

计算机图形学 与CAD技术

王东泉 编著

上海交通大学出版社

(沪)新登字 205 号

内 容 提 要

本书将计算机图形学与计算机辅助设计(CAD)技术融为一体。主要内容包括:计算机图形学和 CAD 技术在国内外的的发展概况、图形学的硬件系统、图形的变换技术、交互技术、有关的国际标准、GKS 图形支撑软件、光栅图形算法、参数型曲线和曲面、三维观察变换、隐线和隐面的消除、明暗处理、三维几何造型技术、CAD 数据库概述等。全书共 13 章,每章结束均有习题。本书图文并茂,内容深入浅出。

本书可作为大专院校有关专业研究生和本科生的计算机图形学或计算机辅助设计基础等课程的教材或教学参考书,也可供从事有关专业的工程技术人员和科研工作者参考。

计算机图形学与 CAD 技术

出 版: 上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)

发 行: 新华书店上海发行所

印 刷: 立信常熟印刷联营厂

开 本: 850×1168(毫米) 1/32

印 张: 11.5

字 数: 297,000

版 次: 1992 年 10 月 第 1 版

印 次: 1992 年 11 月 第 1 次

印 数: 1—3,700

科 目: 280—292

ISBN 7—313—01095—8/TP·39

定 价: 3.60 元

前 言

计算机图形学,作为计算机辅助设计的一门技术学科基础,其发展之迅速和应用之广泛都令人惊喜。该学科的技术基础形成于本世纪 60 年代初,当时,麻萨诸塞州理工学院的伊凡·萨塞兰德发表了他的博士论文《图板:一个人机图形通信系统》。学科的理论和技术体系则于 70 年代初形成。纽曼和斯普劳尔合著的《交互式计算机图形学原理》于 1973 年面世,这是本学科领域的最早一本著作和教科书。1985 年计算机图形学的第一个国际标准 GKS 的颁布则标志着这一学科已臻于成熟。我们看到二十多年来,特别是十多年来,计算机科学的研究成果和大规模集成电路工艺的迅猛发展有力地推动了计算机图形学和 CAD 技术的发展。80 年代初处于实验室阶段的技术已成为标准实践,达到更为突出的“照片实感”效果(photorealistic effect)水平。伪实感(pseudorealism)图像在 80 年代初需要计算机时间数小时才产生一幅,现在即使在个人计算机(即微机)上也已达到动画速度(每秒 10 帧以上)。那时“实时”向量显示器只能显示由数万个向量组成的线框模型,而且没有隐线消除处理;90 年代初,实时光栅显示器不仅能显示 80 年代初那样的线框图形,而且还能以葛洛德(Gouraud)或冯氏明暗模型(Phong shading model)和镜面高光以及全隐面消除的方式显示由数十万个三角形组成的运动体。功能最完善的系统已能提供实时纹理映射、去混叠(antialiasing)、雾气衰减模拟等高级效果。PHIGS 和 PHIGS+ 结合在一起的形式已广泛应用于科学和工程应用的几何图形学中。PHIGS+ 还支持光照、明暗处理、曲线和曲面等功能。功能先进的 CAD 系统已把计算机图形学中取得的这些研究成果应用于产品和工程结构的造型、结构分析等

方面。

如今, 计算机图形学已广泛应用于计算机辅助设计、科学研究、办公室自动化、计算机仿真、过程控制和指挥系统、计算机辅助教育、美术和广告、娱乐等众多领域。而计算机辅助设计技术已推广到机械、电子、建筑、汽车、飞机、船舶、轻纺等工业部门。尽管不同的应用领域有不同的设计对象和要求, 使用不同的 CAD 技术, 但它们都有一个共同的基础, 这就是计算机图形学。

本书是作者在长期从事这一领域的教学和科学研究基础上, 参阅了国内外大量有关文献资料而编写的。

本书共分 13 章。第一章为绪论; 第二章介绍图形学和 CAD 系统的硬件; 第三章到第七章的内容是二维图形学和 CAD 技术; 第三章讲述二维几何变换; 第四章叙述裁剪和开窗; 第五章讨论交互设备和交互技术; 第六章介绍计算机图形学的有关标准和 GKS 图形支撑软件; 第七章论述光栅图形的基本算法; 第八章至第十二章属于三维内容, 第八章介绍参数型曲线和曲面; 第九章陈述三维观察变换; 第十章讨论隐线和隐面的消除; 第十一章介绍明暗处理技术; 第十二章叙述三维几何造型; 第十三章概述 CAD 数据库。本书不讨论有关结构分析的技术(如有限元分析), 因为那是一门相对独立的学科。

