第6章
三维实体造型

苏小红

计算机科学与技术学院

哈尔滨工业大学

本章内容

- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

本章内容

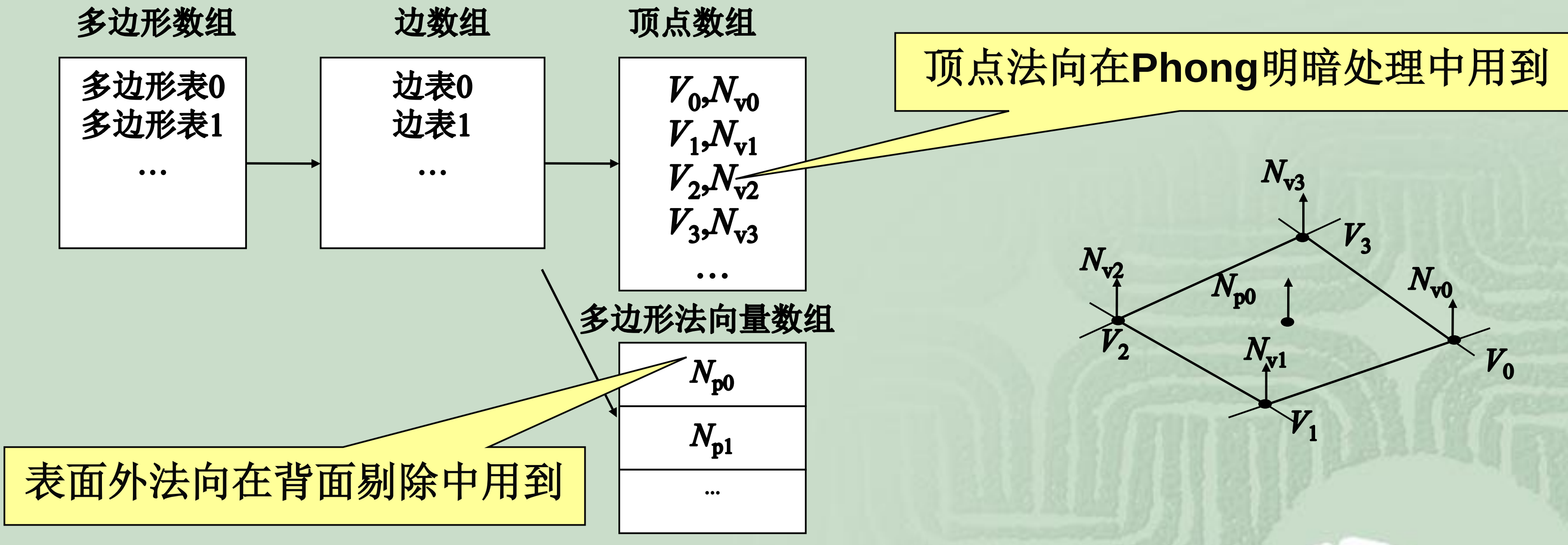
- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

多面体模型（1/7）

- 发展初期常用的模型表示方法
  - 许多商用动画软件，如Alias、Wavefront、Softimage、Maya、3DMAX等都提供了生成多面体模型的手段
- 每个多边形的数据被存储在多边形数据表中
- 多边形数据表可分两组：
  - 几何数据表
    - 物体的几何数据（如顶点坐标等）
    - 用来标识多边形表面空间取向的参数（如表面外法向）
  - 属性数据表
    - 包括物体透明度、表面反射系数以及纹理特征参数

多面体模型（2/7）

- 建立3张表（顶点表、边表和多边形表）以层次结构存储几何数据

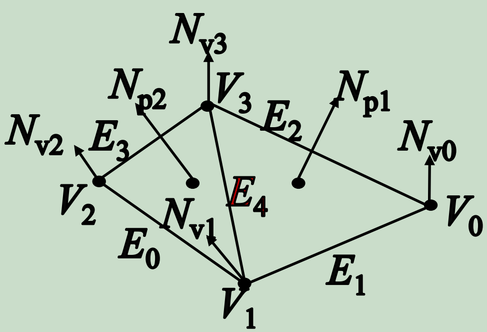


(a) 层次数据结构信息　　(b)多边形信息

- 缺点：
  - 相邻多边形的共享边在上述数据结构中没有得到显式表达，使得同一条边在绘制过程中可能被处理两次。

多面体模型（3/7）

- 基于边的表示
  - 边数组的每个元素包含4个指针，分别指向对应边的两个顶点和它邻接的两个多边形法向量



(a) 多边形信息

边数组
1,2,2,0
0,1,1,0
3,0,1,0
2,3,2,0
3,1,2,1
…

顶点数组
V_0,N_{v0}
V_1,N_{v1}
V_2,N_{v2}
V_3,N_{v3}
…

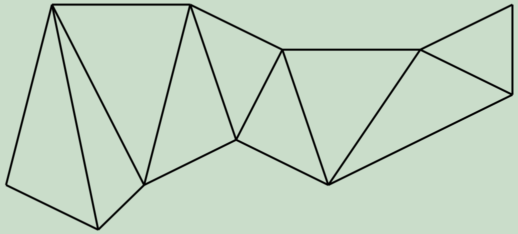
法向量数组
NULL
N_{p1}
N_{p2}
…

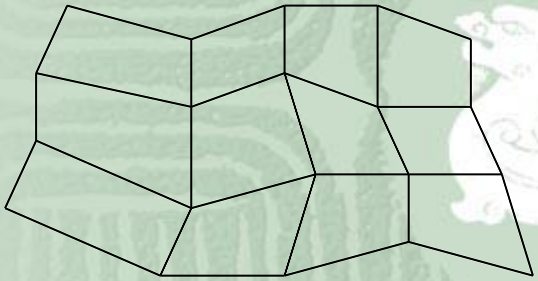
(b) 基于边的数据结构信息

- 优点：共享边在这种数据结构中只保存和处理一次，因此能更有效地表示物体，且数据结构更简单

多面体模型（4/7）

- 在图形绘制时，曲面通常被离散为三角形
  - 因为三角形的多边形曲面片可确保任一多边形的顶点都在一个平面上
  - 有四个或四个以上顶点的多边形，其顶点可能会不在同一平面上
    - 处理这种情况的简单方法是将多边形剖分成三角形





多面体模型（5/7）

- 当物体表面是拼接而成时，用网格函数来给定表面片更方便
- 一些图形软件标准（如OpenGL等）均提供了可快速生成多边形网格（Polygon Mesh）模型的函数
- 例如
  - 给定n个顶点时，可生成n-2个三角形网格
  - 给定n行m列顶点时，可生成(n-1)×(m-1)个四边形网格

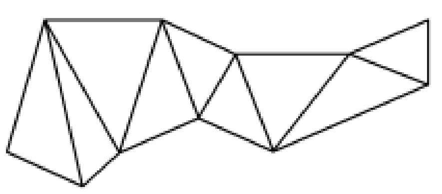


图 6-3　由 9 个三角形和 11 个顶点相连而成的三角形带

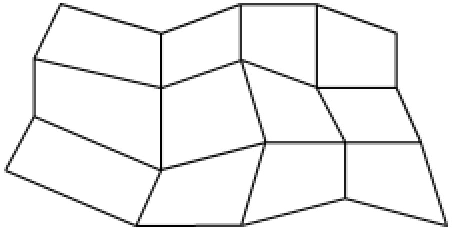


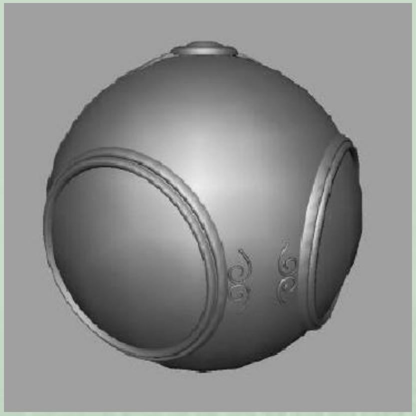
图 6-4　由 12 个四边形和 5 × 4 个顶点形成的四边形网格

多面体模型（6/7）

- 生成多面体模型的方法
  - 由设计者交互生成
  - 由参数曲面离散生成
  - 在实物表面测得一系列离散点，生成三角形或四边形网格
- 多面体模型的优点
  - 数据结构相对简单
  - 集合运算、明暗图的生成和显示速度快

多面体模型（7/7）

- ## 多面体模型的缺点
  - 虽然多面体能以任意精度逼近任意复杂的曲面物体，但毕竟是曲面物体的一种近似逼近表示，存在误差



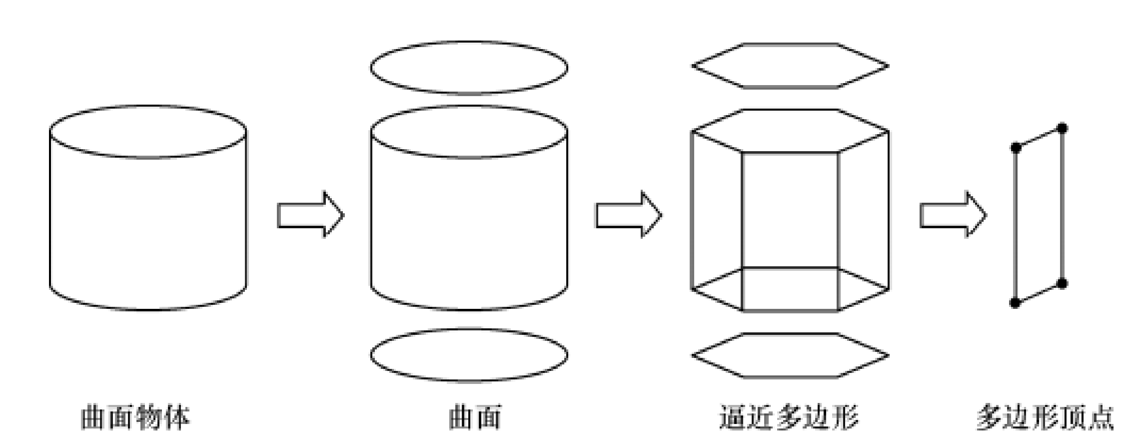
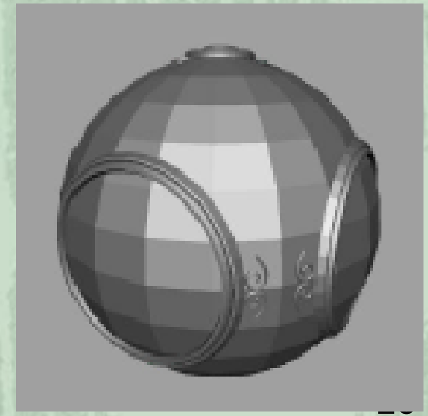


图 6-5　曲面物体的多面体近似逼近表示过程



曲面模型

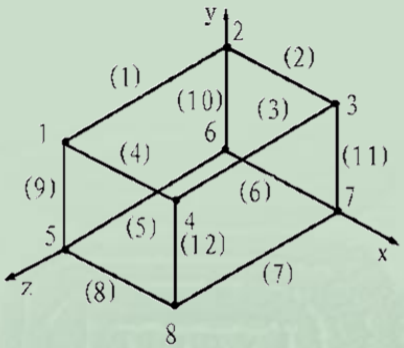
- 曲面造型
  - 研究在计算机内如何描述一张曲面，如何对曲面的形状进行控制与显示
  - 可由数学函数来定义
    - 包括二次曲面、超二次曲面、隐函数曲面等
  - 也可由用户输入一系列离散的数据点，来确定的参数曲面（第4章）
    - 如Bézier曲面、B样条曲面、NURBS曲面等

