AutoCAD系统的配置。配置系统时,一般先配置显示器,再配置图形板和绘图仪。配置完毕后,AutoCAD才能正常运行。如用户设备改变时,应重新配置。

6号任务可列出磁盘上的文件,删除指定的文件,或者改变文件的名字等。

7号任务可通过图形编辑程序,将型转换为AutoCAD可用的格式。建立或修改一个型或字体时,会用到此项选择。型是特殊的实体,可在绘图时调用。

8号任务可将旧版本的图形改造成新版本的图形文件。在旧版本的基础上,对某些图形文件进行修改十分方便。

AutoCAD绘图软件包功能较强,命令也很多,包括绘图、显示控制、尺寸标注、编辑和询问等内容。在附录B中给出了AutoCAD绘图软件的一些常用命令。

## 二、AutoCAD绘图软件在模具CAD中的应用

在模具CAD过程中,一般是先进行工艺设计和模具结构选择,然后利用设计结果和数据库存储的模具标准,绘制模具零件图和装配图。因此,需要将高级语言与AutoCAD绘图软件联系起来,以便根据设计结果形成模具的图形文件。这里,有三种方法可以将高级语言与AutoCAD绘图软件联系在一起。

### 1. 命令组文件

AutoCAD提供了一种从文本文件中读取命令的工具。利用这一工具可执行预定的命令序列。在模具CAD中可以根据工艺设计的结果,用高级语言将绘制模具图的一系列的AutoCAD绘图命令写到后缀为“.SCR”的命令组文件中。命令组文件是ASCII文本文件,因此也可以在DOS状态下用文本编辑软件编辑命令组文件。

例如,在一个名为BOX.SCR的文件中,存储了以下绘图命令:

```
1
SQUARE
LINE 1, 1 2, 1 2, 2 1, 2 C
DELAY 500
MOVE W 0, 0 3, 3 1, 0 3, 3
DELAY 1000
END
0
```

利用此命令组文件中的绘图命令可以画一个单位见方的方框,然后将此方框向右移动二个单位,并向上移动三个单位。此命令组文件的第一行的“1”是响应主菜单的选择,即开始一个新图,第二行“SQUARE”是该图形文件的文件名,“LINE”、“DELAY”、“MOVE”都是AutoCAD绘图软件的命令,其后面的数字是该命令所代的参数。只要熟悉了AutoCAD绘图命令,便不难用高级语言将所需的绘图命令记录在命令组文件中。在建立命令组文件时要在适当的地方使用空格和回车,因为AutoCAD在解释命令时将空格和回车同等处理。



在 Auto CAD 中有两种方法可以装入并执行命令文件中的命令。第一种方法是在开始运行 Auto CAD 时, 用下列命令格式调用:

C>ACAD 图形文件名 命令组文件名

命令组文件必须是 ACAD 程序调用行的第二个文件, 在键入文件名时不必带后缀。

第二种方法是在绘图编辑时用 SCRIPT 命令调用命令组文件。调用格式如下:

Command: SCRIPT 命令组文件名

如果在执行 SCRIPT 命令后不想退出编辑状态, 那么在命令组文件的末尾就不能用“END”和“QUIT Y”命令。

下面给出的是绘制图 6-7 所示凸模的命令组文件。

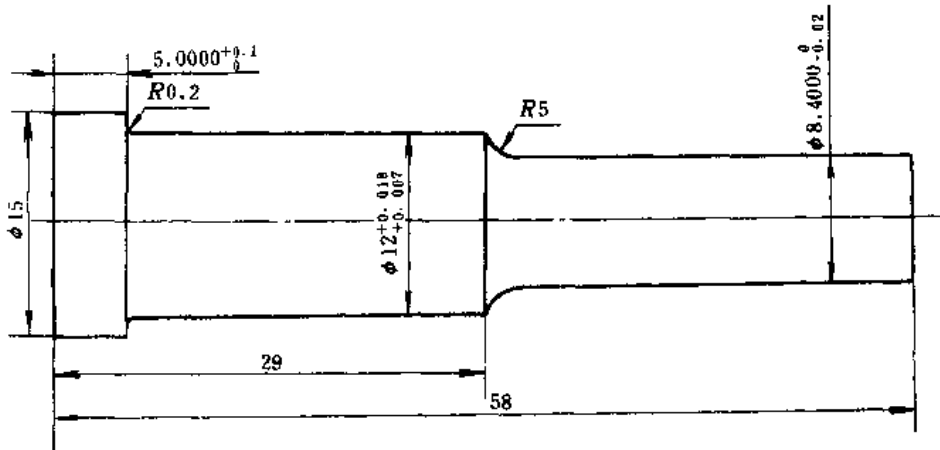


图 6-7 凸模零件图

```

1
axis
layer new 1 set 1 ltype dashdot
limits -5, -18, 65, 12
line -5, 0 60, 0
layer set 0
line 0, 0 0, 7.5 5, 7.5 5, 0
arc c 5.2, 6.2 5, 6.2 5.2, 6
line 5.2, 6 29, 6 29, 0
arc 29, 6 e 32.8, 4.2 r 5
line 32.8, 4.2 58, 4.2 58, 0
zoom a
mirror w 0, 0 60, 8 0, 0 60, 0 n
layer new 2 set 2
dim dimtad on dimasz 0.5 dimtxt 0.8 dimexe 0.5 dimdli 1.5
horizontal 0, -7.5 29, -6 10, -8.5 29
baseline 58, -4.2 58
dimtol on dimtih off dimtoh off dimtm 0.02

```

```

vertical 58, 4.2 58, -4.2 62, 0
exit
text 60.4, -15 0.8 90 %%c
dim dimtol off
radius 30.564, 4.7991
dimtol on dimtm 0.007 dimtp 0.018
vertical 24, -6 24, 6 24, 0
exit
text 22.4, -5.36 90 %%c
text 22.3, 0.49 0
dim dimtm 0 dimtp 0.1
horizontal 0, 7.5 5, 7.50, 8
dimtol off
vertical 0, -7.5 0, 7.5 -1, 0 15
exit
text -1.31, -1.36 90 %%c
zoom w 1.15, 3.3 18.4, 12.6
dim radius 5.0772, 6.031
6, 7
exit
zoom a
delay 5000
quit y
0

```

## 2. 图形交换文件

Auto CAD 可以使用后缀为 “.DXF” 的图形交换文件和其它程序交换绘图信息。Auto CAD 可接受此格式的图形交换文件,并能将其转换为绘图文件。在开发模具 CAD 软件时,可根据设计结果用高级语言生成图形交换文件。

图形交换文件的一般结构如下:

- 1) 标题 (HEADER): 有关图形的一般信息,包括与图形相关的变量的设置。
- 2) 表 (TABLE): 包括线型表、层表、字型表和视图表。
- 3) 块 (BLOCK): 包含所有块的定义。
- 4) 实体 (ENTITIES): 每个绘图实体都以标准的格式给出其参数。
- 5) 文件结束 (END OF FILE)。

在运行 Auto CAD 时,通过 DXFIN 命令,可以将一个图形交换文件转换为图形。在主菜单中选择 1 号任务进入图形编辑状态,然后发出如下命令:

Command: DXFIN

File name: 文件名

这时, Auto CAD 会按照图形交换文件中所包含的内容将图形在屏幕上显示出。

要实现图形数据的交换,关键是要了解与掌握图形交换文件的结构与格式。只有这样,才能用高级语言产生一个合乎要求的图形交换文件,或者用高级语言去读取图形交换文件中的有关信息,进行加工处理。一般说来,编写一个构造图形交换文件的程序,要比编写一个构造命令组文件的程序困难些。有关图形交换文件的格式就不在这里介绍了,使用时可查阅 Auto CAD 使用手册。

值得指出的是,由于 Auto CAD 的广泛应用和其在 CAD 软件中的重要地位,有不少其他的 CAD 软件也都提供了接受 DXF 图形交换文件的功能。因此在 Auto CAD 上产生的图形,也可在其他图形系统中显示或绘出。

### 3. AUTOLISP 编程

Auto CAD 2.17 以上的版本,提供了 LISP 语言的编程功能,其中使用了变量、表达式与函数,从而使 Auto CAD 的工作能力大为增强。AUTOLISP 是一种在 AUTO CAD 内部使用的 LISP 语言,是 LISP 语言的一个子集。但是,它结合 Auto CAD 的需要进行了扩充,例如提供了输入函数、COMMAND 函数(执行 Auto CAD 的内部命令)等。

用 AUTOLISP 编辑的程序可以定义变量,对数据进行处理和作图,并可自定义函数。下面给出的是一段用 AUTOLISP 编写的绘制凸缘模柄的程序。

```
(defun drshank (dd D H hh dd1 D1 dd3 dd2 hh1);; 定义画模柄函数
  (Command " Layer" " a " " 0" "" )
  (setq sp0 (list 200 200));; 设置图形原点
  ;;; 下面给外轮廓各结点赋值
  (setq sp1 (list (+ (- (car sp0) (/D 2)) (* 2 (cos (/pi 4)))) (cadr sp0)))
  (setq sp2 (list (- (car sp0) (/D 2)) (+ (cadr sp1) (* 2 (sin (/pi 4))))))
  (setq sp3 (list (car sp2) (- (+ (cadr sp1) hh) (* 2 (sin (/pi 4))))))
  (setq sp4 (list (car sp1) (+ (cadr sp3) (* 2 (sin (/pi 4))))))
  (setq sp5 (list (- (- (car sp0) (/ dd 2)) 1) (cadr sp4)))
  (setq sp6 (list (- (car sp0) (/ dd 2)) (+ (cadr sp5) 1)))
  (setq sp7 (list (car sp6) (- (+ (cadr sp0) H) (* 2 (sin (/ pi 4))))))
  (setq sp8 (list (+ (car sp7) (* 2 (cos (/ pi 4)))) (+ (cadr sp0) H)))
  (setq sp9 (list (car sp0) (cadr sp8)))
  (setq sp10 (list (car sp0) (cadr sp7)))
  (setq sp11 (list (car sp0) (cadr sp4)))
  (setq sp12 (list (car sp0) (cadr sp3)))
  (setq sp13 (list (car sp0) (cadr sp2)))
  (command " linetype" " s" " continuous" "");; 设置线型为实线
  (Command " line" sp0 sp1 sp2 sp3 sp4 sp5 "");; 画外轮廓
  (Command " arc " sp5 " e" sp6 " r" " 1")
  (Command " line" sp6 sp7 sp8 sp9 "")
  (Command " line" sp7 sp10 "")
  (Command " line" sp5 sp11 "")
  (Command " line" sp3 sp12 "")
```

```

(Command" line" sp2 sp13"")
(setq sp16 (list (-- (- (car sp0) (/ dd1 2)) (cos (/ pi 4))) (cadr sp9)))
(setq sp17 (list (- (car sp0) (/ dd1 2)) (- (cadr sp16) (sin (/ pi 4))))))
(setq sp18 (list (car sp17) (cadr sp0)))
(setq sp19 (list (car sp0) (- (cadr sp16) (sin (/ pi 4)))))
(command" linetype" s" dashed"");;; 设置线型为虚线
(Command" line" sp16 sp17 sp18"") ;;; 画中心孔
(Command" line" sp17 sp19"")
(setq sp14 (list (car sp0) (- (cadr sp0) 5)))
(setq sp15 (list (car sp0) (+ (cadr sp9) 5)))
(command" linetype" s" center"");;; 设置线型为点划线
(Command" line" sp14 sp15"") ;;; 画中心线
(setq w1 (list (- (car sp2) 1) (- (cadr sp0) 1)))
(setq w2 (list (+ (car sp9) 1) (+ (cadr sp9) 1)))
(setq x1 100 y1 100 x2 300 y2 500)
(command" zoom" w" (list x1 y1) (list x2 y2))
(Command" mirror" w" w1 w2" sp14 sp15"");;; 镜像外轮廓的右边
;;; 下面给台阶孔的各结点赋值
(setq sp1 (list (- (- (car sp0) (/ D1 2)) (/ dd3 2)) (cadr sp0)))
(setq sp2 (list (car sp1) (+ (cadr sp0) (-hh hh1))))
(setq sp3 (list (- (- (car sp0) (/ D1 2)) (/ dd2 2)) (cadr sp2)))
(setq sp4 (list (car sp3) (+ (cadr sp0) hh)))
(setq sp5 (list (- (car sp0) (/ D1 2)) (cadr sp4)))
(setq sp6 (list (- (car sp0) (/ D1 2)) (cadr sp2)))
(setq sp7 (list (- (car sp0) (/ D1 2)) (cadr sp1)))
(setq sp8 (list (- (car sp0) (/ D1 2)) (- (cadr sp7) 3)))
(setq sp9 (list (- (car sp0) (/ D1 2)) (+ (cadr sp5) 3)))
(command" linetype" s" dashed"");;; 设置线型为虚线
(Command" line" sp1 sp2"") ;;; 画台阶孔
(Command" line" sp3 sp4"")
(Command" line" sp1 sp7"")
(Command" line" sp3 sp6"")
(Command" line" sp4 sp5"")
(setq w1 (list (car sp9) (cadr sp1)))
(setq w2 sp5)
(Command" mirror" w" w1 w2" sp8 sp9"");;; 镜像台阶孔的右边
(command" linetype" s" center"")
(setq spc (200 100)) ;;; 设置俯视图的中心点
(command" linetype" s" continuous"");;; 设置线型为实线

```

```

(command" circle" spc (/ dd 2.0)) ;;; 画俯视图
(command" circle" spc (- (/ dd 2.0) 2))
(command" circle" spc (/ dd1 2.0))
(command" circle" spc (- (/ dd1 2.0) 1))
(command" circle" spc (/ D 2.0))
(command" circle" spc (- (/ d 2.0) 2))
(command" circle" (list (car spc) (+ (cadr spc) (/ D1 2))) (/ dd2 2))
(command" circle" (list (car spc) (+ (cadr spc) (/ D1 2))) (/ dd3 2))
(command" circle" (list (car spc) (- (cadr spc) (/ D1 2))) (/ dd2 2))
(command" circle" (list (car spc) (- (cadr spc) (/D1 2))) (/ dd3 2))
(command" circle" (list (+ (car spc) (/D1 2) (cadr spc)) (/ dd2 2))
(command" circle" (list (+ (car spc) (/D1 2) (cadr spc)) (/ dd3 2))
(command" circle" (list (- (car spc) (/D1 2) (cadr spc)) (/ dd2 2))
(command" circle" (list (- (car spc) (/D1 2) (cadr spc)) (/ dd3 2))
(command" linetype"" s"" center""")

```

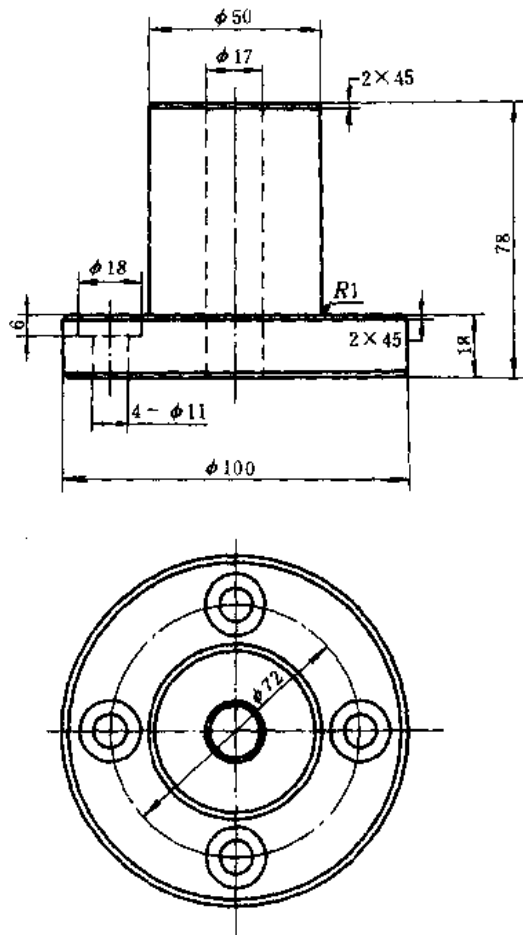


图 6-8 用 AUTO LISP 程序绘图

```

(command" line" (list (+ (car spc) (/D 2) 5) (cadr spc))
                (list (- (car spc) (/D 2) 5) (cadr spc))"")
(command" line" (list (car spc) (+ (cadr spc) (/D 2) 5))
                (list (car spc) (- (cadr spc) (/D 2) 5))"")
(command" circle" spc (/D1 2))
:                                     ;;; 尺寸标注略
(command" zoom" " e")

```

该函数的参数为凸缘模柄的尺寸值，在进行模具设计时，先求出模柄的参数值。然后调用该函数就可以画出凸缘模柄图。图 6-8 是用该函数画出的模柄直径为 50mm 的带凸缘模柄图。采用这种方式，可以编写绘制模具零件图和装配图的程序，其中包括标注尺寸、形位公差和加文字说明等。

关于 Auto CAD 绘图软件在模具结构设计和模具图绘制中的应用，第八章还要结合实例作进一步叙述。

## 习 题

1. 论述平台式绘图机和卷筒式绘图机的工作原理，试比较两者各有什么优缺点？
2. 绘图系统由哪几部分组成？简述各部分的作用。
3. 常用的绘图软件分为哪几类？简单论述其实现方法。
4. Auto CAD 有哪些基本功能？
5. 用 Auto CAD 设计一张模具图，并在绘图机上绘出。

# 第七章 数控加工原理与程序编制

## 第一节 概 述

### 一、数控加工的基本概念

#### 1. 什么是数控加工

数控加工是指在数控机床上进行零件加工的一种工艺方法。这种加工方法与一般加工方法仅在控制方式上有所不同。在普通机床上，为了加工出一定精度要求的零件，需要对机床的各种动作如开车、停车、进给、主轴变速等进行控制，既要控制机床各种动作的先后次序，又要控制机床各运动部件的位移量，而且开车、停车、进给、主轴变速等等操作都是由人工直接控制的。在自动机床和仿形机床中，上述的操作和运动参数是通过凸轮、靠模、挡块等装置以模拟量的形式来设定的。它们虽能加工比较复杂的零件，有一定的灵活性和通用性，但是零件的加工精度受凸轮、靠模制造精度的影响，工序准备时间也长。数控机床则是利用记录在穿孔纸带或其它控制介质上的数字指令来操纵机床的各种动作的。工件的加工内容、尺寸和操作步骤等用数字代码表示，通过纸带（或其它载体）输入到机床的数控装置或系统中，由数控装置或系统加以运算处理后，转换成各种信号，控制机床动作，自动加工出工件来。

因此，数控加工实质上就是由数控装置或系统代替人操纵机床进行机械零件加工的一种自动化加工方法。所用的机床设备称为数字控制机床，简称数控机床或NC机床。机床数控系统则是能自动阅读输入载体（记载零件加工程序的介质，如穿孔纸带）上事先给定的数字代码，将其译码，并使机床动作和加工零件的一种控制系统。

数控机床具有广泛的适应性，加工对象改变时只需要改变输入的程序指令；加工性能比一般自动机床高，可以精确加工复杂型面，因而适合于加工中小批量、改型频繁、精度要求高、形状又较复杂的工件，并能获得良好的经济效果。

#### 2. 工件轮廓的生成方法

数控机床的执行部件，如工作台或刀架通常只能沿互相垂直的坐标方向作直线进给，因此当被加工工件上的轮廓为曲线轮廓或为与执行部件移动方向不一致的直线轮廓时，此工件轮廓就只能用沿工作台或刀架运动方向的细分线段来逼近代替（图7-1）。根据零件轮廓上已知的

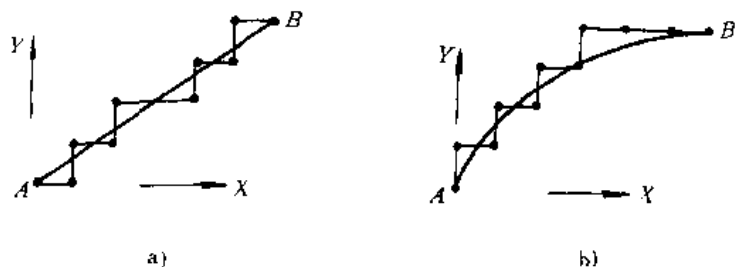


图 7-1 工件轮廓用细分线段逼近

a) 直线的逼近 b) 圆弧的逼近

的起、终点  $A$ 、 $B$  的坐标，求出各细分点的坐标值，作为控制机床执行部件运动的依据，这称为插补运算，由数控系统的插补器或插补软件实现。

具体加工时，数控系统根据插补运算结果，分别沿各细分线段的方向发出相应的指令脉冲，指挥机床驱动系统控制工作台或刀架按细分线段的方向和长度作步进式进给移动。例如，要得到图 7-1a 所示斜率的直线，一定要按 X、Y、X、Y、X、X、Y、X、Y、X 的顺序分配脉冲。

每一单位细分线段的长度为一脉冲当量。所谓脉冲当量就是数控装置每发出一个脉冲时，机床执行部件的位移量。脉冲当量越小，线段分得越细，就越逼近理想的轮廓，工件轮廓的加工精度也就越高。一般脉冲当量定为 0.01~0.005mm。

具有沿直线分配脉冲功能的插补方式叫做直线插补。具有沿圆弧分配脉冲功能的插补方式叫做圆弧插补。目前生产中使用的数控机床，其数控系统大多数都具有直线（图 7-1a）和圆弧图 7-1b）两种插补功能，有些数控系统还具有抛物线和其他高次曲线的插补功能。

具有直线和圆弧插补功能的数控机床，在加工直线时，纸带上只需给出直线的起、终点的坐标信息；在加工圆弧时，纸带上只需给出圆弧起点和终点的坐标以及圆心坐标或半径，机床数控系统就能自动进行插补运算，分配指令脉冲，控制机床按规定的直线或圆弧加工出所要求的工件轮廓表面。

### 3. 数控加工作业过程

图 7-2 为用数控机床加工零件作业过程的示意图，通常由下述几个方面的内容组成：

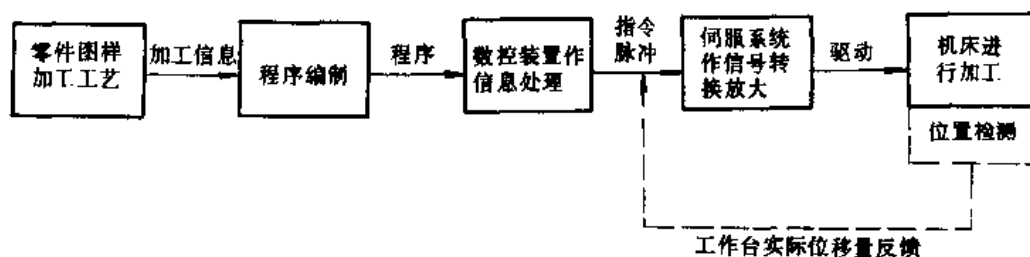


图 7-2 数控加工的作业过程

1) 根据被加工零件的工序图纸编写该零件的加工程序，包括根据加工要求把加工过程分成若干个程序段；确定各程序段的加工控制指令；计算刀具运动轨迹的坐标数据；按加工过程编排各指令以及按规定的自动控制语言和格式编写程序单。

2) 将程序单全部加工程序的信息记录在信息载体上。

3) 通过输入装置将程序输入数控系统。

4) 数控系统对输入的信息进行计算处理，根据处理结果向机床各坐标的驱动伺服系统分配进给脉冲，并发出必要的动作信号。

5) 伺服系统将进给脉冲转换放大，驱动机床执行件按要求的轨迹运动，并配以其它机床动作实现零件的加工。

### 4. 数控加工中的几个重要术语

(1) 数控机床的坐标轴与运动方向 为了正确地控制数控机床的运动和进行程序编制，有关标准（如 JB3051—82）对机床坐标轴及运动方向作出了如下规定：

1) 一个直线进给运动或一个圆周进给运动定义一个坐标轴。不论机床的具体结构是工件



静止、刀具运动，还是工件运动、刀具静止，一律假定工件不动，用刀具相对于工件作进给运动的方向确定坐标轴正向。

2) 机床的直线进给运动的直角坐标系用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示，称为基本坐标系。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标轴的相互关系用右手定则决定，如图 7-3a) 所示。通常取  $Z$  轴平行于机床的主轴， $Z$  轴的正方向是使刀具远离工件的方向。 $X$  轴取为水平且平行于工件的装夹面。在工件旋转的机床上，如车床、磨床等， $X$  轴的方向是在工件的径向并平行于横向拖板，刀具离开工件旋转中心的方向是  $X$  轴的正方向。在刀具旋转的机床上，如铣床、钻床、镗床等，若  $Z$  轴是水平的，则从刀具（主轴）向工件看时， $X$  轴的正方向指向右边。如果  $Z$  轴是垂直的，对于单立柱机床，当从主轴向立柱看时， $X$  轴的正方向指向右边；对于双立柱机床，当从主轴向左侧立柱看时， $X$  轴的正方向指向右边（见图 7-4）。

3) 围绕  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴旋转的圆周进给坐标轴分别用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  表示，其正向按右手螺旋定则确定（图 7-3b）。

4) 如果在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  主要直线运动之外，另有轴线平行于它们的坐标系，可命名为  $U$ 、 $V$ 、 $W$  轴，称为第二坐标系。再增加的第三坐标系用  $P$ 、 $Q$ 、 $R$  表示。同样， $A$ 、 $B$ 、 $C$  以外的转轴可命名为  $D$  或  $E$  等。

(2) 数控机床的坐标数与联动轴数 对于一台数控机床来说，所谓坐标数乃是指有几个进给运动采用了数字控制。例如图 7-5a 所示的数控车床，其  $X$  和  $Z$  方向的进给运动采用了数字控制，所以它是一台两坐标数控车床；又例如图 7-5b 所示的数控铣床，其  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的进给运动都能进行数控，故它就是一台三坐标数控铣床。有些数控机床的运动部件较多，在同一坐标轴方向上会有两个或更多的进给运动是数控的，所以还有四坐标、五坐标、甚至更多坐标的数控机床。

要注意的是，数控机床的坐标数不要与“两坐标加工”、“三坐标加工”相混淆。图 7-5b) 是一台三坐标数控铣床，若机床数控装置只能控制任意两坐标联动，则只能实现两坐标加工；若数控装置能控制三个坐标联动，则能实现三坐标加工。

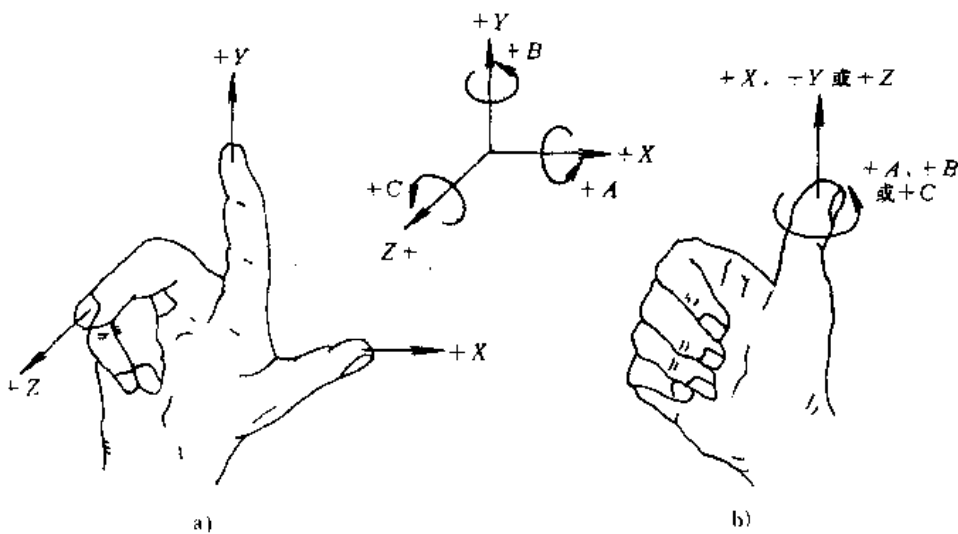


图 7-3 数控机床坐标和运动方向命名

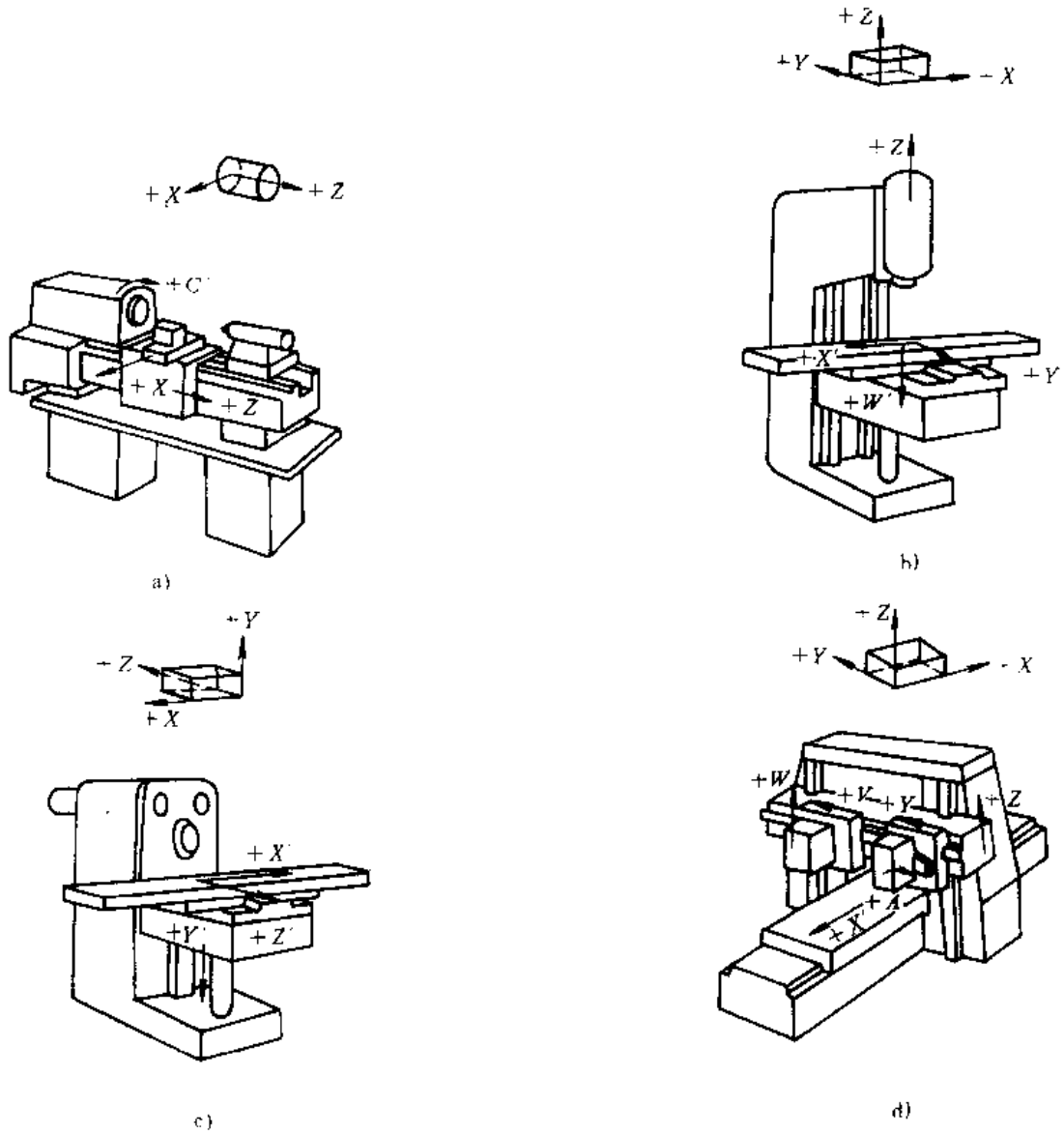


图 7-4 几种数控机床的坐标系

a) 普通数控车床 b) 数控立式升降台铣床 c) 数控卧式升降台铣床 d) 数控龙门式轮廓铣床

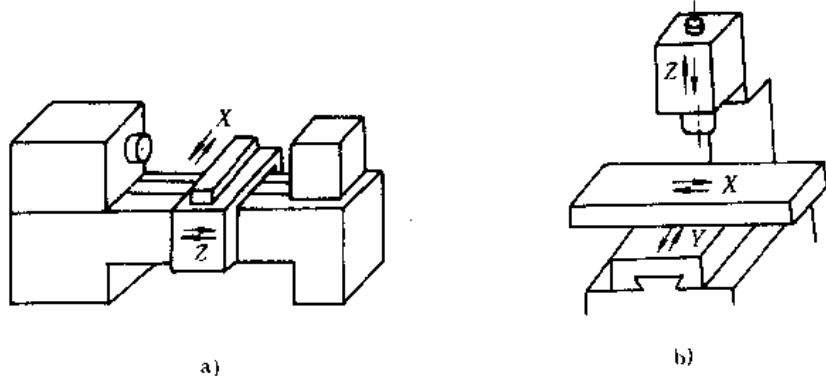


图 7-5 两坐标数控车床和三坐标数控铣床

(3) 机床坐标系与工件坐标系 机床坐标系是机床上固有的坐标系。其固定的坐标原点(也称机床原点),可用机床的坐标轴返回各自的原点(又称零点)以后,各坐标轴部件上的基准线和基准面之间的距离来确定。如立式数控铣床的机床原点为 $X$ 、 $Y$ 轴返回零点后主轴中心线与工作台面的交点,可由主轴中心线至工作台的两个侧面的给定距离来测定。

工件坐标系是编程人员在编程时使用的,由编程人员以工件图样上的某一固定点为原点(也称工件原点)所建立的坐标系。编程尺寸都按工件坐标系中的尺寸确定。在加工时,工件随夹具在机床上安装后,需测量工件原点与机床原点间的距离,这个距离称为工件原点偏置。

(4) 绝对坐标与相对坐标 数控编程时,工件上各加工点的坐标可用以下两种方式来描述:

1) 相对方式(或增量方式):其特点是处于坐标系中的各个点的位置,都是以该点的坐标与相邻点坐标之差表示。此方式表示工件上的尺寸或距离(如孔间坐标距离)比较直观,便于手工编程中的尺寸检查。但当改变工件上某一点的坐标值时,将影响相邻点的增量坐标值。

2) 绝对方式:其特点是处于坐标系中的每一个点的位置,都是以该点对坐标原点的坐标来表示。因此当改变工件上某一尺寸的坐标时,不会影响其它尺寸的坐标值。

例如在图 7-6 中的 I、II 两点,若以绝对坐标计,则  $X_I = 30, Y_I = 35; X_{II} = 12, Y_{II} = 15$ 。

若以相对坐标计,则 II 点的坐标是在以 I 点为原点建立起来的坐标系内计量的,所以 II 点相对 I 点的相对坐标为  $X_{II} = -18, Y_{II} = -20$ 。

目前的数控机床有的采用的是绝对坐标系,有的采用的是相对系统,也有的是两者兼有。编程时,应根据具体机床的坐标系类型,从编程方便(如根据图纸尺寸的标注方式)及加工精度要求来考虑选用何种点坐标描述方式。

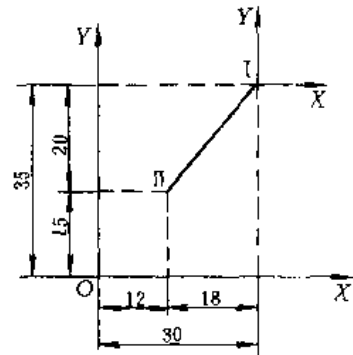


图 7-6 点的坐标的描述方式

## 二、数控机床的组成、分类及发展

### 1. 数控机床的组成

如图 7-7 所示,数控机床由以下几个部分组成。

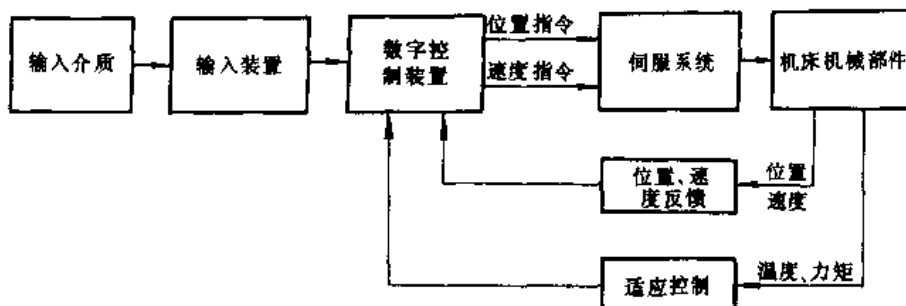


图 7-7 数控机床的组成

(1) 输入介质 采用数控机床加工零件时,应首先将加工一个零件所必需的全部信息(如零件在机床上的装夹位置,零件加工的工艺路线或加工顺序,机床进给运动的方向、速度和位移大小,主运动的启、停、换向及变速,以及其它诸如刀具的选择、交换,工件的夹紧、松

开、冷却、润滑的启、停等)用标准的数控代码,按规定的方法和格式,编制成零件的数控程序并存放一种便于输入给数控装置的信息载体上。这种信息载体称为输入介质,它可以是穿孔纸带、录音磁卡或软磁盘等。输入介质是将人的操作意图转达给数控机床的中间媒介。

(2) 输入装置 它的作用是将输入介质上的数控代码变成相应的电脉冲信号,传送并存入数控装置内。根据数控程序存储介质的不同,输入装置可以是光电读带机、录音机或软盘驱动器。有些数控机床,不用任何程序存储载体,而是将数控程序单的内容通过数控装置上的键盘,用手工方式输入,或者将数控程序由编程计算机用通讯方式传送到数控装置。

(3) 数控装置 数控装置是数控机床的中枢,它接受输入装置送来的脉冲信号,经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算及逻辑处理后,输出各种信号和指令,控制机床的各个部分进行规定的、有序的动作。

(4) 伺服系统 伺服系统由伺服电路、伺服驱动装置、机械传动机构及执行部件组成。它的作用是接受数控系统发出的进给速度和位移指令信号,由伺服电路作一定的转换和放大后,经伺服驱动装置(交流、直流伺服电机,功率步进电机,电液脉冲马达等)和机械传动机构,驱动机床的工作台、主轴头架等执行部件实现工作进给和快速运动。数控机床的进给伺服系统与一般机床的进给系统有本质上的差别,它能根据指令信号精确地控制执行部件的运动速度与位置,以及几个执行部件按一定规律运动所合成的运动轨迹。因此,伺服系统的性能在很大程度上决定了数控机床的加工精度、加工表面质量和生产效率。

(5) 反馈系统 反馈系统包括位置、速度反馈回路和适应控制反馈回路两个部分。

位置、速度反馈回路的作用是将机床的实际位置、速度参数检测出来,转变成电信号,输送给数控装置,使数控装置能够校核机床的实际位置及实际速度是否与指令一致,如果不一致则由数控系统发出指令进行纠正。

如果数控机床配备了适应控制回路,则可在切削过程中随时检测某些状态参数(如切削力、扭矩、功率、温度、振动、热变形等),并能根据预定的评价指标(如最大生产率、最低加工成本、最好加工质量等)或约束条件(如恒切削力、恒切削温度、恒切削功率等),及时自动修正机床的输入参数(如切削速度、进给量、切削深度等),从而使切削过程达到最佳状态,以获得最优的切削效益。适应控制目前仅用于高效率 and 加工精度较高的数控机床,一般的数控机床还较少采用。

(6) 机床的机械部件 数控机床的机械部件包括:主运动部件,进给运动执行部件(如工作台、拖板及其传动部件)和床身、立柱等支承部件;此外,还有转位、夹紧、冷却、润滑等辅助装置;对于加工中心类的数控机床,还有存放刀具的刀库,交换刀具的机械手等部件。数控机床机械部件的组成与普通机床相似,但传动结构要求更为简单,应具有更好的刚性与抗振性,特别是相对运动面的摩擦系数要小,传动部件之间的间隙要小,传动和变速系统要便于实现自动化控制。

为了减小反向间隙,机床进给系统的机械传动链应采用滚珠丝杠、静压丝杠和无间隙齿轮副等;为了减小摩擦,提高运动的平稳性,机床应采用塑料减摩导轨、滚动导轨或静压导轨;为了简化机床的传动机构,不用或少用齿轮传动和齿轮变速,应采用宽调速的进给伺服电动机和宽调速的主轴电动机;机床布局应便于排屑和工件装卸,有些数控机床采用了自动排屑器和自动工件交换装置。

## 2. 数控机床的分类

数控机床的种类很多，分类方法不一。根据数控机床的功能和组成，可以从如下几个不同的角度进行分类：

### (1) 按数控机床的加工功能不同分类

1) 点位控制数控机床：点位控制机床只控制刀具或工作台从一点移至另一点的准确定位，然后进行定点加工，而点与点之间的路径不需控制。但是为了简化机床控制，一般使刀具或工件沿机床的坐标轴运动，而且在刀具或工件运动的过程中不进行切削。这类机床主要有数控钻床、数控冲床和数控镗床。机床有三个坐标轴，其中两个轴控制在加工平面内的坐标位置，另一个坐标轴控制钻镗切削或冲压运动，为了提高生产效率和保证定位精度，机床控制系统要能实现快速定位以减少空行程时间，接近定位点时要降低速度，以减少运动部件因惯性过大所引起的定位误差。

2) 直线控制数控机床：直线控制数控机床除控制直线轨迹的起点和终点的准确定位外，还要保证被控制的两点间的位移轨迹是平行于某一坐标轴的直线，并且在直线位移过程中按需要的进给速度进行切削。直线控制的数控车床和数控磨床，只有两个坐标轴，可用于阶梯轴的车削和磨削加工。直线控制的数控铣床，有三个坐标轴，可用于平面铣削加工。

3) 轮廓控制数控机床：这类机床又称连续轨迹控制或多坐标联动数控机床。机床有几个坐标轴，数控装置能够同时连续控制两个或两个以上坐标方向的联合运动。为了使刀具按规定的轨迹加工工件的曲线轮廓，数控装置具有插补运算的功能，使刀具的运动轨迹以最小的误差逼近规定的轮廓曲线，并协调各坐标轴间的运动速度，以便在切削过程中始终保持规定的进给速度。这类机床的数控装置的功能是最齐全的。能够进行多坐标联动控制的数控机床，一般也能够进行点位和直线控制。除了少数专用的数控机床，如数控钻床、冲床以外，现代的数控机床（如能加工曲面用的数控铣床、数控车床、数控磨床、加工中心和数控电火花线切割机床等）都具有轮廓控制功能。

### (2) 按所用进给伺服系统的不同分类

1) 开环数控机床：开环数控机床采用开环进给伺服系统。通常开环进给伺服系统由步进电机和步进电机驱动线路组成（见图 7-8）。机床数控装置发出的每一脉冲信号使步进电机转动一定的角度，通过滚珠丝杠推动工作台移动一定的距离。它没有位置检测器和反馈线路等环节。这种伺服系统比较简单，工作稳定，容易掌握使用，但精度和速度的提高受到限制。为提高定位精度，常设置有工作台反向间隙补偿和丝杠螺距补偿功能，能补偿机械传动链的误差。

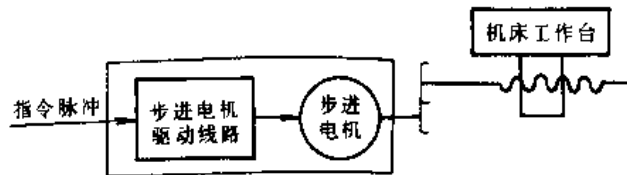


图 7-8 开环进给伺服系统

2) 半闭环数控机床：这种机床的进给伺服系统由比较线路、伺服放大线路、伺服马达、速度检测器和位置检测器组成（图 7-9）。速度检测器和伺服马达同轴刚性连接，随时实测伺服马达的转速；位置检测器装在丝杠或伺服马达的端部，通过测量丝杠的回转角度间接测出工作台的实际位置。机床数控装置是根据来自位置检测器的位置反馈信息和来自速度检测器的速度反馈信息与指令信息相比较的结果来控制位置和速度的。常用的伺服马达有宽调速直流电动机、宽调速交流电动机和电液伺服马达。位置检测器有旋转变压器、光电式脉冲发生器

和圆光栅等。位置检测反馈不包括由伺服马达到工作台之间的机械传动链，所以也要用反向间隙补偿和丝杠螺距误差补偿。因此这种伺服系统称为半闭环进给伺服系统。其所能达到的精度、速度和动态特性优于开环伺服系统，为大多数中小型数控机床所采用。

3) 闭环数控机床：闭环数控机床进给伺服系统的工作原理和组成与半闭环伺服进给系统相同，只是位置检测器安装在工作台上（见图 7-10），可直接测出工作台的实际位置，故反馈精度高于半闭环控制。缺点是系统复杂；机床本身被包含在位置环内，机床固有频率、阻尼和间隙等都可能影响系统的稳定性；调试维修较困难；成本也高。常用于高精度和大型数控机床。闭环伺服系统所用伺服电机与半闭环相同，位置检测器则用长光栅、长感应同步器或长磁栅。

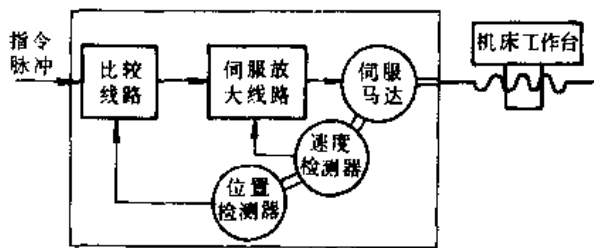


图 7-9 半闭环进给伺服系统

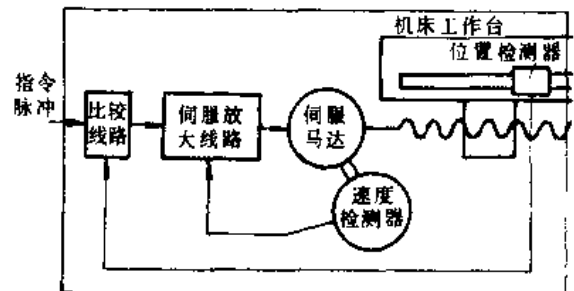


图 7-10 闭环进给伺服系统

### 3. 数控机床的发展

随着微电子、计算机、自动控制、伺服系统与自动检测等技术的迅速发展，表征数控机床水平和决定数控机床功能与特性的数控装置近几十年来也发展异常迅速。50年代初，美国帕森斯公司接受美国空军的委托，在美国麻省理工学院伺服机构研究室的协助下，于1952年试制成功世界上第一台数控铣床。当时的数控装置采用电子管元件，体积庞大，价格昂贵。1959年，制成了晶体管元件和印制电路板，使数控装置进入第二代，体积缩小，成本有所下降。1965年出现了第三代采用集成电路的数控装置，不仅体积小，功能消耗少，且可靠性提高，价格进一步下降，促进了数控机床品种和产量的发展。60年代末，先后出现了由一台计算机直接控制多台机床的直接数控系统（direct numerical control，简称DNC），又称群控系统，以及采用小型计算机控制的计算机数控系统（computer numerical control，简称CNC），使数控装置进入了以小型计算机化为特征的第四代。1974年研制成功使用微处理器和半导体存储器的微型计算机数控装置（micro computer numerical control，简称MNC），这是第五代。第五代与第三代相比，数控装置的功能增加了1倍，而体积则缩小为1/20，价格降低了3/4，可靠性也有了极大提高。

将计算机作为控制单元的数控系统称为计算机数控系统。计算机数控系统的硬件电路是由小型或微型计算机再加上通用或专用的大规模集成电路制成，数控机床的主要功能几乎全部由系统软件来实现，不同功能的机床其系统软件也不同。修改或增减系统功能时，不需变动硬件电路，只需改变系统软件，因此具有较高的灵活性。同时由于硬件电路基本上是通用的，这就有利于大量生产，提高质量和可靠性。所以，目前新研制、生产的数控机床几乎全都采用的是微型计算机数字控制系统。

用计算机对具有数控装置的机床群直接进行联机控制和管理的数控系统称为直接数字控制系统，直接数控又称群控。根据不同的机械加工要求，直接数控系统中所应用的计算机可

以是大型、中型或小型的，控制的机床由几台至几十台。各数控机床的 CNC 系统与 DNC 系统的中央计算机组成计算机网络，实现分级控制管理。直接数字控制技术的发展为柔性制造系统奠定了基础。

80 年代初，随着软件技术的发展，出现了利用键盘和显示屏手动输入数据的人机对话式自动编制程序的数控装置。

目前，数控机床的控制系统日益趋向于小型化和多功能化，并向着具备完善的自诊断功能发展。数控系统本身将普遍地实现自动编程。数控机床的类型将更加多样化，多工序集中加工的数控机床品种越来越多。激光加工等技术将应用在切削加工机床上，从而更加扩大多工序集中的工艺范围。数控机床的自动化程度更加提高，更多的数控机床将配备刀具和工件的自动交换装置和储存装置，并具有多种监控功能，从而形成一个柔性制造单元 (flexible manufacturing cell, 简称 FMC)，更加便于纳入高度自动化的柔性制造系统 (flexible manufacturing system, 简称 FMS) 中。

### 三、数控加工程序编制的内容与步骤

数控加工程序的编制是数控机床使用中最重要的一环。数控机床之所以能加工出各种形状、尺寸和精度的零件，就是因为有程编人员为它编制不同的加工程序。

众所周知，在普通机床上加工零件时，应由工艺员制订零件的加工工艺规程。在工艺规程中规定了所使用的机床和刀具，工件的定位和夹紧方法，表面的加工顺序和加工尺寸，切削用量等内容。操作者按工艺规程所规定的“程序”加工。在数控机床上加工作件时，首先要进行程序编制。程编人员将在分析零件图样的基础上确定被加工零件的全部工艺过程、工艺参数以及工件与刀具相对运动轨迹的尺寸数据，用规定的文字、数字、符号组成代码，按一定的格式编写成加工程序单，并将程序单的信息通过控制介质（如穿孔纸带）输入到机床数控装置上，并由数控装置控制机床进行加工，这时机床操作者的工作只是装卸工件和刀具，安装纸带，调整机床原点，按动开关以及从旁监督机床加工。

我们把从分析零件图样和加工要求开始，到获得机床数字控制系统所需的程序指令或信息载体（如穿孔带、磁带等）的整个工作过程，称为程序编制。

一般来说，用数控机床加工任何一种零件的程序编制，都要包含如下七个方面的工作（参见图 7-11）：

#### 1. 分析零件图样

首先要分析零件的材料、形状、尺寸、精度以及毛坯形状和热处理要求等。通过分析可

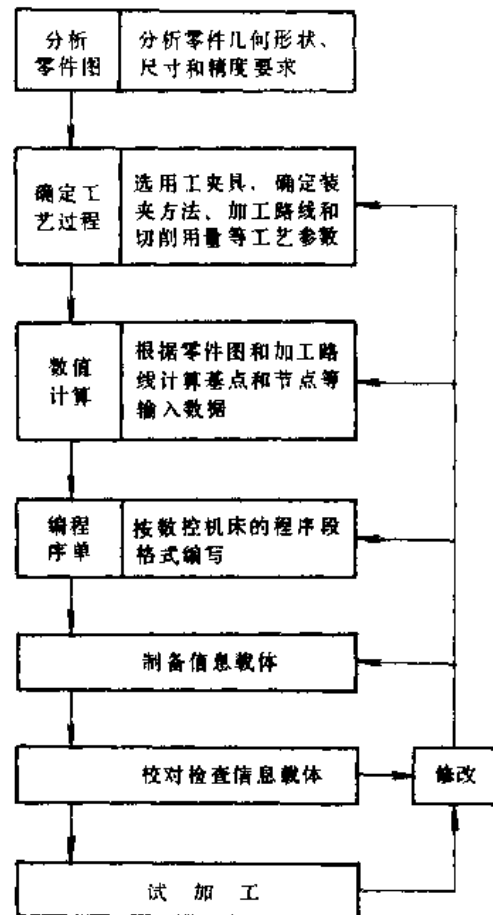


图 7-11 程序编制的内容与步骤

以确定该零件是否适宜在数控机床上加工，或者该零件的哪些工序或哪几个表面应在数控机床上加工。

## 2. 确定数控加工工艺过程

在分析零件图纸的基础上，确定零件的加工方法（如机床、刀具与夹具的选定，工件的定位与夹紧方法的选择）和加工路线（如对刀点、进给路线），并确定切削用量等工艺参数（如进给速度、切削深度或宽度、主轴转速等）。

## 3. 数值计算

根据零件图样和确定的加工路线，计算出数控机床所需的刀位点的坐标数据。

对于点位控制的数控机床，往往无需数值计算。如果零件图样的坐标数据与数控系统要求的输入数据不同，只需进行简单的换算即可。

对于直线、圆弧轮廓零件，若数控系统具有直线及圆弧插补功能和刀具半径补偿功能，数值计算也比较简单，仅需算出零件轮廓上相邻几何元素的交点或切点（如直线的起点及终点，圆弧的起点、终点和圆心）的坐标值，就能满足要求。

当零件形状比较复杂，并与数控系统的插补功能不一致时，需进行较复杂的数值计算。比如，由非圆曲线组成的平面零件，用直线插补功能的数控机床加工时，除了计算组成该零件轮廓相邻几何元素的交点和切点（称为基点）外，还要用直线逼近组成零件轮廓的所有几何元素，而且逼近误差要小于允许值。然后再求出相邻直线的交点（称为节点）。对于这种情况，一般都要借助于计算机完成数值计算工作。

## 4. 编写零件加工程序单

根据加工路线计算出来的刀位点的坐标数据和已确定的切削用量，结合数控系统对输入信息的要求，编写零件加工程序单。

编写程序单时，要了解数控机床加工零件的过程，以便填入必要的工艺指令，如机床启停、切削液的开闭等。

## 5. 制备信息载体

将程序单上的内容记录在信息载体上，作为数控装置的输入信息。若程序简单，也可直接将其通过键盘输入。

## 6. 校对检查信息载体

信息载体的检查方法很多，具体采用何种方法需视本单位的检测手段而定。最通常而又比较有效的方法是将信息载体上的内容输入到机床数控装置进行机床的空运转检查。对于平面轮廓工件，可在机床上用笔代替刀具，坐标纸代替工件进行空运转绘图；对于空间曲面零件，可用木料或塑料工件进行试切，以此检查刀具运动轨迹的正确性。在具有图形显示的机床上，用图形的静态显示或动态显示则更为方便。

## 7. 首件试加工

上述校对检查信息载体的方法只能检查运动轨迹的正确性，无法检查工件的加工误差。首件试切方法不仅可查出程序单和信息载体是否有错，还可知道零件加工精度是否符合要求。当发现错误时，需修改程序单或调整刀具补偿尺寸，直至加工出符合图样要求的零件为止。

## 四、程序编制方法

数控机床的程序编制方法有手工编程和自动编程两种。



手工编程时，整个程序的编制工作是由人工完成的。这就要求编程人员不仅要熟悉数控代码及编程规则，而且还必须具备机械加工工艺知识和数值计算能力。尽管在编制一些较复杂的零件程序时也可用计算机进行数值计算工作，但是从书写算式、记录数据、填写程序单直至穿孔制带、校验程序纸带等都需要大量的人工工作，既繁琐、费时，又容易出错。

自动编程时，编程人员只要根据零件图样的要求，用专门的、人们容易理解的编程语言，编出零件数控加工的语言程序（此程序称为零件源程序），将其输入通用计算机后，通过计算机编程系统对零件源程序的处理，可直接输出零件的数控加工程序或数控纸带。这样，手工编程中大量烦琐的数值计算、编写程序单、制作纸带等工作完全由计算机自动完成，实现了编程自动化。因此自动编程也称作计算机辅助编程。

在计算机辅助编程中，工艺处理阶段的全部或部分工作，以及零件的源程序的编写仍然是由人工完成的。

应该注意的是，用专用语言编写的零件源程序和手工编程所得到的零件加工程序有本质的区别。手工编程的零件加工程序，经制成穿孔纸带，便可控制数控机床进行零件加工；而按零件源程序制作的穿孔纸带，只能作为编程计算机处理的依据，不能控制数控机床。自动编程计算机对源程序处理后，所输出的结果才是所要求的零件加工程序和数控机床可用的数控穿孔纸带。

为了处理源程序，必须为编程计算机配备一套编程系统，也就是通常所说的编译软件。这个编译软件是根据具体的编程语言的要求，并结合具体的计算机由人工编制而成的。在使用时应事先调入计算机的内存。

编程系统对零件源程序的处理，分主信息处理和后置信息处理两个阶段进行（图 7-12）。

在主信息处理阶段，编译程序将零件源程序翻译成计算机能够识别的机器语言并对数控加工时的刀具运动轨迹进行计算，从而得到刀具中心位置数据，简称刀位数据或 CLDATA（Cutter Location Data）。此阶段的处理并不涉及数控系统的具体指令形式和机床的辅助功能，只与计算机的指令系统有关。因此，主信息处理软件对各类数控机床或数控系统都具有通用性。

主信息处理阶段输出的结果——CLDATA 不能直接用在具体的数控机床上，必须通过专门的软件——后置信息处理程序，把 CLDATA 处理成适合于特定数控机床的指令，才能控制数控机床进行加工。因此，主信息处理程序的输出就是后置信息处理程序的输入。对于不同的数控机床来说，数控系统的指令形式不尽相同，机床的辅助功能也不一样，伺服系统的特性也有差别。因此，后置信息处理程序是不通用的，必须根据不同的机床和数控系统来编制。但手工编程中的大量数值计算是在主信息处理阶段，因而后置处理程序相对要简单得多。

计算机计算、处理的结果，通过外部设备可以直接输出数控加工程序单和数控穿孔纸带，也可以画出被加工零件的轮廓图形。

如果源程序有错，计算机能将错误的地址和错误的性质输出，以便进行修改。

显然，对于自动编程，编程人员应熟悉自动编程系统规定的“语言”、“语法”和源程序的书写方法，了解数控机床对程序编制的要求。当编制具体零件的加工程序时，要根据零件图样和要求，选用或设计工夹具，确定工件坐标系与机床坐标系的关系以及进给顺序，然后再编写零件源程序。

编程方法的选择，通常需考虑被加工零件形状的复杂程度、数值计算的难度和工作量的

大小，现有设备条件（计算机、数控语言系统等）以及时间和费用等因素。一般来说，加工形状简单的零件，例如点位加工或直线切削零件，用于手工编程所需的时间和费用与用计算机辅助编程所需的时间和费用相差不大，这时采用手工编程比较合适。当被加工零件形状比较复杂（如复杂凸轮轮廓、叶片曲面、螺旋桨桨叶曲面等），或几何元素虽不复杂，但程序量很大的零件（如一个零件上有数千个孔），或铣削轮廓时，数控装置不具备刀具半径自动偏移功能，而只能按刀具中心轨迹进行编程，这时若不采用机助编程，不仅在编程时间和费用上不合理，有时甚至用手工编程方法无法完成。

