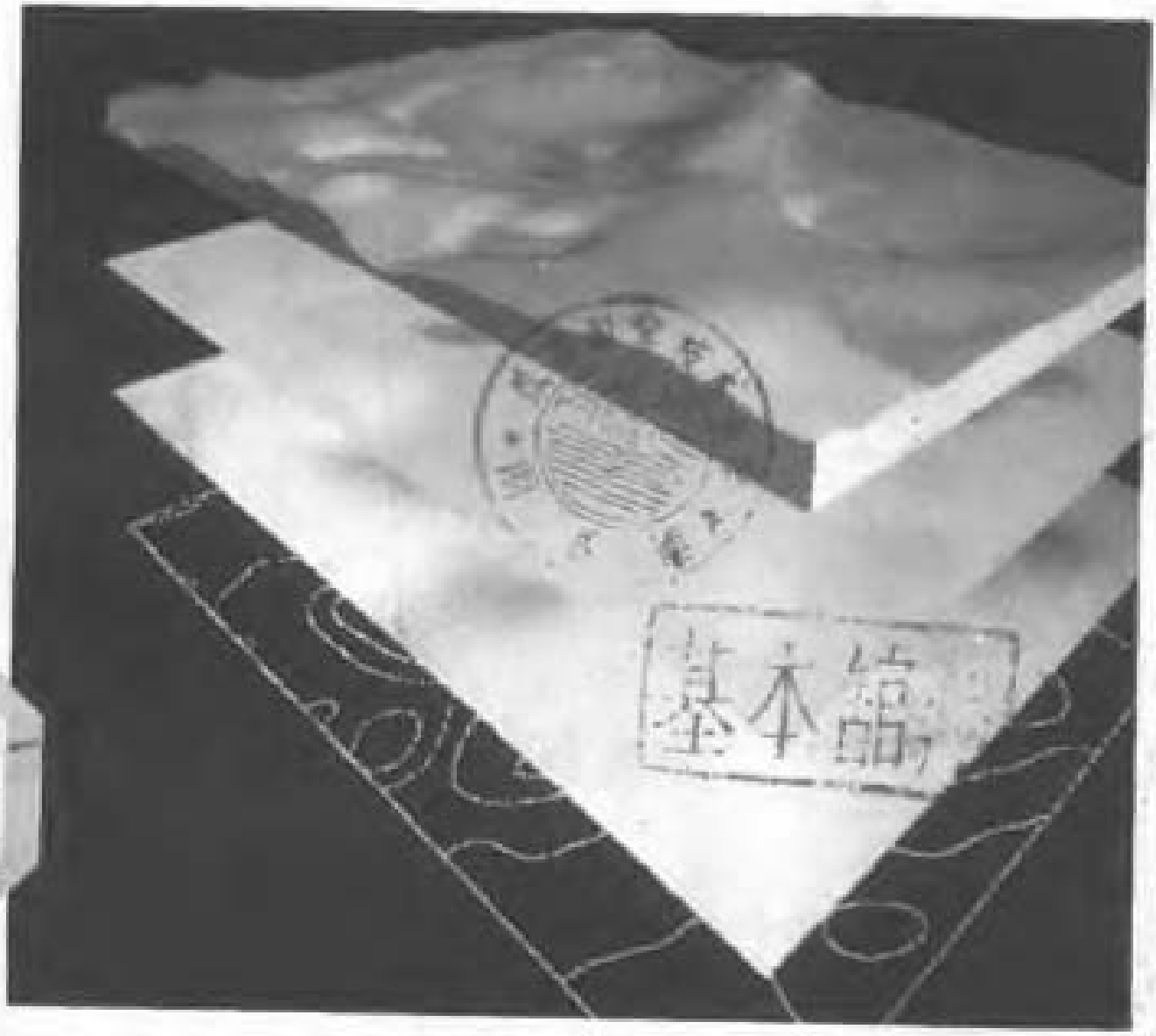
高等学校教学用书

936777

遥感数据的计算机处理与地理信息系统

彭望琭　编著



责任编辑 / 郭瑞涛
封面设计 / 李葆芬

(京)新登字 160 号
ISBN 7-303-01286-9/K · 41
定　　价：4.25 元

936777

高等学校教学用书

遥感数据的计算机处理与地理信息系统

彭望琭 编著

TP751.1
4201
北

北京师范大学出版社

(京)新登字 160 号

高等学校教学用书

遥感数据的计算机处理与地理信息系统

彭望琭 编著

*

北京师范大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行
中国科学院印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：12.375 字数：306 千
1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷
印数：1—3500

