

3D建模是计算机图形图像的核心技术之一,应用领域非常广泛。医疗行业使用生物器官的3D模型仿真手术解剖或辅助治疗;电影娱乐业使用3D模型实现人物和动物的动画和及动态模拟;网络游戏行业使用3D模型作为视频游戏素材资源;化工或材料工程师利用3D模型来表征新型合成化合物结构与性能关系;建筑行业使用3D建筑模型来验证建筑物和景观设计的空间合理性和美学视觉效果;地理学家已开始构建3D地质模型作为地理信息标准。

制造业是3D建模技术的最大用户,利用3D模型可以为产品建立数字样机进行产品性能分析和验证并实现数字化制造。数字化制造包括增材(3D打印)和减材(CNC)制造,3D模型是CAD/CAM的数据源。学习和掌握3D打印建模技术关系到3D打印机用户能否将个人头脑中(或图纸)的创意想法数字化,并被打印机的控制软件所读取,最终完成自己设计作品的打印。所以本章重点讨论如何应用流行的3D建模工具为3D打印机提供可打印的数据。

3.1 3D建模基础知识

客观世界中的物体都是三维的,真实地描述和显示客观世界中的三维物体是计算机图形学研究的重要内容。如果我们能使用特定的数据格式来描述三维物体(从几何角度可称为三维形体)它就能被计算机所理解和存储。所谓3D建模就是用计算机系统来表示、控制、分析和输出描述三维物体的几何信息和拓扑信息,最后经过数据格式转换输出可打印的数据文件。

3.1.1 3D建模途径

三维模型用点在三维空间的集合表示,由各种几何元素,如三角形、线、曲面等连接的已知数据(点和其他信息)的集合。3D建模实际上是对产品进行数字化描述和定义的一个过程。产品的3D建模有三种主要途径:

第一种是根据设计者的数据、草图、照片、工程图纸等信息在计

计算机上人工构建三维模型,常被称为正向设计。

第二种是在对已有产品(样品或模型)进行三维扫描或自动测量再由计算机生成三维模型。这是一种自动化的建模方式,常被称为逆向工程或反求设计。两种建模途径如图 3-1 所示。

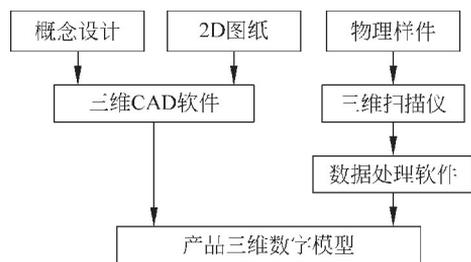


图 3-1 正向和逆向三维建模

第三种是以建立的专用算法(过程建模)生成模型,主要针对不规则几何形体及自然景物的建模,用分形几何描述(通常以一个过程和相应的控制参数描述)。例如用一些控制参数和一个生成规则描述的植物模型,通常生成模型的存在形式是一个数据文件和一段代码(动态表示),包括随机插值模型、迭代函数系统、L 系统、粒子系统、动力系统。

三维建模过程也称为几何造型,几何造型就是用一套专门的数据结构来描述产品几何形体,供计算机进行识别和信息处理。几何造型的主要内容是:

- ◇ 形体输入,即把形体从用户格式转换成计算机内部格式;
- ◇ 形体数据的存储和管理;
- ◇ 形体控制,如对几何形体进行平移、缩放、旋转等几何变换;
- ◇ 形体修改,如应用集合运算、欧拉运算、有理样条等操作实现对形体局部或整体修改;
- ◇ 形体分析,如形体的容差分析、物质特性分析、曲率半径分析等;
- ◇ 形体显示,如消隐、光照、颜色的控制等;
- ◇ 建立形体的属性及其有关参数的结构化数据库。

在计算机内部,模型的数学表示基于点、线、面。点表示三维物体表面的采样点,线表示点之间的连接关系,面表示以物体表面离散片体逼近或近似真实表面。点、线、面的集合就构成了形体。形体有两大几何属性需要进行数字化定义。一是产品形体的几何信息,即点、线、面几何元素在欧氏空间中的数量和大小度量;另一个是拓扑信息,即用来表示几何元素之间的连接关系的信息。

