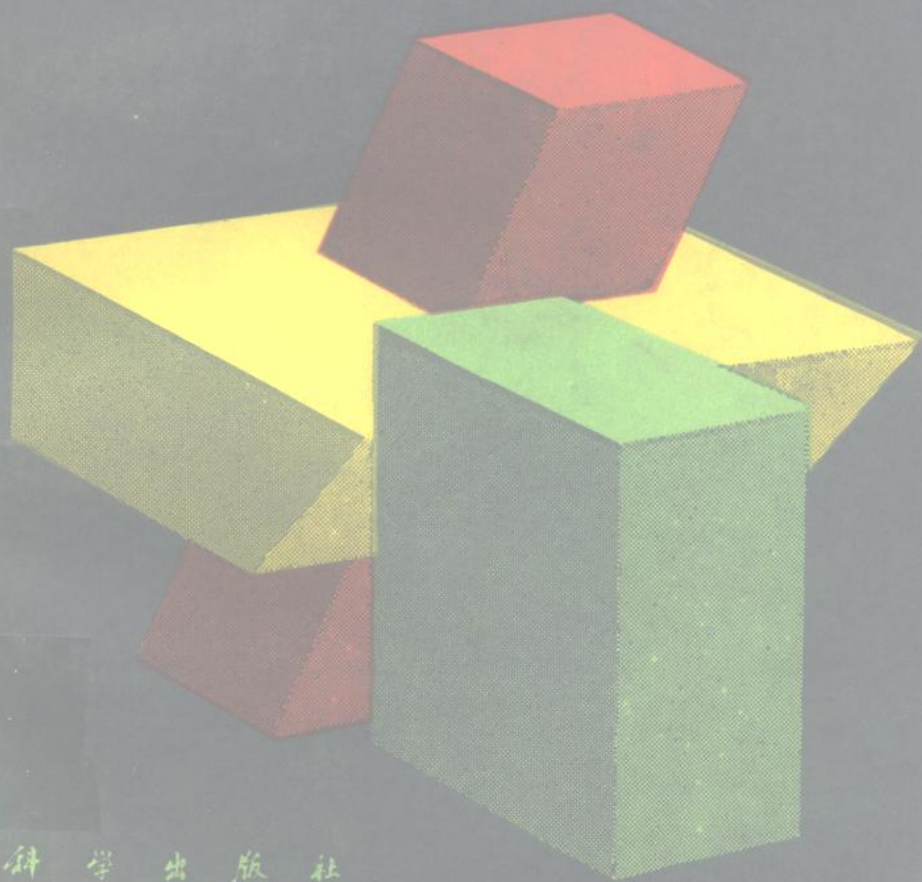


计算机图形学的算法基础

(美) D. F. 罗杰斯 著



科学出版社

计算机图形学的算法基础

〔美〕D. F. 罗杰斯 著

梁友栋 石教英 彭群生 译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是讲述计算机图形学的基础算法的一本专著。全书共分五章，包括计算机图形硬件系统的组成，光栅图形的各种扫描转换算法，二、三维裁剪算法，典型的隐藏线和隐藏面消除算法，生成真实感图形的各种技术，特别是处理明暗、阴影、透明、纹理和色彩等效果的算法以及绘制技术的最新成就。本书的特点是：取材新颖，内容系统，概念叙述清楚，算法描述详细，并附有相应的伪语言程序以及大量实用的例题，因此特别适合于不同水平的人员进行自学。

本书可作为大专院校计算机科学、建筑学、应用数学、机械工程、航空、造船、无线电、电机、纺织、工艺美术等专业有关计算机图形学和计算机辅助设计课程的教材，对从事 CAD 和计算机图形技术的广大科技人员也非常实用。

David F. Rogers

PROCEDURAL ELEMENTS FOR COMPUTER GRAPHICS

McGraw-Hill, Inc., 1985

计算机图形学的算法基础

[美] D. F. 罗杰斯 著

梁友栋 石教英 彭群生 译

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 11 月 第 一 版 开本：850×1168 1/32

1987 年 11 月 第一次印刷 印张：16 插页：2

印数：0001—7,850 字数：418,000

ISBN 7-03-000069-2/TP·8

统一书号：15031·982

定价：5.00 元

译 者 的 话

计算机图形学自从六十年代初形成以来,已经发展成为以图形硬件设备、图形专用算法和图形软件系统等为研究内容的一门成熟的学科。简言之,计算机图形学主要研究图形(图象)的计算机生成。由于图形信息一目了然,当今,几乎所有科学和工程技术领域都利用计算机图形来加强信息的传递和理解。由计算机生成的图形(图象)可以是机械工程、建筑工程用图,也可以是航天飞机、机器人运动的模拟,还可以是描述分子结构或地质构造的三维模型或关于自然景物的真实感图象。