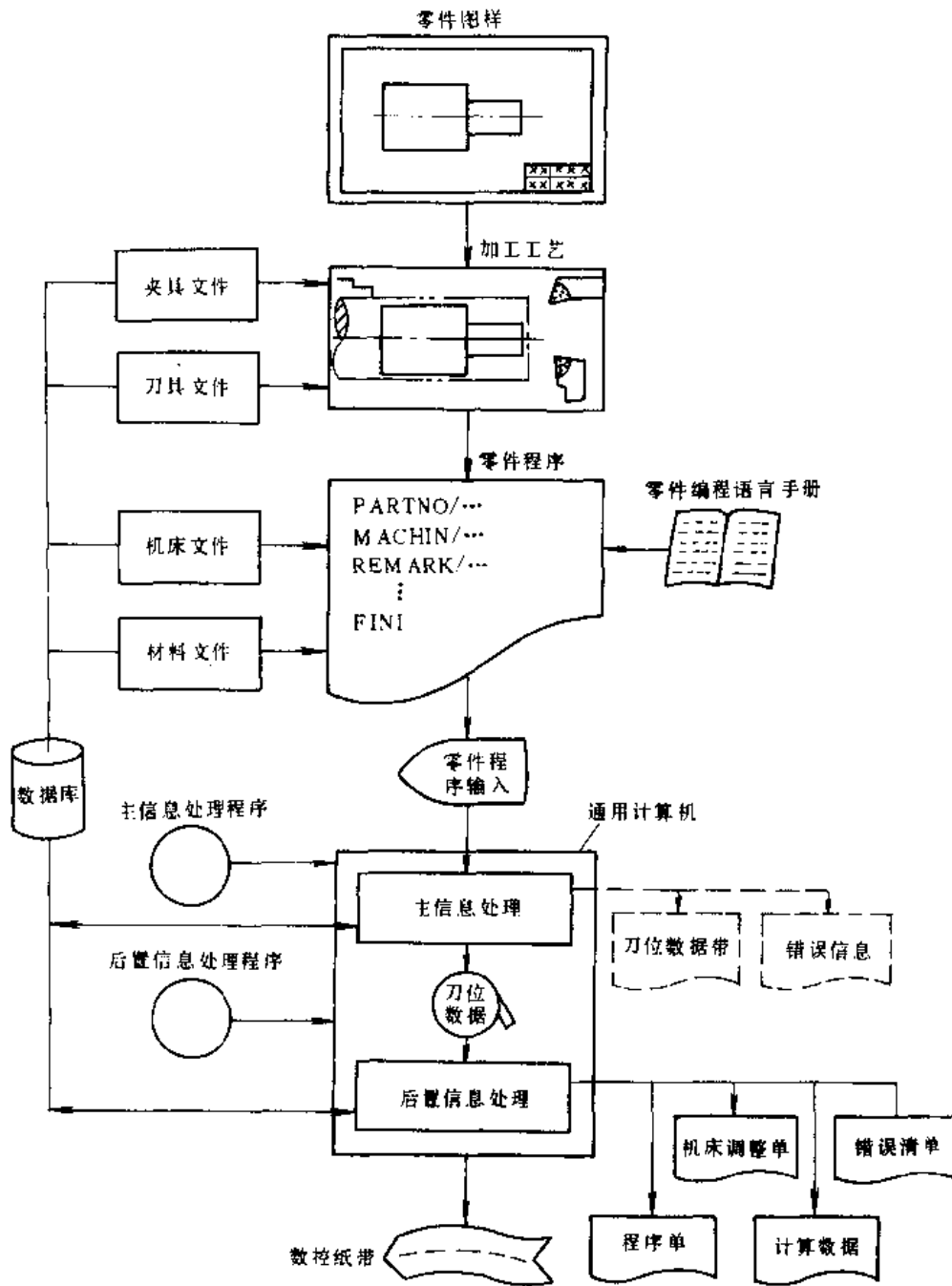


图 7-12 自动编程工作过程

随着数控技术的迅速发展和数控机床使用的日益广泛，对自动编程系统的研究近年来也取得了很大的进展并有如下趋势和特点：

(1) 朝着小型语言系统发展 从自动编程发展的过程来看，自动编程系统基本上朝着大而全和小而专两个方向发展的。目前主要是研制小型语言系统，以适应中小工厂使用微型计算机编程的需要。这种专用自动编程的着眼点不是放在功能齐全上，而是放在如何简化程序和提高效率上。因此这类系统容易掌握，便于使用，且成本较低。

(2) 朝着加工技术处理语言系统发展 早期的自动编程系统（如 APT 系统）只能完成计算机辅助几何参数的计算，后来发展的自动编程系统则愈来愈多地考虑了工艺参数的自动确定问题。如前联邦德国的 EXAPT (Exetended APT) 语言系统就是在 APT 的基础上扩充了工艺处理能力。只要给出零件的最终加工尺寸、精度及材料，计算机就能够自动确定加工顺序、刀具、进给速度、主轴转速等工艺参数，而且能部分解决工艺过程最优化问题。

(3) 朝着新的自动编程技术发展 如 70 年代后期发展起来的会话型自动编程、图形交互编程和数字化技术编程方法已在工业中应用，80 年代开始发展用语音实现人机联系的语音编程方法。

随着自动编程技术的发展，对自动编程系统的功能和应用的方便性也提出了更高的要求。尤其是在处理零件的源程序的过程中，希望操作者能对计算机进行控制，就象与计算机进行对话一样。

会话型自动编程方法是在数控语言自动编程方法的基础上，增加“会话”功能而发展成的。程编人员通过键盘或其它输入装置，将用数控语言书写的零件源程序和会话型自动编程方法专用的会话命令送入计算机，计算机便在显示屏幕上显示出回答与提问。程编员进而用键盘输入回答提问所必要的数据和指令，并对零件源程序进行编辑修改后，就可以获得正确的数控加工程序和穿孔纸带。会话型自动编程系统的特点是：操作者可随时修改零件源程序；随时停止或开始处理过程；随时打印零件加工程序单或某一中间结果；随意给出数控机床的脉冲当量等后置处理参数。例如日本的 FAPT、荷兰的 MITURN 就都是这种会话型自动编程系统。

图形交互编程方法是计算机配备了图形终端和必要的软件后进行编程的一种方法。图形终端由鼠标器、显示屏幕和键盘组成，它既是输入设备，又是输出设备。利用它能实现人与计算机的“实时对话”，发现错误能及时修改。编程时，可在终端屏幕上显示出所要加工的零件图形，用户可利用键盘和鼠标器交互确定进给路径和切削用量，计算机便可按预先存贮的程序计算刀具轨迹，自动编制出零件的加工程序，并输出程序单和穿孔带。这种方法很有发展前途，目前国外许多公司都在研究和用这种方法进行编程。

数字化技术编程方法适用于有模型或实物而无尺寸的零件加工的程序编制，因此也称为实物编程。这种编程方法应具有一台坐标测量机，用于模型的尺寸测量。测量机本身的控制计算机可以对测量数据进行处理，并能输出数控加工所需的程序单和穿孔纸带。

语言编程法是利用人的声音作为输入信息，并与计算机和显示器直接对话，令计算机编出加工程序的一种方法。编程时，程编员只需对着话筒讲出所需的指令即可。编程前，应使系统“熟悉”编程员的声音，即首次使用该系统时，程编员需对着话筒讲该系统约定的各种词汇和数字，让系统记录下来并转换成计算机可以接受的数字指令。采用语音自动编程的主要优点是：便于操作，可免除打字错误，因而提高了编程效率。

(4) 数控编程与 CAD 的连接和集成 随着 CAD 技术的发展及工程数据库研究的日益深入, 为 CAD 与 CAM 的连接和集成奠定了基础。

集成化的 CAD/CAM 就是使设计和制造中的各项功能计算机化, 并且通过一个公用的中心数据库把这些功能联结在一起。其结果是, CAD 系统能让设计人员以图形终端和计算机对话的方式来定义设计轮廓, 进行运动分析、结构分析、力学性能分析和模型试验, 并自动绘制工程图。然后, 生产人员可以用 CAD 提供的零件描述作为 CAM 的起点, 来为零件的生产编制工艺规程 (computer aided process planning, 简称 CAPP), 产生 NC 机床的程序, 指挥机器人运送工件和刀具, 以及用工厂管理系统指挥工厂的生产进度。

集成化的 CAD/CAM 的一个重要优点是, 由于所有的信息都存储在计算机内, 而不是纸上, 数据从一个部门传送到另一个部门变得更迅速、更可靠, 这样就能大大提高生产效率, 减少差错。

数控编程与 CAD 的连接是 CAD/CAM 集成中的重要内容之一。对于集成的 CAD 和数控编程系统, NC 模块成为系统中的一个组成部分。当零件的几何图形利用 CAD 系统以交互的方式设计出来以后, NC 模块即可根据存贮的几何数据、标示的加工轮廓及给定的工艺数据自动生成数控编程语言 (如 APT 语言) 程序, 并通过相应的后置处理程序转换成特定机床数控系统所要求格式的数控程序。

由于被加工的零件图形在屏幕上可任意旋转、放大、缩小, 所以这些操作可以帮助程序员全面考虑加工轮廓, 正确选择刀具并自动生成刀具轨迹。

由于数控程序的执行过程可以在屏幕上显示出来, 因此还可以采用动态模拟的方法对数控程序进行可靠性检验。在动态模拟时, 刀具可以实时地在屏幕上移动, 刀具与工件接触之处, 工件的形状就会按刀具移动的轨迹发生相应变化。由于加工过程中刀具的移动及工件形状的变化采用位移增量法, 例如每隔 30ms 左右就显示一次。因此对观察者来说, 在屏幕上看到的是连续的、逼真的加工过程, 因而很容易发现刀具与工件之间的干涉, 刀具与机床的碰撞, 以及其它错误的程序指令。为了便于观察和了解实际的加工过程, 国外有些机床将屏幕显示和加工过程同步进行。这样, 动态模拟不仅起着监控、检测作用, 也使工作条件大为改善。

## 第二节 数控编程中的工艺处理

数控加工工艺问题与普通加工工艺的处理基本相同, 但又有其特点。因此, 在设计零件的数控加工工艺时, 既要遵循普通加工工艺的基本原则和方法, 又要考虑数控加工本身的特点和零件编程要求。

### 一、工序、工步的划分和顺序安排

在划分零件的数控加工工序、工步和安排工序、工步顺序时, 除了应遵循先粗后精、先面后孔等基本工艺原则外, 还应注意遵循以下各点:

1) 为了减少换刀次数, 减少空程时间, 应按所用刀具来划分工序和工步, 即在一次装夹中, 用一把刀具加工完工件上所有需要用该刀具加工的各个部位后, 再换第二把刀具加工。在自动换刀数控机床中大多采用这种方法来划分工序、工步, 对于手动换刀的数控机床则更应注意这个问题。

2) 对于同轴度要求很高的孔系,应在一次定位后,通过顺序连续换刀来完成该同轴孔系孔的全部加工,然后再加工其它坐标位置的孔,以消除重复定位误差的影响,提高孔系的同轴度,亦即不可按所用刀具来划分工序、工步。

## 二、零件装夹方法的确定与夹具选择

数控机床上被加工零件的装夹方法与一般机床上一样,也要合理地选择定位基准和夹紧方案。为了充分发挥数控机床的效能,在确定零件装夹方法时,更应注意减少装夹次数,亦即要求在一次装夹中尽可能多地完成各个工序工步。为此,要尽量选用便于各个表面都被加工的定位方式。如对于箱体类零件,最好采用一面两销的定位方式,因为这种定位方式有利于刀具对箱体其它各个表面的加工。

数控加工中,为了尽量减少辅助时间,一般使用夹具来加快零件的定位和夹紧过程。数控加工对夹具主要有两方面的要求:一是要保证夹具本身在机床上安装准确;二是要便于协调零件和机床坐标系的尺寸关系,目的是为了保证工件能在正确的位置上按程序加工。夹具的结构大多比较简单,并应尽可能选用由通用元件拼装的组合可调夹具,以缩短生产准备周期,并获取较好的经济效果。

## 三、对刀点和换刀点的确定

对刀点就是数控加工时刀具相对于工件运动的起点。由于程序也是从这一点开始执行,所以对刀点也称作程序起点或起刀点。编程时应首先考虑对刀点位置的选择。

对刀点可以设在工件上,也可以设在夹具上,但必须与工件的定位基准有一定的坐标关系(如图 7-13 中的  $x_1$  和  $y_1$ ),这样才能确定机床坐标系与工件坐标系之间的关系。

加工精度要求不高时,可直接用工件上或夹具上的某些表面作对刀面;加工精度要求较高时,对刀点应尽量选在零件的设计基准或工艺基准上。如以孔定位的零件,取孔的中心作为对刀点就比较合适。

对刀点的选择应便于坐标值的计算。对于建立了绝对坐标系统的数控机床,对刀点宜选在该坐标系的原点上,或选在距原点为确定值的点上。

对刀点应选择在对刀方便的地方。

对刀时应使对刀点与刀位点重合。所谓刀位点,对于平底立铣刀是指刀具轴线与刀具底面的交点;对于球头铣刀是指球头部分的球心;对于车刀是指刀尖;对于钻头是指钻尖;对于线电极切割机床,则是指线电极轴心与零件面的交点。对刀点找正的准确度直接影响加工精度,找正方法的选择应与零件加工精度要求相适应。目前工厂常用方法是将千分表装在机床主轴上然后转动主轴,以使刀位点与对刀点一致。

加工过程中需换刀时应规定换刀点。换刀点的位置应根据换刀时刀具不得碰伤工件、夹具以及机床的原则而设定。

## 四、进给路径的规划

进给路径是指数控加工过程中刀具(刀位点)相对于被加工零件的运动轨迹。规划进给路径时应遵循的原则是:

1) 保证被加工零件获得良好的加工精度和表面质量;

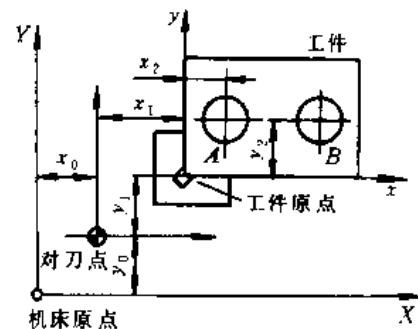


图 7-13 对刀点的设定

- 2) 使数值计算工作简单;
- 3) 使进给路径最短。

对于点位控制的数控机床,一般要求定位精度较高,定位过程尽可能快,而刀具相对于零件的运动路线是无关紧要的。因此在规划进给路径时,对于点位控制的数控机床应使其空程最短。在点位加工中,除了考虑点位间的进给路径以外,还要确定刀具轴向的运动尺寸。其大小主要由被加工零件的孔深来决定,但还应考虑一些辅助尺寸,如图 7-14 所示。图中  $\Delta Z$  为刀具的轴向引入距离,  $\Delta Z$  的大小可按表 7-1 选取。

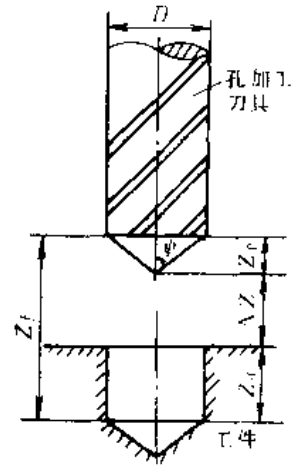


图 7-14 刀具的轴向行程

在数控车床上加工螺纹时,沿螺距方向的 Z 向进给和工件(即主轴)转动必须保持严格的相对运动关系。但考虑到沿 Z 向进给从停止状态达到指令的进给量,机床的进给系统总有一个过渡过程,因此安排 Z 向进给路径时,应使车刀刀位点离待加工螺纹有一定的引入距离  $l_1$  (见图 7-15),以保证刀具起动车进给量达到稳定时才开始切削螺纹。通常取  $l_1 = 2 \sim 5\text{mm}$ ,螺距大与精度要求高时  $l_1$  值取大些。

铣削平面零件时,一般采用立铣刀的侧刃切削。为了保证工件的外形光滑,铣刀的切入和切出点应沿零件周边外延(见图 7-16)。如果铣刀沿法向直接切入零件,将在零件外形上留下明显的刀痕。

表 7-1 刀具引入点距离  $\Delta Z$  (mm)

工 序	零件表面状态	
	已加工表面	毛坯表面
钻 孔	2~3	5~8
镗 孔	3~5	5~8
铰 孔	3~5	5~8
攻螺纹	5~10	5~10

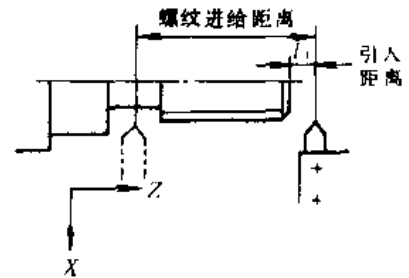


图 7-15 切削螺纹时的引入距离

轮廓加工中应避免进给停顿。因为加工过程中工件、刀具、夹具以及机床等都有少量的弹性变形,进给停顿后切削力减小,刀具将在工件表面留下凹痕。

为了提高加工表面的精度,降低表面粗糙度值,可以采用多次进给的方法,使最后一次进给的加工余量较小(一般以 0.20~0.50mm 为宜)。

对于孔的位置精度要求较高的零件,在精镗孔系时,安排镗孔的路线一定要注意做到各孔的定位方向一致,避免反向间隙的影响。例如图 7-17a 所示的进给路径,在加工孔 N 时, X 的反向间隙将影响 III-N 孔的孔距精度;若按图 b 的进给路径,可使各孔的定位方向一致,从而提高了孔距精度。

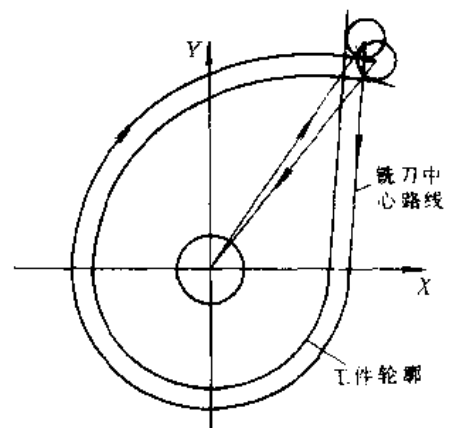


图 7-16 加工外轮廓的刀具路径

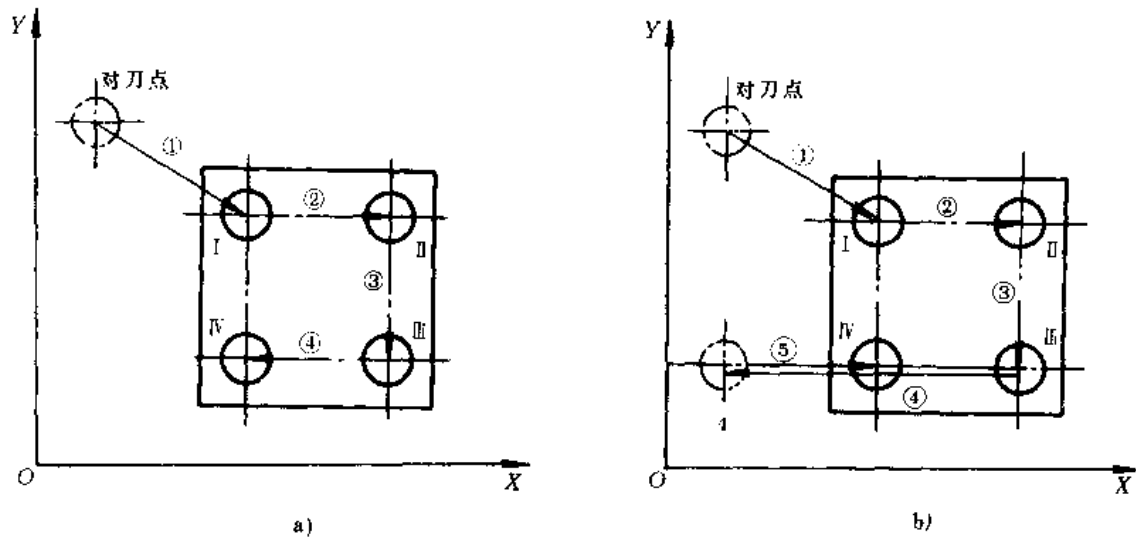


图 7-17 加工孔系的两种进给路径方案

图 7-18 所示为加工内槽的三种进给路径。所谓内槽是指以封闭曲线为边界的平底凹坑。加工内槽应使用平底铣刀，刀具边缘部分的圆角半径应符合内槽的图样要求。进给路径可以是行状的（如图 a 所示），也可以是环状的（如图 b 所示）。两种进给路径的共同点是都能切净内腔中的全部面积，不留死角，不伤轮廓。由于要尽量减少重复进给的搭接量，所以行切法将在每两次进给的起点与终点留下残留高度，即达不到所要求的表面粗糙度。如若按图 c) 所示的方案，即先采用行切法，最后环切一刀，光整轮廓表面，就能获得较理想的效果。从数值计算的角度看，环切法的刀位点计算稍为复杂；从进给路径的长短比较，行切法也略优于环切法。

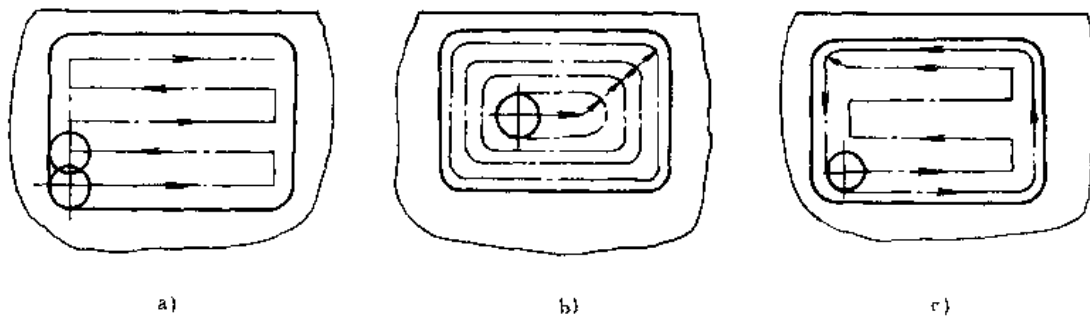


图 7-18 铣切内槽的三种进给路线

铣削平面零件内槽的封闭轮廓时，切入切出不能有外延部分。这时可沿零件轮廓的法线切入或切出，可能时其切入和切出点最好选在零件轮廓两几何元素的交点处。

图 7-19 表示用球头刀加工直纹面时可能采取的两种进给路径。采用图 7-19a 的进给方案，每次沿直线进给，刀位点计算简单，程序段少，而且加工过程符合直纹面的形成，可以准确保证母线的直线度。采用图 7-19b 的进给方案，则符合这类曲面的数据给出情况，因此便于加工后检查型面的准确度；但程序段多。

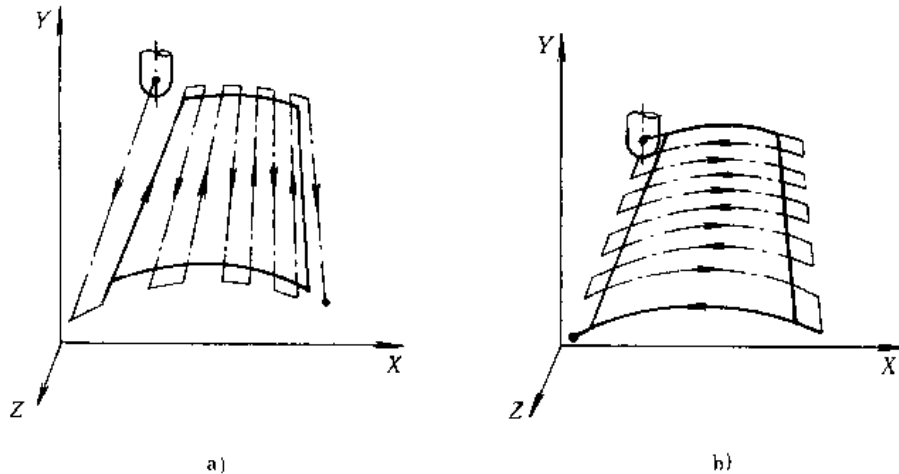


图 7-19 加工直纹曲面的进给路径

## 五、刀具选择

刀具选择是数控加工工艺中的一项重要内容，它不仅影响加工效率，而且直接影响加工质量。

数控加工台时费用高，为提高效益，数控加工对刀具提出了更高的要求，不仅要刚性好、精度高，而且要尺寸稳定、耐用度好、调整方便。

因此，凡加工情况容许选用硬质合金刀具时，就不应选用高速钢刀具。应尽量采用可转位刀片以减少刀具磨损后的更换和预调时间，选用涂层刀具以提高耐磨性。精密镗孔等应选用性能更好更耐磨的金刚石和立方氮化硼刀具。

由于数控机床所加工的零件品种有较大的范围，因而加工中所需刀具的种类、形状和尺寸的规格品种也较多，但应尽量选用标准刀具。

选择刀具时，要规定刀具的结构尺寸，并建立相应的刀具文件供刀具组装、预调及零件加工程序需要时调用和查询。

刀具文件是刀具各种信息记录的集合。完整的刀具信息应包括刀具的种类及其可能的加工范围，刀具的形状及主要尺寸，刀具对加工材料的切削用量，刀具与辅具的组合型式、预调尺寸，刀具的安装、夹紧方法和限制条件，以及刀具夹持部分（刀柄、刀杆等）的信息。刀具文件是编制零件加工程序的重要依据之一，也是刀具准备和管理的必要手段。刀具文件完善与否，直接影响刀具的合理使用、加工工艺乃至加工系统的运行效益。

### 1. 铣刀的选择

1) 粗铣平面时，切削力大，宜选较小直径的铣刀，以减少切削扭矩；精铣时，应选大直径铣刀，尽量能包容工件加工面的宽度，以提高切削效率。

2) 铣平面轮廓时，用平头立铣刀（图 7-20b），以立铣刀侧刃切削。若加工的是内凹轮廓，铣刀半径  $r_f$  应小于内凹轮廓面的最小曲率半径  $\rho$  [一般取  $r_f = (0.8 \sim 0.9) \rho$ ]，以避免干涉；若铣切的是外凸轮廓，铣刀半径应尽量选得大些，以提高刀具的刚度和耐用度。

用立铣刀侧刃铣轮廓时，铣刀螺旋角  $\omega$  应尽可能使  $c = Bz \tan \omega / (\pi D)$ （式中， $B$  为切削宽度或零件高度， $z$  为刀刃数， $D$  为铣刀直径）为整数。这样加工过程中切削面积就不会变化，切削就比较均衡。



3) 铣空间轮廓时,选球头立铣刀(图 7-20a),以立铣刀的球头和侧刃切削。对于像汽车覆盖件模具型面一类的曲面,若采用镶齿盘铣刀(图 7-20c),在五坐标联动的数控机床上加工,不仅效率可提高近 10 倍,而且能获得满意的加工精度。

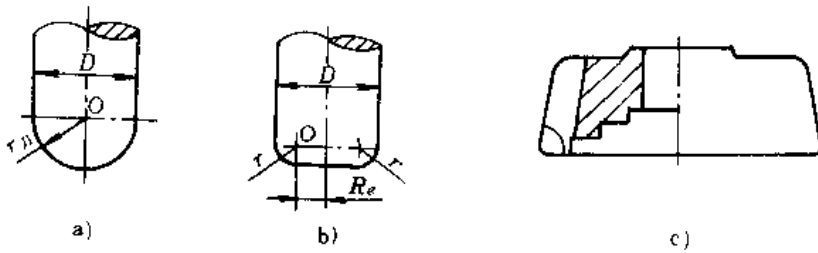


图 7-20 球头刀、平底立铣刀和盘铣刀

## 2. 孔加工刀具的选择

数控加工一般不采用钻模,钻孔刚度差,因此钻孔前应选用大直径钻头或中心钻先铤一个内锥坑或预钻,作为钻头切入时的定心锥面,然后再用钻头钻孔,而且要求孔深与孔径之比最好不要超过 5。钻大孔时应采用刚度较大的硬质合金扁钻,有硬皮时,应采用硬质合金立铣刀先铣去孔口表皮,然后铤锥孔和钻孔。

铤孔采用浮动铤刀,铤前孔口要倒角,铤刀两刀刃对称度要控制在  $0.02\sim 0.05\text{mm}$  之内。

由于镗孔是悬臂加工,为平衡径向力,减轻镗削振动,应采用对称的 2 刃或 2 刃以上的镗刀头进行切削。精镗应采用微调镗刀。

## 六、切削用量的确定

切削用量包括切削深度  $a_p$ 、进给量  $f$  和切削速度  $v$ 。对粗加工、精加工、钻孔、攻螺纹、尖角部位加工等,需要选用不同的切削用量,这些都应编写在程序单内。

确定具体切削工序的切削用量时,是以一定的刀具耐用度为前提的。由金属切削原理可知,对刀具耐用度影响最大的是切削速度  $v$ ,其次是进给量  $f$ ,影响最小的是切削深度  $a_p$ 。因此,从刀具耐用度出发,在选择切削用量时,应首先采用最大的切削深度,再选用大的进给量,然后根据确定的刀具耐用度选择切削速度。

对于数控加工,刀具耐用度至少应大于加工完一个零件,或最少不低于半个工作日。

### 1. 切削深度 $a_p$

主要根据机床、夹具、刀具和工件的刚性决定。在允许的情况下,最好一次切净余量,提高加工效率。有时为了改善加工精度和表面粗糙度,也可以留少量余量 ( $0.2\sim 0.5\text{mm}$ ),最后光加工一次。数控机床的精加工余量可较普通机床的精加工余量小。

### 2. 进给量(进给速度) $f$

应根据零件的加工精度和表面粗糙度要求,以及刀具和工件材料选取。当加工精度要求高时,进给量选小一些,如精铣时可取  $20\sim 50\text{mm}/\text{min}$ ,精车时可取  $0.10\sim 0.20\text{mm}/\text{r}$ 。最大进给量受机床拖动系统性能限制,并与脉冲当量有关。

进给量  $f$  在加工程序中用  $F$  指令(进给速度指令)给定。 $F$  指令有两种表示方法。一种为代码法。即  $F$  后跟两位数字,这些数字不直接表示进给量的大小,而是机床进给速度数列中某种进给速度的编码号;另一种为直接给定法,即  $F$  后跟的数字也就是进给量的大小,例如  $F100$  表示走刀量  $100\text{mm}/\text{min}$ 。这种指定方法较为直观,因此现在大多数数控机床均采用

这种指定方法。

在轮廓加工中,选择进给量时应考虑轮廓拐角处的“超程”或“欠程”问题。例如,加工图 7-21 所示的零件时,铣刀将由 A 点运动到 B 点,再由 B 点运动到 C 点。如果进给速度较高,由于惯性作用,在 B 点可能出现超程现象,将拐角处的金属(图中的阴影部分)多切去一部分,而在加工外型面时,可能在 B 点处留有多余的金属未切去。为了克服这种现象,要选择变化的进给量,即在接近拐角处应适当降低进给量,过拐角后再逐渐升高。

在加工过程中,由于切削力的作用,机床、刀具、工件系统产生变形,可能使刀具运动滞后,从而在拐角处产生“欠程”。欠程现象也可通过选择变化的进给量来克服。

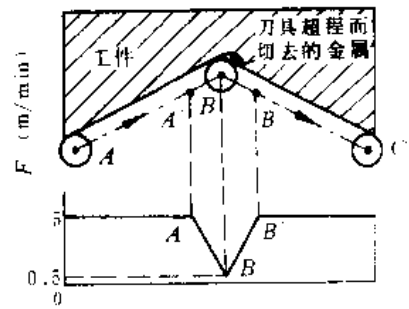


图 7-21 超程误差与控制

### 3. 切削速度 $v$

切削深度  $a_p$ 、进给量  $f$  确定以后,再按照已经选定的刀具耐用度,通过计算或查切削用量手册即可决定切削速度  $v$  (m/min)。进而可计算得到机床主轴转速  $n$  (r/min):

$$n = \frac{1000v}{\pi D}$$

式中  $D$  —— 工件(或刀具)直径 (mm)。

## 七、程编误差及其控制

程序编制中的误差主要由三部分组成:

### 1. 逼近误差

这是用近似计算方法逼近零件轮廓时所产生的误差。例如,当零件轮廓以列表点阵给出,列表点阵用样条曲线或参数曲面等近似方程去拟合时,近似方程所表示的形状与原始零件轮廓之间就有误差,这就是逼近误差。由于在多数情况下无法知道零件轮廓的准确数学表达式,所以通常很难确定逼近误差的大小。

### 2. 插补误差

这是用直线段或圆弧段逼近零件轮廓曲线所产生的误差。减小插补误差的最简单方法是密化插补点,但这会增加程序段数目,增加计算、编程和制备纸带工作量。

### 3. 尺寸圆整误差

这是将计算尺寸换算成机床脉冲当量时由于圆整数据所产生的误差。数控机床能反映的最小位移量是一个脉冲当量,小于一个脉冲当量的数据只能按四舍五入的办法处理,于是产生了误差。一般应控制尺寸圆整误差不超过脉冲当量的一半。

显然,在点位数控加工中,程编误差只包含一项圆整化误差。在轮廓加工中,程编误差主要是插补误差,尺寸圆整误差所占的比例较小。

插补误差相对于零件轮廓的分布形式有三种:即在零件轮廓的外侧,在零件轮廓的内侧,以及在零件轮廓的两侧,分别如图 7-22a、b、c 所示。选择哪种误差分布方式主要取决于零件图样的要求。从计算简单的角度考虑,可以采用图 7-23 所示的误差分布方式。这时节点全在零件的轮廓曲线上,误差分布在曲线的凹向。

数控加工误差中除了程序编制误差外,还有控制系统与拖动系统误差(它们由机床脉冲当量或分辨率的大小、脉冲从数控系统送出的不均匀性、控制系统的动态特性、插补器的形

式与实现插补的算法等因素决定), 零件定位误差、对刀误差、刀具磨损误差以及工艺系统的受力变形、热变形等等。所以, 零件图样给出的公差, 只允许一小部分分配给程编过程中所产生的误差。在生产中常取程编误差等于零件公差的 10%~20%。

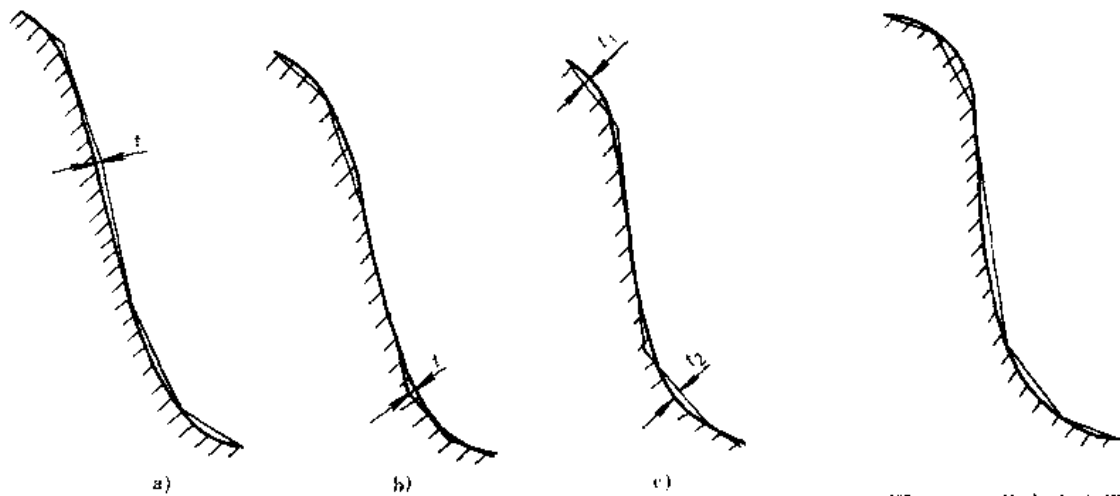


图 7-22 插补误差的三种分布形式

图 7-23 节点全在零件轮廓上的插补误差

### 第三节 数控加工程序的编制

#### 一、零件编程的通用标准

如前所述, 用数控机床加工零件时, 要编制零件加工程序。程序编制的方法有手工编程和计算机辅助编程。程序的编制可在生产准备部门进行, 也可在加工现场或机床上进行。

为了统一和便于交流, 不论采用哪种方法编程, 都必须遵守一定的标准。下面介绍零件编程时必须遵守的一些通用标准。

##### 1. 穿孔带

穿孔带也称控制带, 或简称纸带。它是数控加工中最常用的信息载体。在纸带上用穿孔形式记录了输入数控装置的信息指令。最常用的纸带是八孔穿孔带, 如图 7-24 所示。其中有孔表示“1”, 无孔表示“0”, 第三列和第四列之间的连续小孔称为同步孔, 作为每行信号孔的定位基准, 并产生同步信号。

##### 2. 代码

代码是数控系统传递信息的语言, 一般用一个 8 位二进制数来表示, 在穿孔带上则用一行孔表示。以不同孔位的排列表示各种数字、字母和符号。目前常用的代码有 ISO (International Standard Organization, 国际标准化组织)、EIA (Electronic Industries Association, 美国电子工业协会) 两种, 见表 7-2。ISO 代码是补偶代码, 第 8 列是补偶位; EIA 则是补奇代码, 第 5 列是补奇位。所谓补偶 (或补奇), 即奇偶校验, 是防止纸带穿错、破损或读带错误的措施, 因为一只孔出错的机率最大。当每行孔数要求为偶数 (或奇数) 而错读

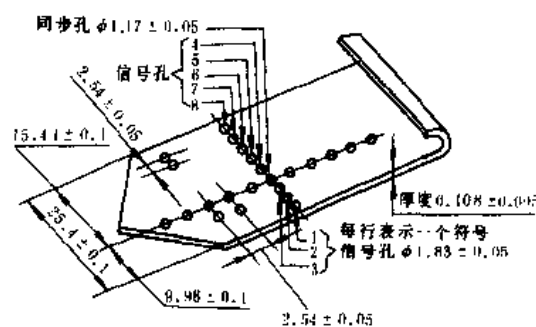


图 7-24 八通道标准穿孔纸带

表 7-2 数控机床用 EIA 和 ISO 代码表

穿孔带代码								符 号	符号含义	
8	7	6	5	4	0	3	2			1
		●			●			●	0	数字 0
					●			●	1	数字 1
					●			●	2	数字 2
			●		●			●	3	数字 3
			●		●			●	4	数字 4
			●		●			●	5	数字 5
			●		●			●	6	数字 6
				●	●			●	7	数字 7
				●	●			●	8	数字 8
				●	●			●	9	数字 9
●	●				●			●	A	绕着 X 轴的转角
●	●				●			●	B	绕着 Y 轴的转角
●	●	●			●			●	C	绕着 Z 轴的转角
●	●				●			●	D	中间停留机能
●	●	●			●			●	E	其它用
●	●	●			●			●	F	进给速度
●	●	●			●			●	G	准备功能
●	●	●			●			●	H	输入 (刀具补偿数)
●	●	●	●		●			●	I	圆弧起点对圆心沿 X 轴坐标
●	●	●	●		●			●	J	圆弧起点对圆心沿 Y 轴坐标
●	●	●	●		●			●	K	圆弧起点对圆心沿 Z 轴坐标
●	●				●			●	L	其它用
●	●	●			●			●	M	辅助功能
●	●				●			●	N	程序号
●	●				●			●	O	不用
●	●	●			●			●	P	其它用
●	●	●	●		●			●	Q	其它用
●	●				●			●	R	平行于 Z 轴的第三坐标
	●	●			●			●	S	主轴转速
	●	●			●			●	T	刀具功能
	●	●			●			●	U	平行于 X 轴的第二坐标
	●	●			●			●	V	平行于 Y 轴的第二坐标
	●	●			●			●	W	平行于 Z 轴的第二坐标
	●	●	●		●			●	X	X 轴方向的主运动
	●	●	●		●			●	Y	Y 轴方向的主运动
	●	●	●		●			●	Z	Z 轴方向的主运动
●	●	●			●			●	:	冒号
●	●	●			●			●	+	加
●	●				●			●	-	减
●	●				●			●	*	乘
	●	●			●			●	/	除 (省略) (跳带)
	●	●	●		●			●	,	分号
	●	●	●		●			●	(	括号开
●	●	●	●		●			●	)	括号闭
●	●	●	●		●			●	%	百分比
					●			●	Stop (ER)	纸带倒带停止
					●			●	Tab	制表 (或分隔符号)
●					●			●	CR (或 EOB)	程序段结束
	●	●	●		●			●	Delete	注销
					●			●	Space	空格

EIA 标准代码

(续)

穿孔带代码								符 号	符号含义	
8	7	6	5	4	0	3	2			1
●		●	●		●			●	0	数字 0
●		●	●		●			●	1	数字 1
●		●	●		●			●	2	数字 2
●		●	●	●	●			●	3	数字 3
●		●	●		●			●	4	数字 4
●		●	●		●			●	5	数字 5
●		●	●		●			●	6	数字 6
●		●	●		●			●	7	数字 7
●		●	●		●			●	8	数字 8
●		●	●		●			●	9	数字 9
	●							●	A	绕着 X 轴的转角
	●							●	B	绕着 Y 轴的转角
	●							●	C	绕着 Z 轴的转角
	●							●	D	中间停留机能
	●							●	E	其它用
	●							●	F	进给速度
	●							●	G	准备功能
	●							●	H	输入 (刀具补偿数)
	●							●	I	圆弧起点对圆心沿 X 轴坐标
	●							●	J	圆弧起点对圆心沿 Y 轴坐标
	●							●	K	圆弧起点对圆心沿 Z 轴坐标
	●							●	L	其它用
	●							●	M	辅助功能
	●							●	N	程序号
	●							●	O	不用
	●							●	P	其它用
	●							●	Q	其它用
	●							●	R	平行于 Z 轴的第三坐标
	●							●	S	主轴转速
	●							●	T	刀具功能
	●							●	U	平行于 X 轴的第二坐标
	●							●	V	平行于 Y 轴的第二坐标
	●							●	W	平行于 Z 轴的第二坐标
	●							●	X	X 轴方向的主运动
	●							●	Y	Y 轴方向的主运动
	●							●	Z	Z 轴方向的主运动
		●						●	:	冒号
		●						●	+	加
		●						●	-	减
		●						●	*	乘
		●						●	/	除 (省略)
		●						●	:	分号
		●						●	=	等号
		●						●	(	括号开
		●						●	)	括号闭
		●						●	\$	单元符号
		●						●	%	百分比
		●						●	Tab	制表 (或分隔符号)
		●						●	CR 或 LF	程序段结束
		●						●	Delete	注销
		●						●	Space	空格

ISO 标准代码

一孔，即变为奇数（或偶数），可以通过奇偶校逻辑线路检查出来。由于通用计算机和电传打字机都采用补偶代码，因此，ISO 代码有较大的通用性。此外，ISO 代码较有规则，如凡数字在第 5 列和第 6 列都有孔，凡字母则在第 7 列都有孔等等。这给判别这些孔码的逻辑设计带来方便。

国际上大都采用 ISO 代码。我国制订的 JB3050—82《数控机床用七单位编码字符》部颁标准与 ISO 编码基本相同。

### 3. 程序格式

程序格式就是关于字符在穿孔带上排列的顺序和含义的规定。每种机床数控系统，都根据其功能要求和编程需要，规定有一定的程序格式。编程时，必须按规定的格式进行，否则，数控系统就无法接受，也无法执行。

(1) 程序的组成 一个完整的零件加工程序由若干个程序段组成；一个程序段由若干个代码字组成；每个代码字则由文字（地址符）和数字（有些数字还带有符号）组成。字母、数字、符号统称字符。例如下例为一个完整的零件加工程序，它由 17 个程序段组成，每个程序段以顺序号字“N”开头，以符号 LF 结束。M02 作为整个程序结束的标志。每个程序段中有若干个代码字，如第 1 程序段就有 8 个代码字。

```
N001 G91 G00 X2700 Y3000 Z15000 M03 LF
N002                Z-14800 LF
:                   :
N017                X-5000 Y-4000 Z14800 M02 LF
```

(2) 地址程序段格式的组成 数控系统是以执行指令的方式进行工作的。每条具体指令相当于程序中的一个字。数控机床为完成某一特定动作所需的全部指令，相当于由各相应的字组成的一个程序段。

所谓程序段格式就是一个程序段中字的排列书写方式和顺序，以及每个字和整个程序段的长度限制和规定。常用的程序段格式有两种，即地址格式和分隔符顺序格式。现代数控机床广泛采用地址程序段格式，其程序段的长度可随字数和字长而变，故又称可变程序段地址程序格式。本节仅介绍地址程序段格式，关于分隔符顺序格将在第五节中说明。

1) 程序段内字的顺序：各字的先后顺序并不严格，但为编程方便起见，一般习惯的排列顺序如下：

N-	G-	X-	Y-	...	F-	S-	T-	M-	LF-
顺序号字	准备功能字	尺寸字			进给功能字	主轴转速功能字	刀具功能字	辅助功能字	程序段结束
程 序 段									

在同一程序段中，X、Y、F、S、T 等字不能重复，但不同组的 G 功能或 M 功能可以多于一个；不需要的字略去；与上一程序段相同的模态（续效）字可以省略。

#### 2) 程序段内各字的说明：

顺序号字 由地址码 N 和后面的若干位数字构成，用来识别程序段的编号。例如，N001、

N010 分别表示是第一程序段和第 10 程序段。

准备功能字 (G 功能字) 由地址码 G 和两位数字构成, 用来描述机床的动作类型, 如 G01 表示直线插补功能, G02 表示顺时针圆弧插补功能。常用的 G 功能见表 7-3。

表 7-3 常用 G 功能代码

代 码	功 能	代 码	功 能
G00	点位控制	G35	螺纹切削, 减螺距
G01	直线插补	G36~G39	保留作控制用
G02	顺时针方向圆弧插补	G40	取消刀具偏移
G03	逆时针方向圆弧插补	G41	刀具左偏
G04	暂停 (延迟)	G42	刀具右偏
G06	抛物线插补	G43	刀具偏置 (+)
G08	加速	G44	刀具偏置 (-)
G09	减速	G60	准确定位
G17	XY 平面选择	G65~G79	保留用于点位系统
G18	ZX 平面选择	G80	取消固定循环
G19	YZ 平面选择	G81~G89	固定循环 #1~#9
G33	螺纹切削, 等螺距	G90	绝对坐标编程
G34	螺纹切削, 增螺距	G91	相对坐标编程

**尺寸字** 尺寸字由地址码、+、-符号和绝对值 (或增量) 的数字构成, 用来表示各坐标的运动尺寸。尺寸字码有 X、Y、Z、U、V、W、P、Q、R、I、J、K、A、B、C 等。坐标尺寸字的正号 “+” 可省略。例如 X100、Y120、Z50 分别表示 X、Y、Z 坐标方向的移动量。

**进给速度功能字** 由地址码 F 和在其后面的若干位数字构成。这个数字的单位可以是 mm/r 或 mm/min, 也有用进给率数 1/min 表示, 取决于每个数控系统所采用的进给速度指定方法。

**主轴转速功能字** 由地址码 S 和其后面的若干位数字构成, 其单位可以是转速 r/min 或切削速度 m/min。

**刀具功能字** 由地址码 T 和若干位数字构成。在自动换刀的数控机床中, 该指令用以选择所需的刀具。刀具功能字中的数字代表刀具的编号。

**辅助功能字 (M 功能字)** 由地址码 M 和两位数字表示。常用的 M 指令见表 7-4。各种

表 7-4 常用 M 功能代码

代 码	功 能	代 码	功 能
M00	程序停机	M14	主轴逆转并开切削液
M01	任选停机	M15	正向 (+) 运动
M02	程序结束	M16	负向 (-) 运动
M03	主轴顺时针方向旋转	M19	主轴定向停止
M04	主轴逆时针方向旋转	M30	纸带终了
M05	主轴停转	M31	旁路互锁
M06	换 刀	M32~M35	恒切削速度
M07	开 2 号切削液	M40~M45	可用于变换齿轮, 否则不用
M08	开 1 号切削液	M50	开 3 号切削液
M09	关闭切削液	M51	开 4 号切削液
M10	夹 紧	M60	换工件
M11	松 开	M68	工件夹紧
M13	主轴顺转并开切削液	M69	工件松开

数控系统的 M 功能并不完全相同。因此，在编程时必须了解所使用的数控系统的 M 功能。

**程序段结束** 在每一程序段结束之后，均应加上程序段结束码。在 ISO 代码中用 LF，在 EIA 代码中用 CR，而在 JB3050—82 中，除了 LF 外，还可用 NL。

## 二、点位、直线控制系统的程序编制

如前所述，数控机床就其控制功能来说，可以分为点位、直线控制和轮廓控制，因此，数控加工程序的类型也就相应区分成点位、直线切削程序编制和连续轨迹程序编制两种。它们的主要不同点在于：点位程序只用于在一个点（孔）上定位，然后完成一种操作（例如钻孔），刀具在各点（孔）之间的移动轨迹无关紧要；而轮廓加工程序的刀具轨迹是由程编人员规定的，应用于连续切削加工。因此，在编制点位控制系统加工程序时，需注意下面几个方面的问题：

(1) **进给路线要短** 虽然点位控制加工对刀具移动轨迹没有什么要求，但是在程序编制时必须保证刀具或工作台从一个位置移至下一个位置时，不致与工件、夹具和机床碰撞，而且进给路线要尽可能短。

(2) **定位要准确** 为此必需提高对刀精度；零件装夹时，应尽量使定位基准与设计基准重合；编程选择坐标指令时，应尽量与图样的尺寸标注方法一致，避免尺寸换算。例如，若图样尺寸为链式标注，编程时宜用增量坐标指令；若图样尺寸为坐标式标注，编程时宜用绝对坐标指令。

(3) **刀具预调** 在钻镗床、加工中心机床等机床上加工零件时，切削尺寸是由程序规定的。为了计算出刀具的行程长度（即程序指令值），编程时必须知道每把刀具的长度尺寸  $Z_r$ 、刀具顶端至工件表面的距离  $Z_s$ 、被加工零件钻削深度  $Z_d$  以及刀具引入量  $\Delta Z_o$  和刀具超出量  $\Delta Z_h$ 。刀具轴向各尺寸关系如图 7-25 所示。其中， $Z_o$  对于每一种机床是已知的一定值，刀具行程长度为  $(\Delta Z_o + Z_d + \Delta Z_h)$ ，而刀具长度尺寸  $Z_r$  需通过刀具预调确定。

图 7-26 为用机械式预调装置进行刀具预调方法的示例。钻头装在刀夹中，刀夹装在刀具预调装置的座孔中，座孔端面 A 相当于图 7-25 中的主轴端面。当精度要求不高时，可用游标高度尺测量出  $Z_r$  值；若精度要求高，则应使用千分表、块规等来测量。

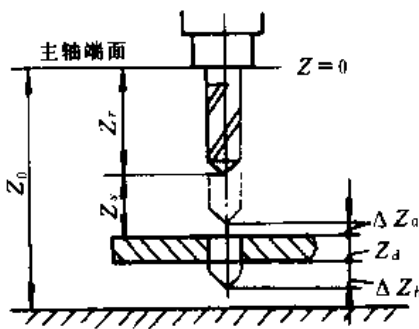


图 7-25 刀具轴向尺寸关系

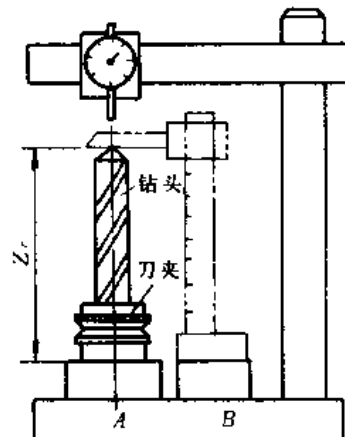


图 7-26 采用机械式预调装置预调刀具

需指出，对于点位加工，被加工的孔径尺寸是由刀具保证的，与控制系统无关，而孔径尺寸精度则取决于机床的控制系统与机械系统的精度以及与程编有关的误差。



图 7-27 是点位加工的程序编制实例。工件要求在  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  点处钻孔，NC 机床的脉冲当量为  $0.01\text{mm}$ ，程序采用增量坐标指令。加工程序列于表 7-5 中。

纸带穿孔时，程序单上空白栏可以不留空。N002 和 N005 中 G 功能栏未填，表示前一程序段 N001 和 N004 中所规定的 G 功能仍有效。N006 中没有指定进给速度，所以 N003 的 F200 仍保持有效。中间插入 G00，此程序段表示实现快速进给而无视 F200 的进给速度。但在 G00 执行完毕后，F200 的功能仍保持不变。

### 三、轮廓控制系统的程序编制

轮廓控制系统又称为连续控制系统。由于它能同时控制机床的几个坐标动作，并能使几个坐标方向的运动之间保持预先确定的关系（如直线、圆弧、平面或空间曲线），因而能把工件加工成某一形状轮廓。

轮廓控制系统的加工程序编制工作最大的困难之处是数学处理比较复杂，而多坐标轮廓编程较之两坐标轮廓编程则更为不易。为简明扼要起见，下面将侧重于铣削平面轮廓零件编程时的数值计算及编程方法的讨论。

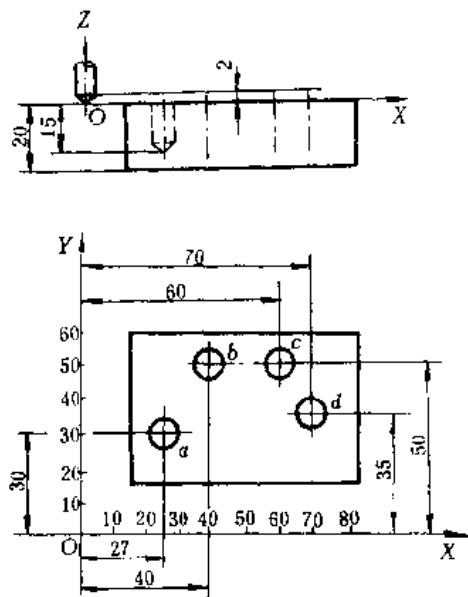


图 7-27 钻孔工件

表 7-5 图 7-27 所示工件的钻孔程序卡

N	G	X	Y	Z	F	M	EOB	说 明
N001	G91G00	X2700	Y3000	Z-15000		M03	LF	快进到 $a$ 点之上 150mm 的点，主轴正转
N002				Z-14800			LF	快进到 $a$ 点之上 2mm 的位置
N003	G01			Z-1700	F-200		LF	以 200mm/min 切削 $a$ 点的孔
N004	G00			Z-1700			LF	快进，工具向上
N005		X1300	Y2000				LF	$b$ 点之上 2mm 快速定位
N006	G01			Z-1700			LF	以 N002 的 F200 在 $b$ 点上钻孔
N007	G00			Z-1700			LF	
N008		X2000					LF	$c$ 点定位
N009	G01			Z-1700			LF	$c$ 点钻孔
N010	G00			Z-1700			LF	
N011		X1000	Y-1500				LF	$d$ 点定位
N012	G01			Z-1700			LF	$d$ 点钻孔
N013	G00			Z-1700			LF	
N014		X-7000	Y-3500	Z-14800		M02	LF	至原点上 150mm，主轴停止

众所周知，零件加工程序是用刀位点的运动轨迹来描述的。对于圆形刀具，刀位点就是刀具的中心。在零件加工过程中，刀具和零件产生相对位移的刀具中心的路径，叫做刀具中心轨迹。显然，刀具中心轨迹是零件轮廓的等距线。

如前述，数学处理的主要任务是根据零件形状，按照已经确定的进给路线和允许的编程误差，计算出数控系统的输入数据，亦即零件轮廓上或刀具中心轨迹上一些点的坐标数据。具体包括：

(1) 基点和节点的计算 基点就是构成零件轮廓各相邻几何元素的交点或切点。例如圆弧与圆弧的交点或切点，直线与圆弧的交点或切点，两直线的交点等。

由于一般数控装置只具备直线插补和圆弧插补功能，当加工非圆曲线时，在满足允许编程误差条件下常用直线和圆弧去逼近。逼近线段的交点称为节点。编程就是要计算出各直线段长度和节点坐标值、各圆弧的起点、终点及圆心坐标值。

加工立体型面时，根据加工精度要求，用平行于某一坐标平面的一族平面，将型面分割成许多薄片，每个薄片外形轮廓都可视为平面曲线，为此也要计算出每一薄片外形轮廓曲线上的基点和节点坐标。

(2) 刀具中心轨迹的计算 数控铣床的控制系统要求程编给出刀具中心轨迹上的基点或节点的坐标数据，以控制刀心运动轨迹，由铣刀切削刃加工出零件轮廓。具有刀具偏移功能的控制系统程编时，实际上只需算出零件轮廓上的基点或节点坐标数据、给出刀具半径大小及刀具偏移指令，数控系统即可自动进行刀具偏移计算，算出所需的刀具中心轨迹坐标，控制刀具运动。对于没有刀具偏移运算的数控系统，则必须计算出铣刀中心轨迹的基点和节点，作为编程的依据。

(3) 辅助程序计算 对刀点到切入点(刀具开始与零件轮廓接触的点)的程序以及由切削终点返回到对刀点的程序都是辅助程序。在数值计算中也应算出辅助程序所需数据。

(4) 增量计算 增量坐标系统的数控装置输入的数据是增量坐标指令。对于直线段需算出直线终点相对于起点的坐标增量值；而对于圆弧段，一种是需算出圆弧终点相对于起点的坐标增量值及圆弧的圆心相对于圆弧起点的坐标增量值，另一种是需算出圆弧起点相对于圆心的坐标增量值及圆弧终点相对于圆心的坐标增量值。绝对坐标系统的数控装置输入的数据是绝对坐标指令。对于直线可直接给出它的终点坐标值；对于圆弧段，直接给出圆弧终点的坐标值，而圆弧起点仍用其相对于圆心的坐标增量给出，或用圆弧圆心相对于圆弧起点的坐标值给出。

按照上述规则，对于一段轮廓直线，若已算出它在零件坐标系里的起点坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  和终点坐标  $(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ ，当按绝对坐标指令编程时，其插补程序书写格式为：

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G01\cdots G90X\{x_{i+1}\}Y\{y_{i+1}\}\cdots \quad (\text{平面直线})$$

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G01\cdots G90X\{x_{i+1}\}Y\{y_{i+1}\}Z\{z_{i+1}\}\cdots \quad (\text{空间直线})$$

当按增量坐标指令编程时，该直线插补程序为(工件相对于刀具的当前位置是直线的起点)

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G01\cdots G91X\{x_{i+1} - x_i\}Y\{y_{i+1} - y_i\}\cdots \quad (\text{平面直线})$$

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G01\cdots G91X\{x_{i+1} - x_i\}Y\{y_{i+1} - y_i\}Z\{z_{i+1} - z_i\}\cdots (\text{空间直线})$$

上述各式中，G01、G90、G91的意义见表7-3。其中G90、G91对于具体的控制系统有时不一定要写。

对于圆弧轮廓，目前最为通用的编程方法是：用X、Y、Z表示圆弧段的终点坐标(在G90状态)或是圆弧终点到圆弧起点距离(在G91状态)，用I、J、K分别表示圆弧中心相对于圆弧起点在X、Y、Z方向的坐标分量(即圆弧起点取为增量坐标的参考点)，跨象限圆弧无需分段编程，只编成一个程序段即可。其程序书写格式为：

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G02G17G90X\{x_{i+1}\}Y\{y_{i+1}\}I\{x_0 - x_i\}J\{y_0 - y_i\}\cdots$$

$$N\Delta\Delta\Delta \quad G02G17G91X\{x_{i+1} - x_i\}Y\{y_{i+1} - y_i\}I\{x_0 - x_i\}J\{y_0 - y_i\}\cdots$$

式中  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1})$ 、 $(x_0, y_0)$  分别为圆弧段起点、终点和圆心坐标。

在直线和圆弧插补程序中，除了指定坐标平面G17、G18、G19之外，还必须指定刀具偏

置指令 G41 或 G42。这些指令以及 G02 的意义亦参见表 7-3。

下面举一简单例子说明圆弧插补指令的应用。

如果加工如图 7-28 所示的一个整圆，设起刀点在机床的原点，且编程原点与机床原点重合，加工时刀具从 O 点快速移到 A 点，由 A 点顺时针方向加工整圆又回到 A 点，再快速返回 O 点。这时，按绝对坐标编程的程序为

```
N001 G00G17G90X30Y0LF
N002 G02X30Y0I-30F100LF
N003 G00X0Y0M02LF
```

按相对坐标编程为

```
N001 G00G17G91X30Y0LF
N002 G02X0Y0I-30F100LF
N003 G00X-30Y0M02LF
```

因为是一个整圆，故终点与起点重合，终点相对于起点的坐标增量为零，因此 N002 中用 X0Y0 来给定终点的相对坐标值。

(5) 脉冲数计算 有些数控系统采用脉冲数输入方式。把零件轮廓和刀具中心轨迹上基点和节点的坐标值，除以相应的脉冲当量，即换算成脉冲数。

直线、圆弧轮廓零件在机械零件中大约要占 80%~90%，是最常见的一类零件。所以这类零件的数控加工程序编制是轮廓控制的数控机床程编的基本形式。下面将通过一实例来介绍这类零件程编过程。

