

Jisuanji Tuxingxue
Jiqi Zai Gongcheng Zhongde Yingyong

计算机图形学 及其在工程中的应用

王 莉 李宗保 吴志明 编著
李 方 审

人 民 交 通 出 版 社

前 言

为适应日益普及的计算机辅助设计的需要我们编写了这本书。在这本书中,我们努力把图形学理论与道路工程中的计算机辅助设计紧密地联系在一起,使读者在学完这本书后能够同时掌握图形学理论和实际应用的技能,并对图形学的发展有所了解。

本课程的参考学时数为60~80学时,先修课程为“计算机原理”、“程序设计”及有关公路设计的专业课等。本书由浅入深地对从基本原理到图形学应用的一些实际问题作了较详细的介绍。它共分基础理论和应用两篇。理论篇主要内容有:计算机图形学的发展及其应用,计算机绘图系统,直线与简单图元的生成,二次曲线与几种自由曲线的拟合,三维一般曲面与自由曲面的拟合,二维和三维图形的各种变换,开窗口,对图形进行剪辑、消隐。应用篇的主要内容是利用图形学原理对道路计算机辅助设计工作所做的一些研究成果;有用 TRUE BASIC 编写的道路CAD系统、公路透视图显示系统和用 *AutoLisp* 语言编写的能在 *AutoCAD* 软件包中运行的 RCAD 系统(平面线形设计系统)。授课时,可将第四章与第五章的内容穿插并行。从第五章开始,可逐步增加编程上机时间,或结合第二篇的内容进行讲授。本书的特点是专业性、实用性强。书后附有一些基础理论部分算法的 BASIC 程序,是用 TURBO BASIC 编写的。应用篇的算法用框图或程序写入了正文。

全书由东南大学李方同志审定。第一、二、三、四章及第九章第五节由北方交通大学王莉编写,第五、六、七章由北方交通大学李宗保编写,第八章的第一至四节和第九、十章由同济大学吴志明编写。

本书在编写过程中得到了北方交通大学计算中心,同济大学道路交通工程系许多同志的支持和帮助,我们在此谨表示诚挚的感谢。由于我们水平有限,书中难免还有一些缺点和错误,希望广大读者能给予批评指正。

编 者

1988年10月

(京)新登字091号

计算机图形学及其在工程中的应用

王 莉 李宗保 吴志明 编著

李 方 审

插图设计：汪 萍 正文设计：周 圆 责任校对：张建设

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各 地 新 华 书 店 经 销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：18.5 字数：404千

1992年3月 第1版

1992年3月 第1版 第1次印刷

印数：0001—3000册 定价：19.50元

ISBN7-114-01141-5

U·00747

内 容 提 要

计算机图形学是一门新兴科学，是计算机辅助设计的基础理论课，本书讲述了直线、曲线、曲面、图形变换、开窗与剪裁、消隐等内容，并讲述了如何进行道路计算机辅助设计，以及公路透视图等应用图形的显示方法。全书共分两篇十章和一个附录，附录中有图形部分的一些常用程序，每章后附有一定的习题。

本书可作为在校大学生和研究生的教材以及各级道路工程专业计算机辅助设计技术人员的参考书或各种计算机辅助设计和辅助制造培训班的教材。

目 录

第一篇 基础理论

第一章 概论	1
第一节 计算机图形学的发展及其应用	1
第二节 计算机绘图系统	5
习题一	16
第二章 直线和简单图元	17
第一节 图形学系统中的几种坐标系	17
第二节 直线的产生	20
第三节 字符的产生	30
第四节 多边形	38
习题二	42
第三章 曲线拟合及其显示	44
第一节 圆弧及二次曲线	44
第二节 曲线拟合	56
第三节 曲线显示	72
习题三	75
第四章 三维曲面拟合与显示	76
第一节 一般曲面	76
第二节 孔斯曲面	79
第三节 贝塞尔曲面	83
第四节 B 样条曲面	84
第五节 曲面显示	85
习题四	85
第五章 图形变换	86
第一节 齐次坐标	86
第二节 二维图形变换	87
第三节 三维图形变换	96
第四节 三维图形的平行投影	104
第五节 三维图形的透视投影	113
第六节 图形变换的实现	116
习题五	117
第六章 开窗口与剪裁	118
第一节 开窗口和视见变换	118
第二节 线段问题	120

第三节 二维图形的剪取.....121
 第四节 三维图形的剪取.....135
 习题六.....143
 第七章 隐藏线和隐藏面的消除.....144
 第一节 简化深度比较法.....144
 第二节 表优先级算法.....146
 第三节 Z 缓冲器算法.....148
 第四节 Warnock算法.....149
 第五节 扫描线算法.....153
 第六节 浮动水平线算法.....157
 第七节 曲面扫描线算法.....159
 习题七.....161

第二篇 应 用

第八章 图形学在工程辅助设计中的应用.....162
 第一节 交互式图形系统基本子程序.....162
 第二节 交互式Road CAD系统设计.....166
 第三节 计算机绘图.....192
 第四节 TJRCAD系统简介.....199
 第五节 用Auto CAD开发的公路线形设计系统.....214
 第九章 公路平面设计图的绘制.....226
 第一节 公路设计线, 边界、地界的绘制.....226
 第二节 公路等高线的绘制.....230
 第三节 地物的绘制.....245
 第十章 公路透视图的绘制.....249
 附录 基础理论部分的常用程序.....254
 参考文献.....287

第一篇 基础理论

第一章 概 论

随着电子计算机的不断发展, 作为一门新兴科学——计算机图形学也正在被越来越多的部门更广泛地应用起来。所谓计算机图形学就是在计算机的辅助之下产生图形的科学。其中目前发展最快的交互式计算机图形学是这门科学中的一个重要组成部分, 它利用人一机对话、人一机交互的方式在计算机上作各种图形。图形学的发展使人们进行图形通讯、图形交互设计的愿望已成为事实。