这里要注意,平时经常讲的图形实际上是三维模型的一个具体可见的图像,是人们所看到的模型的表征,不能把图形与图像混为一谈。在三维空间,描述的是几何形体和几何曲面图像,只有在平面上,它才是人们通常所称的图形。

3.1.2 3D 模型的计算机表示

人们希望能够有一种统一的方法来处理几何形状。但目前的情况是,对于处理平面和简单曲面组合成的三维规则几何形状和像汽车车身那样的复杂形状分别采用不同的处理方法。前者称为实体模型,后者称为曲线/曲面模型,将两者组合起来就可制作出各种各样产品的几何模型。可用于三维打印的 3D 模型可分为两大类。

(1) 实体模型:这种模型用来定义具有体积或质量性质的物体(如汽车的零件、人造骨骼)。实体模型主要用于工业制造和建筑业,用于需要表示内外几何结构、装配和加工、非可

可视化或可视化的数值模拟仿真,以及部分需要可视化渲染的场合。

(2) 面体模型: 此类模型定义设计对象的表面或边界。面体模型像一个无限薄的壳,没有体积和质量,就像鸡蛋可以看作一个实体,但蛋壳可以看作是一个椭球面体模型,从视觉感知上用蛋壳也可以表示鸡蛋。稍复杂些的曲面模型(如图 3-2 中的剃须刀外壳)可能是由多个曲面拼接而成的。从技术上看在计算机内部这类模型比实体模型容易实现,所以几乎所有游戏和电影中使用的三维模型都是面体模型。简单的曲面模型可直接用数学曲面公式建立,复杂而精确的自由曲面需要使用参数化的样条拟合方式构建,复杂而精确度不高的可以采用多边形网格方式建模。

三维模型的应用场合不同,需要采用不同的建模技术。需要精确配合的场合如机器零件需要用实体模型和曲面模型;不需要精确的场合如游戏、动漫等环境中,可能只需要满足光照处理、纹理映射等视觉效果,往往采用多边形网格模型来近似表示物体,模型的精度由多边形网格的数量决定。

例如,图 3-2 显示了三种表示方式(从左至右分别为实体、曲面和多边形网格)模型,可以总结出实体模型和面体模型的不同应用场合。

实体模型:

- ◇ 主要关注模型的结构、几何精度、性能属性,美学方面仅是兼顾;
- ◇ 模型的几何尺寸可以参数化关联;
- ◇ 所有几何特征可以以树状结构呈现,设计历史可回溯;
- ◇ 具备物理属性,可以实现功能、性能仿真(如有限元分析)。

曲面和多边形网格模型:

- ◇ 主要关注模型外形、美学和人机工学,模型精度不是主要问题;
- ◇ 从点、线、面开始构建,无物理属性;
- ◇ 常用逆向工程依靠 3D 扫描数据构建;
- ◇ 需要和实体模型混合使用。



图 3-2 实体、曲面和多边形网格模型示例

3.2 3D 建模方法

三维模型的要解决两个问题:一是几何形体在数学上的抽象表示,二是几何形体在计算机内部的数据结构如何正确地显示出来。早期的三维建模主要解决产品的几何形体定义,包括几何信息和拓扑信息两类,后来随着 CAD/CAM 技术的发展,产品三维模型还要

能表示反映加工制造属性的特征信息,即产品三维模型要能表征下列信息:

(1) 几何信息:规定了形体要素(点、线、面)的数量、尺寸、位置和方向特性,例如组成曲线各个型值点的坐标值、切矢等;

(2) 拓扑信息:规定了形体要素之间的邻接关系或结构关系,例如曲线间的线邻接关系、曲线型值点之间的点邻接关系、各个局部表面之间的点邻接与线邻接关系等;