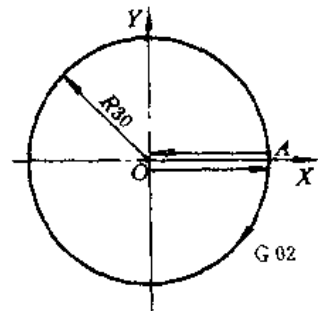


图 7-29 为铣削加工的工件。使用的 NC 机床具有刀具直径补偿和刀具偏置功能。其加工程序编制过程如下：

首先对零件图进行工艺分析，并确定进给路线和工艺参数。如选用  $\phi 16\text{mm}$  立铣刀，主轴转速  $n=900\text{r/min}$ ，切削进给速度  $F=100\text{mm/min}$ 。使工件原点与机床原点重合。对刀点选在机床原点上。切削分粗、精加工两次进给。粗加工时，刀具中心在工件轮廓的法向偏离一个距离  $D$ ， $D=R+\Delta$ ，其中  $R$  为铣刀半径， $\Delta$  为精铣时的加工余量；精加工时的刀具偏离距离应为刀具半径  $R$ 。

其次进行数值计算。计算步骤为：

1) 根据零件轮廓特点与所确定的进给路线，将加工分成 5 个程序段，即 AB、BC、CD、DE 和 EA。

2) 在工件坐标系里计算出基点 A、B、C、D、E 和圆心  $O_1$ 、 $O_2$  的绝对坐标值。由于零件比较简单，这些点的坐标值可直接从图上得到。

3) 增量计算。根据零件尺寸标注方式，选用绝对坐标编制加工程序较为方便。因此对于直线段可直接给出

图 7-28 圆弧插补指令的应用

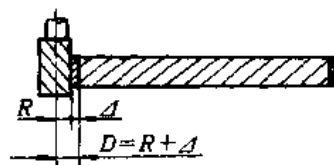
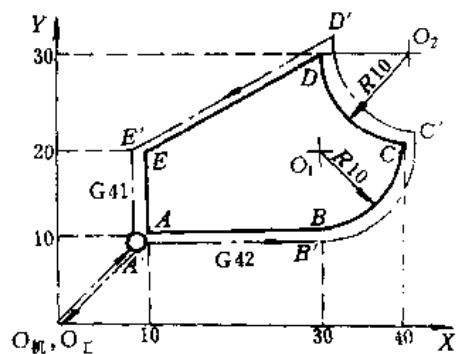


图 7-29 直线、圆弧零件的程序编制

它的终点坐标值，对于圆弧段，则给出圆弧终点坐标值，而圆弧起点用其相对于圆心的坐标增量给出。

机床数控系统可直接输入带小数点的十进制数，不需换算成脉冲数。

4) 辅助程序数据计算。切入程序是点  $O_{机}$  到点  $A$  的直线段，切出程序是点  $A$  至点  $O_{机}$  的直线段。需要求出这两直线段的终点坐标值。

5) 根据计算所得的全部数据及有关指令，编写加工程序：

```
G92X0Y0
N001 G90G17G00G42D01X10Y10LF
N002 G01X30F100LF
N003 G03X40Y20I0J-10LF
N004 G02X30Y30I10J-0LF
N005 G01X10Y20LF
N006 Y10LF
N007 G00G40X0Y0M02LF
```

上程序中，程序段  $G92X0Y0$  完成工件坐标系到机床坐标系的变换。对于本例，由于这两个坐标系重合，所以  $X$ 、 $Y$  后为零值。

$G42$  为刀具右偏指令。所谓右偏是指当沿刀具前进方向观察时，刀具偏在工件轮廓的右边。 $D01$  为数控系统的内存地址，在运行程序进行加工之前，要用数控系统的手动键盘，将刀具中心的偏移量  $D$  送入到内存地址  $D01$  中去。加工时，机床根据按工件轮廓尺寸编制的加工程序和预先存放在数控系统内存中的刀具中心偏移量，自动计算刀具中心轨迹  $A'B'C'D'E'A'$ ，并控制刀具沿轨迹  $A'B'C'D'E'A'$  进行加工。

$N007$  程序段的  $G40$  是撤销刀具半径补偿指令，指令本程序段和其后的程序段不作刀具半径补偿运算。 $G40$ 、 $G42$  都是续效代码。

## 第四节 数控自动编程技术

### 一、概述

本节介绍用数控语言实现计算机辅助程序编制的方法。

最早研究数控自动编程系统的是美国。1952年美国研制出世界上第一台数控铣床以后，美国麻省理工学院伺服机构试验室在美国空军的资助下，于1953年开始研究零件数控加工的自动编程问题。研究成果于1955年公布，这样便诞生了APT (Automatic Programmed Tools, 自动化编程工具)。以后经多次修改和完善，于70年代发展成APT M系统，并一直沿用至今。该系统能够在五坐标的范围内自动编制复杂零件的数控加工程序。在APT的基础上，世界各工业国都各自发展了各具特色的数控语言系统。如原联邦德国的EXAPT、英国的2CL、日本的FAPT和HAPT、法国的IFAPT、意大利的MODAPT、前苏联的CAЛ和CЛC、以及我国的SKC、ZCX等。

现在，全世界实际应用而且比较著名的数控语言系统有100余种，但影响最深、应用最广、最具有代表性的要算APT系统。因此，本节将介绍APT的基本语法组成及零件源程序编制方法。

APT 不仅是一种数控语言,也是根据 APT 语句完成刀具中心轨迹计算的计算机程序。本节将主要讨论程序员必须使用的语言,而不涉及计算机程序的内部工作过程。APT 是最多能控制五坐标的三维系统,我们的讨论仅限于 X、Y、Z 三坐标,而不考虑旋转坐标的问题。APT 能控制各类机床作业,这里仅涉及钻削和铣削加工。APT 词汇有 400 多个字,这里也仅介绍其中比较重要的一部分。

## 二、APT 语言

APT 语言的语句有四种类型,即几何定义语句、运动语句、后置处理语句和辅助语句。

### (一) 几何定义语句

几何定义语句是为了描述零件的几何图形而设置的。我们知道,一个零件是由各种几何元素所构成。零件加工时,刀具就是沿着这些几何元素在运动,因此要描述刀具运动轨迹,首先必须描述构成零件形状的各几何元素。

APT 的几何定义语句的一般形式是:

几何元素名字=几何元素类型/定义方式该语句由三部分组成:第一部分为标识几何元素用的名字,名字可用 6 个以内的英文字母和数字组成,但至少要有个英文字母,而且名字的用字不能与 APT 语言的词汇字相同。例如

$$P1=POINT/5.0, 4.0, 0.0$$

表示名为 P1 的点的几何定义语句。

第二部分是标识几何元素种类的 APT 词汇字。除 POINT 之外,APT 包括的其它几何元素有 LINE、PLANE、CIRCLE 等。

第三部分是几何元素的定义方式。例如上例语句的点 P1 是用点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标值给出的。

每种几何元素都有几种甚至十多种定义方式。在编写零件源程序时,程编人员可根据图纸数据给出情况,选择最方便的定义方式来定义几何元素。

例如定义一条直线,最简单的方法就是用通过该直线上的两个点给出:

$$L2=LINE/P3, P4$$

如果感到用定义一条平行于某一已定义直线的新直线更方便,则可采用下面的语句:

$$L3=LINE/P5, PARLEL, L2$$

这就是说直线 L3 必须通过点 P5,且平行于直线 L2。

定义一个平面只要通过这平面上的三个点就可以:

$$PL1=PLANE/P1, P4, P5$$

当然,这里的 P1、P4、P5 不能在同一直线上。类似于上述平行直线语句,同样可以定义一个平面平行于另一个平面:

$$PL2=PLANE/P2, PARLEL, PL1$$

平面 PL2 平行于平面 PL1,且通过点 P2。

一个圆可以由其圆心位置和半径来定义:

$$C1=CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 10.0$$

应该指出,在上述几何定义中,虽然直线和圆属于二维图形,但 APT 系统处理这类几何元素时仍把它们当作三维图形处理。即直线是当作平面来处理的,认为该平面穿过直线并与 XY 坐标平面垂直;圆被认为是圆柱面,圆柱面穿过这个圆,并且圆柱的轴线垂直于 XY 坐标

平面。

同时还应强调的是，在使用几何定义语句时必须遵循以下几条基本规则：

1) 坐标数据必须按  $x$ ,  $y$ ,  $z$  的顺序给出。例如语句

$$P1=POINT/5.0, 4.0, 0.0$$

将被 APT 程序理解为： $x=5.0$ ,  $y=4.0$ ,  $z=0.0$  的一个点。

2) 定义方式中出现的符号必须是在前面已定义过的。例如语句

$$P2=POINT/INTOF, L1, L2$$

表示名为 P2 的点由直线 L1、L2 的交点给出。其中直线 L1 和 L2 必须已被定义过。

3) 一个标识符仅能用来定义一个几何元素，亦即同一标识符不能用来定义两个不同的几何元素。所以，下列语句的表达是错误的：

$$P1=POINT/INTOF, L1, L2$$

$$P1=POINT/5.0, 4.0, 0.0$$

4) 任一给定的几何元素只能用一个标识符来命名。因此，在同一程序中，下列两个语句将使得程序出错：

$$P1=POINT/0.0, 0.0, 0.0$$

$$P2=POINT/0.0, 0.0, 0.0$$

5) 在 APT 中定义的直线被认为两端是无限长的，平面被认为是无限大的，圆则被认为是一个完整的圆。

## (二) 刀具运动语句

刀具运动语句是在源程序中用来描述刀具运动路线的语句。在一个 APT 零件源程序中，几何语句与运动语句占了程序的绝大部分。运动语句的一般格式为：

运动命令/描述数据

例如

$$GoTo/P1$$

语句由“/”分开的两部分组成。第一部分是基本运动命令，它告诉刀具如何运动。第二部分由描述数据组成，告诉刀具运动到哪里去。在上面的例句中，命令刀具运动到 P1 点，而 P1 点已在前面的几何语句中被定义。

在运动语句的开始，必须给出刀具的起始点，这是操作员工作开始前刀具定位的地方。零件程序员用下列语句指示这个起始位置：

$$FROM/TARG$$

FROM 是一个 APT 词汇字，它表明其它点将以此初始点为参考点。TARG 是给出的起始点的符号，任一其它的 APT 符号都能用于定义初始点。以上命令也可写成

$$FROM/0.0, -1.0, 0.0$$

这里，描述数据就是初始点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标值。

由于零件加工通常可区分为点位加工和轮廓加工，因此刀具的运动方式也就可以分成点位控制运动和轮廓控制运动。不同的刀具运动方式，其运动语句是不同的。

### 1. 点位运动方式

刀具从某一规定位置直接作直线运动移动到另一规定位置称作点位程序控制。在 APT 语言中，完成点位控制运动的语句只有两种：GOTO 和 GODLTA。GOTO 语句就是让刀具的

顶端（中心）移动到后面描述数据所指定的点处。点是按绝对坐标数据或已定义过的点名等来表示的。例如：

```
GOTO/P2
GOTO/3.0, 4.0, 1.0
```

在第一句中，P2 是刀具中心的目标点，要求刀具移动到这一点。在第二句中，要求刀具运动到  $x=3.0, y=4.0, z=1.0$  的位置上。

GODLTA 命令规定刀具从当前位置移动一个距离增量。例如语句

```
GODLTA/2.0, 5.0, 0.0
```

指示刀具从它的当前位置向  $x$  正向移动 2mm，向  $y$  正向移动 5mm，而  $z$  坐标保持不变。

GODLTA 命令对钻削之类的加工很有用。例如欲加工的孔在点 P2 处，可首先用 GOTO 语句指示刀具移动到点 P2，然后使用 GODLTA 命令钻这个孔。其语句顺序如下：

```
GOTO/P2
GODLTA/0, 0, -15
GODLTA/0, 0, +15
```

**例** 写出完成图 7-30 所示零件钻孔所必需的 APT 几何定义语句和运动语句。零件的厚度为 15mm。

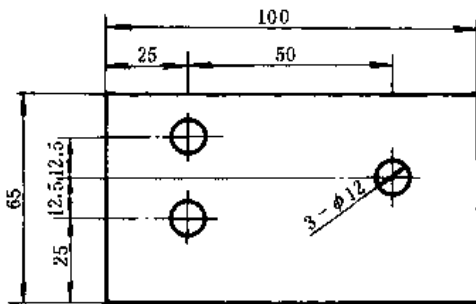


图 7-30 板状零件

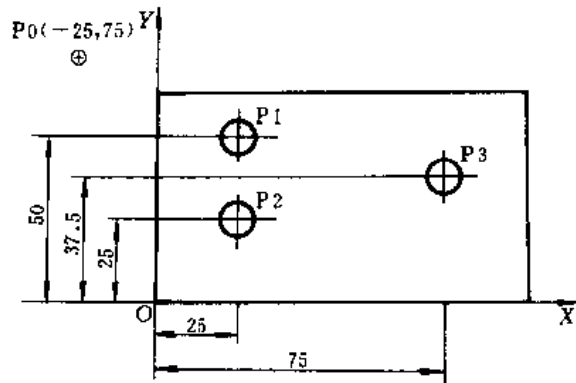


图 7-31 建立坐标系并对三孔标号

在设置坐标系和零件上三个孔的标号后，该零件图如图 7-31 所示。我们将坐标平面  $Z=0$  定义在零件表面之上 5mm 处。图中点 P0 (-25, 75, 40) 为对刀点。

按照题意，可以写出如下程序：

P1=POINT/25, 50, 0	点 P1 的坐标是 $x=25, y=50, z=0$
P2=POINT/25, 25, 0	点 P2 的坐标是 $x=25, y=25, z=0$
P3=POINT/75, 37.5, 0	点 P3 的坐标是 $x=75, y=37.5, z=0$
P0=POINT/-25, 75, 40	对刀点的位置 $x=-25, y=75, z=40$
FROM/P0	指定起刀点
GOTO/P1	刀具移动到点 P1
GODLTA/0, 0, -25	在 P1 点上钻孔
GODLTA/0, 0, +25	刀具向上
GOTO/P2	刀具移动到点 P2

GODLTA/0, 0, -25	在 P2 点上钻孔
GODLTA/0, 0, +25	刀具向上
GOTO/P3	刀具移动到点 P3
GODLTA/0, 0, -25	在 P3 点上钻孔
GODLTA/0, 0, +25	刀具向上
GOTO/P0	刀具回到对刀点 P0

由于上述程序没有包括必要的辅助语句和后置语句，所以不是一个完整的 APT 程序。然而，语句顺序说明了几何定义语句和运动语句应如何组合，以指示刀具完成一系列的加工步骤。

## 2. 轮廓控制方式

(1) 三个控制面的定义 在这种方式中，由于必须对刀具的运动进行连续控制，因此轮廓控制运动命令就必然要复杂些。而要完成这种连续控制，或者说为了得到唯一的刀具运动轨迹，就需要确定刀具相对于工件的位置关系，其中包括刀具在其轴心线方向上与工件的位置关系，在垂直于轴心线的面上沿着什么样的轨迹运动，运动到什么地方停止等。为此在 APT 系统中定义了三个控制面：

1) 零件面 PS (part surface)：它是在加工过程中与刀具顶端始终保持接触的一个表面，它控制刀具切削的深度（见图 7-32）。应该注意，零件面可能是，也可能不是工件的实际表面。零件面一经指定，对后续语句就一直有效，直到被其它指定零件面的语句重新指定为止。

2) 导动面 DS (drive surface)：它是在进行指定的切削运动过程中，引导刀具保持在指定公差范围内运动的面。该面与刀具进给运动方向平行。刀具相对于导动面 DS 的位置由如下三个修饰词表示（图 7-33）：

TLLFT (刀具在左)

TLRGT (刀具在右)

TLON (刀具在线上)

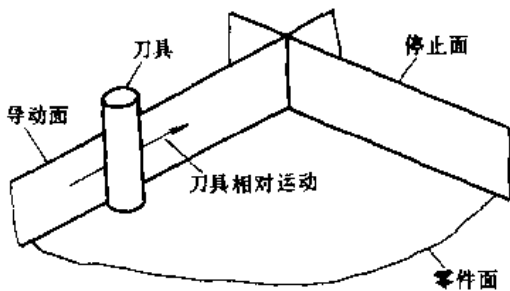


图 7-32 轮廓控制运动中引导刀具的三个曲面

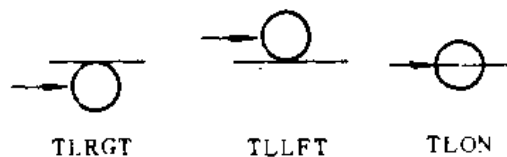


图 7-33 刀具相对于导动面 DS 的位置

顺着刀具运动方向看，刀具左切导动面时为 TLLFT，刀具右切导动面时为 TLRGT，刀具轴线落在导动面上为 TLON。

导动面 DS 应在初始运动语句和连续切削运动语句中予以指定。

3) 停止面 CS (check surface)：它是用来限制刀具继续向前运动的面。刀具到达停止面，表示该运动语句执行完毕，可转入执行下一运动语句。

刀具移动时，由一对控制面，即导动面 DS 和零件面 PS，得到刀具的轨迹。刀具继续运动到第三个控制面，即停止面 CS 时，就停止运动或转下一运动。因此，在连续运动中，刀具



总是沿着一个控制面运动到下一个控制面。刀具当前沿着它运动的控制面就是导动面，刀具沿导动面运动将要到达的下一个控制面就是停止面，而且前一运动语句的停止面必为下一运动语句的导动面。如图 7-34 所示，对刀具运动 1 来说，表面 A 是导动面，表面 B 是停止面；对运动 2 来说表面 B 为导动面，而表面 C 是停止面，如此等等。

为了说明并区别刀具由导动面到达停止面时，与停止面的接触状态，需要用到下面五个修饰词（图 7-35）：

- TO（走到）—— 刀具刚好与停止面相切；
- ON（走上）—— 刀具中心刚好停在停止面上；
- PAST（走过）—— 刀具越过停止面并与之相切；
- TANTO（走切）—— 刀具停在导动面与停止面的切点上；
- PSTAN（切于零件面）—— 刀具停在零件面与停止面的切点上。

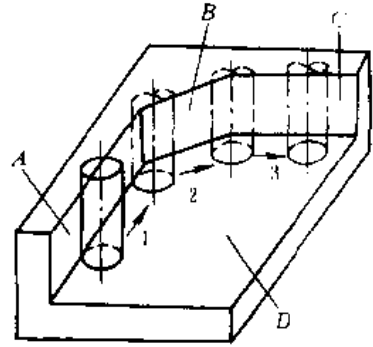


图 7-34 刀具运动和控制面

停止面在初始运动语句和连续切削运动语句中予以指定。

(2) 初始运动语句 进行连续切削之前，除了同样需要指定刀具的起始位置（起刀点）以外，为了使刀具沿着指定的控制面运动，还必须使用初始运动语句将刀具从远离加工表面的位置（起刀点）引导到两个或三个控制面的容差带之内。初始运动语句的一般形式是：

$$GO / \left\{ \begin{matrix} TO \\ ON \\ PAST \end{matrix} \right\}, DS, \left\{ \begin{matrix} TO \\ ON \\ PAST \end{matrix} \right\}, PS, \left\{ \begin{matrix} TO \\ ON \\ PAST \end{matrix} \right\}, CS$$

其中最后一项停止面 CS 有时可以省略。这时刀具将沿最短距离路线从起刀点移动到前两个控制面所限定的位置。

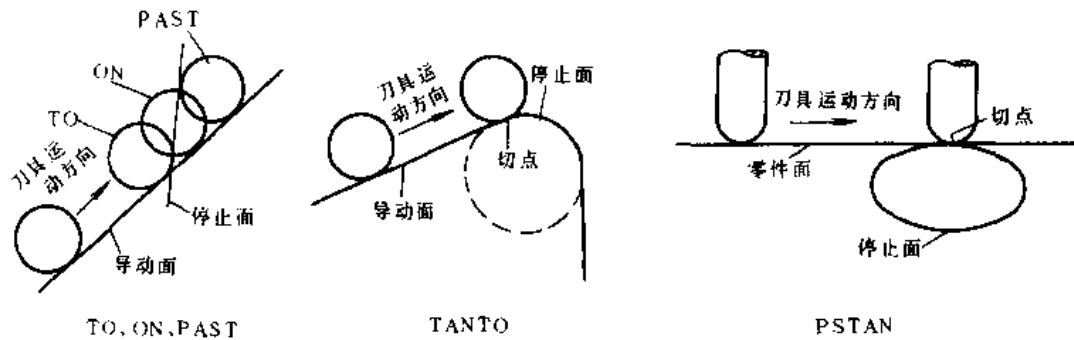


图 7-35 刀具与停止面的相对位置

必须注意，初始运动语句中三个控制面的表达顺序为导动面、零件面、停止面，不能随意颠倒。

括号内是修饰词，它表示刀具相对于控制面的关系，其含意已于前述，下面再举一例说明。

FROM/SETPT

GO/ON, S1, TOS2, PASTS3

该两语句表示：调整到名为 SETPT 点（起刀点）上的刀具，根据初始运动语句的命令进给，其位置对于面 S1，刀具中心在此面上（ON），对面 S2，刀具与之相切（TO），对 S3，刀具走过头但相接触（PAST）。S1 是下一个运动的导动面，S2 是零件面，S3 为初始运动的停止面。

如果只指定 DS、PS 两个面而又不允许刀具沿最短路线前进，此时就应在初始运动语句前加写如下语句，使刀具通过已知点（POINT1）或已知矢量（VECTOR1）来限定刀具的前进方向（参见图 7-37）

INDIRP/POINT1

INDIRV/VECTOR1

必须指出，GO/TO 命令与 GOTO 命令是不同的。GOTO 仅用于点位控制加工，而 GO/TO 是用作轮廓控制运动指令串的初始运动语句。

(3) 轮廓加工语句 当用 GO/语句对刀具初始运动作了规定之后，以后的刀具运动需要用轮廓加工语句来规定。轮廓加工语句使刀具沿着两个控制面运动到第三个控制面。语句的书写格式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{GOUP} \\ \text{GOFWD} \\ \text{GOLFT} \\ \text{GORGT} \\ \text{GOBACK} \\ \text{GODOWN} \end{array} \right\} / \text{DS}, \left\{ \begin{array}{l} \text{TO} \\ \text{ON} \\ \text{PAST} \\ \text{TANTO} \\ \text{PSTAN} \end{array} \right\}, \text{CS}$$

由于初始运动语句中给定的零件面 PS 对以后的语句都有效，所以轮廓加工语句中只需给出导动面和停止面。导动面 DS 之前要用方向指示词指出刀具从上次进给运动转入本次进给运动时的前进方向，如 GOUP（向上）、GOFWD（向前）、GOLFT（向左）、GORGT（向右）、GOBACK（向后）、GODOWN（向下）等，它们都是沿前一次运动的方向观察来决定的（见图 7-36）。

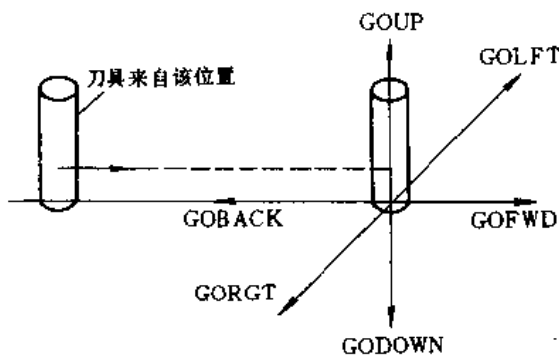


图 7-36 刀具运动方向的指定

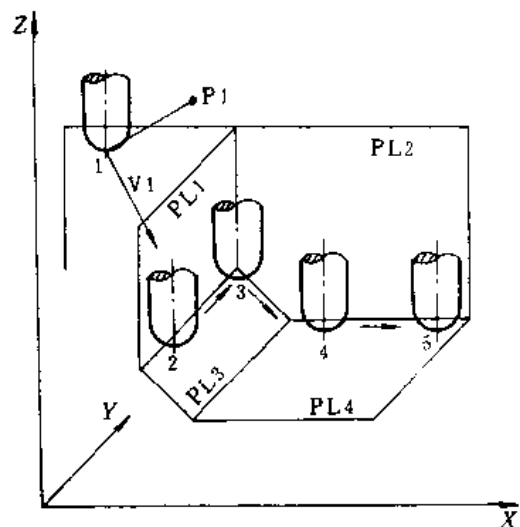


图 7-37 轮廓加工的刀具运动语句串

当加工过程中需要改变零件面 PS 时，可以使用 PSIS (Part Surface is) 语句。

图 7-37 所示是一综合示例。该例中刀具运动的指令串书写如下：

FROM/P1	起刀点是 P1
INDRIV/V1	刀具按 V1 方向运动
GO/PAST, PL1, TO, PL3	GO/规定 PL3 为零件面 PS
GOLFT/PL1, TO, PL2	刀具沿 PL1 在 PL3 上滑动到 PL2 止
PSIS/PL2	PL2 变为零件面 PS
GODOWN/PL3, TO, PL4	刀具沿 PL3 向下运动到 PL4 止
GOFWD/PL4	刀具沿 PL4 继续向前运动

由上面语句可以看出，在这个例子中，刀具是从起刀点 P1 按 V1 规定的方向运动到 GO/语句所指定的导动面 (PL1) 及零件面 (PL3) 的容差范围内的，而不是按最短距离路线移动到该位置上；若要改变 GO/语句所指定的零件面，必须用 PSIS/语句规定新的零件面。

### (三) 后置处理程序语句

由 APT 系统产生的刀具轨迹数据 (刀位文件) 是在假定工件静止、刀具移动的前提下得到的一般解。但是，这个假设不一定符合实际机床情况。把一般解处理成适合于特定的机床或数控装置的程序称为后置处理程序。后置处理程序的主要功能是将刀位文件转换成机床能够接受的 S 代码、F 代码、M 代码。主要的后置处理程序语句有：

#### 1. MACHIN/后置名

该语句用来指定所用后置处理程序，其中后置名是一个标识符，为所用的后置处理程序的名字。

#### 2. FEDRAT/数

该语句用来指定刀具的进给速度。式中数表示机床的进给速度 (mm/min) 或进给速度代码。

#### 3. SPINDL/

该语句用来指定机床主轴的转速 ( $n$ )、旋转方向 (CLW 或 CCLW) 或启停状态。其形式为：

$$\text{SPINDL}/n, \left\{ \begin{array}{l} \text{CLW} \\ \text{CCLW} \\ \text{OFF} \end{array} \right\}$$

#### 4. COOLNT/

此语句指示切削液的状态。语句格式为

$$\text{COOLNT}/\left\{ \begin{array}{l} \text{FLOOD} \\ \text{MIST} \\ \text{OFF} \end{array} \right\}$$

式中，FLOOD 表示液冷开；MIST 表示雾冷开；OFF 为切断切削液。

#### 5. STOP

该语句的作用是使机床停止加工，此时可更换刀具或进行工件检测，但控制机仍处于工作状态。

#### 6. END

该语句不仅使机床停止工作，而且控制机也停止工作。

#### 7. TRANS/ $x, y, z$

图 7-38 所示为装夹在机床工作台上的零件。 $XYZ$  为编程时在工件上设定的坐标系， $X'Y'Z'$  为机床上设定的坐标。通常工件坐标系与机床坐标系并不重合。如图中点  $A$  的坐标，按工件坐标系是  $(2, 1, 0)$ ，而按机床坐标系则是  $(8, 3, 0)$ 。工件加工时，必须将作为一般解的刀位数据（定义在工件坐标系中）表示在机床坐标系中，语句 TRANS/ $x, y, z$  即完成此坐标变换，其中  $x, y, z$  的数值就是机床坐标系的原点  $O'$  在工件系中的坐标值。对于图 7-38 所示的情形，此语句为

$$\text{TRANS}/-6, -2, 0$$

#### (四) 辅助语句

完整的 APT 程序还必须包括各种其它语句，称为辅助语句。最常用的几个辅助语句是：

##### 1. 指定刀具形状的语句

$$\text{CUTTER}/D, r$$

式中  $D$  和  $r$  分别为圆柱铣刀直径和圆角半径（图 7-39）。

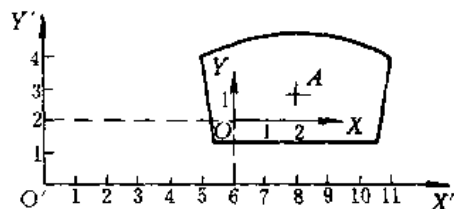


图 7-38 工件坐标系和机床坐标系

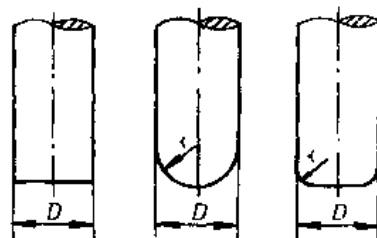


图 7-39 刀具形状的定义

##### 2. 指定容差的语句

APT 系统对于任何曲线均用直线段逼近，它偏离真实曲线的差值是通过源程序中的容差语句来指定。容差值规定得愈小，则加工出的轮廓愈接近所希望的理论曲线，但运算时间长，加工程序亦长。所以，应按加工精度的要求规定合适的容差值。

在零件源程序中规定容许误差的语句有

(1) OUTTOL/ $t$  式中  $t$  为理论曲线与刀具所描绘的直线段之间的最大偏差，亦即表示允许零件表面留下的最大毛坯余量（图 7-40a），称为外容差。

(2) INTOL/ $t$  该语句中  $t$  表示允许刀具可以切入零件表面的量（图 7-40b），称为内容差。

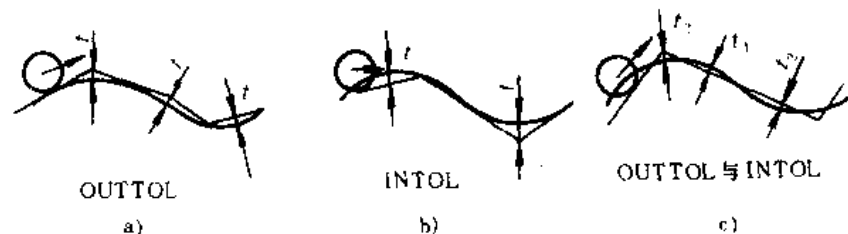


图 7-40 容许误差的指定

若同时指定 OUTTOL 和 INTOL，此时偏到理论曲线外侧部分按 OUTTOL 规定容差，

偏到内侧的按 INTOL 规定容差 (图 7-40c)。

OUTTOL 和 INTOL 一经指定, 直到再指定之前都是有效的。

由于 APT 系统的主要目的就是求不断变化的刀具轨迹的位置, 即计算刀位点的坐标值。因此, 在书写运动语句之前, 应先写出指定刀具形状和容差大小的语句。

(3) 程序结束命令语句 零件源程序写完后, 最后必须写上

FLNI

语句。否则 APT 系统就会将后续的零件源程序作为当前程序的继续加以处理, 因而造成错误。由于语句 STOP 和 END 不是指示程序的结束, 因此不用 STOP 或 END 来代替 EINI。

(4) 其他辅助语句

PARTNO——用于程序的开头以标识零件程序。

CLPRNT——打印出刀具中心轨迹数据。

REMARK (或 \$\$) ——用以指明该语句后的句子为注释语句。

### 三、APT 语言应用实例

前几节介绍了应用 APT 语言编写零件源程序要用到的基本知识。本节将利用这些基本知识, 编制一个零件的源程序, 并总结其编写方法和步骤。

图 7-41 为由直线与圆弧组成的零件, 其零件源程序的编写方法和步骤如下:

1. 选择坐标系和确定各有关几何元素的标识符号

选择程编坐标系时, 要考虑使程编方便, 图样尺寸换算工作量小。确定有关几何元素的标识符号, 就是给各几何元素取个名称, 并将这些名字记入零件图样。如图 7-42 所示, 点为 P1、P2、P3、P4, 直线为 L1、L2、L3, 圆为 C1, 平面为 PL1。

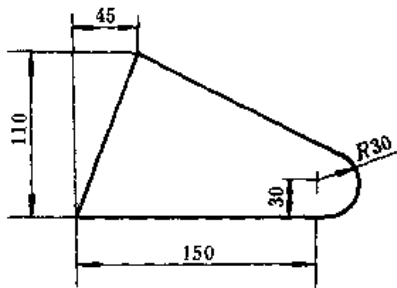


图 7-41 零件图

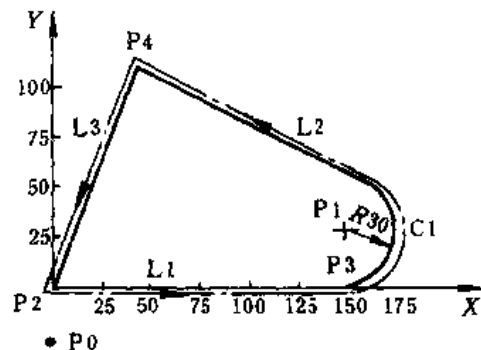


图 7-42 几何定义及走刀路线图

2. 书写几何定义语句

按照 APT 的几何定义功能书写出各几何定义语句。应注意的是, 凡是后面要用到的任何标识符, 事先必须定义, 否则将出现语法错误。因此, 为避免漏定义, 几何语句的书写应遵循一定的次序。

3. 确定对刀点和对刀方法

本例是在夹具上设置一个对刀销钉, 以该销钉中心 PO 点的位置作为程序的起点, 见图 7-42 (图中销钉未画出)。

采用对刀销钉对刀, 其方法与对刀孔对刀相同, 即同样用千分表随主轴转动方法找正对刀点。

#### 4. 选择刀具、容差等工艺参数

在书写刀具运动语句之前应把工艺参数语句写在程序里。工艺参数语句具有续效性，若要变更，需重新指定。

#### 5. 编写刀具运动语句

严格按照图 7-42 所示的加工路线的顺序，逐条写出刀具运动语句。

#### 6. 插入其它语句

根据数控装置和机床的种类，指定选用何种后置处理程序；指定刀具的进给速度、主轴的回转速度、切削液的开与关等；在程序开始处书写零件源程序的名称；在适当位置书写刀位数据的打印命令；在零件源程序结束时写上结束命令。

#### 7. 检查有无语法错误

这是指上机前的检查。为了提高编程效率和节约费用，应当尽可能地把错误消除在上机以前。语法检查的重点是书写格式是否正确，语句和语句中的字是否有遗漏。

零件复杂时最容易出现漏定义漏加工的情况。因此建议在书写几何定义语句的同时，紧接着用另一张纸写出运动语句，待所有的几何元素都定义好以后，就可将两张纸放在一起进行对照检查：既查看是否所有表面都已加工到，也检查所用的标识符是否都已定义过。采用这样的方法就不容易遗漏。当然也可以利用零件图样一遍遍地校对定义和进给路线，这样也可以发现是否有遗漏。

最后，将源程序输入到具有 APT 程序系统的计算机中进行处理，检查打印出来的被处理结果的清单，如有错误就改正，直到全部无误为止。

APT 系统本身有很强的诊断功能，能自动诊断出源程序中的错误，所以编程人员能根据诊断出的问题，很快地改正错误。

下面就是按照上述方法和步骤编写出的图 7-41 所示零件的 APT 源程序：

PARTNO TEMPLATE

初始语句，说明加工对象是样板，写在 PARTNO 后面的标题将穿在数控纸带上，便于检索。

MACHIN/F7M

后置处理语句，说明控制机型号。

CLPRNT

说明需要打印刀位数据清单。

INTOL/0.01

指定用直线段逼近零件轮廓的容许误差。

OUTTOL/0.01

CUTTER/10

说明选用平头立铣刀，直径为 10mm。

\$ \$ DEFINITION

作注释语句用，表明以下为几何定义语句。

P0=POINT/0, -25, 0

P1=POINT/150, 30, 0

P2=POINT/0, 0, 0

P3=POINT/150, 0, 0

P4=POINT/45, 110

L1=LINE/P2, P3

C1=CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 30

L2=LINE/P4, LEFT, TANTO, C1	
L3=LINE/P2, P4	
PL1=P2, P3, P4	
SPINDL/900, CLW	主轴转速 $n=900\text{r/min}$ , 顺时针旋转。
FEDRAT/50	选用进给速度为 $50\text{mm/min}$ 。
COOLNT/ON	切削液开。
FROM/P0	指定起刀点。
GO/TO, L1, TO, PL1, TO, L3	初始运动指令。
GORG/T/L1, TANTO, C1	以下说明进给路线。
GOFWD/C1, PAST, L2	
GOFWD/L2, PAST, L3	
GOLFT/L3, PAST, L1	
COOLNT/OFF	切削液关闭。
FEDRAT/500	
GOTO/PO	回到起刀点。
FINI	零件源程序结束。

## 第五节 数控电火花线切割加工的程序编制

### 一、数控线切割编程中的工艺处理

#### 1. 偏移量 $f$ 的确定

编程时首先要确定钼丝中心运动轨迹与切割轨迹之间的偏移量  $f$ 。 $f$  为钼丝半径和单边放电间隙之和。

放电间隙  $Z$  与工件的材料、结构、走丝速度、钼丝的张紧状况、导轮的运行状态、工作液种类、供应状况及脏污程度、加工电源的电规准以及加工变频调节等情况有关。采用快速走丝机构, 在  $v_{\text{走}}=60\sim 80\text{V}$  时, 一般  $Z=0.01\sim 0.02\text{mm}$ 。

在实际工作中, 为了准确地确定  $f$  值, 放电间隙往往需通过切割一正方形试件后实测得到。

#### 2. 取件位置、切割路线走向及起点的选择

为了避免工件材料内部组织及内应力对加工精度的影响, 必须考虑工件在坯料中的取出位置, 合理选择切割路线的走向和起点。

例如在切割热处理性能较差的材料时, 若工件取自坯料的边缘处 (图 7-43a), 则变形较大; 若工件取自坯料的里侧 (图 7-43b), 则变形较小。所以, 为保证加工精度, 必须限制取件位置。

切割路线的走向和起点选择不当, 也会严重影响工件的加工精度。如图 7-44 所示, 加工程序引入点为  $A$ , 起点为  $a$ , 则切割路线走向可有:

1)  $A\rightarrow a\rightarrow b\rightarrow c\rightarrow d\rightarrow e\rightarrow f\rightarrow a\rightarrow A$ ;

2)  $A\rightarrow a\rightarrow f\rightarrow e\rightarrow d\rightarrow c\rightarrow b\rightarrow a\rightarrow A$ 。

如选 2) 走向, 则在切割过程中, 工件和易变形的部分相连接, 会带来较大的误差; 如选

1) 走向, 就可减少或避免这种影响。

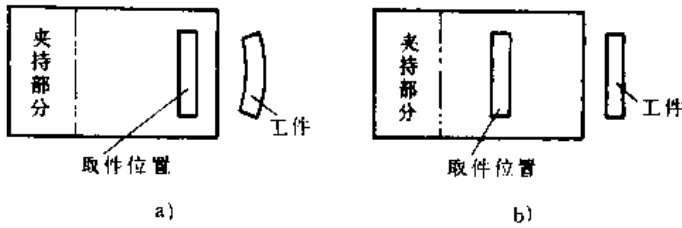


图 7-43 取件位置对工件精度的影响

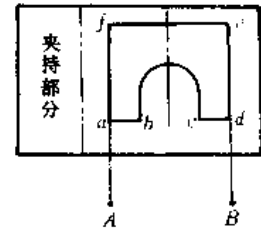


图 7-44 切割路线走向及起点对加工精度的影响

若加工程序引入点为  $B$ , 起点为  $d$ , 这时无无论选哪种走向, 其切割精度都会受到材料变形的影响。

程序起点 (一般也是终点) 选择不当, 会在工件切割表面上残留切痕, 尤其起 (终) 点是选择在圆滑表面上时, 其残痕更为明显。所以, 应尽可能把起 (终) 点选在切割表面的拐角处, 或选在精度要求不高的表面上, 或选在容易修整的表面上。

### 3. 钼丝切割轨迹的确定

钼丝切割轨迹 (即所得工件的轮廓线) 应选在工件尺寸公差带的什么位置上, 可区分成以下三种情况来考虑:

1) 直接加工零件时, 应使钼丝切割轨迹通过公差带中心。如图 7-45 所示, 按照工件尺寸性质不同, 编程尺寸也不相同。

图例			
编程尺寸	$D_A = D + \frac{T}{2} - f$	$d_A = d - \frac{T}{2} + f$	$L_A = L$

图 7-45 切割轨迹通过公差带中心时的编程尺寸

2) 加工冷冲模的凸凹模时, 为了延长模具的使用寿命, 应使切割轨迹偏离公差带中心。如图 7-46 所示, 按加工情况的不同, 其编程尺寸的计算也不同。

3) 当线切割需分粗、精两次完成, 或者需要对线切割表面后续其它方法加工时, 就要求粗加工时为精加工 (或后续加工) 留有一定余量, 即需加大偏移量  $f$  值。故粗加工时的偏移量

$$f = \frac{1}{2} d_{丝} + Z + \Delta$$

式中  $d_{丝}$  —— 钼丝直径;  
 $Z$  —— 放电间隙;  
 $\Delta$  —— 精加工 (或后续加工) 余量。

### 4. 零件定位方式的确定与夹具选择

(1) 适当的定位可以简化编程工作 工件在机床工作台上的位置影响工件轮廓线的方位, 因而影响各节点坐标的计算过程和结果。例如, 对图 7-47 所示的工件, 当  $\alpha$  角为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  或  $45^\circ$  时, 各节点的计算就比较简单, 计

图例		
编程尺寸	$d_A = D + (0.75 \sim 1) T + f$	$D_A = d - (0.75 \sim 1) T - f$

图 7-46 冷冲模的编程尺寸



算也就不容易出错（对手工编程而言）。

(2) 夹具对编程的影响 采用适当的夹具,或可使编程简化,或可用一般编程方法使加工范围扩大。如用固定分度夹具,用一段程序带可以加工零件的多个回转图形,这就简化了编程工作。再如用自动回转卡盘,变原来的直角坐标系为极坐标系,可用切斜线的程序,加工出近似的阿基米德螺旋面;还可以用适当的夹具,加工出导轮的沟槽、样板的椭圆线和双曲线等,这就扩大了线切割机的使用范围。

### 5. 辅助程序的规划

辅助程序一般有以下几种:

(1) 引入程序 程序起点是在切割轨迹的某个节点上,如图 7-44 之  $a$  点。在开始切割时,引入点(如图 7-44 中之  $A$  点)通常不能与起点重合,这就需要一段引入程序。引入点有时可选在材料实体之外(如大多数凸模的加工);有时也选在材料实体之内(如凹模加工)。这时就需要预制工艺孔,以便穿丝。

如上所述,为了控制加工过程中的材料变形,应合理选择引入点和引入程序。此外,引入点应尽量靠近程序的起点,以缩短切割时间。

(2) 切出程序 有时工件轮廓切完之后,钼丝还需沿切入路线反向切出。如图 7-48 所示,如果材料的变形使切口闭合,当钼丝切至边缘时,会因材料的变形而卡断钼丝。这时应在切出过程中,增加一段保护钼丝的切出程序(见图 7-48 中  $A'-A''$ )。 $A'$  点距材料边缘的距离,应依变形力大小而定,一般有 1mm 左右即可。 $A'-A''$  斜度可取  $1/3 \sim 1/4$ 。

(3) 超切程序和回退程序 钼丝是个柔性体,加工时受放电压力、工作液压力等的作用,会造成加工区间的钼丝滞后于上、下支点一个距离,即钼丝工作段会发生挠曲(见图 7-49a)。这样就会抹去工件轮廓的清角,影响加工质量(见图 7-49b)。为了避免抹去清角,可增加一段超切程序,如图 7-49b 中的  $A-A'$  段,使钼丝切割的最大滞后点达到程序节点  $A$ ,然后再增加  $A'$  点返回  $A$  点的回退程序  $A'-A$ 。接着再执行原程序,便可割出清角。

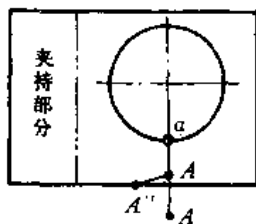


图 7-48 切出程序

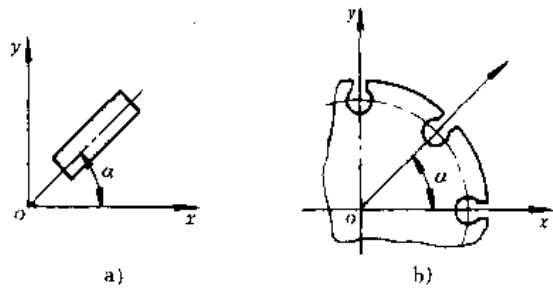


图 7-47 工件定位对编程的影响

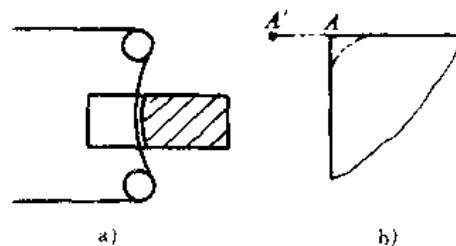


图 7-49 加工时钼丝挠曲及其影响

## 二、数控线切割机床的程序编制

### 1. 程序编制的基本规则

1) 如前所述,编制程序时必须符合一定的格式。例如,国内一些数字程序控制线切割机的 3B 程序格式见表 7-6。

表 7-6 3B 程序格式

B	X	B	Y	B	J	G	Z
分隔符	X 坐标值	分隔符	Y 坐标值	分隔符	计数长度	计数方向	加工指令

表中 B 为分隔符号，因 X、Y、J 均为数码，需用 B 将它们区分开来。

2) 加工圆弧时，坐标原点取在圆心，X、Y 为圆弧起点坐标值；加工斜线时，坐标原点取在斜线起点，X、Y 为斜线终点坐标值，并允许将 X 及 Y 坐标值按相同的比例缩小和放大。

在一个工件的加工过程中，X、Y 坐标轴的方向应始终保持不变，即为机床的 X 拖板和 Y 拖板的运动方向。加工不同的曲线时，取不同的坐标原点，只是坐标平移。

3) 选取 X 拖板方向进给总长来进行计数的称为计 X，用  $G_x$  表示。选取 Y 拖板进给总长度来进行计数的称为计 Y，用  $G_y$  表示。为了保证加工精度，必须正确选择计数方向。如图 7-50a) 所示，当斜线在阴影区域内，计数方向取  $G_y$ ，否则应取  $G_x$ ；如图 7-50b) 所示，若圆弧的加工终点在阴影部分，则计数方向取  $G_x$ ，否则应取  $G_y$ 。

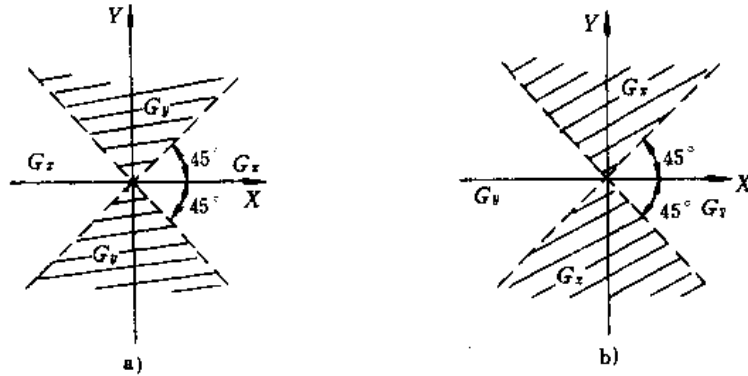


图 7-50 计数方向选择

4) 计数长度 J 应取从起点到终点某个方向拖板移动总距离。当计数方向确定后，就是被加工曲线（直线）在该方向投影长度的总和。图 7-51 说明了圆弧计数长度的计算。

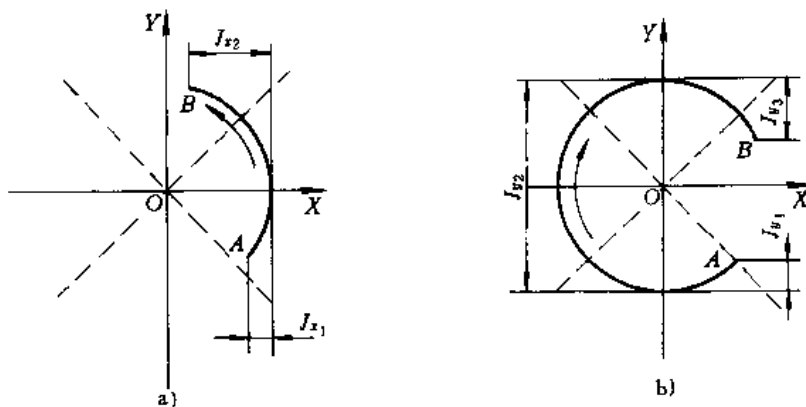


图 7-51 圆弧计数长度计算

a) 取  $G_x$ ，计数长度  $J = J_{x1} + J_{x2}$  b) 取  $G_y$ ，计数长度  $J = J_{y1} + J_{y2} + J_{y3}$

5) X、Y、J 数值均以  $\mu\text{m}$  为单位。编制程序的计算误差应小于  $1\mu\text{m}$ 。当 X 或 Y 为零时，可以不写。对于计数长度 J，则应写足六位数，如  $J = 1732\mu\text{m}$ ，应写成 001732。

6) 加工指令共有 12 种, 如图 7-52 所示。

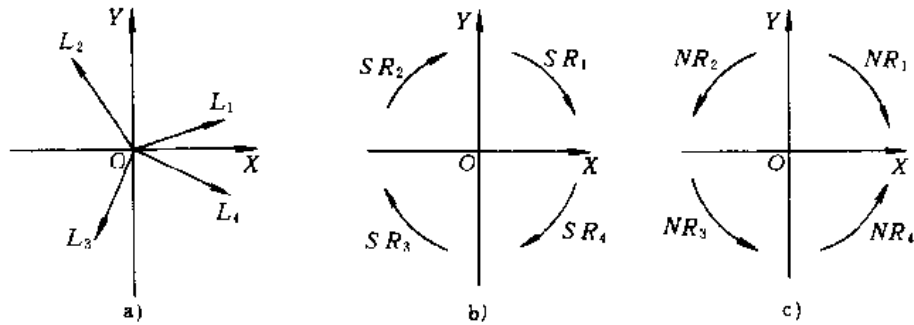


图 7-52 加工指令

当被加工的斜线在 I、II、III、IV 象限时, 分别用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  表示 (图 7-52a)。

对于平行于坐标轴方向的线, 为了区别于一般的斜线, 把它称为直线, 根据进给方向, 直线加工指令的选取按图 7-53 的规定, 且此时程序中应取  $X=Y=0$ 。

当被加工的圆弧在 I、II、III、IV 象限, 加工点按顺时针方向运动时, 分别用  $SR_1$ 、 $SR_2$ 、 $SR_3$ 、 $SR_4$  表示 (图 7-52b); 当被加工的圆弧在 I、II、III、IV 象限, 加工点按逆时针方向运动时, 分别用  $NR_1$ 、 $NR_2$ 、 $NR_3$ 、 $NR_4$  表示 (图 7-52c)。

圆弧可能跨越几个象限, 此时加工指令应由起点所在的象限和圆弧走向决定。例如加工图 7-51a) 中的圆弧  $\widehat{AB}$  时, 加工指令为  $NR_4$ ; 加工图 7-51b) 中的圆弧  $\widehat{AB}$  时, 加工指令为  $SR_4$ 。

2. 使用分隔符程序格式编程实例

例 在数控线切割机床上加工图 7-54 所示的样板, 其轮廓为  $abcdfg$ , 机床脉冲当量为  $0.001\text{mm}/\text{脉冲}$ , 试编制其程序。

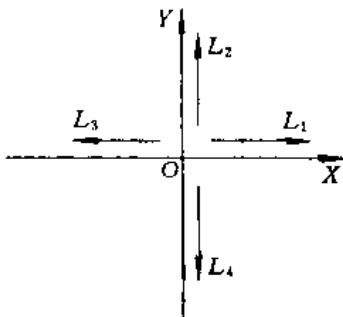


图 7-53 直线加工指令

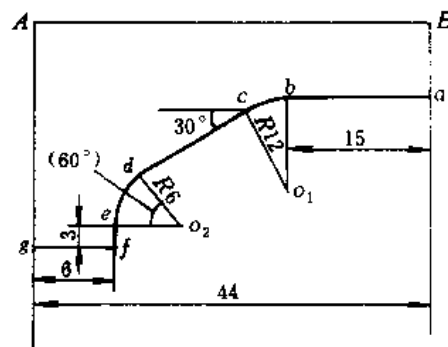


图 7-54 样板

首先确定偏移量  $f$ 。用  $\phi 0.12\text{mm}$  的钼丝加工, 放电间隙取经验值  $Z=0.01\text{mm}$ , 所以  $f=0.07\text{mm}$ 。

假定机床具有间隙补偿功能, 切割路线的走向为  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow g$ 。根据上述编程规则就可编写出样板的加工程序 (见表 7-7)。

表 7-7 样板加工程序单

序号	程序段	X		Y		J		G	Z
1	a-b	B	0	B	0	B	15000	G <sub>x</sub>	L <sub>3</sub>
2	b-c	B	0	B	12000	B	6000	G <sub>x</sub>	NR <sub>2</sub>
3	c-d	B	14000	B	8080	B	14000	G <sub>x</sub>	L <sub>3</sub>
4	d-e	B	3000	B	5190	B	5190	G <sub>y</sub>	NR <sub>2</sub>
5	e-f	B	0	B	0	B	3000	G <sub>y</sub>	L <sub>4</sub>
6	f-g	B	0	B	0	B	6000	G <sub>x</sub>	L <sub>2</sub>
		D							

表中 D 为停机码，供整个工件加工完毕后发“停机”命令用。

### 习 题

1. 什么是插补运算？什么是直线插补和圆弧插补？
2. 简述数控加工的作业过程。
3. 什么是机床坐标系？什么是工件坐标系？二者有何关系？
4. 用手工编程编写的“零件加工程序单”与用数控语言编写的“零件源程序”有何重要差别？
5. 什么是数控加工的进给路线？确定进给路线时应遵循的主要原则是什么？
6. 程序编制中的误差主要由哪三部分组成？为什么编程允许误差只能取为零件公差的 10%~20%？
7. 用绝对坐标值编制加工如图 7-55 所示的零件上 10 个  $\phi 6$ mm 孔的程序。

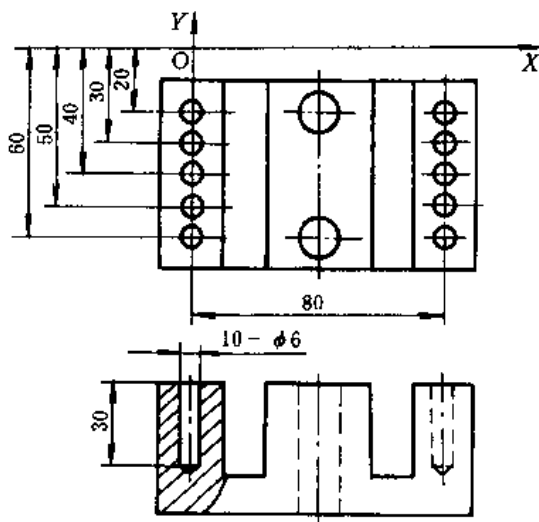


图 7-55

8. 已知一直线的起点坐标为 (50, -10)，终点坐标为 (30, 20)，试写出 G90 和 G91 状态下的直线插补程序。

9. 已知一段 XOY 坐标系中的圆弧，其起点坐标为 (30, 10)，终点坐标为 (40, 20)，圆心坐标为 (30, 20)，试书写出 G90 和 G91 状态下的圆弧插补程序。

10. 按照下面的进给路线及如图 7-56b 所示的钻孔、攻螺纹循环行程长度，编制如图 7-56a 所示的零件加工程序单。

进给路线：对刀点→孔 A→孔 B→孔 C→孔 D→孔 E→换刀点→孔 D（攻螺纹）→孔 E（攻螺纹）→对

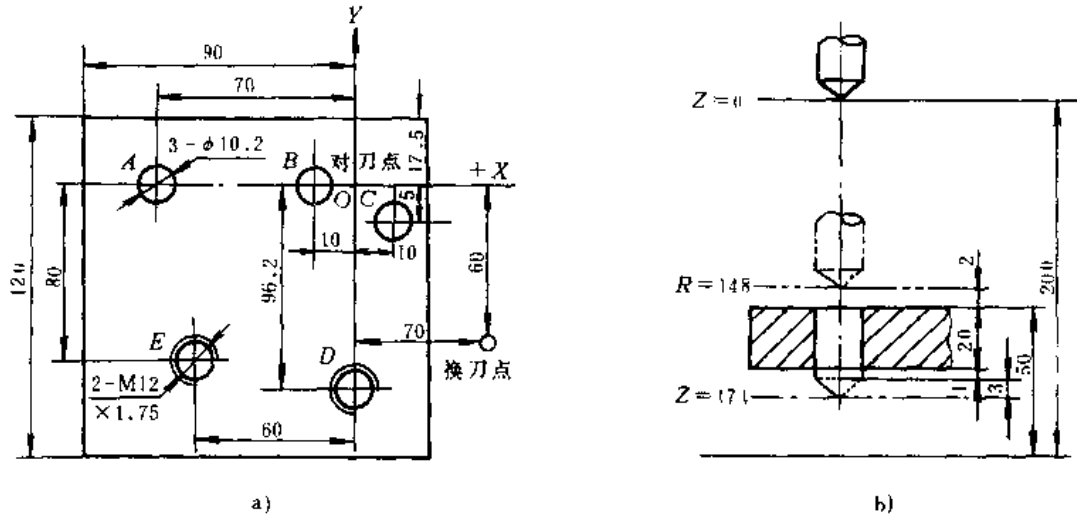


图 7-56

刀点。

11. 按图 7-57 所示加工路线编写出零件加工程序。使用的 NC 机床具有刀具直径补偿和刀具偏置功能。

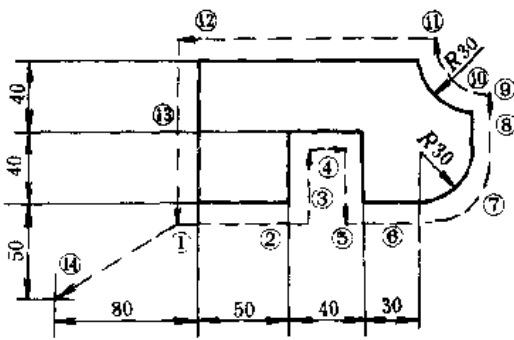


图 7-57

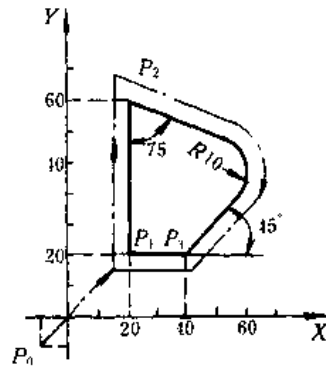


图 7-58

12. 已知下列 APT 的几何定义：

- P1=POINT/30, 60, 0
- P2=POINT/50, 60, 0
- P3=POINT/60, 20, 0
- L1=LINE/P1, P2
- L2=LINE/P2, P3
- GOFWD/L1, T0, L2
- GOLFT/L2, ...