计算机图形学最初研究线画图形(line drawing)的生成,特别是关于线画图形的裁剪、消隐和交互处理技术。所采用的图形设备以随机扫描显示器和存贮管显示器为主。近年来,光栅扫描技术发展很快,由于光栅图形显示器以其真实的图象、丰富的色彩、低廉的价格而后来居上,因此逐渐成为图形显示器市场的主流。与此同时,各种各样的光栅图形算法的涌现已形成当今人们研究计算机图形学的最有吸引力的方向之一。

计算机图形学在我国起步较晚,七十年代主要集中在船体放样的研究,八十年代逐步开展了对图形显示器、图形支撑软件和图形专用算法的研究工作,并取得了一批实用的成果。在此期间,国内先后翻译了几本有影响的介绍交互图形处理技术的专著,但大多侧重于线画图形方面的内容,而在光栅图形方面的最新研究成果反映较少。由于光栅图形技术近几年发展很快,因此广大科技人员迫切需要一些全面反映光栅扫描图形学最新成就的书籍以供学习。1985年春,美国佛罗里达大学电机系和计算机系教授 John Staudhammer 应邀来浙江大学讲学时,向我们推荐了 D. F. 罗杰斯的这本新著:“Procedural Elements for Computer Graphics”。

该书内容以光栅图形学为主，重点介绍各类光栅图形的基础算法及其最新成就。全书共分五章。第一章简要介绍计算机图形硬件系统的组成。第二章叙述光栅图形的扫描转换算法。第三章介绍各种实用的二维和三维裁剪算法，包括端点编码、中点分割、逐次裁剪和 Cyrus-Beck 等算法。第四章介绍各种隐藏线、隐藏面消除算法，包括浮动水平线算法、Roberts 算法、Warnock 区域分割算法、Watkins 区间扫描线算法、深度缓冲器算法、表优先级算法等。第五章介绍生成真实感图象的各种技术，包括建立各种局部和整体光照模型以及对明暗、反射、折射、透明、阴影、纹理等真实感效果的处理，最后介绍了色度学中各种颜色系统的定义以及它们之间的转换算法。本书的特点是：内容新颖，概念清晰，书中系统地收集整理了分散在许多文献中的光栅图形学的各类算法，并通过例题详细叙述了算法实现的具体细节。因此本书除可用作大专院校的计算机图形学教材外，还可作为有关科研和工程技术人员的实用参考书。

在翻译过程中，我们采用了分工翻译、集体校对的方法来保证译文的质量。初稿的前言、一、二章由石教英翻译，三、四、五章由彭群生翻译，附录由石教英和彭群生两人共同翻译，全书译文经过译者集体逐字逐句讨论校对并由梁友栋审定后定稿。在翻译过程中，我们改正了原书中的一些错误，其中许多是印刷错误。由于在计算机图形学中很多名词的译名尚未统一，因此我们在书中所采用的某些译名与其它译著也不尽相同。这些译名是经过我们反复考虑和斟酌后才定稿的，例如，将 shading 译为明暗处理，将 object space 译为对象空间，将 rendering 译为绘制，将 active edge list 译为活化边表，将 antialiasing 译为反走样等，详见索引。这些译名是否妥当，还可进一步斟酌。

由于译者水平所限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

译者

1986年4月

前 言

计算机图形学已成为一门成熟的学科。目前作为商品的图形软件和硬件已能方便地生成各种线画图形和自然景物的真实感图象。十年前,这种硬件和软件价格在几十万美元左右,如今只需几万美元就能买到性能优异的设备。至于性能稍低但在许多情况下仍然适用的设备则只需几千美元。所有现代科学和工程领域几乎都采用计算机图形以加强信息的传递和理解,因此当今的科学家和工程师都需具备计算机图形学的基本知识。计算机图形学也在深入到商业、医疗、广告以及娱乐等行业中。用计算机图形设备制作演讲用的幻灯片以及一般商业用的幻灯片已是司空见惯。在医疗上根据 CAT* 扫描所采集的数据重建三维图象已变得日益普及。在电视和其它媒介上制作广告也经常利用计算机图形以及计算机动画技术,在娱乐行业中已将计算机图形应用于电子游戏和拍制长篇故事片。从本书所提供的一些照片可以看到计算机图形学甚至渗入到艺术领域。