(3) 特征信息:规定了形体要素的加工、材料、物理属性等信息,目的是为CAM和CAE提供数据支持。

具体来说,和三维打印关系较为密切的建模方法主要有线框建模、曲面建模、实体建模和多边形建模。

3.2.1 线框建模

线框建模(Wire Frame Modeling)是利用基本线素来定义设计目标的棱线部分从而构成的立体框架图。作为在计算机内构成三维立体的表示方法,像借用金属丝框架来描述几何形状那样将棱线、轮廓线、交线等表示立体形状特征的线作为形状参数来表示三维立体,是比较容易理解的。这种模型被称为线框模型(Wire Frame Model),是最早用于实际、并且现在仍然应用较广的一种三维几何模型。

以立方体为例,其线框模型的数据内容如图3-3所示。首先要在计算机内设定 x 、 y 、 z 轴,为了表示立方体的几何位置,将所有的顶点坐标列入顶点表。其次,为了表示形状特征,将棱线的顶点和所构成的棱线列入棱线表。有了这些数据,计算机就很容易在显示器上显示出线框图形。

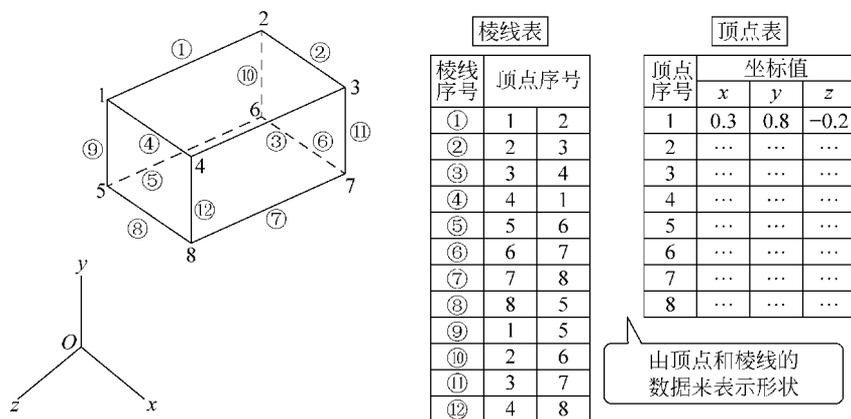


图 3-3 线框模型数据结构

因为线框模型的数据结构简单,所以具有计算机处理速度快的特点。但是,用线框模型表示的立体在计算机内是用与线相关的信息来表示的,表示形状特征的信息不够充分。例如图3-3中线的集合能够使人们联想出立方体,但是对于计算机来说,只不过是空洞的线的集合,因此,要利用这种模型来求体积、重量等质量参数或者进行隐线消除,都是无法实现的。此外,如图3-4(a)所示,利用顶点和棱线表示的这种模型要表现由柱面、平面构成的圆柱立体比较困难,必须采用图3-4(b)和图3-4(c)所示的辅助线来表示。

如上所述,用线框模型描述空间实体,表达的信息不够完整,但对于某些应用还是很有价值的,特别是处理速度快这一特点,使其在不能使用高性能计算机的情况下充分显示出优越性。若需要在计算机内建立曲面模型,线框模型也是必不可少的基础性工作。

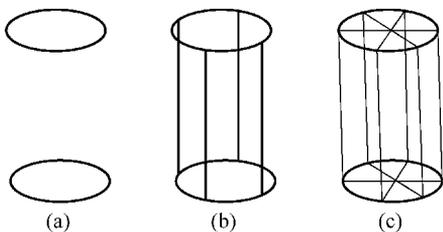


图 3-4 圆柱体线框表示

3.2.2 曲面建模

曲面建模(Surface Modeling)是计算机图形学和计算机辅助设计中最活跃和关键的学科分支之一,是 CAD 系统的一个重要组成部分。它主要研究在计算机系统的环境下对曲面的表示、设计、显示和分析。曲面建模技术的研究领域包括曲面表示、曲面求交、曲面拼接、曲面变形、曲面重建、曲面简化以及曲面转换等。曲线/曲面建模技术经历了两个阶段:第一阶段是针对用解析几何函数表示的规则表面如抛物面、球面、双曲面等;第二阶段是针对难以用数学解析式表达的曲线/曲面,称为自由曲线/曲面,其中曲面表示是曲面建模中的基础和核心问题。为了既适合计算机处理,又能有效地满足几何设计要求,曲线/曲面需要用数学模型来表示,分为参数化表示和非参数化表示,非参数化表示又分为显式表示和隐式表示。