若刀具轴线平行于 Z 轴，试作图表明导动面、零件面和停止面。

13. 按照图 7-58 所示进给路线用 APT 语言编写零件源程序。

## 第八章 冲模与挤压模 CAD/CAM

计算机辅助设计与制造在冲压生产中应用较早。国外一些飞机和汽车公司从 60 年代起便致力于飞机机身和汽车车身的 CAD 的研究。在此基础上复杂曲面的设计和 NC 加工方法得到发展，CAD/CAM 技术也随之引入到冲压模具的设计与制造中。

早在 1973 年，美国的 DIECOMP 公司就研究成功了 PDDC 连续模 CAD 系统。1977 年美国 OBERG 公司开始采用 CAD/CAM 系统，设计制造复杂精密的冲压模具。英国 PSF 公司较早采用 CAD/CAM 技术设计制造形状复杂的车身零件的模具。美国 AUTODIE 公司由于采用 CAD/CAM 技术，在 8~10 个月内就可完成一种车型的模具设计与制造，一年之内可接受 5 种车型的模具订货。

此外，日本、德国和意大利等国家的一些研究单位和公司都在冲模 CAD/CAM 的研究和应用中做了大量工作。

CAD/CAM 在冲模设计与制造中的应用，主要可归纳为以下几个方面：

- 1) 利用几何造型技术完成复杂模具的几何设计。
- 2) 完成工艺分析计算，辅助成形工艺的设计。
- 3) 建立标准模具零件和结构的图形库，提高模具结构和模具零件设计的效率。
- 4) 辅助完成绘图工作，输出模具零件图与装配图。
- 5) 利用计算机完成有限元分析和优化设计等数值计算工作。
- 6) 辅助完成模具加工工艺设计和 NC 编程。

本章将以冲裁模和冷挤压模 CAD/CAM 为例，阐述冲模 CAD/CAM 的有关问题。

### 第一节 冲裁模 CAD/CAM 系统的结构与功能

CAD/CAM 在冲裁模中应用较早。目前，冲裁模 CAD/CAM 系统已经比较成熟，应用亦较广泛。

通常，冲裁模 CAD/CAM 系统可用于简单模、复合模和连续模的设计制造。将产品零件图输入计算机系统后，系统可完成工艺分析计算和模具结构设计，绘制模具零件图和装配图，完成数控线切割编程，并输出纸带。

这里，以微机上运行的冲裁模 CAD/CAM 系统为例，说明其结构、功能与流程。

#### 一、系统的结构

图 8-1 所示为一个在 IBM PC 计算机上运行的冲裁模 CAD/CAM 系统的硬件配置。除计算机外，硬件配置中还包

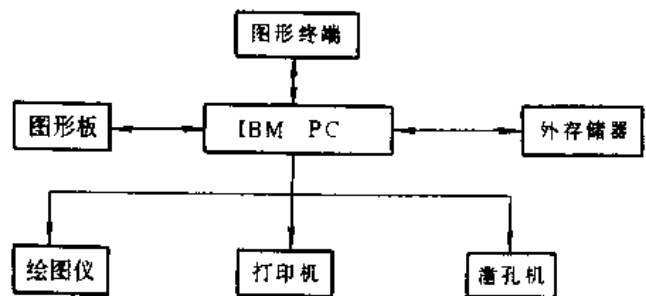


图 8-1 冲裁模 CAD/CAM 系统的硬件配置

括硬盘、图形终端、绘图仪、打印机、图形板和穿孔机。

系统的软件主要由应用程序、数据库、图形库和绘图软件等部分组成（图 8-2）。数据库采用了 DBASE 关系型数据库管理系统。库内存放了工艺设计参数、模具结构参数、标准零件尺寸、公差和材料性能等方面的数万个数据。由于采用了数据库，便利了数据的管理与检索，减少了冗余数据，保证了数据的一致性。图形软件包括图形基本软件和应用软件。图形软件可根据设计结果自动绘制模具图。应用程序包括简单模、复合模和连续模的工艺设计计算、模具结构设计和线切割 NC 自动编程等部分。

## 二、系统的功能与流程

冲裁模 CAD/CAM 系统的运行流程如图 8-3 所示。

首先，将冲裁零件的形状和尺寸输入计算机，图形处理程序将其转换为机内模型，为后续模块提供必要的信息。

常用的冲裁件图形输入方法有编码法、面素拼合法和交互输入法等。

冲裁零件图形的定义可归结为对点、线、圆及其相互位置关系的描述。用编码法

输入冲裁件图形时，将组成零件轮廓的几何元素的类型、尺寸和相互位置关系以代码表示，按照几何元素之间的相互决定关系，依次对轮廓元素进行描述。编码法的优点在于节省机时，可预先对零件图编码形成输入数据，其缺点是编码规则较多，出错率较高。

面素拼合法类似于三维几何造型中的体素拼合，利用一些称为面素的简单几何图形的并、交、差，拼合成冲裁件图形。面素拼合法具有较高的图形输入效率，但其缺点是缺少尺寸公差信息，会给其它应用带来一些困难。

交互输入方法通过在屏幕上交互作图，完成冲裁件的图形输入。这种方法可对图形进行交互编辑、修改、插入和删除，具有输入直观、显示及时等优点。目前，大多数冲模 CAD/CAM 系统都采用这种图形输入方法。

冲裁件为二维形状，是三维冲压件的特殊情况，所以利用第五章中介绍的冲压件几何造型系统也可以完成冲裁件的图形输入。

工艺性判断模块以自动搜索和判断的方式分析冲裁件的工艺性。如零件不适合冲裁，则给出提示信息，要求修改零件图。

毛坯排样模块以材料利用率为目标函数进行排样的优化设计。程序可完成单排、双排和调头双排等不同方式的排样，从近万种排样方案中选出材料利用率最高的方案。

工艺方案的选择，即决定采用简单模、复合模或连续模，通过交互方式实现。程序可以按照内部结合的设计准则自动确定工艺方案，用户也可以自行选择认为合适的工艺方案。这样，系统便可适应各种不同的情况。

如图 8-3 所示，简单模和连续模为一个分支，复合模的设计为另一分支。在各分支内，程序完成从工艺力计算到模具结构与零件设计的一系列工作。凹模和凸模形状的设计可通过屏幕上显示的图形菜单选择确定。凹模内顶杆的优化布置，使顶杆分布合理，顶杆合力中心与压力中心尽量接近。在设计挡料装置时，用户可以用光标键移动屏幕上的圆销，以选定合适的位置。

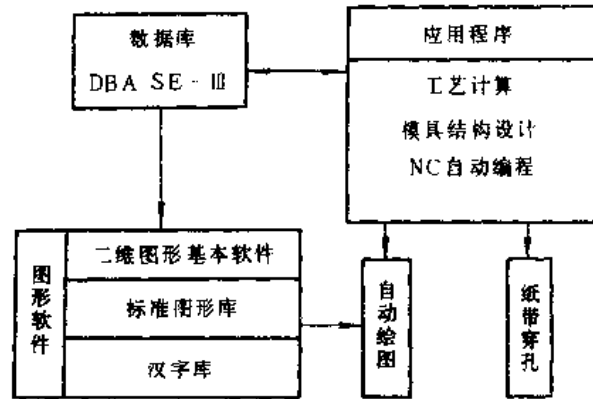
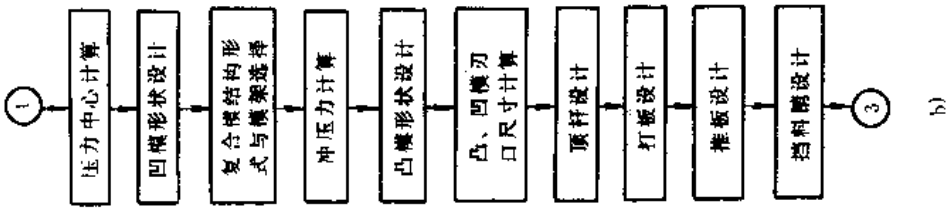
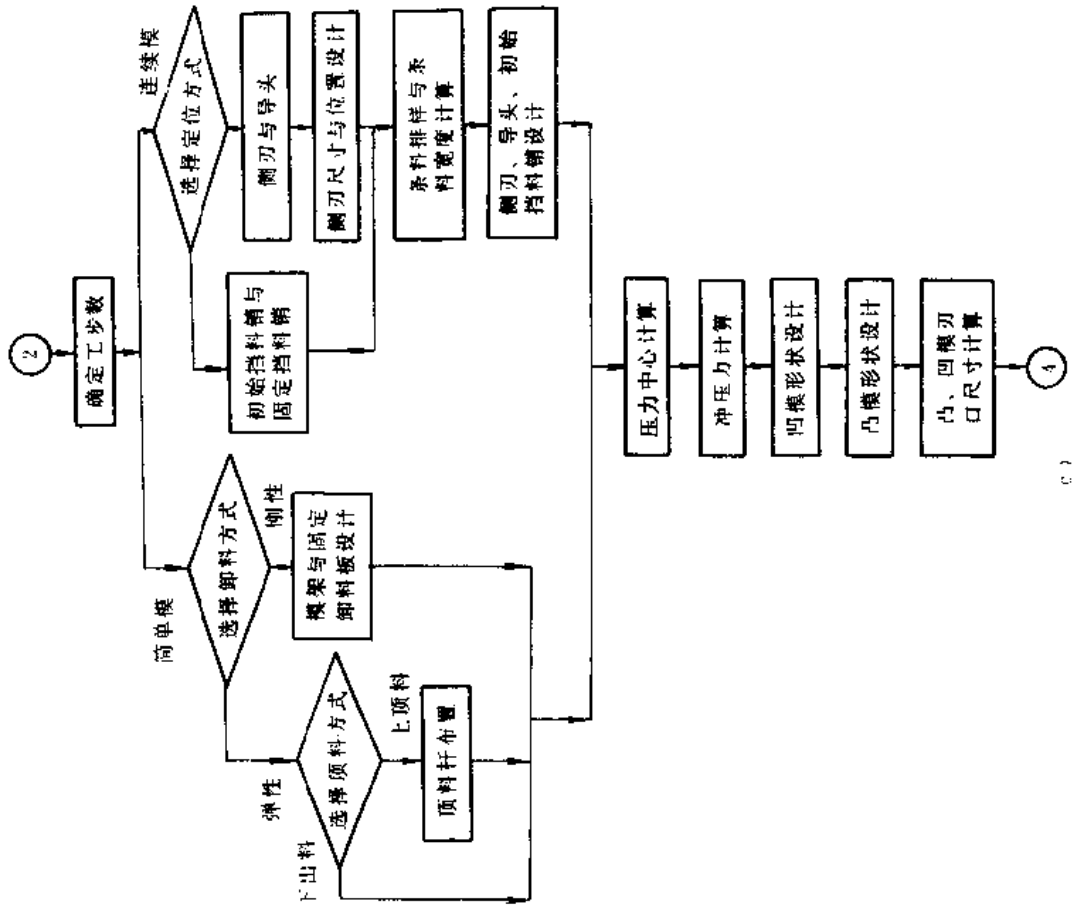
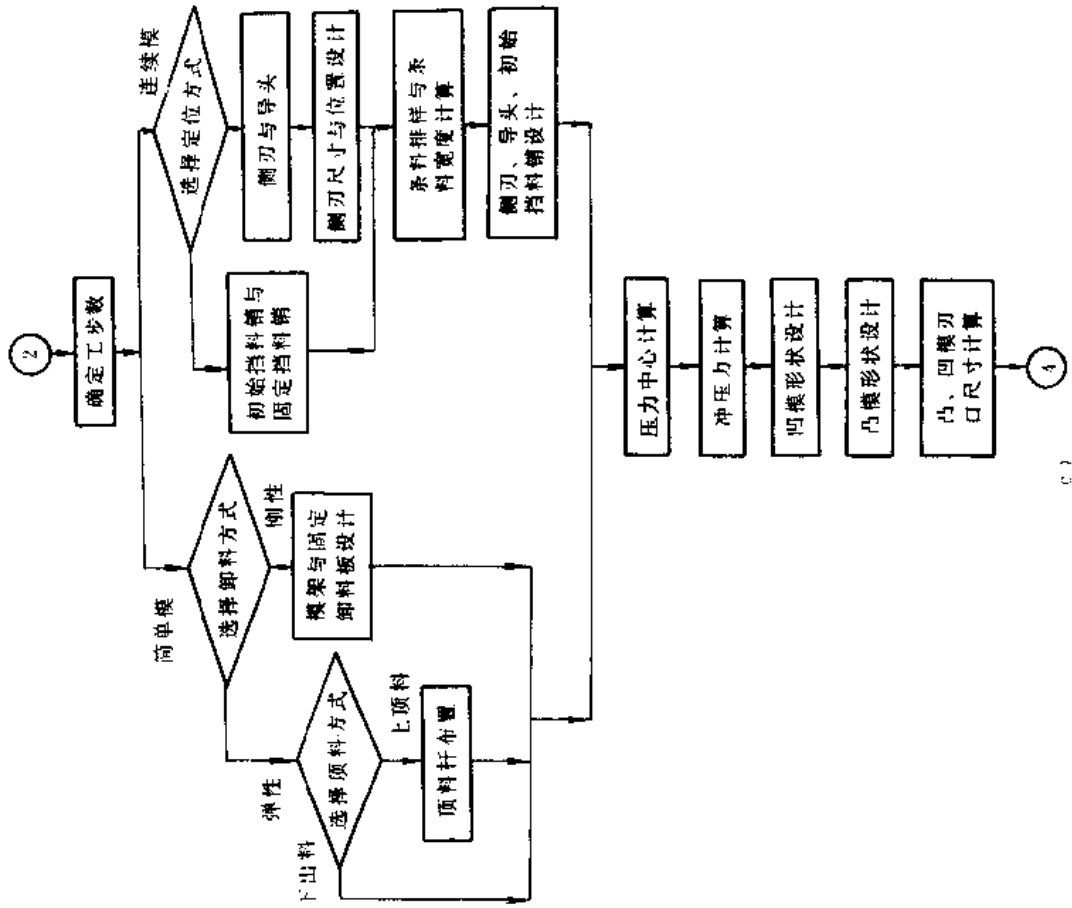


图 8-2 系统的软件结构



b)



c)

图 8-3 冲裁模 CAD/CAM 系统的流程



模具设计完毕后,绘图程序可根据设计结果自动绘出模具零件图和装配图。系统的绘图软件包括绘图基本软件、零件图库和装配图绘制程序等。

绘图基本软件包括几何计算子程序、数图转换子程序、尺寸标注程序、剖面线程序、图形符号包和汉字包。

零件图库由凸模、凹模、上下模座等零件的绘图程序组成。绘制凹模、凸模、固定板和卸料板等零件图的关键是将冲裁件的几何形状信息通过数图转换,生成冲裁件的图形。此外,还要恰当地处理剖面线和尺寸标注。所有这些均可调用基本软件中的有关程序完成。

装配图的绘制采用图形模块拼合法实现,即将产生的零件图的视图转换成图形文件,将各装配件的图形插入到适当的位置,拼合成模具装配图。

该系统利用 AutoCAD 绘图软件包作为绘图的基础软件,将此软件包和高级语言结合使用,完成绘图程序的设计。

数控线切割自动编程模块可选择穿丝孔位置和直径,确定起割点,计算金属丝的运动轨迹,按照数控线切割机床控制程序的格式完成 NC 编程,并可在凿孔机上输出纸带。

## 第二节 毛坯排样的优化设计

在冲裁零件的成本中材料费用占 60% 以上。在大量生产中,即使将材料利用率提高 1%,其经济效益也相当可观。因此,材料的经济利用是冲压生产中的一个重要问题。

毛坯排样的目的在于寻求材料利用率最高的毛坯排列方案。人工排样一般难以获得最佳排样方案,这是因为工件的布置方案多种多样,要比较这些方案材料利用率的高低是手工计算所不能胜任的。另外,工件形状千差万别,单凭经验和直觉作出正确判断往往是困难的。计算机排样较之手工排样具有明显的优越性,可显著提高材料利用率。使用情况表明,计算机优化毛坯排样可使材料利用率提高 3%~7%。

在冲裁模设计中,凹模、卸料板和凸模固定板等零件的设计均需利用排样结果所提供的信息,因此在系统流程图中毛坯排样处于较前的位置。

### 一、毛坯排样问题的数学描述

图 8-4 为实际生产中常用的排样方式,a)、b) 为单排排样,c)、d) 为双排排样,b)、d) 为旋转 180° 的排样。



图 8-4 常用的排样方式

排样在数学上是非线性规划问题,其目标函数为材料利用率。

对于卷料冲裁的情况,可以用步进材料利用率来评价排样方案的优劣。步进材料利用率用下式计算,

$$\eta = \frac{S}{BH}$$

式中, $S$  为一个步距上所排列的零件的面积, $B$  为卷料的宽度, $H$  为进给步距。

对于条料冲裁的情形，材料利用率为

$$\eta = \frac{nS_1}{BL}$$

式中， $S_1$  为一个零件的面积， $n$  为条料上的零件个数， $B$  和  $L$  分别为条料的宽度和长度。

对于整块板料，材料利用率为

$$\eta = \frac{NS_1}{A_1B_1}$$

式中， $N$  为由板料冲得的零件数目， $A_1$ 、 $B_1$  为板料的长度和宽度。

一般来说，排样可由图 8-5 中所示的两个参数  $\phi$  和  $\lambda$  决定。

参数  $\phi$  和  $\lambda$  的变化范围为

$$G \{0 \leq \phi \leq \pi, -\beta(\phi) \leq \lambda \leq \beta(\phi)\}$$

式中， $\beta(\phi)$  为  $\phi$  的单值函数，它反映了图形在  $OY$  轴方向上的宽度与  $\phi$  角的关系。

在一般情况下，排样的优化问题在于寻找  $\phi$  和  $\lambda$  的最佳值，使目标函数

$$\eta(\phi, \lambda) = \frac{S}{B(\phi, \lambda) H(\phi, \lambda)} \quad (\text{对于卷料})$$

或者

$$\eta(\phi, \lambda) = \frac{N(\phi, \lambda) S_1}{A_1 B_1} \quad (\text{对于板料})$$

在域  $G$  内达到最大值。

由于产品零件的复杂性，难以用一个统一的解析式表达排样问题的目标函数。所以，计算机辅助排样的方法虽有多种，但基本思想却是相同的，即从排列零件的所有可能的方案中选出最优者，也就是采用优化设计中的网格法解决毛坯排样问题。

计算机排样方法可分为半自动化和自动化两大类。属于前者的方法需要较多的人机交互作用，利用图形交互设备和图形软件提供的操作图形的功能在屏幕上完成图形布置，利用计算机比较材料利用率的大小，从中选择理想的方案。

自动化排样方法则由程序自动完成排样方案的产生、材料利用率的比较和最优方案的选择。常用的程序排样方法有多种，这里主要介绍多边形法和高度函数法。

## 二、多边形法

这种方法的特点是将平面图形以多边形近似，通过旋转、平移得到不同方案，从中选择最佳者。其主要步骤如下：

1) 多边形化：以直线段代替圆弧段，用多边形代替原来的零件图形，图 8-6 为多边形化的示意图。

2) 等距放大：排样零件之间的最小距离为搭边，计算机排样时处理的为包括了搭边值的等距放大图，即将多边形化的图形向外等距放大  $\Delta/2$ 。当两等距图相切时，自然保证了搭边值  $\Delta$ 。

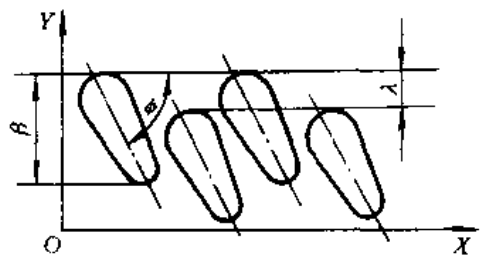


图 8-5 决定排样的参数



图 8-6 零件图形的多边形化

- 3) 图形的旋转、平移：通过旋转、平移使等距图相切，这样就产生了一种排样方案。
- 4) 与已存储方案比较，保留材料利用率高的方案。如全部搜索完毕，转至 5)，否则转到 3)。
- 5) 输出排样结果。

图 8-7 为采用多边形法实现旋转 180° 单排排样的流程图。这种排样方法的优点是概念清晰，可适用于各种情况，其缺点是运行时间较长。

### 三、高度函数法

分析毛坯排样时的冲裁件图形的位置特点可知，在排样图上各图形的轴线总是相互平行的（图 8-8）。如前所述，在一般的排样方法中以  $\phi$  和  $\lambda$  为参数进行优化。高度函数法则是根据图形轴线的平行性，采用各图形的相对高度差  $h_i$  为优化排样参数。在图 8-8 所示的双排排样中，以  $h_{12}$  和  $h_{23}$  为排样参数。

参数  $\phi$  和  $\lambda$  与参数  $h_{12}$  和  $h_{23}$  之间存在以下关系：

$$\phi = \pi/2 - \text{tg}^{-1}(h/r) \quad (8-1)$$

$$\lambda = h_{12} \sin \phi - r_{12} \cos \phi \quad (8-2)$$

如图 8-8 所示，在排样中各个图形均置于其自身坐标系中，第一、第二和第三图形的坐标系分别为  $x_1o_1y_1$ 、 $x_2o_2y_2$  和  $x_3o_3y_3$ 。 $r_{12}$  和  $h_{12}$  为第二图形自身坐标系原点在第一图形自身坐标系中的坐标。 $r_{23}$  和  $h_{23}$  为第三图形坐标系原点在第二图形坐标系中的坐标。式 (8-1) 中， $h$  为  $h_{12}$  与  $h_{23}$  的代数和，表示  $o_3$  点到  $x_1$  轴的距离； $r$  为  $y_3$  轴与  $y_1$  轴的间距，其值为

$$r = \max\{[r_{12}(h_{12}) + r_{23}(h_{23})], r_{13}(h)\} \quad (8-3)$$

#### (一) 可行域与相切条件

设图形在其自身坐标系中包括搭边值在内的高度为  $t$ （图 8-9），则搜索最优排样方案的可行域为

$$G \{-t \leq h_{12} \leq t, -t \leq h_{23} \leq t\}$$

因为各图形自身坐标的  $y$  轴在排样图中相互平行，各图形的高度皆为  $t$ ，所以  $G$  为方形域。

如果将可行域等分网格数定为  $2m \times 2m$ ，则搜索时  $h_{12}$  和  $h_{23}$  每次变化的量  $\Delta t = t/m$ 。程序分两次优化，第一次为初步优化，第二次为细分优化，即在第一次求得的最优值附近细分网格，进一步搜索。设第一次优化求得的最优值为  $h_{12}$  和  $h_{23}$ ，第二次优化时的搜索区域为

$$G' \{h_{12} - \Delta t \leq h'_{12} \leq h_{12} + \Delta t, h_{23} - \Delta t \leq h'_{23} \leq h_{23} + \Delta t\}$$

通过两次搜索，求得的最优值已相当精确。

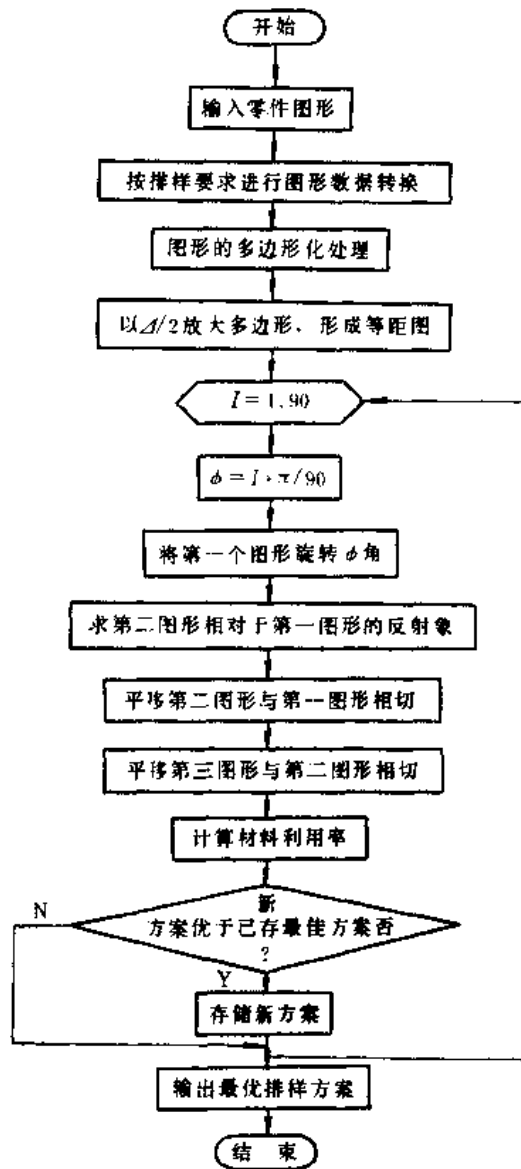


图 8-7 多边形法的流程框图

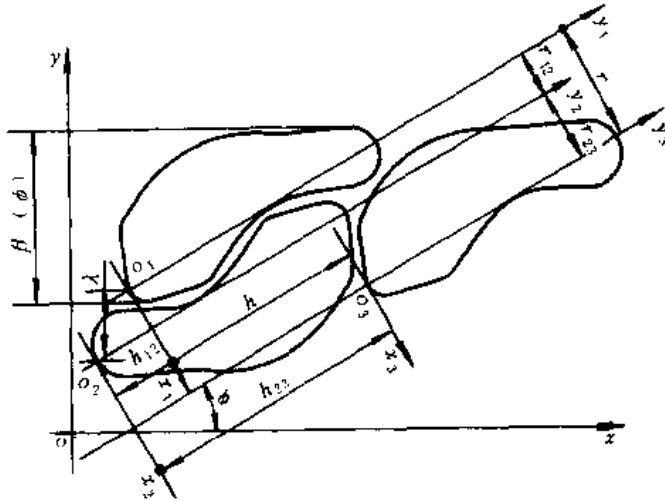


图 8-8 排样中图形间的关系

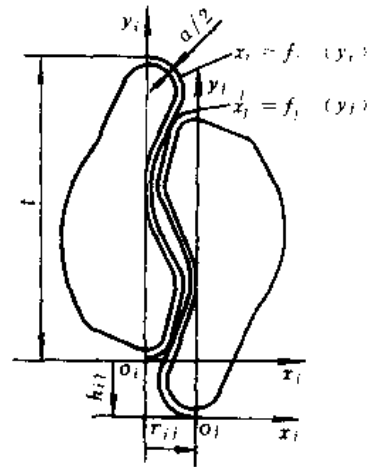


图 8-9 两图形相切时的关系

为了获得排样方案，通常将图形等距放大半个搭边值，在排列图形时使相邻的放大图形相切。确定两图形相切的算法对于优化排样的速度有重要影响。在图 8-9 中，两图形置于自身的坐标系  $x_i, o_i, y_i$  和  $x_j, o_j, y_j$  中。图形以其最高点和最低点为界分为两部分，设图形  $i$  的右半部分的曲线为  $x_i = f_i(y_i)$ ，图形  $j$  的左半部分曲线为  $x_j = f_j(y_j)$ 。当两图形相切时，存在如下关系：

$$r_{ij} = \begin{cases} \max_{t \geq y_i \geq h_{ij}} [f_i(y_i) - f_j(y_i - h_{ij})] & t \geq h_{ij} \geq 0 \\ \max_{t + h_{ij} \geq y_i} [f_i(y_i) - f_j(y_i - h_{ij})] & -t \leq h_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (8-4)$$

式中， $r_{ij}$  为  $o_j$  在  $x_i, o_i, y_i$  坐标系中的横坐标。利用式 (8-4) 的关系，可以预先在  $h_{12}$ 、 $h_{23}$  和  $h_{31}$  的等分点上算出  $r_{12}$ 、 $r_{23}$  和  $r_{31}$  的值，并列成数据表。在排样过程中可直接调用这些数值，因而提高了效率。

这种确定两图形相切的方法与加密点排样法采用的算法类似，在确定图形相切时避免了计算量很大的迭代运算。但是，应该指出的是，这种方法对于凸图形是完全正确的，对于具有凹下部分的图形在绝大多数情况下也可找到最优值，但在个别情况下可能丢失最优解。正如绝大多数优化方法都有其一定的适用范围，这种方法也有其适用范围，但是其运行速度快，计算效率高，所以仍不失为一种好的排样方法。

(二) 条料宽度、步距和材料利用率的计算

如图 8-10 所示，将图形放置在极坐标系中，极坐标系原点与其自身参考坐标系原点重合， $x$  轴方向与自身参考坐标系的  $x_i$  轴方向一致，图形的轮廓曲线为  $\rho(\theta)$ 。设代表排样条料方向的  $l$  轴与  $x$  轴之间的夹角为  $\varphi$ ，则图形轮廓和  $l$  轴的最大距离为

$$T(\varphi) = \max_{0 \leq \theta \leq 2\pi} [\rho(\theta) \sin(\theta - \varphi)] \quad (8-5)$$

这里，将  $T(\varphi)$  定义为高度函数。

在图 8-8 中， $\phi$  角可由式 (8-1) 确定，排样条料方向与图形自身坐标系  $x_i$  轴的夹角为

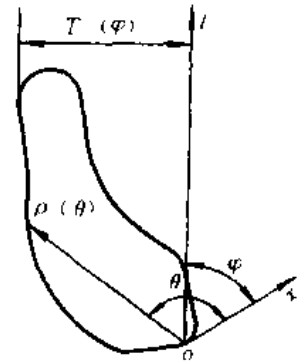


图 8-10 高度函数的定义

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \phi \tag{8-6}$$

因此,条料的宽度  $B$  可用下式计算,

$$B = \max \left[ T_1 \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right), T_2 \left( \frac{\pi}{2} - \phi \right) + \lambda \right] - \min \left[ T_1 \left( \frac{3}{2} \pi - \phi \right), T_2 \left( \frac{3}{2} \pi - \phi \right) + \lambda \right] + a \tag{8-7}$$

式中,  $T_1$ 、 $T_2$  分别为第一图形和第二图形的高度函数,  $a$  为搭边值。因为在工件的等距放大图中放大量为  $a/2$  (图 8-9), 所以式中应包括搭边值  $a$ 。如果考虑到工件间的搭边和侧搭边不同, 可对此项进行修正。  $T_i \left( \frac{3}{2} \pi - \phi \right)$  表示图形  $i$  的下半部轮廓和参考轴  $l_i$  之间的最大距离。  $\lambda$  按式 (8-2) 计算, 因为  $\lambda$  值表示工件 2 相对于工件 1 的错移量, 所以其值有正负之分。

参考图 8-8, 不难得出计算进给步距  $H$  的公式:

$$H = \sqrt{r^2 + h^2} = \sqrt{[\max(r_{12} + r_{23}, r_{13})]^2 + (h_{12} + h_{23})^2} \tag{8-8}$$

所以,条料的步进材料利用率  $\eta$  可用下式计算,

$$\eta = \frac{nS_1}{BH} = \frac{nS_1}{B(h_{12}, h_{23})H(h_{12}, h_{23})} \tag{8-9}$$

式中,  $S_1$  为一个零件的面积,  $n$  为排样的排数。条料的宽度  $B$  和进给步距  $H$  皆为  $h_{12}$  和  $h_{23}$  的函数, 可用式 (8-7) 和 (8-8) 计算。

### (三) 排样过程

高度函数法的排样过程如图 8-11 所示。排样前首先进行数据处理, 将图形信息转换成便于排样的数据形式。前置数据处理包括输入图形信息和排样方式, 计算图形的面积, 选取搭边值, 并以二分之一的搭边值等距放大图形。对放大处理后的图形作多边形化处理, 建立图形的自身坐标系。根据式 (8-5) 建立图形的高度函数表, 以便于排样过程中调用。变量  $\phi$  在其变化域  $[0, 2\pi]$  内的等分数取为 128, 计算精度取为搭边值的 5%。

数据准备完毕后, 在  $h_{12}$  和  $h_{23}$  的变化域划分网格。为了在排样过程中快速使图形相切, 在  $h_{12}$  和  $h_{23}$  的等分点上按式 (8-4) 计算  $r_{ij}$  的值, 并列成数表。排样时用查表法可以很快求得  $B$  和  $H$  的值。在程序中进行了两次优化, 首次优化搜索整个方形域  $G$ , 获得初步最优方案。然后, 在最优解附近确定搜索区域  $G'$ , 并在此区

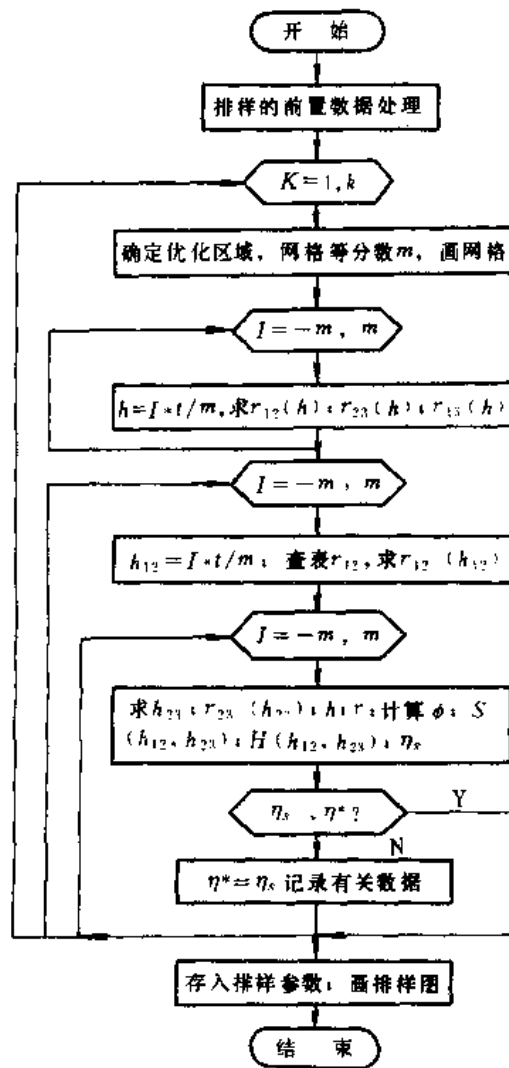


图 8-11 高度函数法的排样过程

域内以较小步距搜索，最终获得较精确的最优解。程序中将  $G$  域的边长分为 50 等份，将  $G'$  域的边分为 20 等份。在 IBM PC 计算机上运行，3~5min 便可完成优化排样。

### 第三节 冲裁工艺方案的设计

冲裁工艺方案合理与否，直接影响产品的质量、生产率和模具寿命，所以工艺方案设计模块是冲裁模 CAD/CAM 系统的重要组成部分。冲裁工艺方案设计的主要内容包括选择模具类型，即采用单冲模、复合模或连续模，以及确定单冲模和连续模的工步与顺序。

#### 一、模具类型的选择

由计算机设计冲裁工艺方案，首先必须建立设计模型。在工艺方案设计中，选择模具类型通常遵循以下准则：

(1) 制件的尺寸精度 当制件内孔与外形间或内孔间定位尺寸精度要求较高时，应尽可能采用复合模，这是因为复合模冲出的制件精度高。

(2) 制件的形状与尺寸 当制件的料厚大于 5mm，外形尺寸大于 250mm 时，不宜采用连续模。若制件的孔或槽间（边）距太小，或悬臂既窄又长时，不能保证复合模的凸凹模强度，故应采用单冲模或连续模。

(3) 生产批量 由于复合模和连续模生产率高，所以大批量生产的制件宜采用连续模或复合模。

(4) 模具加工条件 复合模和连续模结构复杂，对加工条件要求较高。

上述准则中，有的可以用数学模型描述，有的则不便于用数学模型描述。例如，可以采用搜索和图形类比方法，由产品模型中求得最大外形尺寸、尺寸精度，判断孔、槽间距是否满足要求，凸模安装位置是否发生干涉等，从而确定能否采用复合模。对于不便于采用数学模型描述的条件，可采用人机对话方式，由用户根据生产实际情况作出决定。

模具类型选择的程序框图示于图 8-12。选择、判断的过程是按料厚、外形尺寸、孔槽间（边）距、孔位尺寸精度和凸模安装位置是否干涉的顺序进行的。在程序运行过程中，安排了数处人机对话。例如，当发现某一孔槽间（边）距小于  $W$  ( $W=1.5t$ ) 时，询问是否有必要重新判断。用户可决定是否要对  $W$  值进行调整。当程序已判断不能使用复合模时，仍允许用户根据生产批量和模具加工条件等因素决定采用单冲模或连续模。这种将经验判断与程序自动判断相结合的方法，不仅可达到设计的高效率，而且可保证工艺方案的合理性。

在选择模具类型的程序中，冲裁零件的最大外形尺寸和孔、槽间（边）距可以自动确定。判断孔、槽间（边）距的值是为了保证复合模壁厚不小于一定的值，以保证其强度。为此，可将轮廓图形等距缩放一定值，然后判断各图形是相离还是相交。若内外轮廓或内轮廓间相交，则冲裁件的孔边（间）距不能满足复合模的要求。

#### 二、连续模的工步设计

连续模是在压力机的一次行程中，在不同工位上完成多道工序的模具。在设计连续模时，首先进行工步设计，包括确定工步数，安排工序顺序和设计定位装置等。连续模的工步设计，直接影响模具的结构和质量。工步设计须综合考虑材料利用率、尺寸精度、模具结构与强度，以及冲切废料等问题。

连续冲裁模的工步设计一般遵循以下原则：

- 1) 为保证模具强度，将间距小于允许值的轮廓安排在不同工步冲出。
- 2) 有相对位置精度要求的轮廓，尽量安排在同一工步上冲出。
- 3) 对于形状复杂的零件，有时通过冲切废料得到工件的轮廓形状。
- 4) 为保证凹模、卸料板的强度和凸模的安装位置，必要时可增加空工步。
- 5) 落料安排在最后工步。
- 6) 为减小模具尺寸，并使压力中心与模具中心尽量接近，将较大的轮廓安排在前面的工步。
- 7) 设计合适的定位装置，以保证送料精度。

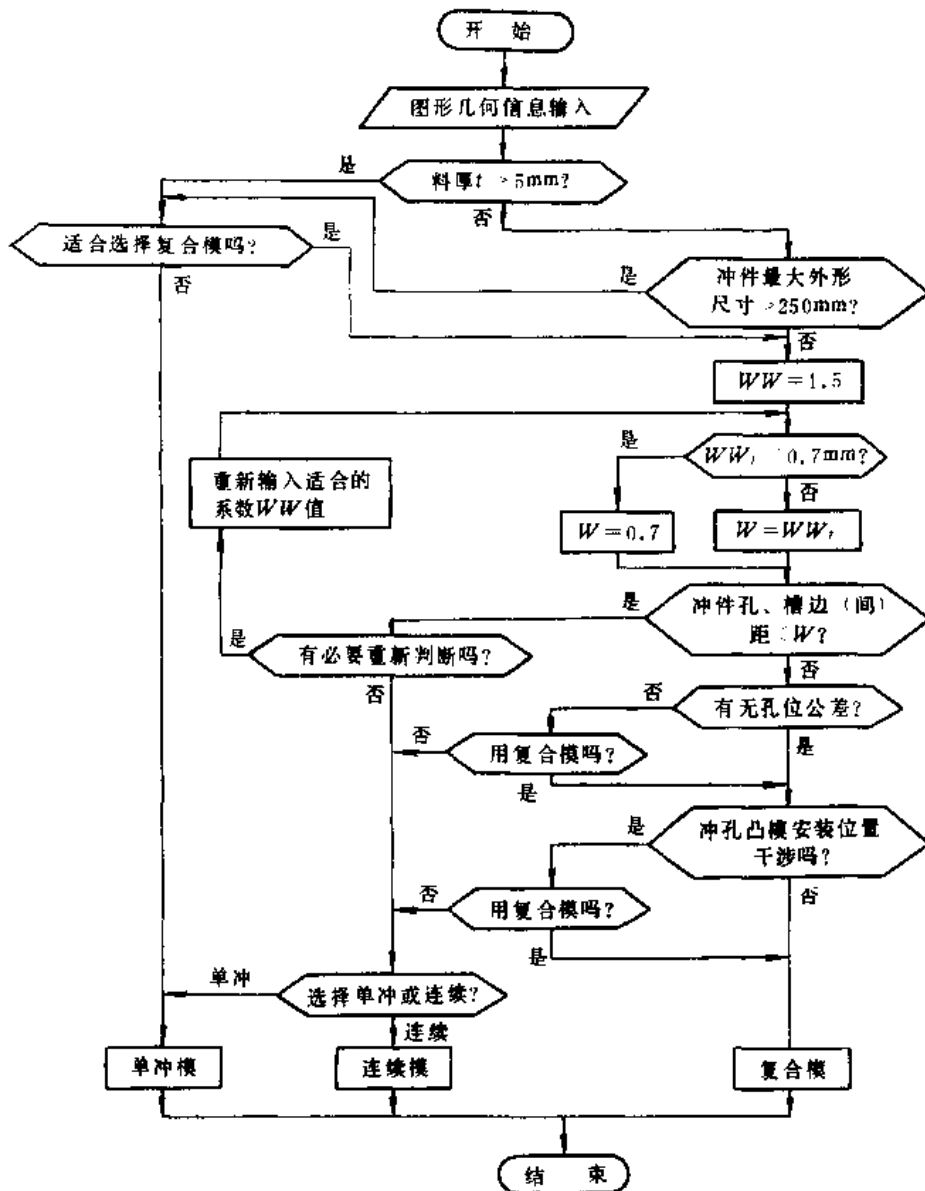


图 8-12 模具类型的选择过程

### (一) 位置精度关系模型和干涉关系模型的建立

为了在工步设计时将位置精度要求的轮廓放在同一工步，而将间距小于一定值的轮廓设置在不同工步，建立了位置精度关系模型和干涉关系模型。

冲裁件图形为多个轮廓的集合，可表示为

$$A = \{K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n\}$$

式中  $K_i$  表示组成冲裁件图形的第  $i$  个轮廓。定位尺寸有精度要求的轮廓组成了集合  $A$  上的一个关系  $\rho_1$ 。 $\rho_1$  包括了全部有位置精度要求的孔。若两轮廓  $K_i$  和  $K_j$  间的定位尺寸有精度要求，则序偶  $(K_i, K_j) \in \rho_1$ 。由  $\rho_1$  可形成位置精度关系矩阵

$$M1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } (K_i, K_j) \in \rho_1 \\ 0 & \text{若 } (K_i, K_j) \notin \rho_1 \end{cases}$$

式中， $1 \leq i, j \leq n$ ， $n$  为轮廓个数。

为了确定关系  $\rho_1$ ，必须判别各轮廓间的位置尺寸关系。冲裁件图形的输入方法不同，建立的冲裁件几何模型不同，判别轮廓间位置尺寸关系的方法也不相同。

为保证凹模的强度，须使各型孔间的壁厚大于一定值。为此，可将冲裁件图形的内轮廓等距放大，然后判断各等距放大图形是否相互干涉。相干涉的轮廓组成了冲裁件轮廓集合  $A$  上的关系  $\rho_2$ 。若两轮廓  $K_i$  和  $K_j$  间相互干涉，那么序偶  $(K_i, K_j) \in \rho_2$ 。与位置精度关系类似，可形成干涉关系矩阵

$$M2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } (K_i, K_j) \in \rho_2 \\ 0 & \text{若 } (K_i, K_j) \notin \rho_2 \end{cases}$$

式中， $1 \leq i, j \leq n$ ， $n$  为轮廓个数。

矩阵  $M1$  和  $M2$  皆为对称矩阵，这是因为位置精度关系和干涉关系具有对称性的缘故。程序在自动完成工步设计时，以矩阵  $M1$  和  $M2$  为参考矩阵，便可将有位置精度要求的轮廓置于同一工步，而将间距小于允许值的轮廓安排在不同工步。

## (二) 工步的设计过程

图 8-13 所示为一个冲裁模 CAD/CAM 系统设计连续模工步的过程。首先，输入冲裁件的几何模型和优化的毛坯排样方案。接着，搜索确定定位尺寸有精度要求的内轮廓，形成位置精度关系矩阵  $M1$ 。

为避免过长的悬臂和窄槽，以保证凸模和凹模的强度，有时采用冲切废料的方式冲出零件轮廓。有许多尺寸小、形状复杂的零件，只有用切废料的方法才能冲出。程序可设计三种形式的废料形状，即局部废料、对称双排套裁废料和完全冲废料（图 8-14）。对于完全冲废料的情况，以后不必设置落料工步。根据选择的废料形式，可对毛坯排样方案加以调整，以便于废料的冲制。废料形状的设计采用在屏幕上交互作图的方法完成。设计的

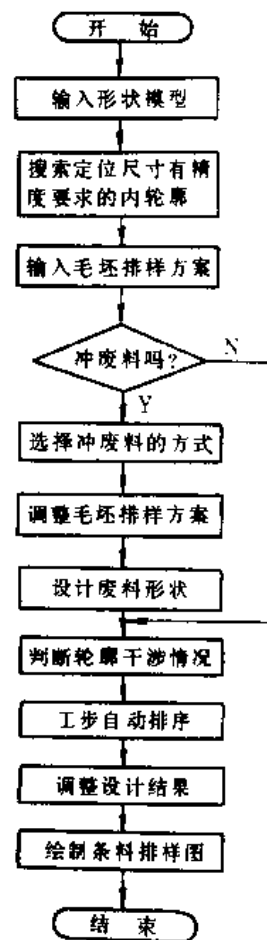


图 8-13 工步设计流程图



废料轮廓形状将与原零件的轮廓一起参与工步排序。

在建立了位置精度关系模型和干涉关系模型之后，工步排序的问题即转换为将轮廓集合  $A$  划分为若干子集  $B_i$  的问题，即存在以下关系：

$$\bigcup_{i=1}^m B_i = A$$

每个子集为一个工步上冲制轮廓的集合，子集的个数即为工步数。

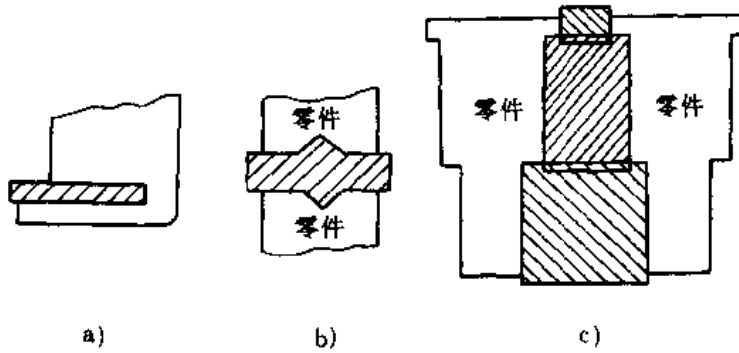


图 8-14 三种形式的废料

a) 局部废料 b) 双排套裁废料 c) 全冲废料

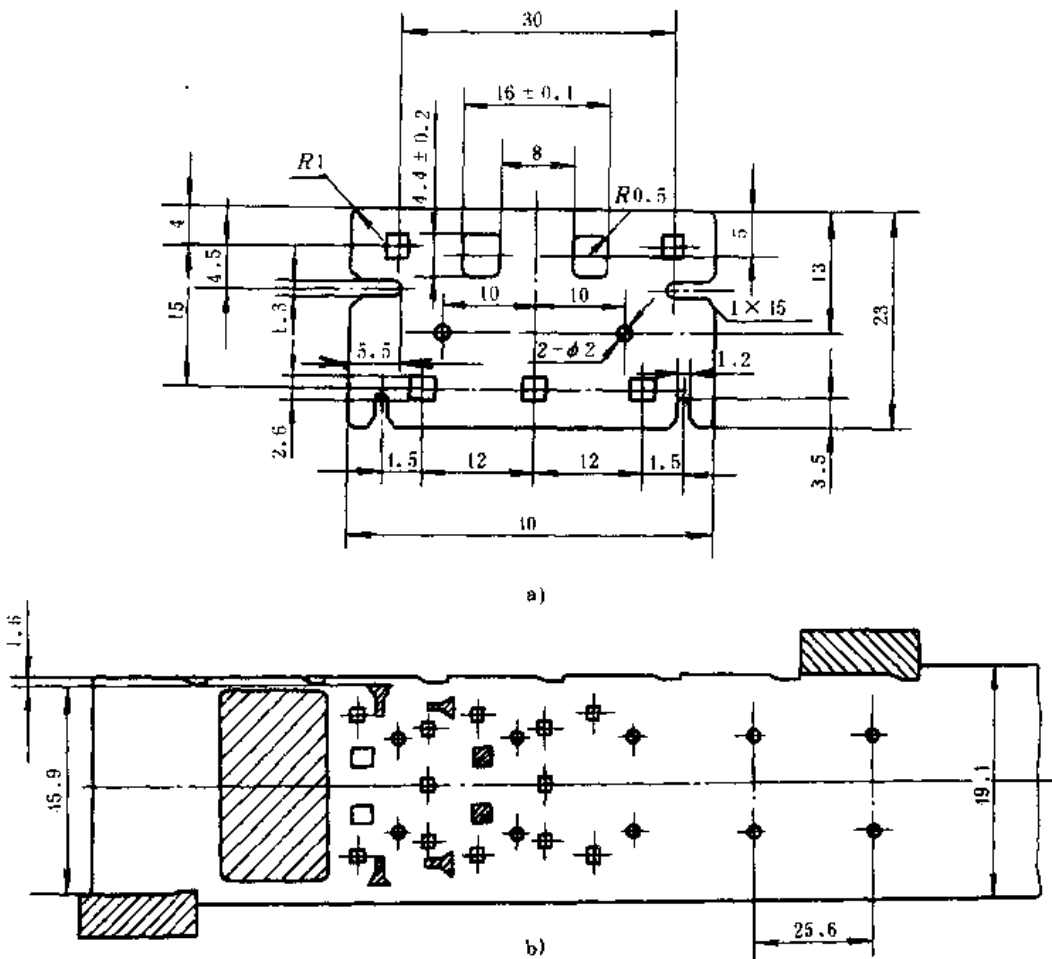


图 8-15 条料排样图

a) 零件图 b) 排样图

自动排序时,尽量将有位置精度要求的轮廓分配在同一工步。因此,对于轮廓 $K_i$ 和 $K_j$ ,如果矩阵 $M1$ 的元素 $a_{ij}=1$ ,则尽量分在同一工步。对于互相干涉的轮廓,自动排序时须将其分配在不同工步。所以,对于轮廓 $K_i$ 和 $K_j$ ,若矩阵 $M2$ 的元素 $b_{ij}=1$ ,则将其分在不同工步。冲制定位孔的工步放在开始位置。除完全冲废料的情况外,落料工步布置在最后。为了使压力中心和模具中心尽量接近,并减小模具尺寸,在工步排序时将轮廓周长较大子集排列在前面的工步。

由于影响工步设计的因素很多,并且有些因素,例如生产条件、模具加工能力等,难以定量描述,所以完全依靠自动设计工步,有时会产生与实际条件不相容的设计结果。因此,工步自动安排完毕后,将条料排样图显示在屏幕上,用户可操纵光标移动轮廓形状,改变轮廓组合,设置空工步,增加工步数,直至获得满意的工步设计。

图 8-15 为一冲裁件的条料排样图。

## 第四节 冲裁模结构设计

模具标准化是建立模具 CAD/CAM 系统的重要基础。冷冲模国家标准 GB2851~2875—81 为冲裁模 CAD/CAM 系统的建立提供了有利条件。该标准包括 14 种典型的模具组合、12 种模架结构和模座、模板、导柱、导套等标准零件。在此基础上,不同厂家为适应各自的需要,亦可补充本企业的冲模标准。

由于冲裁模 CAD/CAM 系统采用了冷冲模国家标准,所以冲裁模的结构设计主要是选择模具组合的型式,选用模架和其它标准装置,以及设计凸模和凹模等零件。

通常,冲模 CAD/CAM 系统都将模具零部件分为两大类,一类为标准零部件,如底板、导柱、导套等;另一类为非标准零部件,如凸模、凹模、推板等。标准零件的数据是不变的,存放在数据库中,在设计过程中可进行选择调用。非标准零件的数据是变化的,因产品零件的不同而异。这种做法大大提高了设计的效率。

本节主要介绍模具结构设计软件的结构、凹模与凸模的设计和顶料装置的设计。

### 一、模具结构设计软件的结构

图 8-16 所示为一冲裁模 CAD/CAM 系统模具结构设计模块的结构图。该模块分为三个子模块,即系统初始化模块、模具总装与零件设计模块、图样生成模块。

初始化模块根据产品的工艺设计信息和用户要求,对系统参数进行初始化,显示系统的用户菜单。

模具总装及零件设计模块是模具结构设计模块的主要部分,它又分为基本结构设计、工作零件设计、杆件与板件的拼合、板件设计与编辑等八个子模块。

基本结构设计子模块可根据用户要求,完成模具标准结构的选择或非标准结构的设计。工作零件设计子模块,以交互方式进行凹模、凸模和凸凹模的设计,最后得到记录这些零件信息的零件描述表。板件设计与编辑子模块完成板件的设计、插入和删除。杆件与板件的拼合子模块可实现杆件与板件的拼合,自动处理内孔参数,处理拼合结果。其它子模块分别完成模架、卸料装置、紧固装置和辅助装置的设计。

模具结构设计模块中的图样生成子模块,根据总装及零件设计子模块产生的总装图、零件图和零件描述表,画剖面线,在总装图上添加指引线、明细表和标题栏,产生绘图文件,以

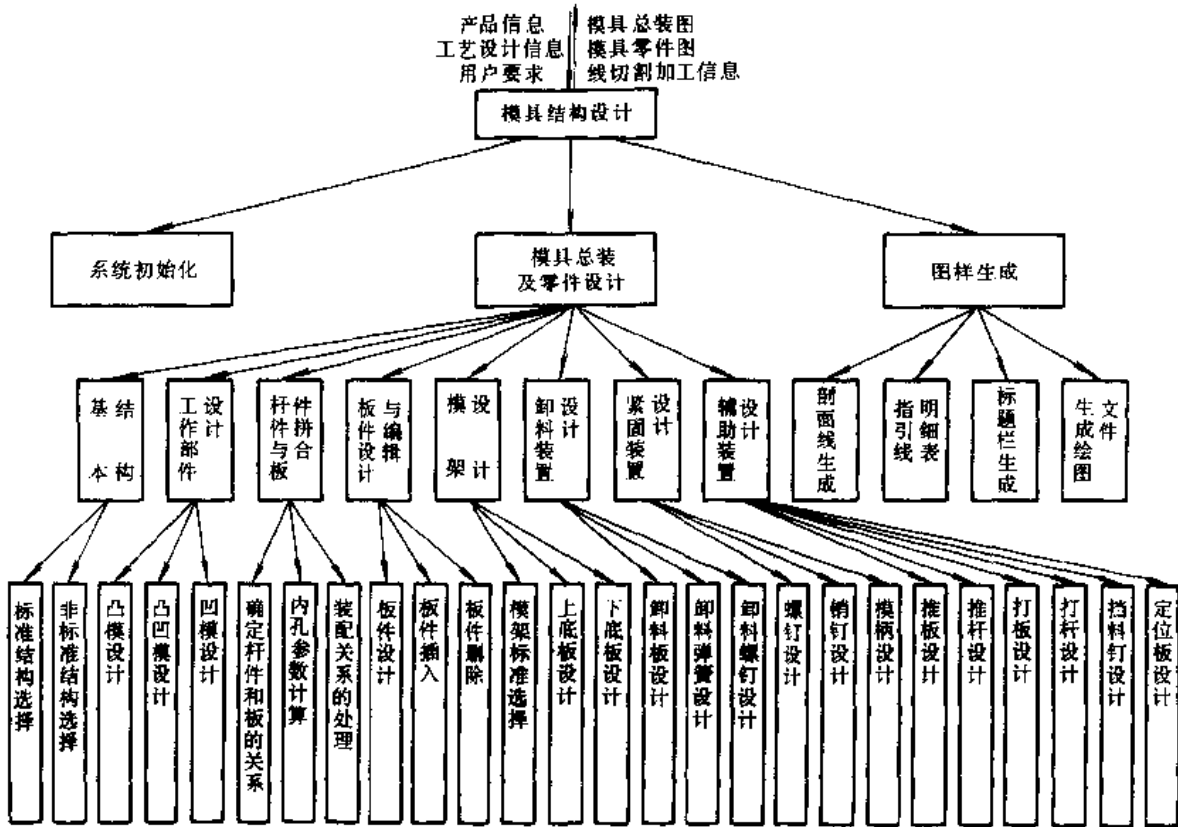


图 8-16 模具结构设计模块的结构图

便在绘图机上绘出图样。

模具结构设计模块是以 AutoCAD 为支撑软件，进行二次开发形成的。标准模具零件可以图块的形式存放在图库中。为了能把图块调至别的图形中，需要指定其插入基点。在将图块插入到其它图形时，可拖动图块使其基点与插入点重合。AutoCAD 的块插入命令对快速生成模具总装图特别有用。利用 AutoLisp 功能，还可实现模具零件的参数化绘图。有关的设计和绘图程序可参阅本章第七节。

图 8-17 为冲裁模 CAD/CAM 系统绘制的模具总装图。

### 三、凹模与凸模的设计

凹模和凸模的设计分为刃口尺寸计算与外形尺寸设计两部分。

在计算凹模和凸模的刃口尺寸时，和常规设计一样，落料以凹模为设计基准，冲孔以凸模为设计基准。由于冲裁件的尺寸会随刃口的磨损而发生变化，所以计算刃口尺寸时应考虑磨损问题。根据磨损情况，可将刃口尺寸分为磨损后变大的尺寸、磨损后变小的尺寸和磨损后不变的尺寸三大类。程序可在图形输入模型的基础上区分三类尺寸，并按以下公式确定刃口尺寸。

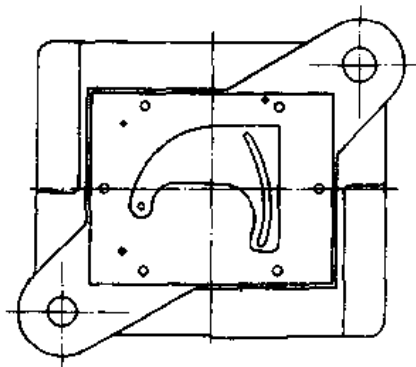
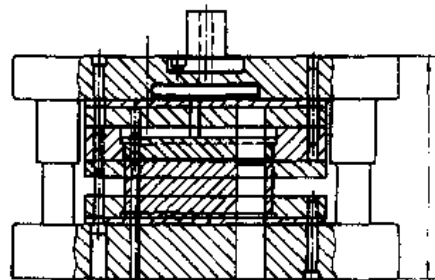


图 8-17 冲裁模总装图

$$A = (A_{\max} - x\Delta)^{+\frac{\Delta}{4}}_0$$

$$B = (B_{\min} + x\Delta)^{-\frac{\Delta}{4}}_0$$

$$C = (C_{\min} + 0.5\Delta)^{\pm\frac{\Delta}{4}} \quad (\text{当工件尺寸为 } C^{+\frac{\Delta}{4}} \text{ 或 } C^{-\frac{\Delta}{4}} \text{ 时})$$

$$C = C \pm \frac{\Delta}{8} \quad (\text{当工件尺寸为 } C^{\pm\Delta} \text{ 时})$$

上述公式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为模具刃口的三类尺寸;  $A_{\max}$ 、 $B_{\min}$  和  $C_{\min}$  分别为相应的最大或最小尺寸;  $\Delta$  为工件的公差值。

按国家标准设计冲裁模时, 凹模尺寸是关键尺寸。对选定的模具结构型式, 当凹模尺寸确定后, 其它模具零部件尺寸 (如模架闭合高度、凸模长度等) 也随之确定。

凹模的外形尺寸应保证凹模具有足够的强度, 以承受冲裁时产生的应力。通常的设计方法是按零件的最大轮廓尺寸和冲裁件的厚度确定凹模的高度和壁厚, 从而确定了凹模的外形尺寸。因此, 凹模的外形尺寸是由冲裁件的几何形状、厚度、排样转角和条料宽度等因素决定的。

凹模尺寸的设计过程如图 8-18 所示, 图中  $K$ 、 $L$ 、 $g$ 、 $t$  分别表示模具组合类型、排样参数、零件的几何形状和材料厚度。送料方向由条料宽度和零件在送料方向上的最大轮廓尺寸的相对关系决定。凹模形状 (圆形或矩形) 的确定和模具材料的选择, 由人机对话和菜单选择完成。

凹模的工作部分有如图 8-19 所示的四种型式。设计时, 屏幕上显示出该图形菜单。用户键入适当数字, 便可选定相应的型式。凹模口部的台阶高度和锥角等有关尺寸, 由程序根据选择的型式自动确定。

利用凸模设计模块可以设计四种型式的凸模。图 8-20 为选择凸模型式的图形菜单。根据凹模尺寸和模具组合类型, 查询数据库中的标准数据, 可以确定凸模的长度等尺寸。凸模材料用人机对话方式选定。程序可以自动处理凸模在固定板上安装位置发生干涉的情况, 确定凸模大端切去部分的尺寸。

一旦确定了凹模尺寸, 选择了典型组合型式, 其它模具零件, 如固定板、垫板和卸料板等, 可根据标准确定其尺寸。模架的闭合高度也随凹模和典型组合型式的确定而确定。模架零件包括上模座、下模座、导柱和导套等, 将由凹模尺寸、模架的闭合高度和选择的模架型式, 根据相应的标准数据确定。因此, 模具刃口尺寸和凹模外形尺寸的计算是模具零部件设计的主要内容, 其它模具零件的尺寸可由标准确定。对于有些零件, 如卸料板和垫板等, 在由标准确定其基本尺寸后, 尚需将与冲裁件形状有关的孔考虑进去。