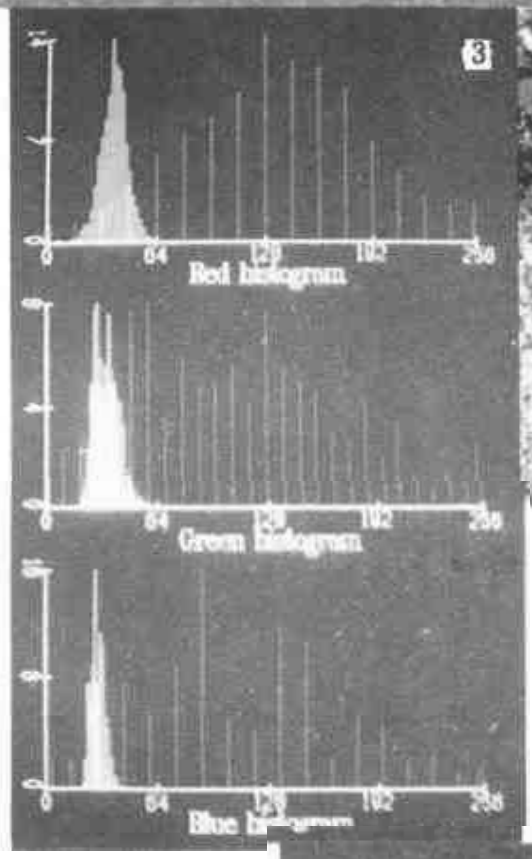
ISBN 7-303-01286-9/K·41

定价：4.25元



1. MSS 北京城区附近标准假彩色合成图(波段 4、2、1 分别赋予红、绿、蓝色)。

2. 图 1 经过灰阶对比度拉伸处理后的彩色合成增强图，增强后最小灰度值是0，最大灰度值是255。图中加入的黄绿框为作监督分类前选择的训练区。

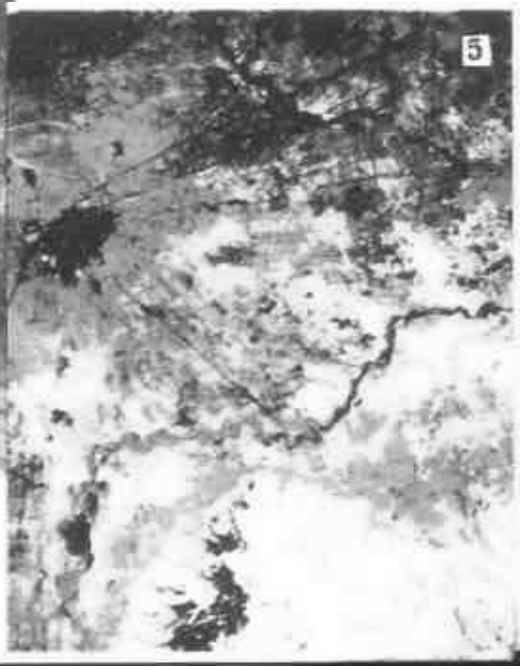




3. 图 1 与图 2 的直方图相比，从上至下分别为红、绿、蓝三个波段，桔黄色图为增强前的直方图，蓝色图为增强后的直方图。



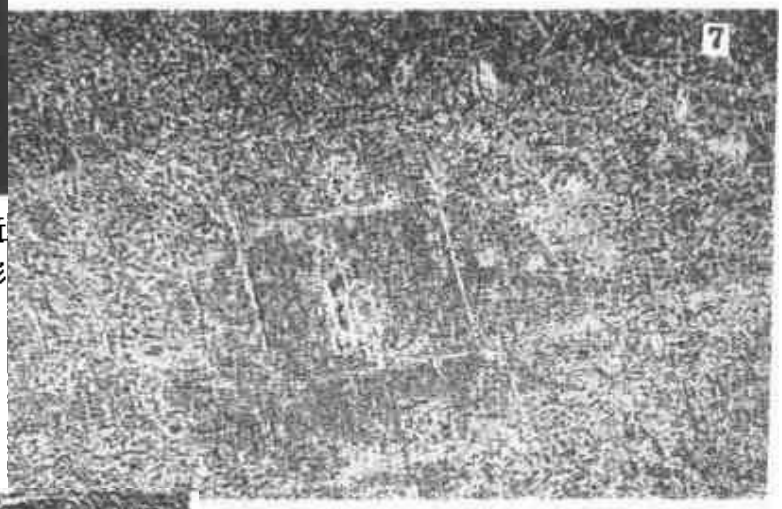
5. TM 影象，山西省阳高地区波段 4、3、2 彩色合成并作直方图均衡化处理后的图象。