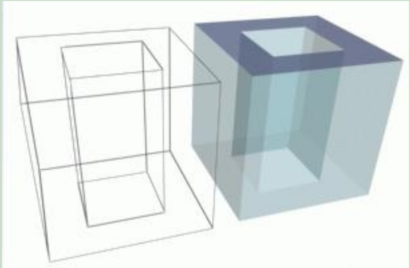
本章内容

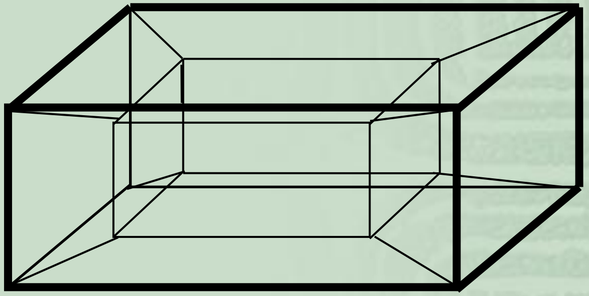
- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

数据模型的分类（1/3）

- 线框模型 ----物体的骨架
  - 相邻顶点连接构成棱边表示几何形状特征
  - 形体表示成一组轮廓线的集合，只需建立三维线段表
  - 数据结构简单、处理速度快
  - 所构成的图形含义不确切，与形体之间不存在一一对应关系，有二义性
  - 不能计算面积、体积等物理量，不便进行光照或消隐处理，不适合真实感显示和数控加工







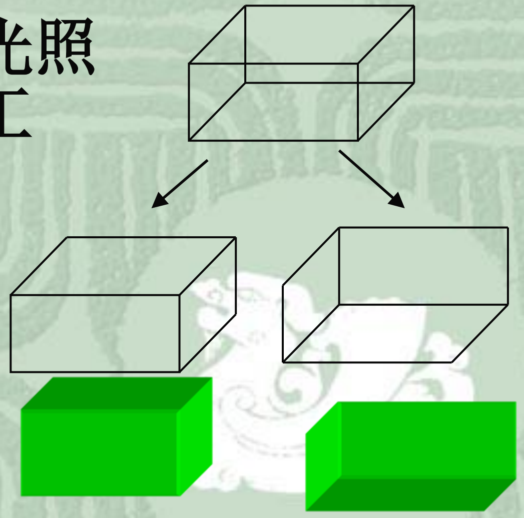
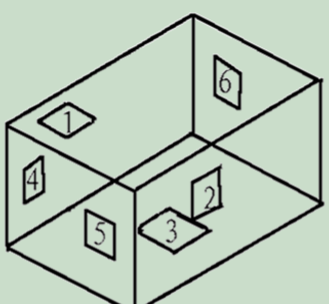


图6-8 用线框模型表示的有二义性的物体

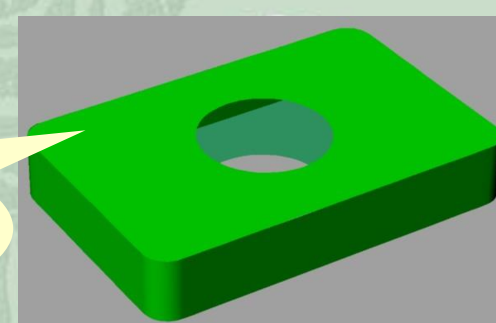
可有三种不同的理解，从三个方向中的一个方向打一个方孔

数据模型的分类（2/3）

- **表面模型** ----物体的皮肤
  - 用有向棱边围成的部分定义形体表面，由面的集合定义形体
  - 在线框模型的基础上，增加物体表面和边的信息及表面特征、棱边的连接方向等，形体与其表面一一对应，避免了二义性，能计算面积，能满足面面求交、线面消隐、明暗处理、数控加工等需求
  - 但只有形体表面的信息，形体信息表示不完整
  - 进行剖切操作时，内部为空洞，无法计算和分析物体的整体性质（如体积、重心等），限制了在工程分析方面的应用

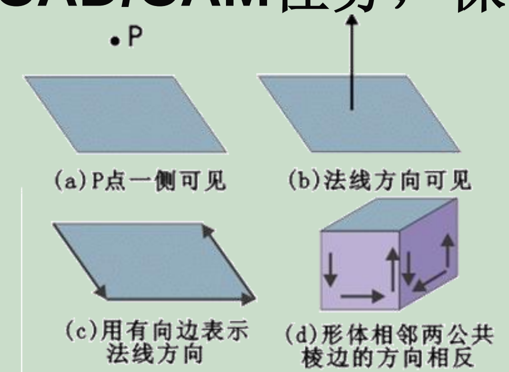


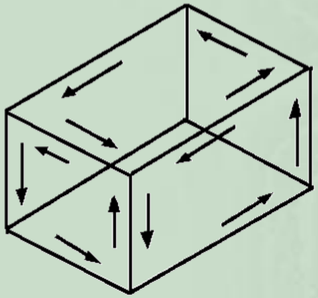
在面模型上打孔，
内部为“空洞”

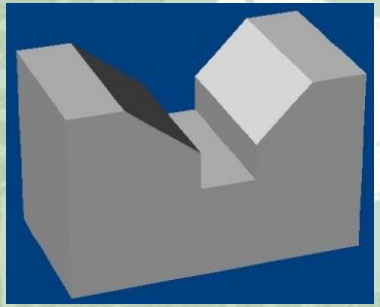


数据模型的分类（3/3）

- 实体模型 ----”有血有肉” 的物体模型
  - 明确定义了表面的哪一侧存在实体，在表面模型基础上，使用表面外法向指明实体存在的一侧，如规定正向指向体外
    - 通常用有向棱边隐含地表示表面的外法向
      - 在定义表面时，有向棱边按右手法则取向，沿着闭合的棱边所得的方向与表面外法向一致
      - 此法还可检查形体的拓扑一致性，拓扑合法的形体在相邻两个面的公共边界上，棱边的方向正好相反
  - 包含描述实体所需的较多信息，如几何信息、拓扑信息，表示完整无歧义，适合用集合运算构造形体和有限元分析。实现所有的CAD/CAM任务，保证CAD/CAM的自动化。





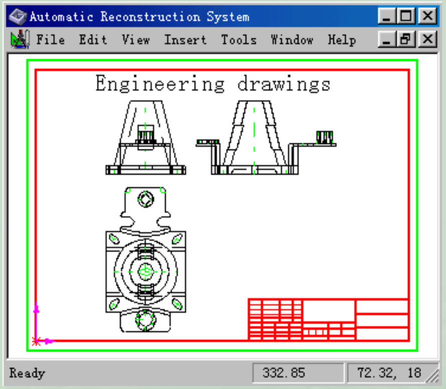


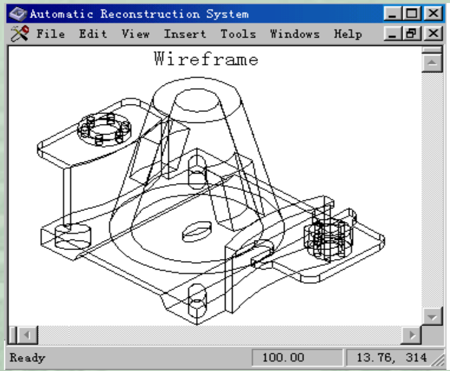
本章内容

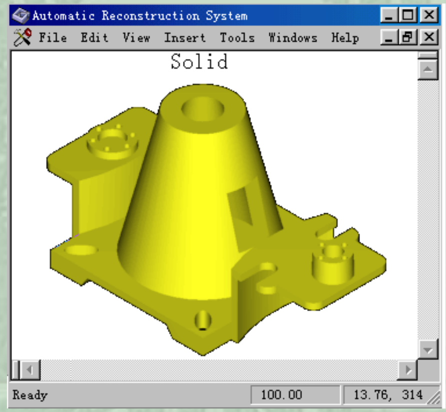
- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

几何造型技术的发展

- 几何造型技术的发展
  - 第一代：手工绘制工程图
  - 第二代：二维计算机绘图
  - 第三代：三维线架系统
  - 第四代：曲面造型
  - 第五代：实体造型（**Solid Modeling**）
    - 为适应**CAD/CAM**的需求发展起来的







实体几何造型

- 实体几何造型（**Solid Modeling**）？
  - 研究三维几何实体在计算机中的完整信息表示的模型和方法的技术
  - 如何在计算机中建立恰当的模型，来表示不同的图形对象？
  - 如何组织图形对象的描述数据，使存储这些数据所需的空间最省，检索、处理这些数据的速度较快？

实体几何造型系统的发展

- **20世纪60年代初期**
- **20世纪70年代初期**
  - 计算机内提供物体的完整几何定义，可随时提取所需信息
  - 支持CAD/CAM过程的各个方面，如计算机绘图、应力分析、数控加工等，为CAD/CAM一体化提供了可能性
  - 用多面体表示形体，不支持精确的曲面表示
- **20世纪80年代初期**
  - 精确的二次曲面方法表示形体
- **20世纪80年代末**
  - NURBS曲面表示方法
- **20世纪90年代以后**
  - 开始支持线框、曲面、实体统一表示的非正则形体的造型

本章内容

- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

描述实体的信息（1/3）

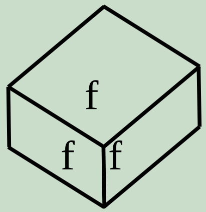
- 几何信息（**Geometry**）

  形体在欧氏空间中的位置和大小
  描述形体的几何元素（顶点、边、面）
  形成物体边界表示的“骨架”

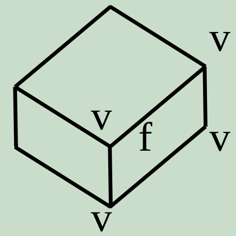
- 拓扑信息（**Topology**）

  形体各分量（顶点、边、面）的数目及其相互间的连接关系
  描述形体的几何元素的性质和度量关系
  犹如附着在“骨架”上的肌肉

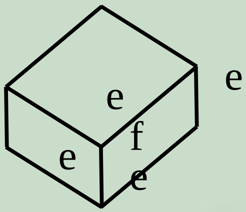
描述实体的信息（2/3）



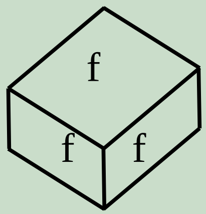
面相邻性 f:{f}



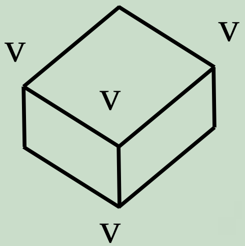
面-顶点包含性



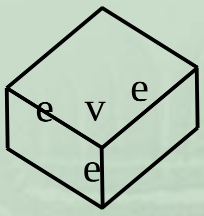
面-边包含性 f:{e}



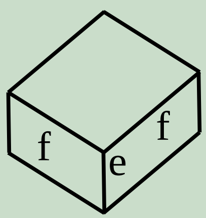
顶点—面相邻性



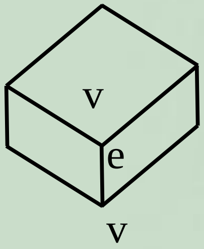
顶点相邻性



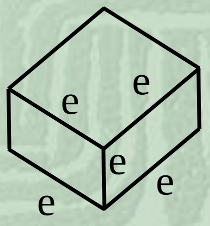
顶点-边相邻性 v:{e}



边-面相邻性 e:{f}



边-顶点包含性 e:{v}



边相邻性 e:{e:}

拓扑信息

描述实体的信息（3/3）

- 刚体运动
  - 不改变图形上任意两点间的距离
  - 也不改变图形的几何性质的运动
- 拓扑运动
  - 允许形体作弹性运动，即在拓扑关系中，对图形可随意伸张扭曲。
  - 但图上各点仍为不同的点，不允许把不同的点合并成一个点。