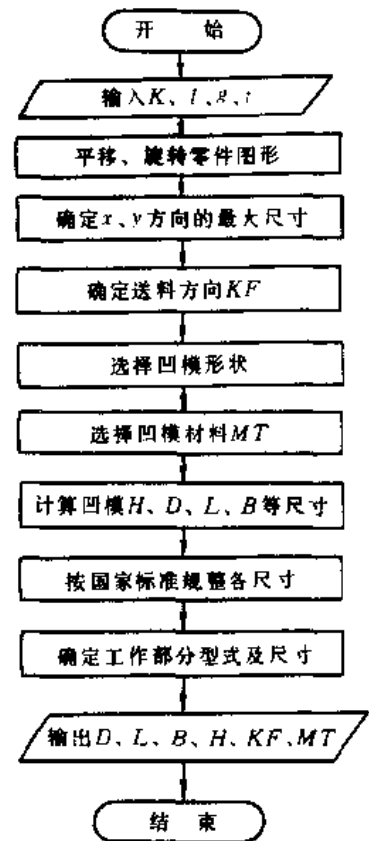


图 8-18 凹模设计过程

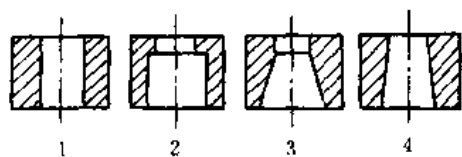


图 8-19 凹模工作部分型式 (1~4)

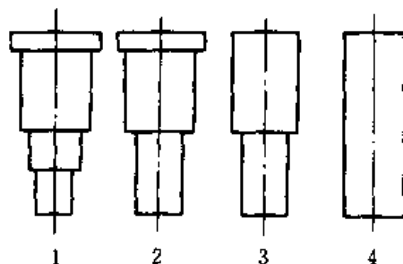


图 8-20 选择凸模型式 (1~4) 的图形菜单

### 三、顶料装置的设计

为了将工件或废料从凹模中推出, 需要设计顶料装置, 包括推板、顶杆、打板和打杆等零件。这里介绍一种优化布置顶杆的方法。

图 8-21 给出了顶杆的几种布置方式。顶杆的合理设计与布置应满足以下条件:

- 1) 顶杆的合力中心应尽可能地接近冲裁件的压力中心。
- 2) 顶杆应靠近冲裁件轮廓边缘, 均匀分布。
- 3) 在某些特殊部位 (如工件的窄长部分) 须安放顶杆。
- 4) 顶杆的直径和数目要适当。

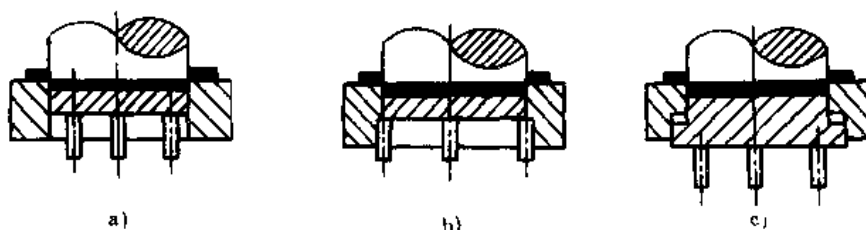


图 8-21 顶杆的布置方式

a) 内顶杆 b) 边界顶杆 c) 采用台阶式推板

顶杆的直径和数目一般可根据零件尺寸、顶件力的大小和材料性质等条件, 由强度或失稳条件计算。顶杆的直径和数目可用交互方式决定, 也可先由用户根据工件的形状和尺寸选择顶杆直径, 程序由以下公式计算顶杆数目  $n$ 。

$$n = \begin{cases} \frac{64K_s F_c H^2}{\pi^3 E D^4}, & \lambda \geq 100 \\ \frac{4K_s F_c}{\pi D^2 (A - B\lambda)}, & 60 \leq \lambda < 100 \\ \frac{4F_c}{[\sigma] \pi D^2}, & \lambda < 60 \end{cases}$$

式中,  $D$  为顶杆直径;  $H$  为杆长;  $K_s$  为安全系数;  $F_c$  为顶件力;  $A$ 、 $B$  为和材料性质有关的系数, 当  $\sigma_b > 480\text{MPa}$  时,  $A = 46.9\text{MPa}$ ,  $B = 26\text{MPa}$ 。  $\lambda$  为顶杆的相对长度, 计算式为

$$\lambda = \frac{H}{\sqrt{J/S}}$$

式中,  $J$  为最小惯性矩;  $S$  为顶杆横截面积。

推板分台阶式和无台阶两种。当需要在零件轮廓范围之外布置顶杆时, 通常采用台阶式推板。

顶杆位置的确定是顶杆设计程序的难点和关键, 下面对此问题加以讨论。

### (一) 优化目标函数的建立

顶杆布置是一个具有约束条件的多目标优化问题。根据布置顶杆的要求，可以确定两个优化目标：

1) 顶杆的合力中心与冲裁件压力中心的距离

$$f_1(x, y) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} - x_0 \right]^2 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - y_0 \right]^2$$

2) 顶杆所围成的多边形周长的倒数

$$f_2(x, y) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} + \sqrt{(x_1 - x_n)^2 + (y_1 - y_n)^2}}$$

式中， $x_0$ 、 $y_0$  为工件压力中心的坐标； $n$  为顶杆个数； $x_i$ 、 $y_i$  为第  $i$  个顶杆中心的坐标。

用下面的方法建立评价函数，可以将多目标的优化问题转化为单目标优化问题：

$$U(X) = \sum_{j=1}^m \lambda_j f_j(X)$$

其中， $U(X)$  为多目标的评价函数； $f_j(X)$  为单个目标函数的值； $\lambda_j$  为加权系数； $m$  为目标个数。

加权系数  $\lambda_j$  的取值反映了对各个目标的估价，可取为

$$\lambda_j = \left( \min_{X \in D} f_j(X) \right)^{-1}$$

即将各单目标函数最优值的倒数取为加权系数。这种确定加权系数方法所形成的评价函数反映了各个单目标值离开各自最优值的程度。

### (二) 约束条件的处理

由于冲裁件内外轮廓的复杂性，无法用一组固定格式的约束函数来解析表示随冲裁件形状变化的约束条件。为了增加程序的通用性和使问题可解，引入了划分网格的方法，将有约束的优化问题转化为无约束的优化问题处理。

解除约束条件的做法如下：

1) 利用图形输入程序建立的关于产品零件形状的函数模型和求得的结点坐标，用一系列等间距坐标点使内外轮廓离散化，即用加密点近似图形的轮廓（图 8-22a、b）。

2) 在冲裁零件图形的外切矩形内划分网格，网格的边长等于顶杆的直径（图 8-22c）。

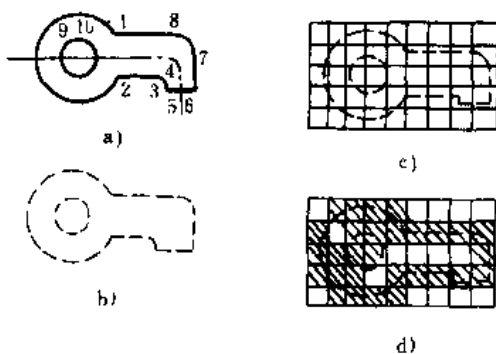


图 8-22 网格的划分

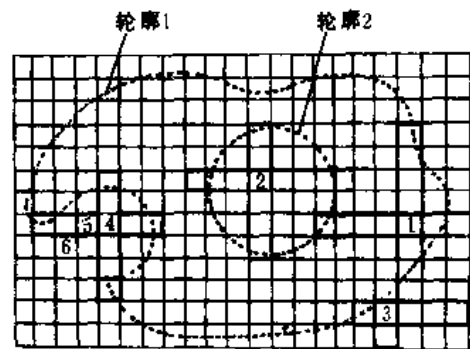


图 8-23 可行网格的确定

3) 根据与图形轮廓的相对位置, 网格可分为边界网格、内网格和外网格。跨越边界轮廓的网格为边界网格。外网格为轮廓以外的网格, 即外轮廓以外和内轮廓以内的网格。零件图形内部的网格为内网格, 亦称可行网格。显然, 每一可行网格对应着顶杆的一个可能布置的位置。约束条件转化的关键在于搜索出所有的可行网格 (图 8-22d)。对于台阶推板的情形应将推板的轮廓作为区分网格类型的依据。

### (三) 可行网络的确定

可行网络的不同组合方式将构成不同的顶杆布置方案, 因此区分可行网络有助于减少搜索的盲目性和加速布置顶杆的过程。程序中, 三维数组  $WG(N, M, 3)$  用以记录网络的特征, 其中第一维数组元素为网格所在的行号; 第二维数组元素为网格的列号; 第三维数组元素用以记录网格中心点的坐标以及网络的属性, 即指出是否属于边界网格。对于边界网格, 则记录其所属的轮廓号, 外轮廓编号为 1。内孔编号为 2, 3, ...。该信息对于确定可行网络起着十分重要的作用。

如图 8-23 所示, 可以利用图形的封闭性来检测可行网络。若一网格的同行 (或同列) 的两边中任何一边未被边界网格所封闭, 则此网格一定为非可行网络。图中标号为 3 的网格即属此种情况。若一个网格的同行或同列的两边被编号为 2 或 2 以上的同一编号的边界网格所封闭, 那么该网格亦为非可行网络。图中标号为 2 的网格位于孔内, 它被编号为 2 的边界网格所封闭, 所以可判定为非可行网络。

检测网格的上下左右是否封闭是确定可行网络的基本依据, 这构成了算法的第一个步骤。但是, 余下的网格也并非一定为可行网络。例如, 图 8-23 中标号为 4 的网格同行和同列均被编号为 1 的边界网格所封闭, 但它却是非可行网络。类似的情况也可能发生在孔内。这些非可行网络不会在第一步里被检测出来, 所以程序安排了第二步。采用在第一步中已检测出的非可行网络为基础, 在剩余的网格中进一步筛除非可行网络。图中标号为 6 的网格在第一步中被检测为非可行网络, 在第二步中, 它将非可行性信息传递至标号为 5 的网格。后者又将非可行性信息传递

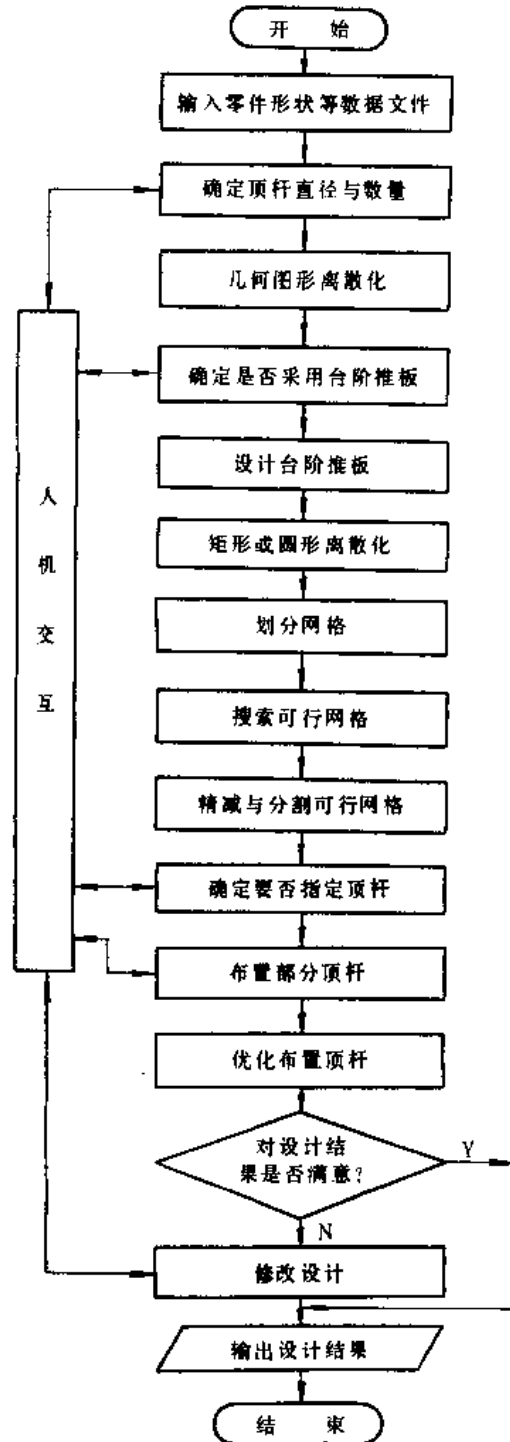


图 8-24 顶杆设计程序的框图

给标号为 4 的网格，如此进行下去，可完成确定可行网格的工作。

在这里，可行网格即为优化计算时的可行域。这种优化布置顶杆方法的一个基本特点就是可行域用网格的占据状态表示，从而避免了解析表示时的困难。确定可行网格之后，程序将在可行域内构造可行方案，并从所有可行方案中选出最佳者。

#### (四) 保证顶杆均匀分布的方法

为了使顶杆尽可能地均匀分布，程序中采用了如下方法：

1) 过冲裁件的中心作水平和铅垂线，将可行网格分为四个区。设各区的网格数为  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ ，各区拟安排的顶杆数为  $n_1$ 、 $n_2$ 、 $n_3$ 、 $n_4$ ，则在布置顶杆时应尽可能满足以下关系：

$$\frac{n_1}{K_1} = \frac{n_2}{K_2} = \frac{n_3}{K_3} = \frac{n_4}{K_4}$$

2) 当可行网格较多时，任一可能的顶杆位置一旦确定，就不再选择相邻的网格与之组合。

3) 在布置前，将明显的不适宜安排顶杆的可行网格删除。这样，既保证了顶杆布置方案的合理性，也提高了设计的效率。

由于采取了以上措施，使顶杆的分布比较均匀，运算量也大大减少。

#### (五) 程序的结构

图 8-24 为顶杆设计程序的框图。在输入了冲裁零件的形状信息和其它包含推件力等参数的数据文件后，程序将计算出顶杆的直径和数目，并将计算结果显示给用户。如果不同意计算的结果，可以用交互方式输入设计者自己确定的数值。

在将图形轮廓离散化之前，以交互方式确定是否需要采用台阶推板。图形轮廓离散化之后，程序按前面所述的方法自动划分网格，将网格分类，确定布置顶杆的可行域。接着，程序将可行网格分割为四个区域，确定每个区域中应布置顶杆的个数，删除不适于布置顶杆的可行网格。在自动优化布置顶杆之前，使用者可用交互方式在某些部位预先设置一些顶杆。顶杆的优化布置包括求取单个目标函数的最优值，构造评价函数和最终优化等步骤。程序采用的优化方法为网格搜索法。最后，程序将优化结果显示输出。如果使用者对设计结果不满意或需作某些修改，可以通过人机交互作用实现其意图。

## 第五节 挤压模 CAD/CAM 系统的结构

### 一、挤压模具的分类与结构特点

冷挤压模具的结构型式很多，挤压同一个零件，往往可以采用不同的模具结构型式。但是，挤压模具结构在导向方式，卸件和推件装置、凸模和凹模的固定方式等方面有许多共同的特点。挤压模具的标准化比其它类型的成形模具更容易些，模具 CAD 也较易实现。挤压模具按照工序的性质可分为正挤压模、反挤压模、复合挤压模、径向挤压模和墩挤模等；按照导向方式可分为导柱和导套类挤压模、导板类挤压模和敞开式挤压模等。

挤压模具的主要结构特点如下：

- 1) 为确保挤压零件的精度，一般采用带导柱、导套的导向装置。
- 2) 凸模和凹模大都通过套圈、压环等紧固零件与模座固定，以便于拆卸和更换。
- 3) 视冷挤压单位压力的大小，凹模分别采用整体式、双层和三层组合凹模结构。
- 4) 当挤压薄壁深筒类零件时，要保证凸模有足够的强度和刚度，有时可考虑采用护套结



构。

5) 为了降低凸模、凹模传递给上、下模座的单位压力,需要在两者之间设置一定厚度的垫板。

6) 反挤压凸模的端面结构形式、挤压凸模和凹模的工作带的高度均应使之有利于金属的流动和降低变形阻力。

7) 需选择恰当的顶、卸件装置,复合挤压时要同时使用两种卸件装置。

### 二、挤压模 CAD/CAM 系统的结构流程图

按照通常的设计方法,挤压模的设计过程可以分为工艺分析、工步设计、组合凹模优化设计和绘制模具总图及零件图等几部分。其中,工艺分析和工步设计十分重要,它不仅要对零件的工艺性进行分析,还要对成形的工步作出合理的安排。挤压零件的工艺合理性是决定挤压成败的关键,同时也对模具的寿命影响极大。工步设计时,主要依据变形流动规律的分析 and 变形程度的分配。工艺设计人员凭经验进行工艺设计时,往往带有一定的主观随意性。近年来发展起来的工步分析专家系统,对于克服片面性,充分发挥书本知识和专家的经验起到了积极的作用。它有助于提高挤压工艺分析的科学性,还能帮助缺乏经验的工程技术人员完成复杂的工艺设计工作。

组合凹模的优化设计在挤压模具 CAD 中占有很重要的位置。通常采用的一种优化方法是以 Lamé 公式为基础的常规优化方法;另一种优化方法是把有限元分析与优化计算相结合的综合优化方法。这种新的优化方法有利于提高优化精度,使模具设计更趋合理。

挤压模总图设计是人的设计思想与技巧的体现,但是在绘图时,存

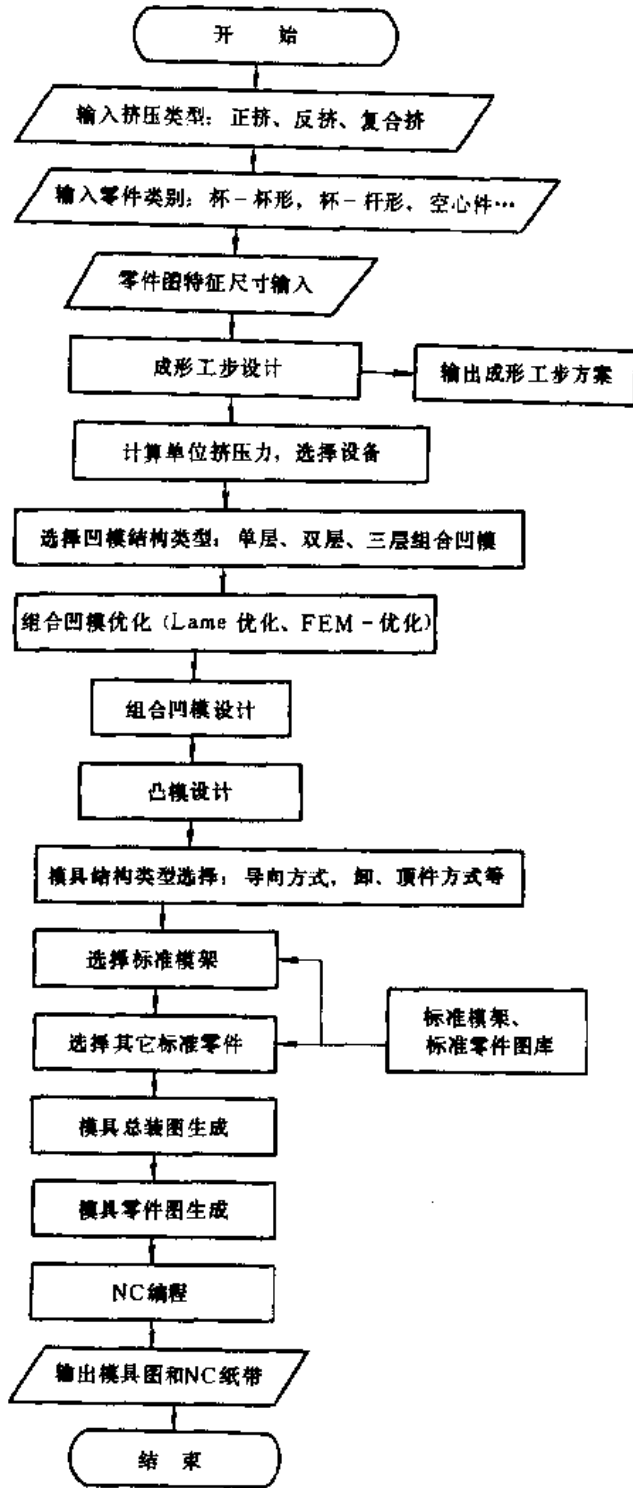


图 8-25 挤压模 CAD/CAM 系统流程框图

在着很多重复性的劳动。在进行挤压模具设计时，应尽量采用标准化模具结构，建立标准模架和标准零、部件图库。设计时只需要调用和装配这些标准零件，对工作零件的成形部分作局部的修改就能迅速生成模具总图。挤压模具的标准化可以大量节省绘图时间，使设计人员把更多的精力花在设计创新上。

例如，德国 HASCO 模具制造公司将其模具零部件完全标准化、系列化，建立了包括 1 万多个零件的图形库。其进行模具结构设计的步骤是：①通过菜单提示选择标准模架和零部件；②拼装总装配图；③修改成形部分的设计。这样，总图的设计时间缩短为原来的几分之一。

通常，挤压模具 CAD/CAM 系统包括工艺设计、组合凹模优化、装配图和零件图的绘制、生成 NC 纸带等部分。图 8-25 为挤压模具 CAD/CAM 系统的结构流程图。

## 第六节 组合挤压凹模的优化设计

组合凹模优化设计就是要选择组合凹模的最佳直径比，各层直径和它们之间的过盈量，目的是保证模具在最大压力作用下具有足够的强度。

### 一、组合凹模的类型和受力特点

通常，作用于冷挤压凹模内壁的压力是很高的，特别是在挤压黑色金属时，单位压力有时高达 2000MPa 以上。整体凹模难以承受这样高的压力，所以通常采用带预紧圈的组合凹模来提高它的承压能力。

图 8-26a 为整体式凹模内的工作应力的分布，图 8-26b 为双层组合凹模内的真实应力分布情况。从图中可以看出，由过盈配合产生的预应力，改善了凹模内部的应力分布，大大降低了凹模内壁危险面上的切向拉应力的数值，因而使凹模的承载能力得到提高。

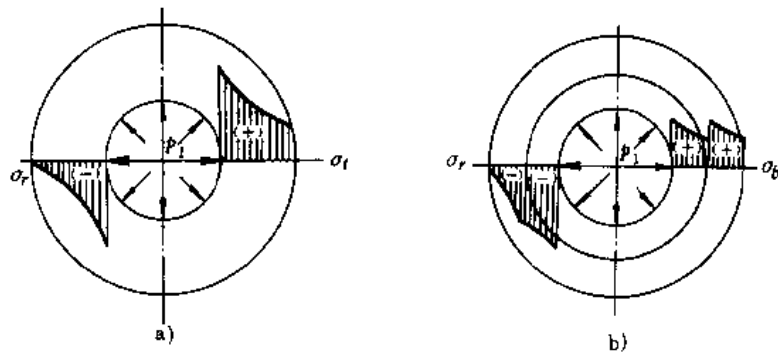


图 8-26 凹模内的应力分布

a) 整体凹模内的应力分布 b) 组合凹模内的应力分布

常规的以 Lamé 公式为依据的组合凹模优化方法，把凹模视作均匀受压的厚壁筒，按照凹模各圈材料同时达到屈服点的条件，计算出凹模的最佳径比、各圈的直径及过盈量。这种常规优化方法虽然比较简单，即使不使用计算机也能进行计算，但是它有明显的不足之处：

- 1) 挤压凹模不是无限长圆筒体，两端也没有封闭，因此把它视作厚壁筒是一种很大的近似。
- 2) 作用于凹模内壁的压力分布是不均匀的，并且只作用于凹模的局部高度上，这与均匀压力作用下的厚壁圆筒是明显不同的。

由于作用于凹模的内压力分布方式比较复杂，不同的简化方式会直接影响到组合凹模的优化精度和实际效果。对局部均布压力作用下的组合凹模内的应力分布的研究结果表明，局

部内压力作用方式下的凹模内的应力分布与按照 Lamé 公式计算的结果有明显的差异。

为了确保优化设计的效果，近年来人们发展了一种新的优化方法，即有限元优化方法。

## 二、组合凹模的有限元优化方法

### 1. 单层凹模承受局部内压力时应力和位移的有限元分析

冷挤压模的受力多属于轴对称问题，因此可以采用轴对称弹性有限元方法进行应力和位移的计算。在划分单元时，采用四边形八结点等参单元较三角形单元计算精度高。

图 8-27 所示为整体式凹模的单元网格划分图，其边界约束条件规定模底平面的纵向位移为零。载荷作用方式设为作用于凹模内壁的部分高度上的压力均匀分布，其作用位置和作用高度是可以调节的。计算中把作用的均布载荷用等效结点力方式转移到相关结点上。变化载荷作用区间的长度和位置，就可以模拟各种受力状态下的挤压过程，计算出凹模内的应力和位移的分布。

单层凹模的有限元分析程序结构框图示于图 8-28。

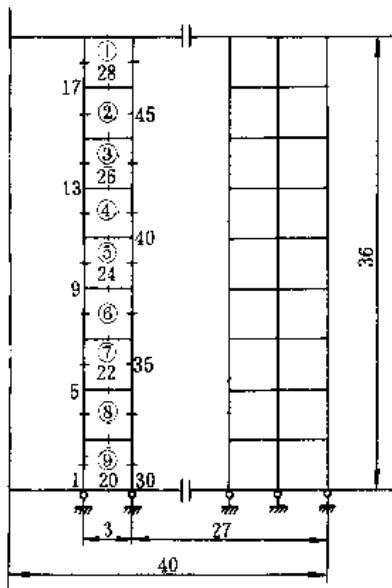


图 8-27 单层凹模网格划分图

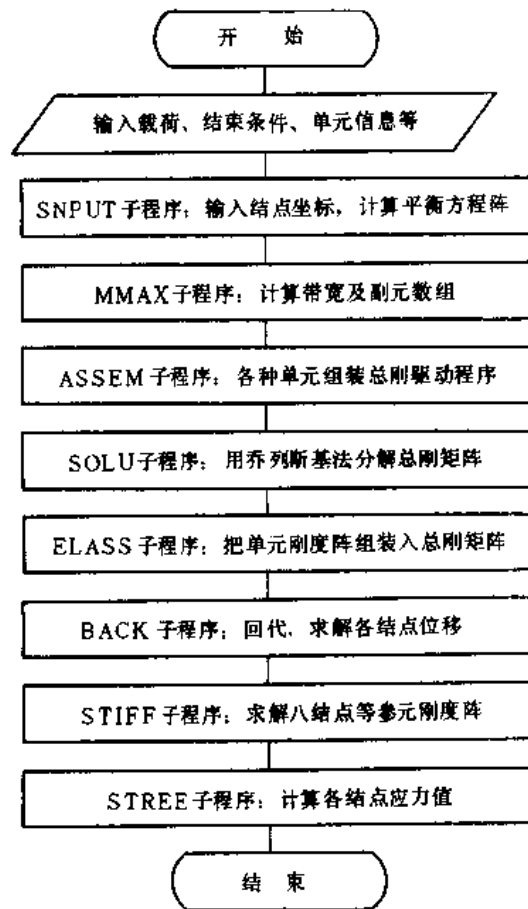


图 8-28 有限元分析程序框图

图 8-29 所示为凹模内壁的主应力差  $(\sigma_t - \sigma_r)$  与内压力  $p_0$  作用区间的关系。直线 1 为内压力作用于全高，曲线 2 表示内压力  $p_0$  的作用区间为④、⑤、⑥三个单元（参见图 8-27），曲线 3 表示内压力的作用区间为③、④、⑤、⑥四个单元，曲线 4 表示内压力作用区间为②、③、④、⑤、⑥五个单元，虚线 5 为按 Lamé 公式计算的结果。从图中可以看出，当内压力作用于凹模内壁的局部高度上时，各点的主应力差值  $(\sigma_t - \sigma_r)$  明显小于按照 Lamé 公式的计算结果。因此，按照 Lamé 公式和屈服条件设计的凹模没有使凹模的实际承载能力得到充分发挥。

### 2. 组合凹模的有限元优化设计

用电测法和光弹性法测试的结果表明，挤压时作用于凹模内壁的压力是非均匀分布的，在

挤压毛坯与凹模内壁接触处，凹模的受力为三向应力状态。按照厚壁圆筒的理论计算凹模的工作应力会产生较大的误差。但是，把挤压毛坯与凹模相接触的一段区间假设为均布压力而作为有限元计算的边界条件，可以使计算大为简化。尽管这种简化与凹模的实际受力情况仍然存在着一定的差异，但是考虑到挤压中各种偶然因素的影响和模具的安全性，在进行有限元计算时，仍然可以用局部均布载荷来代替作用于这一高度上的局部非均布载荷。对于由预紧力产生的预应力的计算，由于组合凹模的各圈之间沿凹模高度存在着相同的过盈量而产生均匀的预紧压力，因此可以用 Lamé 公式来计算。

在对组合凹模的工作应力进行有限元计算时，凹模各圈的弹性模量和泊松比都近似相等，可以把组合凹模当作连续体进行有限元应力场计算。在划分网格时，为了使元素结点坐标随各圈直径的变化而变化，可预先规定每层的径向结点数，然后由计算机自动划分网格程序。组合凹模单元网格划分如图 8-30 所示，图中  $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  和  $r_3$  分别为凹模的内、中、外各圈的内径和外径， $p_0$  为内压力， $h'$  为挤压毛坯离凹模端面的距离。

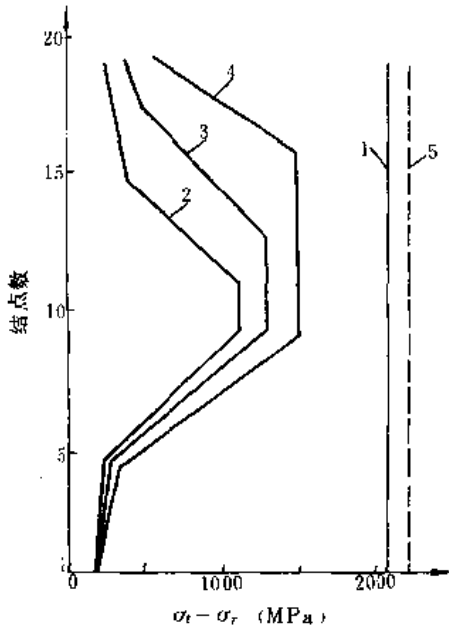


图 8-29 凹模内壁主应力差  $(\sigma_t - \sigma_r)$  与内压力作用高度的关系

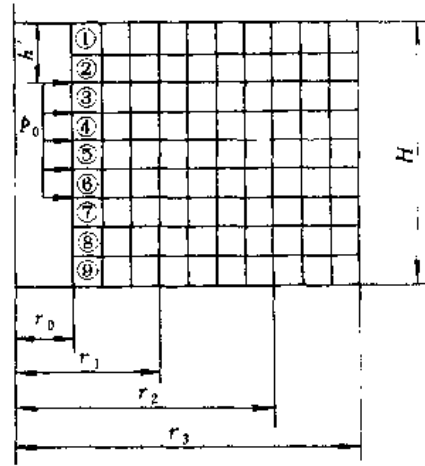


图 8-30 组合凹模单元网格的划分

组合凹模的优化设计的指导原则是，按照第三强度理论，当凹模内壁承受最大工作内压力时，凹模内圈及各预紧圈危险面上的切应力正好达到材料的许用应力之半，可以用公式表示为：

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}[\sigma] \quad \text{或} \quad (\sigma_t - \sigma_r) = [\sigma]$$

设  $F_{max}$  为组合凹模各层内壁上的主应力差与其许用应力的相对误差所允许的最大值，当  $F_{max}$  达到预先给定的某一精度值  $\epsilon$  时，优化即告结束。设计变量为：中圈内径  $r_1$ ，外圈内径  $r_2$ ，外圈外径  $r_3$  以及内圈与中圈之间的过盈量  $\Delta r_{12}$ ，中圈与外圈之间的过盈量  $\Delta r_{23}$ 。

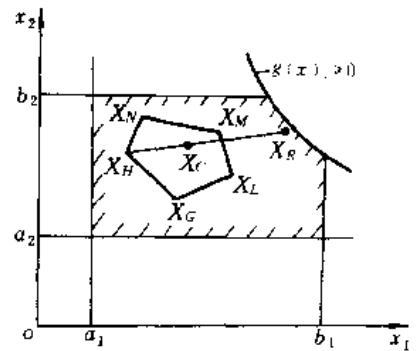


图 8-31 复合形法示意图

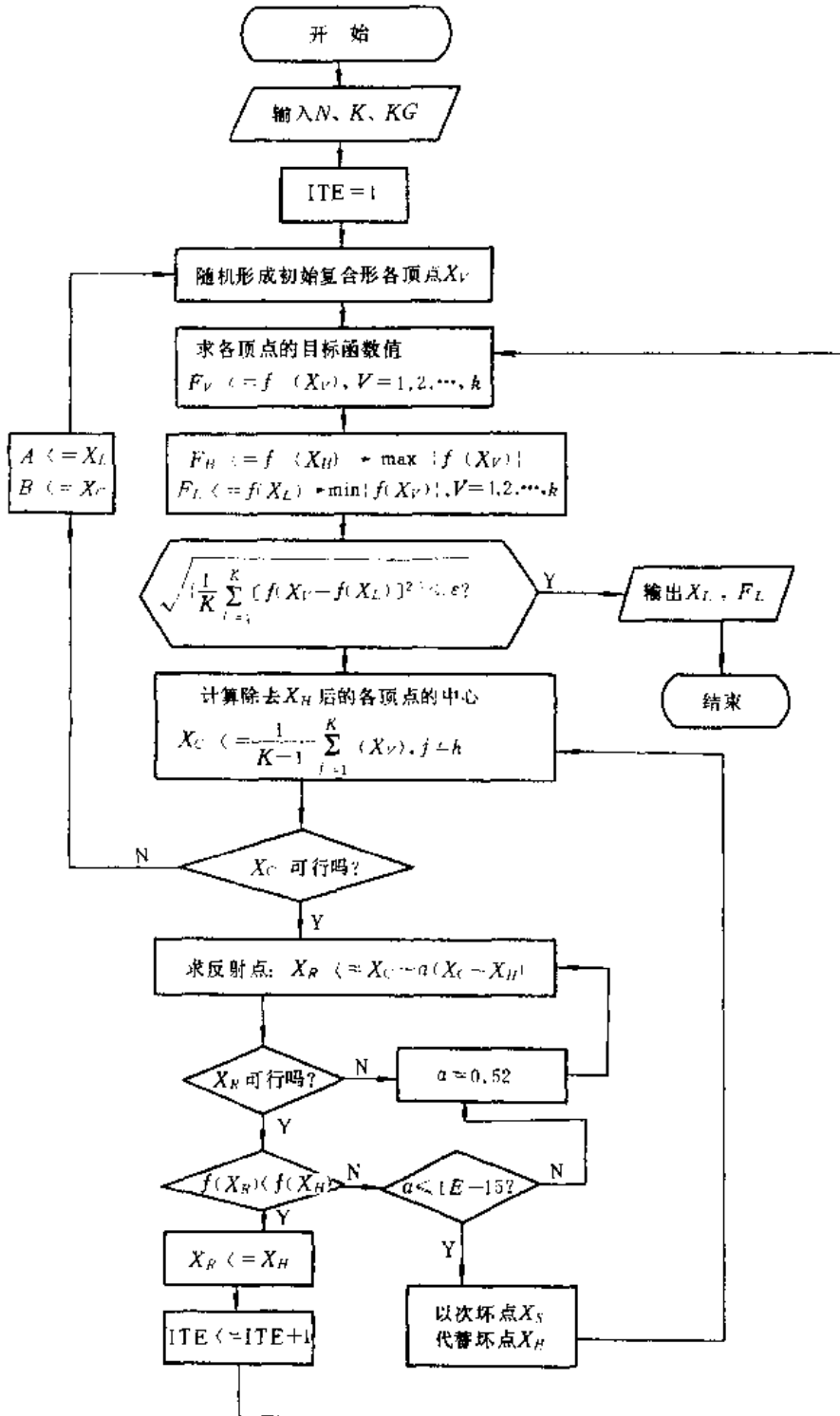


图 8-32 复合形法计算框图

优化设计的方法很多，要选择适合于问题求解的方法，就要认真考虑所规定的目标函数和约束条件。这里，选用复合形法比较有利，它不必计算目标函数的梯度及二阶导数矩阵，程序比较简单。优化计算过程是：在可行域内选取  $K$  个设计点作为初始复合形的顶点，通常取

$N+1 < K < 2N$ ,  $N$  为设计变量数。计算并比较这些顶点的目标函数值,以反射点代替坏点,构成新的复合形。以此步骤重复多次,使复合形的位置越来越靠近最优点,最后以复合形中目标函数值最小的点作为近似最优解。图 8-31 为复合形法示意图,有影线区域为设计可行域,择优过程在该域内进行。设在由  $X_G, X_H, X_L, X_M, X_N$  构成的初始复合形中,  $X_H$  为最大函数值的对应点,并定义为坏点;  $X_G$  是除坏点以外的各点的中心;  $X_R$  为坏点  $X_H$  的反射点。以  $X_R$  代替  $X_H$  构成新的复合形,重复上述步骤,直到满足收敛条件为止。

图 8-32 为复合形法计算框图,其中主要标识符为:  $N$ ——设计变量个数;  $K$ ——复合形顶点个数;  $KC$ ——不等约束数;  $ITE$ ——迭代次数。图 8-33 为有限元优化设计程序的计算框图。

对组合凹模优化的计算结果表明:

- 1) 当内压力作用于凹模全高时,其结果与常规优化结果基本吻合。
- 2) 局部均匀内压力作用下的凹模进行优化所得凹模的外径明显小于常规优化结果。
- 3) 一般情况下,凹模内圈与中圈之间的过盈量  $\Delta r_{12}$  约为  $\Delta r_{23}$  的 2 倍。
- 4) 当内压力作用区间的长度一定时,其位置的改变对凹模各中径尺寸、过盈量等参数的优化结果影响不大。但是,当内压力作用区间的长度变化时,则对各优化参数的影响比较大。
- 5) 对于凹模承受非均布内压力作用的方式,可以把分布压力简化为几段折线的形式,再按照将分布力转化为结点力的方法进行优化计算。
- 6) 对于只有一层预紧圈的双层组合凹模,可以令有关参数为零,亦可用上述方法进行优化。

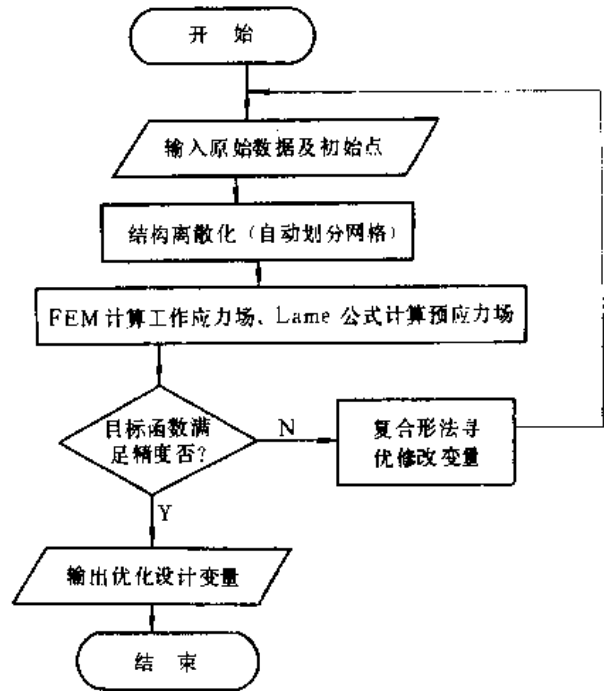


图 8-33 有限元综合优化计算框图

## 第七节 挤压模具的结构设计

### 一、挤压模具的结构设计方法

挤压模具的结构主要由下列零、部件组成:

- 1) 支撑与夹持类零件: 上、下模板, 模柄等。
- 2) 工作零件: 凸模、整体式凹模和组合凹模。
- 3) 固定类零件: 凸模固定板、凹模压模圈。
- 4) 导向类零件: 导柱、导套、导板。
- 5) 卸件类零件: 顶杆、脱料板、拉杆。
- 6) 紧固类零件: 螺钉、销钉。

7) 传压类零件：压力垫板、模芯、垫块等。

挤压零件形状的对称性、规则性比较强，模具结构上有许多相似之处，这就为模具结构的标准化提供了有利的条件。采用标准化的模具结构，在设计时可调用图库中存贮的零件图形，因而避免了许多重复性劳动。

挤压模的结构设计可以用 Auto CAD 为支撑软件实现。由于凸模和凹模的设计主要依赖于工件的形状和尺寸，可以采用交互式命令绘图，或者利用 Auto Lisp 功能，编制程序绘图。利用 Auto CAD 的块命令 (BLOCK)，可以建立适合用户需要的标准零件图库，通过插入命令 (Insert) 可将它们从图库中调出，完成图形的组合与装配。

作为图库中的标准零件或部件，应考虑其通用性和互换性，因此应参考有关标准，设计成系列尺寸，以满足不同模具结构的需要。另一方面，挤压模具总图的生成不是简单的搭积木式的图形装配，图库的建立应能更好地发挥设计人员的智慧和创造性，因此交互设计是不可避免的。例如，模具结构的选择，凸模和组合凹模的设计，以及协调各零、部件之间的关系等都可采用交互方式完成。

为了便于图库的管理与搜索，可在 Auto CAD 屏幕菜单的基础上，建立标准图库的用户菜单，图 8-34 所示为挤压模设计时的图库用户菜单，其中一级菜单中的模架 MJ 含二级菜单 MJ170、MJ200、MJ240、...，后三位数字给出了下模座的有效周界；模架二级菜单又派生出三级菜单，如 MJ200150、MJ200180、MJ200220、...，最后三位数字代表装模高度。

关于建立用户菜单的方法，可以参阅 Auto CAD 使用手册。为了满足交互式绘图的需要，可使 Auto CAD 屏幕菜单与用户自定义屏幕菜单互相切换，即可从 Auto CAD 屏幕菜单转入用户自定义屏幕菜单，或者从用户菜单返回 Auto CAD 菜单。

二、模具零件图与装配图的绘制

1. 模架和其它标准零件图的绘制

在利用 Auto CAD 设计绘图时，模架可以作为一个实体出现，也就是作为一个块存在。模架一般包括上模座、下模座、导柱和导套。用 Auto CAD 命令绘制的模架图形，可以用外部文件 (.dwg) 的形式保存，在进入 Auto CAD 状态后，可以绘制老文件的形式把它调至当前屏幕。

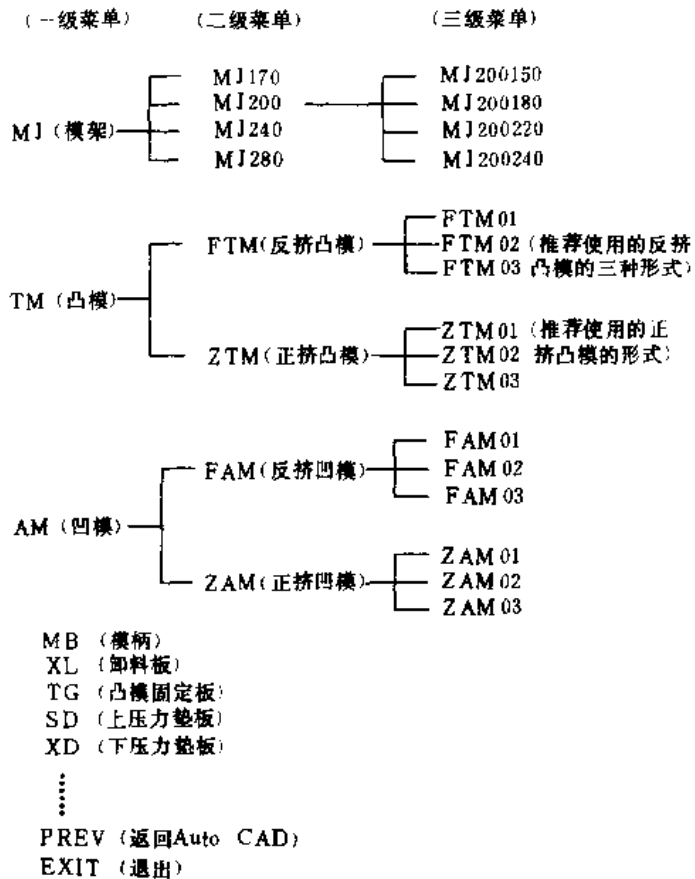


图 8-34 用户自定义菜单

其它零、部件，如模柄、压力垫板、固定圈、卸料板等，可以以块的形式存储于图库中。为了能把块插入到别的图形中，要指定块的插入基点，然后以 Block name = <filename> 的形式存盘，执行过程如下：

Command: Block ↓  
 Insert base point: 选定基点 ↓  
 Command: save ↓  
 Block name: <块名> ↓  
 :

零件图形的基点，应根据它与其它相关图形的装配关系来选择，例如两个零件的共面线与模架中心线的交点等。如图 8-35 所示，根据凸模在固定板中的位置，可定义凸模上的 A 点作为基点，定义固定板上的 B 点作为插入点。

凡定义过基点的图块，在插入到其它图形时，可以被拖动进入图形屏幕。这样，只要准确捕捉到插入点的位置，就能使基点与插入点坐标重合，以确保两图形的相互位置关系。

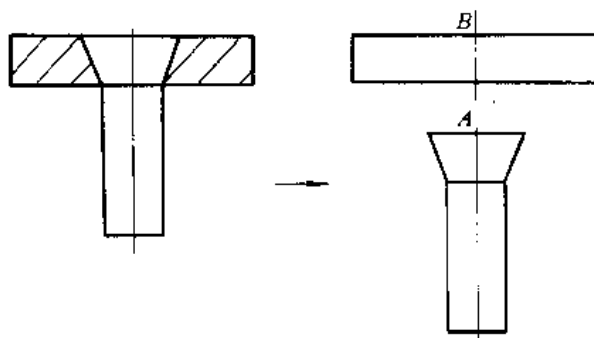


图 8-35 凸模与固定板的装配关系

使用块操作的优点是：

- 1) 节省绘图时间，避免重复性劳动。
- 2) 便于图形修改，当个别零、部件改变时，只需要重新修改并定义块，而无需对整个图形进行修改。
- 3) 节省存储空间。
- 4) 便于技术文件的保存与管理。

## 2. 凸模与组合凹模的参数绘图

由于凸模与凹模的结构对挤压零件形状的依赖性较大，所以不宜事先设计成标准图形，可以利用 Auto Lisp 功能实现程序化绘图，并且把绘制的图形以块的形式保存。用户可通过点菜单，在插入时调用它。对于组合凹模来说，它的结构参数可以在优化程序中产生，并自动转入绘图程序。下面是绘制反挤压凸模和组合凹模的 Lisp 程序段，零件图见图 8-36。

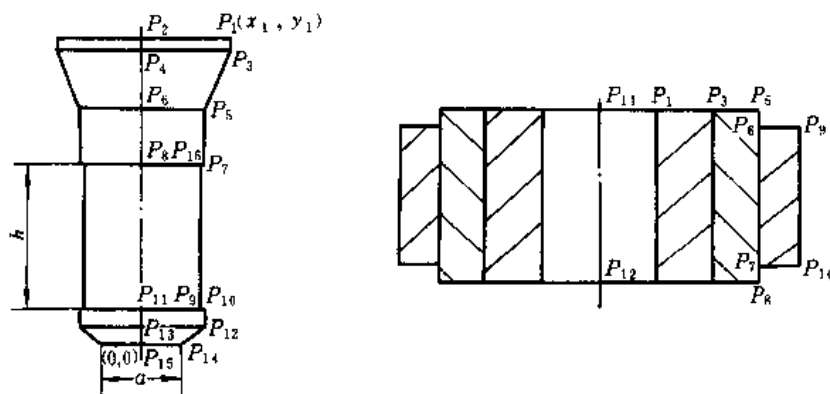


图 8-36 用 Lisp 程序绘制凸模和凹模



{绘制凸模的 Lisp 程序}

```
(defun tml ()
  (setq f1 (open"ftm. txt" "r"))
  (setq d (atoi (read-line f1)))
  (setq y1 (* 0.1 d))
  (setq y2 (+ y1 2))
  (setq y3 (+ y2 h))
  (setq y4 (+ y3 (* 0.6 d)))
  (setq y5 (+ y4 23))
  (setq y6 (+ y5 2))
  (setq x1 (* 0.3 d))
  (setq x2 (- (* 0.5 d) 1))
  (setq x3 (* 0.6 d))
  (setq x4 (* 0.7 d))
  (setq x5 (* 0.5 d))
  (setq p1 (list x4 y6))
  (setq p2 (list 0 y6))
  (setq p3 (list x4 y5))
  (setq p4 (list 0 y5))
  (setq p5 (list x3 y4))
  (setq p6 (list 0 y4))
  (setq p7 (list x3 y3))
  (setq p16 (list x2 y3))
  (setq p8 (list 0 y3))
  (setq p9 (list x2 y2))
  (setq p10 (list x5 y2))
  (setq p11 (list 0 y2))
  (setq p12 (list x5 y1))
  (setq p13 (list 0 y1))
  (setq p14 (list x1 0))
  (setq p15 (list 0 0))
  (command " limits" "-100, -100" "494, 320")
  (command " line" p2 p1 p3 p5 p7 p8 " ")
  (command " line" p15 p14 p12 p10 p11 " ")
  (command " line" p12 p13 " ")
  (command " line" p9 p16 " ")
  (command " line" p3 p4 " ")
  (command " line" p5 p6 " ")
  (setq w1 (list -5 -5))
```

{定义函数 tml}

{打开文件 ftm. txt}

{从文件 f1 中读出并赋值 d}

{赋值 y1}

{赋值 x1}

{各节点坐标赋值}

{定屏幕边界 594, 420}

{画线}

{为镜像定窗口坐标}

```

(setq w2 (list (+ x3 5) (- y6 5)))
(setq c1 (list 0 5))
(setq c2 (list 0 -5))
(command "mirror" "w" w1 w2 "" c1 c2 "")           {镜像凸模的另一半}
(command "block" "tml" "p2" c "" -50, -10" 50, 200" "") {定义块}
(command))
* * * * *
{绘制凹模的 Lisp 程序段, 紧缩型}
(defun am2 ()                                       {定义函数 am2}
  (setq f2 (open "fam. txt" "r"))                  {打开文件 fam. txt}
  (setq d1 (atoi (read-line f2)))                 {从文件 f2 中读出赋值给 d1}
  (setq d2 (atoi (read-line f2)))                 {从文件 f2 中读出赋值给 d2}
  (setq d3 (atoi (read-line f2)))
  (setq d4 (atoi (read-line f2)))
  (setq h (atoi (read-line f2)))
  (setq x1 (* 0.5 d1))                             {给 x1 赋值}
  (setq y1 h)                                       {给 y1 赋值}
  (setq x2 x1)
  (setq y2 0)
  :
  (setq p1 (list x1 y1))                            {给节点坐标赋值}
  (setq p2 (list x2 y2))
  :
  (command "limits" "-100, -100" "494, 320")       {定屏幕边界}
  (command "line" p1) p1 ""                         {画线}
  (command "line" p1) p2 ""
  (command "line" p1) p3 p4 p2 "c")
  (command "mirror" "c" p1) "200, 100" "" "0, 0" "0, 30" "" {镜像}
  (command "block" "am1" p1) "c" "-150, -10" "150, 200" "" {定义块}
  (command))

```

### 3. 挤压模具装配图的绘制

在建立了模具标准图库以后, 利用 Auto CAD 的块插入命令 (Insert), 就能快速生成模具总图。首先调用标准模架, 然后按照零件的装配顺序从图库中依次调出零件图, 并插入到相应的位置。这时, 插入点的选择应满足零件相互间的位置或装配关系。利用目标捕捉方式, 有助于把块的基点准确定位于插入点的位置上。插入命令的过程是:

```

Command: Insert ↓
Block name: 块名 ↓
Insert point: 选定插入点 ↓
X scale factor (1) /corner/X Y Z: ↓

```

Y scale factor (default=x): ↓

Rotation angle (o): ↓

⋮

图 8-37 为一反挤压模具总装图的生成过程。该图由模架（含上、下压力垫板及固定凸模用的紧固圈和固定凹模用的压环）、组合凹模、凸模和卸料装置等组成。绘图顺序是：

- 1) 进入 JY CAD 用户菜单。
- 2) 调模架 MJ 至当前屏幕。
- 3) 调凸模 TM，插入到 MJ 的相应位置。
- 4) 调凹模 AM，插入到 MJ 的相应位置。
- 5) 调卸料装置 XL，插入到 MJ 的相应位置。
- 6) 返回 Auto CAD 菜单。
- 7) 以交互方式对图形进行必要的修改补充。

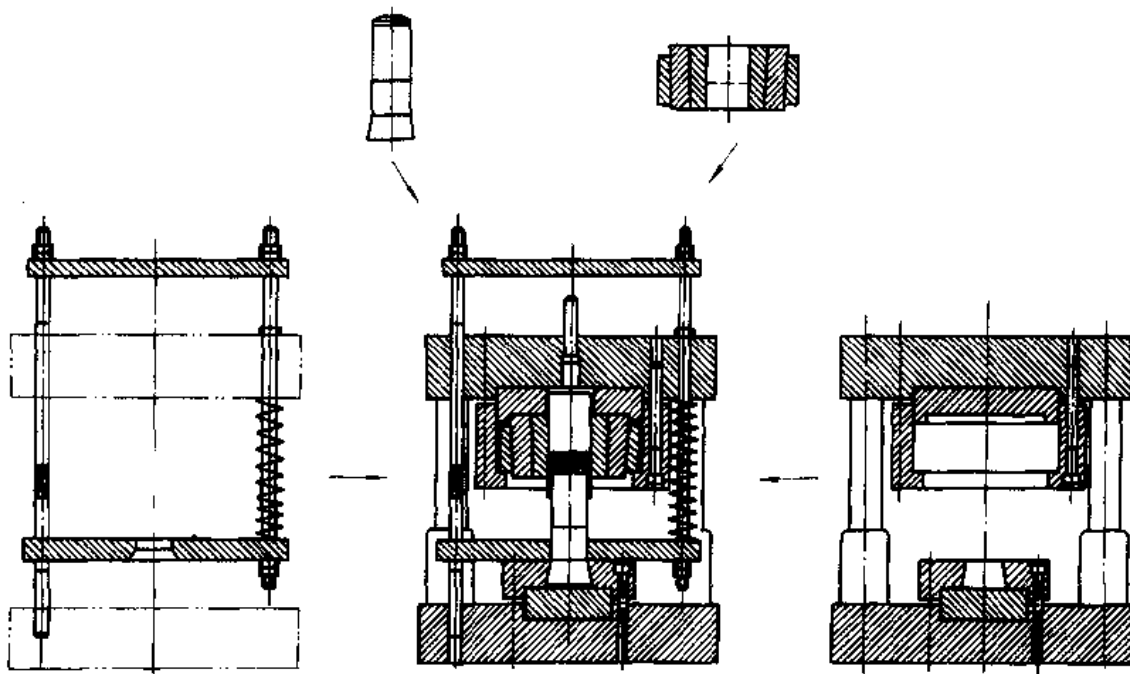


图 8-37 反挤压模具总装图的生成

## 习 题

1. 画出冲裁模 CAD/CAM 系统的结构图，并说明各模块的功能。
2. 决定毛坯排样的参数有哪些？用于优化毛坯排样的多边形法和高度函数法包括哪些主要步骤？
3. 在冲裁工艺方案的设计中，选择模具类型通常遵循哪些准则？在程序中如何实现？
4. 冲模结构设计主要包括哪些工作内容？在开发冲模 CAD/CAM 系统时，如何才能提高模具结构设计的效率，并保证系统的实用性？
5. 挤压模 CAD/CAM 系统包括哪些主要组成部分？画出挤压模 CAD/CAM 系统的流程图。
6. 组合凹模有限元优化设计方法有什么特点？试编写复合形法计算程序。
7. 利用 Auto CAD 软件建立标准模具零件图库，并调用图库中的零件绘制模具装配图。

## 第九章 锻模 CAD/CAM

随着计算机技术的发展,计算机在锻造中的应用也不断增长。自 70 年代以来,国内外许多单位对锻模 CAD/CAM 进行了广泛研究。在几何造型、工艺过程设计、金属流动模拟和锻模设计等方面取得了一系列成果,为提高锻模设计和制造的效率及质量,降低成本开拓了一条新的途径。

本章将介绍轴对称锻件和轴类锻件锻模 CAD/CAM 系统,以及这两种系统中所采用的一些方法,包括锻件和毛坯形状复杂性的定量计算、飞边槽设计和预锻型槽设计等。

### 第一节 利用成组技术建立锻模 CAD/CAM 系统的方法

成组技术(Group Technology,简称 GT)是在零件分类的基础上,按照其结构和加工工艺的相似性来组织生产的。利用成组技术有利于工序的优化设计,有利于扩大加工设备的使用范围,提高设备使用效率和降低生产成本,促进生产工艺的标准化和规范化,为 CAD/CAM 奠定基础。

计算机辅助设计由于自身的特点,要求采用系统的、定量的设计方法。在锻件生产中,多品种、小批量的生产占多数,并且缺乏系统的、定量的设计方法。这种情况阻碍了锻模 CAD/CAM 系统的建立。成组技术是解决这一矛盾的有效途径。利用成组技术可针对不同种类锻件的工艺过程和锻模设计的特点,建立相应的锻模 CAD/CAM 系统。

成组技术用于锻造生产,就是按照锻件形状、尺寸和材料的不同,将锻件进行分类,根据各类锻件的不同特点采用不同的生产工艺和模具设计方法。成组技术有利于建立系统的设计方法,有助于以定量的方式表达现有的设计经验。设计锻模时,可以采用与锻件相对应的系统化、公式化的设计准则。这样,在现有的技术发展水平上,利用成组技术就使得锻模 CAD/CAM 系统较易建立。

锻模的标准化是建立锻模 CAD/CAM 系统的一个重要问题。在 CAD/CAM 系统中,利用存储在计算机中的标准模具结构和模具零件信息,可提高系统的自动化程度,简化设计过程。成组技术就是在零件分类的基础上,采用相类似的加工方法及加工设备。因此,可根据锻件形状和工艺的相似性,使锻模标准化和系列化。在设计锻模时,同组内的不同锻件,利用标准化的模具结构,仅需对少数模具零件(如模芯零件)进行设计,其它零件可直接调用。图 9-1 为一种具有单模芯的标准模具结构。

锻件的锻造工艺取决于它的形状、尺寸和材料。另外,生

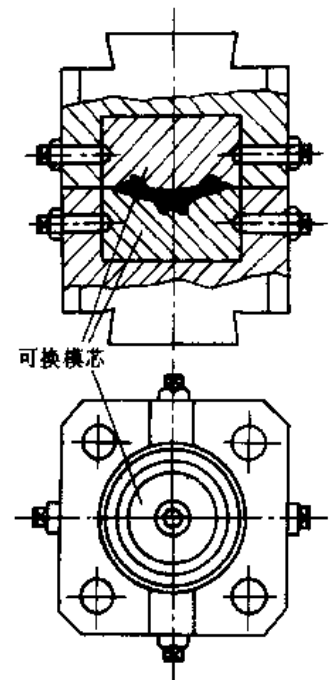


图 9-1 一种具有单模芯的标准模具结构

产批量和工厂现有设备也是考虑的因素。例如，小批量生产时，使用预锻模是不经济的，这时可采用胎模锻预成形，甚至取消预成形工序。对于一个工厂，可利用的设备总是有限的。利用成组技术可为每类锻件制定出一系列的标准工序组合，最终按生产批量和经济性等因素选定具体工序。这种方法有助于锻造工艺过程的优化设计。

总之，锻件的合理分类为锻模 CAD/CAM 奠定了基础。以成组技术为基础的锻模 CAD/CAM 系统可用 9-2 图表示。

在图示的系统中，首先输入有关机械零件的信息，接着决定零件是否可用已有的标准复合锻件加工。如果可以，就不必再进行锻件和锻模的设计，可直接输出工艺卡和 NC 纸带。如果需要设计新锻件，首先确定其类别，再根据类别进行锻件设计和模锻工序的设计。设计模具时，按锻件类别调用相应的设计方法。设计的模具可以包括制坯模、预锻模、终锻模和切边模等。最后，输出锻模的零件图、装配图、零件名细表和 NC 纸带。如果需要，系统还可以估算成本，输出报价单。