4. TM 影象，山西省阳高地区波段 4、3、1 彩色合成并作直方图均衡化处理后的图象。

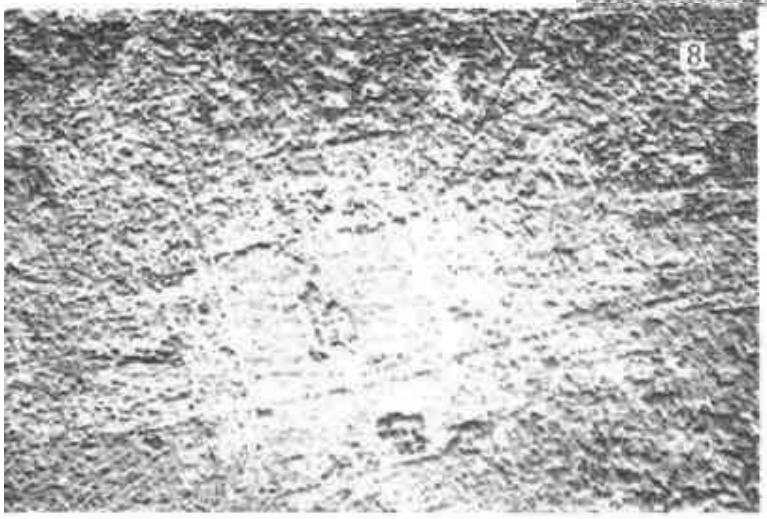


6. 密度分割，山西省柳林县DEM，按高程分级作伪彩色的密度分割处理，不同高度段给予不同颜色，清楚看出东高西低的地形特征，西边是黄河，中间的三川河流入黄河。

