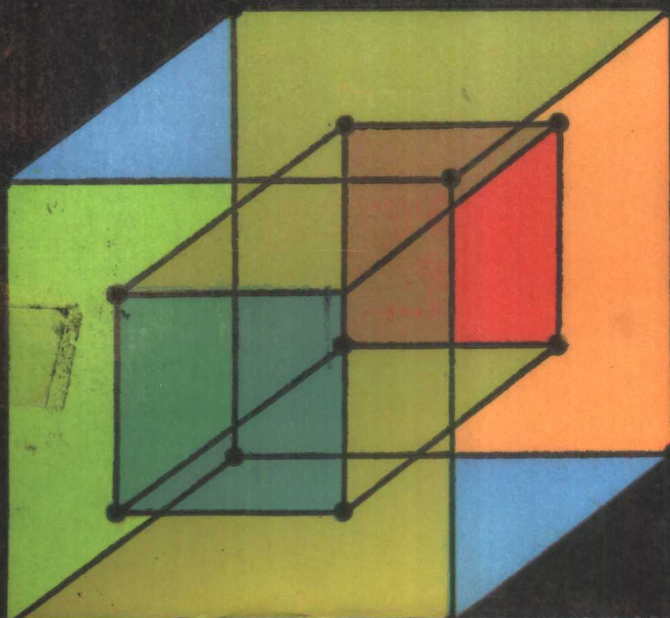


实体造型技术

SHITI ZAOXING JISHU
SHITI ZAOXING JISHU

欧阳春梅 丁秋林 林奋强 肖均祥

韩 伟 林支宇 编译



实体造型技术

欧阳春梅 丁秋林 林奋强
肖均祥 韩伟 林支宇 编译

国防工业出版社

(京)新登字106号

内 容 简 介

本书的编者以简明流畅的语言向读者介绍了实体造型技术的理论及其应用。

目前我国在此项技术上已取得可喜的成就。编者从切身的体会出发,在占有丰富材料的基础上,系统地讲述了实体造型技术的概念及历史;几种实体模型的表示方法及必要的数学知识;已作为商品出售的实体造型系统情况,及对其选择和测试的有关问题。

本书最后对实体造型技术的前景作了恰如其分的估计。

本书对高等院校及研究单位从事 CAD/CAM 技术的师生、研究人员以及负责 CAD/CAM 技术发展和应用决策的人员都将是一本有价值的参考书。

实体造型技术

欧阳春梅 丁秋林 林奇强 编译
肖均祥 韩 伟 林文宇
责任编辑 宋桂珍

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 9¹/₈ 印张 238千字

1991年11月第一版 1991年11月北京第一次印刷 印数0-001—1 200册

ISBN 7-118-00790-0/TH·58 定价: 8.30元

代 序

实体造型是近二十年发展起来的一种新的几何造型技术。它在表示三维物体方面具有无可置疑的优点——能完整且无二义性地表示物体，在机械工程的许多领域，如产品设计与布局、分析与测试、产品制造、工程管理乃至文档编写等方面得到日益广泛的应用，因而受到了机械制造业及其他有关行业越来越多的重视，具有实体造型能力的 CAD/CAM 系统正陆续涌入市场。预计到 90 年代，实体造型技术有可能为多数机械行业所接纳，从而使传统的几何物体表示方法发生根本性变化。实体造型将成为 90 年代制造技术——CIM（集成化制造技术）的基本支柱技术。

我国在 70 年代后期开展了实体造型技术的研究工作，取得了许多令人鼓舞的成果，但遗憾的是，至今国内尚未出版过一本系统介绍实体造型理论及应用的书籍。这在一定程度上影响了此项技术的普及推广。本书正是为了促进实体造型技术的研究与应用，为了培养这方面的研究人才而编写的。