本章将从计算机图形学的发展历史开始, 简单地介绍一下计算机图形学的软件和硬件, 以及计算机绘图系统。

第一节 计算机图形学的发展及其应用

目前, 计算机图形学正在航空、造船、汽车、电子、建筑、教育等方面不断地满足着设计及工程技术人员的需要。与此同时, 这一学科本身也正在被工程师们不断地丰富和完善着。

一 设备及硬件的发展

在计算机发展初期, 人们可以利用行式打印机、电传打字机等硬拷贝设备打印出粗略的图形。这种图形学被称为“被动的”、“脱机的”计算机图形学。如图1.1.1为 $y = x^2$ 的打印图形。1950年美国麻省理工学院的旋风计算机(*whirlwind*)第一次使用了计算机驱动的阴极射线管(CRT)显示器作为计算机输出部件, 计算机可在此显示器上显示要输出的图形。1958年, 美国Calcomp公司试制了第一台滚筒式自动绘图机。50年代中期, 美国SAGE空中防御系统第一次使用了能够指挥和控制的CRT显示控制台。美国麻省理工学院林肯实验室的伊凡·萨瑟兰德(Ivan Sutherland)在1962年发表了题为《SKETCHPAD: 人一机通信的图形系统》(SKETCHPAD: *Man—Machine Graphical Communication System*)的博士论文, 首先提出了“计算机图形学”(Computer Graphics)这一术语, 引入了分层存贮符号的数据结构, 开发了交互技术; 可用键盘和光笔实现定位、选项和绘图, 还正式提出了至今仍在延用的许多其它基本思想和技术, 从而奠定了计算机图形学作为一门新兴科学的基础。60年代中期, 美国、英国、法国一些汽车、飞机制造业的大公司对计算机图形学

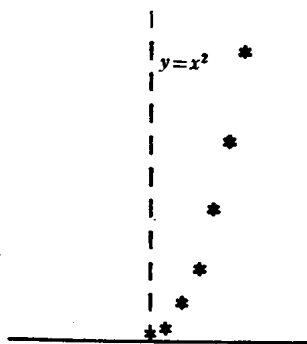


图1.1.1 $y = x^2$ 的打印图形

开展了大规模的研究。在计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助制造 (CAM) 中, 人们利用交互式计算机图形学实现了多阶段的自动设计、自动绘图和自动检测。在这一时期, 计算机图形学的输出技术也得到了很大的发展, 60年代中期开发的向量显示器包括一个显示处理器, 一个显示缓冲存贮器和一个阴极射线管CRT及其相关的电子部分。缓冲存贮器存贮计算机产生的显示清单、显示程序及绘制字符命令: 显示处理器将这些命令加以翻译, 把数字量转换成模拟电压, 使之能移动电子束写在CRT的屏幕上, 显示处理器必须至少以30次/s的频率循环地处理显示清单, 刷新荧光屏, 才能避免闪烁。如图1.1.2所示, 转移指令使显示过程回到显示清单的开始部位, 以便实现图象的周期性刷新。

60年代后期出现了存贮管式显示器, 它不需要缓冲和刷新, 显示大量信息也不闪烁。但它不具有显示动态图形的能力, 也不能进行选择删除。它的出现可使一些较简单的图形实现交互处理。目前已有与刷新技术相结合的存贮管式显示器, 使这类设备的交互功能得到了提高。如图1.1.3所示。

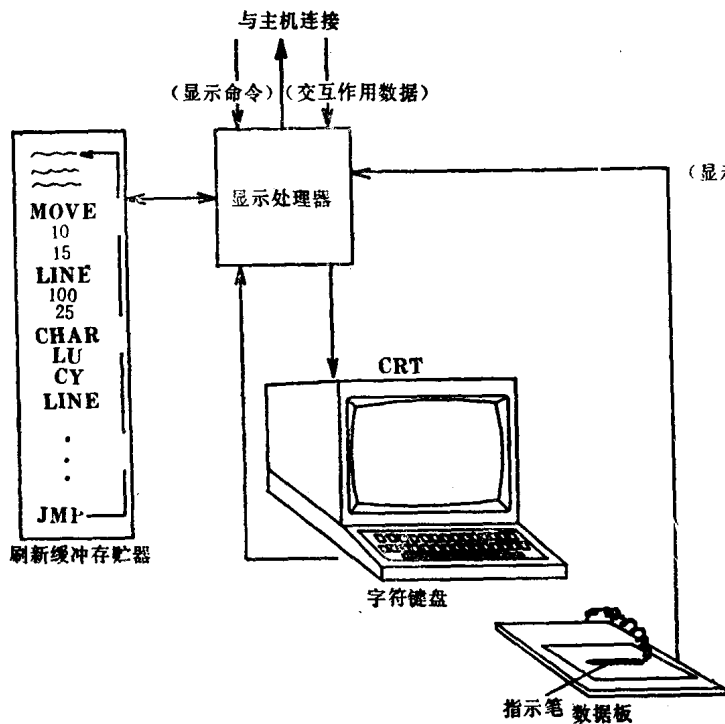


图1.1.2 刷新显示设备

70年代中期, 出现了基于电视技术的光栅图形扫描器, 在光栅显示器中, 线段、字符及多边形等显示图素均存贮在刷新缓冲存贮器中, 这些图是按照构成图素的点之亮度存贮的。这些点被称为象素。一个个象素构成了一条条的光栅线。一系列光栅线又构成了一幅完整的图象。这样, 光栅图象就是一个覆盖全屏幕面积的矩阵。整个图象是按一定的顺序逐条扫描出来的光栅。每秒至少30次, 每次一条光栅线, 从顶到底顺序扫描, 它仅靠改变每条线上