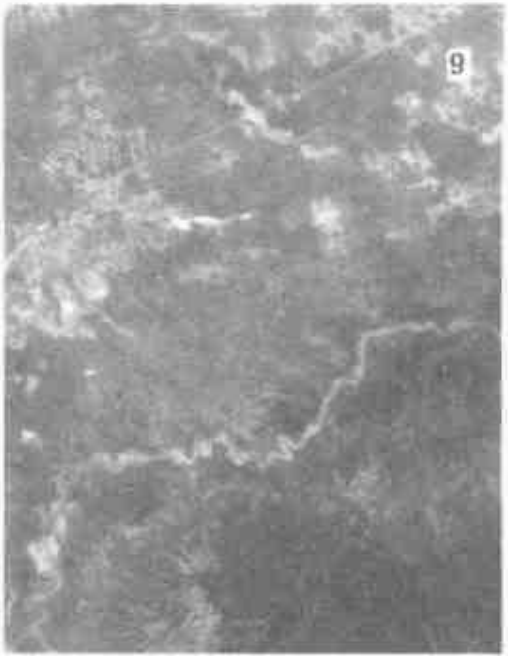


7. 拉普拉斯算法进行锐化。北京城区附近MSS波段4,2,1分别作拉普拉斯运算后彩色合成，突出边界。

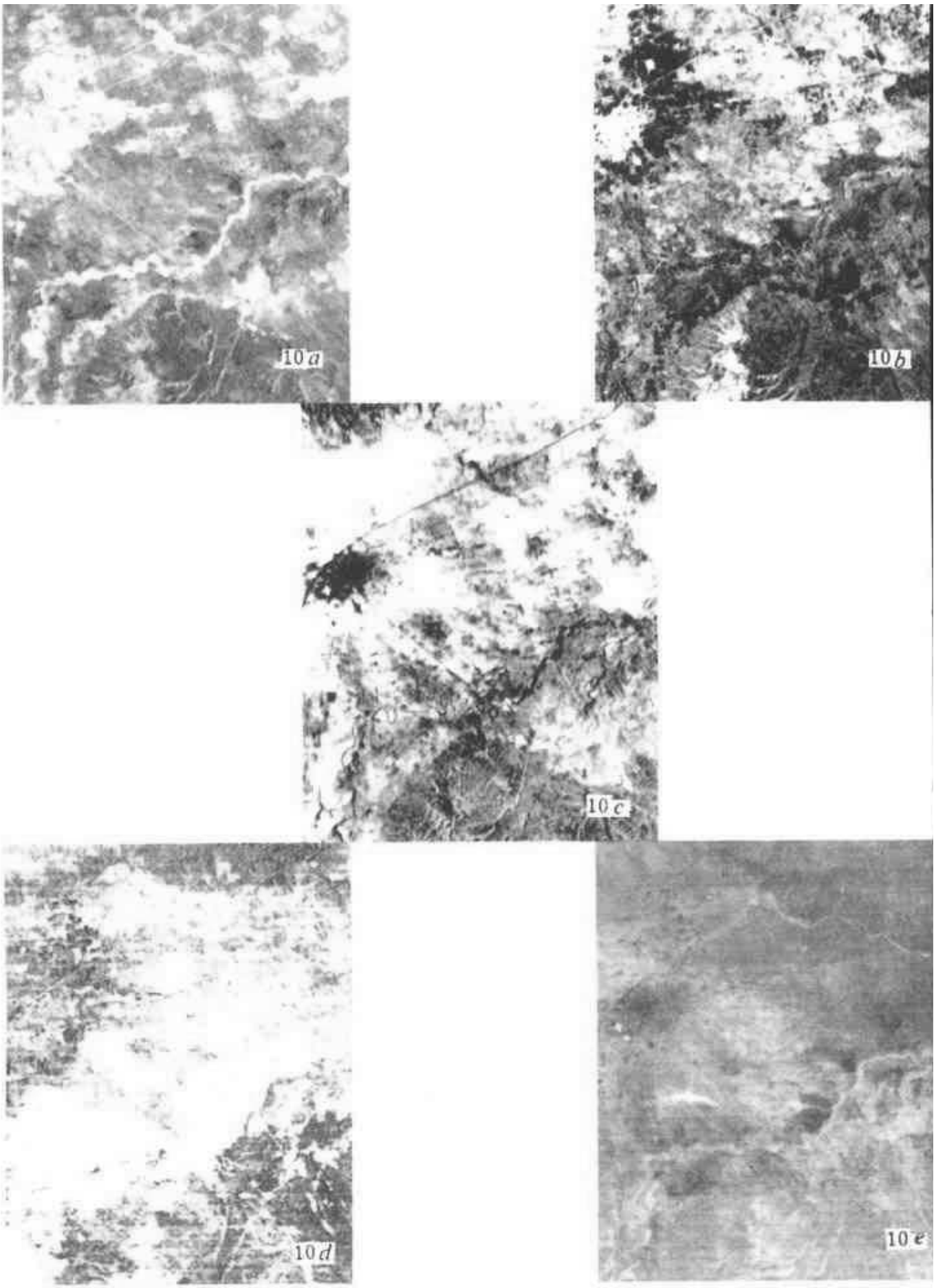
模板为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$