表示实体的基本几何元素

- 顶点（**Vertex**）

零维几何元素。在齐次坐标系下，***n***维空间中的点用***n*+1** 维向量来表示。

- 边（**Edge**）

一维几何元素。对正则形体，边是两邻面的交集，对非正则形体，边有可能是多个邻面的交集。边的形状可以是直线，也可以是曲线。

- 面（**Face**）

二维几何元素。可以无内环，但必须有且只有一个外环。面有方向性，一般用其外法线方向作为该面的正向。面的形状可以是平面，也可以是曲面

- 环（**Loop**）

二维几何元素。有序、有向边（直线段或曲线段）组成的面的封闭边界 。外环边通常按逆时针方向排序 ， 内环

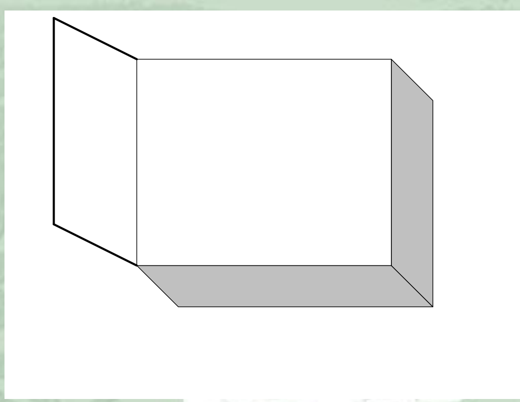
- 体（**Body**）

三维几何元素。由封闭表面围成的空间，其边界是有限面的并集。

按照：体－面－环－边－点
的层次记录信息

正则形体的定义（1/3）

- 几何造型
  - 通过对点、线、面、体等几何元素
  - 经平移、放缩、旋转等几何变换和并、交、差等集合运算，产生实际的或想象的物体模型
- 如何保证实体的有效性呢？
  - 无效的实体不具备可加工性
  - 要保证实体的有效性和可加工性，形体必须是正则形体



- 那么什么是正则形体呢？

正则形体的定义（2/3）

- 从点集拓扑学的角度理解实体
- 点的邻域
  - 若P是点集S的一个元素，则点P的以R（R>0）为半径的域指的是围绕点P的半径为R的小球（二维情况下为小圆）
- 开集的闭包
  - 指该开集与其所有边界点的集合的并集，本身是个闭集。（三维物体的点的集合可分为内部点和边界点两个部分）
- 正则点集
  - 由内部点构成的点集的闭包
- 正则形体
  - 三维空间的正则点集是正则形体，即三维有效物体

正则形体的定义（3/3）

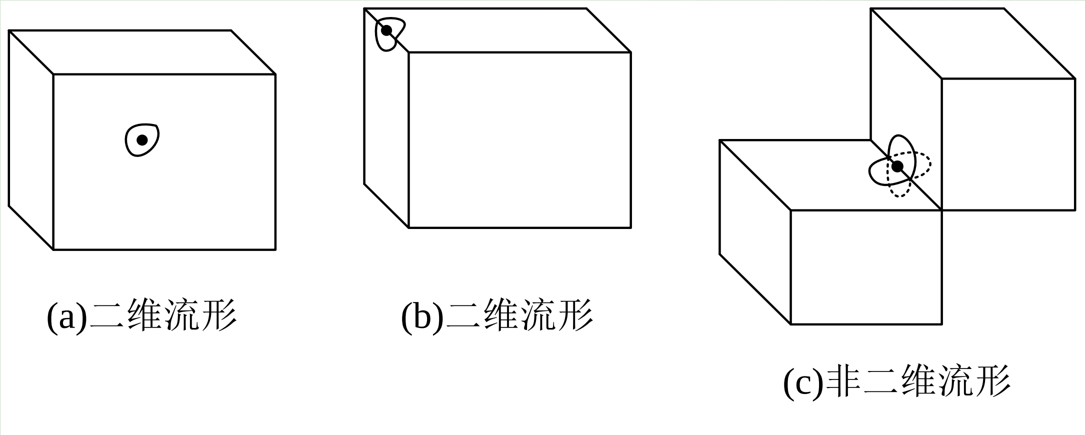
- 如何得到一个正则形体？
  - 将三维形体点集分成内部点集和边界点集两部分
  - 先找出形体的内部点集
  - 然后形成形体内部点集的闭包——正则点集

(a) 形体的开集　(b) 图(a)开集的闭包　(c) 图(a)形体的内部点集　(d) 图(c)内部点集的闭包

图6-9 正则形体的形成过程示意图

实体的定义和性质（1/6）

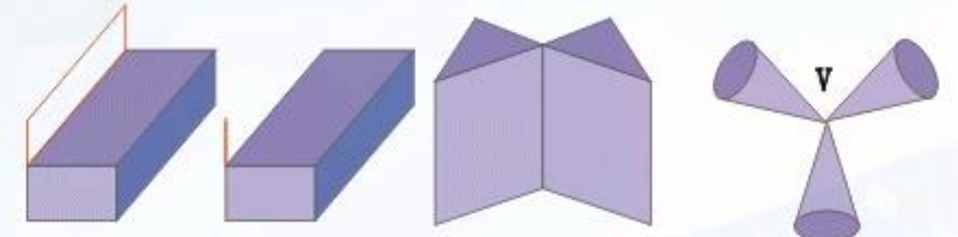
- 二维流形（Manifold）
  - 对于实体表面上的任意一点，都可找到一个围绕着它的任意小的邻域，该邻域与平面上的一个圆盘是拓扑等价的。



- 实体
  - 对于一个占据有限空间的正则形体，若其表面是二维流形，则该正则形体为实体。

实体的定义和性质（2/6）

- 正则形体的性质？
  - （1）刚性
    - 不变形的实体，不能随实体位置和方向而发生形状变化
  - （2）维数的一致性
    - 三维空间中的实体的各部分均应是三维的



(a)悬面 (b)悬边 (c)一条边有二个以上的邻面 (d)点V的小邻域不是单连通域

几何元素	正则形体	非正则形体
面	是形体表面的一部分 不允许存在悬面	可以是形体表面的一部分，也可是形体内的一部分，也可与形体相分离。
边	只有两个邻面 不允许存在悬边	可有多个邻面、一个邻面或没有邻面
点	至少和三个面（或三条边）邻接 不允许存在孤立点	可与多个面（或边）邻接，也可以是聚集体、聚集面、聚集边或孤立点

实体的定义和性质（3/6）

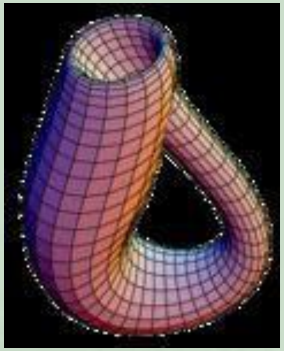
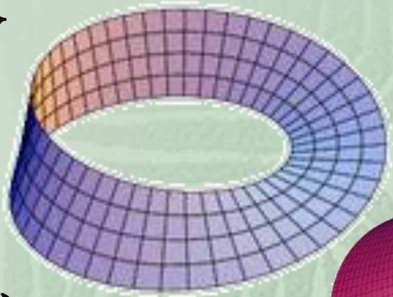
- 正则形体的性质？
  - （3）有限性
    - 一个实体必须占据有限的三维空间
  - （4）边界的确定性
    - 根据实体的边界能区分出实体的内部和外部
  - （5）封闭性
    - 经过一系列刚体运动和任意次序的集合运算之后，实体仍保持其同等的有效性

实体的定义和性质（4/6）

- 正则形体的表面的性质
  - （1）连通性
    - 位于实体表面上的任意两个点，都可用实体表面上的一条路经连接起来
  - （2）有界性
    - 实体在有限空间内是可定义的，即实体表面可将空间分成互不连通的两个区域，其中一个区域是有界的。

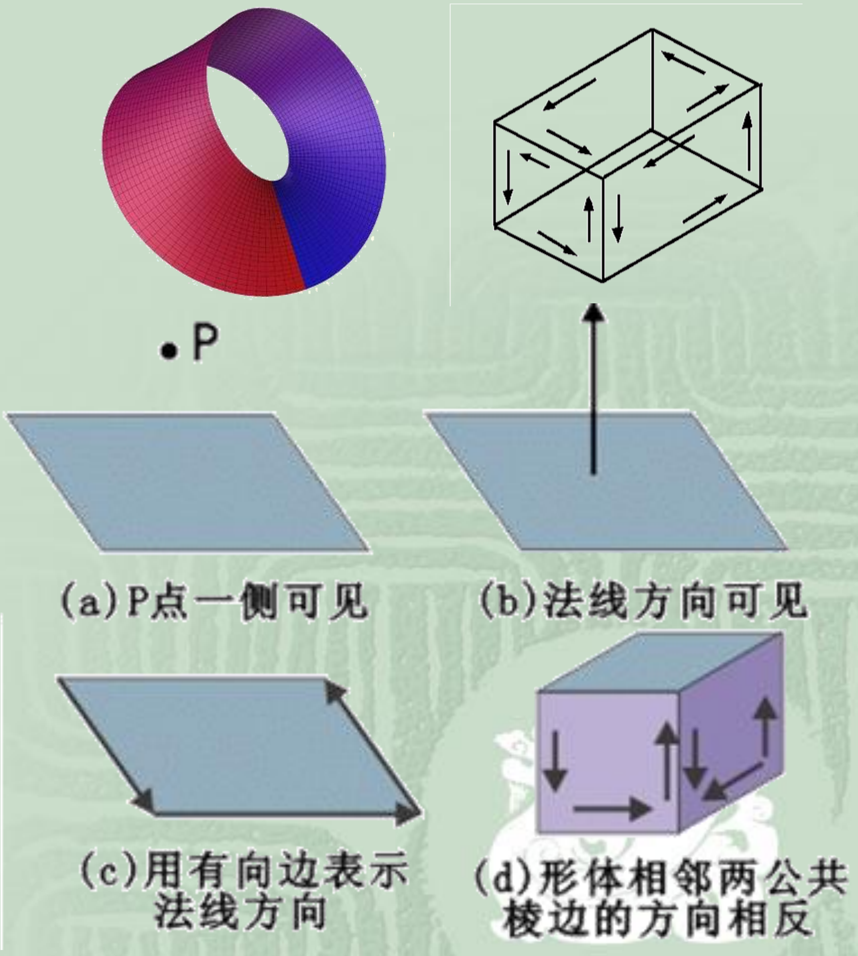
实体的定义和性质（5/6）

- 正则形体的表面的性质
  - （3）非自交性
    - 实体的表面不能自交
    - 克莱茵瓶（Klein Bottle）是一个自交且不可定向的封闭曲面
  - （4）可定向性
    - 表面的两侧可明确地定义出属于实体的内侧还是外侧
    - 莫比乌斯带（Mobius Band）则是单边不可定向的例子