本书由三个部分组成。第一章以浓缩的笔法对实体造型的概念、历史、应用、前景以及系统配置作了简明介绍。对于初学者，它是必读之物。对于那些负责 CAD/CAM 技术发展和应用决策的负责同志，也是值得一读的。第二章到第四章以及作为附录的第八章。主要是为从事实体造型技术研究及 CAD/CAM 系统的开发人员写的，为他们提供了必要的数学知识，详细介绍了实体模型的几种表示方法和性质。第五章到第七章则主要是为 CAD/CAM 的用户写的，介绍了几种已作为商品出售的有影响的实体造型系统，告诉他们如何选择实体造型系统和进行测试。此外，本书对这一技术的前景，也作了恰如其分的估计。本书对高等学校学习 CAD/CAM 技术的学生无疑也是一本系统、完整的教材

或参考书。

相信,本书的出版将对实体造型技术的普及和应用作出贡献。

曾在联邦德国参加“CADEMAS”●合作项目的同志们,对本书的编写给予了热情的支持,对此谨表示编者和我本人的谢意。

北京航空工艺研究所 研究员级高工

李声远

● “CADEMAS”系原航空部与联邦德国MBB公司合作开发的“计算机辅助设计、工程分析、制造与产品支持”软件系统的英文名称首字母缩写词。

前 言

实体造型 (Solid Modeling) 是一种先进的计算机辅助设计方法, 能设计出完整的产品实体模型。随着计算机应用的日益广泛, 机械制造业中设计方法正经历着深刻的变革, 从手工绘图, 经过二维计算机绘图、三维线架系统和曲面造型, 一直发展到今日的实体造型, 形成了五代设计方法并存的局面。经过多年的研究和发展, 实体造型技术已奠定了相当坚实的理论基础, 日臻成熟完善。实体造型应用十分广泛, 几乎涉及工程设计的各个方面, 如工程总体布局和详图设计、结构静态分析、有限元计算、干涉检查、工艺规程设计、数控编程、工程文件编制以及工程管理等。

实体造型在计算机辅助设计和制造系统中占有重要地位, 是该系统的核心内容之一。它也是工程设计和制造过程实现集成化的重要基础。微型计算机技术的发展, 特别是近年 32 位微机的发展为实体造型的应用推广开创了宽广而良好的硬件环境。

目前, 在我国, 不仅一些大型公司和厂矿企业引进了含有实体造型在内的 CAD/CAM 系统, 而且中小企业也踊跃涉足于这个领域, 以进行企业的技术改造, 提高自己产品在国际和国内市场上的竞争能力。

为了配合实体造型技术的应用推广, 我们编写了此书。本书是一部集体劳动成果, 主要执笔人为丁秋林、欧阳春梅、林奋强和于小葆等。全书由丁秋林、肖均祥、韩伟和林支宇等审校。航空航天部周正寅对本书的出版给予大力关怀和支持, 特此深表谢意。

—编者—

目 录

第一章 实体造型概论	1
§ 1-1 什么是实体造型	1
§ 1-2 实体造型的历史	9
§ 1-3 实体造型在工程中的应用	11
§ 1-4 实体造型系统的配置	22
第二章 实体造型基础	28
§ 2-1 引言	28
§ 2-2 闭路拓扑原理	29
§ 2-3 分片平曲面的拓扑原理	41
§ 2-4 封闭曲面的拓扑原理	52
§ 2-5 边界的一般概念	53
§ 2-6 集合论	56
§ 2-7 布尔运算符	60
§ 2-8 集成员的分类	72
§ 2-9 欧拉运算符	78
§ 2-10 规范化造型准则	85
第三章 实体模型的构造	90
§ 3-1 引言	90
§ 3-2 以图为基础的模型	90
§ 3-3 布尔模型	97
§ 3-4 实体几何构造表示法 (CSG法)	105
§ 3-5 边界表示法 (BR法)	116
§ 3-6 单元分解和空间分割表示法	125
§ 3-7 扫描表示法	129
§ 3-8 引例和参数表示法	134
§ 3-9 线架表示法	138
§ 3-10 表示法的比较	141