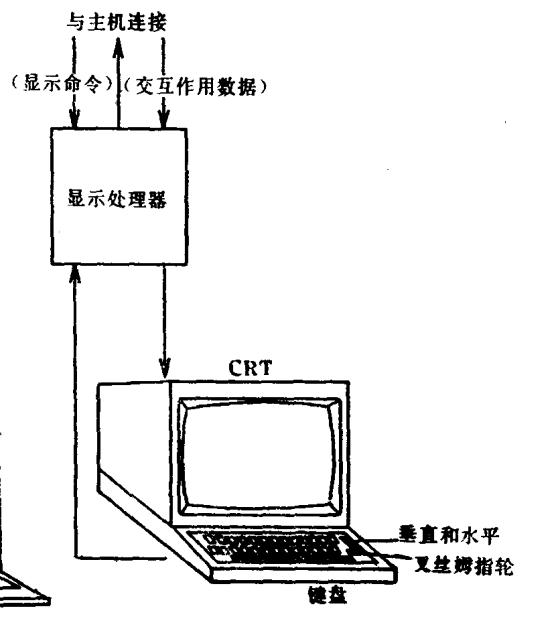


图1.1.3 存贮管设备

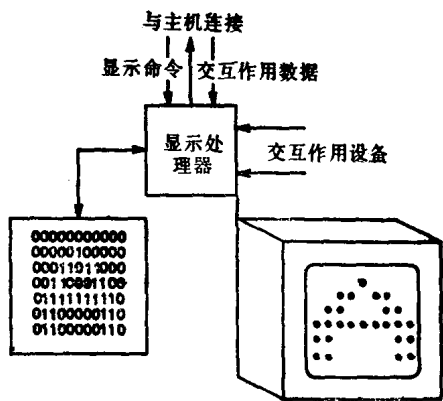


图1.1.4 刷新存贮器中象素矩阵的值与显示器显示的图

各像素的电子束强度来得到明暗相间的图象。如图1.1.4所示。

二 软件开发

计算机图形学软件是指那些指示计算机驱动各种显示设备和绘图设备做各种图形的命令解释、存贮程序和控制各种图形输入输出的控制程序。一般来讲,对于各种设备有着各种不同的软件。早期的图形软件对于各自的设备有着很强的依赖性,随着图形学的不断发展,人们逐渐意识到了研制独立于设备的计算机图形软件的重要性,并开始了对软件可移植性的研究。能驱动各种不同类型的显示设备,能独立于具体设备的高级图形软件包被称之为具有可移植性的图形软件包。随着计算机的广泛使用,70年代中期开始的一个很有意义的进步是普遍认识到软件标准化的重要性。1974年美国国家标准化局召开了“与机器无关的图形技术”会议,会后,美国计算机协会(ACM)成立了一个图形标准规范化委员会。1977年该委员会提出了“核心图形系统”(Core Graphics System)的规范,1979年又作了第二次修改。该规范的范围是具有图形输出功能和具有交互功能的二、三维直线图形、光栅扫描图形技术等等。德国提出了GKS规范,虽只有二维图形功能,但它采用了虚拟设备接口、虚拟设备文件以及工作站等概念。预计在不久的将来,世界计算机协会将会推出更多功能的图形软件标准。要想让一个图形系统无修改地在任意两套设备上运行,使其具有绝对可移植性是困难的。但如果要求只对源程序作少量修改即可运行还是可行的。

目前,在图形系统中,系统规范所涉及的主要包括二维、三维的直线、曲线、曲面、开窗、剪取、隐藏面、隐藏线、阴影、浓淡等等。这些问题将在本书以后的章节里逐一加以论述。

三 计算机图形学的应用

计算机图形学被应用最广泛的是在工业、商业、政府统计部门、教育、娱乐等方面。最近西方一些国家还将它用于家庭。它已涉及了几乎所有的领域。下面是图形学一些有代表性的方面。

1 交互式绘图

计算机图形学经常被用来绘制数学、物理以及经济函数中的二维、三维图形,如各种函数曲线、直方图、线条图、表示百分比的饼图、工作进程图等。还可用来在纸上或胶片上产生高精度的地理或其它自然现象的图形,如地理图、点貌图、地形图、气象图、等值线图及人口密度图等等,如图1.1.5所示。

这些图的特点是以有意义的和简明的形式表示数据模型和变化趋势,以增强人们对复杂现象的理解,它比起一个个枯燥数字来更容易被人们所接受。

2 计算机辅助设计与辅助制造

在计算机辅助设计(CAD)和辅助制造(CAM)[Computer Aided Design and Computer Aided Manufactory]中,交互式图形技术可被用来设计机械、电气、电子装置的元部件和各种结构,模具加工,建筑工程等。如:化工厂、发电厂的房架结构,各种管道布置图,建筑物的外观模型,室内采光分析,机械行业中汽车车身、飞机和船的壳体中三维曲面及其内部结构的设计与制造。有时,我们仅着重于产生元件和部件的精确图形,如联机或脱机绘图等。然而更常用的是利用计算机的可交互性在计算机上直接设计元件模型,把这个模型看作是一个模拟器,在计算机上试验它的机械、电场或热性能,然后把试验得到的系统性能返回给显示控制器前的用户,以便作进一步的设计修改和测试,经过反复试验