实体的定义和性质（6/6）

- 确定多面体表面是否具有可定向性的方法
  - Mobius提出
  - 将实体的每个表面的边环定义一个一致的方向（如逆时针方向）
  - 这样，每条边会得到两个指示方向的箭头
  - 当且仅当每条边在每个方向都具有一个箭头时，该实体表面就是可定向的。



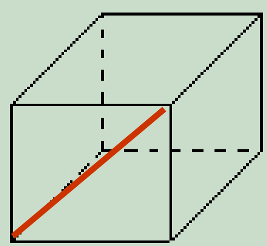
(a) P点一侧可见
(b) 法线方向可见
(c) 用有向边表示法线方向
(d) 形体相邻两公共棱边的方向相反

平面多面体与欧拉公式（1/4）

- 欧拉特征
  - 设表面s由一个平面模型给出，且**v,e,f**分别表示其顶点、边和小面的个数，那么**v-e+f**是一个常数，它与s划分形成平面模型的方式无关。该常数称为**Euler**特征。

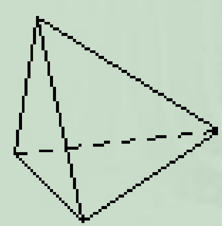
- 欧拉公式

$$v - e + f = 2$$

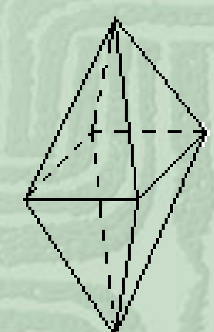


v=8,e=12,f=6

v=8,e=13,f=7



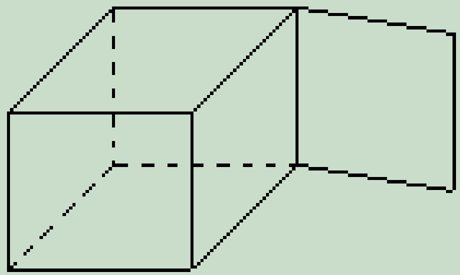
v=4,e=6,f=4



v=6,e=12,f=8

平面多面体与欧拉公式（2/4）

- 欧拉物体
  - 满足欧拉公式的物体



v=10,e=15,f=7

欧拉公式只是检查实体有效性的必要条件，而非充分条件

平面多面体与欧拉公式（3/4）

- 欧拉运算
  - 增加或删除面、边和顶点以生成新的欧拉物体的过程
- 欧拉运算时，除了要满足欧拉公式外，还必须满足以下附加条件，才能够保证实体的拓扑有效性。
  - 所有面是单连通的，其中没有孔；
  - 实体的补集是单连通的，没有洞穿过它；
  - 每条边完全与两个面邻接，且每端以一个顶点结束；
  - 每个顶点都至少是三条边的汇合点。

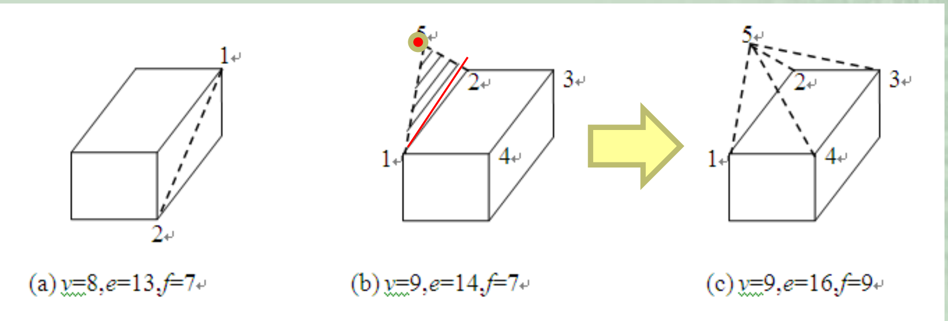


图 6-15 在立方体上的欧拉运算

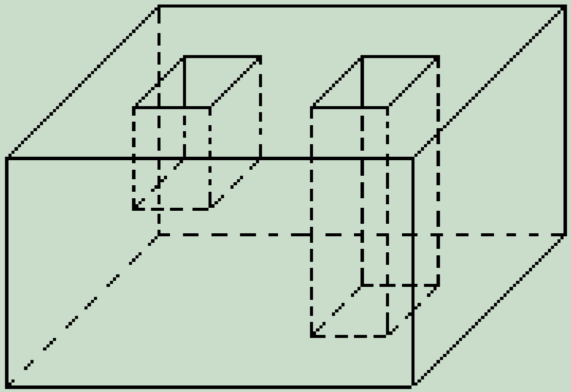
平面多面体与欧拉公式（4/4）

- 对于非简单多面体，欧拉公式是否成立呢？
- 广义欧拉公式

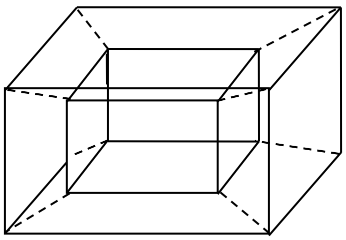
$$v - e + f - r = 2\,(s - h)$$

有一个贯穿的方孔和一个非贯穿的方孔的立方体

r: 多面体表面上内孔数
s: 相互分离的多面体数
h: 贯穿多面体的孔洞数



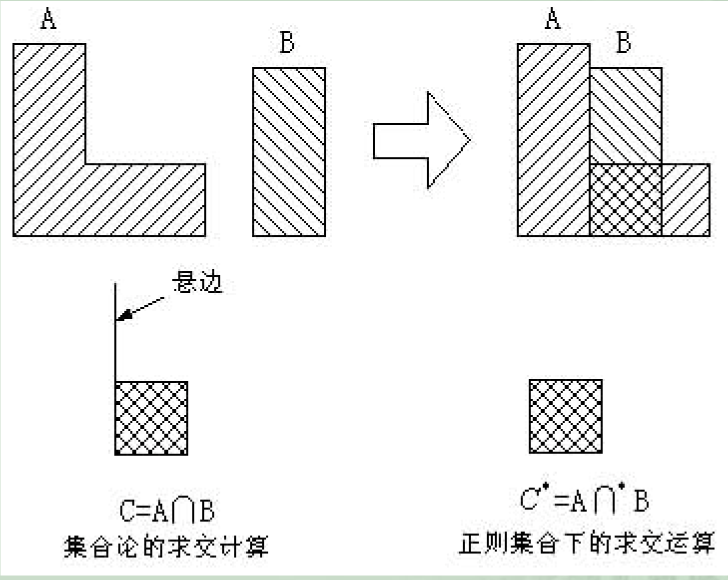
v=24,e=36,f=15
r=3,s=1,h=1
欧拉公式不适用于非简单多面体



v=16,e=32,f=16
r=0,s=1,h=1

实体的正则集合运算（1/8）

- 正则集合运算
  - 能产生正则形体的集合运算
- 为什么在正则实体造型中，不使用普通的并、交、差等集合运算，而要使用正则集合运算呢？
  - 正则集合运算保证集合运算的结果仍是一个正则形体
  - 普通的集合运算会产生悬边、悬面等低于三维的形体



实体的正则集合运算（2/8）

- 如何实现正则集合运算?
  - 方法1：
    - 先按照普通集合运算
    - 再删去不符合正则形体定义的部分：悬边、悬面等
  - 方法2：
    - 定义正则集合算子，直接计算得到

实体的正则集合运算（3/8）

- 任何物体都可用三维欧氏空间中点的集合来表示，但三维欧氏空间中任意点的集合却不一定对应于一个有效的物体
- 设有三维空间中的一个点集***A***，如果***A***满足

$$r \bullet A = b \bullet i \bullet A$$

- 那么称 $r \bullet A$ 为***A***的正则点集
- 其中，***r***表示正则化算子，***b***、***i***分别表示取闭包运算和取内点运算，相当于内部点构成的点集的闭包
- 正则运算
  - 先对物体取内点再取闭包的运算

实体的正则集合运算（4/8）

- 正则集合运算定义如下：

$$A \quad op^{*} \quad B \quad = r \bullet (A \quad op \quad B)$$

- 正则并

$$A \bigcup^{*} B = r \bullet (A \bigcup B)$$

- 正则交

$$A \bigcap^{*} B = r \bullet (A \bigcap B)$$

- 正则差

$$A -^{*} B = r \bullet (A - B)$$

实体的正则集合运算（5/8）

- 以正则交集合运算为例
  - 符合正则形体定义的实体，是三维空间中的点的正则点集，可以用它的边界点集和内部点集来表示，即写成

$$A = bA \cup iA$$

    - *A*为符合正则形体定义的实体
    - *bA*代表*A*的边界点集
    - *iA*代表*A*的内部点集

实体的正则集合运算（6/8）

- 普通集合交运算

$$C = A \cap B$$

$$C = (bA \cap bB) \cup (iA \cap bB) \cup (bA \cap iB) \cup (iA \cap iB)$$

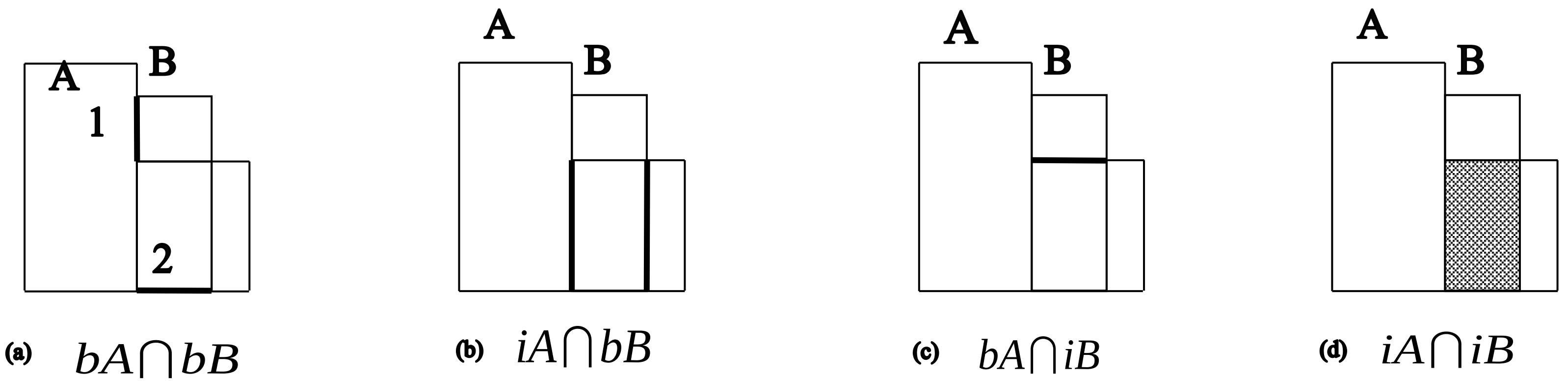


图6-17 正则交运算的候选部分

- 确定两个相交物体的重叠边界中的有效部分
  - 确定图中粗实线所示边界中的有效部分

实体的正则集合运算（7/8）

- 确定两个相交物体的重叠边界中的有效部分
  - 确定图中粗实线所示边界中的有效部分

$$A\cap^* B = \mathrm{Valid}_{\mathrm{b}}(bA\cap bB)\cup(iA\cap bB)\cup(bA\cap iB)\cup(iA\cap iB)$$