完成图 9-2 所示的系统需要做大量研制工作。为此，可先分别建立适用于不同类别锻件的 CAD/CAM 系统。这些系统只能应用于一定类别的锻件。在此基础上将各个系统结合起来，形成应用范围较广的系统。

应用成组技术的关键是对零件分类编码。目前，

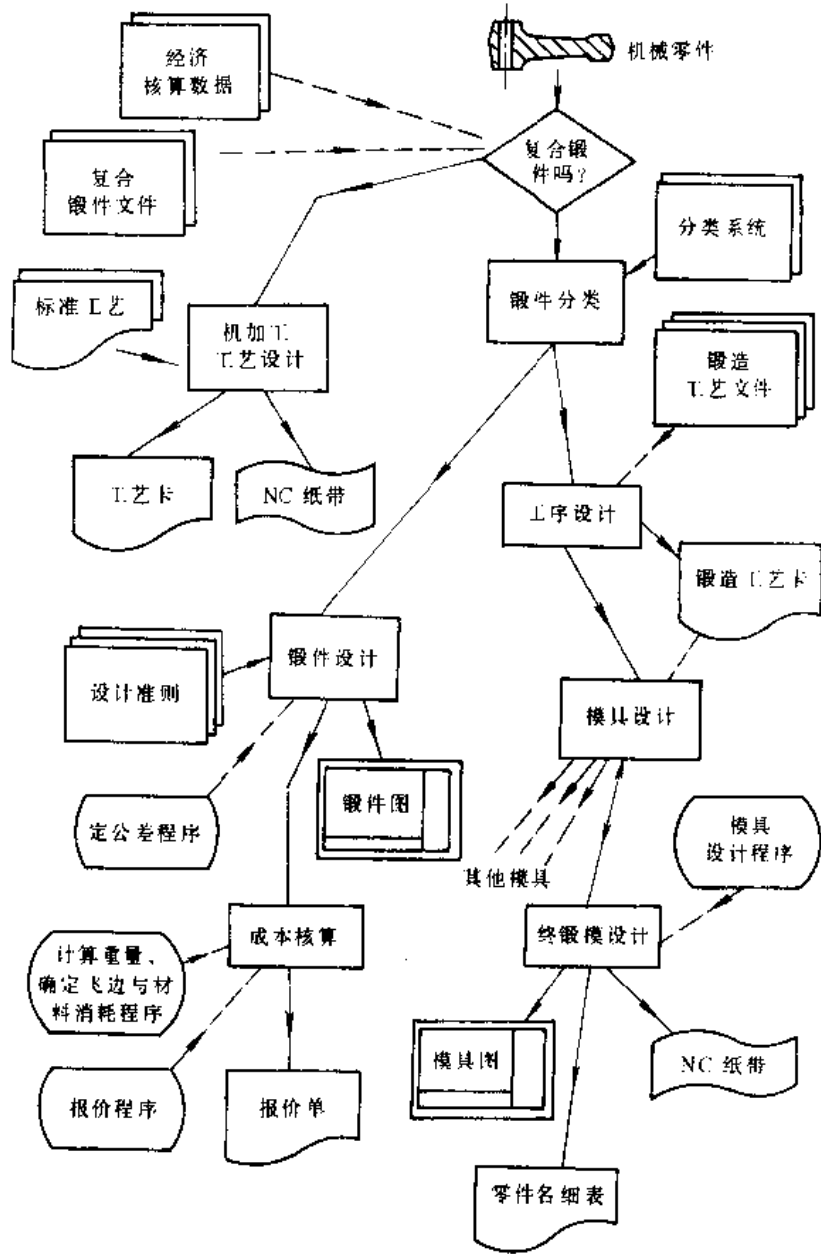


图 9-2 以成组技术为基础的锻模 CAD/CAM 系统

已提出许多分类编码的方法，大多数的锻件分类方法是以锻件的形状和各部分的尺寸比例作为分类标准。图 9-3 所示的分类方法中，锻件分为三大类。第一类为紧凑型锻件，这类锻件在三个方向上的主要尺寸近似相等，即  $l \approx b \approx h$ 。第二类为盘类锻件，这类锻件在两个方向上的尺寸近似相等，而且大于第三个方向（高度方向）的尺寸。第三类为轴类锻件，其显著特点

是一个方向上的尺寸远大于另外两个方向上的尺寸。根据主要形状元素是否弯曲或在几个平面内弯曲, 以及是否具有附加形状元素, 轴类锻件又可分为组和子组。



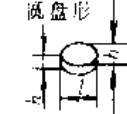
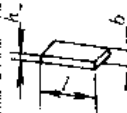
第一类 密集形状  $l \approx b \approx h$	子组	101	102	103	104	
	组					
第二类 圆盘形  $l \approx b > h$	子组	无轮毂和凸缘	带轮毂	带轮毂和孔	带凸缘	带凸缘和轮毂
	组	21	211	212	213	214
第三类 长杆形  $l > b > h$	子组	无枝芽	带有与主轴平行的枝芽	带X形的	带不对称枝芽	带两个以上枝芽
	组	直杆类 31	311	312	313	314
$1. l > 3b$ 一个方向为曲线的长杆类 2. $l > 3 \sim 8b$	32	321	322	323	324	325
$3. l > 8 \sim 16b$ 几个方向为曲线的长杆类 4. $l > 16b$	33	331	332	333	334	335

图 9-3 按形状和尺寸关系分类的方法

上述分类中未考虑锻件的材料和尺寸大小。图 9-4 所示的分类方法保持了上述分类标准的特点, 还包含了材料和尺寸大小等因素。在这种分类方法中, 锻件的分类可用 10 位数字编码表示。前三位数字表示了锻件的形状特点。锻件的三个基本类别即紧凑类、盘类和轴类, 用第一位数字表示。数值 0~9 表示了锻件的主要特征或尺寸比例关系; 第二位数字表示同一类锻件的基本特点, 例如轴类锻件的轴线弯曲方向与横截面形状; 第三位数字用以描述锻件形状的一些附加特征, 这些附加特征往往是很重要的。对于紧凑类锻件凸起或压凹的位置与方向决定着分模面位置和工步数。又如轴类锻件的突起、孔等附加形状的对称性及其与弯曲平面的关系是确定工艺和设计模具时必须考虑的因素。第四位数字表示锻件的材料。在此编码系统中将锻件材料分为十大类, 分别用 0~9 表示。锻件的长、宽、高方向的尺寸用第 5~10

位数字表示。采用这种锻件分类方法，可使锻造工艺的设计合理化，便于锻模 CAD/CAM 系统的建立。

图 9-5 为按上述规则对锻件编码分类的一个例子。

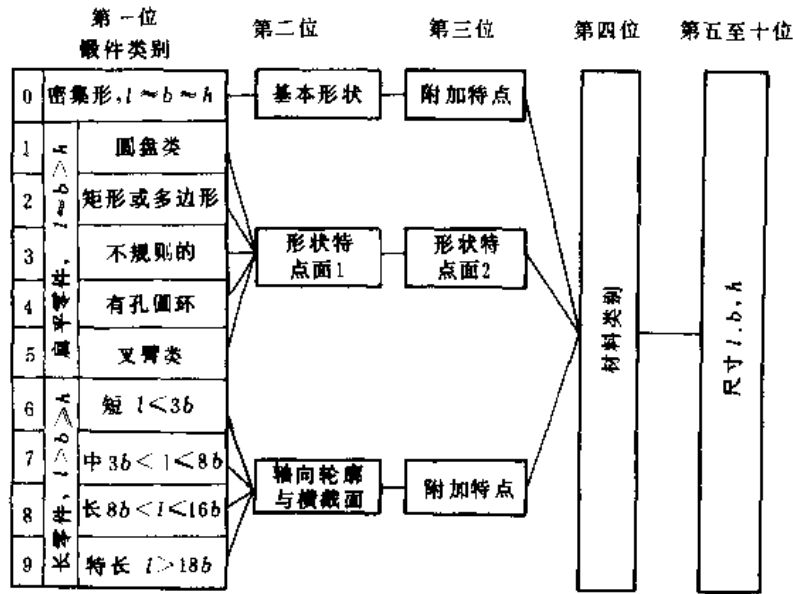


图 9-4 锻件分类的编码方法

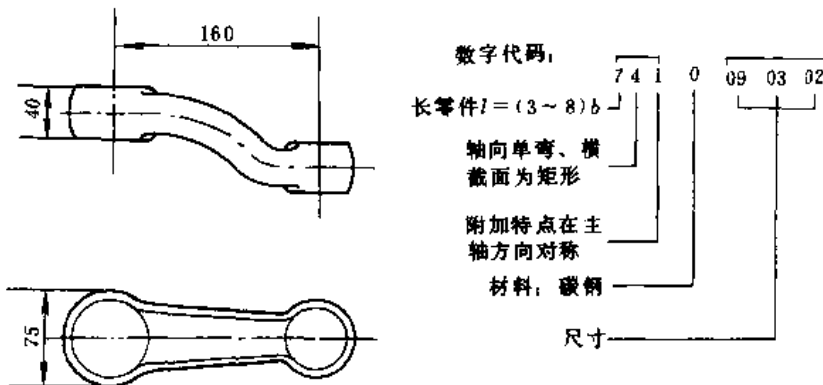


图 9-5 锻件编码实例

## 第二节 轴对称锻件锻模的 CAD/CAM 系统

据统计，轴对称锻件占锻件总数的 30% 左右，因此，建立轴对称锻件锻模 CAD/CAM 系统是一项很有意义的工作。同时，轴对称锻件几何形状简单，易于描述和定义，所以早期的锻模 CAD/CAM 系统大多数从这类锻模入手。目前，轴对称锻件锻模 CAD/CAM 系统已进入实用阶段。

轴对称锻件锻模 CAD/CAM 系统主要包括：零件几何形状的描述、锻件设计和锻件图绘制、模锻工艺设计、锻模设计和锻模图绘制、NC 加工程序的编制。系统框图如图 9-6。

系统运行时，首先需输入零件的几何形状、材料和工艺条件等信息，为后续的锻件设计、工艺设计和锻模设计提供必要的信息。

锻件设计指的是设计冷锻件图和热锻件图，包括选择分模面、补充机加工余量、添加圆角和拔模斜度等内容。工艺设计决定是否采用预成形工序，以及选择设备吨位等。

在建立系统时，对模具结构进行了标准化。设计模具时，只有少数零件需要根据不同锻件进行设计，从而大大提高了设计效率。

轴对称锻模的模芯和顶杆等零件可在数控车床上加工。系统可为数控车床编制加工零件的 NC 程序。

### 一、轴对称锻件几何形状的输入

锻模 CAD/CAM 系统要求使用者输入零件形状、材料和加工条件等信息。虽然有些信息可在系统运行过程中以交互方式输入，但是有关零件几何形状和尺寸的信息则必须在运行的最初阶段输入。

轴对称锻件可通过定义半个截面的几何形状，就可以完成整个零件的定义，也就是说，这类零件的几何描述可用二维的方法实现。

目前，在国内的轴对称锻件锻模 CAD/CAM 系统中，锻件几何信息描述大多数采用节点输入方法，其输入规则和步骤如下（图 9-7 和表 9-1）：

1) 将锻件所用的材料和年产量填入表中。

2) 确定分模面位置。

3) 将零件的右半截面置于笛卡尔直角坐标系中，使纵轴与零件回转轴重合，横轴与分模线重合。

4) 作出包容零件右半截面的凸凹多边形。轮廓上圆弧段以其相邻直线或其切线的延长线的交点作为多边形节点，如图 9-7 中第 4、5、11、12 号节点。对于

倒角部分，以倒角相邻直线的延长线交点作为多边形节点。如图 9-7 中第 2、7、9、14 号节点。

零件上的孔或槽如其尺寸较小，可作敷料处理，即在形状处理中将其填平。

5) 对节点进行编号。以分模线与包容多边形的第一个交点为起始点，对包容多边形进行编号。最后一节点和起始点重合，使图形封闭。分模线与多边形交点亦作节点处理。

6) 确定每一节点的坐标，精确至 0.01mm，将其填入表 9-1 中。

7) 图形中的圆弧半径  $R$  与每一节点相对应。在分模线与轮廓相交产生的节点处， $R$  取为 -1，这样便于计算机进行处理。

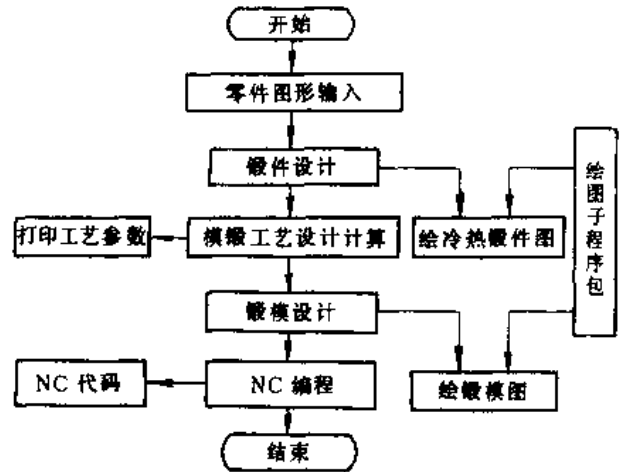


图 9-6 轴对称锻件锻模 CAD/CAM 系统框图

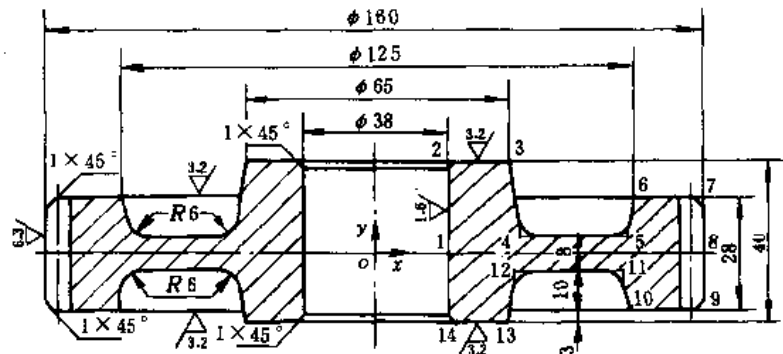


图 9-7 锻件图输入示例



表 9-1 零件输入数据表

材料: 12CrNi3 数量: 100

节点号	X (mm)	Y (mm)	R (mm)	C	节点号	X (mm)	Y (mm)	R (mm)	C
1	19.00	0.00	-1.00	1.6	9	80.00	-12.00	0.00	6.3
2	19.00	25.00	0.00	3.2	10	62.50	-12.00	0.00	3.2
3	32.50	25.00	0.00	0.0	11	61.70	-4.00	6.00	6.3
4	34.80	4.00	6.00	0.0	12	34.10	4.00	6.00	6.3
5	61.70	4.00	6.00	0.0	13	32.50	-17.00	0.00	6.3
6	62.50	12.00	0.00	3.2	14	19.00	-17.00	0.00	6.3
7	80.00	12.00	0.00	6.3	15	19.00	0.00	-1.00	6.3
8	80.00	0.00	-1.00	3.2					

8) 与每一节点相对应的数 C 代表表面粗糙度。在截面图上, 表面是以该节点为起点的多边形的一边。非加工表面的粗糙度用零表示。

由上述输入规则可见, 输入过程不单纯是描述零件的几何形状, 也涉及到锻件的设计, 例如, 分模面的选择和敷料设计。这样, 可充分利用设计人员的设计经验, 减少系统的复杂程度。

二、锻件设计

锻件设计流程如图 9-8 所示。其中分模面和敷料的设计在零件图输入时已经完成。添加机加工余量时, 逐一判别零件各表面是否为机加工面。对于输入表中粗糙度非零的面, 则要添加加工余量。对包容多边形进行放大, 计算放大后轮廓的节点坐标值。锻件的公差和机械加工余量值是由设计者根据实际情况和设计习惯选定的, 可参考有关标准。

锻件上与分模面垂直的面要加一定的拔模斜度, 以便锻件成形后能从锻模型槽中顺利取出。影响拔模斜度设计的因素比较多, 可采用自动设计和交互选择相结合的方法确定拔模斜度值。通常, 外斜度取 7°, 内斜度取 10°。

如图 9-9 所示的带孔锻件, 对内孔壁加斜度的 PASCAL 程序的语句为

$$X[I] := \text{MIN}(X[2] - (Y[2] - Y[1]) \times \text{tg}10^\circ, \\ X[N] - (Y[1] - Y[N]) \times \text{tg}10^\circ)$$

在给分模面以上各表面加斜度时, 上升面需加内斜度, 如图 9-9 中 I+1、I+2 连线所代表的面。计算式如下

$$\text{IF } Y[I+1] > Y[I] \text{ AND } \text{ARCTAN}((X[I+1] - X[I]) / (Y[I+1] - Y[I])) < 10^\circ \\ X[I] := X[I+1] - (Y[I+1] - Y[I]) \times \text{tg}10^\circ$$

对于下降面则需外斜度, 如图 9-9 中 I-1、I 连线所代表的面。

$$\text{IF } Y[I+1] < Y[I] \text{ AND } \text{ARCTAN}((X[I+1] - X[I]) / (Y[I] - Y[I+1])) < 7^\circ$$

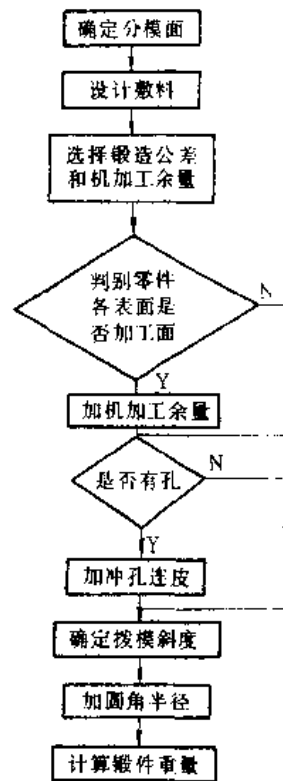


图 9-8 锻件设计流程图

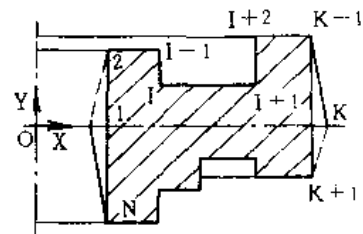


图 9-9 加拔模斜度示意图

$$X[I+1] = X[I] + (Y[I] - Y[I+1]) \times \text{tg}7^\circ$$

锻件外缘垂直面加斜度时,可按下式求图 9-9 中 K 点坐标

$$X[K] = \text{MAX}(X[K-1] + (Y[K-1] - Y[K]) \times \text{tg}7^\circ, X[K-1] + (Y[K] - Y[K+1]) \times \text{tg}7^\circ)$$

给分模面以下各个表面添加斜度的算法与上述类似。

从利于金属在型槽内流动和保证锻模强度考虑,设计锻件时,在不同面之间必须设计过渡圆角。可根据锻件精度及锻件重量,确定外圆角半径  $R_1$ ,内圆角半径  $R_2$  取为  $2.2R_1$ ,并对  $R_1, R_2$  进行圆整,取标准值。程序对每个节点进行判断。

若为内圆角,且  $R[I] < R_2$ ,则  $R[I] = R_2$ ;

若为外圆角,且  $R[I] < R_1$ ,则  $R[I] = R_1$ 。

当锻件内孔直径大于 30mm 时,要设计冲孔连皮,通常采用图 9-10 所示的两种冲孔连皮方式。

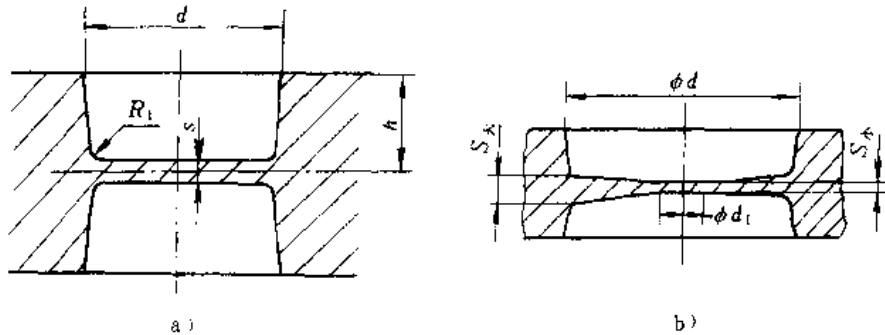


图 9-10 锻件冲孔连皮  
a) 平底连皮 b) 斜底连皮

计算零件和锻件的重量时,需确定其体积。体积可用下式计算,

$$V = 2\pi R_g (F/2)$$

式中,  $R_g$  为半截面重心与对称轴之间的距离;

$F/2$  为半个截面的面积。

由  $n$  条边构成的多边形的面积和重心计算公式如下:

$$F/2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_{i+1}y_i - x_iy_{i+1})$$

$$R_g = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n (x_{i-1}^2y_i - x_i^2y_{i+1}) / (F/2)$$

为了适用上述公式,可将锻件上圆弧部分离散化,使锻件的截面简化为多边形。

设计锻模时,要根据热锻件图设计终锻型槽。热锻件图设计主要包括锻件图的放大、飞边槽设计和钳口设计等内容。飞边槽设计将在第四节叙述。

### 三、锻模设计

因为采用标准的模具结构,所以只需要根据锻件形状和尺寸设计模芯。模芯的外轮廓形

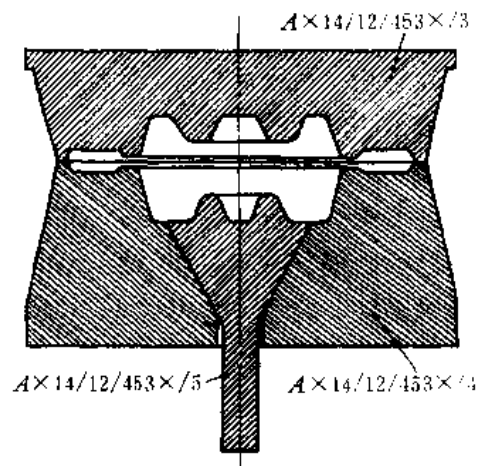


图 9-11 上、下模芯和顶杆装配图

状已存入计算机内，加上型槽的形状就构成了模芯的完整图形。程序可根据锻件底部的轮廓形状选择合适的顶杆直径。设计人员也可以自行选择合适的顶杆。图 9-11 为输出的上、下模芯和顶杆的装配图。

### 第三节 长轴类锻模的 CAD/CAM 系统

长轴类锻件代表着另一类广泛应用的锻件，无论是工序设计、分析计算，还是模具结构设计，其设计过程，都比轴对称锻件复杂得多。因此，建立这类锻模的 CAD/CAM 系统的难度较大。

#### 一、轴类锻模 CAD/CAM 系统的总体结构

图 9-12 所示为一锤上轴类锻模 CAD/CAM 系统的结构框图，系统由几何构型、工艺设计、制坯型槽设计、预锻型槽设计、终锻型槽设计、型槽布置和 NC 自动编程等部分组成。

长轴类锻件几何形状比轴对称锻件复杂得多，所以要利用三维几何造型方法建立其几何模型。目前，有很多商品化三维造型软件可供选用，例如 PRO/ENGINEER、CADD5、DUCT 等系统都有较强的造型功能。利用这些软件进行锻模设计，可方便地提取锻件的有关信息，包括体积计算、截面形状生成等，还可以利用其造型功能设计锻模型槽。

工艺设计部分是锻模设计的重要内容，进行模锻工艺设计时，首先由已建立的锻件几何模型计算出其体积、净重、投影面积、长度和形状复杂系数。在此基础上，求得质量分布曲线、计算坯料图和方块图，确定锻造工序，计算飞边消耗，设计飞边槽几何形状和毛坯尺寸，估算锻造载荷和能量，并选择所用设备。工艺设计模块产生的这些数据可供后续模块利用。

设计预锻型槽时，首先设计若干具有代表性的型槽截面，再利用几何造型系统的功能，参照描述锻件形状时所用的体素，构成预锻型槽的形状。

当所有的型槽设计完毕后，型槽布置程序设计模块的尺寸，确定各型槽的位置。首先，从数据库中读入锻造工序的数目、棒料尺寸、锻锤吨位和飞边几何形状的数据。各工序型槽轮廓的数据也被用作型槽布置时的输入信息。该模块最后输出的是锻模型槽布置图，包括模块的总体尺寸、安装尺寸、以及各型槽的相对位置尺寸。

#### 二、模锻工艺设计

工艺设计模块的主要任务是确定锻造工序，计算工艺参数，并为后续设计程序准备必要的数据库，图 9-13 为该模块的流程框图。根据输入的锻件几何形状信息，程序可以计算出毛坯尺寸、锻造载荷等参数，确定锻造工序、设计飞边槽尺寸等。该模块提供的交互设计功能，允许用户根据实际情况确定自己认为合理的参数与方案。

毛坯计算是选择制坯工步、设计制坯型槽和确定坯料尺寸的主要依据。将锻件离散化为一系列垂直于轴线方向的薄片，如图 9-14 所示，利用造型软件的剖切功能，生成一系列横截面图。计算各个截面的面积和相应处平均直径，可产生质量分布图和计算坯料图。使用者可

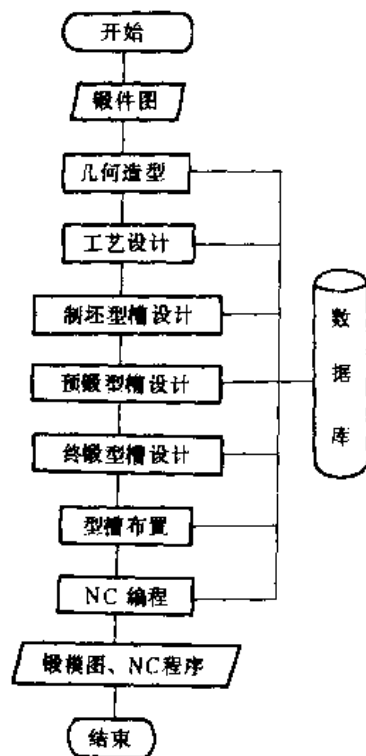


图 9-12 长轴类锻模 CAD/CAM 系统的结构框图

根据质量分布曲线，通过控制光标，将锻件分为头、杆不同部分，程序可将其转换为设计拔长和滚挤型槽时将要用到的方块图。

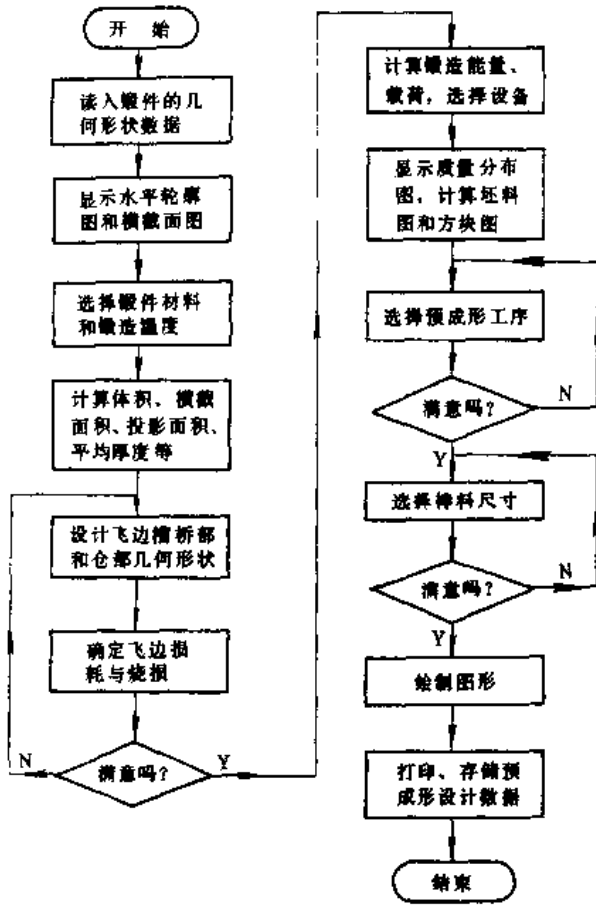


图 9-13 工艺设计流程图

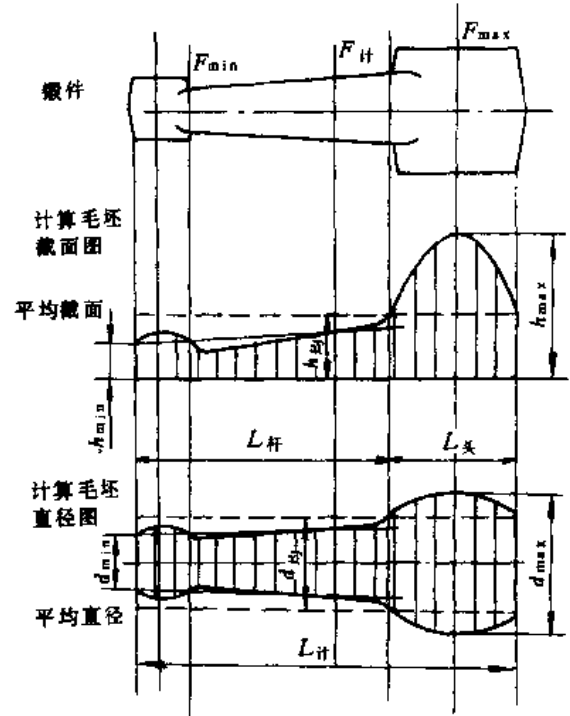


图 9-14 锻件毛坯的计算

预成形工序的设计也是在工艺设计模块完成的。预成形工序包括拔长、滚挤和预锻。预成形工序的选择除了决定于锻件本身的形状复杂性外，还受到工厂设备、生产批量和经济性等因素的影响。程序按建立的数学模型选择预成形工序，用户可以接受程序设计结果，也可以对方案加以修改，或另行选择自己认为更好的方案。

通常根据图 9-15 所示的线图选择制坯工步。图中  $y$  为计算毛坯图中最大直径与平均直径之比， $x$  为锻件长度与平均直径之比。 $G$  为锻件重量。 $A$ 、 $B$ 、 $C$  三条曲线所确定的几个区域，分别表示需要拔长和滚挤制坯、闭式滚挤制坯、开式滚挤制坯和不需制坯。

将曲线  $ABC$  离散化处理后，采用四次多项式拟合曲线，可得到曲线的方程。

$$A: y=0.500063+6.730503/(x-2.829102)$$

$$B: y=0.685949+2.318586/(x-1.735835)$$

$$C: y=-2.029169E-0.2+1.660974/(x+6.56823E-0.2)$$

根据所得公式和计算毛坯图的有关数据，即可确定制坯工步。

### 三、拔长型槽的设计

拔长型槽由坎部和仓部组成，坯料在坎部产生变形，仓部的作用是容纳已变形的金属。坎部的纵向轮廓有平的和凸圆弧形两种。坎部的横向轮廓分开式和闭式两种，前者为平的，后

者为凹圆弧形。纵向轮廓和横向轮廓的不同组合可以形成图 9-16 所示的四种拔长型槽。坎部高度  $G$  和坎部长度  $L$  为型槽的两个最重要的尺寸。

棒料在拔长时的变形程度定义为

$$F = \frac{D_0 - G}{D_0}$$

式中,  $D_0$  为拔长之前的棒料尺寸。

最大允许变形程度为

$$F_{er} = \frac{D_0 - G_{min}}{D_0}$$

式中,  $G_{min}$  为允许的最小坎部高度。

毛坯拔长以后的形状和伸长与其在型槽内的放置位置有关。由于拔长时难以保证准确的放置, 所以在设计拔长型槽时, 假定两次打击(即翻转  $90^\circ$  的两次打击)后完成要求的伸长与断面减缩。设计时应保证在第一次打击之后, 毛坯的形状满足锻造要求, 即其高度与宽度之比应小于 3。

1. 拔长型槽设计程序的流程

图 9-17 为拔长型槽设计程序的流程图。首先, 输入工艺设计模块产生的数据, 包括质量分布曲线、计算坯料图和方块图等。将这些图形显示在屏幕上, 设计人员可重新划分头、杆, 产生新的方块图, 或重新选择毛坯的尺寸。

拔长步骤和拔长模类型的

选择可通过人机对话完成。设计人员可以根据显示的方块图和毛坯图指定拔长部分。

程序按照使用者选择的拔长模类型, 自动完成型槽的设计, 并显示有尺寸标注的设计结果。如果使用者对设计结果不满意, 可以提出修改, 包括改变变形程度和拔长长度等。程序按照使用者的意图重新设计, 直至获得满意的结果。

2. 拔长型槽的设计方法

拔长型槽的设计分为两个阶段, 一是确定拔长步骤, 二是设计模具几何形状。

在确定拔长步骤时要用到质量分布曲线(图 9-18a)和计算坯料图(图 9-18b)。根据截面变化情况将锻件分为头、杆部分, 计算各段的体积和平均截面积可得到方块图(图 9-18b)。图

中  $D_i = \left(\frac{V_i}{L_i}\right)^{\frac{1}{2}}$ , 其中  $D_i$ 、 $V_i$ 、 $L_i$  分别表示方块图中各块的高度、体积和长度。与方块图各段

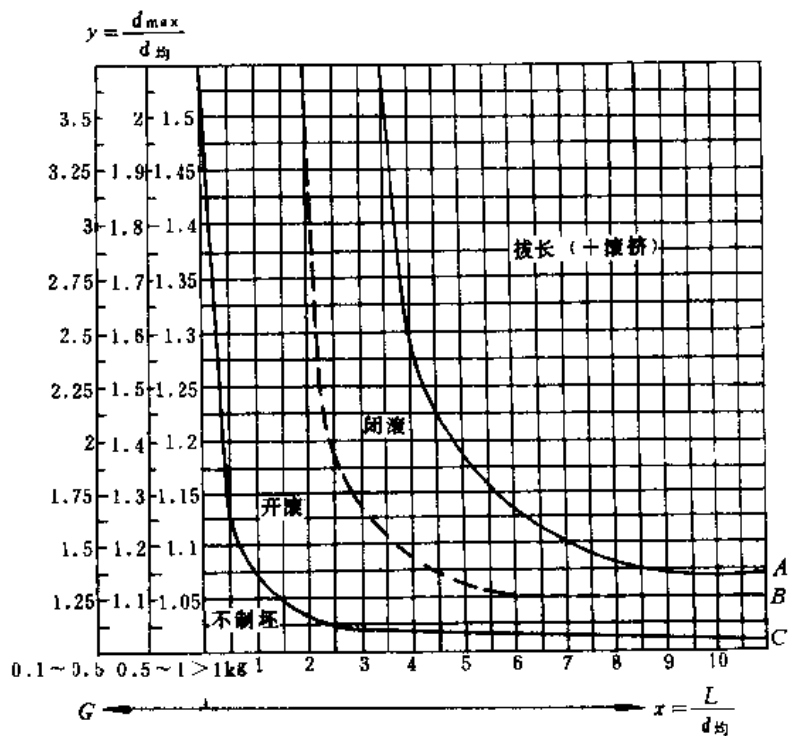


图 9-15 确定制坯工步的线图

所对应的毛坯长度可由各段的体积和毛坯截面积求得 (图 9-18c)。这些图形均已在工艺设计时得到,但在拔长模设计时仍可以重新分段,并按新的分段求取方块图。

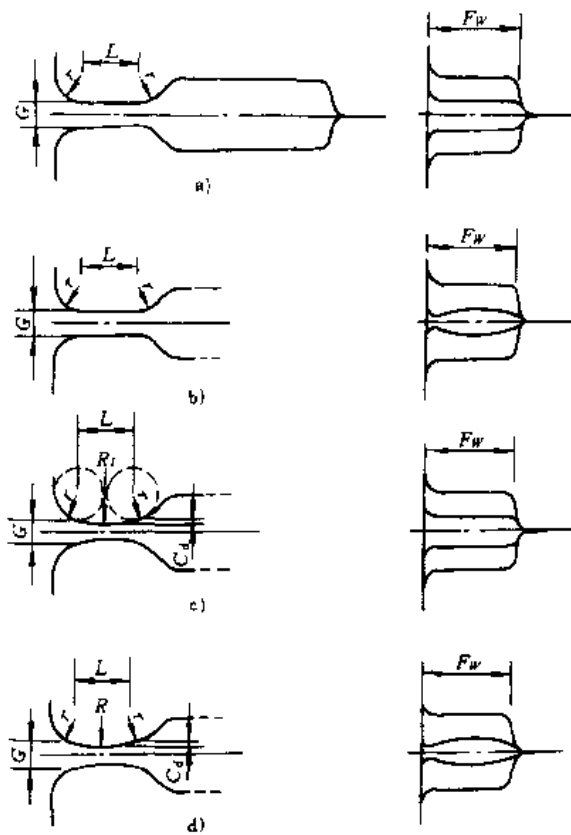


图 9-16 四种拔长型槽

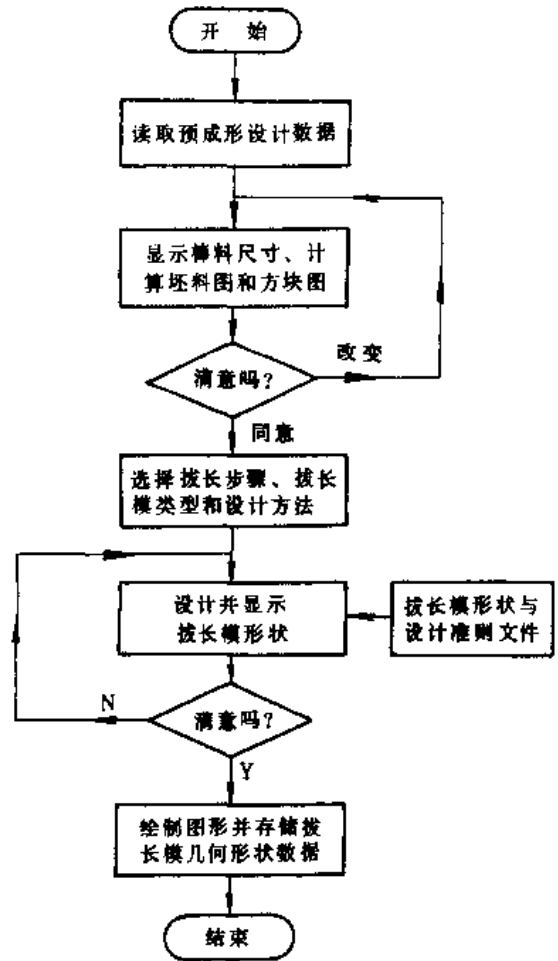


图 9-17 拔长型槽设计程序的流程图

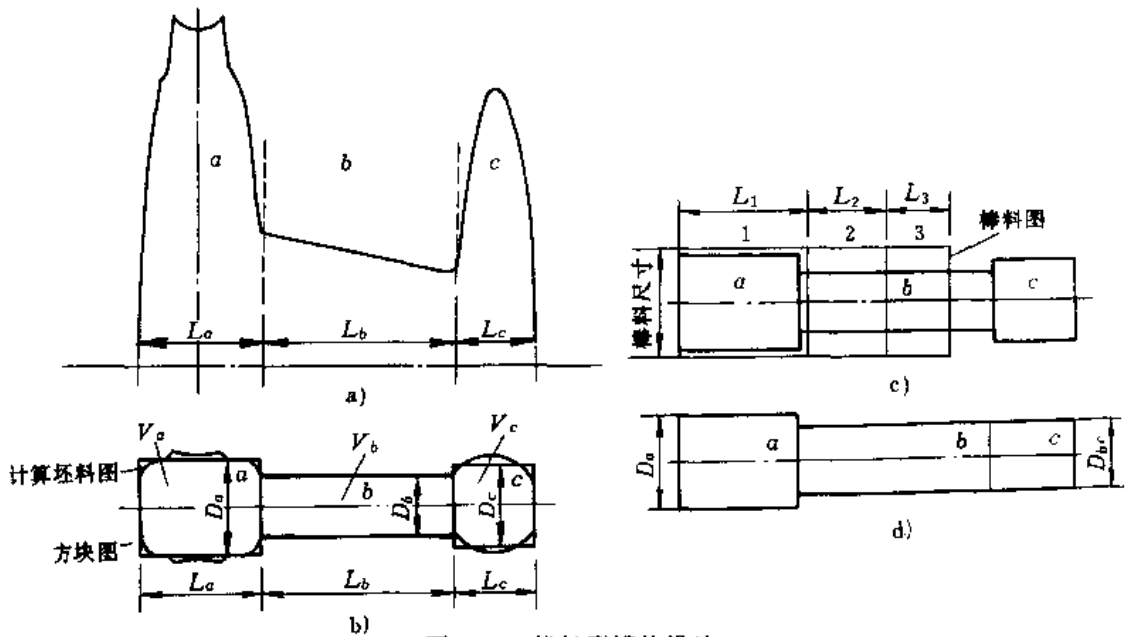


图 9-18 拔长型槽的设计

拔长步骤的选择应能以最少的打击次数得到与计算坯料图相近似的形状。拔长步骤的选择主要由毛坯尺寸和方块图中所表示的横截面的变化所决定。以图 9-18 为例, 应首先拔长  $b$  段和  $c$  段, 使截面尺寸达到  $c$  段的要求, 然后进一步拔长  $b$  段, 获得方块图表示的形状。如果相邻段的横截面积相差不大, 例如  $D_c - D_b < D_m$ , 其中  $D_m$  为某一规定值, 则  $b$ 、 $c$  段可以简化为一段 (图 9-18d)。该段的截面尺寸为

$$D_{bc} = \left( \frac{V_b + V_c}{L_b + L_c} \right)^{\frac{1}{2}}$$

这时仅需一次拔长便可满足要求。设计人员可以改变  $D_m$  值, 以便根据自己的需要确定简化头杆的判据。

设计拔长型槽的形状包括确定坎部高度、设计纵向轮廓和横向轮廓。手工设计通常采用的方法有几何作图法和查表法。因为这些设计方法在确定一些主要尺寸时缺少定量的分析, 所以不适合于计算机辅助设计。

这里介绍一种适合于程序实现的设计方法。

这种方法确定坎部高度  $G$  的算式为:

$$\text{对于平的纵向轮廓} \quad G = \sqrt{A}$$

对于凸圆弧形的纵向轮廓  $G = \sqrt{A} - B$ ,  $1.6 \leq B \leq 3.2$  式中,  $A$  为不包括飞边在内的截面面积, 这是因为拔长时不可能得到准确的方形, 得到的截面总是较大的缘故。为了防止失稳,  $G$  不得小于棒料尺寸的  $1/3$ , 否则需要进行两次拔长。

坎部长度  $L$  的计算式为

$$L = L_f - 13$$

式中,  $L_f$  为拔长长度, 即与该段相对应的毛坯长度。

对于凸圆弧形的纵向轮廓, 弧形高度  $G_d$  和主圆弧半径  $R$  (图 9-16c、d) 的确定方法为

$$\begin{cases} G_d = 3.2 - 1.6 \left( \frac{25}{D_0} \right), & \text{当 } D_0 > 25 \text{ 时} \\ G_d = 1.6, & \text{当 } D_0 \leq 25 \text{ 时} \end{cases}$$

$$R = \frac{G_d}{2} + \frac{L_f}{32}$$

拔长坎部宽度  $F_w$  为

$$\begin{cases} F_w = 0.75 \frac{A}{G} \\ F_w \geq (1.4 \sim 1.5) D_0 \end{cases}$$

试验表明拔长时产生的宽展量不会超过平面应变时的 75%, 这就是上面算式中采用 0.75 的原因。另一方面, 提供较宽的坎部可以防止因为毛坯放偏而产生夹缝或凸起。

#### 四、滚挤型槽的设计

滚挤型槽用以减小坯料某部分的横截面积, 增大另外部分的横截面积, 在长度方向上分配金属, 使毛坯接近于计算坯料的形状。另外, 滚挤还可以去除氧化皮, 消除拔长时产生的缺陷。

滚挤型槽由钳口、本体和尾部三个部分组成 (图 9-19)。滚挤型槽按横截面形状可分为开式、闭式和混合式三种。图 9-19 为闭式滚挤型槽截面图。

本体部分的设计是滚挤型槽设计的主要内容，计算坯料图为设计的主要依据。虽然按计算坯料图制坯可获得最大的材料利用率，但是由于锻件形状的复杂性，要做到这一点实际上是不可能的。因此，通常的做法是根据计算坯料图简化毛坯形状，并用较大的圆弧或直线连接各部分，形成型槽本体部分的纵向轮廓。计算坯料图的分段方法和拔长模设计时的相同。

图 9-20 为滚挤型槽设计程序的流程图。作为输入信息的是工艺设计模块产生的计算坯料图、方块图和毛坯尺寸等数据。首先，程序将图形显示出来，这时设计人员可以重新分段或选择毛坯尺寸。接着，程序设计型槽本体部分的纵向轮廓，并将设计结果和计算坯料图同时显示，允许设计人员修改程序结果，或重新划分计算坯料图，产生形状完全不同的本体轮廓。设计横向轮廓时采用交互方式，使用者选择轮廓类型（开式或闭式），程序计算型槽宽度，并显示横向轮廓。输入要求的宽度或轮廓类型，可以改变设计的横向轮廓。

下面说明一下用曲线拟合的方法设计型槽本体的过程。图 9-21a) 为连杆锻件图，图 9-21b) 为其计算坯料图和根据分段产生的方块图。在这里，计算坯料图分为三段，即二头一杆。如图所示，在方块图的每一部分定义三个点，然后用一段圆弧拟合。圆弧的起点、中点和终点的  $x$  坐标和每一段的左边、中线和右边的  $x$  相同。改变三个点的高度，即改变其  $y$  坐标，可以得到不同的拟合圆弧。程序可以自动处理，使得比相邻区高的方块用凸圆弧拟合，产生聚料作用；比相邻区低的，则用凹圆弧拟合，以产生赶料作用。

在对计算坯料图的每段拟合完毕后，程序根据相邻圆弧是否相交，用圆弧或直线连接相邻弧段（图 9-21c）。

在设计滚挤型槽钳口和尾部的程序中，可采用图 9-22 所示的数表，即根据毛坯尺寸决定这两部分的尺寸。

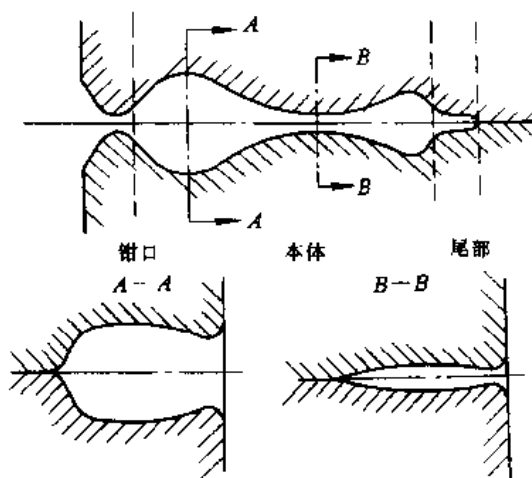


图 9-19 滚挤型槽的纵截面与横截面

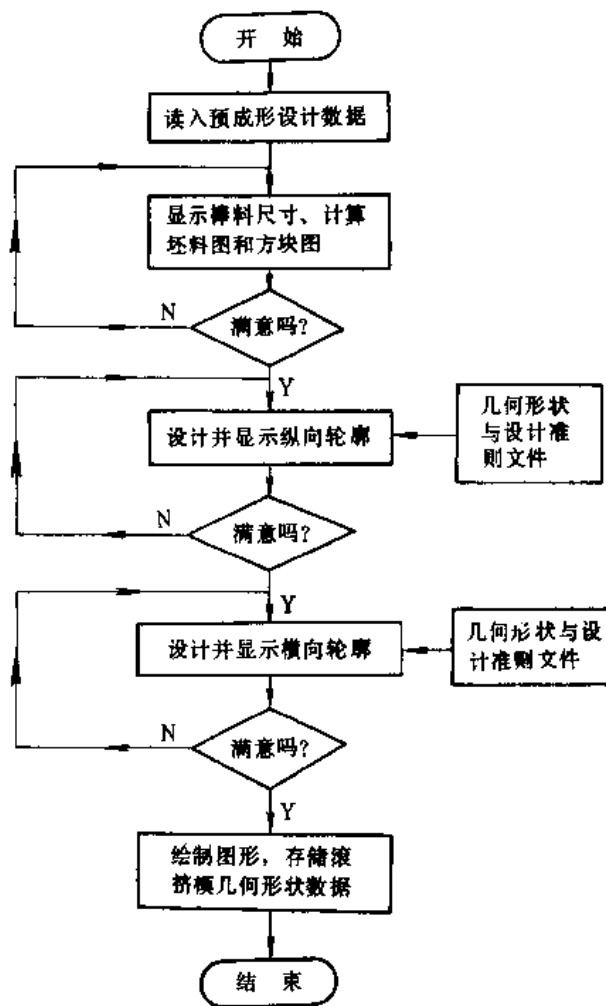


图 9-20 滚挤型槽设计程序的流程图



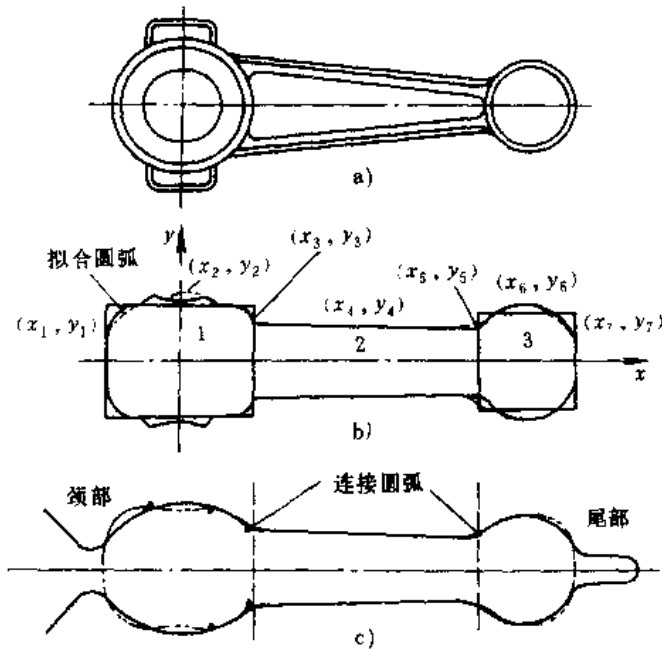
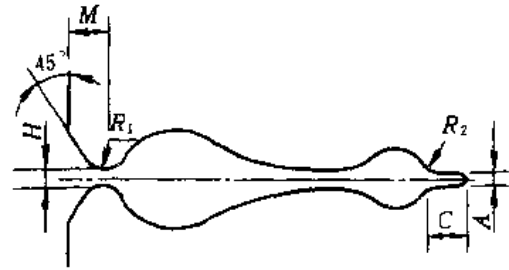


图 9-21 设计滚挤型槽本体轮廓的过程



(mm)						
棒料尺寸	A	C	R <sub>2</sub>	H	R <sub>1</sub>	M
<30	4	20	5	10~12	8	15~20
30~50	6	25	5	12~16	8	20~25
50~80	8	30	10	16~20	10	25~30
80~100	10	35	10	20~26	12	30~38
>100	12	40	10	>26	15	>16

图 9-22 滚挤型槽设计程序所用的数据

### 五、型槽的布置

型槽在模块上的位置将直接影响锻件的质量和作用在设备上的力。如果型槽布置不当，模块锻时产生的偏心载荷会使分模面产生偏移，造成锻件超差，同时会加速滑块的磨损。在模块上布置多个型槽时，通常需权衡各种因素，尽量使载荷中心与滑块中心靠近，减小偏心载荷。

从生产率的角度考虑，应按照锻件工步的顺序布置型槽，使工件传送的距离最短。但是，通常的作法是将终锻型槽布置在模块的中心附近，使载荷中心接近滑块中心。图 9-23 为多型槽的布置情况，制坯型槽布置分置两边，载荷较大的终锻型槽和预锻型槽安排在中间。终锻型槽比预锻型槽更接近模块中心，因为前者的压力比后者大。

布置型槽时用到的信息包括锻造工序、打击能量、飞边槽

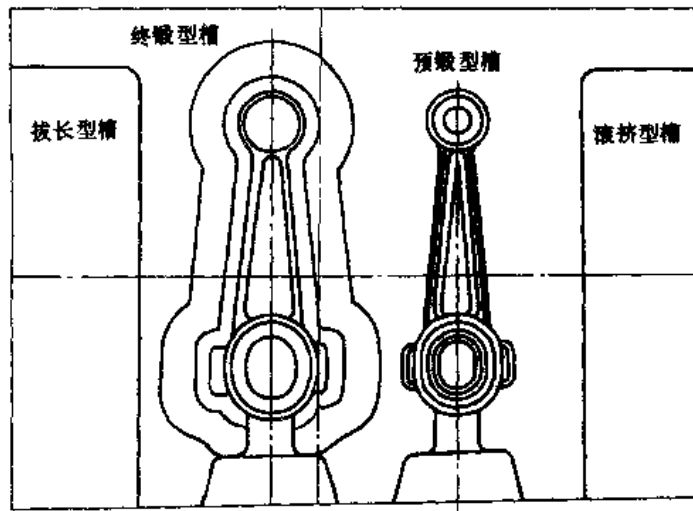


图 9-23 多型槽的布置

尺寸和毛坯尺寸。此外，各个型槽的轮廓形状和几何尺寸也是型槽布置程序的输入信息。图 9-24 为型槽布置程序的流程图。型槽布置完毕后，显示设计结果，除图形外还包括模块尺寸、承压面积、各型槽相对于燕尾中心和键槽中心的位置尺寸。设计人员可以修改设计结果，直至满意为止。最终设计结果保存在文件中，并可在绘图机上输出型槽布置图。

在布置型槽的程序中，压力中心的计算是比较重要的一部分。在计算压力中心时，通常使用以下几种方法：

### 1. 质心或轮廓线中心法

这种计算方法认为压力中心和锻件的质心重合。当锻件形状复杂时计算比较麻烦，所以常用轮廓线的中心作为压力中心。如锻件在厚度方向的尺寸变化不大，则用水平投影的轮廓线进行计算（图 9-25a）。若厚度尺寸变化大，则用垂直方向的投影计算（图 9-25b）。一般说来，用这种方法求得的压力中心有较大的误差。

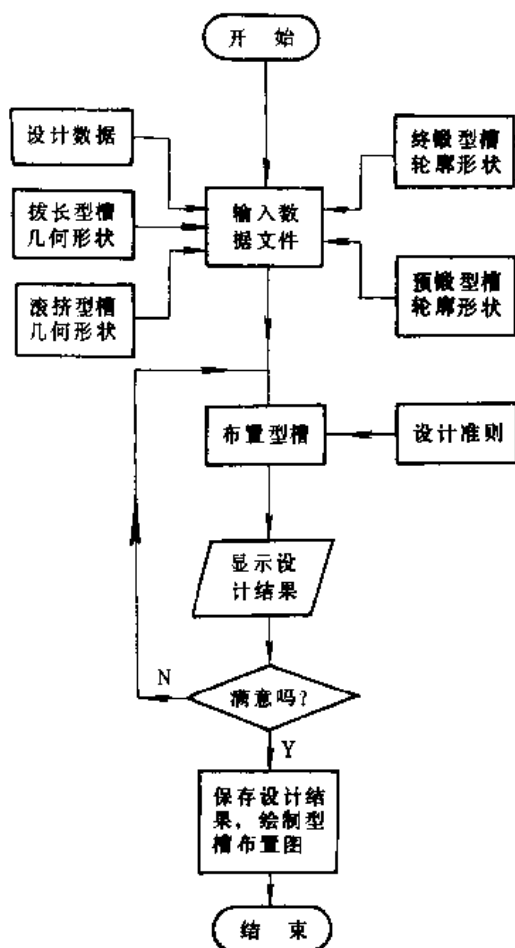


图 9-24 型槽布置程序的流程图

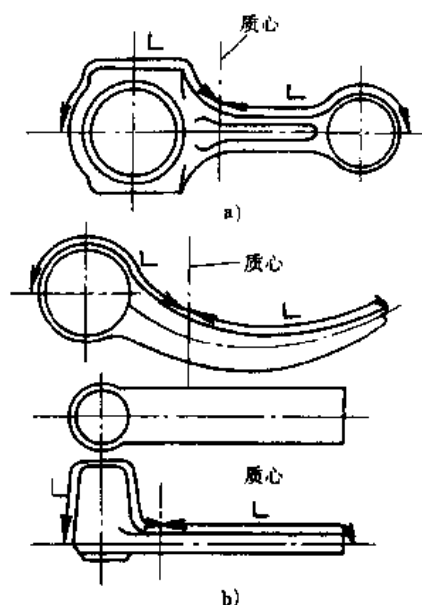


图 9-25 用质心或轮廓线中心法确定压力中心

### 2. 平衡点法

该方法计算时，沿长度方向将锻件分为若干部分（图 9-26），每一部分的“向量” $V$  定义为

$$V = A \sqrt{\frac{W}{T}}$$

式中， $A$  为投影面积； $W$  为平均宽度； $T$  为平均厚度。“向量”和作用点距离的乘积为“矩”，平衡点可用下式求得，

$$\text{平衡点} = \frac{\sum \text{矩}}{\sum \text{向量}}$$

对于复杂的锻件，计算时应划分较多段数。这种方法的计算精度与划分的段数、平均宽度和厚度的计算有关。实际应用表明，用平衡点法得到的结果比较精确。

### 3. 主应力法

将锻件分解为具有一定变形方式的若干区域，分别对每一变形区求解，计算出各部分的压力中心。然后，用力矩平衡法可以计算出整个型槽的压力中心。

在上述求压力中心的方法中，平衡点法和主应力法比较精确，计算结果与实际情况接近。主应力法的优点在于可同时求得锻造载荷。

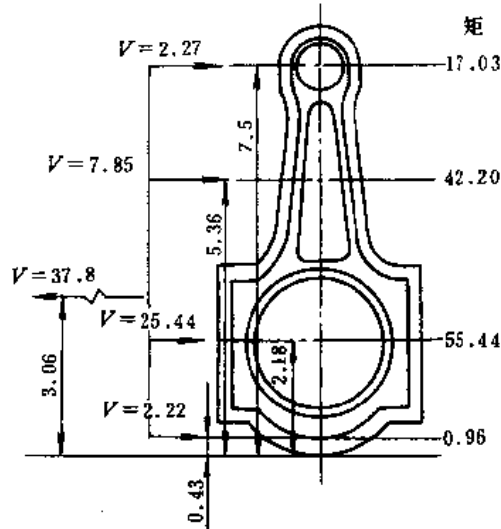


图 9-26 确定压力中心的平衡点法

## 第四节 形状复杂性和飞边槽的有关算法

### 一、锻件与毛坯形状复杂性的定量计算

计算机辅助设计时，由于机器对锻件的形状特点缺乏直观感觉，因此有必要制订定量计算形状复杂性的标准。这样，才便于导出计算模锻工艺过程主要参数的算法。人们在研究锻件形状复杂性标准时，提出了各种不同的算法。

有的算法用锻件的平均高度与锻件最大直径的比值表示形状复杂性。有的则利用锻件最大直径的平方与平均直径的平方之比来计算形状复杂性系数。原苏联国家标准 ГОСТ 7505—74 规定用锻件体积与其外切圆柱或长方体的体积之比来确定锻件形状复杂程度。实践证明，用这些计算方法得到的结果均不够理想，因而不能在锻模计算机辅助设计的算法中使用。

一般来说，形状简单的锻件较易锻造，形状复杂的锻件，如长而细或分枝、凸起较多的锻件，则较难锻造。这是因为形状复杂锻件的表面积与体积之比较大，形状的变化影响着摩擦作用和温度的变化，从而影响充满型槽所需的压力。基于这些考虑，捷捷林提出了如下计算锻件形状复杂性系数的算法。

为了计算轴对称锻件的形状复杂性系数，定义了轴向形状系数  $\alpha$ ：

$$\alpha = X_f / X_c$$

式中， $X_f = P^2 / F$ ； $X_c = P_c^2 / F_c$

其中， $P$  为锻件轴截面的周长； $F$  为锻件轴截面的面积； $P_c$  为轴截面包络矩形的周长； $F_c$  为轴截面包络矩形的面积。因为这个包络矩形也就是锻件包络圆柱体的轴截面，所以  $\alpha$  的值实际上代表了锻件形状与圆柱体形状的差别。