本书的姐妹篇《计算机图形学的数学基础》出版已有十年之久。在此期间,光栅扫描图形学取得了巨大进展。本书将着重介绍这方面的内容。第一章是计算机图形学硬件引论,重点介绍阴极射线管显示器以及交互设备的基本概念。以后各章讨论光栅扫描图形学,包括直线和圆的绘制,多边形填充以及反走样 (antialiasing) 算法;二维和三维裁剪,包括对任意凸体的裁剪;隐藏线和隐藏面算法,包括光线追踪算法;最后讨论绘制——生成真实感图形的“艺术”,包括建立局部和整体照明模型以及对纹理、阴影、透明以及色彩等效果的处理。所采用的叙述方式与其姐妹篇相同。对每一问

* CAT 为计算机辅助层面 X 射线照相的简称。——译者注

题作系统讨论之后一般都给出详细的算法和实例。

本书可作为高年级大学生或研究生第一门正式的计算机图形学课程的教材，可供讲授一个学期，重点放在光栅扫描图形学上。如果已讲授过《计算机图形学的数学基础》，那么接着讲授本书就再好不过了。作者就是这样组织教学的。如果需要在一个学期中讲授更多的内容，那么也可以将这两本书结合起来使用。具体安排如下：先讲两本书中的第一章，接着讲《计算机图形学的数学基础》一书的第二、第三两章和第四章中的几节，然后从本书的其它各章中选择一些内容进行讲授，例如第二章中的 2-1 到 2-5、2-7、2-15 到 2-19、2-22、2-23、2-28，第三章中的 3-1、3-2、3-4 到 3-6、3-9、3-11、3-15、3-16，第四章中的 4-1、4-2 中有关背面剔除部分、4-3、4-4、4-7、4-9、4-11、4-13 以及第五章中的 5-1 到 5-3、5-5、5-6、5-14 等节。本书也可作为专业程序员、工程师和科学家们的参考书。详细的算法和实用的例题使本书特别适合于各种水平的人员进行自学。只要具有大学数学和高级程序设计语言基础知识者即可阅读，如有一定数据结构知识则更好，但不是必需的。

本书中用两种方式来说明算法。第一种用叙述方式详细说明算法的每一个步骤。第二种较为形式化，采用算法“语言”来陈述。由于计算机图形学的应用十分广泛，在选择一种恰当的“算法语言”时，作者再三斟酌，征求过许多同行的意见，但他们的看法均不一致。计算机科学界的同行们一般喜欢使用 PASCAL，也有相当一部分更偏爱 C 语言。工业界则一般爱用 FORTRAN 语言，这样易于和已有的软件兼容。作者本人喜欢用 BASIC，因为它的用法简单。为了求同存异，本书中的详细算法均用伪语言写成。使用伪语言是基于作者对很多班级讲授计算机图形学课程的经验得到的。因为这些班级中的学生并不掌握一种共同的程序设计语言。伪语言易于翻译成任意一种通用程序设计语言，关于伪语言的介绍详见附录。本书中给出的所有伪语言算法或者直接写成并验证，或者从已运行的程序导出。这些算法均用通用程序设计语言编写并在 Apple IIe 上用 BASIC，在 IBM 4300 上用 PL1 以

及在它们之间的各种机种上用不同语言实现过。作者可提供一套表演程序。

简单介绍本书的产生过程是饶有兴趣的。它采用计算机排版，所用的 TEX 排版系统是由弗吉尼亚州勒斯顿市 TYX 公司提供的。书稿直接由手写本经计算机处理后得到。长条校样和供编辑以及页面排版用的两套版面校样均由激光打印机印出。最后供插入艺术图片的复制本是在光学排版机上产生的。TYX 公司的 Jim Gauthier 和 Mark Hoffman 为解决在使用 TEX 系统过程中所发现的许多细小问题作出了很大的努力，在此表示深切的谢意。对 Louise Bohrer 和 Beth Lessels 在整理手稿时所作的出色工作深表谢意。McGraw-Hill 出版公司的出版工作一贯是高质量的，本书由 David Damstra 和 Sylvia Warren 负责编辑。