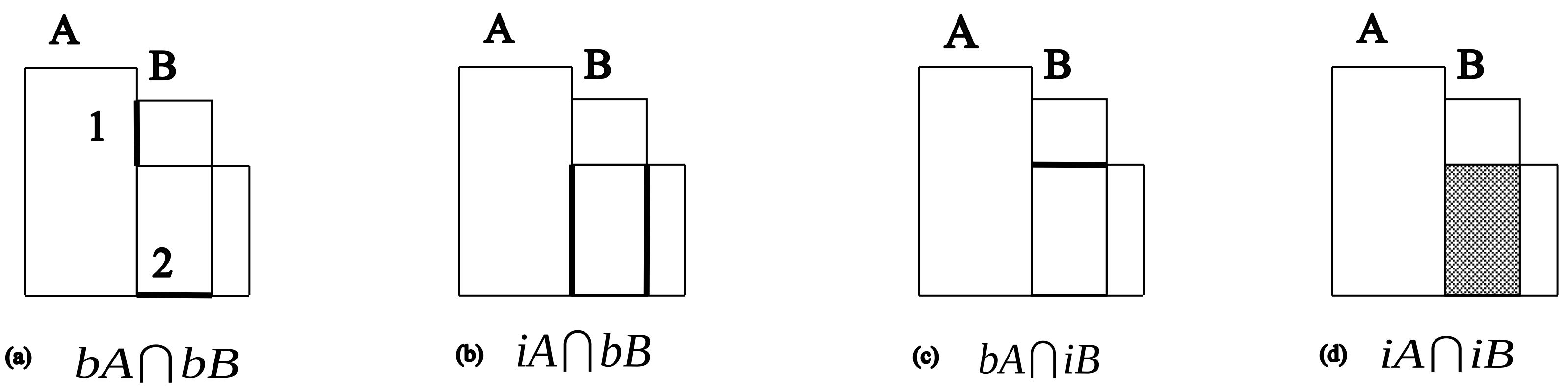
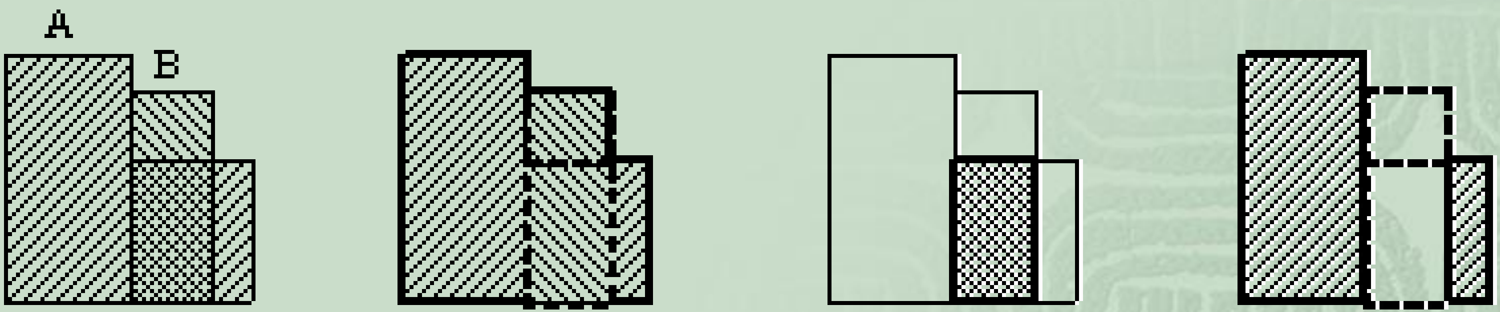


图6-17 正则交运算的候选部分

  - 如果对物体的边界采用一致的方向约定，那么，在两个相交物体的重叠边界上，如果某点处的切矢同向，则重叠边界线段就是有效的边界，否则是无效的边界

实体的正则集合运算（8/8）

- 正则并、交、差集合运算



(a) A 与 B　(b) $A \cup^* B$　(c) $A \cap^* B$　(d) $A -^* B$

本章内容

- 6.1多面体模型和曲面模型
- 6.2线框模型、表面模型和实体模型
- 6.3实体几何造型系统的发展
- 6.4实体的定义与运算
- 6.5实体的表示方法

6.5实体的表示方法

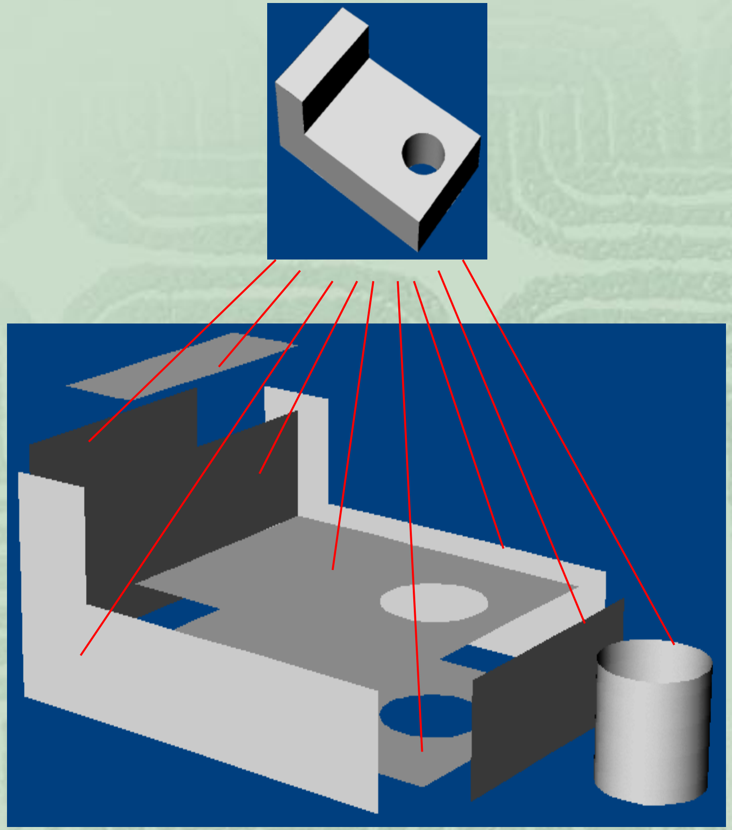
- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

6.5实体的表示方法

- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

数据模型——边界表示（1/4）

- Boundary Representation，称BR或B-reps表示
  - 当前CAD/CAM系统中的最主要的表示方法，最成熟、无二义性
  - 用一组曲面或平面来描述物体，这些曲面或平面将物体分为内部和外部



- 物体的边界与物体一一对应
  - 实体的边界是表面的并集
  - 表面的边界是边的并集
- 多边形表面模型
  - 边界表示的最普遍方式
  - 使用一组包围物体内部的平面多边形，即平面多面体，来描述实体。

数据模型——边界表示（2/4）

- 多面体表示的实体的表面、棱边、顶点间的连接关系有9种
- 至少需要选择其中的2种才能表示一个实体的完整的拓扑信息

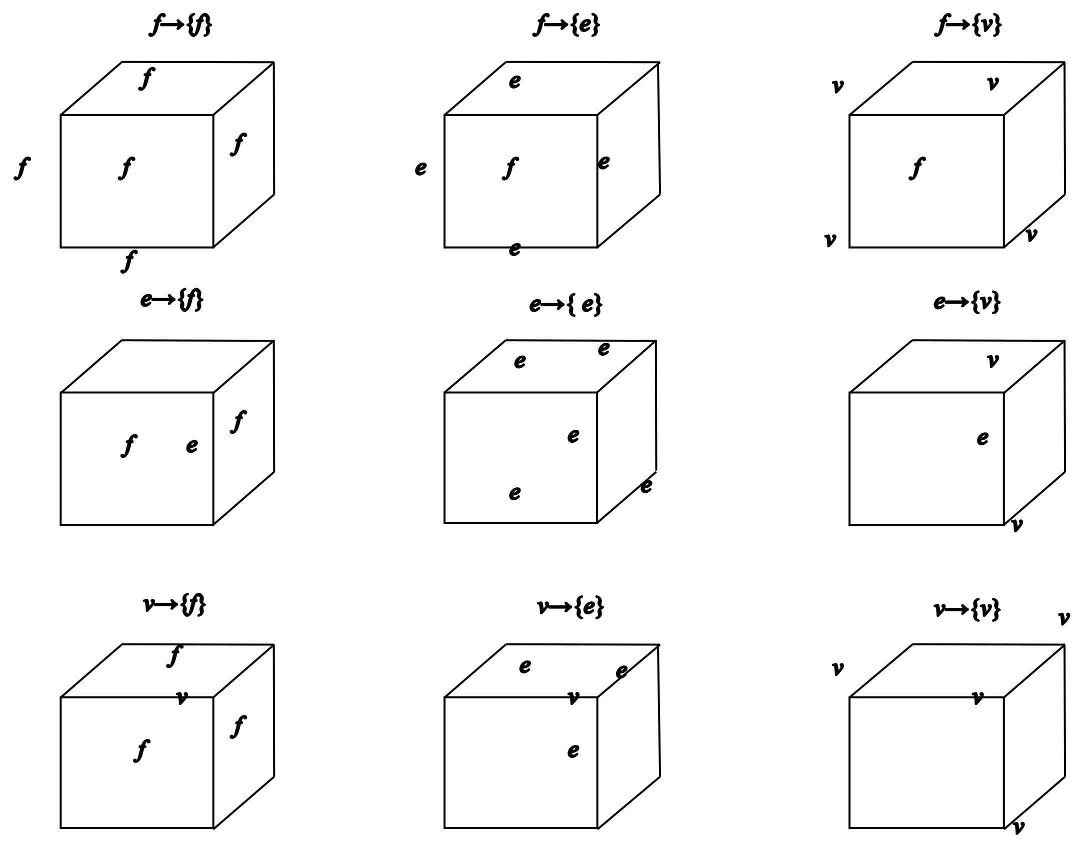


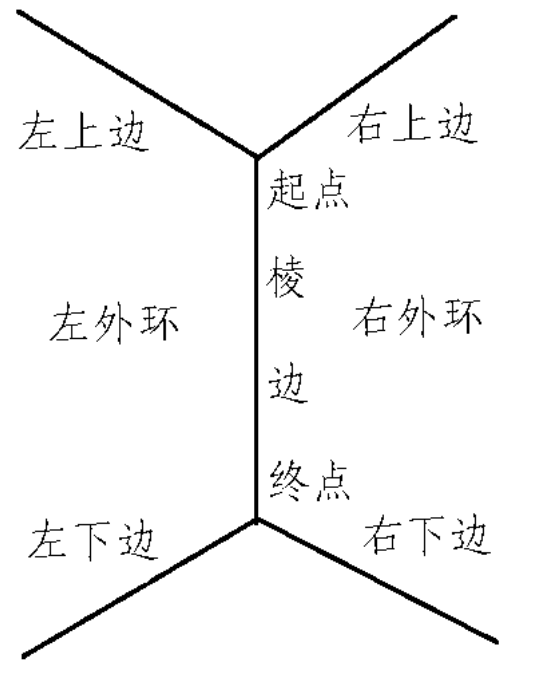
图6-20 表面、棱边、顶点之间的拓扑关系

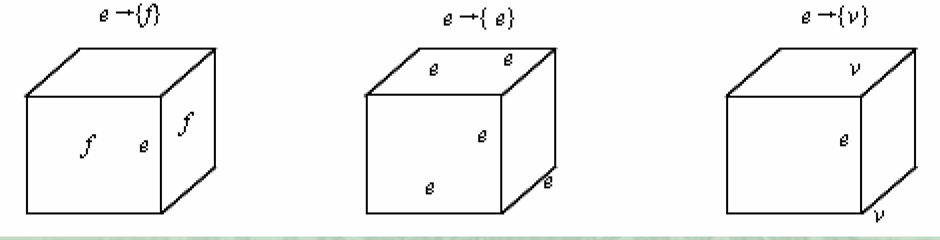
采用较少的关系类型进行组合来表示一个实体，所需的存储空间小，但对数据的查找时间长