1. 曲面模型的非参数化表示

对于一个平面曲线,显式表示一般形式是 $y=f(x)$ 。方程中,一个 x 值与一个 y 值对应,所以显式方程不能表示封闭或多值曲线。例如,不能用显式方程表示一个圆。同理,对于一个曲面,其显示形式为 $z=f(x,y)$,在此方程中,一个 z 值与一组 (x,y) 值对应。

如果一个平面曲线方程表示成 $f(x,y)=0$ 的形式,一个曲面表示成 $f(x,y,z)=0$ 的形式,我们称为隐式表示。当函数 f 是多项式时,该隐式曲面也称为代数曲面。隐式表示的优点是:易于判断函数 $f(x,y)$ 或者 $f(x,y,z)$ 是否大于、小于或等于零,也就易于判断一个点是落在所表示的曲线/曲面上还是在曲线/曲面的内侧或外侧;隐式曲面表达形式紧凑,具有几何运算的封闭性,而且任何参数或者隐式曲面之间进行求交、等距操作等几何运算的结果均可表示成隐式形式,大大方便了曲面造型系统的统一设计;工程中许多常用的曲面,例如球面、柱面、平面及环面等都很容易由隐式函数来定义;隐式曲面有更多的自由度可以用于曲面控制,同时在构造复杂曲面的时候可以获得更高的光顺度,可以有更多的形状控制方法。

对于非参数表示形式的方程(无论是显式的还是隐式的)存在下述问题:①与坐标轴相关;②可能会出现多值的情况(如圆: $x^2+y^2=r^2$);③会出现斜率为无穷大的情形(如 $y=mx+b$,垂线情况);④对于非平面曲线/曲面,难以用常系数的非参数化函数表示;⑤编程困难。

2. 曲面模型参数化表示

在几何造型系统中,曲线/曲面方程通常表示成参数形式,即曲线上任一点的坐标均表示成给定参数的函数。空间一条曲线可以表示成随参数 t 变化的运动点的轨迹,其矢量函

数为

$$P(t) = [x(t), y(t), z(t)], \quad t \in [0, 1]$$

如最简单的参数曲线是直线段,端点为 P_1, P_2 的直线段参数方程可表示为

$$P(t) = P_1 + (P_2 - P_1)t, \quad t \in [0, 1]$$

再如圆在计算机图形中应用十分广泛,显式表示为 $y = \sqrt{1-x^2}$ ($0 \leq x \leq 1$),其参数形式可表示为

$$p(t) = \left[\frac{1-t^2}{1+t^2}, \frac{2t}{1+t^2} \right], \quad t \in [0, 1]$$

同理,空间中一个曲面可用参数 (u, v) 表示为 $P(u, v) = P(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$, 参数 (u, v) 在 $[0, 1]$ 范围内变化, $P(u, v)$ 称为单位正方域上的参数曲面,其中 $x(u, v), y(u, v), z(u, v)$ 分别为 u, v 的显式函数,即

$$x = x(u, v)$$

$$y = y(u, v)$$

$$z = z(u, v)$$

参数方程在曲线/曲面的表示上有很多的优越性,主要表现在: ①具有几何不变性; ②可以处理无穷大的斜率; ③对曲线/曲面进行变换时,可以直接进行参数方程的集合变换,而不需要像非参数方程表示的曲线/曲面那样需要对所有点均进行变换; ④参数方程将自变量和因变量分开,使得参数的变化对各因变量的影响可以明显地表示出来,同时也容易把低维空间中的曲线/曲面扩展到高维空间中去; ⑤规格化的参数变量 $t \in [0, 1]$ 使得相应的几何分量是有界限的,不需要另外再设其他数据来定义边界; ⑥易于用矢量和矩阵运算,从而简化计算。