一本书的出版总是在很多人的帮助下完成的。本书是根据 1978 年以来在 Johns Hopkins 大学应用物理实验室中心为研究生课程所准备的材料编写而成。感谢听过我这门课和其它课程的一些学生，我从他们那里学到很多东西。感谢阅读本书原始提纲并提出有价值建议的 Turner Whitted。感谢我的同事 Pete Atherton, Brian Barsky, Ed Catmull, Rob Cook, John Dill, Steve Hansen, Bob Lewand, Gary Meyer, Alvy Ray Smith, Dave Warn 以及 Kevin Weiler, 他们仔细地阅读了手稿的一些章节，提出了一些意见和建议，从而使本书更为完善。感谢我的同事 Linda Rybak 和 Linda Adlum, 他们读完全部手稿并检查了所有例子。感谢我的三位学生：Bill Meier 实现了 Roberts 算法，Gary Boughan 首先提出凸性检查（见 3-7 节），Norman Schmidt 首先提出多边形分割技术（见 3-8 节）。感谢 Mark Meyerson 实现了这一分割技术并给出该技术的数学基础。特别感谢 Lee Billow 和 John Metcalf 准备了所有线画插图。

深切感谢 Steve Satterfield 全部读完 800 页手稿并提出有益的意见。

还要特别感谢我的长子 Stephen, 他实现了第四章中的所有隐

藏面算法以及书中其它许多算法。我们之间多次活跃的讨论使很多重要观点更为清晰。

最后,要特别提一提我的妻子 Nancy 以及另外两个孩子 Karen 和 Ranson, 他们面对自己的丈夫和父亲在长达一年半之久的时间里每晚和周末都在办公室里度过而毫无怨言, 这是一种真正的支持! 谢谢!

D. F. 罗杰斯

目 录

第一章 计算机图形学引论	1
1-1 计算机图形学概述	1
1-2 图形设备的类型	3
1-3 存贮管图形显示器	3
1-4 笔划式刷新图形显示器	5
1-5 光栅刷新图形显示器	9
1-6 阴极射线管基础	16
1-7 彩色 CRT 光栅扫描基础.....	17
1-8 视频基础	18
1-9 交互设备	20
1-10 小结.....	29
第二章 光栅扫描图形学	30
2-1 画直线算法	30
2-2 数字微分分析法	31
2-3 Bresenham 算法	36
2-4 整数 Bresenham 算法.....	40
2-5 一般 Bresenham 算法.....	41
2-6 圆的生成——Bresenham 算法	45
2-7 扫描转换——显示的生成	55
2-8 实时扫描转换	55
2-9 行程编码	61
2-10 单元编码.....	64
2-11 帧缓冲器.....	66
2-12 光栅的寻址.....	68
2-13 线段显示.....	70

2-14	字符显示	72
2-15	实区域扫描转换	73
2-16	多边形填充	74
2-17	多边形的扫描转换	75
2-18	简单的有序边表算法	78
2-19	更有效的有序边表算法	80
2-20	边填充算法	84
2-21	边标志算法	88
2-22	种子填充算法	90
2-23	简单的种子填充算法	92
2-24	扫描线种子填充算法	96
2-25	图形反走样基础	101
2-26	简单的区域反走样算法	104
2-27	卷积积分与反走样算法	108
2-28	半色调技术	112
第三章	裁剪	119
3-1	二维裁剪	119
3-2	Sutherland-Cohen 分割线裁剪算法	129
3-3	中点分割算法	136
3-4	一般凸多边形窗口的二维线裁剪	144
3-5	Cyrus-Beck 算法	149
3-6	内裁剪和外裁剪	162
3-7	凸多边形的判定和内法线确定	163
3-8	凹多边形分割	168
3-9	三维裁剪	169
3-10	三维中点分割算法	172
3-11	三维 Cyrus-Beck 算法	176
3-12	齐次坐标裁剪	182
3-13	内法矢量及三维凸体集合的决定	184
3-14	凹体分割	187

3-15	多边形裁剪	190
3-16	逐次多边形裁剪——Sutherland-Hodgman 算法	191
3-17	凹裁剪区域——Weiler-Atherton 算法	204
3-18	字符裁剪	210
第四章	隐藏线和隐藏面	213
4-1	引言	213
4-2	浮动水平线算法	215
4-3	Roberts 算法	234
4-4	Warnock 算法	273
4-5	Weiler-Atherton 算法	297
4-6	曲面分割算法	301
4-7	z 缓冲器算法	302
4-8	表优先级算法	310
4-9	扫描线算法	317
4-10	扫描线 z 缓冲器算法	318
4-11	区间扫描线算法	324
4-12	曲面扫描线算法	333
4-13	可见面光线追踪算法	338
4-14	小结	348
第五章	绘制	349
5-1	引言	349
5-2	一个简单的光照模型	352
5-3	表面法线的计算	358
5-4	决定反射光线矢量	360
5-5	Gouraud 明暗处理	363
5-6	Phong 明暗处理	366
5-7	具有特殊效果的简单光照模型	372
5-8	一个较为完整的光照模型	374
5-9	透明	383