反之，所需的存储空间大，但对数据的查找时间短

数据模型——边界表示（3/4）

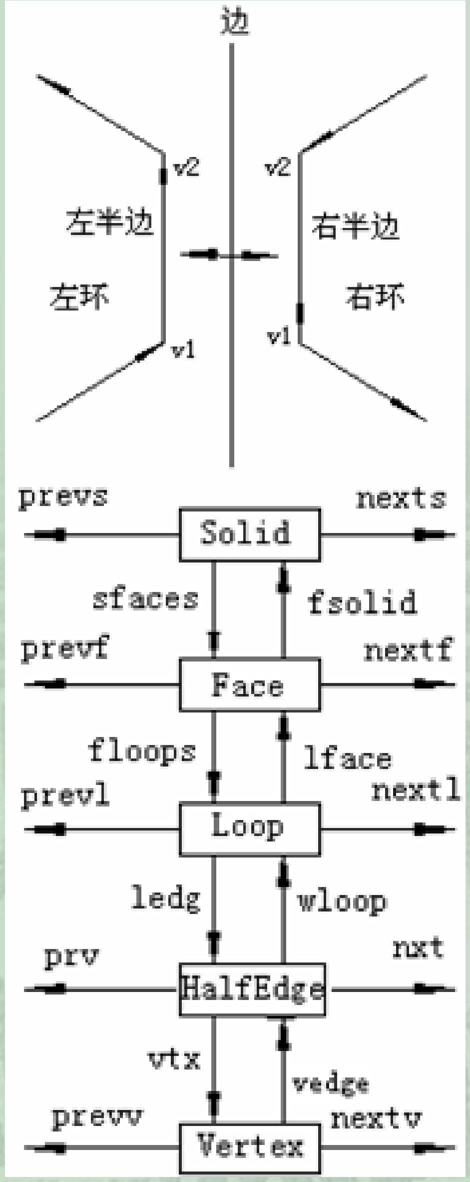
- **翼边数据结构**
  - 最早由美国斯坦福大学B.G.Baumgart等人于1972年提出
  - 以边为核心来组织数据的一种数据结构
  - 用指针记录每一边的两个邻面（即左外环和右外环）、两个顶点、两侧各自相邻的两个邻边（即左上边、左下边、右上边和右下边）
  - 用此数据结构表示多面体模型是完备的，但不能表示有精确曲面边界的实体





数据模型——边界表示（4/4）

- 半边数据结构
  - 20世纪80年代提出，已成为边界表示的主流数据结构
  - 以边为核心，将一条物理边拆成拓扑意义上方向相反的两条“半边”来表示，使其中每条边只与一个邻接面相关
  - 因半边数据结构中的边只表示相应物理边的一半信息，故称其为半边
  - 在拓扑上分为体—面—环—半边—顶点五个层次



6.5实体的表示方法

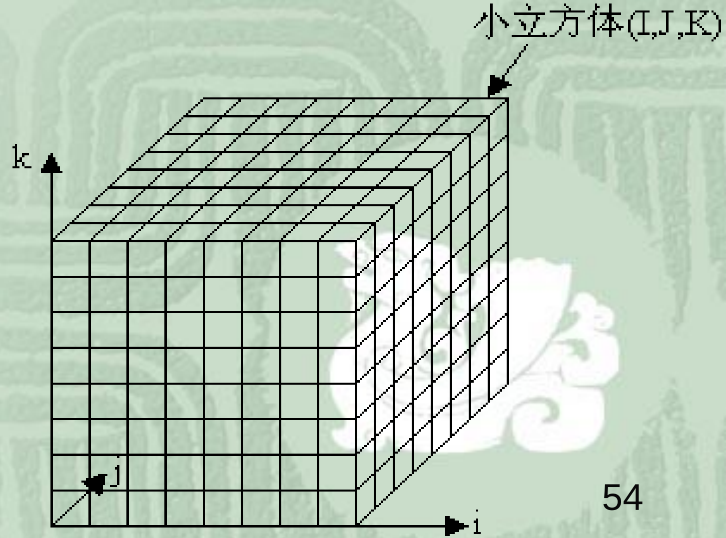
- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

数据模型——空间分割表示（1/6）

- 将包含物体的空间划分成一组非常小的非重叠的连续实体
- 空间位置枚举表示
  - 选择一个立方体空间，将其均匀划分
  - 用三维数组C[I][J][K]表示物体，数组中的元素与单位小立方体一一对应

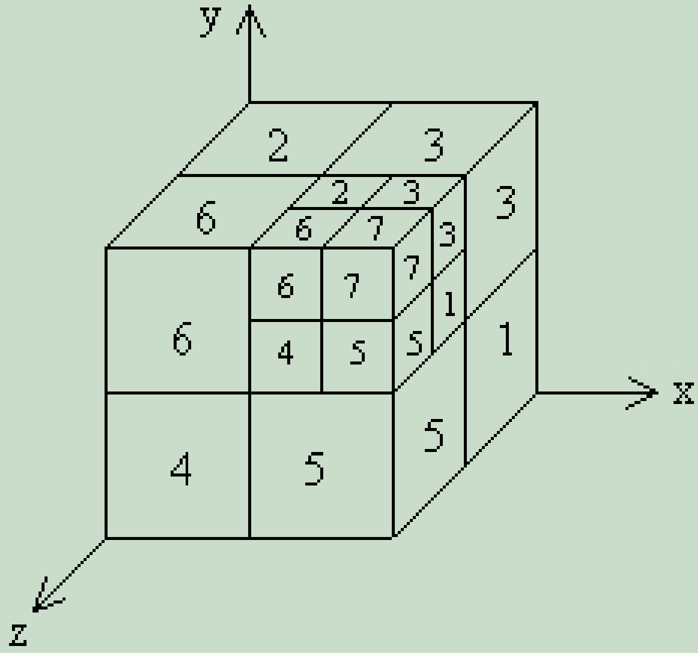
当C[I][j][k] = 1时，表示对应的小立方体被物体占据

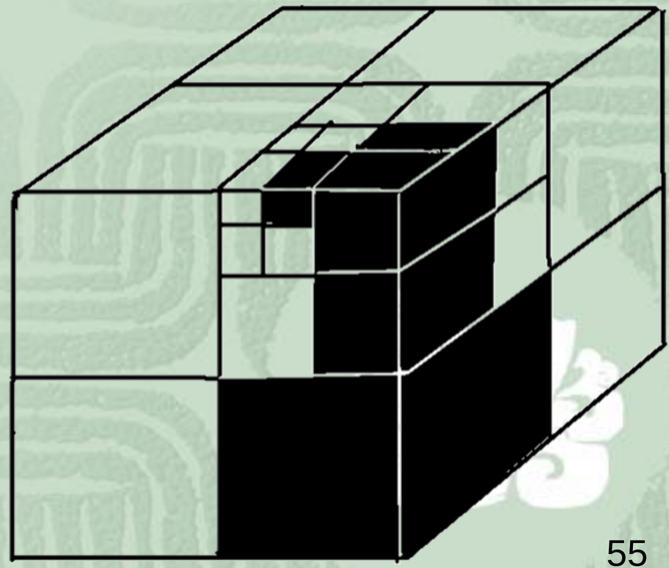
当C[I][j][k] = 0时，表示对应的小立方体没有被物体占据



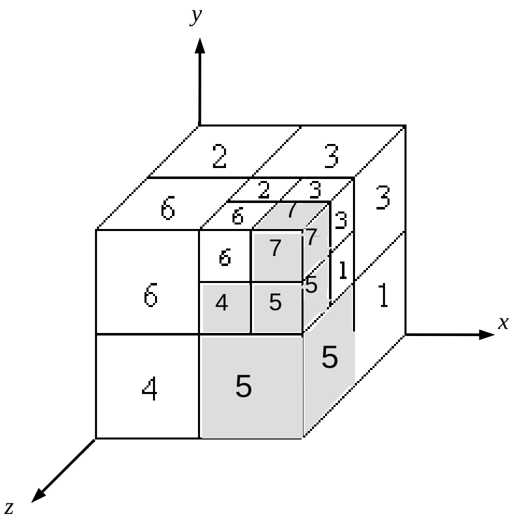
数据模型——空间分割表示（2/6）

- 八叉树（octrees）表示
  - 对空间位置枚举表示的空间分割方法作了改进：均匀分割 ⟹ 自适应分割

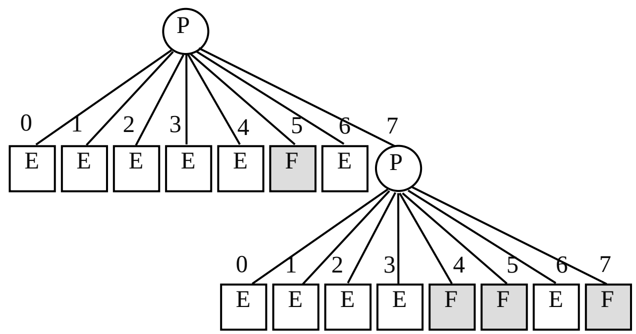




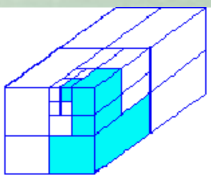
数据模型——空间分割表示（3/6）



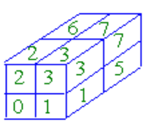
(a)



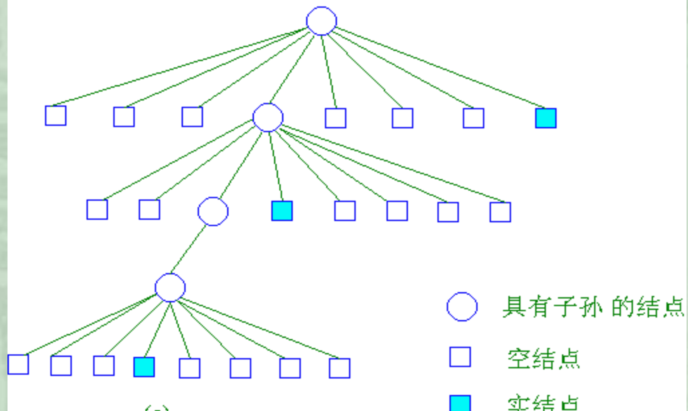
(b)