3. 常见曲面造型的形式

(1) 平面: 由三点(或数条共面的边界曲线)定义的面。

(2) 用初等函数描述几何形状的面: 如球面、圆锥面等。

(3) 直纹面(Ruled Surface): 一条直线的两端点沿两条导线分别匀速移动,其直线的轨迹所形成的面。其中,导线由两条不同的空间曲线组成。

(4) 旋转面(Surface of Revolution): 由平面的线框图绕轴线旋转所形成的曲面,此曲面可以构造车削类加工的零件。

(5) 柱状面(Tabulated Cylinder): 由一平面曲线沿一条不共面的直线移动一定距离而生成的曲面。该曲面具有相同的截面,有些 CAD 软件将此种面称为牵引面(Draft)。

(6) 孔斯面(Coons): 由封闭的边界曲线构成,边界曲线为孔斯曲线,其曲面光滑。

(7) 圆角面(Fillet Surface): 为两个曲面间的过渡曲面,此曲面要求光滑过渡。

(8) Bezier 曲面: 是以 Bezier 空间参数函数为基础、用逼近的方法形成的光滑曲面。该曲面通过参数函数的特征多边形的起点与终点,但不通过中间点,而是由这些点来控制。如图 3-5(a)所示的 Bezier 曲面中,红点表示控制点,蓝线表示控制格,其余是拟合曲面。

(9) B 样条曲面: 是以 B 样条函数为基础、用逼近的方法所形成的光滑曲面。任意空间曲面都可以看成无数点的集合。如图 3-5(b)所示,在 v 方向任意截面上选择 $M + 1$ 个点为特征顶点,用最小二乘逼近法可生成一条曲线,即 B 样条曲线。同样,在 v 方向的不同截面

上可生成一组 $(N + 1)$ 条 B 样条曲线,以同样方法在 u 方向的不同截面也生成一组 $(M+1)$ 条 B 样条曲线。两组 B 样条曲线的直积可求得 B 样条曲面,即为任意复杂的空间曲面。该曲面的性能较 Bezier 曲面好,主要在于 B 样条曲面控制点是局部的而非全局的,改变局部控制点只是影响局部曲面形状。

(10) NURBS 曲面(如图 3-5(c)所示): NURBS 是 Non-Uniform Rational B-Splines 的缩写,是“非统一有理 B 样条”的意思。具体解释是: Non-Uniform(非统一)——是指一个控制顶点的影响力的权重能够改变,当创建一个不规则曲面的时候这一点非常有用; Rational(有理)——是指每个 NURBS 物体都可以用数学表达式来定义,它是以 NURBS 参数方程来描述的空间曲面。简单地说, NURBS 就是专门做曲面物体的一种造型方法。NURBS 造型总是由曲线和曲面来定义,所以要在 NURBS 表面生成一条有棱角的边是很困难的。就是因为这一特点,可以用它做出各种复杂的曲面造型和表现特殊的效果,如人或动物身体、皮肤、面貌或流线型的汽车、飞机、太空飞船等。其特点是: 它用这种参数方程既能描述自由型曲面(如 Bezier 曲面与 B 样条曲面),也能精确表示用初等函数所描述的曲面(如圆柱面、圆锥面、球面等)。