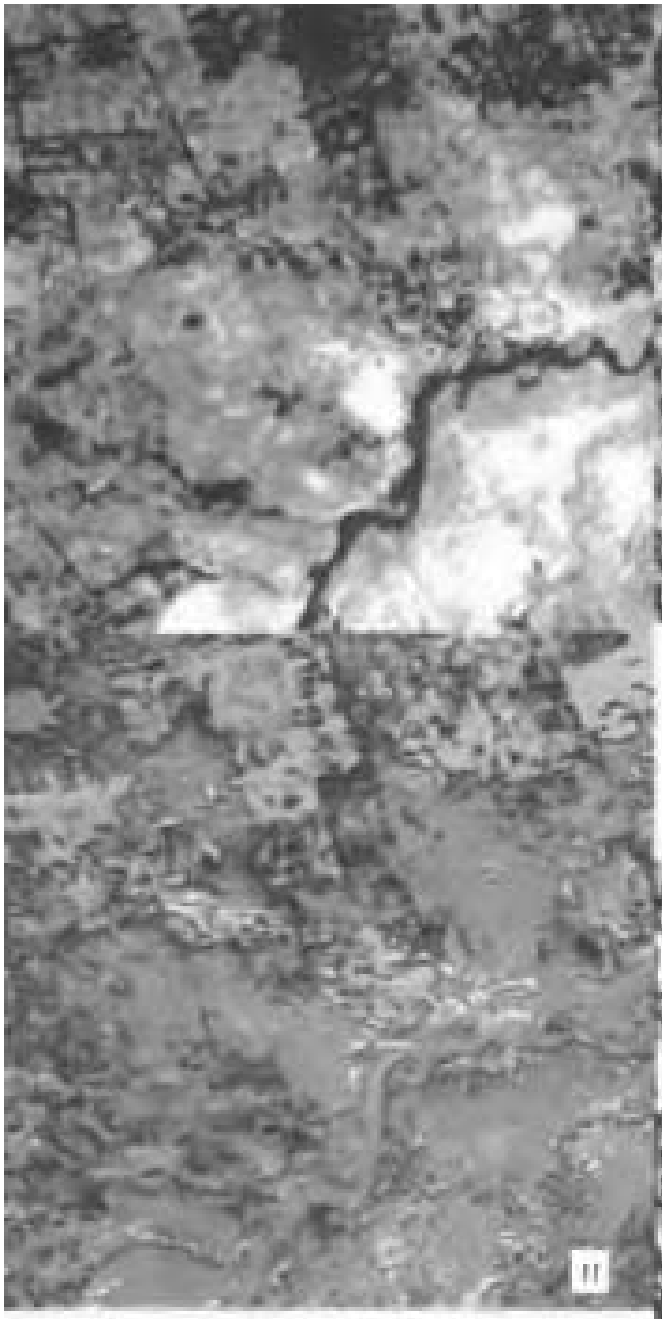
8. 高斯高通滤波器作锐化。北京城区附近MSS波段4作快速傅立叶变换(FFT)到频域后，用高斯滤波器作高通滤波，再作反傅立叶变换后，目的在于突出边界，图中可见清晰的北京老城廓等线条特征。