§ 3-11	实体模型的建立	143
第四章	实体模型的整体性质	151
§ 4-1	表示方法—相关法	151
§ 4-2	Timmer-Stern	155
§ 4-3	基于点分类的空间再细分法	161
§ 4-4	基于单元分类的块分解法	162
第五章	实体造型系统	164
§ 5-1	商品化实体造型系统	167
§ 5-2	其他实体造型系统	221
第六章	实体造型系统的选择	225
§ 6-1	TARGET-1 系统	225
§ 6-2	实体造型系统的 Benchmark 测试法	237
第七章	实体造型系统的前景	247
§ 7-1	现状	247
§ 7-2	硬件和软件的预测	249
§ 7-3	完全接受实体造型	256
§ 7-4	实体造型系统的实际应用	257
第八章	实体模型的三参数表示 (附录)	259
§ 8-1	代数形式和几何形式	261
§ 8-2	切矢和扭矢	270
§ 8-3	实体的参数空间	272
§ 8-4	连续性和组合实体	273
§ 8-5	实体中的曲线和曲面	274
§ 8-6	具有不规则边界的实体	277
§ 8-7	规范的符号格式和高维元素	278
§ 8-8	元素构造	281

第一章 实体造型概论

我们可以设想有这样的公司或工厂：其整个产品的设计都能以实体模型的组合件方式存储于计算机中，所有工程和制造部门工作人员均能方便地从图形工作站网络存取这些信息。外购件目录不再是一些清单，而是数据库信息，其中标明了所需的全部几何和功能特性。制造部门的人员在工作站旁边，就可以看到逼真的装配件彩色图像，可以要求远在 30 m 甚至 100 km 以外的工程设计部门的人员对工程设计进行修改。工程部门的人员可重新修改存储在数据库中的实体模型，核算修改后的设计，更新零件数据库，并在几小时、甚至几分钟内就能通知制造部门的人员，他们所要求的设计修改业已完成。

尽管这种设想似乎有些神奇，但实现它已为期不远，因为实现此设想所需的关键技术——实体造型技术目前已经成熟。实体造型技术就是我们走向所憧憬的公司或工厂的阶石。

§ 1-1 什么是实体造型

实体造型是几何造型中一个新的重要领域，是几何学发展到现在与当代计算机强大功能相结合的先进技术。

实体造型 (Solid Modeling) 这一术语是实现三维几何实体完整信息表示的理论、技术和系统的整体概括。通过这种完整的、无二义性的三维几何实体的表示，至少原则上可以自动地算出，被表示物体的任何有效定义了的几何特性。迅速发展的实体造型技术正使得 CAD/CAM 中的“A”字不仅仅表示“Aided”或“Assisted”（辅助），而且具有“Automated”（自动）的含义。

由此可见，实体造型的最显著特点就是所表示物体的完整性和无二义性。换言之，能完整且无二义性地表示物体即为实体造

型的显著特点。要弄清什么是实体造型，有必要了解物体的完整的、无二义性的表示方法。这里只简单介绍一下目前系统中常用的三种表示方法，在第三章将作详细介绍。

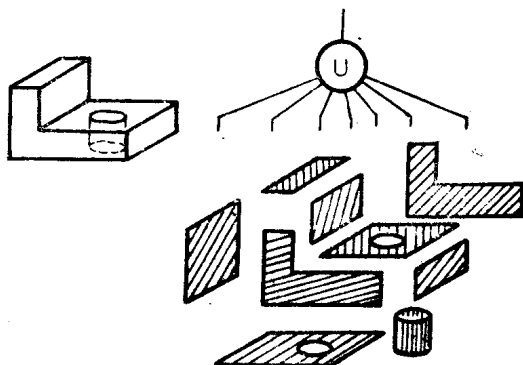


图1-1 边界表示

图1-1所示为用实体边界（笼统地说，即封闭曲面）表示实体的方法（Boundary Representation），简称BR表示方法。实体的边界通常是由面的并集来表示。而每个面又由它所在的曲面的定义数据加上其边界来表示（面的边界看起来仍是边的并集）。