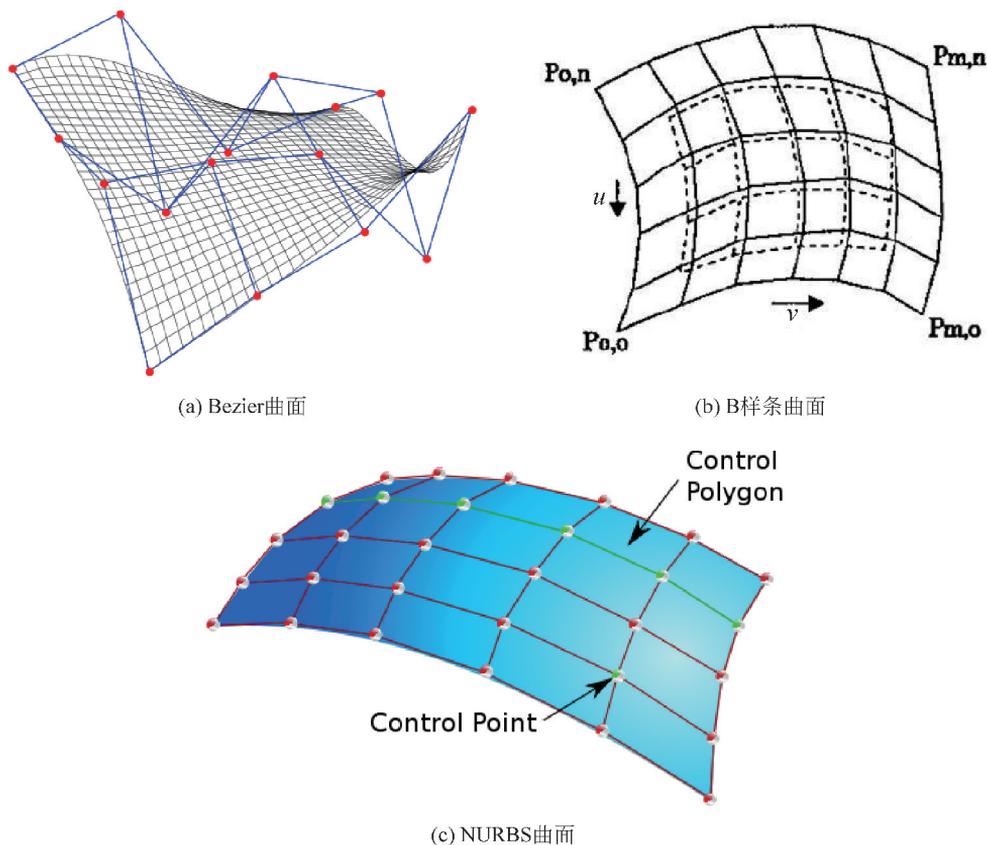


图 3-5 参数化空间自由曲面

其中(8)至(10)项为高级自由曲面。需要指出的是,对于一个实体而言,可以用不同的曲面造型方法来构成相同的曲面。例如,在数控加工时用哪一种方法产生的模型更好,一般

用两个标准来衡量：

- ◇ 看哪种方法更能准确体现设计者的设计思想和设计原则；
- ◇ 看用哪种方法产生的模型能够准确、快速、方便地产生数控刀具轨迹，即更好地为CAM、CAE服务。

4. 曲面建模的特点

曲面建模有以下优点：

- (1) 在描述三维实体信息方面比线框造型完整、严密，能够构造出复杂的曲面，如汽车车身、飞机表面、模具外形等。
- (2) 可以对实体表面进行消隐、着色显示，也能够计算表面积。
- (3) 可以利用几何造型中的基本数据进行有限元网格划分，以便进行有限元分析，或利用有限元网格划分的数据进行表面建模。
- (4) 可以利用表面造型生成的几何数据自动生成数控加工轨迹。

同样，曲面建模方法也有缺点：

- (1) 曲面建模理论严谨、复杂，故建模系统使用较复杂，需要具备一定的曲面数学理论及应用方面的知识。
- (2) 曲面建模虽然有了面的信息，但缺乏实体内部信息，故有时会产生对实体理解的二义性。例如对一个圆柱曲面，它是一个实体轴的面呢，还是一个空心孔的面呢？无法区分其工艺意义。

3.2.3 曲线/曲面的光顺性评价

曲线/曲面的光顺(Fairing)是指消除曲线/曲面外形的不规则性以得到更光滑形状的CAD数据处理方法。曲线/曲面的光顺性评价已成为产品设计中一个重要指标，如果曲面不光顺，不但影响设计外观，同时可能还会引起数控加工或3D打印的困难。如图3-6所示，对光顺性的评价主要有以下几个指标：