5-10	阴影	388
5-11	纹理	398
5-12	采用光线追踪的整体光照模型	409
5-13	一个采用光线追踪的更完善的整体光照模型	426
5-14	绘制技术的最新进展	428
5-15	颜色	430
附录 A	伪语言	460
附录 B	习题	466
参考文献		474
索引		482

第一章 计算机图形学引论

计算机图形学现在已是一门成熟的技术。变换处理以及曲线、曲面描述的基础已相当成熟，并已列入各种文献和专著(见参考文献 1-1 到 1-3)。光栅扫描技术、裁剪、隐藏线和隐藏面、色彩、明暗处理 (shading)、纹理以及透明效果等也得到研究，但仍在发展之中。后面这些课题正是我们所感兴趣的。

1-1 计算机图形学概述

计算机图形学是一门复杂的综合性的技术。为了理解这门技术，在开始时需要把它分成几个部分来研究。可以认为计算机图形学的最终产品是图形。显然，图形可应用于许多方面。例如，它可能是工程图，使用说明书上的零件插图、商业图表，建筑工程或设计项目的总体结构外形图、广告图片或动画片中的一帧图象等。图形是计算机图形学中能把各个部分联系在一起的基本概念。因此必须解决如下几个问题：

计算机图形学中图形的表示

表现图形所需要的预处理

经预处理后的图形的表现

人-图形交互功能的实现

一般的图形算法把多边形或边作为图形数据，而每个多边形或边又可用顶点来表示。因此，点是表示图形的基本元素。算法具有同等重要性，它说明如何把点组织起来。例如第一象限的单位正方形可由它的四个顶点表示，如图 1-1 所示。

$$P_1(0, 0), P_2(1, 0), P_3(1, 1), P_4(0, 1)$$

相应的算法描述可以是

按序连接 P_1, P_2, P_3, P_4

单位正方形也可以用它的四条边来表示

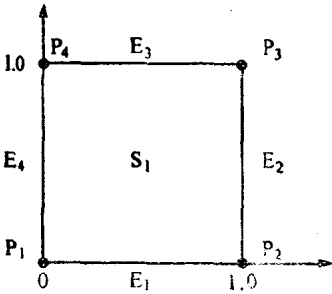


图 1-1 图形的数据描述

$$E_1 \equiv P_1P_2, E_2 \equiv P_2P_3,$$

$$E_3 \equiv P_3P_4, E_4 \equiv P_4P_1$$

其算法是

依次显示 E_1, E_2, E_3, E_4

最后，单位正方形可以作为一个多边形由点或边来描述，例如

$$S_1 = P_1P_2P_3P_4P_1 \text{ 或}$$

$$P_1, P_4, P_3, P_2, P_1$$

或

$$S_1 = E_1E_2E_3E_4$$

对于二维或三维不同的情况，基本元素即点，分别由一对数或三元组表示，即 (x_1, y_1) 或 (x_1, y_1, z_1) 分别表示二维空间或三维空间的点。两点表示一条直线或一条边，三个或三个以上的一组点表示一个多边形。这些点、边或多边形集合贮存在数据库中。图形预处理的数据不同于图形显示的数据，用于显示图形的数据通常称为显示文件。它表示存贮于数据库的整个图形的某些部分，视图或画面。所显示的图形通常是对数据进行旋转、平移、缩放以及各种投影变换后形成的。上述基本定向变换和视图预处理通常是在齐次坐标下通过 4×4 变换矩阵运算得到的(见参考文献 1-1)。这些运算通常由硬件实现。在生成最终图形之前，往往还需消除隐藏线或隐藏面，以及进行明暗、透明、纹理或色彩等处理。如果不要求显示整个数据库所表示的图形，则需选择图形的适当部分。这个过程称为裁剪。裁剪有二维和三维的。有时裁剪窗口或视体可能具有孔或呈不规则的形状。对标准的二维和三维区域的裁剪通常是用硬件实现。

几乎所有图形都涉及到文字。字符可以由硬件也可以由软件生成。若采用软件生成方法，那么可用处理图形某一部分的同样方式处理字符。若采用硬件生成方法，那么在显示之前，字符一直