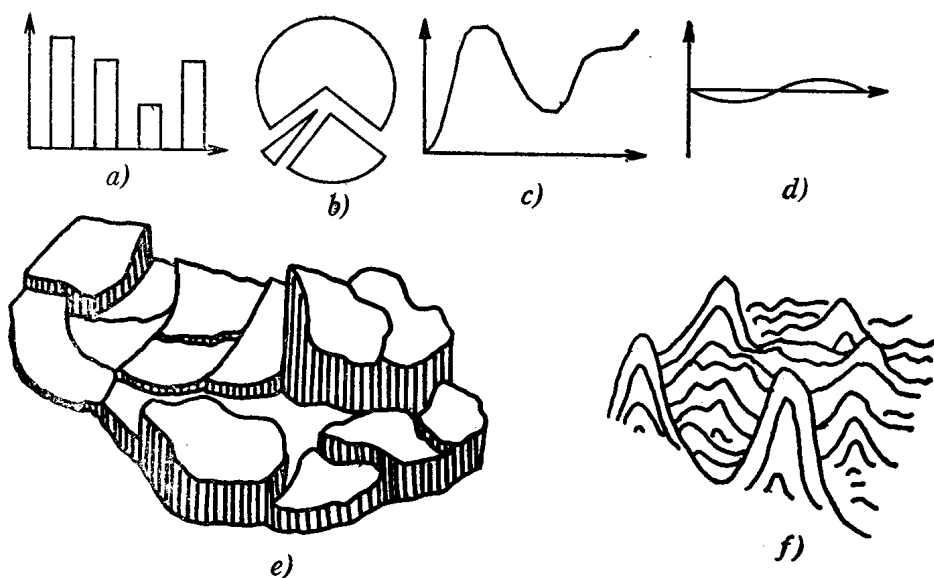


图1.1.5 交互绘图的几个例子

a) 直方图; b) 饼图; c) 销售曲线; d) $\sin(x)$ 函数; e) 某区人口密度图; f) 某地区地貌图

后, 当元件的结构和性能均达到设计要求时, 就可用其它应用程序再对设计好的数据进行处理, 以便制出部件表、材料单、图纸, 如果是需进行机械加工的机械零件、部件等, 还可得到数控机床用的数控加工纸带或磁带等等, 利用这些纸带和磁带, 可在数控机床上加工出理想的部件来。例如, 设计人员想设计一座桥梁。他可先利用计算机的交互性能在屏幕上得到结构的三维图形, 然后利用应用软件向结构加载, 同时进行有限元分析, 看是否满足承载要求, 如不满足则需继续修改结构, 直至满足承载要求为止。最后还可从美观的角度出发, 对结构的外观进行修整, 直至满意为止。然后联接绘图机, 绘出施工图, 交施工部门施工。又如: 当设计人员要设计一条线路时, 可先输入数字地形模型, 在屏幕上显示二维地形图, 设计人员利用交互功能在屏幕上直接定线, 继而设计纵、横断面, 接着动态显示驾驶员在该线路上以各种速度驾驶时的透视图, 设计人员可根据透视图的合理与否重新修改线路平面和纵断面, 直至感到满意为止。根据该线路的平纵断面资料, 计算机又可计算出各种工程量和费用, 并硬拷贝输出施工所需的各种图纸和表格, 交施工单位施工。再如: 塑料水杯模具, 工程师们可先在计算机屏幕上用对话设计功能绘出较理想的外观模型, 这是一个三维图形, 为了测试水杯各处的承载能力和变形情况, 可在计算机上为水杯加上同水一样的荷载, 这时应用检测软件就可检测水杯各处的受压和受弯情况, 并在显示屏上显示变形情况。如果这时工程师对计算出的和观察到的值不满意, 可直接在屏幕上修改设计, 再检测, 直至所设计的水杯不论在外观上, 还是在承载和用料方面均达到令人满意为止, 然后将各项设计数据和加工工艺指标写到磁带、磁盘上或在纸带上穿孔, 再把该带或盘放到数控机床上, 控制机床切削出设计的模具, 这就是计算机辅助制造 (CAM)。

3 模拟系统

实时模拟图象正在被越来越广泛地用于航天、航空、驾驶和试验等项工作。所谓实时模拟就是由计算机产生表现真实图象和模拟对象随时间变化的行为和动作。通过观察以图形方式表现出的变化效果, 我们不仅可以研究数学图形, 而且可以研究科学现象的数学模型。

如：液体流动、热流、相对论、核反应、化学反应、生理系统与器官，以及有负载时的结构变形等等。还可用于飞机模拟训练。飞行模拟训练就是让飞行员坐在一间特制的屋子里，四周模拟驾驶舱的各种设施，面前摆着各种仪表和数字显示器，周围墙壁上在应该有窗的地方放上大型显示屏，当显示屏显示出各种外部景物时，驾驶员的感觉如同真正驾驶在天空时的情况是一样的，对于屏幕上出现的各种景物，如云雾、烟、夜晚灯光，以及不同大小和形状的有关飞机、飞行物等特殊景物，驾驶员作出各种反应，操作飞机运行，这时各种仪表显示器显示出各种相应数据，这一切都同在天上发生的一样，驾驶员在这种驾驶室内可以用最低廉的费用、最安全地学会驾驶。为训练月球登陆，宇航员在模拟器上演习驾驶登月舱等。

计算机图形学为这些试验，训练提供了真正安全、迅速而又极为低廉的试验条件和比较、存贮资料的手段。

4 制作动画片

用图形学的方法产生动画片，其形象逼真、生动。在使用高分辨率显示器的情况下，图象具有很高的欣赏价值。更重要的是，用这种方法制作动画片成本低。因为画动画片时，往往一幅图和下一幅图之间仅有很小区别，或背景完全相同，用人来完成，就不得不做大量重复性工作，而用计算机来做，这些重复性的工作可存贮在计算机内，需要时直接调出来，再加以稍微改动就成了下一幅图，还有时一幅图和另一幅图之间景物不变，但比例发生变化，或角度发生变化，这时就可以利用图形学中窗口、旋转等功能，毫不费力地完成这一工作，既准确又迅速，可以轻而易举地解决人工绘片时难以解决的问题。大大地提高了工作效率，可以生产出更多更好的动画片。