对于轴对称锻件，凸起部分与对称轴的距离愈远，则锻造的困难愈大。为此定义了横向

形状系数  $\beta$ :

$$\beta = 2R_g/R_c$$

式中,  $R_g$  为半轴截面的重心与对称轴之间的距离;  $R_c$  为锻件的最大半径 (图 9-27)。

锻件的形状复杂系数  $S_F$  可用下式计算,

$$S_F = \alpha\beta$$

如果锻件为圆柱体, 按上式算得的  $S_F$  等于 1。锻件的形状愈复杂, 愈难锻造,  $S_F$  的值也愈大。

毛坯或预锻件的形状复杂性系数  $S_P$  也可用相同的方法求得。因为预锻件的形状和所要求的锻件形状愈接近, 终锻愈容易进行。所以, 在考虑了毛坯形状的影响因素之后, 综合形状复杂性系数

$$S = S_F/S_P$$

对于直长轴类锻件的横截面形状复杂性系数  $C_F$ , 捷捷林建议用下式计算 (图 9-28),

$$C_F = \frac{P}{\sqrt{F}} = \frac{L}{0.5B}$$

式中,  $P$  为锻件横截面周长;  $F$  为锻件横截面面积;  $B$  为锻件横截面宽度;  $L$  为  $\text{Max}(L_1, L_2)$ ,  $L_1$ 、 $L_2$  分别为截面的左部和右部重心与  $y$  轴的距离。

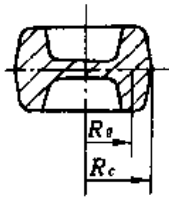


图 9-27 锻件的轴截面

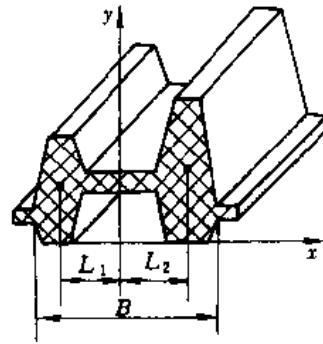


图 9-28 直长轴类锻件的横截面

同样, 考虑了毛坯的形状影响之后, 综合形状复杂性系数为

$$C = C_F/C_P$$

式中,  $C_P$  为毛坯的形状复杂性系数, 采用与计算  $C_F$  类似的公式计算。

上述形状复杂性系数的计算公式已为不少锻模 CAD/CAM 系统所采用。许多研究表明, 虽然这些公式最初仅用于轴对称锻件, 但它也可用于任意形状的锻件。为此, 必须确定锻件所有截面的形状复杂性系数, 把其中最大者当作锻件的形状复杂性系数。

## 二、计算飞边槽尺寸和飞边金属消耗的算法

### 1. 计算飞边槽桥部尺寸的算法

图 9-29 中显示出了常用的飞边槽形状, 系由桥部 1 和仓部 2 组成。仓部的作用是容纳过剩的金属。正确地设计飞边槽桥部尺寸对保证金属充满型槽、降低金属消耗和减少模具磨损有着重要意义。

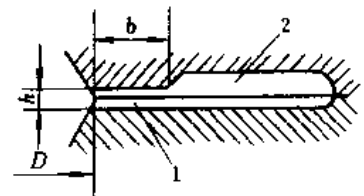


图 9-29 飞边槽的形状

1—桥部 2—仓部

在手工设计锻模时,不同国家、不同公司采用的设计准则往往都不同。

例如,我国的一些工厂按锻锤的落下部分重量或压力机的吨位决定桥部尺寸。这种方法没有考虑锻件和毛坯的形状复杂性。同一锻件往往能够在不同的设备上锻造,但所需压力值是不会改变的。按这种方法,如果所选择的设备吨位小, $h$ 也会减小,显然是不合理的。

捷捷林在研究锻模 CAD 时,利用数理统计的方法导出了计算飞边槽桥部尺寸的算法。

他对 240 多种锤上模锻资料进行了统计分析。对诸因素统计数据分布进行分析的结果表明,桥部厚度  $h$  与锻件的轮廓尺寸和重量有关。对桥部厚度和锻件重量、锻件最大直径进行相关分析,结果表明锻件重量  $Q_{\text{锻}}$  能最好地反映计算桥部厚度用的未知关系式。利用回归分析方法,得到计算桥部厚度  $h$  的关系式

$$h = -0.09 + 2\sqrt[3]{Q_{\text{锻}}} - 0.01Q_{\text{锻}}$$

在确定  $h$  后,计算  $b$  的尺寸应保证金属完全充满型槽所必需的压力。 $b/h$  的值愈大,金属向飞边流动的阻力就愈大。对锤上模锻的统计资料进行相关和回归分析,得到如下关系式:

$$\frac{b}{h} = -0.02 + 0.0038S \frac{D_0}{h} + \frac{4.93}{Q_{\text{锻}}^{0.2}}$$

式中,  $S$  为形状复杂性系数;  $D_0$  为毛坯的最大直径。

通过类似的方法得到的用于热模锻压力机的关系式为

$$h = 2.17 + 1.39Q_{\text{锻}}^{0.2}$$

$$\frac{b}{h} = -1.985 + 5.258Q_{\text{锻}}^{-0.1} + 2.56 \times 10^{-2} \frac{D_0}{h}$$

这些公式不仅可用于轴对称锻件,也可用于形状更为复杂的锻件,例如具有薄肋的锻件和汽轮机叶片等。

## 2. 计算飞边金属消耗的算法

在计算毛坯重量时,应考虑飞边金属消耗和加热时的烧损。

手工设计时采用的估算飞边金属消耗的经验方法,没有充分考虑毛坯形状、分模面位置和飞边桥部尺寸等因素的影响。虽然也有的锻模 CAD/CAM 系统在确定飞边金属消耗时采用的是些粗略的经验公式,但是为了充分体现计算机辅助设计的优越性,有必要建立计算飞边金属消耗的可靠算法。

飞边金属的消耗取决于锻件和毛坯的形状复杂性、分模面位置和飞边桥部尺寸。另外,锻件重量愈大,飞边金属消耗也愈多。

回归分析的结果得到了以下关系式,

$$\frac{Q_{\text{飞}}}{Q_{\text{锻}}} = -0.012 + 0.169Q_{\text{锻}}^{-0.2} + 0.0115 \left( \frac{D_0}{D_{\text{锻}}} \right)^2 - 0.011 \frac{b}{h}$$

式中,  $Q_{\text{飞}}$  和  $Q_{\text{锻}}$  分别为飞边和锻件的重量,其余参数如前述。

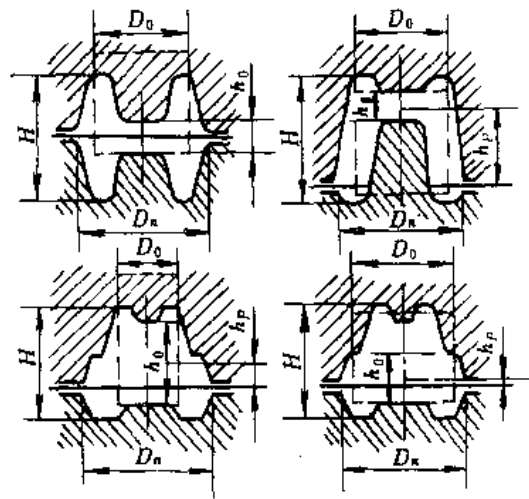


图 9-30 内外分模面的相对偏移

对于内外分模面有偏移的锻件(图 9-30),应考虑内外分模面的偏移和毛坯在锻模中的原始位置。定义

$$\gamma = \frac{H}{h_0 + h_P}$$

式中,  $H$  为锻件的高度;  $h_0$  为锻模闭合时上、下模两平面间的最小距离, 毛坯在原始位置时紧靠这两个平面;  $h_P$  为内外分模面之间的距离。

设  $T = S (D_c/D_{\text{锻}})^2 \gamma^2$ , 回归分析结果得

$$\frac{Q_{\text{飞}}}{Q_{\text{锻}}} = -0.54 + 15.44 Q_{\text{锻}}^{-0.2} + 0.117 T Q_{\text{锻}}^{-0.2} - 0.01383 \frac{b}{h} T - 0.703 \frac{b}{h}$$

用类似的分析方法得到的热模锻压力机上飞边金属消耗的计算式为

$$\frac{Q_{\text{飞}}}{Q_{\text{锻}}} = -0.680 + 12.30 Q_{\text{锻}}^{-0.2} - 0.022 T + 0.0777 Q_{\text{锻}}^{-0.2} - 0.130 T^{0.5}$$

上述算法的计算结果和试验所得的最优数据相吻合。设计的锻模不仅可以保证金属充满型槽, 而且减少了飞边金属消耗。

由于设计飞边尺寸和计算飞边金属消耗算法的先进性和可靠性, 这些算法在锻模 CAD/CAM 中得到了较广泛的应用。

## 第五节 预锻型槽的设计

预锻工序的目的是分配金属, 形成中间过渡形状。设计合理的预锻模有利于金属在终锻时充满型槽, 生产出无缺陷的锻件; 有利于减少飞边损失; 可减少金属在终锻型槽中的流动, 从而减少模具的磨损。此外, 预锻提供了合理的变形量和金属流动, 有利于获得理想的锻件性能。在很多情况下, 预锻模设计是否合理决定着模锻工艺的成败。预锻模设计是锻模 CAD/CAM 软件的重要组成部分。

### 一、预锻型槽的设计规则

在设计模锻工艺时, 是否采用预锻取决于以下因素:

- 1) 锻造设备的能力不足以由原始坯料一次锻出工件, 这时应采用预锻。
- 2) 对于形状复杂的锻件, 即使设备能力足够, 如不采用预锻, 会造成型腔的角部、肋部等位置不能充满。这时须采用预锻, 使金属成形时易于向难填充的部位流动。
- 3) 当采用一次或多次预锻时, 由于终锻模的使用寿命延长或原材料节省而产生的经济效益, 有可能补偿额外的模具制造费、工件运输费和其它费用。因此, 设计时应综合考虑生产批量和终锻模的使用寿命。

在手工设计中, 预锻模的设计在很大程度上取决于设计人员的经验和技艺。设计预锻模的经验准则可归纳为以下几点:

- 1) 预锻型槽和终锻型槽的横截面相等。
- 2) 预锻型槽截面的横向尺寸应比终锻型槽窄一些, 以利预锻件在终锻型槽中的放置。
- 3) 为有利于金属的流动, 预锻型槽应有较大的圆角半径。
- 4) 为有利于金属向肋部流动, 应提供由腹板中心向肋部的开口斜度。
- 5) 对于具有较高凸台或肋部的锻件, 常将预锻模相应部位的宽度、高度减小, 而将腹板

厚度加大。

6) 对于钢锻件, 只要可能, 应设计预锻模的肋部截面, 使其在终锻时以镦粗方式变形, 减少模具磨损。

### 二、预锻型槽截面的设计方法

预锻型槽的设计主要是以锻件的截面为基础进行的。对于轴对称锻件, 可取其轴截面; 对于长轴类锻件, 则需选取一系列有代表性的截面。

图 9-31 为长轴类锻模设计预锻型槽截面程序的流程图。程序首先将锻件的形状显示出来, 并要求设计人员选择一些具有代表性截面。然后, 逐个设计预锻型槽各截面。最后, 在此基础上组合为预锻型槽的形状。

这里, 介绍设计预锻型槽截面的两种方法。

#### 1. H 形断面预锻型槽设计方法

在设计 H 形断面预锻型槽时, 根据肋板高与宽的比值可将截面分为三种, 这三种截面及其预成形的设计表示在图 9-32 中。这些预锻模形状被广泛采用, 并为设计复杂的预锻模打下了基础。但是, 这种方法缺少定量的计算, 因此设计时需要相当的经验。

有人提出了 H 形断面预锻型槽的定量计算方法。按照肋板的高、宽比  $H_f/W_f$ , 这种计算方法可分为两种情况 (图 9-33)。

1)  $\frac{H_f}{W_f} \leq 2$  时 (图 9-33a), 预锻型槽的

顶部和底部为平的, 截面宽度

$$X_m = X_f - C$$

式中,  $X_f$  为终锻模截面宽度;  $C$  值为 2~10, 由设计人员选取。

预锻型槽的外圆角半径  $R_{mc}$  和内圆角半径  $R_{mf}$  分别为

$$R_{mc} = 1.25R_{fc} + 3.2, \quad R_{mf} = 1.25R_{ff} + 3.2$$

截面的高度按照面积相等的原则求值。

2)  $\frac{H_f}{W_f} \geq 2$  时 (图 9-33b),  $R_{mc}$ 、 $R_{mf}$  和

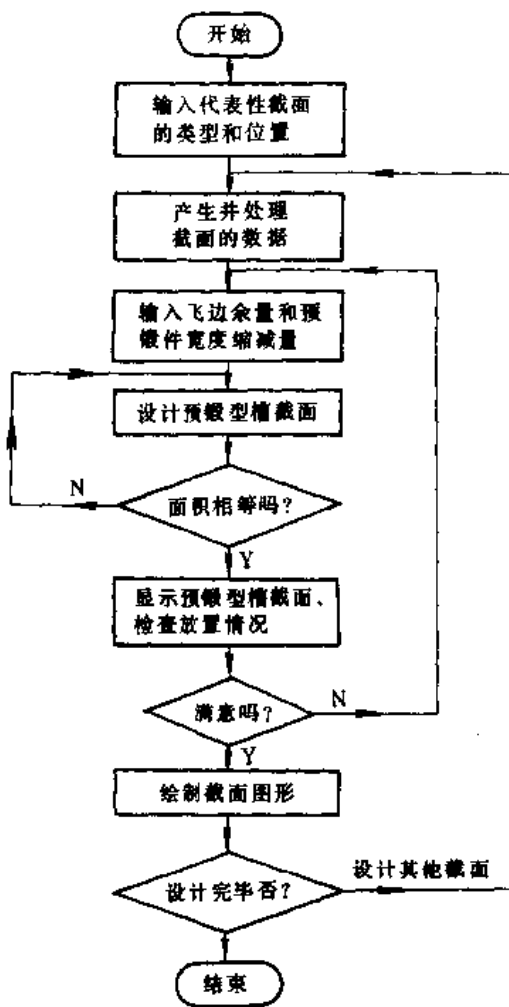


图 9-31 预锻型槽截面设计程序流程图

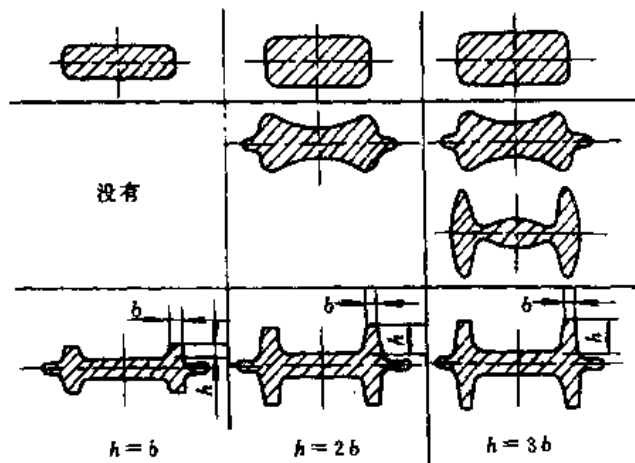


图 9-32 常用的设计 H 形截面预锻型槽的方法

截面的平均高度  $H_m$  均可按上述方法求得。尺寸  $Y_1$  按下式计算

$$Y_1 = 0.25 (H_0 - H_m)$$

$Y_2$  由面积  $A_1$  和  $A_2$  相等的关系求得。

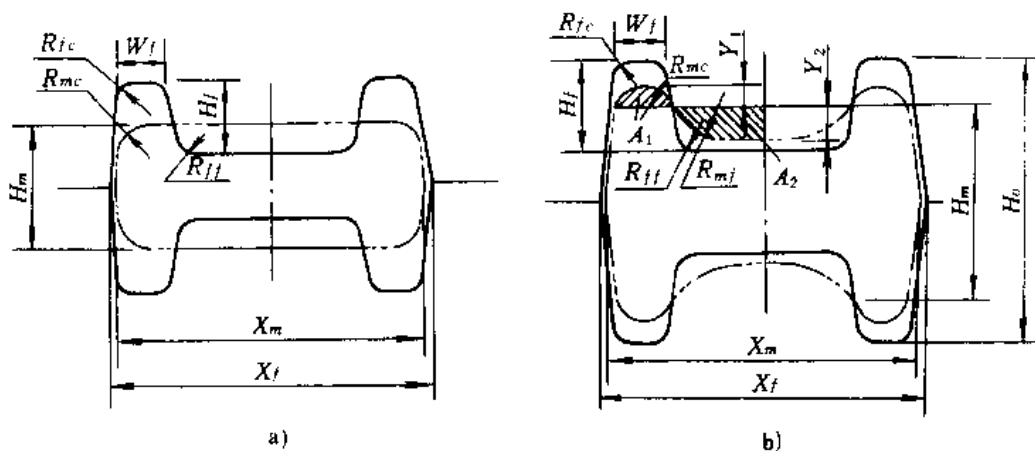


图 9-33 一种设计 H 形断面预锻型槽的计算方法

2. 用指数曲线定义预锻型槽截面形状的方法

用指数曲线定义预锻型槽截面形状的方法在锻模计算机辅助设计中应用较多。使用这种方法设计预锻型槽截面时，须将截面分解为若干 L 形单元进行处理。

美国阿格曼和阿尔坦等人基于指数曲线设计方法和对金属流动的理论分析，提出了确定 L 形单元形状的计算公式。首先将截面分解为 L 形单元 (图 9-34)，然后根据截面所在的变形区域确定 L 形单元的轮廓形状。

当截面处于平面应变区域时 (图 9-35)，

$$x = L \left[ \ln \left( \frac{y}{h} \right) + 1 \right]$$

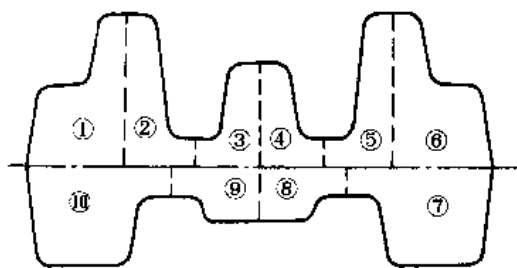


图 9-34 将截面分解为 L 形单元  
当截面处于轴对称变形区域时，

$$x = L \left[ 0.5 \ln \left( \frac{y}{h} \right) + 1 \right]$$

程序用不同的计算公式设计不同变形区域的预锻型槽截面形状，整个截面的形状是由各 L 单元组合而成。图 9-36 为用上述方法设计的预锻型槽与终锻型槽的截面形状。

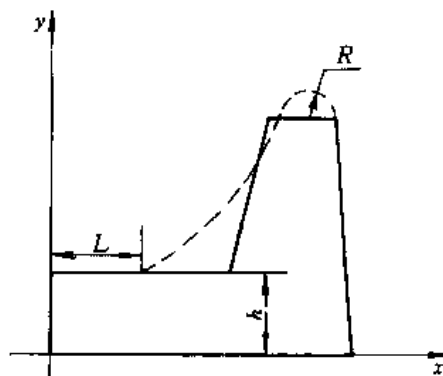


图 9-35 处理 L 形单元的方法



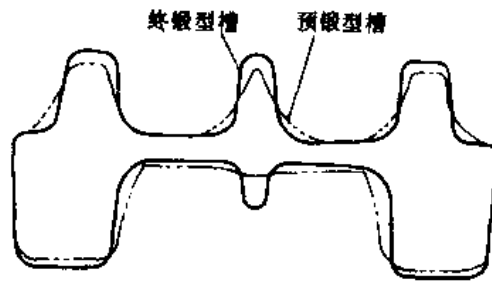


图 9-36 预锻型槽与终锻型槽

### 习 题

1. 如何将成组技术应用于锻模设计?
2. 参照图 9-7, 用 FORTRAN 语言编写轴对称锻件, 添加机加工余量及拔模斜度的程序。
3. 编写轴对称锻件体积计算程序。
4. 计算图 9-7 所示锻件的形状复杂系数。
5. 叙述长轴类锻件锻模工艺计算机辅助设计的方法及步骤。

## 第十章 注塑模具 CAD/CAM

### 第一节 注塑模 CAD/CAE/CAM 概述

#### 一、发展简史

常用塑料如聚氯乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯、ABS 等,在本世纪 40 年代才问世,注塑模具的历史不过 40 余年,但发展速度却异常迅速。例如美国和日本的塑料模具专业厂均已超过 1 万家,日本塑料模具年总产值已达 1003000 亿日元,美国也达到 60 亿美元。塑料工业对模具的迫切需要是注塑<sup>①</sup>模具 CAD/CAE/CAM 技术发展的原动力,而近 20 年塑料流变学、几何造型技术、数控加工以及计算机技术的突飞猛进又为注塑模具 CAD/CAE/CAM 系统的开发创造了条件。

从 60 年代开始,英国、美国、加拿大等国的学者如 J. R. Pearson (英)、J. F. Stevenson (美)、M. R. Kamal (加)、K. K. Wang (美) 等开展了一系列有关塑料熔体在模具型腔内流动与冷却的基础研究。在合理的简化基础上,60 年代完成了注塑过程一维流动与冷却分析程序,70 年代完成了二维流动与冷却分析程序,80 年代开展三维流动与冷却分析,并把研究扩展到保压分析、纤维分子取向以及翘曲与变形预测等领域。进入 90 年代后开展了流动、保压、冷却、应力分析等注塑工艺全过程的集成化研究。这些卓有成效的研究成果,为开发实用型的注塑模工艺过程分析软件奠定了基础。

几何造型与数控加工技术在近 20 年内也取得了显著的进步,从 60 年代的线框模型的 CAD 系统到 70 年代的以曲面造型为核心的 CAD/CAM 系统、80 年代的实体造型技术的完善,为注塑模具采用 CAD/CAM 技术提供了可靠的保证。目前在国际市场上已推出一批商品化的 CAD/CAM 系统,并成功地运用于注塑模具的设计与制造中。

注塑模 CAD/CAE/CAM 技术能够推广运用的另一个原因是计算机的发展。在 70 年代,模具 CAD 系统使用的大多为中、小型计算机,采用集中式的分时系统,其缺点是响应时间长、价格昂贵。80 年代初国外推出了以 16 位微处理器为核心的个人计算机,其功能可与高档小型机媲美,且价格便宜,一般的中、小模具厂均有能力购买。80 年代中期国外又推出功能更为强大的 32 位工程工作站,采用分布式的系统,可将多个模具工作站连网工作。

正是由于上述领域的努力和发展,注塑模 CAD/CAE/CAM 才会实现商品化,在实际生产中发挥越来越大的作用。现在,注塑模 CAD/CAE/CAM 已成为热门研究课题。分散、零星的探讨发展为集中、系统的研究和开发。在该领域中最有代表性的研究团体是美国 Cornell 大学 K. K. Wang 教授领导的 CIMP 研究组(C-Mold 系统)、加拿大 McGill 大学 M. R. Kamal 教授所在的化学工程系(MCKAM-I 系统)以及德国 Aachen 大学 G. Menges 教授的 IKV 研究所(CADMOULD 系统)。

#### 二、技术特点

注塑模 CAD/CAM 的重点在于注塑产品的造型、模具设计、绘图和数控加工数据的生成。

① 此处暂保留“注塑模具”字样,不改成“注射”,下同。

而CAE(计算机辅助工程)包含的工程功能更为广泛。CAE将工程设计、试验、分析、文件生成乃至制造贯穿于产品研制过程的每一个环节之中,用以指导和预测产品在构思和设计阶段的行为。

按照传统方法,注塑产品的构思完成后,需制作实体模型以评估其外观,测定其性能。若采用仿形加工制作模具型腔或者电火花机床所需的电极,常需要制作木模,经过两次翻型后方能得到石膏靠模。这种方法的主要缺点是木模的精度无法保证。由于仅凭经验设计模具,模具在装配完毕后,往往需要几次试模和修正才能生产出合格的注塑产品。

CAD/CAE/CAM的集成化从根本上改变了传统的模具生产方式。采用几何造型技术,注塑制品一般不必进行原型试验,制品形状能逼真地显示在计算机屏幕上,并能借助于弹性有限元分析软件对制品的力学性能进行预测。借助于CAD软件,自动绘图代替了人工绘图,自动检索代替了手册查阅,快速分析代替了手工计算,模具设计师能从繁冗的绘图和计算中解放出来,集中精力从事诸如方案构思和结构优化等创造性的工作。

在模具图样下达车间之前,CAE软件可以预测成型工艺及模具结构等有关参数的正确性。例如,可以采用流动模拟软件来考察塑料熔体在模具型腔内的流动过程,以此改进流道系统的设计,提高试模的成功率。可以采用保压和冷却分析软件来考察塑料熔体的凝固过程和模温的变化,以此改进模具的冷却系统,调整注塑成型工艺参数,提高制品的质量和生产效率。还可以采用应力分析软件来预测制品出模后的变形和翘曲。

借助于CAM软件,模具型腔的几何数据能交互地转换为机床刀具的曲面运动轨迹,进而生成数控加工指令,这样就可省去木模制作工序,提高模具型腔表面的加工精度和效率。

由此可见,模具CAD/CAE/CAM技术是用科学、合理的方法,以计算机软件的形式,为用户提供一种有效的辅助工具,使用户能借助于计算机对制品、模具结构、加工、成本等进行反复的修改和优化,直至获得最佳结果。因而CAD/CAE/CAM技术能显著地缩短模具设计与制造时间,降低模具成本并提高塑料制品的质量。

### 三、工作内容

目前,注塑模CAD/CAE/CAM的工作内容主要有:

#### 1. 注塑制品的几何造型

采用几何造型系统,如线框造型、表面造型和实体造型,在计算机中生成注塑制品的几何模型,这是CAD/CAE/CAM工作的第一步。由于注塑制品大多是薄壁件且又具有复杂的表面,因此常用表面造型方法来产生制品的几何模型。

#### 2. 模腔表面形状的生成

在注塑模具中,型腔用以生成制品的外表面,型芯用以生成制品的内表面。由于塑料的成型收缩率、模具磨损及加工精度的影响,制品的内、外表面尺寸并不就是模具的型芯面、型腔面的尺寸,两者之间需要经过比较复杂的换算。目前的商品化注塑模CAD软件并未能解决这种换算,因此制品的形状和模腔的形状要分别地输入,工作量大且十分繁琐。如何由制品形状方便、准确地生成型腔与型芯表面形状仍是当前的研究课题。

#### 3. 模具结构方案设计

采用计算机软件来引导模具设计者布置型腔的数目和位置,构思浇注系统、冷却系统和顶出机构,为选择标准模架和设计动模部装图和定模部装图作准备。

#### 4. 标准模架选择

采用计算机软件来设计模具的前提是尽可能多地实现模具标准化,包括模架标准化、模具零件标准化、结构标准化及工艺参数标准化等。一般而言,用作标准模架选择的设计软件应具有两个功能,一是能引导模具设计者输入本企业的标准模架,以建立专用的标准模架库,二是能方便地从已建好的专用标准模架库中,选出在本次设计中所需的模架类型及全部模具标准件的图形及数据。

#### 5. 部装图及总装图的生成

根据所选定的标准模架及已完成的型腔布置,模具设计软件以交互方式引导模具设计者生成模具部装图和总装图。模具设计者在完成总装图时,能利用光标在屏幕上拖动模具零件,以搭积木的方式装配模具总图。

#### 6. 模具零件图的生成

模具设计软件能引导用户根据模具部装图、总装图以及相应的图形库完成模具零件的设计、绘图和标注尺寸。

#### 7. 注塑工艺条件及注塑材料的优选

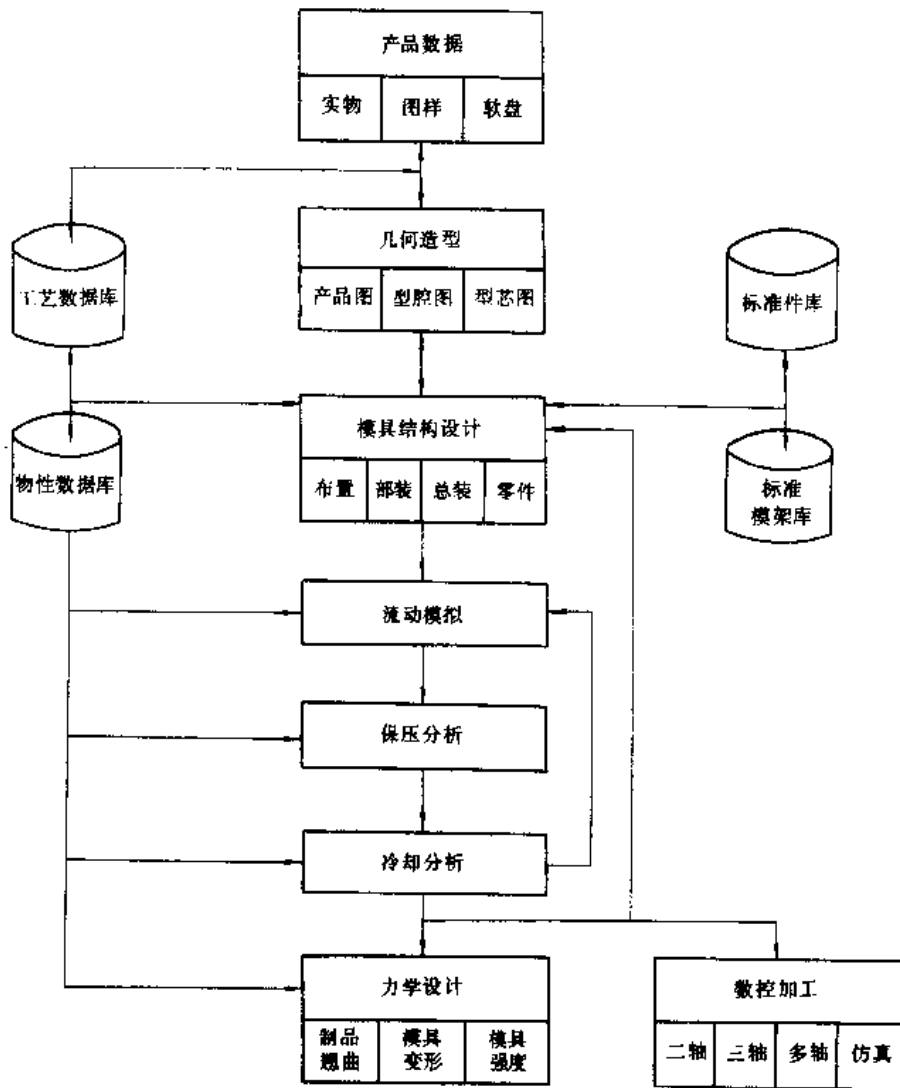


图 10-1 注塑模 CAD/CAE/CAM 集成系统框图

基于模具设计者的输入数据以及选定的优化算法, 模具的 CAE 程序能向模具设计者提供有关熔体充模时间、熔体成型温度、注射成型压力及最佳注塑材料的推荐值。有些软件还能运用专家系统来帮助模具工作者分析注塑成型故障及制品成型缺陷。

#### 8. 注塑流动及保压过程模拟

一般常采用有限元方法来模拟熔体的充模和保压过程。其模拟结果能为模具工作者提供熔体在流动过程中的动态图, 提供不同时刻熔体及制品在型腔内各处的温度、压力、剪切速率、切应力以及所需的最大锁模力等, 其预测结果对改进模具浇注系统及调整注塑成型工艺参数有着重要的指导意义。

#### 9. 冷却过程分析

一般常采用边界元法来分析模具的冷却过程, 用有限差分法分析塑料制品沿着模壁垂直方向的一维热传导, 用经验公式描述冷却水在冷却管道中的导热, 并将三者有机地结合在一起分析非稳态的冷却过程。其预测结果有助于缩短模具冷却时间, 改善制品在冷却过程中的温度分布不均匀性。

#### 10. 力学分析

一般常采用有限元法来计算模具在注塑成型过程中最大的变形和应力, 以此来检验模具的刚度和强度能否保证模具正常地工作。有些软件还能对制品在注塑成型后可能发生的翘曲进行预测, 以便模具工作者在模具制造之前及时采取补救措施。

#### 11. 数控加工

目前已有许多自动编程系统和 CAD/CAM 软件能够生成机床所需的数控线切割指令、曲面的三轴、五轴数控铣削刀具运动轨迹以及相应的 NC 代码。

在加工复杂的曲面时, 为了检验数控加工软件的正确性, 在计算机屏幕上模拟刀具在三维曲面上的实时加工并显示有关曲面的形状数据。

图 10-1 示出了注塑模 CAD/CAE/CAM 集成系统应有的功能及彼此之间的关系。

## 第二节 注塑模结构 CAD

### 一、注塑模结构 CAD 的工作流程

注塑模结构设计的重复性很大, 模具 CAD 的任务之一是将模具设计人员从繁重的重复劳动中解放出来, 因此需要将模具的设计标准、工艺参数、注塑机有关数据存入数据库或图形库, 注塑模结构 CAD 的工作流程是以这些数据库和图形库为依据来安排的。注塑模结构 CAD 工作流程的特点是所有的数据查询、计算、图形显示和绘制全由计算机完成, 与模具设计技巧和经验有关的判断与决策则以人机交互方式由模具设计人员完成, 充分发挥计算机与模具设计人员各自的优势。

由于注塑制品的种类很多, 与之相对应的注塑模结构形式也很多, 因此各类注塑模结构 CAD 的工作流程不尽相同。图 10-2 示出小型、精密、多腔注塑模结构软件的工作流程。

从图中可见, 该系统能将几何造型时生成的制品表面信息转换成模具型腔面和型芯面。根据型腔面和型芯面, 程序引导模具设计人员进行动模板和定模板的方案设计, 包括确定一模几腔、浇注系统的走向、型腔位置的确定、冷却管道的安排等, 以便决定动模板和定模板的长度与宽度, 这类方案设计在很大程度上取决于模具设计人员的经验, 因此需要以人机交互

的方式来完成。方案设计所得到的模板尺寸可用于选择标准模架，同时方案设计的结果还用于定模和动模部装的详细设计。

由于小型精密注塑模常常采用镶块结构，有时是先确定型腔的镶块组成，然后完成部装图，有时又是先完成部装图的布局，再划分型腔的镶块，所以程序采用双向的数据流，既允许由部装图划分镶块，也允许由镶块生成部装图，或者两者反复交替，直至得到满意的设计结果。

由部装图得到的模具零件以及由标准模架得到的模具标准件，经过尺寸标注后可形成模具零件图。这些模具零件在计算机屏幕上以搭积木的形式可方便地组合成模具总装配图。在装配图上可协调冷却管道与顶杆的关系，以便最终确定顶杆的尺寸和位置及冷却管道的尺寸和位置。

模具结构 CAD 的输出包括如下三部分：

- 1) 包括注塑模部装图和总装图在内的全套模具图样和明细表。
- 2) 供流动模拟和冷却分析用的数据，如模腔曲面和浇注系统尺寸等。
- 3) 供数控加工用的模腔曲面尺寸。

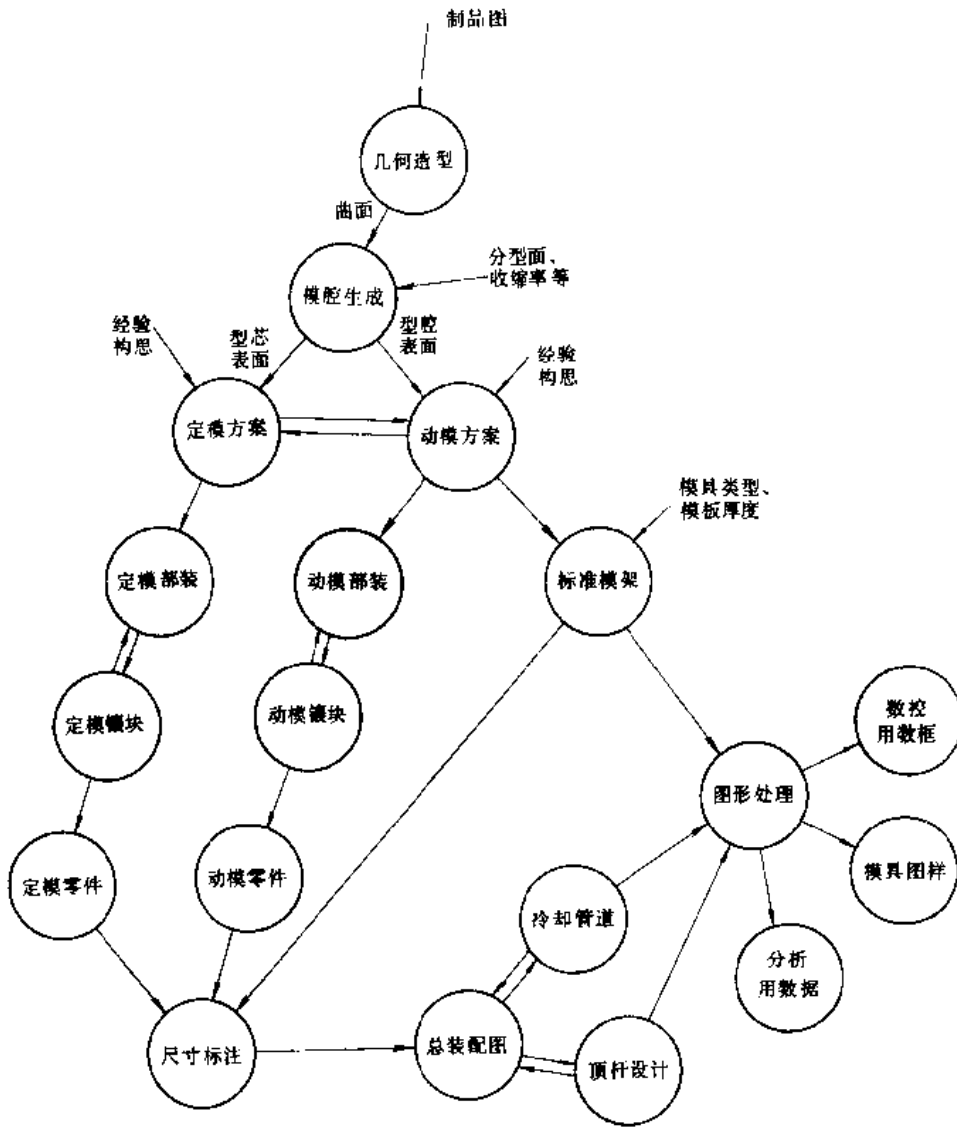


图 10-2 小型精密多腔注塑模结构软件工作流程

## 二、标准模架的选择与编码

如上所述，标准模架的选择是注塑模结构CAD工作的一个重要步骤。标准模架系列应在设计工作开始之前，就已存放在数据库中供程序选用，标准模架的组成如图10-3所示。

日本、美国、德国等先进工业国家均已实现了注塑模架的标准化，并已广泛地运用到生产中，我国的注塑模架系列最近也已有了国家标准，正在推广和运用之中，这是开展模具CAD工作的前提。

下面以国际上流行的美国DME公司的模架标准为例，介绍标准模架的选择与编码。

美国DME公司的标准模架共有七种系列，它们是A、AR、B、X5、X6、AX和T系列。在这七种系列中，A、AR和B系列属于两板结构（单分型面），X5、X6和AX属于三板结构（双分型面），而T系列属于四板结构（三分型面），图10-4示出了B、X5和T三种模架系列的简图。

A系列与B系列结构相同，只是A系列设置了上、下垫板。AR系列与A系列类似，只是导柱与导套倒装。

与A系列不同，X5和X6在结构上增加了推件板，X5与X6的差别在于X6系列设置有动模垫板。

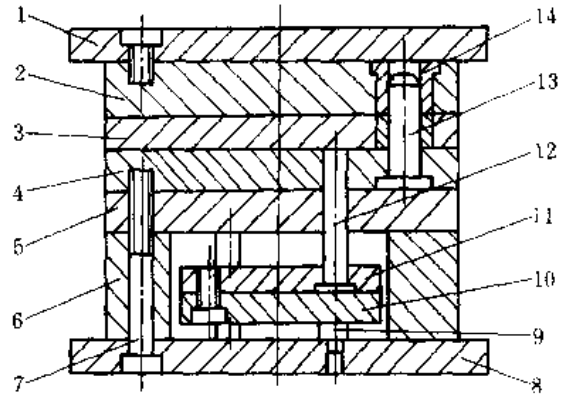


图 10-3 标准模架的组成

- 1—定模座板 2—定模板 3—推件板 4—动模板
- 5—支承板 6—垫块 7—内六角螺钉 8—动模座板
- 9—限位钉 10—顶板 11—顶杆固定板
- 12—复位杆 13—带头导柱 14—带头导套

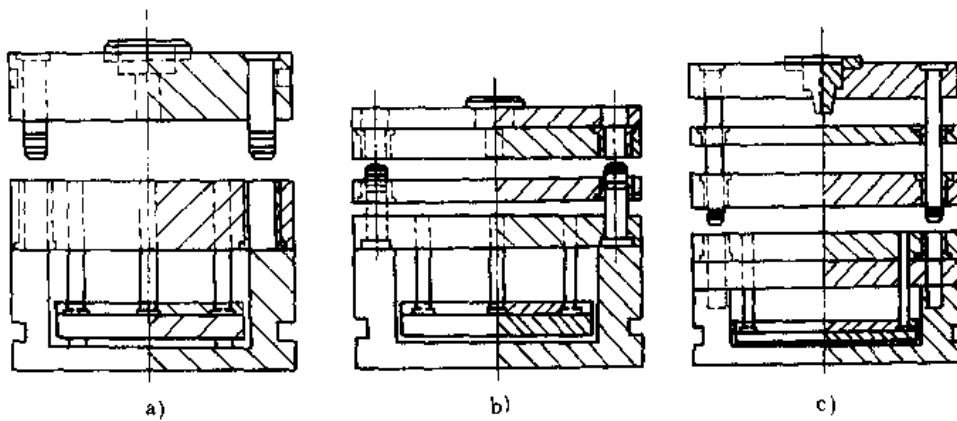


图 10-4 DME公司的三种模架系列

a) B系列 b) X5系列 c) T系列

AX系列与A系列的不同点是，AX系列具有一块中间活动板，形成两个分型面，分别脱出流道凝料和塑料制品。

T系列具有两块活动板，可以形成三个分型面，用于一些特殊的场合。

利用图10-5所示的程序流程，模具设计人员能方便地选择出所需要的标准模架系列。

标准模架系列确定后，便需要确定该系列中合适的模具零件尺寸，因此各种模架系列中的全部模具零件尺寸，均应存放在数据库中以供查询，存放的方式若是将模架手册中的表格

数据原封不动地照搬，这样势必占去计算机大量的存储空间，且查找也不方便。当尚无合适的数据库可采用时，自行建立简明的编码系统是一种行之有效的办法。

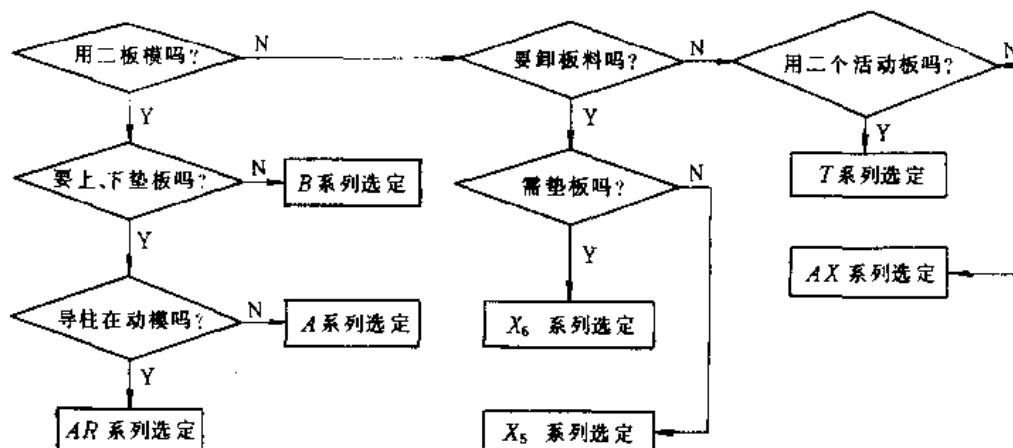


图 10-5 标准模架选择程序流程图

根据模具零件尺寸之间的隶属关系，在这样的编码系统里一般可采用链表数据结构和树状数据结构，如图 10-6 所示。

链表结构属于顺序关系结构，程序通过指针对数据逐个访问，以选取合适的数。例如，可以利用链表结构存储推件板的所有不同规格的尺寸，以便逐个查询。

树状结构属于层次关系结构，根据隶属关系，可将不同种类的模具零件安排在不同的层次里。例如，可将顶板放在第一层次，将动模板放在第二层次，因为一旦顶板的宽度确定下来，动模板的宽度也就确定了，这时可进入第二层次查找在确定的宽度下合适的动模板长度。

编码时，可以采用数据压缩技术来减少数据的存储量。一般，双字节的整数在计算机内占 16 位，而实数占 32 位，因此应尽量将模具尺寸中的实数转换成整数形式编码，同时充分利用每个 16 位整数的空间，尽可能将有关联的几个数压缩到一个 16 位的整数中，当程序调用这类数据时，可通过译码，

把这个 16 位整数还原成两个或几个尺寸数据。在编码时要安排好必要的的数据联系指针，做到同一属性的数据项只存储一次。

采用上述的编码技术后，可大大节省计算机的存储空间。例如美国 Cornell 大学塑料模研究组 (CIMP) 所开发的模具结构设计程序中，两板式模具的标准模架零件约有 4 万多数据，约需 160K 字节的存储空间，经采用编码技术后，同样多的数据仅需 1.71K 字节的存储空间。华中理工大学模具 CAD 科研组对原电子工业部所颁布的标准模架 13 种系列 31150 种规格 (SJ2528—84) 进行了编码，由于所占用的存储空间小，使得全套的注塑模 CAD/CAE/CAM 软件能在个人计算机 (386 兼容机) 上运行。

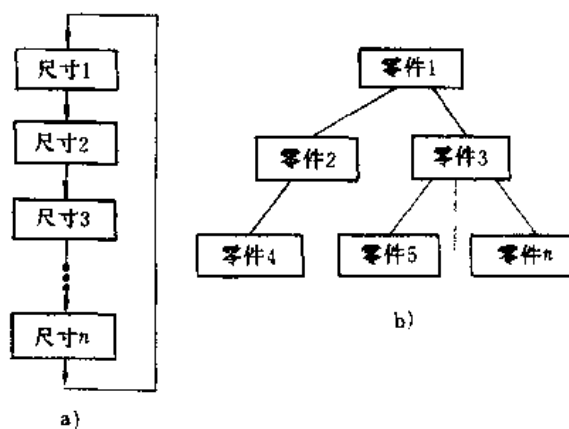


图 10-6 模具零件编码时的两种数据结构

a) 链表结构 b) 树状结构



在编码系统的基础上，需要制定一组原则来选择模具零件的尺寸，并根据这些原则编制计算机程序，使模具零件尺寸的选择过程能够自动地或者以人机交互的形式完成。例如，动模板尺寸的选择遵循了如下两条原则：

- 1) 顶板的宽度应大于型腔的总宽度。
- 2) 在长度方向上，导柱的中心距离应大于型腔的总长度。

第一条原则的依据是，所有顶杆必须位于顶板的平面内，这就要求顶板宽度应大于型腔的总宽度。第二条原则保证动模板在长度方向上能容纳下型腔和导柱。由于每一种宽度的动模板对应着某一宽度的顶板，所以一旦顶板宽度确定下来，动模板宽度也随之而定。动模板的长度则根据第二条原则确定。

根据第一条原则选定动模板的宽度后，若该宽度所对应的动模板所有长度尺寸均无法满足第二原则，则动模板宽度和顶板宽度需增加一个档次，然后重新根据第二条原则选取动模板合适的长度，一直到以上两条原则全部满足为止。这个选择过程可由程序自动完成，然后显示出结果等待模具设计人员认可或修改。

### 三、型腔与型芯形状的生成

不同的注塑模 CAD 系统生成型腔与型芯的方法不同。下面以美国 Cornell 大学注塑模结构设计程序为例，介绍他们采用日本的三维实体造型系统 TIPS 生成型腔与型芯形状的方法。图 10-7 示出型腔和型芯形状生成的流程简图。

从图中可见，为了生成型腔和型芯的形状，首先需要定义塑料制品的形状，由于目前尚未能够顺利解决由制品形状直接得到型腔与型芯的形状，在输入制品形状时就应考虑到塑料的收缩率，然后从输入的图形中分解出型腔和型芯。

图 10-8 所示的为用 TIPS 系统得到的塑料烟缸形状，利用 TIPS 系统所提供的 P 模式（得到实体）生成型芯形状，如图 10-9a) 所示，利用 Q 模式（得到空腔）生成型腔形状，如图 10-9b) 所示。

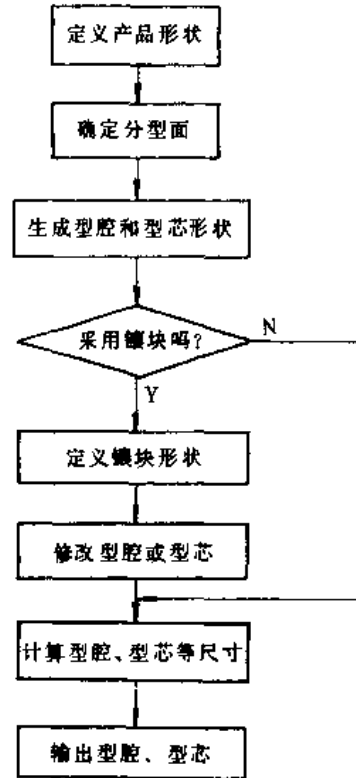


图 10-7 型腔与型芯形状生成流程简图

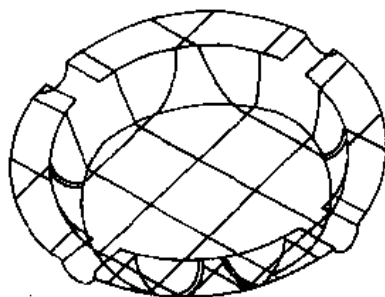


图 10-8 塑料烟缸形状的描述

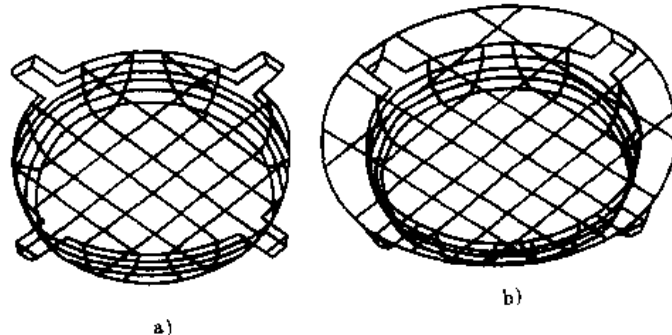


图 10-9 烟缸模具型腔与型芯的生成  
a) 型芯形状 b) 型腔形状

一些复杂的注塑模型腔或型芯常采用镶块结构，即从型腔或型芯中取出其中的一部分，形成镶块结构。镶块形状的生成和型腔、型芯的分解处理是类似的，首先需要确定镶块形状在

型腔或型芯上的位置以及分割面，然后利用 CAD 系统所提供的功能取出镶块并修改型腔或型芯的形状。

#### 四、型腔模与型芯模的生成

利用模具 CAD 系统的拼合功能，可将型腔、浇注系统，顶杆孔、冷却水管孔等与模板结合起来，生成模具图。例如，对于上节所列举的塑料烟缸型腔，在三维实体造型系统 TIPS 中可利用如下语句构造出一模四腔的模具结构（图 10-10 所示）：

```
Q1=CAVITY.UNI.GATE.UNI.RUNNER
Q2=.ROT.Q1(x,y,z,i,j,k,a1)
Q3=.ROT.Q1(x,y,z,i,j,k,a2)
Q4=.ROT.Q1(x,y,z,i,j,k,a3)
CVPLATE=PLATE.DIF.(Q1.UNI.Q2.UNI.Q3.UNI.Q4)
```

以上语句中，第一句是将已生成的型腔 CAVITY、浇口 GATE 和流道 RUNNER “并合” (UNI) 在一起，形成型腔与浇注系道的组合图 Q1。第二至第四句是将图形 Q1 分别旋转  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  的角度，形成 Q2、Q3 和 Q4。括号中的 x, y, z 为旋转中心坐标；i, j, k 分别为旋转轴的三个方向余弦。第五句是将 Q1、Q2、Q3 和 Q4 组合在一起，并从模板 PLATE 中“减去” (DIF)，这样就在模板上构造出型腔和流道以及浇口的形状。

除了以上所利用的“并” (UNI)、“差” (DIF)、“旋转” (ROT) 外，还可以利用 TIPS 系统所提供的“交” (INT) 和“装配” (ASB) 来构造模具的零件图，利用“平移” (MOV) 和“放大” (SCA) 等来编辑图形。一般，商品化的 CAD 软件都具有良好的用户界面，系统所提供的造型功能和图形编辑功能均以屏幕菜单的形式提供给用户使用，借助于光标就能拾取菜单和图形，完成构造模具图的各种操作，而不必编写如上所列举的程序语句。

TIPS 系统采用构造体素法 (CSG 法) 形成的模具零件树状结构如图 10-11 所示。

利用 TIPS 系统生成的烟缸定模板和动模板结构图如图 10-12 所示。

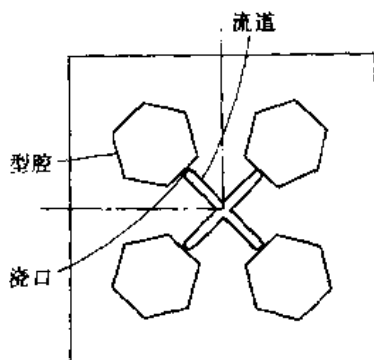


图 10-10 烟缸型腔的布置图

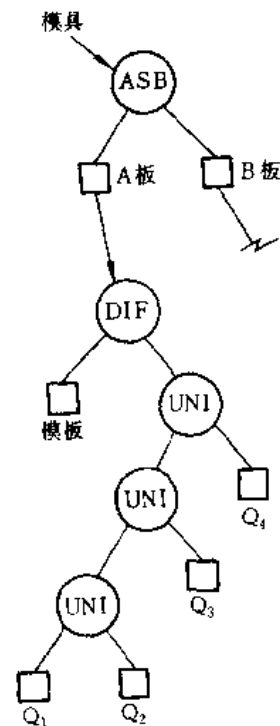


图 10-11 CSG 法生成的模具零件树状结构

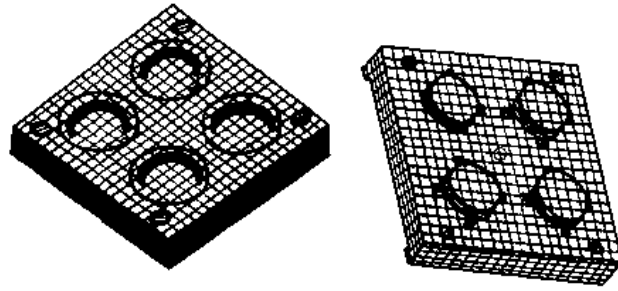


图 10-12 烟缸模具定模板与动模板结构图

### 第三节 注塑成型流动模拟

注塑成型流动模拟软件作为一种辅助设计的工具，能在注塑模具制造之前，预测塑料熔体充模过程的流动行为，以便尽早发现设计中存在的弊病，修改模具设计图样而不是返修模具。因此，注塑成型流动模拟软件的出现，不仅是注塑模设计方法上的一次突破，而且对于减少模具返修报废，提高塑料制品质量也有重大的经济意义。下面分别介绍注塑成型的一维、二维和三维流动分析。

#### 一、一维流动分析

所谓注塑成型的一维流动，是指塑料熔体流动过程的速度场可用单方向的流速来表征。一维流动的基本形式有三种，它们是圆管流动（图 a）、矩形板流动（图 b）和径向流动（图 c），如图 10-13 所示。圆管流动主要用来模拟熔体在流道内的流动，而矩形板和径向流动则用以模拟熔体在模具型腔内的流动。

为了确定一维流动过程的算法和编制程序，需要建立熔体的一维流动数学模型。如图 10-14 所示，我们用带有中心浇口的薄圆盘型腔来表示径向流动的基本单元，用带有端部浇口的薄长板型腔来表示矩形板流动的基本单元。

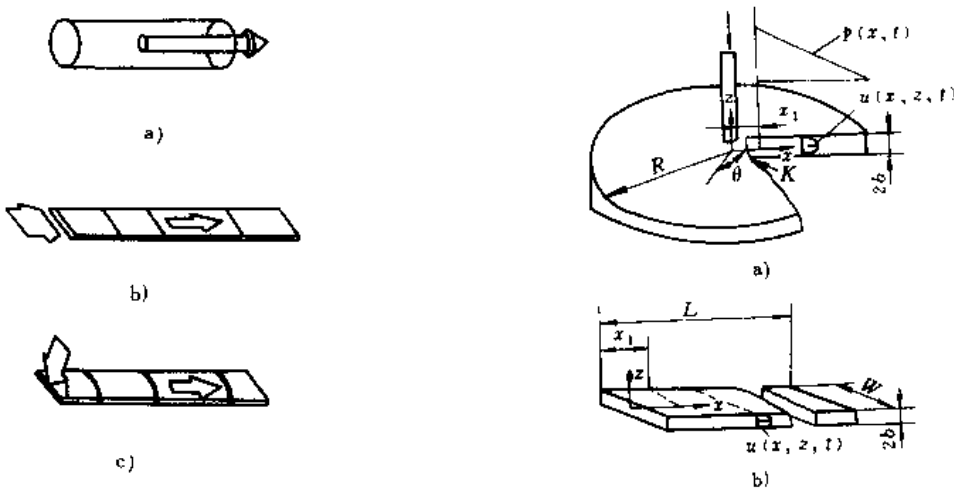


图 10-13 一维流动的三种基本形式

图 10-14 一维基本流动单元  
a) 圆盘型腔 b) 长板型腔

根据流体动力学、塑料流变学以及传热学的基本方程，基于一系列必要而且合理的简化，对于薄圆盘型腔和薄长板型腔的热塑性塑料熔体的充模过程，可以得到如下一组控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (10-1)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (10-2)$$

$$\Gamma(x) \int_{-b}^b u dz = Q \quad (10-3)$$

式中,  $z$  为厚度方向的坐标,  $\eta$  为剪切粘度,  $u$  为  $x$  方向的流速,  $p$  为型腔内压力,  $\rho$  为密度,  $c_p$  为熔体比热容,  $T$  为熔体温度,  $t$  为时间变量,  $K$  为热传导系数,  $Q$  为恒定的熔体注射流量, 型腔厚  $2b$  (从  $-b$  到  $b$ )。

式 (10-1) 是将本构方程  $\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$  代入到流体动力学方程

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial z} + \rho g_x$$

中经简化后得到的。式中忽略了惯性项  $\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right)$  以及熔体的自重力  $\rho g_x$ , 此时视熔体在型腔内的流动为“蠕动”。

式 (10-2) 由热传导的普遍微分方程

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi$$

简化而来, 式 (10-2) 忽略了流动方向的导热  $K \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$ , 认为热传导仅沿着垂直于模壁的方向 ( $z$  方向) 进行。其粘性热项  $\phi = \eta \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$ 。

式 (10-3) 为流量积分方程, 其中  $\Gamma(x)$  为型腔形状函数, 对于圆盘型腔,  $\Gamma(x) = 2\pi x$ , 对于长板型腔,  $\Gamma(x) = W$ ,  $W$  为型腔宽度。

流场的边界条件为:

$$\text{当 } z=b \text{ 时, } u=0; \quad (10-4)$$

$$\text{当 } z=0 \text{ 时, } \frac{\partial u}{\partial z}=0。$$

温度场的边界条件为:

$$\text{当 } x=x_1 \text{ 时, } T=T_c;$$

$$\text{当 } x=x_i(t) \text{ 时, } \frac{\partial T}{\partial x}=0; \quad (10-5)$$

$$\text{当 } z=\pm b \text{ 时, } T=T_c;$$

$$\text{当 } z=0 \text{ 时, } \frac{\partial T}{\partial z}=0。$$

式 (10-4) 中, 因熔体沿型腔厚度方向上呈对称流动, 故在厚度的中心处 ( $z=0$ ), 有  $\frac{\partial u}{\partial z}=0$ 。