边界表示可视为线架表示的拓广，它是计算机图形界最成熟的无二义性表示法。由于要满足详尽的尺寸和组合要求，用人工来构造正确的边界表示则很困难、很繁琐。因此，采用了边界表示法的那些系统通常都是采用转换算法，即通过其他表示方法来建立边界表示。

图1-2所示为实体几何构造表示法（Constructive Solid Geometry），简称CSG表示法。其基本思想是：用简单实体的各种有序的“加”和“减”，通过布尔集算子——并、差、交来表示复杂的实体。图中最简单的实体——长方体和圆柱，就是有界的基本体素。有些CSG法还可采用半空间（half space）作为最简单的实体。例如，图1-2中的方法是用六个平面半空间的正交来表示。基本体素如有界的，则构造有效的CSG表示就容易；如是半空间，则必须检查合成物体的有界性。

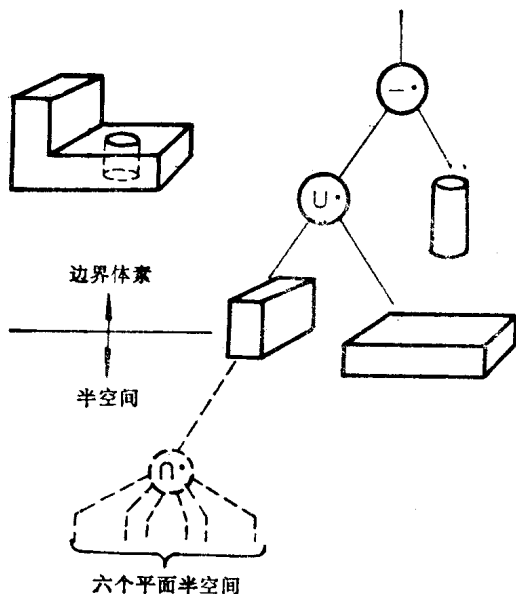


图1-2 实体几何构造法

第三种无二义性而又常用的方法称为扫描表示法。其基本思想是：将“实体”的点集表示成一个“区域集”和一个“轨迹集”的笛卡儿乘积。从而可以直观地看到，区域集在沿轨迹集移动的同时，将所表示的实体扫描出来。图 1-3(a)所示即是平移扫描出的物体，旋转扫描可以产生旋转对称的物体。图 1-1 和图 1-2 所描述的物体不能由简单的扫描表示。因此，有些系统具有混合表示手段，即扫描和集运算的组合，称为“粘结” (gluing)，图 1-3(b)便是一例。

构造简单的扫描表示并不难，但其所能描述的物体的范围仅包含呈现平移或旋转对称性的那些物体。各种广义形式的扫描将来可能会覆盖更大的物体范围，但它们又会带来各种数学和计算上的复杂性。

总的说来，在 CAD/CAM 系统中用来表示物体的三维模型通常有三类：线架、曲面和实体模型，见图 1-4。讨论各类模型有助于了解实体造型与其他造型方法的区别及其优越性。