5 计算机辅助教育

正在兴起的计算机辅助教育（CAI），利用计算机图形学产生各种图象、表、实验器具和实验内容等等，使教学过程更形象、直观、生动，提高了学生的兴趣和教学效果。

如化学实验课，学生从取烧杯、计量化学剂开始，一切均在屏幕上执行。先用光标把“烧杯”取来，再用屏幕上的“称”称出该取出的化学剂，放在“烧杯”里，加“水”，加“热”，学生可从屏幕上直接看到所出现的化学现象。当学生违反操作规程时，实验可能做不出结果来，即不出现预期的效果，或者发生“爆炸”等等，然后计算机将自动演示一遍做该实验的步骤。这些实验现象都能在屏幕上直观、形象地显示出来。计算机辅助教学的优点主要是节约资金，“随叫随到”，同时可以加强学生对课程的理解和增强感性知识。

以上仅仅是计算机图形学的几个最主要的用途。随着计算机的不断发展，计算机图形学一定会得到更广泛、更深入的应用，它将涉及到人们社会生活的各种领域。

第二节 计算机绘图系统

计算机绘图系统是指能用计算机和外部设备输入数据和图形信息，进行运算并在计算机屏幕上或其它外部设备上做图形输出的一整套设备及其相应的软件。硬件一般包括用于输入输出的输入输出设备和用来计算的主机部分，软件是指用于驱动各种设备的驱动软件和用于显示计算的图形软件。下面将分别作介绍。

一 输入和输出设备

总的来讲，图形输入设备就是将用户的图形数据、各种命令等转换成电信号送给计算

机，而输出设备则是将计算机处理好的结果转换成可见的图形。

目前，一般用户使用的计算机终端仅向用户提供字母键盘作为输入数据和命令的设备。但对绘图系统的一些应用来说，键盘就不太方便，不适用了。例如：用户想在屏幕上删除一个已标记过的符号。当然，用键盘输入该符号的名字可以达到这一目的，但远不如直接在屏幕上指出该符号并将其删掉来得方便。另外，如果用户想在屏幕图象中加入线或符号，尽管他能用输入该位置的直角坐标方法来定位，但如果能在屏幕上直接指出所需点的位置则会更好。尤其是当该位置与图象的其它部分有关时，这种情况更加明显。这两个例子也表明了交互性图形学的两种基本输入类型，即：标定屏幕上的已有项——选项和在屏幕上定义一个新项——定位。

理想的图形输入设备应该既能选项又能定位，但实际上没有这种多功能的设备。大部分设备只能定位不能选项，只有光笔例外。不过，我们能用软件来弥补这些设备的不足之处。用软件补充硬件的方法可产生一个具有两种能力的硬软件系统。

(一)常用的输入设备

1 键盘

图形输入设备的键盘与电传打字机、微机键盘相似。除通常所用的以 ASCII 编码的键外，还有一些功能键和命令控制键，用以在进行图形操作时完成某一特定功能。如指定图形几何变换方式等。

组成键盘的键有机械式、簧片式等接触式按键，也有磁敏元件等非接触式键。

2 鼠形器 (mouse)

鼠形器是一个带有两副轴线成正交的金属轮的小塑料盒。鼠形器的每副轮子都与一个轴编码器相连，这个编码器根据每次轮子的转动增量发送一个相应的电脉冲，计算机以30~60次/s的频率对这些值进行采样，然后由这些电脉冲计算在两个相互正交方向上的位置。如图1.2.1。

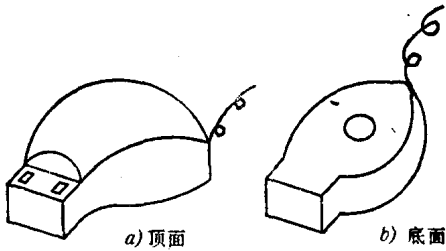


图1.2.1 鼠形器

鼠形器是很有效的选项设备，它有以下两个特点：(1)使用它时不必把它拿起来；(2)如果把鼠形器拿起来放在其它地方则光标不动。它的缺点是由于鼠形器任一个小的转动和轻微的接触不良都会引起读数时的积累误差，因此，不能用它来读纸上的数据，而且也很难写出能由计算机识别的字符。

3 光笔

光笔可以作为一种选项设备。如果用它指向屏幕上的一项，它就能从由程序定义的这一项里得到信息。光笔的两个主要部件是光电管和一个能把光笔视见范围内的所有光聚在上面的光学系统。光笔的外壳象只笔，人们可握住它并指向屏幕。在这个笔壳里还要有一个手动开关或有一个允许光达到光电管的光闸。光电管的输出被放大，然后送到检测器里面。当笔指向一个足够量的光源时，检测器被置位。

光笔还可以作为定位设备，即用光笔输入一个位置的坐标值。用光笔定位时，屏幕上没有显示对象，这时必须提供另一种光源以供给光笔用于采光，这个光源就是发自光笔的光标。因此，光笔有针对屏幕上已显示图象的采光系统和一个针对光笔本身所产生的光标的采光系统，这两个系统采的光分别控制不同的逻辑部件工作。光标的形式应是有一个对称中心

的任一方便形状，通常采用“+”字、“米”字、“回”字等。图1.2.2是光笔的工作原理图。

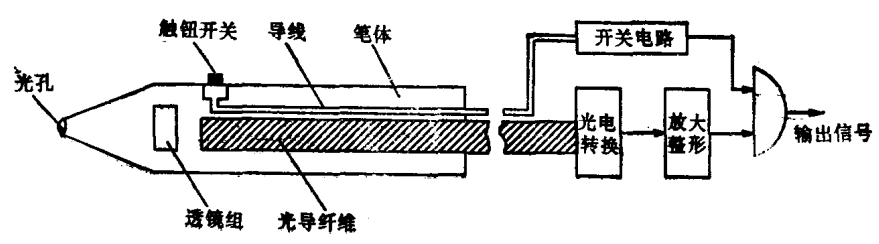


图1.2.2 光笔工作原理

光笔的性能指标主要由它指向屏幕时的反应速度来决定。高速显示器就要求光笔有特别高的响应速度。快速响应光笔可用光电倍增管等高灵敏度光电管制造。

光笔的缺点是：如果屏幕调整不合适，可能检测到假目标，而检测不到预想的物体。另外，由于用户每次都要把笔拿起来，再指向屏幕，然后再放下，这会使用户感到很疲乏。现在，越来越多的系统都采用图形输入板或鼠形器来模拟光笔的选项功能，光笔正在逐步减少。