(a)



(b)



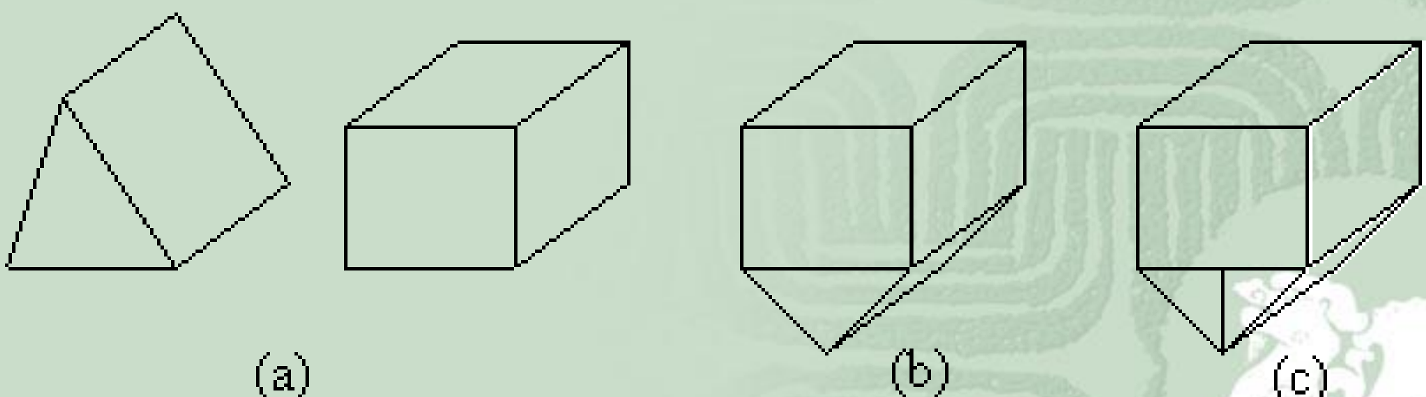
(c)

数据模型——空间分割表示（4/6）

- 八叉树建立过程
  - 八叉树的根节点对应整个物体空间
  - 如果它完全被物体占据，将该节点标记为F(Full)，算法结束；
  - 如果它内部没有物体，将该节点标记为E(Empty)，算法结束；
  - 如果它被物体部分占据，将该节点标记为P(Partial)，并将它分割成8个子立方体，对每一个子立方体进行同样的处理

数据模型——空间分割表示（5/6）

- 单元分解（cell decomposition）表示
  - 对空间位置枚举表示的空间分割方法作了改进：单一体素 ⟶ 多种体素



数据模型——空间分割表示（6/6）

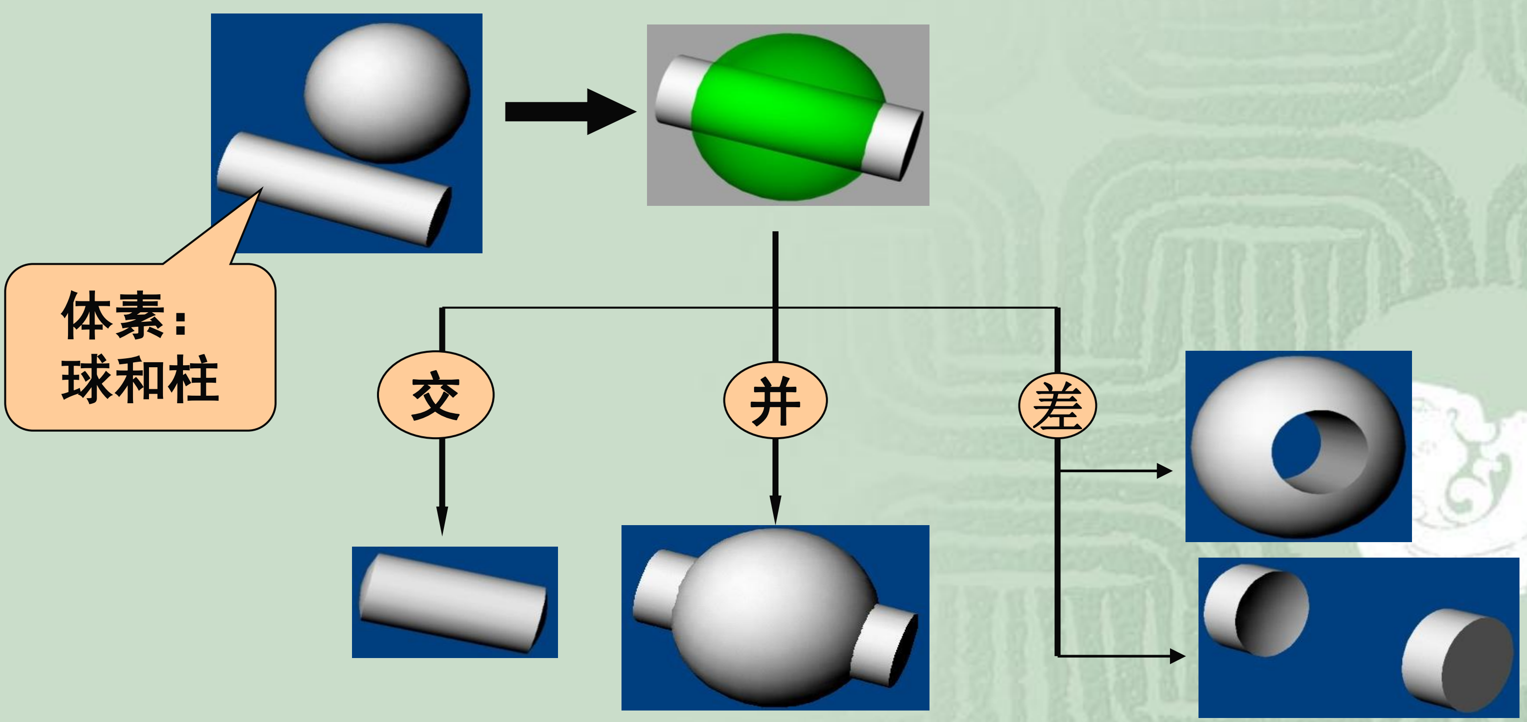
- 三种空间分割方法的比较
  - 空间位置枚举表示----同样大小立方体粘合在一起表示物体
  - 八叉树表示----不同大小的立方体粘合在一起表示物体
  - 单元分解表示----多种体素粘合在一起表示物体

6.5实体的表示方法

- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

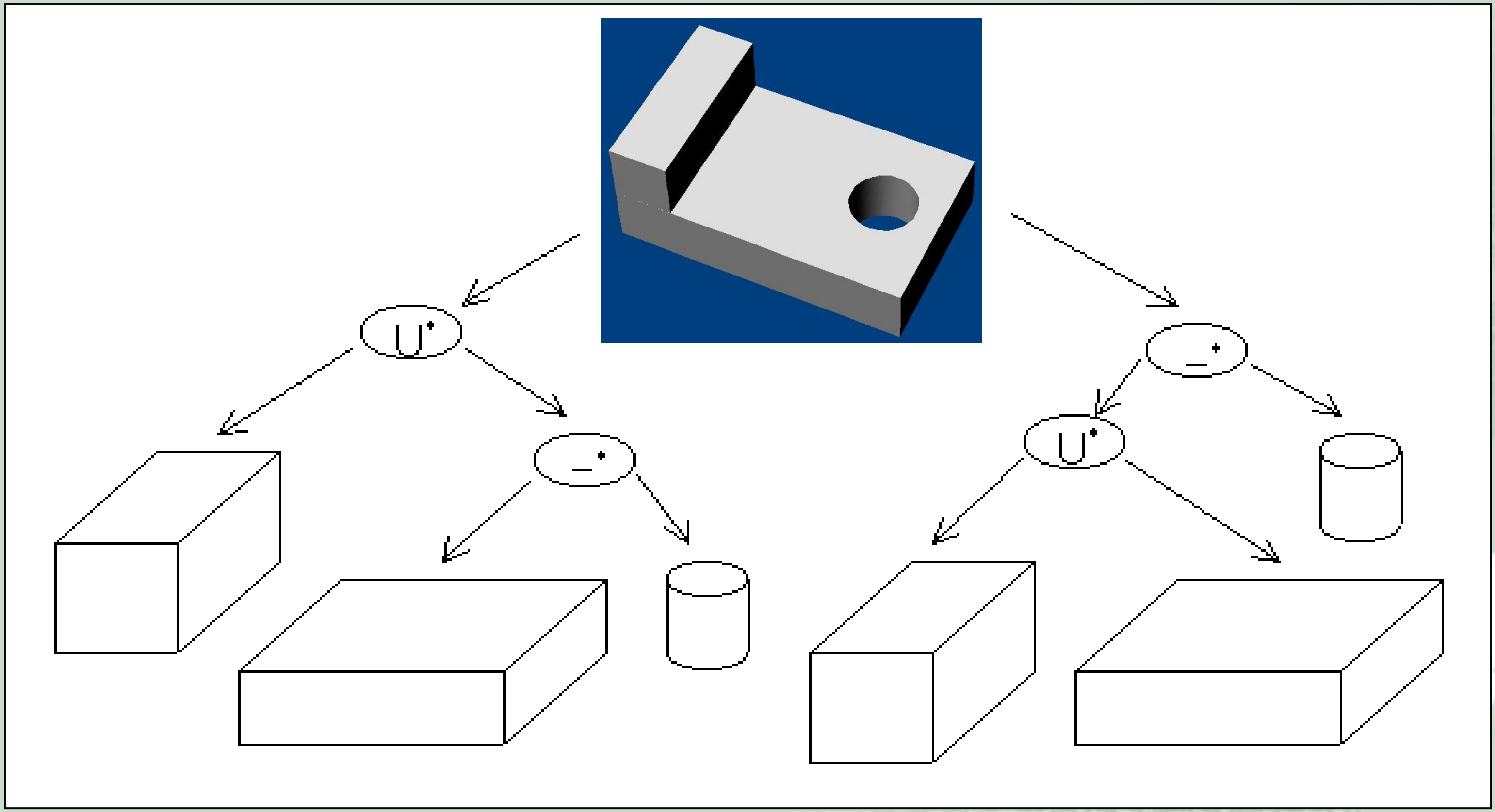
数据模型——构造实体几何表示（1/3）

- **Constructive Solid Geometry，简称CSG**
  - 采用单一的“建筑块”形式的实体造型方法，由两个物体的正则集合操作生成新的物体
    - 并（**union**），交（**intersection**），差（**difference**）



数据模型——构造实体几何表示（2/3）

- 将物体表示成一棵二叉树，称为**CSG树**
  - **叶节点**-基本体素，如立方体、圆柱、圆环、锥体、球体等
  - **中间节点**----并、交、差正则集合运算



数据模型——构造实体几何表示（3/3）

- 优点
  - 如果体素设置比较齐全，通过集合运算就可构造出多种不同的符合需要的实体。
- 缺点
  - 集合运算的中间结果难以用简单的代数方程表示，求交困难
  - CSG树不能显式地表示形体的边界，因而无法直接显示CSG树表示的形体