(1) **曲率梳(Curvature Comb)** 曲线各点处曲率矢量的表示，通过它可以直观地评价曲线光顺的情况，也可以用于指导用户对曲线光顺性进行微调。

(2) **G0连续(G0 Continuity)** 零阶几何连续，亦称位置连续，指两曲线具有公共的连接点或两曲面具有公共的连接线。两曲线或曲面只是在连接点或连接线重合，而在连接处

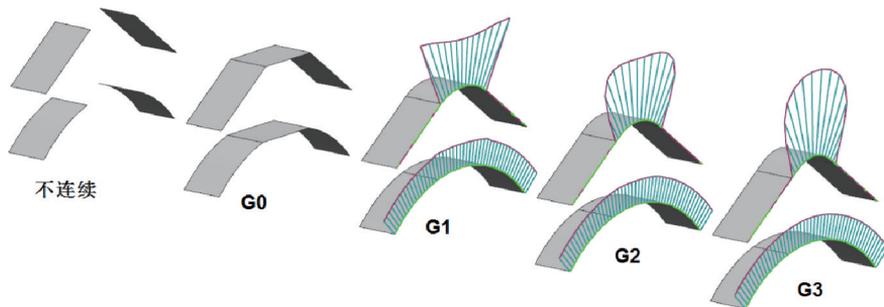


图 3-6 光顺性评价

的切线方向和曲率不一致。这种连续的表面看起来会有一个很尖锐的接缝,属于连续性中等级最低的一种。数学解释:曲线或任意平面与该曲面的交线处处连续。

(3) **G1 连续(G1 Continuity)** 一阶几何连续,亦称切矢连续,指两曲线不仅在连接点处重合,而且在此点有一致的切矢方向;而对于两曲面指在连接处具有公共的切平面或公共的曲面法线。这种连续性表面不会有尖锐的连接缝,但是由于表面连接处可能存在曲率的突变,在曲面外形视觉效果上不够满意。数学解释:曲线或任意平面与该曲面的交线处处连续,且一阶导数连续。

(4) **G2 连续(G2 Continuity)** 二阶几何连续,亦称曲率连续,指两曲线在连接点处具有相同的曲率或是两曲面沿公共连接线处具有一致的法向矢量。其条件是,当且仅当两曲面沿它们的公共连接线处具有公共的切平面,又具有公共主曲率及在两个主曲率不相等时具有公共的法矢方向。这种曲面连接处表面没有尖锐的接缝,也没有曲率突变,视觉效果光滑流畅。曲率连续是制作光滑表面的最低要求,也是制作 A 级曲面的最低要求。数学解释:曲线或任意平面与该曲面的交线处处连续,且二阶导数连续。

(5) **G3 连续(G3 Continuity)** 三阶几何连续,亦称相切连续,是指曲面或曲线点点连续,并且其曲率曲线或曲率曲面分析结果为相切连续。判定方法:对曲线做曲率分析,曲率曲线连续,且平滑无尖角。一般场合对 G3 连续比较少用到。

(6) **A 级曲面(Class A Surface)** Class A 术语最早是由法国 Dassault System 公司在开发 Catia 软件时针对汽车车身覆盖件、仪表板、汽车内饰件等面的光顺性提出的专用术语。A 级曲面在产品几何造型设计上没有一个确切的定义,在日常工作中 A 级曲面产品指既满足几何光顺要求,又满足审美要求的一类高质量曲面。其技术要求可以归结为如下 4 点:

- ◇ 必须是 G2 连续曲面;
- ◇ 曲面的特征网格线必须均匀、合理分布,最好在某一投影面上以矩形方式分布;
- ◇ 在曲面的特征网格节点上表示曲面曲率方向的箭头指向应一致;
- ◇ 两相邻曲面在与两曲面相接线的垂直方向,两曲面的阶数应一致,这样在曲面匹配处理后,不会产生不必要的扭曲变形。