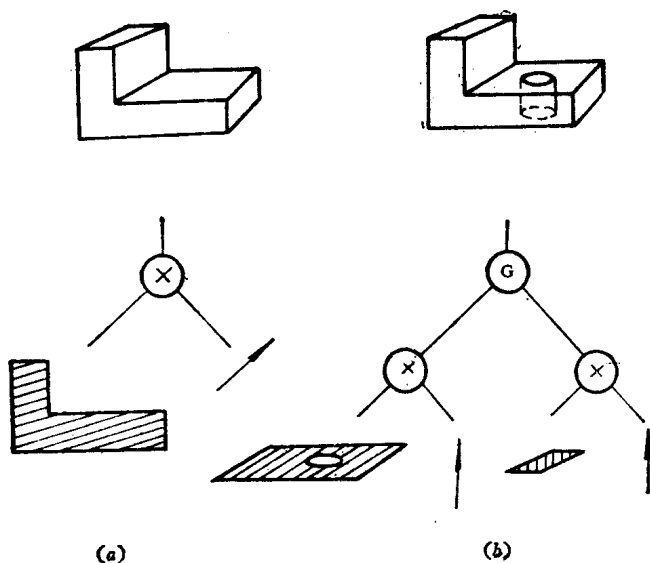


图1-3 扫描表示法

(a) 纯扫描表示法；(b) 混合扫描表示法。

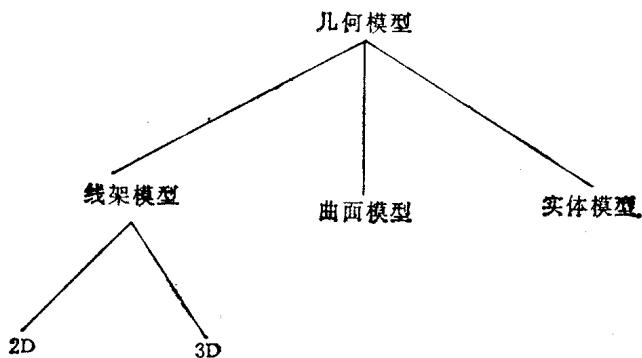


图1-4 几何模型的种类

一、线架模型

三维线架模型是从二维线架模型发展来的。下面首先讨论二维线架模型的局限性。

二维线架模型相当于一张未标注尺寸、不带注释的图样, 据此可以精确地测得坐标和实体大小。二维模型使用的绘图元素有: 点、线、圆弧、椭圆和样条。通常可用多面视图来表示二维线架的零件。但是, 二维线架模型与绘图一样也有许多局限性:

——二义性问题 根据此种模型构造的零件, 需要人工解释。被构造零件的形状不仅与设计信息有关, 而且也与构造该零件的人所作的解释说明有关。

——难以识读和分析 复杂装配件中的零件空间关系难以识别。

——可能含有错误 由于有二义性和解释上的问题, 一个二维模型含有的错误和矛盾连人也不易检查出来, 对计算机就更困难了。因此, 有许多错误都可能发现不了。

三维线架模型所使用的元素都是二维线架元素的三维扩展: 三维点 (x 、 y 、 z); 两点间的直线; 平面上的圆弧和椭圆以及由一系列点拟合而成的样条曲线。对交互式 CAD/CAM 工作站的用户来说, 三维线架模型比二维线架模型更容易理解, 更便于观察。

三维线架模型也称为边-顶点 (edge-Vertex) 模型或棍棒图 (Stick-figure) 模型。它是最简单、也是最常用的模型。这是因为线架模型容易建立, 所需的计算机时间和内存较少, 用 16 位个人计算机就可以完成所需的处理。

虽然三维线架模型大大扩展了 CAD/CAM 系统在机械产品设计中的应用, 但并非十全十美, 主要存在有下列问题:

——覆盖线架的面不是由模型定义的, 而是推理出来的。线架上的包络面往往可用不同的方法来定义, 故会引起二义性。对这种二义性, 人工解释起来并不十分困难, 但计算机处理起来就很困难, 并很可能产生错误。