式 (10-5) 中,  $x_1$  为浇口附近温度测量点, 此处温度可视为熔体的入口温度  $T_c$ , 在模壁处 ( $z=\pm b$ ), 可近似认为熔体温度  $T$  为模壁温度  $T_c$ , 因温度沿型腔厚度方向对称分布, 故在厚度中心 ( $z=0$ ) 处有  $\frac{\partial T}{\partial z}=0$ , 在熔体的流动前沿  $x=x_i(t)$ , 假定熔体热量不传至空气中,

故有  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ 。

熔体的粘度模型采用克罗斯经验 (Cross) 公式:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0(T)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (10-6)$$

$$\eta_0(T) = B \exp(T_b/T) \quad (10-7)$$

式中,  $\eta$  为熔体的剪切粘度,  $\eta_0$  为零剪切速度粘度,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $T$  为温度,  $n$ 、 $T_b$ 、 $B$ 、 $\tau^*$  为与塑料性质有关的四参数, 它们可以根据测定粘度的实验, 采用曲线拟合的方法得到。对于热塑性塑料,  $n < 1$ ,  $n$  和  $\tau^*$  描述了热塑性塑料熔体的粘度随切应力增加而减小的特性, 而  $B$  和  $T_b$  描述熔体零剪切速率时的粘度。

在熔体流动数学模型中, 忽略了熔体的弹性, 这是因为目前尚不能构造出理想的包括弹性影响的流动数学模型。

流动数学模型建立后便可确定数值解法。对式 (10-1) 积分, 有

$$\int_0^z \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) dz = \int_0^z \frac{\partial p}{\partial x} dz$$

因  $\frac{\partial p}{\partial x}$  不随  $z$  变化, 故得

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{z}{\eta}$$

对上式积分, 有

$$\int_z^b \frac{\partial u}{\partial z} dz = \int_z^b \frac{\partial p}{\partial x} \frac{z}{\eta} dz$$

利用边界条件  $u=0$  ( $z=b$  时), 可得

$$u = - \frac{\partial p}{\partial x} \int_z^b \frac{z}{\eta} dz$$

再次对上式积分, 有

$$\int_0^b u dz = \int_0^b - \left[ \frac{\partial p}{\partial x} \int_z^b \frac{z}{\eta} dz \right] dz$$

利用分部积分, 可得

$$\int_0^b u dz = - \frac{\partial p}{\partial x} \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz$$

将上式代入到式 (10-3), 便可得到

$$\Delta = \frac{Q}{2FS} \quad (10-8)$$

式中, 压力梯度

$$\Delta = - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (10-9)$$

流动率

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz \quad (10-10)$$

其它符号同式 (10-3)。此外, 还可推出如下关系式:

剪切速率

$$\dot{\gamma} = \frac{|\Delta|z}{\eta} \quad (10-11)$$

流速

$$u = \int_z^b \dot{\gamma} dz \quad (10-12)$$

式 (10-2) 中最后一项为粘性热  $\Phi$ , 也即

$$\Phi = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (10-13)$$

由于在一维流动中型腔仅限于圆盘类和长板类形状, 故可方便地采用有限差分法求解。计算步骤可以这样安排: 如果已知某一时刻的温度场  $T$  (假定开始计算时温度场  $T = T_0$ ), 可利用上一时刻的粘度  $\eta$  和式 (10-10) 求得流动率  $S$ , 利用式 (10-8) 求得压力梯度  $\Delta$ , 从而获得该时刻的压力场。这样, 便可利用式 (10-6)、式 (10-11)、式 (10-13) 求得该时刻的粘度  $\eta$ 、剪切速率  $\dot{\gamma}$  和粘性热  $\phi$ , 利用式 (10-12) 求得速度场  $u$ 。至此, 就能利用式 (10-2) 求取下一时刻的温度场  $T$ , 依次循环下去, 直至整个圆盘单元或长板单元被熔体充满。

## 二、二维流动分析

当建立起圆盘单元和长板单元那样的一维流动数学模型和算法后, 便可按熔体在型腔内的流动路径, 将一维流动单元组合起来, 分析任意形状的二维型腔内熔体的流动。这种方法需要模具设计人员根据经验, 事先划分出熔体在型腔内的流动路径, 然后再根据流动路径, 将型腔分解成若干串联的一维流动单元。

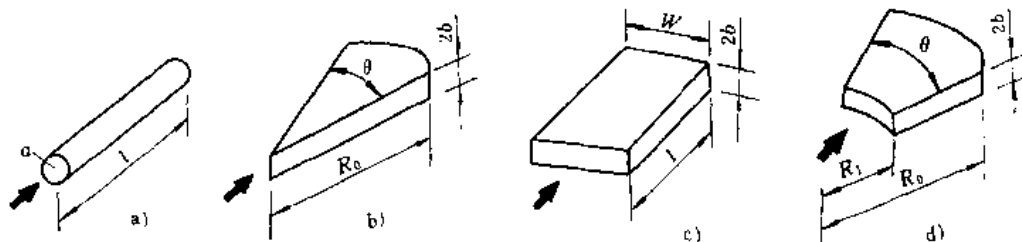


图 10-15 四种常用的流动单元

在这种方法中, 模具型腔和流道被划分为许多基本流动单元。图 10-15 示出了其中四种①圆形管 (图 a); ②具有中心浇口的圆板件 (图 b); ③边缘浇口的平板 (图 c); ④中心浇口圆环板 (图 d)。

在实际应用中, 还可以再增添一些其它基本单元, 如梯形块、圆环管、圆锥管等。应注意的, 无论这些基本单元的形状如何变化, 它们都应属于一维流动。

图 10-16 示出某平面型腔的九个流动单元, 它们可为图 10-15 所示单元类型中的任意一种。通过分析不难看出, 以单元 1 为入口的塑料熔体一共有五条流动路径, 它们由 1—2—9、1—3—4、1—3—5—6、1—3—5—7 及 1—3—5—8 单元组合而成。

又如图 10-17 所示的某平板型腔及流道, 经分析, 可划分出两条流动路径。第一条路径由 1—2—3—4—5 单元组成。第二条路径由 1—2—6—7—8—9 单元组成。从图中可知, 1 与 2 属于圆形管单元, 3 与 6 属于圆板单元, 4 与 7 属于圆环板单元, 5、8、9 属于平板单元。

当人为地确定好流动路径和流动单元后, 便可借助于二维流动分析程序来模拟熔体在型腔内的流动, 获得任一时刻熔体流动前沿位置及其温度场、速度场、压力场、熔合纹位置等。

二维流动分析程序基于一维流动分析程序，其算法的主要步骤如下：

- 1) 由于熔体在充模时是一个非稳态过程，因此在流动分析时应分别考虑每一个时间步长。名义时间步长  $\Delta t = t/N$  ( $t$  为设定的型腔充满时间， $N$  是人为取定的时间间隔数)。因为我们是一维流动单元的串联组合来分析二维流动的，所以在某一个时间步长中，涉及到两个流动单元的计算，也即在某一个时间步长内只考虑在一个单元内的熔体流动过程。当出现某单元在一个时间步长的中间被充满时，应根据该单元的充满时间调整该次的时间步长。
- 2) 若在某单元内熔体的流动尚未停止，则在每个时间步长内，都应更新该单元的温度场。
- 3) 因为每条流动路径的入口压力近似相等，末端压力皆为大气压力，所以在任一时刻，每条流动路径的总压力降应该相等，根据这一物理条件，利用迭代法在每一时间步长内，沿每条流动路径更新其体积流量  $Q_i(I)$  ( $I = 1, 2, \dots, NN$ )  $NN$  为总流动路径数。但若在流动过程中，某一流体路径的最后一个单元已全部被熔体充满，在后续的时间步长内再没有熔体流入该路径，从此时起，应置该流动路径的体积流量为零。
- 4) 根据更新后的体积流量，计算熔体在每一个未充满单元内的前沿位置。
- 5) 根据一维流动分析中所介绍的计算步骤，计算单元内的压力场和速度场等。
- 6) 返回到步骤 2)，重复计算过程，直至全部流动路径内的单元均被熔体充满为止。

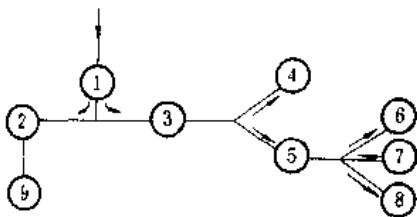


图 10-16 流动路径的确定及单元划分

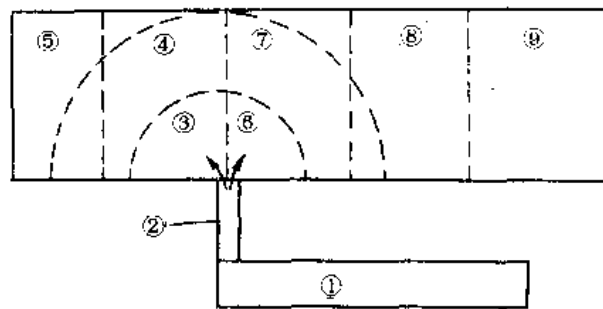


图 10-17 某平板型腔的单元划分

### 三、三维流动分析

为了使分析过程简化，在实际应用中，常常借助于二维流动方法分析模具型腔内熔体的三维流动，此时需要将三维形状的塑料制品展平，以便划分流动路径和流动单元。图 10-18 示出某塑料制品的平面展开图及其流动路径和单元的设置。

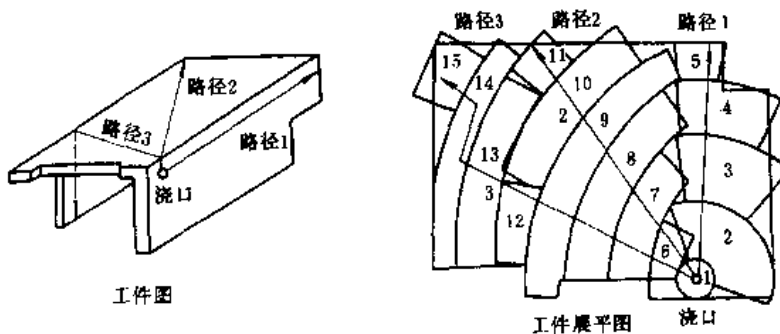


图 10-18 制品展开图及流动路径、流动单元的设置

制品三维形状的展平既可手工完成,也可借助于交互式程序实现。若采用交互式程序,模具设计人员只要指定需展平的面以及旋转轴,程序便可根据三维表面的数据结构,逐步以交互方式将制品展平。若在程序中记录下每个表面在展平前后的几何对应关系,则可将展平图的分析结果映射回三维形状中去,以便显示出具有三维效果的熔体流动前沿位置、温度场、压力场等。

当得到型腔的二维展平图后,模具设计人员就能凭借自身经验设置浇口位置、划分流动路径和流动单元,然后利用二维分析程序对型腔和浇注系统进行流动分析。

这种用二维代替三维的流动分析方法具有计算量小、方法简便等优点。但此法完全依靠模具设计人员的经验,需要人为地设定流动路径、划分流动单元,还需要将制品的三维形状展平,使用起来不方便。而有限元法在模拟注塑流动时,不需要事先规定流动路径和流动单元,也不必将型腔的三维形状展平,对模具设计人员的经验依赖甚少,且分析精度较高,在近十年来得到了迅速发展和应用。

下面以基于控制体积法的有限元流动模拟程序为例,介绍其算法原理以及程序流程简图。

所谓控制体积,是指由一定厚度的有限元网格得到的多边形体积。在图 10-19 所示的具有一定厚度的三角形网格中,连接三角形重心和各边中点便构成了多边形控制体积,如图中阴影构成的区域所示。

从图中可见,经过这样处理后,每一个三角形单元的内部结点均被一个多边形控制体积所围绕。图 10-20 示出了一个简单的长板形型腔,其三角形单元网格以及控制体积都可以由程序自动生成,此时可用标量  $f$  对型腔中的每一个控制体积进行标志。

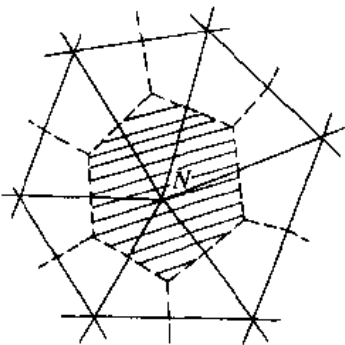


图 10-19 多边形控制体积的形成

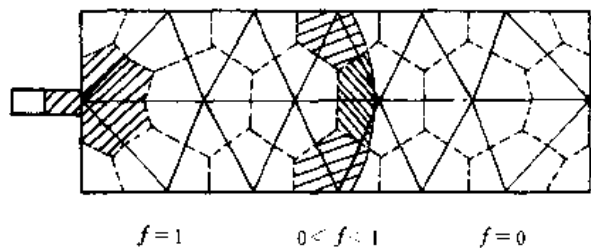


图 10-20 控制体积的标志及前沿位置的确定

控制体积的标志及熔体在型腔中的前沿位置确定的方法如下:

1) 定义熔体进入型腔处的控制体积的  $f$  值为 1,即分析一开始,便认为入口处的控制体积是充满的,且熔体温度为等温状态。

2) 凡已被熔体充满的控制体积,  $f$  值为 1。

3) 定义尚未被熔体充满的控制体积为前沿控制体积。显然,前沿控制体积的  $f$  值处于  $0 \sim 1$  之间,  $f$  值的大小直接反映了控制体积的充满程度。如果已知了那些控制体积为前沿控制体积,就能根据流量计算每一个前沿控制体积需要充满的时间,取最短的充满时间为当前时间步长,则在下一时刻,必有一个前沿控制体积被熔体充满,与其相邻的各个控制体积将变为新的前沿控制体积,如此进行下去,直至整个型腔被完全充满。



4) 定义熔体尚未流入的控制体积的  $f$  值为 0。

流动有限元三维分析程序流程简图如图 10-21 所示。程序中, 读入数据包括型腔形状、网格单元、注塑材料及流动条件的有关参数。开始分析时, 假定入口的第一个控制体积已被熔体充满。此时可近似认为, 熔体仍处于等温状态, 其温度即为熔体的入口温度  $T_e$ , 这样便可获得初始时刻熔体的前沿位置和温度场, 因此能够计算出此时刻的剪切粘度  $\eta$ 、流动率  $S$  和平均体积流量  $Q$ , 然后用迭代法求压力场。在获得压力场的合适数据后, 计算下一时间间隔和熔体的新前沿位置, 以便计算下一时刻的温度场。在更新入口压力后, 程序返回计算新时刻的压力场, 如此循环下去, 直至整个型腔被熔体充满。

目前已有不少国外公司出售商品化的流动模拟软件, 如美国 AC-Tech 公司的 C-FLOW (美国 Cornell 大学的科研成果)、澳大利亚的 Moldflow、意大利的 FA、德国的 MouldCAD 等。我国华中理工大学也研制成功 H-FLOW, 并运用到生产中。

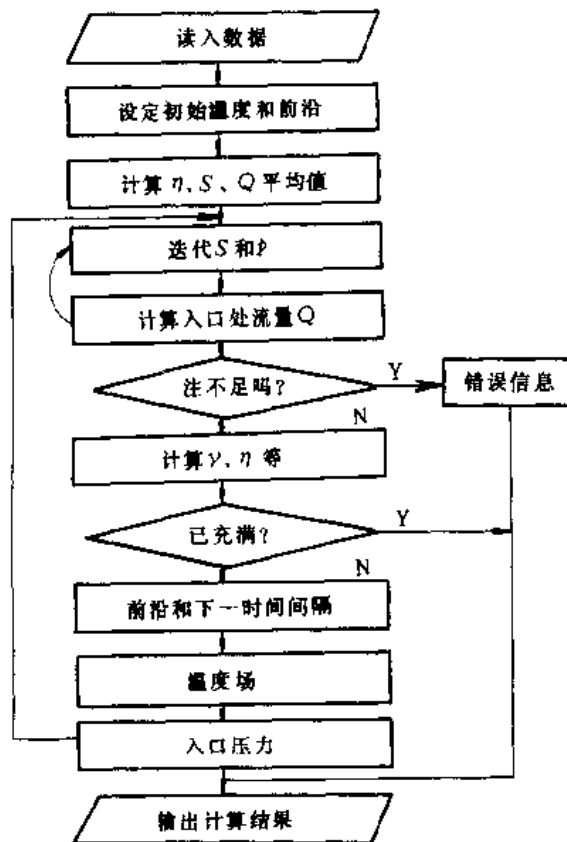


图 10-21 流动分析程序流程简图

#### 第四节 注塑模冷却系统模拟

注塑模冷却系统的设计直接影响到塑料制品的生产效率和质量。据统计, 模具冷却时间约占整个注塑循环周期的  $2/3$ , 冷却不良常常导致制品翘曲或产生局部凹痕。衡量注塑模冷却系统好坏的标准有两条, 第一是冷却时间的长短, 第二是制品表面是否均匀冷却。

影响注塑模冷却系统的因素很多, 如制品形状、冷却管道尺寸和布置、冷却介质的流速和温度以及制品与模具之间的非稳定热交换过程等。目前, 注塑模冷却系统的设计主要依赖

于经验，而丰富的经验和综合的知识需要长期积累，模具设计人员有必要借助于计算机这个工具进行快速而有效的设计与计算。同时，用实验的方法来测试不同冷却系统对冷却时间和制品质量的影响是相当困难的，而冷却过程的计算机模拟则是完成这种预测的最佳方法。

### 一、一维冷却分析

在传统的手工设计时，模具设计人员常常采用有关文献和书籍中提供的一套冷却系统的公式，用这些公式来计算注塑模中冷却管道的合适管径和所需要的长度，预计制品从模内顶出时的温度，检验冷却水的流动状态，计算冷却水在冷却回路中的压力降，这个计算过程过于繁冗，手工计算十分不便。若将该计算过程编制成程序，采用人机交互方式，则会节省模具设计人员的大量精力和时间。由于这样的程序主要用来计算冷却管道的长度，检验有关冷却工艺参数，所以我们将这种程序归于一维冷却分析之中。图 10-22 示出该程序的流程框图。

为了对冷却系统进行计算和检验，需要输入有关塑料、制品、注塑机、模具等有关冷却的参数，然后程序分别计算塑料在单位时间散发的热量  $Q$ 、模具通过对流散发的热量  $Q_C$ 、通过辐射散发的热量  $Q_R$ 、通过注塑机工作台面散发的热量  $Q_L$ 。设  $Q_2 = Q - (Q_C + Q_R + Q_L)$ ，为了使注塑模保持温度稳定，必须使模具处于热平衡状态，即要设计冷却系统将单位热流量  $Q_2$  带走。由  $Q_2$  和制品的表面积、模具与制品的热传导系数等可求得制品与模壁的平均温差  $(t_1 - t_3)_m$ 。

如图 10-22 所示，当模具设计人员设定模壁的平均温度  $t_{3m}$ 、塑料熔体的注入温度  $t_{1max}$  以及模壁温度允许的波动值  $t_{3a}$  后，由  $(t_1 - t_3)_m$  可以求得制品的脱模温度  $t_{1min}$ 。若制品脱模温度  $t_{1min}$  过高（高于合理的顶出温度），可改变  $t_{3m}$  或者  $t_{3a}$ ，反复计算，以便获得理想的制品顶出温度。

然后，可以设定冷却水的入口温度  $t_{5in}$  和冷却水的出口温度  $t_{5out}$ ，根据  $Q_2$  和水的密度和比热容，可求得欲带走热量  $Q_2$  所需冷却水的体积流量  $V_2$ ，由此可得到处于稳定湍流状态下冷却水管道的直径  $d$  和流速  $v$ 。

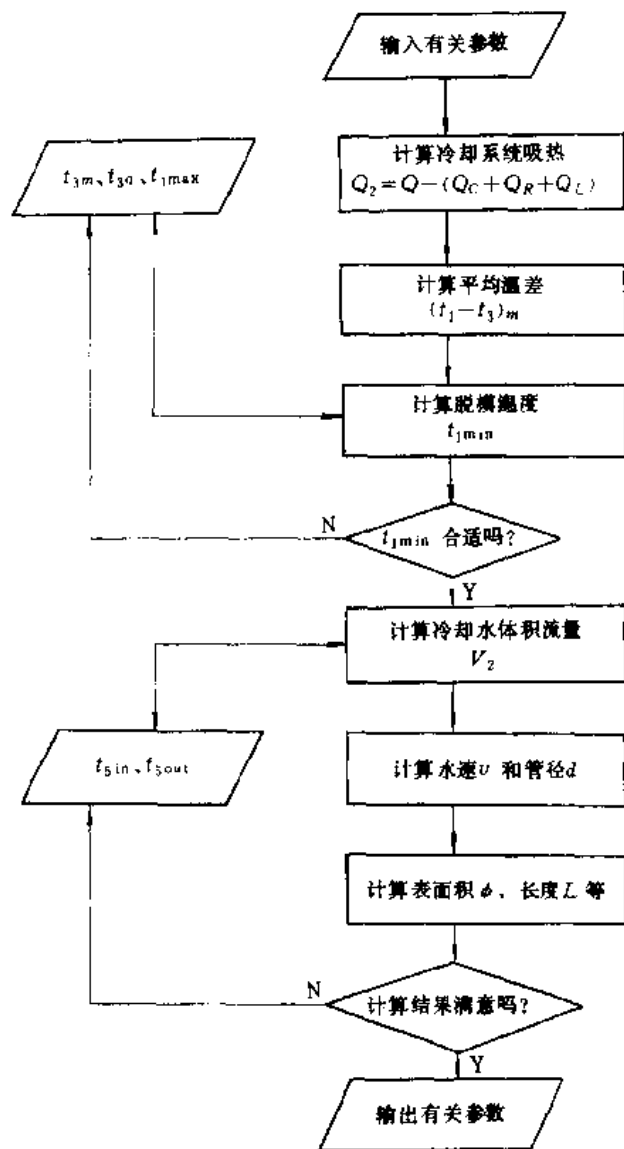


图 10-22 冷却管道长度计算及检验程序框图

在此基础上,程序可求得所需冷却水管的表面积 $\phi$ 、冷却水管的总长度 $L$ 及在冷却回路中保证稳定湍流所需的压力降 $\Delta p$ 。

在图 10-22 所示的程序中,是由设定的模壁的平均温度 $t_{3m}$ 和模壁温度允许的波动值 $t_{3\Delta}$ 来预测制品的脱模温度 $t_{1min}$ 的,也可以将程序设计为已知制品的脱模温度,设定模壁温度的波动值 $t_{3\Delta}$ ,预测模壁的平均温度 $t_{3m}$ ,以考察模壁温度的波动对模壁平均温度的影响程度。

对于具有简单扁平形状的大型注塑模型腔,常采用如图 10-23 所示的等间距冷却管道布置方案。若型腔壁很长,这样的冷却系统仅用参数 $a$ 和 $b$ 就能确定。设定冷却管道中允许的温度波动率,可用如下一组方程迭代求解图 10-23 所示的参数 $a$ 和 $b$ :

$$J = 2.4 \left( \frac{h_c d}{K_w} \right)^{0.22} \left( \frac{b}{a} \right)^{2.8} \ln \left| \frac{b}{a} \right| \quad (10-14)$$

$$Q_2 = \frac{0.87(T_w - T_c)K_w h_c d}{0.87bK_w + h_c \cdot d[a - 0.13(\pi d - b)]} \quad (10-15)$$

式中, $J$ 为冷却管道中允许的温度波动率,对于无定形塑料 $J < 5\%$ ,对于结晶形塑料, $J < 2.5\%$ , $d$ 为设定的冷却管道直径(m), $h_c$ 为冷却水与管壁之间的冷却膜导热系数( $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C})$ ), $K_w$ 为模具材料的热导率( $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C})$ ), $T_w$ 为型腔壁的平均温度( $\text{C}$ ), $T_c$ 为冷却水的平均温度( $\text{C}$ ), $Q_2$ 为冷却水应带走的热量,它由模具的热平衡分析得到。

由于直接利用式(10-14)和式(10-15)求取 $a$ 和 $b$ 不方便,在编制程序时可按如下方式计算 $a$ 和 $b$ :

1) 设定允许的水管温度波动率 $j$ 、管道直径 $d$ 以及 $b/a$ 的初始值(如选定一个大值 $b/a = 5.0$ )。

2) 将 $b/a$ 的初始值代入式(10-14)中,计算 $J$ 值,比较 $J$ 值与 $j$ 值的接近程度,若 $J$ 不接近于 $j$ ,则依次减小 $b/a$ (如每次减小0.1),重新计算 $J$ 值,一直计算到 $J$ 接近 $j$ 为止,这样便获得了 $b/a$ 。

3) 通过热平衡分析获得冷却水需带走的热量 $q_2$ ,初次利用式(10-15)计算 $Q_2$ 时,假定 $a=d$ (管道直径),比较 $Q_2$ 与 $q_2$ 的大小,若不接近,逐次增加 $a$ 值(如每次增加1mm),重新计算 $Q_2$ 值,一直计算到 $Q_2$ 接近 $q_2$ 为止,这样就求得了管边距 $a$ 与管间距 $b$ 。

以上的一维冷却分析算法简单,程序易于编写和使用,在计算机上可立即获得计算结果。对于外形简单、规则的注塑制品,如电视机外壳、箱类零件等,一维冷却分析的结果是令人满意的。

## 二、二维冷却分析

由于大多数注塑制品均具有复杂的形状,此时仅布置等间距的平行冷却管道显然是不妥的。一种行之有效的方法是对注塑模典型截面上的冷却系统进行二维冷却分析。

注塑模的冷却过程是非稳态的,从图 10-24 可见,注塑模内某点的测量温度在循环注塑过程中呈周期性变化,但这种非稳态的温度波动较小,且主要表现在模具型腔的表面区域。在二维冷却分析中,可以略去温度的周期性变化,用稳定温度场取而代之,如图 10-24 中虚线所示。

二维稳态热传导归结为求解拉普拉斯方程:

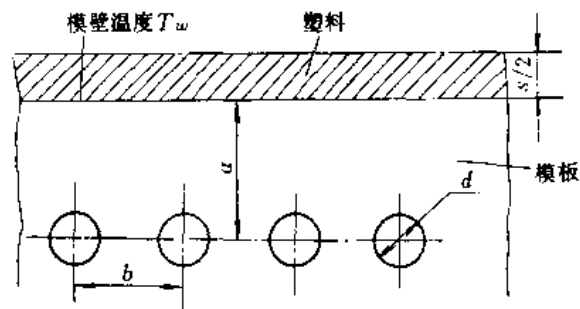


图 10-23 计算一维冷却系统的管边距和管间距

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} = 0 \quad x \in \Omega \quad (10-16)$$

其边界条件为:

$$T = \bar{T} \quad x \in s_1 \quad (10-17)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial n} \quad x \in s_2 \quad (10-18)$$

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) \quad x \in s_3 \quad (10-19)$$

式中,  $T$  为温度,  $K$  为模具材料的热传导系数,  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  分别对应不同的边界条件。例如, 模具与空气接触的部分属于  $s_1$ , 此时可认为模具与空气接触的外壁温度是恒定的, 且等于大气温度  $\bar{T}$ 。边界条件  $s_2$  常用于对称的模具, 此时, 因对称性仅分析模具的一半, 模具的对称面便成其为模具边界的一部分, 在对称面上的热流量为零, 即温度的法向梯度  $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ , 故对称面边界条件为  $\partial T / \partial n = 0$ 。边界条件  $s_3$  分别对应如下三种情况:

1) 模具与空气的边界, 此时式(10-19)中的  $h$  为模具与环境温度  $T_0$  之间的空气热导系数。

2) 模具与冷却管道的边界, 此时  $h$  为冷却膜热导系数,  $T_0$  为冷却水的温度。

3) 塑料与模壁的边界, 此时  $h$  为塑料与模壁之间的热导系数,  $T_0$  为塑料制品冷却前的初始温度。系数  $h$  可定义为:

$$h(t_c) = \frac{\int_0^{t_c} q(t) dt}{t_c (T_0 - T_w)} \quad (10-20)$$

式中,  $q(t)$  为随时间变化的塑料制品的热流量,  $t_c$  为从初始温度  $T_0$  到模壁温度  $T_w$  所需的冷却时间, 它们均可从一维非稳态热传导的理论解推导出来。从式(10-20)可以看到,  $h(t_c)$  是制品与模壁之间的热传递在一个冷却周期内的平均值。

式(10-16)可用有限元法或边界元法求解。在求解冷却问题时, 常用边界元法。因为边界元法仅需离散二维截面的边界而不是整个截面, 当修改模具内冷却管道尺寸和位置时, 无需重新划分边界元网格, 简化了操作, 节省了计算时间。

边界元法基于格林第二公式, 格林第二公式可写为

$$\int_D (T \nabla^2 K - K \nabla^2 T) d\tau = \int_a \left( T \frac{\partial K}{\partial n} - K \frac{\partial T}{\partial n} \right) dA$$

式中,  $T$  和  $K$  是任意两个在区域  $D$  内二次可微的函数;  $\Omega$  是区域  $D$  的边界。

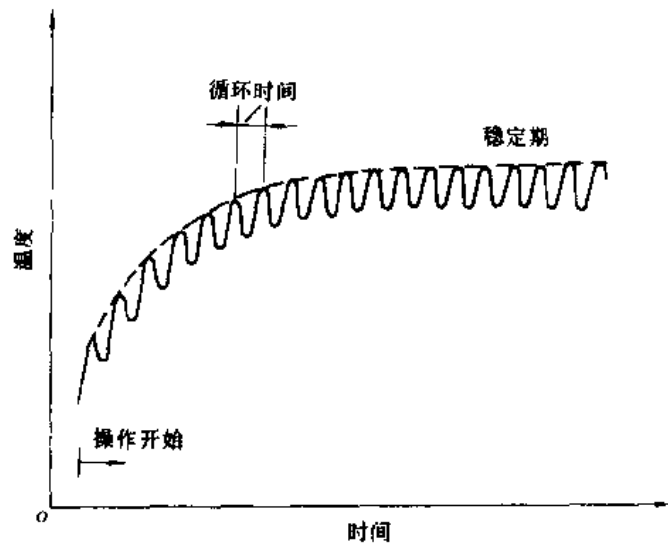


图 10-24 注塑模内某点温度的周期性变化

如果能够选择函数  $T$  和  $K$  均满足拉普拉斯方程, 即  $\nabla^2 K = \nabla^2 T = 0$ , 则有:

$$\int_a \left( T \frac{\partial K}{\partial n} - K \frac{\partial T}{\partial n} \right) dA = 0$$

$T$  选为满足拉普拉斯方程 (式 (10-16)) 的温度场函数,  $K$  选为满足拉普拉斯方程的“自由空间格林函数”,  $K$  称为基本解, 其具体形式将在下面介绍。

在选定基本解后, 通过积分计算上式可转化为如下形式:

$$\int [K_n(P, Q)T(Q) - K(P, Q)T_n(Q)] ds(Q) = C(P)T(P) \quad (10-21)$$

式中,  $P$ 、 $Q$  分别是区域中和边界上的任意点, 如图 10-25a) 所示,  $K(P, Q)$  为基本解, 二维分析时,  $K = \ln|PQ|$ ,  $T_n = \frac{\partial T}{\partial n}$ ,  $K_n = \frac{\partial K}{\partial n}$ ,  $n$  为在点  $Q$  处的单位外法向向量,  $C(P)$  为  $P$  点内角。

在二维时, 假定平滑边界, 则式 (10-21) 可转化为

$$\int_{\partial B} \left( T \frac{\partial \ln r}{\partial n} - \ln r \frac{\partial T}{\partial n} \right) ds = C(P)T(P) \quad (10-22)$$

式中,  $r = |PQ|$ , 当  $P$  在边界上时  $C(P) = \pi$ ,  $P$  在区域内时  $C(P) = 2\pi$ 。

式 (10-22) 表明, 区域内任一点温度  $T(P)$ , 能用边界积分项来定义, 即已知边界上的  $T$  和  $\frac{\partial T}{\partial n}$ , 可利用该式求得区域内任一点的温度。

如图 10-25b) 所示, 若将  $P$  点移至由  $N$  个线性单元组成的边界上, 且假定  $T$  和  $\frac{\partial T}{\partial n}$  在每个单元内为常数, 则式 (10-22) 可改写为:

$$\pi T_i(P) = \sum_{j=1}^N \left[ T_j \int_{\partial B_j} \frac{\partial \ln r_j}{\partial n} ds - \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_j \int_{\partial B_j} \ln r_j ds \right] \quad (10-23)$$

式 (10-23) 中的积分项可利用图 10-25 中所示的局部坐标系  $(\eta, \xi)$  求出。这样, 随着点  $P$  在边界单元上的移动, 便可得到  $N$  个代数方程, 加上  $N$  个边界条件, 就能唯一地确定  $2N$  个未知数  $\left( T \text{ 和 } \frac{\partial T}{\partial n} \right)$ 。

二维冷却分析软件可将分析结果 (温度场或热流量场) 用图形显示在模具边界上, 包括显示冷却时间、热流量、冷却管道进出口温度等数据。

模具设计者利用二维冷却分析软件, 可交互式地改变冷却管道尺寸和位置, 或者改变冷却介质的流速和温度, 或者改变制品顶出温度等, 来选择最佳冷却系统设计方案, 以获得较短的模具冷却时间和均匀的模腔表面温度场。

### 三、三维冷却分析

用二维典型截面代替三维模具进行冷却系统分析具有编程简单、计算量小等许多优点。但并非所有的模具都能用二维典型截面来代替。特别是对于精密注塑模具, 需要更精确的分析结果, 此时应采用三维冷却分析软件。

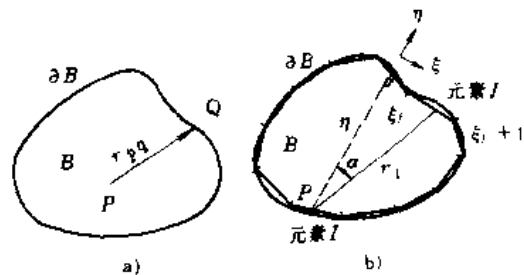


图 10-25 二维区域及其离散

在三维冷却分析时,采用边界元法的优点除了能将三维问题化作二维表面网格处理外,还能与三维注塑流动模拟程序共用同一几何模型,简化了图形输入和处理的工作量。

当考虑稳态热传导时,三维边界积分方程与二维相同(式(10-21)),差别仅是三维基本解  $K = -|PQ|^{-1}$ 。但是,三维冷却分析的数值求解却面临以下三点困难:

1) 模具尺寸比例相差悬殊。例如,模具外表面比冷却管道表面尺寸大几个数量级,冷却管道本身长度又比管道直径大得多,型腔厚度和长度也相差甚远,除非将单元划分得很细,否则边界元法不能适应单元尺寸的这种大幅度变化。

2) 冷却管道很长,离散管道圆周至少需要 8 个单元,当划分管道表面网格时就会产生大量单元。

3) 边界元法产生非对称满矩阵,当模具具有复杂型腔时往往导致计算量过大。

一种解决方法是将模具分解为若干子区域,然后分别对各子区域进行三维冷却分析,用化整为零的方法来减小数值计算的工作量。

但是,对于复杂的冷却管道布置和不规则的注塑模型腔,并非都能采用三维子区域的划分方法。由于注塑模内的封闭型腔与金属零件内的封闭裂纹较为相似,可以采用断裂力学的某些研究成果,即用型腔的中心面代替封闭表面的方法来克服上述数值求解的困难。这种简化不仅使计算量成倍地减少,而且其几何模型及网格划分能与三维流动模拟软件共用。如果忽略温度和热流量沿冷却管道圆周方向上的变化,还能避免沿冷却管道表面划分网格,这些措施为开发实用的三维冷却分析软件创造了条件。

当对精密注塑模的冷却系统作精确分析时,则需要考虑冷却时的非稳态特性。非稳态问题比稳态问题复杂得多,在实现方法上需要采用必要的简化措施。例如美国的三维冷却分析软件 POLYCOOL2 在作非稳态冷却分析时,将制品简化为一维非稳态冷却问题,用有限差分法将制品沿厚度方向分层处理,用三维边界元方法求解模具内温度场,用半经验方法处理冷却管道的冷却,再将这三类公式结合在一起处理冷却系统的非稳态冷却过程。

目前已有不少国外公司出售商品化的冷却分析软件,如美国 AC-Tech 公司的 C-COOL,澳大利亚 Moldflow 公司的 COOL、美国 SDRC 公司的 POLYCOOL2 以及美国的 SIMUCOOL、MOLDCOOL 等。我国的华中理工大学也研制出实用的三维非稳态冷却分析软件 H-COOL,并在生产中运用。

## 习 题

1. 为了输入注塑制品的形状,几何造型系统应具有哪些基本的功能?
2. 模具的型腔面和型芯面与制品的外表面和内表面有什么区别?由制品表面转化为型腔面和型芯面的困难何在?
3. 为什么在开展注塑模 CAD 时要采用标准模架和标准结构?
4. 流动模拟程序的主要简化和假定是什么?有什么根据?
5. 冷却分析程序的主要简化和假定是什么?有什么根据?
6. 流动和冷却软件的计算结果能从哪几个方面帮助模具工作者。

## 附录 A dBASE III 的常用命令

下面是 dBASE III 的一些常用命令。在命令格式中，[ ] 是命令的任选部分，〈 〉为命令中由用户提供的部分。

### 1. 文件的建立

①COPY 把活动中的数据库文件复制成一个新的数据库文件。

格式： COPY TO 〈文件名〉 [〈显示〉]  
[FIELDS 〈字段清单〉]  
[FOR WHILE 〈条件〉]  
[SDF/DELIMITED [MITH 〈定义符〉]]

②COPY FILE 复制任何类型的文件。

格式： COPY FILE 〈源文件名〉 TO 〈目标文件名〉

③CREATE 建立新的数据库文件。

格式： CREATE 〈文件名〉

④INDEX 建立一个索引文件。

格式： INDEX ON 〈关键字表达式〉 TO 〈文件名〉

⑤JOIN 从两个数据库文件中，将指定的记录和字段组合起来。

格式： JOIN WITH 〈别名〉 TO 〈文件名〉  
FOR 〈条件〉 [FIELDS 〈字段清单〉]

⑥MODIFY COMMAND 建立一个命令文件、格式文件或过程文件。

格式： MODIFY COMMAND 〈文件名〉

⑦MODIFY REPORT 建立一个报告格式文件。

格式： MODIFY REPORT 〈文件名〉

⑧MODIFY STRUCTURE 修改一个已存在的数据库文件的结构。

格式： MODIFY STRUCTURE 〈文件名〉

⑨SAVE 把当前的存储器变量复制到存储器变量文件中去。

格式： SAVE TO 〈文件名〉 [ALL LIKE/EXCEPT 〈框架〉]

⑩SORT 建立活动数据库文件的一份拷贝，根据指定的关键字字段，拷贝中的记录按字母顺序、年月顺序、或数值顺序排列。

格式： SORT TO 〈新文件〉 ON 〈字段〉 [/A] [/D]  
[, 〈field<sub>2</sub>〉 [/A] [/D] ...] [〈范围〉] [FOR 〈条件〉]

### 2. 增添数据、编辑数据

①APPEND 将数据记录加到数据库文件的尾部。

格式： APPEND [BLANK]

②BROWSE 把数据记录加到数据库文件的尾部，或用全屏幕窗口显示编辑。

格式： BROWSE [FIELDS 〈字段清单〉]

③INSERT 把数据记录插入到数据库文件中去。

格式: INSERT [BLANK] [BEFORE]

④CHANGE 在数据库文件中编辑指定的记录和字段。

格式: CHANGE [ <显示>] [FIELDS <字段清单>] [FOR/WHILE <条件>]

⑤DELETE 对删除的记录作上标记。

格式: DELETE [ <范围>] [FOR/WHILE <条件>]

⑥EDIT 改变数据库文件中记录的内容。

格式: EDIT [ [RECORD] <expN>]

⑦PACK 移走作了删除记号的记录。

格式: PACK

⑧RECALL 不删除记录, 恢复活动数据库文件中已作了删除标记的记录。

格式: RECALL [ <显示>] [FOR/WHILE <条件>]

⑨REPLACE 用指定的值替换数据字段。

格式: REPLACE [ <范围>] <字段> WITH <表达式>  
 [, <字段> WITH <表达式> ...]  
 [FOR/WHILE <条件>]

### 3. 给出用户信息

①ASSIST 使 dBASE III 在菜单驱动方式下使用。

格式: ASSIST

②DIR 显示有关文件的名称、记录个数等信息。

格式: DIR [ <驱动器>] [ <路径> \] [ <框架>]

③DISPLAY MEMORY 显示有关存储器变量的当前信息。

格式: DISPLAY MEMORY [TO PRINT]

④DISPLAY STRUCTURE 显示数据库文件的有关信息, 包括文件名、记录个数、字段的定义等。

⑤HELP 对 dBASE III 的命令和使用信息提供指导。

格式: HELP [ <关键字>]

### 4. 数据显示

①AVERAGE 对指定范围的数据库文件的记录, 显示表达式的算术平均值。

格式: AVERAGE [ <表达式清单>] [ <显示>]  
 [FOR WHILE <条件>]  
 [TO <存储器变量清单>]

②DISPLAY 显示字段和记录。

格式: DISPLAY [OFF] [ <范围>] [ <表达式清单>]  
 [FOR/WHILE <条件>]  
 [TO PRINT]

③LIST 对记录和字段进行列表。

格式: LIST [OFF] [ <范围>] [ <表达式清单>]  
 [FOR WHILE <条件>]



[TO PRINT]

④SUM 计算并显示指定范围内数据库记录的表达式的和。

格式: SUM [ <范围> ] [ <表达式清单> ] [TO <存储器变量清单>]  
[FOR WHILE <条件>]

⑤TEXT 用于在命令文件里显示一文本组数据。

格式: TEXT  
<一些文本字符>

ENDTEXT

#### 5. 定位记录的指针

①CONTINUE 按 LOCATE 命令中指定的条件, 确定下一记录的位置。

格式: CONTINUE

②FIND 用与指定的字符串匹配的索引关键字确定记录的位置。

格式: FIND <字符串>

③GOTO 直接确定一个指定记录的位置。

格式: GOTO <expN> BOTTOM/TOP

④LOCATE 确定适合条件的记录位置。

格式: LOCATE [ <范围> ] FOR <条件>

⑤SEEK 用同指定的表达式匹配的索引关键字确定记录的位置。

格式: SEEK <表达式>

⑥SKIP 在数据库文件中向前或向后移动记录指针。

格式: SKIP [± <expN>]

#### 6. 使用数据库

①APPEND FROM 从其他文件把记录加到 dBASE III 文件中。

格式: APPEND FROM <文件名> [FOR WHILE <条件>]  
[SDF DELIMITED]

②CLOSE 关闭一个指定类型的文件。

格式: CLOSE <文件类型>

③MODIFY STRUCTURE 修改数据库结构。

格式: MODIFY STRUCTURE <文件名>

④REINDEX 重新建立索引文件。

格式: REINDEX

⑤RENAME 重新命名一个文件。

格式: RENAME <旧文件名> TO <新文件名>

⑥SELECT 在 10 个独立工作区之间转换。

格式: SELECT <工作区别名>

⑦USE 打开一个已经存在的数据库文件和多至七个索引文件。

格式: USE [ <文件名> ] [INDEX <索引文件清单>] [ALIAS <别名>]

#### 7. 使用存储器变量

①CLEAR ALL 关闭所有打开的数据库文件, 释放所有存储器变量, 将 dBASE 初始化。

格式: CLEAR ALL

②CLEAR MEMORY 删除所有的存储器变量。

格式: CLEAR MEMORY

③WAIT 存储器变量接收进一个字符。此命令暂停所有 dBASE II 过程,直至键入任意一个键。

格式: WAIT[〈提示〉] [TO〈存储器变量〉]

## 8. 程序设计

①ACCEPT 将字符数据输入存储器变量。

格式: ACCEPT[〈提示〉]TO〈存储器变量〉

②DO 使程序或过程执行,并可传递参数。

格式: DO〈文件名〉[WITH〈参数表〉]

③DO WHILE 为结构化程序设计命令,在满足指定条件时,反复执行 DO WHILE 和相应的 ENDDO 之间的命令语句。

格式: DO WHILE〈条件〉

〈命令集〉

ENDDO

④DO CASE 执行几条可能路径中的一条,也是一种结构化程序设计命令。

格式: DO CASE

CASE〈条件〉

〈命令集〉

[CASE〈条件 1〉]

〈命令集〉

⋮

[OTHERWISE]

〈命令集〉

ENDCASE

⑤EXIT 将控制从 DO WHILE...ENDDO 循环中转移到紧跟在 ENDDO 后面的命令。

格式: EXIT

⑥IF 允许命令有条件的执行。

格式: IF〈表达式〉

〈命令集〉

[ELSE]

〈命令集〉

ENDIF

⑦INPUT 把一个表达式输入到存储器变量中。

格式: INPUT[〈提示〉]TO〈存储器变量〉

⑧QUIT 关闭全部文件,并退出 dBASE II。

格式: QUIT

## 9. 环境与参数控制

①CLEAR 清屏,且将光标置于左上角。

格式: CLEAR

②SET CARRY 将数据从先前记录拷贝到一新录。

格式: SET CARRY ON/OFF

③SET DEBUG 确定错误位置的工具,控制是否将 ECHO 的输出送至打印机。

格式: SET DEBUG ON/OFF

④SET DECIMALS 确定在计算结果的显示中小数位的最小个数。

格式: SET DECIMALS TO<数字表达式>

⑤SET ECHO 控制是否显示 dBASE III 程序的命令行。

格式: SET ECHO ON/OFF

⑥SET STEP 在每条指令后暂停程序的执行,为调试程序的工具。

格式: SET STEP ON/OFF

## 附录 B Auto CAD 绘图软件的一些命令

Auto CAD 绘图软件包的命令很多,包括绘图、显示控制、尺寸标注、编辑和询问等内容。下面介绍一些常用的命令,其中有横线的部分为键入的内容,无横线的部分为显示内容或说明。命令和坐标值的输入可使用键盘,也可使用图形板和鼠标器等交互设备。

### 实用命令

1. HELP 命令——使用 HELP 命令,可以在忘记命令表或命令格式的情况下,得到有关的详细信息。

Command: HELP↵

Command name (RETURN for List):

2. END 命令——返回主菜单,并且修正绘图文件。修正后的图形文件后缀为“.DWG”,需要时还可对其进一步编辑。

Command: END↵

3. QUIT 命令——返回主菜单,但不改变图形。

Command: QUIT↵

4. ENDSV 命令——退出绘图编辑程序,除保存用户的绘图文件外,还同时保存另一个称为矢量文件的文件。

Command: ENDSV↵

5. SAVE 命令——将绘图文件的当前状态写入磁盘,但未退出绘图编辑程序,可进一步编辑。

Command: SAVE↵

FILE name: 输入文件名

6. STATUS 命令——用此命令可得到缺省、方式和范围的当前值。

Command: STATUS↵

7. LIMITS 命令——可为当前图设置图幅(边界)和控制是否检查这些边界。

Command: LIMITS↵

ON/OFF/Low Left corner (当前值):

8. FILES 命令——可在编辑状态下,列文件目录,删除或重新命名文件。

Command: FILES↵

在菜单提示下,键入数字 0~4,可退出文件服务程序,列图形文件,列用户指定文件,删除文件,或对文件重新命名。

9. RENAME 命令——可改变块、层、线型、正文字型或视图的名字。

Command: RENAME↵

Block/Layer/Ltype/Style/View: 选择其一

Old name: 旧名

New name: 新名

### 绘制命令

10. LINE——画直线。

Command: LINE↵

From point: X1, Y1

To point: X2, Y2

To point: 键入坐标值或回车

11. POINT——画点。

Command: POINT↵

point: X, Y

12. CIRCLE——画圆。

Command: CIRCLE↵

Center point (or 3P or 2P): X, Y

Radius (or D): 半径值

可采用四种方式画圆，即圆心与半径、圆心与直径、三点和两点。上例中是用圆心和半径方式画圆。

13. ARC——画圆弧。

画圆弧可用以下几种方法：

- ①弧上三点。
- ②起始点、圆心及终点。
- ③起始点、圆心及夹角。
- ④起始点、圆心和弦的长度。
- ⑤起始点、终点和夹角。
- ⑥起始点、终点和半径。
- ⑦起始点、终点和起始方向。
- ⑧前面的直线或弧的接续。

ARC 命令的选择项字母 A、C、D、E、L 和 R 分别表示夹角、圆心、起始方向、终点、弦长和半径。下面为三点画弧的例子。

Command: ARC

Start point or C: X1, Y1

Second point or C or E: X2, Y2

End point or R or A or D: X3, Y3

14. TRACE——画给定宽度的线条。

Command: TRACE↵

Width: 宽度值

From point: X1, Y1

To point: X2, Y2

To point: 坐标值或回车

15. SOLID——绘制实心区。

下面的例子是画一个四边形填充区。

Command: SOLID↙

First point: X1, Y1

Second point: X2, Y2

Third point: X3, Y3

Fourth point: X4, Y4

Third point: ↙

16. TEXT——用此命令可将文字说明加到图中。

文本实体可借助于多种字型或字体绘制，可以旋转和对齐。选择项字母 A、C、R 和 S 分别表示两头对齐、中心对齐、向右对齐和字型。

Command: TEXT↙

Starting point (or ACRS): 起点坐标

Height: 高度值

Rotation angle (O): 旋转角

Text: 文字

17. SHAPE——此命令可将一个型置于图中。

型 (Shape) 是一种特殊的实体，可以用线、弧和圆来定义它们。如需多次在图中插入一个简单的图形，可用定义型的方法方便地实现。型文件的类型为“SHX”，使用之前须先装入。

Command: SHAPE↙

Shape name (or?): 型名

Starting point: 型起点

Height: 高度

Rotation angle: 旋转角

18. LOAD——装入型文件。

Command: LOAD↙

Filename: 型文件名

#### 编辑和查询命令

当用户需要选择一组实体处理时，屏幕上显示提示信息：select objects or window or last。这时，可以选择目标，开窗口，或选择最近建立的实体。例如，开窗口可按以下方法实现。

Select objects or window or last: W

Lower left corner: 左下角点

Upper right corner: 右上角点

19. ERASE——从图中取消实体。

Command: ERASE↙

Select objects or window or last: 选择目标

20. OOPS——恢复最近的 ERASE 命令所擦去的实体。

Command: OOPS↙

21. MOVE——将实体从图中当前位置移到一个新位置。

Command: MOVE↵

Select objects or window or last: 选择

Displacement: 第一点或 X、Y 距离

Second point: 第二点或 RETURN

22. COPY——复制已存在的图形。

Command: COPY↵

Select objects or window or last: 选择复制内容

Displacement: 第一点或 X、Y 距离

Second point: 第二点或 RETURN

23. MIRROR——产生镜象反射。

Command: MIRROR↵

Select objects or window or last: 选择目标

First point of mirror line: X1, Y1

Second point: X2, Y2

Delete old object? (N) Y 或 N

24. BREAK——删去直线、线条、圆或弧的一部分。

Command: BREAK↵

Select object: 选择目标

Enter first point: 第一点

Enter second point: 第二点

25. FILLET——按规定的半径将两直线平滑地用圆弧连接起来，产生圆角。

Command: FILLET↵

Polyline/Radius/ (Select two lines): 选两线

Enter fillet radius: 半径值

26. ARRAY——以矩形或环形方式对选择的对象进行多次复制。例如，选用矩形方式复制时的命令如下：

Command: ARRAY↵

Select objects or window or last: 选择

Rectangular or circular array (R/C): R

Number of rows: 行数

Number of columns: 列数

Unit cell or distance between rows: 行距

Distance between columns: 列距

**显示控制命令**

27. ZOOM——对图形进行缩放。

Command: ZOOM↵

Magnification or type (ACELPW): 选择

这里有七种选择：

数字：放大倍数；

- A: 显示边界内的全部图形;
- C: 给出中心点和高度;
- E: 显示当前范围内的全部图形;
- L: 给出左下角和高度;
- P: 恢复原来的图形;
- W: 给出要缩放的矩形窗口。

28. PAN——可以不改变尺寸观察图中的不同部位。

Command: PAN↙

Displacement: 图对屏幕的相对移动量

#### 其他命令

29. DIM——标注尺寸。

尺寸标注命令分为五类,即直线尺寸标注命令、角度尺寸标注命令、直径尺寸标注命令、半径尺寸标注命令和尺寸标注实用命令。

例如,标注直线尺寸时需键入以下命令:

Command: DIM↙

Dim: ROTATED

Dimension line angle: 角度

First extension line origin: 第一尺寸界线起点

Second extension line origin: 第二尺寸界线起点

Dimension line location: 尺寸线位置

Dimension text: 标注的文字

30. HATCH——画阴影线。

Command: HATCH↙

Pattern (? or name/u, style): 选择

如果用标准图案画阴影线,只要输入图案名字。如果用户要定义自己的图案可键入 U。方式 (style) 选择中, N 表示一般方式; O 表示只填充最外层区域; I 表示忽略内部。

### 参 考 文 献

- 1 C. B. Besant. Computer Aided Design and Manufacture. Chichester: Ellis Horwood, 1980
- 2 俞长高, 蒋锡蕃. 机械制造中的计算机辅助设计. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 3 李志刚, 李德群, 肖景容. 模具计算机辅助设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- 4 胡祖宣等. 微型计算机辅助设计系统. 北京: 科学技术文献出版社, 1988
- 5 Scrivener. S. A. R. Computer Aided Design and Manufacture — State of the Art Report. Pergamon Infotech Ltd, 1985
- 6 王勇领. 系统分析与设计. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 7 任仲贵等. CAD/CAM 原理. 北京: 清华大学出版社, 1991
- 8 孙家广等. 计算机辅助设计技术基础. 北京: 清华大学出版社, 1990
- 9 Newman. W. M, Sproull. R. F. Principles of Interactive Computer Graphics. New York: Mc Graw-Hill, 1979
- 10 James D. Foley, Andries Van Dam.



- Fundamentals of Interactive Computer Graphics. Addison—Wesley, 1982
- 11 郑若忠, 王鸿武. 数据库原理与方法. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983
  - 12 敬喜等. dBASE III—新一代关系型数据库管理系统. 北京: 清华大学出版社, 1986
  - 13 David E. Rogers, J. Alan Adams. 计算机图学的数学基础. 北京工程图学学会译. 北京: 人民教育出版社, 1981
  - 14 Baer. A, Eastman. C and Henrion. M.  
Geometric Modelling; A Survey. Computer Aided Design. 1979, 11 (6): 253~272
  - 15 Requicha. A.A.G. Representations for Rigid Solids; Teory, Methods and Systems. Computing Surveys. 1980, 12 (4): 437~464
  - 16 Shah J. J., Rogers M. T. Expert Form Feature Modelling Shell. Computer Aided Design. 1988, 20: 515~524
  - 17 孙家广等. 计算机辅助几何造型技术. 北京: 清华大学出版社, 1990
  - 18 孙家广, 许隆文. 计算机图形学. 北京: 清华大学出版社, 1986
  - 19 胡瑞安. 计算机辅助几何设计. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987
  - 20 余华刚等. 三维机械零件图信息描述方法和数学模型. 华中理工大学学报. 1989, 17 (5): 37~42
  - 21 李建军等. 基于零件图的板料件产品模型. 华中理工大学学报. 1991, 19 (10): 49~53
  - 22 许耀昌、王昌禄. 微型计算机辅助机械设计与绘图. 北京: 电子工业出版社, 1988
  - 23 上海交通大学等院校编写组. 计算机制图. 北京: 高等教育出版社, 1984
  - 24 范本明等. 自动绘图仪与图形数字化仪. 北京: 电子工业出版社, 1991
  - 25 中国科学院希望电脑技术公司编译.  
Auto CAD 10.0 计算机绘图软件包. 1989
  - 26 李福生等. 数控机床程序编制——手工编程. 北京: 机械工业出版社, 1988
  - 27 李福生. 数控机床程序编制. 北京: 机械工业出版社, 1982
  - 28 范炳炎. 数控加工程序编制. 北京: 航空工业出版社, 1990
  - 29 廖效果、朱启速等. 数字控制机床. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992
  - 30 唐荣锡等. 计算机辅助飞机制造. 北京: 国防工业出版社, 1985
  - 31 Groover M. P., Zimmer E. W. CAD/CAM; Computer—aided Design and Manufacturing. New York: Prentice—Hall Inc., 1984
  - 32 孟少农等. 机械加工工艺手册, 第3卷. 北京: 机械工业出版社, 1992
  - 33 Oswin F. Shifman. The PDDC System; A CAD—CAM Application to the Design and Fabrication of Press Tools. SME TE73—107, 1973
  - 34 Shirai. K. and Murakami. H. Hitachi Harnesses CAD to Progressive Die Design. Machine and Tool Blue Book. April, 1982; 58~63
  - 35 肖景容等. 精冲模的计算机辅助设计与制造. 华中工学院学报. 1984, 12 (6): 1~5
  - 36 肖景容等. 冲裁模的计算机辅助设计. 华中理工大学学报. 1987, 15 (1): 1~4
  - 37 肖景容等. 冲裁件图形和尺寸的数字模型及程序. 华中工学院学报. 1984, 12 (6): 13~16
  - 38 陈召云等. 用于模具 CAD/CAM 的交互式二维图形输入系统. 华中理工大学学报. 1989, 17 (5): 21~26
  - 39 张子公等. CAD/CAM 用二维工件图形的面素拼合法. 模具工业. 1987, No. 6: 1~5
  - 40 李志刚等. 板料冲裁零件排样的优化设计. 华中工学院学报. 1984, 12 (6): 21~24
  - 41 余华刚等. 冲裁件排样的优化设计. 华中工学院学报. 1987, 15 (1): 5~10
  - 42 肖祥芷等. 冲裁工艺方案的计算机辅助设计. 华中工学院学报. 1987, 15 (1): 11~14
  - 43 李志刚等. HCCD 冲模 CAD/CAM 系统. 锻压机械. 1989, 24 (4): 8~12

- 44 董枚等. 级进模工步的计算机辅助设计. 锻压技术. 1989, 14 (1): 20~22
- 45 李德群等. 计算机辅助布置模具顶杆. 华中工学院学报. 1984, 12 (6): 33~37
- 46 肖景容等. 精冲模的计算机辅助制造. 华中工学院学报. 1984, 12 (6): 51~56
- 47 李志刚等. HPC 系统中的人机交互作用. 华中工学院学报. 1987, 15 (1): 15~18
- 48 洪深洋. 冷挤压工艺及模具设计. 合肥: 安徽科技出版社, 1985
- 49 何献忠等. 优化技术及其应用. 北京: 北京工业学院出版社, 1986
- 50 刘全坤等. 挤压凹模强度的光弹性与有限元优化综合分析. 实验力学. 1992, No. 4
- 51 王雷刚等. 计算机辅助挤压工艺设计综合系统. 金属成形工艺. 1991, 9 (4): 42~45
- 52 F. H. 捷捷林, H. M. 波卢欣. 热体积模锻工艺过程最优化和自动化原理. 李德群等译. 北京: 国防工业出版社, 1983
- 53 张志文. 锻造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 54 Biswas, S. K., Knight, W. A. Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies. Proc. 15th MTDR Conf., 1974: 135~143
- 55 Choi, S. H., Dean, T. A. Computer Aids to Data Preparation for Cost Estimation. Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1984, 24 (2): 105~119
- 56 Choi, S. H., Dean, T. A. Computer Aided Design and Machining of Roller Dies for Forging Hammers. Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1984, 24 (2): 121~131
- 57 Choi, S. H. CAD/CAM of Preform Dies for Forging Hammers. ph. D. Thesis, Univ. of Birmingham. 1984
- 58 Wang, K. K et al. Research Reports (1) ~ (13). Cornell University. 1975~1987
- 59 周波等. 注塑模温度控制系统的计算机设计. 模具工业. 1988, 1 (1): 25~31
- 60 李德群等. 注塑模计算机冷却分析系统的研制及实用化. 模具技术. 1988, 8 (4): 1~7
- 61 李德群等. 注塑模流动模拟的数学模型. 华中理工大学学报. 1989, 10 (5): 9~14
- 62 李德群等. 精密多腔注塑模 CAD/CAE/CAM 系统. 华中理工大学学报. 1991, 10 增刊 (■): 37~42