4 图形输入板

图形输入板看上去就是一个平板，它一般与显示设备相分离，用户可用一只特制的笔在这块板上绘图，然后便可在屏幕上得到同样的图形。

1) 声波图形输入板

这种输入板是以声学原理工作的图形输入板。在输入板的两个相邻边上分别安装着条状微音器，靠近铁笔端部有一小块陶瓷，在有规则的时间间隔内，两电极之间产生一个小的瞬态放电，两个微音器都可得到由火花产生的声音脉冲，分别与两个微音器连接的两个计时器记录下产生电火花与该微音器收到声音之间的延迟。这两个延迟与由铁笔到安装微音器的边的距离成正比，由此可推算出 x 和 y 的值。

2) 声电图形输入板

声电输入板也应用了声技术。它的写表面是一片能起到延迟线作用的一排排磁质伸缩材料。当有一个电脉冲先在其 x 方向，后在其 y 方向上通过写表面时，铁笔内的感应器拾取脉冲信号，同时用计时器计算从发出脉冲到拾取脉冲之间的延迟，由这个值推算出笔所在的位置。

5 数字化坐标仪

常用的数字化坐标仪主要有超声波式和全电子式。

超声波式数字化坐标仪与超声波图形输入板的原理相同。这类设备对温度、湿度的影响很敏感，因此对工作环境要求较高，否则精度会受影响。

全电子式数字化仪利用电磁感应原理，在平板的 x 、 y 方向上有许多平行印刷线，每隔 $200\mu\text{m}$ 一条，在游标中装有一个线圈，当线圈中通有交流信号时，将产生一个电磁场。当游标在平面上运动时，印刷线上就会产生感应电流，印刷板周围的多路开关等线路可测出最大信号点，即十字交叉中心所在位置，从而得到该点坐标。其构造如图1.2.3所示。

(二) 输出设备

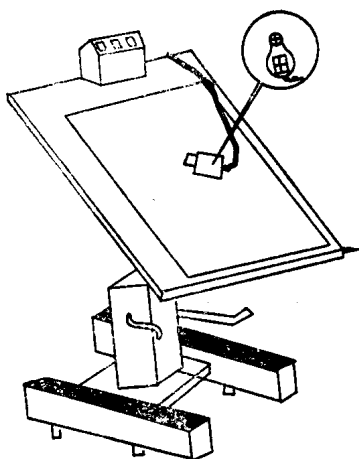


图1.2.3 全电子式数字化仪

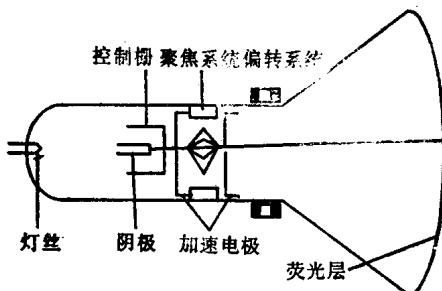


图1.2.4 CRT结构图

常用的图形输出设备一般可分为两大类；一类是用于交互作用的显示设备，另一类为输出永久性图形的绘图设备。

1 显示设备

显示设备一般都基于阴极射线管 (Cathode Ray Tube简称CRT) 的原理工作。典型的CRT结构如图1.2.4。

CRT 的简单工作过程为：电子枪发出高速电子，聚焦成电子束，经偏转部件做偏转后打在荧光屏的某一预定位置上，当 x 、 y 方向的偏转系统所加电压为变量时，即可控制电子束在屏幕上来回运动。

随机扫描显示器和光栅扫描式显示器都是基于CRT原理进行工作的显示器。

1)随机扫描显示器

这种显示器的工作原理如图1.2.5。计算机把显示文件放到指令寄存器中，显示图形时，从指令寄存器中取出指令，包括画线、画圆等作图指令和方式指令，送到显示控制器和运算器中，由显示控制器控制电子束偏转和电子束的强弱，由运算器得到的 x 、 y 的坐标放入 x 、 y 坐标寄存器，然后通过数/模转换，把数字信号变成模拟电压信号，产生图形，共同控制CRT的工作，可轰击荧光屏上的荧光粉，从而出现一条发亮的图形轨迹。这种显示器具有高度的动态性能、较高的分辨率、明显的对比度、线条质量好和易于修改等优点。但由于这种显示器需要至少30次/s重复扫描，所以画线的长度受限制。一旦线段过长，图形将发生闪烁。