计算机图形学不是一门纯科学, 虽然有它自己的理论和技术体系, 但它的实践性特别强, 因为它是一门计算机应用技术学科。因此, 要掌握这门学科的知识, 必须重视实践, 并参加实践。为此, 本书在每章结束后都有相当数量的习题。

在编写本书的过程中, 王涵青和王涵刚协助绘制了本书中绝大多数插图稿, 作者在此表示感谢。

由于作者理论水平和实践经验的局限性, 书中难免有错误和不妥之处, 热忱希望读者批评指正。

王东泉 1992 年 2 月

于上海交通大学图像处理与模式识别研究所

目 录

第一章 绪论	1
1.1 计算机图形学与 CAD 的发展概况	1
1.2 计算机图形学研究的对象	7
1.3 计算机图形学的应用	8
习题	11
第二章 图形学硬件	13
2.1 引言	13
2.2 输出设备	16
2.3 阴极射线管	21
2.4 显示处理系统	28
习题	37
第三章 二维几何变换	38
3.1 二维几何变换的表示	38
3.2 齐次坐标和二维变换的矩阵表示	46
3.3 二维变换的组合	50
3.4 变换效率考虑	52
习题	53
第四章 裁剪和开窗	55
4.1 引言	55
4.2 点的裁剪	57
4.3 直线的裁剪	57
4.4 字符的裁剪	65
4.5 多边形的裁剪	66
4.6 窗口向视口的映射	69

习题	70
第五章 交互设备和交互技术	72
5.1 交互设备的逻辑分类和输入方式	72
5.2 交互设备	74
5.3 模拟逻辑设备的技术	82
5.4 交互技术	84
习题	91
第六章 图形学标准和 GKS 图形支撑软件	92
6.1 图形学标准	92
6.2 VAX GKS	98
6.3 GKS 程序设计	104
习题	130
第七章 光栅图形的基本算法	131
7.1 引言	131
7.2 直线的扫描转换	132
7.3 圆的扫描转换	138
7.4 椭圆的扫描转换	143
7.5 区域填充	146
7.6 多边形的扫描转换	150
习题	154
第八章 参数型曲线和曲面	156
8.1 引言	156
8.2 赫米特曲线	160
8.3 三次贝齐埃曲线	163
8.4 B 样条曲线	169
8.5 孔斯曲面	176
8.6 贝齐埃曲面	184
8.7 B 样条曲面	188
8.8 非均匀有理 B 样条	190

8.9 曲线和曲面上点的计算	196
习题	200
第九章 三维观察变换	201
9.1 三维几何变换	201
9.2 投影的分类	209
9.3 正投影变换	211
9.4 透视变换	216
9.5 三维观察系统	227
9.6 三维裁剪	240
习题	240
第十章 隐线和隐面的消除	243
10.1 引言	244
10.2 隐线的消除	246
10.3 隐面的消除	265
习题	275
第十一章 明暗处理	277
11.1 反射模型	277
11.2 多边形网格的明暗处理方法	283
11.3 光线跟踪	287
习题	296
第十二章 三维几何造型	297
12.1 三维几何造型的基本知识	297
12.2 线框造型	306
12.3 面造型	312
12.4 实体造型	315
12.5 几何造型系统简介	335
习题	338
第十三章 CAD 数据库概论	339
13.1 数据库和数据库管理系统	339

13.2 CAD 数据库特点	343
13.3 图形数据库的实现	345
13.4 若干 CAD 数据库系统简介	349
习题	351
参考文献	353

绪 论

本章论述计算机图形学和 CAD 在国外及国内的发展概况与趋势,计算机图形学的研究对象及其主要应用领域。

1.1 计算机图形学与 CAD 的发展概况

众所周知,语言和文字是人类表达思想和交流思想的工具。而图或图形,由于它具有形象直观的特点,易于被人们理解,因此在人类表达思想和交流思想方面也起着重要的作用。从建筑、机械、电子等工业,到教育、科学研究、管理、广告、娱乐、生活各方面,都离不开图这个信息形式。对工程技术人员来说,工程图被冠以“工程师的语言”之称。