——不能完整地表示曲面。

——无法保证模型完整和无错误。例如, 可能会丢边或丢面。边或面也可能会穿过实体的截面。图 1-5 所示为这类二义性的

实例。

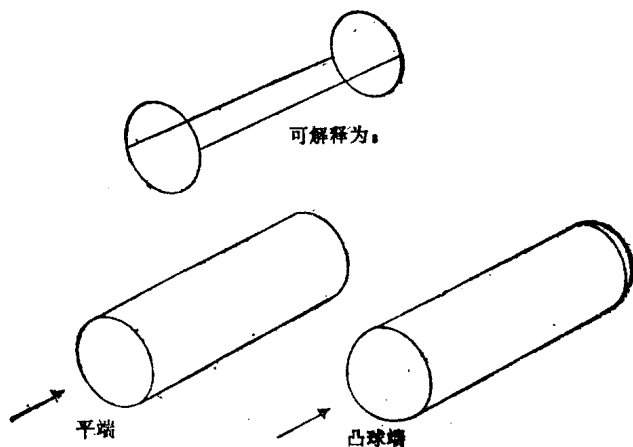


图1-5 三维线架解释中二义性实例

——设计人员通过已定义的边来建立面。确定两面的交线，则要作图或进行计算。只有用户有了使用实体模型的经验以后才会明显地体会到三维线架的这种局限性。

——对模型进行全面修改的命令难以保证始终如一。例如，拼合两个零件或改变一个孔的直径不能用造型命令来实现。

——设计人员用以输入参数（零件尺寸）的方法并非十分有效，但预先定义的“标准”零件则例外。即便如此，参数超过了程序员原定的极限，就可能发生问题。例如，输入的内径尺寸可能大于外径尺寸。结果，设计出来的零件实际上无法加工。

——许多三维线架造型系统缺乏严密性。特别是相邻两线的端点，在逻辑上应重合，但实际上并非如此，这就会给数控加工带来问题。

二、曲面模型

在几何造型中，更高一级的模型是曲面模型，它避免了许多线架模型的二义性。曲面模型可以在线架模型上通过定义曲面来建立。构造曲面模型的过程类似于在框架上覆盖一层薄膜。由于

曲面模型可以精确地定义零件的几何形状，也就是完整地定义零件表面和边界，因而有助于自动生成数控加工指令。

曲面模型在大多数 CAD/CAM 系统中，均可以用多种曲面来构造。平面是最基本的一种，因为它是曲面的简化情况。较复杂的形状可由列表圆柱曲面、直纹曲面、旋转曲面、扫描曲面和圆角过渡曲面来定义。

最复杂的曲面是雕塑曲面，如双三次样条曲面， B -样条曲面和有理曲面等。雕塑曲面上包含有互相交叉的两族曲线，将整张曲面分割成许多曲面块，而这些小曲面块一般又都是相互光滑连接的。

尽管曲面模型表示的只是计算机内存中零件几何形状的包络，然而利用消隐技术，可以很容易地将曲面模型像实体模型一样加以显示。

三维曲面模型在 CAD/CAM 中占有重要地位，能表示那些无法用线架来构造的形体曲面。这些曲面包括外形曲面（如汽车和电话机的外壳表面）和函数曲面（如齿轮和叶片等）。

单是曲面模型并不宜用作表示机械零件的一般方法。例如，零件可能会丢面；两面相交处可能会产生间隙，或可能出现占据零件内部空间的曲面。三维曲面造型系统无法避免这类错误，因而，也不能保证精度。没有精度，高度自动化的应用程序就无从谈起。

曲面模型存在的另一个大问题就是不能有效地处理曲面的不规则区域。试看两管路或两筒体相交这样一个简单的问题，单是曲面模型远不能表示像过渡柱面这样的相关曲面，必须使用像 B -样条这样的高次曲面来逼近或用多个曲面片来表示。

曲面模型实际上并不表示零件的实体特性，因为它并不含有扫描零件内部几何和质量特性的信息，例如，重量、体积和惯性矩等特性。这就限制了曲面模型在工程分析方面的应用。

三、实体模型

在几何造型中，最高级的模型是实体模型。从表面看来实体模型往往类似于经过消除隐藏线的线架模型，或经过消除隐藏面

的曲面模型。但实质上迥然不同。实体模型可以使物体的实体特性在计算机中得到定义。零件在计算机中的表示可以和重心、重量等质量特性联系起来。就预测零件的重量、稳定性、力矩、体积等特性来说，零件模型的质量特性是极其重要的。