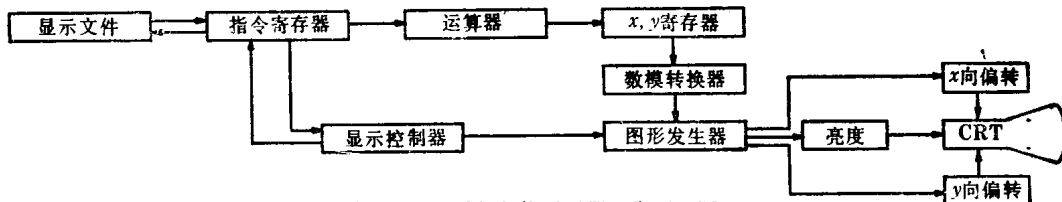


图1.2.5 随机扫描显示器工作原理图

2)光栅显示器

光栅显示器是由一个图象生成系统、一个图象存贮系统和一个图象显示系统组成，如图1.2.6。

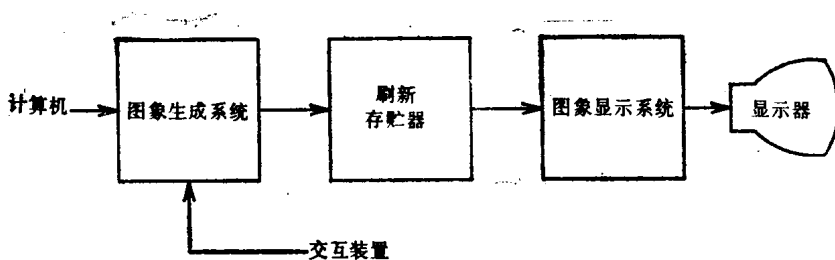


图1.2.6 光栅显示器的基本结构

图象生成系统的功能是把要输出的图素经扫描变换存入刷新缓存器中，图象显示系统不断地从刷新存贮器中取出信息，转换成两个方向的电压，控制在显示器上的图象显示。

光栅扫描显示器是基于电视原理：在CRT中装有水平偏转线圈，用以产生水平磁场和一个用以产生垂直磁场的垂直偏转线圈。在线圈中通以线性变化的电流，这样磁场的变化也是线性的。电子束在水平磁场作用下做“行扫描”，在垂直磁场作用下做“垂直扫描”或称“场扫描”。一般电视机每幅图象 512×512 个点，有些高分辨率的电视屏幕图象要扫描 1024×1024 个点，每个点称之为一个象素，为使屏幕图象不闪烁，每秒钟至少扫描30次，每个象素还可选择 $2^8 = 256$ 种灰度等级和 $2^6 = 64$ 种颜色，因此，要保留屏幕上所有象素的全部属性需要一个很大的存贮器，这个存贮器通常被称为帧缓冲存贮器，它和显示控制器的关系如图1.2.7所示。

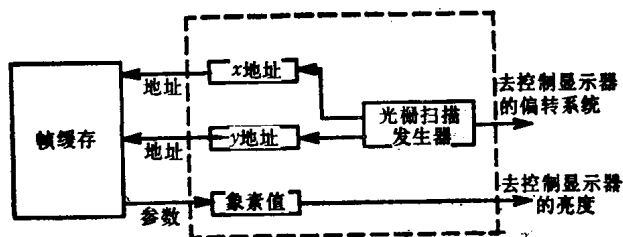


图1.2.7 光栅扫描显示器的帧缓冲存贮器和控制部件

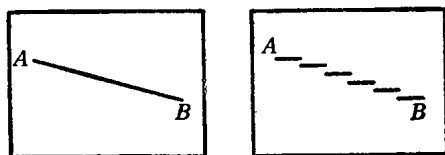


图1.2.8 光栅显示器中斜线的阶梯效应

光栅扫描显示器具有许多优点，它不仅可以显示物体的轮廓线、特征线等线性图形，而且可以显示由多种灰度和色调填充的面图形，使屏幕能输出具有真实感的立体图形。它还具有良好的动态性能，宜于做模拟器，但是它的交互响应慢，输入信息也较费时间。另外，如图1.2.8所示的斜线的阶梯效应很难解决。

其它图形显示设备还有：等离子显示板、液晶显示器等，但目前由于种种原因尚未达到实用阶段。

2 绘图设备

1) 滚筒式绘图仪

滚筒绘图仪是使用压紧轮把图纸紧贴在滚筒表面并随滚筒旋转产生 x 方向的位移，绘图笔在导轨上作 y 方向的移动，两个方向运动的合成即可绘出任一图形。 y 方向导轨上的笔架可翻转一个小角度，这一翻转可实现抬笔、落笔。有些绘图仪还附加笔架，在附加笔架上放各种

颜色和各種粗度的筆，當向繪圖機發出更換筆的命令時，繪圖機可自動換筆，繪出更令人滿意的圖案。

這種繪圖儀一般分為兩大類，一類是單圖幅滾筒式繪圖機，這類繪圖機只能繪制在 x 方向上有一個圖幅大小的圖，有 4 號圖紙、1 號圖紙等等，這類繪圖機如圖 1.2.9 所示。它可用來繪各種一般常見的機械圖、建築圖等等，但無法完成公路平、縱斷面圖之類在一個方向上的長度比另一個方向上的長度大得多的圖。

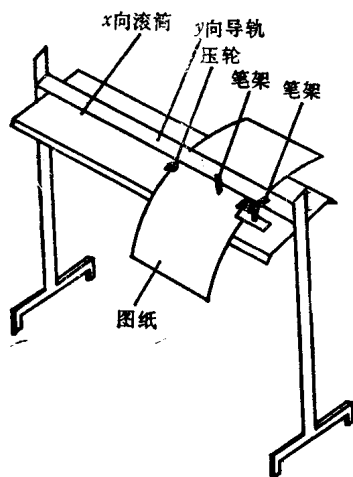


圖 1.2.9 單幅面滾筒式繪圖儀

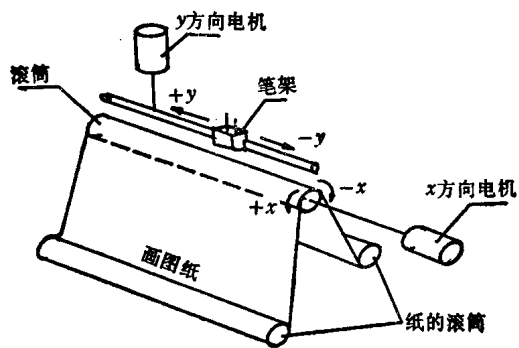


圖 1.2.10 連續式滾筒繪圖儀

另一類是不定幅連續滾筒繪圖儀，這類繪圖儀在 x 方向上不限長，繪圖紙卷在紙筒上，理論上可畫任意長，只是受紙筒大小的限制。這種繪圖機可用來繪帶狀地形圖、道路縱斷面圖等，且由於紙的兩端分別卷在紙筒上，所以繪圖精度比單幅滾筒式高得多。如圖 1.2.10。