绘图的发展经历了从纯手工、手工借助简单工具(如直尺、三角尺、圆规、模板等)到如今计算机辅助绘图诸阶段。

计算机图形学作为一门新兴学科,是在计算机应用不断得到发展,特别是在计算机图形显示技术的发展中应运而生的。

1. 计算机图形学和 CAD 在国外的发展概况

美国是当代科学技术最先进、工业最发达的国家。计算机图形学首先在美国得到发展,并推广到各应用领域。

本世纪 40 年代,世界上第一批电子计算机诞生。第一台数字电子通用计算机 ENIAC 于 1945 年在美国宾夕法尼亚大学研制成功。当时,为了把计算结果转变成图形输出,人们是在与计算机连接的电传机或行打印机上输出图形的,由于这些设备的分辨

率低,图形质量较差。

在 50 年代,计算机图形显示技术有明显进展。1950 年,美国马萨诸塞州理工学院(MIT)的“旋风一号”(Whirlwind I)计算机被用于控制阴极射线示波器(CRT),成功地生成和显示了图形,那是用于研究飞机稳定性和可控性的。50 年代中期,美国一个半自动防空系统 SAGE,即警戒雷达系统,成功地把雷达波形转换成计算机图形,第一次用光笔选取图形。从一定意义上说,这是计算机辅助设计(computer-aided design 简称 CAD)的第一次技术性突破。这个系统也可以说是交互式计算机图形系统的一个雏形。

60 年代是交互式计算机图形学兴起和确立的年代。1963 年美国马萨诸塞州理工学院的伊凡·萨塞兰德(Ivan Sutherland)发表了他的博士论文,其题目为“图板:一个人机图形通信系统”。该系统简称为“图板系统”,这是一个功能相当完善的交互式图形系统。他使用 Lincoln TX 2 计算机控制一台作为向量刷新显示器的阴极射线示波器,能够产生直线、圆、圆弧等图形,并能作比例、旋转等几何变换。“图板系统”具有两个特点:①建立了用键盘和光笔操纵图形的人机对话技术基础,②采用一种数据结构存放不同层次的图形符号。该论文作者指出,交互式计算机图形学是一个重要和可行的研究领域。由他开创的交互式计算机图形学标志着计算机辅助设计的一个新时代的开始。在 60 年代中期,美国一些大公司把巨额资金投入 CAD 的研究和开发应用,其中美国通用汽车公司,洛克希德、麦道等飞机制造公司,国际商用机械公司(IBM)都有大的研究项目。计算机辅助设计和计算机辅助制造(computer-aided manufacture,简称 CAM)作为一个技术概念于 1968 年美国国防与工业会议上正式被采纳。

70 年代是计算机图形学蓬勃发展、成果辉煌的年代。隐藏线和隐藏面得到更深入的研究,明暗处理技术开始受到重视,这就推动了三维计算机图形学和真实感图形图像的应用发展。计算机图

形软件标准化活动由单个国家转向国际范围，如美国制订了核心系统(core system)，而 GKS 作为国际图形软件标准的起草等大量准备工作始于 70 年代中期，并延续至 80 年代初。

80 年代是大规模集成电路技术飞速发展的时期，是计算机图形系统和 CAD 系统迅速推广应用的年代。计算机图形软件功能开始部分地用硬件实现，如 1980 年克拉克(J.H.Clark)的几何机器(geometry engine)用集成块能完成比例、旋转、平移等几何变换功能。80 年代初在 CAD 领域开始用实体造型软件。个人计算机由 16 位机进化到 32 位机，CAD 工作逐渐用 32 位工作站。CAD 数据库和 CAD/CAM 一体化数据库受到重视并开始得到应用。三维计算机图形学的国际标准 PHIGS 和 GKS-3D 经过起草和修改，已正式颁布。