6.5实体的表示方法

- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

数据模型——扫描表示(1/5)

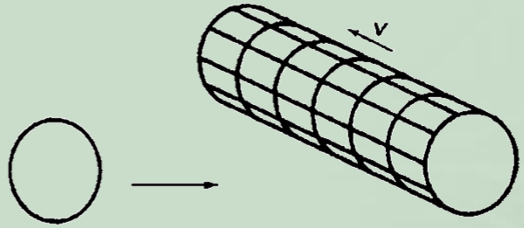
- 扫描表示（**sweep representations**）
- 基于一个基体（一般为封闭的二维区域）沿某一路径运动而产生形体
- **sweep**体
- 两个分量
  - 被运动的基体
  - 基体运动的路径
  - 如果是变截面的扫描，还要给出截面变化规律

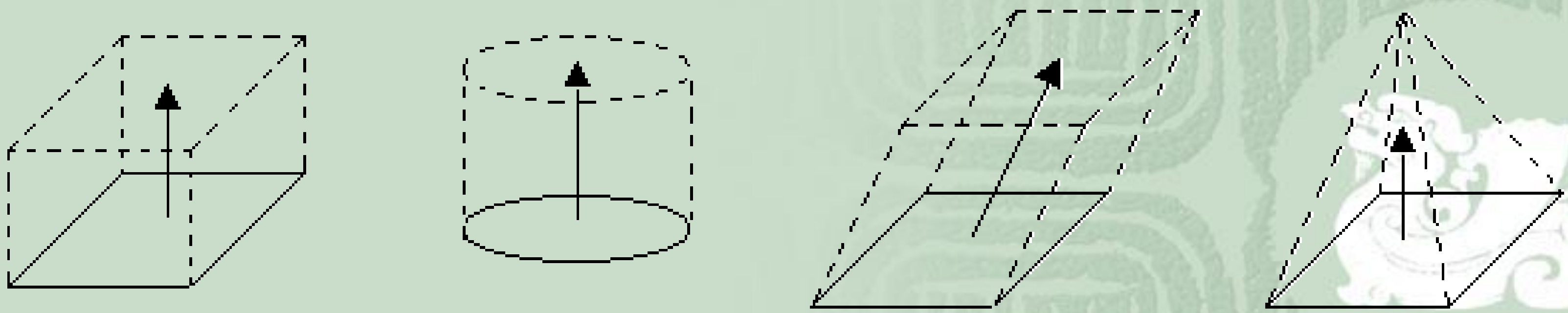
数据模型——扫描表示(2/5)

- 根据扫描路径和方式的不同，可将**sweep**体分为以下几种类型：
  - 平移**sweep**体
  - 旋转**sweep**体
  - 广义**sweep**体

数据模型——扫描表示(3/5)

- 平移sweep体
  - 将一个二维区域沿着一个矢量方向（线性路径）推移，拉伸曲面





(a)

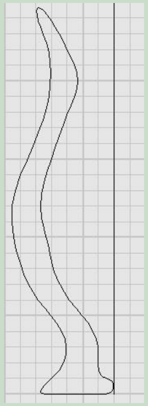
(b)

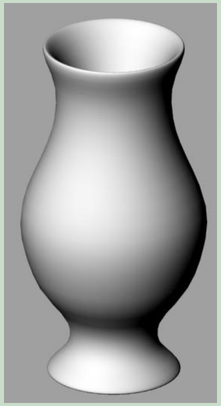
数据模型——扫描表示(4/5)

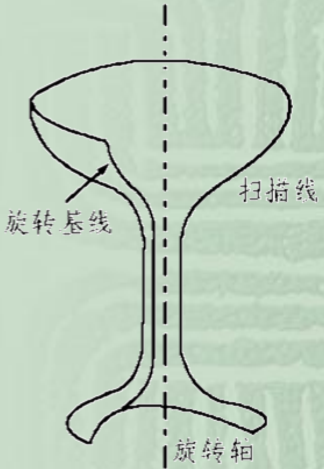
- 旋转sweep体
  - 将一个二维区域绕旋转轴旋转一特定角度
  - 旋转曲面

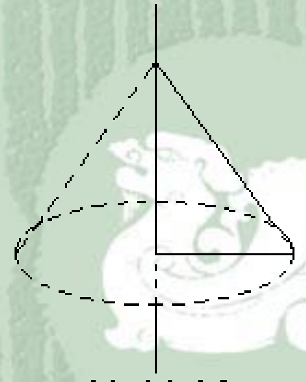
3DMAX例子

旋转扫描法





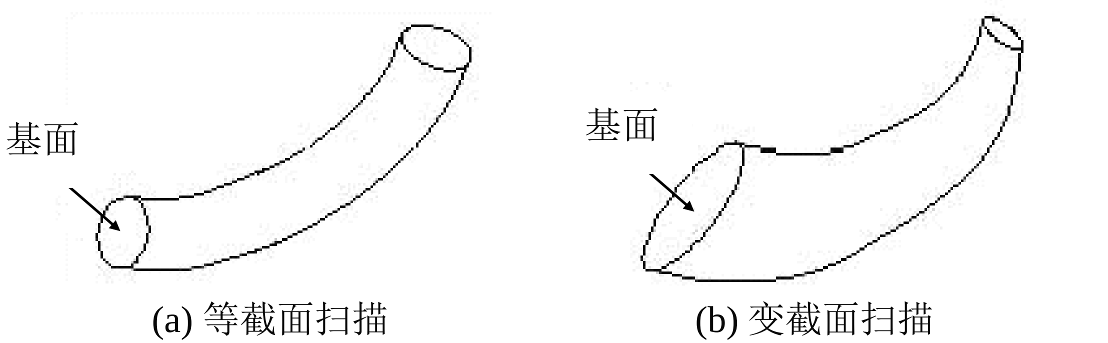




旋转轴

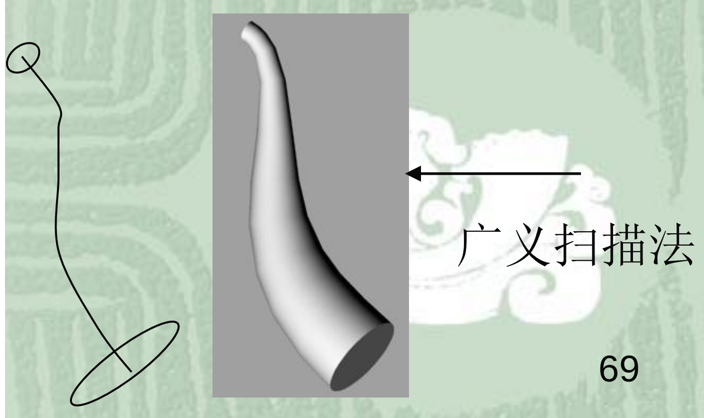
数据模型——扫描表示(5/5)

- 广义sweep体
  - 任意剖面沿着任意轨迹扫描指定的距离
  - 扫描路径可用曲线函数来描述
  - 可沿扫描路径变化剖面的形状和大小
  - 或当移动该形状通过某空间时变化剖面相对于扫描路径的方向，也称扫描曲面



(a) 等截面扫描 (b) 变截面扫描

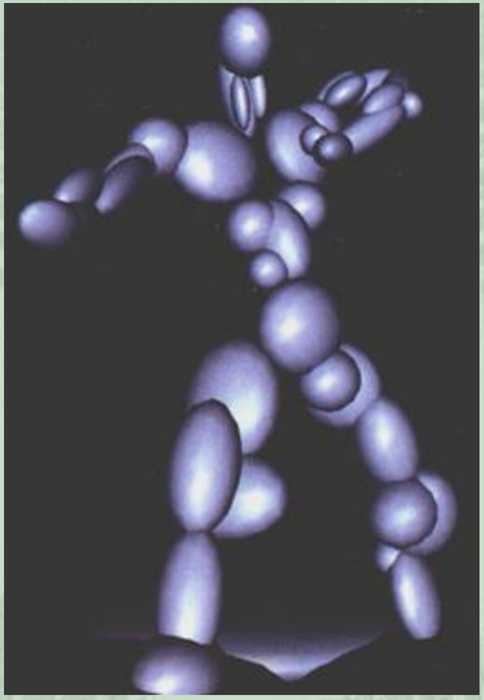
扫描体的扫描路径为曲线时得到的广义sweep体



6.5实体的表示方法

- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造实体几何表示
- 扫描表示
- 元球表示

元球表示法（1/2）



- 用相互重叠的球体表示物体形状
- 特点
  - 数据描述方法简单
    - 球体只需要球心和半径两个参数就能完全确定
  - 计算速度快、所需内存小
    - 特殊性质：球体的平行投影总是圆
    - 因此用球体表示三维物体（尤其是人体）计算速度快
    - **Badler**使用**300**多个球体就相当好地表示了人体

元球表示法（2/2）

- 元球（metaball）模型——柔性物体的建模方法
  - 使用在几个区间内取0而非指数衰减形式的二次密度函数的组合来对物体建模

$$f(r)=\begin{cases} b(1-3r^2/d^2) & 0<r\le d/3 \\ \dfrac{3}{2}b(1-r/d)^2 & d/3<r\le d \\ 0 & r>d \end{cases}$$

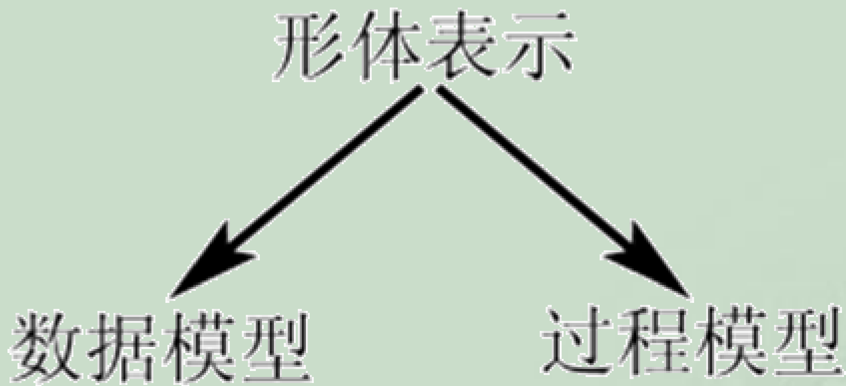
  - 现在，许多动画软件都提供了基于元球的造型工具，来生成那些不适合用多边形或样条函数来模拟的物体，如人体肌肉、器官、液体等

非正则实体造型

- 基于正则形体表示的实体造型技术
  - 只能表示正则的三维“体”
  - 不能表示线架模型中的“线”，表面模型中的“面”
  - 但在实际应用中，有时候人们希望在系统中也能处理低于三维的形体
    - 形体中心轴
    - 剖切平面
- 要求造型系统的数据结构能统一表示线架、表面、实体模型。
- 于是，产生了非正则实体造型技术。

三维实体表示模型的分类

- 模型分类



规则形体的建模方法（完全以数据描述）
- 边界表示
- 空间分割表示
- 构造表示
- ……

不规则形体的建模方法（以过程和控制参数描述，数据文件和一段描述生成规则的代码）
- 随机插值模型
- 迭代函数系统
- L系统
- 粒子系统
- ……


Thank you for your attention !
SuXiaoHong


Question?