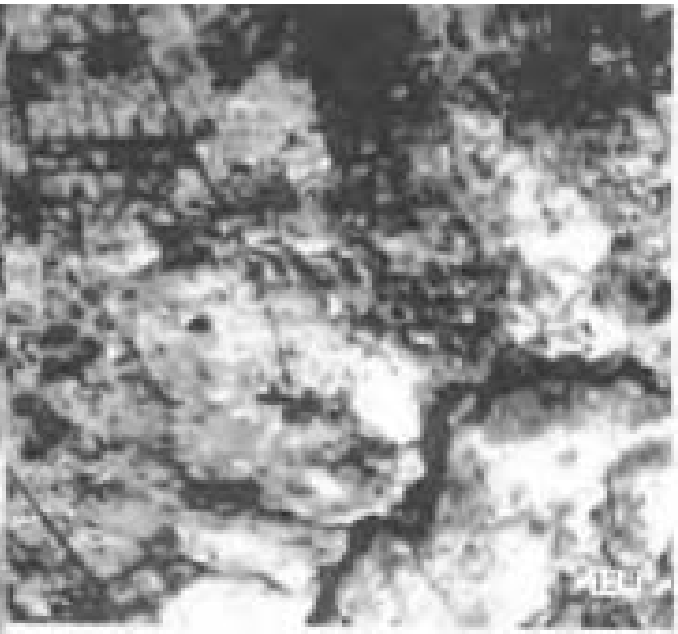
9. K—L变换后的前三个主分量彩色合成图象，使用山西阳高地区TM波段1—5和7作K—L变换形成，数据量减少但信息量保留。



10. K—L变换后前五个主分量对比，使用数据与图9相同，图中可见从KL1至KL5，信息量逐渐减少而噪声逐渐加大，到KL5只有少量线条信息，其他几乎全是噪声，可见只取前三个主分量信息量已足够。

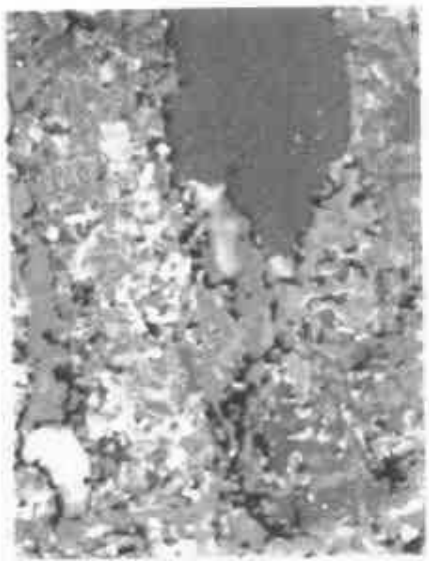


11. K—T变换(下)与标准彩色合成(上)对比。由两期高附近TM影象对(1—5和7波段)K—T变换后取前三个互意义的分量彩色合成，红是亮度基波1，蓝是非植被的裸田和河滩地，深蓝是水或湿地。TM标准彩色合成由波段4、3、2分别赋予红、绿、蓝色形成。