作为计算机图形学或 CAD 系统的一个主要组成部分的图形显示系统，经历了从向量显示系统、存贮管显示系统到光栅显示系统的演变过程。这个演变过程对计算机图形学自身的发展和应用有重要意义。这三代显示系统的发展简况如下：

(1) 向量显示系统(图 1.1)。该系统于 60 年代中期研制成功。它是由显示处理器(display processing unit, 简称 DPU)、刷新缓冲存贮器(refresh buffer memory)和阴极射线管三个主要部分组成。绘图和写字符的命令和参数贮存在刷新缓冲存贮器中。在计算机的中央处理器控制下，显示处理器周而复始地从刷新缓冲存贮器中取出命令和参数，并转换成模拟信号，输送到阴极射线管的电子束偏转系统，从而显示出一幅稳定无闪烁的图形。当时，刷新缓冲存贮器是磁芯或磁鼓存贮器，价格昂贵。显示处理器则采用分立电路元件。

(2) 存贮管显示系统。60 年代末泰克公司首先研制成功直视型存贮管。由这种特殊的 CRT 组成的显示系统不需要刷新缓冲存贮器，因为它一旦显示一幅图形，就能保持很长时间(约 1 小时)而无闪烁。由于节省了在刷新缓冲存贮器上的投资费用，因

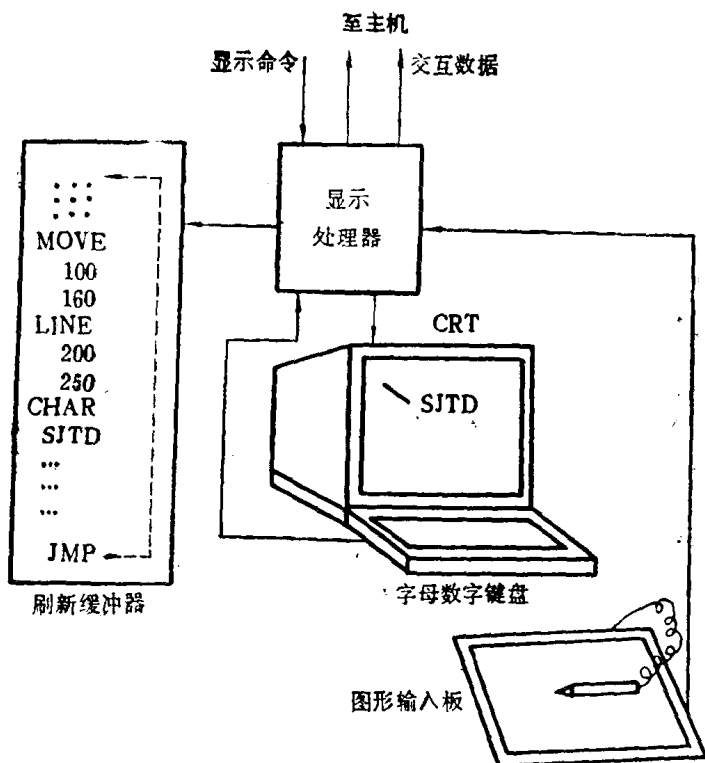


图 1.1 向量型显示系统

此，这种显示系统得到了广泛应用。但是它没有那种有选择地擦除一部分屏幕图形的能力。因此它不适合于交互工作方式。尽管如此，由于整个系统的投资费用不高，在 70 年代的计算机图形系统中存贮管的使用占了大多数。

(3) 光栅显示系统。70年代中期光栅显示器研制成功，这是电视技术发展的成果。由这种显示器构成的显示系统需要存放每个图形最小元素(称为像素)的存贮器(称为帧缓冲存贮器)。由光栅系统的显示处理器周期性地从帧缓冲存贮器中读取像素的值，并转换成模拟信号以控制电子束的强度，使相应位置的像素显示出给定的颜色或灰度。这种系统的一个最重要的优点是可提供丰富

的颜色,从而可显示有实感的计算机产生的图像。80年代,由于大规模集成电路的突飞猛进的发展,帧缓冲存贮器是使用半导体集成电路的随机存取存贮器(RAM)。系统性能不断提高,而系统的价格不断下跌。在CAD系统中已普遍采用光栅显示系统。向量显示系统和存贮管显示系统已很少被使用。