保持为字符码形式。此时一般只提供有限的操作功能，例如只能进行有限度的旋转和提供几种显示尺寸。用硬件生成的字符进行裁剪一般是不可能的，只能显示整个字符。或者完全不显示。

1-2 图形设备的类型

生成计算机图形的显示设备种类繁多。典型的有笔墨绘图仪、点阵式、静电式或激光打印绘图仪、照相底片、存贮管、笔划式刷新和光栅扫描阴极射线管（CRT）显示器。由于绝大多数计算机图形系统使用某种类型的 CRT 显示器，而显示器的基本原理大多体现在 CRT 显示器技术之中，因此我们只讨论 CRT 显示器。关于其它显示技术见参考文献 1-1 到 1-3。

三种最常见的 CRT 显示器技术是直视存贮管显示器（线画图形），笔划式刷新显示器（线画图形）和光栅扫描刷新显示器（点画图形）。随着技术的发展，单个显示器可能综合采用多种显示技术。介绍各种类型显示器时，我们采用用户的或概念性的观点，即仅关心显示器的功能而不是详细的电子线路原理。

1-3 存贮管图形显示器

从原理上讲，直视存贮管是最简单的 CRT 显示器。可把存贮管（或称双稳态存贮管）看作是采用长余辉荧光粉的 CRT。一条直线或一个字符在被擦除以前一直是可见的（可长达一个小时）。这种显示器的典型例子示于图 1-2。为了在显示器上画一条直线，电子束的强度要增强到足以使荧光粉持久地保持明亮的存贮状态。要擦除显示的内容就要施加一定电压泛射整个管屏，使荧光粉处于暗的状态。擦除过程约需半秒钟，由于整个管屏被泛射，所有直线和字符都被擦除。因此不可能对个别线条和字符进行擦除，也不可能用作动态或动画显示。有时可以使用中间状态（透写方式）获得有限的刷新能力（见下文）。这时，电子束的强度略低于造成

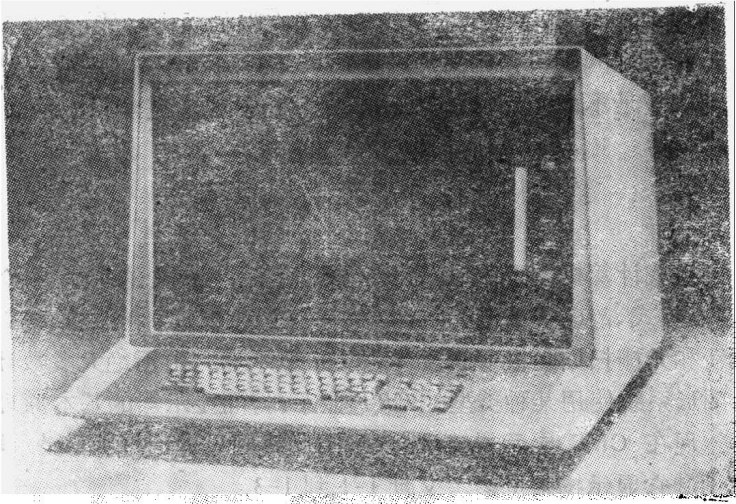


图 1-2 存贮管图形显示器

持久存贮的阈值，但仍足以使荧光粉发光。由于用这种方式得到的图象不能存贮，因此必须不断地重画才能使图象稳定可见。

存贮管显示器无闪烁现象(见下文)，因此能显示“无限”多矢量。在 8×8 英寸*正方形(对角线为 11 英寸 CRT)上，典型分辨率是 1024×1024 可寻址点(10 位)，而在 14×14 英寸正方形(对角线为 19 英寸 CRT)或在 18×18 英寸正方形(对角线为 25 英寸 CRT)上，典型分辨率是 4096×4096 (12 位)。在垂直方向上一般只有 78% 可寻址区域是可见的。

存贮管显示器是一种线画显示器或随机扫描显示器。这意味着直线(矢量)可以从任何一个可寻址点画到另一个可寻址点。硬拷贝使用方便，速度快、价格低廉。从原理上讲，存贮管显示器比笔划式或光栅扫描式刷新显示器易于编程。存贮管 CRT 显示器可以和微型计算机组合在一起形成独立的计算机图形系统，也可以组成图形终端。作为终端使用时，主计算机通过接口将文字和图形信息传送到终端。虽然可采用平行接口，但实际上还是采用

* 1 英寸 = 0.0254 米。——译者注