12. K—T变换后前三个分量对比。选取数据与图11相同。第一分量是亮度分量，白色为裸露土地。第二分量是绿度分量，白色为作物长势良好区。第三分量是湿度分量，白色为湿度最大区：河道或湿地等。

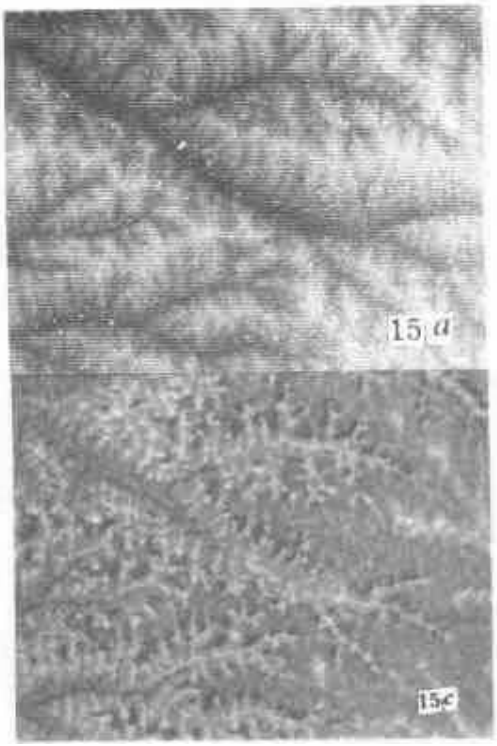


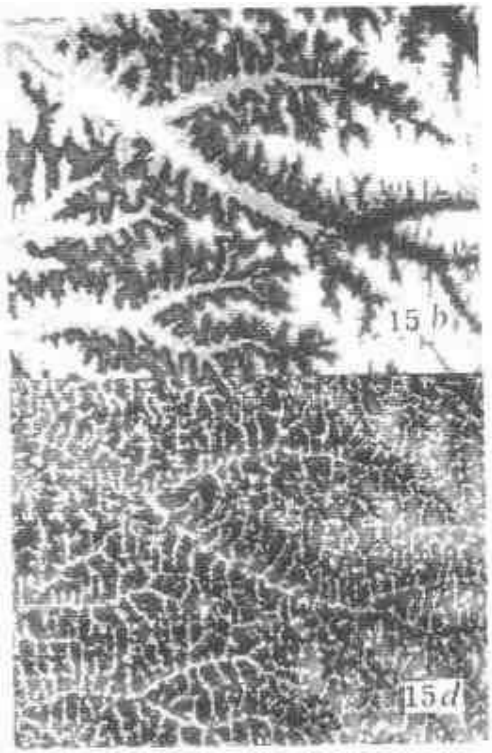


13. 分类后类别图象。用 TM 影象对双阳县部分地区作监督分类。用最大似然分类法对土壤分出一级类别九种和二级类别若干，如水体、草甸土、黑土、白浆土、水稻土、沼泽土、石质土等。图中可见类别地块过细碎，黑色为难以区分的"拒分类"。