目前,在美国、日本等发达国家,飞机、汽车和集成电路制造企业已全部采用CAD/CAM技术,大约50%的机械工业、30%的建筑设计部门采用CAD技术。采用CAD技术后,集成电路设计的效率提高了18倍,机械产品提高了5倍,建筑设计提高了3倍。

2. 计算机图形学和CAD在我国的发展概况

我国计算机图形学与CAD的研究和应用始于70年代初期。当时只有机电、航空航天、船舶等少数几个工业部门和少数高等学校开始研究计算几何的数学理论、工程图的绘制方法、布局和布线算法等,主要应用领域只限于船体放样、飞机设计和集成电路版图设计等。在很长一段时期内进展不大,应用不广。自改革开放的十余年来,特别是“七五”以来,计算机图形学与CAD的研究和应用有了较快的发展。这表现在:

(1) CAD技术已推广应用到机电、航空航天、建筑、船舶、轻工、纺织等众多工业部门。目前,我国大型设计院中计算工作的90%以上,方案设计的50%,绘图工作的25%均已用CAD系统来完成。工作效率提高了3~10倍,基建投资节约了2%。

(2) CAD应用软件、图形支撑软件的研究和开发取得成果,有的已达到国际水平。如集成电路三级CAD系统开发与实用化,使我国成为继美国、日本、西欧共同体之后能进行大型集成电路CAD系统开发的少数国家之一。一些实用化CAD软件已在工业生产中发挥作用。

(3) 硬件的开发和制造能力有所提高。如我国自行研制的图形设备——显示终端和彩色监视器已形成系列化产品,并已形成

· 批量生产能力,不但占领了国内市场,并开始出口。我国已能研制成套工艺用于制造 $1\sim 1.5\ \mu\text{m}$ CMOS 集成电路,已研制成 1 MB 的汉字只读存储器。

(4) 已建立了若干国家重点研究开发基地,如浙江大学 CAD 与计算机图形学国家重点实验室,中国科学院开放 CAD 实验室,沈阳计算技术研究所 CAD/CAM 开放实验室,华中理工大学模具设计与制造国家重点实验室。

但是,目前还存在不少问题,如专业人才缺乏,还没有建立起我国自己的 CAD 产业,大部分 CAD 软件和图形软件还没有达到实用化、集成化和商品化。然而,我们相信,随着对“科学技术是第一生产力”的认识逐渐成为我国人民的共识,与其他产业和新兴学科领域一样,当前存在的这种落后状态终将被彻底改变。

3. 计算机图形学和 CAD 技术的近期发展趋势

计算机图形学领域的发展动向是:

(1) 提高三维几何造型的处理速度。如在图形显示系统中配置一个专用的三维图形加速器(graphics accelerator),除完成三维变换和成像(rendering)之外,还完成三维网格体素、(3 D mesh primitive)、非均匀有理 B 样条、葛洛德明暗处理、冯氏光照、曲面调配(surface blending)等功能。

(2) 完善三维实体造型算法,提高实体造型系统的可靠性。因为在实体造型过程中需要进行大量的面与面的求交运算,难免出现奇异情况,例如计算精度带来的几何数据的误差有时会导致实体的拓扑关系不满足欧拉公式,使布尔运算难以进行下去,或产生错误结果。

(3) 工程图的自动输入和向量化,进而达到对现有工程图纸的处理、编辑和管理的计算机化。

(4) 改善计算机生成的图像的照片实感,提高其生成速度。

在 CAD 技术方面的发展趋势是:

(1) 集成化 集成化 CAD 系统能支持产品发展的整个生命

周期,因为它把产品的计划、构思、设计、仿真、制造、组装、测试以及文档等各个环节集成在一个统一的系统中,因而实现资源共享和信息集成。

(2) 网络化 工作站之间实现联网,成为分布式、开放式的工作环境,有利于在更大范围内信息和资源的共享。

(3) 智能化 人工智能领域的研究成果,如把由知识库和推理机组成的专家系统引入 CAD 系统。

此外,高性能、低价格的工程工作站和微机工作站将成为 CAD 系统的主流机种。诚然,适合不同应用的 CAD 软件将成为发展 CAD 技术的关键。

1.2 计算机图形学研究的对象

计算机图形学是什么? 1982 年国际标准化组织数据词汇处理小组给出的定义是:研究用计算机进行数据与图形之间相互转换的方法和技术。我们可以具体地说,计算机图形学是研究用计算机进行图形信息的表达、输入、存贮、显示、输出、检索、变换和图形运算(如图形的并、交、差运算)的一门学科。