实体造型系统是一种交互式计算机图形系统，能为机械零部件设计出完整的实体模型。它具有如下特性：

——是一个全封闭（实体）的三维形体的计算机表示。

——具有完整性和无二义性。其完整性使得单一的模型表示可用于实现所有的 CAD/CAM 任务。其无二义性保证自动完成许多 CAD/CAM 工作。实体模型可用来自动生成逼真图像，便于设计人员观察并与其他设计人员进行通讯。

——保证只对实际上可实现的零件进行造型。

实体模型不会缺边少面，也不会有一条边穿入零件实体，因此，能避免差错和不可能实现的设计。

——提供高级的整体外形定义方法。这可通过布尔运算来完成。对两个外形进行布尔运算，形成一个新的外形。例如，两零件做并运算，即得一个具有两者特征的模型，而两零件做差运算，则得一个孔或凹面等。此外，还采用了一些其他方法，如通过扫描或旋转一个二维截面来形成一个模型，或通过映射（取镜像）或变比来形成一个新的模型。

通过布尔运算和其他方法，可设计出复杂的零部件，也就是说，能生成和修改复杂的零部件，速度快、时间少、且无差错。例如，从一个模型中减去一个钻头形状的实体即可在零件上形成一个复杂的孔，其交线也不需另行校对修改。如果实体造型系统运行正常，则交线肯定正确无误。

再看另一个例子，一个零件若由梁及其连接的两个部分组成，可将梁的模型与另两个部分的模型进行“并”运算，从而获得该零件的模型。同样，交线也不必再一一校对或修改。

总之，使用实体造型可以避免线架造型中常见的差错，也大大节省了时间。

§ 1-2 实体造型的历史

实体造型可看作是第五代几何造型方法,前四代分别为手工绘图、二维计算机绘图、三维线架系统和曲面造型。机械制造行业及其他部门仍在广泛地使用手工绘图,但许多公司、厂矿已配置了后四代系统,形成五代并存的局面。尽管有人断言,技术发展将出现无图纸工作环境,但我们认为,五代造型方法将较长时间并存使用,在实际生产中发挥各自优势。

实体造型的出现可以追溯到 60 年代初期,即 L.G.Roberts 寻找处理实体和景物(Scene)分析问题之时。那个时期,还有另外两个著名的项目,它们是由当时正处于萌芽状态中的计算机图形界发起的。Sandia 公司 IIT 研究所的 Gutterman M.M.对用扩充的 APT 语法来表示的半空间合成的传统集论来定义实体的方法进行了研究探讨。结果未能成功,主要原因显然是因为计算上的困难,即如何从这些表示产生必要的边界信息(曲面和边),以生成图形显示。边界计算问题直到 1970 年才得到真正解决。在 IBM 公司,由 Luh 和 Krolark 进行的一个项目中,是用半空间上 CSG 的约束形式来表示实体的。这一颇有雄心的项目也惨遭失败,不得不中途放弃,而在人们的心目中留下的只是一桩不愉快的往事。

60 年代后半期,对实体造型本身的报导仍然很少,然而,在雕塑曲面和图形显示方面确实做了大量的工作。60 年代后期和 70 年代初期,出现了一系列新的实体造型项目,主要有:

- 在英国,1973 年剑桥大学计算机试验室的 CAD 小组的 Ian Braid 研制了 BUILD-1 系统,5 年以后又出现了 BUILD-2 系统。但都没有公开使用,不过它们在研究领域中都十分重要。十分遗憾的是,剑桥大学计算机研究室的 CAD 小组在 1980 年解散了。其中有一部分人员组建了 Shape Data 有限公司,但该公司最近又被 Evans & Sutherland 合并。

- 在欧洲大陆,1969 年柏林的一所大学开始 COMPAC 系统