3.2.4 实体建模

实体建模(Solid Modeling)是在曲面建模的基础上,加入了曲面的某一侧存在实体的信息,较为完整地表达了零件或产品的信息。

这种信息的表达方法也较多,常用方法是用有向棱边的右手法则确定所在面的外法线,即右手 4 指的指向和模型有向棱边方向一致时,大拇指所指就是模型表面外法线的方向,其内部为实体,外法线所指为空。这种实体造型方法与曲面造型不同之处有二:一是面的信息由有向线构成;二是加入了表面的外法线矢量信息。

对于实体造型的信息与线框建模、曲面建模的信息不同,在计算机内部不再只是点、线、面的信息,还要记录实体的体信息。计算机内部表示的三维实体模型的方法有很多,并且还不断有新的方法出现。常见的方法有:实体几何构造法、边界表示法、混合表示法、空间单元表示法等。

1. 边界表示法

边界表示法(Boundary Representation)简称 B-Rep 法,它的基本思想是:一个实体的边界是面,即由“面”或“片”的子集表示;表面的边界是边,可用“边”的子集表示;边的边界是顶点,即由顶点的子集表示(如图 3-7 所示)。此方法优点是:

- ◇ 在 CAD/CAM 集成环境下,采用边界表示法建立三维实体的数据模型,有利于生成和绘制线框图、投影图。
- ◇ 有利于计算几何特性。
- ◇ 有利于与二维绘图功能衔接,生成工程图。

边界表示法也有其缺点:

- ◇ 由于它的核心是面,因而对几何物体的整体的描述能力相对较差,无法提供关于实体生成过程的信息。例如一个三维物体最初是由哪些基本体素,经过哪种集合运算拼合而成的。
- ◇ 无法记录组成几何体的基本体素的原始数据。

另外要注意边界模型和曲面模型的区别:边界模型的表面必须封闭,有内外之分,各个表面间有严格的拓扑关系,从而构成一个整体;而曲面模型的表面可以不封闭,且不能通过面来判断形体的内外部。

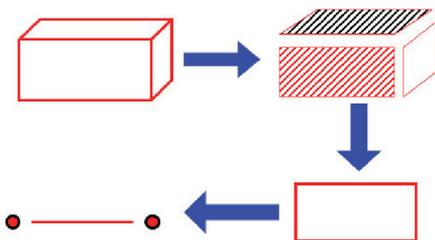


图 3-7 B-Rep 表示示意图

2. 实体几何构造法

实体几何构造法(Constructive Solid Geometry, CSG)是一种用简单的体素拼合复杂实体的描述方法。机械零件的几何形状多数是由诸如立方体和圆柱体等简单几何形体组合而成的,因此,若事先在计算机内定义出基本的立体形状,就能够利用立体的组合表示各种复杂的几何形体。利用这种思路定义实体造型的方法就是实体几何构造法(CSG),也称体素构造法,这时所采用的基本立体形状称为体素(或体元),如图 3-8 中的立方体、圆柱体、球体都是基本体素。用 CSG 造型的过程就是对基本体素进行几何形状的和(Union)、差(Difference)、交(Intersection)布尔运算(见图 3-8(a)的运算符号与示意图)。图 3-8(b)说明由圆柱和球这两种基本体素利用和、差布尔运算得到零件的过程。

除了布尔逻辑运算外,CAD 零件造型还涉及几何体素在空间坐标系的位置关系,图 3-8(b)所示的造型过程显然要对体素进行移动(Move)、旋转(Rotation)等操作才能得到最后的几何形体。

定义体素的时候,只要能够将立体所占据的空间与其他空间区分开就可以了。因此,可以在计算机内设定 x 、 y 、 z 轴,建立联立不等式,令满足联立不等式的点为体素内的点(包括边界上的点),其余的点为外部点。图 3-9 就是利用这种方法定义圆柱体的例子。圆柱体内部以及边界上的点满足图中所给出的联立不等式。在给出体素时,为了使大小、角度等能够自由变化,一般采用参数的形式来表示。

CSG 造型方法与机械装配的方式非常类似,从定义体素到拼合实体的过程,正如先设计零部件,再将其装配成产品的过程。这种方法简洁,生成速度快,处理方便,数据冗余少,