交互式计算机图形学是指使用交互设备和交互技术的计算机图形学。

计算机图形学涉及计算机科学、线性代数、计算几何、制图学、美学、视觉心理学、光学等多门学科,它既包含自己的理论体系,又富于很强的实践性。计算机图形学发展到今天,其理论体系的框架已经形成,作为一门年轻的学科,理所当然地有待向更成熟、更完美的阶段发展。

计算机图形学与 CAD 有着密切的关系。计算机图形学是 CAD 主要的理论基础和技术基础,而 CAD 则是计算机图形学的最主要的一个应用领域。CAD 技术中广泛采用了计算机图形学的研究成果。

1.3 计算机图形学的应用

计算机图形学的应用非常广泛,我们不能一一枚举。这里,我们只选择若干有代表性的应用领域加以说明。

1. 计算机辅助设计和绘图

如前所述,这是目前计算机图形学最主要的一个应用领域。如今,计算机辅助设计推动了几乎一切领域的设计革命。

计算机辅助设计是用计算机系统产生设计方案并加以修改、分析和优化的一个过程。一般的设计过程可分为六个阶段:

- (1) 明确设计要求,
- (2) 规定设计任务,
- (3) 综合,
- (4) 分析和优化,
- (5) 审核设计,
- (6) 表达设计。

计算机辅助设计可参与第三至第六阶段的工作,分别表现为几何造型、工程分析、审核设计和自动绘图。其中工程分析如有限元分析,以确定结构的应力、应变、热变形等;审核设计主要检查设计正确性、零部件之间的干涉及动态性能;自动绘图过程,输出完工的设计图,图中可能包含剖面线、尺寸、图纸比例等信息。

计算机辅助设计的好处是:

- (1) 可提高设计效率,一般可缩短设计周期 30~60%;
- (2) 可改善设计质量,一般可降低废品率 80~90%;
- (3) 可降低设计成本(如土木工程设计成本一般可降低 15~30%);
- (4) 产生的工程图较优美,易实现标准化;
- (5) 可为后续工序(制造)建立工程数据库。

2. 科学研究

科学技术工作者在研究工作过程中的计算结果可用计算机图形学的方法显示在显示屏幕上或用输出设备得到硬拷贝。利用图形学显示计算结果的过程称为可视化(visualization)。计算结果用图形图像显示以后,被研究对象或过程的本质容易被理解和被揭示。

有些科学上的假说可用图形图像来表示,这比用文字阐述更清晰、直观,尤其是有关结构的假说。例如,对高分子物质的结构观察,目前使用光学显微镜或电子显微镜都无济于事。计算机图形学为分子生物学和分子造型领域提供了一个有效手段。例如,DNA 分子结构可用分子造型系统产生。

3. 管理和办公室自动化

管理部门用于管理的作业进程图、生产量图、库存量图,统计、计划等所用的条图、圆饼形图,都可用计算机图形系统产生。

管理只是办公室职能之一。从世界范围来说,办公室机构林立,涉及面广,处理的事务多,工作人员队伍庞大。因此,办公室自动化在发达国家已受到普遍重视。现在约有 2000 万台个人计算机和数十万台 UNIX 系统工作在办公室自动化中运行。在办公室事务中,计算机可完成各种各样的任务,但归结起来,主要完成两方面功能:

(1) 数据库类型的功能。如仓库管理系统中将入库零件的数量、规格、型号等数据输入数据库;当需要报表或图表时,将有关应用数据用打印机或绘图机输出。

(2) 文件处理型的功能。用计算机完成文件的打印、修改、保存、传送。

目前,办公室自动化发展趋势是向联网群体工作发展。

4. 制图

国家或省或市或其他局部地域的地图、地势图、人口分布图,沿海和远海的海洋图、天气图、云图、石油勘探图等等,都可用计算机图形系统产生。