滾筒式繪圖儀結構簡單，易於操作，價格較便宜，但精度、速度不能太高。畫出的線條在低精度情況下呈鋸齒狀。

2) 平板式繪圖儀

平板式繪圖儀將圖紙固定在平板面上，繪圖筆可沿橫梁導軌做 y 方向移動，而橫梁又能在平面上的 x 方向移動，這兩個方向的合成運動可到達平面上的任一位置。

這類繪圖儀也可分為兩種，一種為機械驅動式，如圖 1.2.11。它的缺點是速度慢（國產一般為每秒幾米，國外有的可達每秒十幾米）。由於磨損大，故精度容易下降，壽命較短。另一種是平面電機驅動式，如圖 1.2.12。它用單向脈沖電動機驅動。電機的可動部分與不

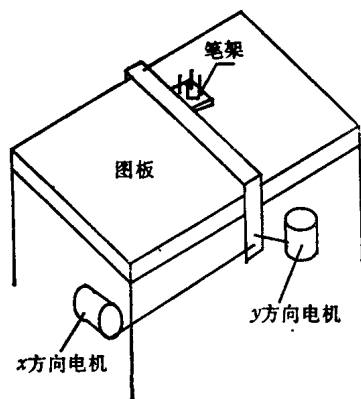


圖 1.2.11 機械式平板繪圖儀

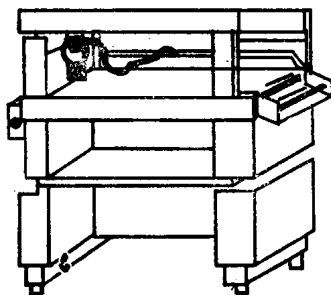


圖 1.2.12 電機驅動式平板繪圖儀

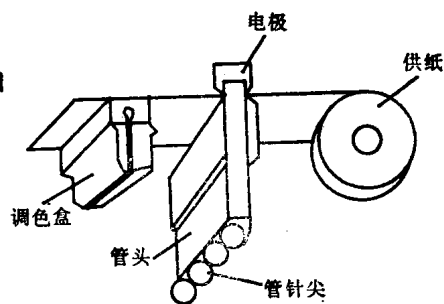


圖 1.2.13 靜電繪圖儀示意圖

动部分均为平板。由于可动部分的重量较轻，动子和定子之间采用空气轴承，因此，可有较高的速度和加速度（120m/min左右）。由于磨损小，故寿命较长，精度较高。它的缺点是体积大、笨重、不灵活且价格昂贵。

3) 静电绘图仪

静电绘图仪是打印机和绘图仪的结合。它的原理是：当程序控制的电压作阵列式输出，并作用在管头的管针尖上时，被选中的针尖就在管头下面通过的纸上产生一个极小的静电点，然后暴露在液态调色盒下，产生图象或字符。如图1.2.13。它的分辨率较高（4~8点/mm）。能输出具有明暗度的平面、曲面图形，可靠性高，安静。但线条有锯齿状，所用纸张特殊且价格昂贵。另外，由于整个绘图过程对计算机负载较重，所以需要脱机工作。

随着新技术的发展，将会有更多新型绘图仪问世，它的发展趋势是灵活、精度高和价格便宜。

二 交互技术

现在，我们要讨论一些更有效的和更方便使用的交互性图形输入技术。交互性图形输入技术是程序设计人员设计一个交互性图形学应用程序时所必须使用的技术。只有使用这些技术，程序员向用户提供的应用软件才能真正做到和用户进行交互作用，才能进行有效的人-机对话。使用了这些技术可随时随地让用户知道自己正在做什么，也让计算机知道用户想要做什么，以便使计算机能帮助用户更好地按照用户自己想像的方式、方法完成各项工作。通过程序员对这些技术进行选择，他将向用户提供一个带有一组操作命令的程序。这组命令可使用户利用既有的各种输入输出设备，绘制或修改图形。程序员的工作是要定义各种设备在各种状态下的功能，定义它们的作用域，定义既有图形的可访问区和访问的方式方法。当程序员为这些设备写程序时，除考虑设备的特殊功能外，还要考虑以下三个因素：

- ①用户想要做什么？
- ②应用程序需要哪些输入信息？
- ③怎样显示及计算机如何帮助用户工作？

下面讨论一下如何使用交互技术解决这三方面的问题。

1 反馈技术

反馈技术是交互性图形学的一个重要组成部分。使用反馈技术可减少用户对自己动作效果的不确定性。例如：当用户选择一个符号并想删掉它时，如没有反馈信息，他就无法知道图的其它部分是否也随之删掉了，图形反馈会告诉他哪些部分将受到影响。他的交互效率会随之有很大提高。这种反馈技术一般采用图形反馈技术，如改变受影响部分的图形线型、颜色等等。另外反馈还能帮助新用户使用还不太熟悉的程序，向用户提供必要的提示和帮助信息，在执行一个交互性命令时，使用户随时知道自己该做什么工作。当用户不知道如何使用交互命令时，向他提供解释信息。这种反馈技术一般采用文字反馈，即在文本屏幕上显示必要的文字信息。由此可见，反馈技术是一种必不可少的交互技术。

2 定位技术

定位技术是一种最基本的图形输入技术。定位就是用户先把光标或跟踪十字标移到屏幕上所希望的一个区域，然后通过按钮或敲键的方式通知计算机，使计算机记录下光标所在的位置。约束技术是定位技术中必不可少的一项。在交互图形学中，有时用户想要使输入的定位信息与屏幕上已有的某个信息相一致，如想要找到屏幕上已定义的一个点等等，在这种情