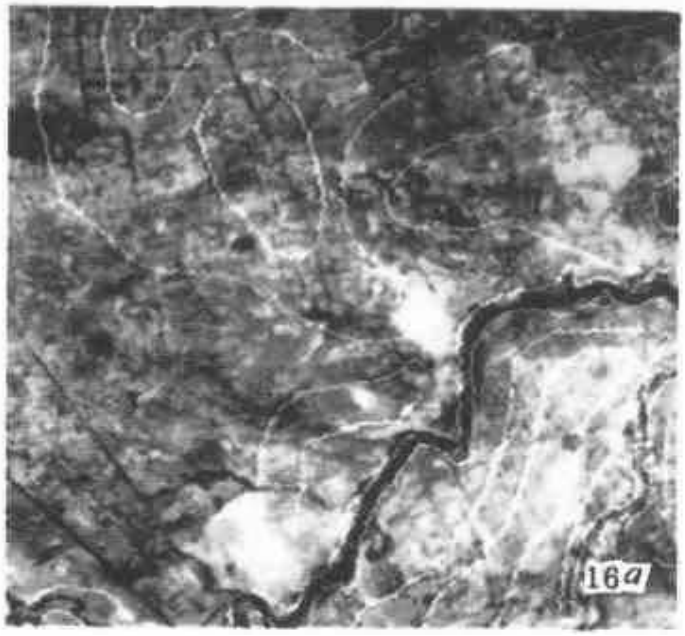


14. 分类后处理，为使分类结果接近专题图象，将细碎部分合并，并使拒分类象元归入附近类别。与图 13 比较，类别区域比较整齐，更接近实际。

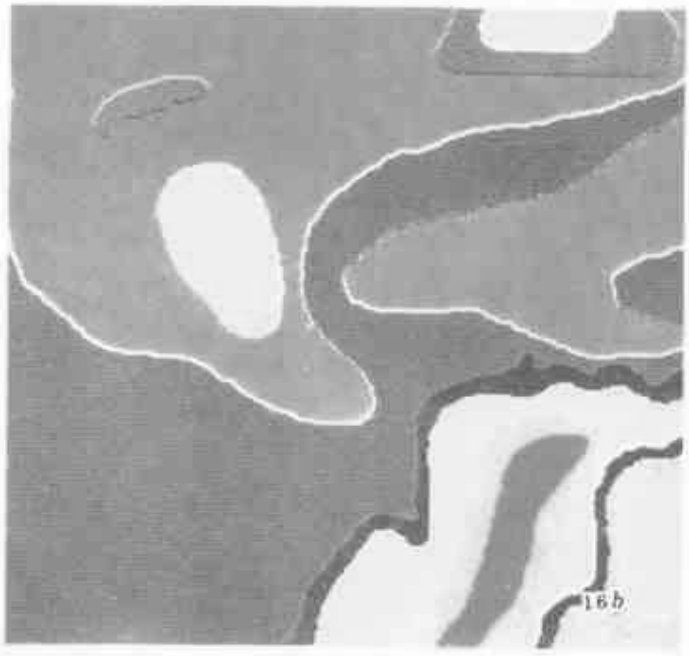




15. 沟谷提取生成派生图。利用 DEM 数据作曲面拟合后提取沟谷可以生成 DTM 的图件之一。a 图为山西三川河部分地区 DEM 显示图，黑色较低、白色较高；b 图为按高度段不同分级，全区东南高，西北低；d 为沟谷图，本区为黄土丘陵区，沟谷密集成网状，c 图是把沟谷图叠加在按高程的彩色分级图上。



16a. TM432 彩色合成影象与地下水埋深等值线图叠加研究土壤盐渍化(山西雁北)。



16b. 与卫星影象作复合计算的地下水埋深分级图(由数字化矢量数据转换成网格图象后与卫星影象配准)。

前　言

最近的30年，遥感技术与地理信息系统技术经过了各自突飞猛进的发展阶段，找到了它们的结合点。从目前的情况看，遥感数据的计算机处理技术比较成熟，已有许多专著出版，但还缺乏较为浅显易读的教科书和参考书；地理信息系统方面的专著或教材则更为缺少。目前，地理信息系统作为一个新的学科分支在各个应用领域正在迅猛发展，已激起许多学生渴望学习和实践的热情，因此，对教科书和参考书的需要成为燃眉之急。在这种形势下，作者编写了这本书，期望对读者起到指引入门的作用。

遥感和地理信息系统涉及多种学科：数学、计算机、系统论、计算机制图学等等。为了突出遥感图象处理方法和地理信息系统概念，本书在内容上尽量精简，避免与相关课程重复，不过多涉及相关学科的理论。如果需要，读者应同时学习其它课程。在这一原则下，本书对遥感数据的计算机处理和地理信息系统作了一些基本的和较为广泛的介绍，对二者既独立讲述，又说明它们的结合之处。为了尽可能做到易读好懂，本书偏重于概念、方法的讲述并附有大量插图，而避免较繁的数学推导，只有个别之处涉及较复杂的公式，若有困难可将这部分内容改作选读。

由于本书既可作为教科书，又可作为参考书，作者想让学生们能更多地了解科学工作者近年来的大量研究成果，以便在入门的同时更快地进入到前沿，为此，书中引用了不少同行们已发表的论文中的科学成果，并一一列入参考书目，在此特向这些同行们表示衷心的感谢，对于引用内容是否得当，欢迎提出宝贵意见。

在本书编写过程中，得到褚广荣教授的大力帮助，审阅全书并

Z3571/09

提出宝贵的意见。同时，本书的出版还与赵济教授的支持及许多同志在各方面的关心和帮助分不开，地图出版社王淑华同志清绘了插图，在此一并表示诚至的谢意。

由于作者水平所限，书中错误及不妥之处在所难免，敬请读者批评指正，并欢迎来信来函。

作者

1989 年 10 月

目　　录

绪论…… 1
第一部分　遥感数据的计算机处理…… 11
第一章　遥感图象数据的基本知识…… 11
§1.1　数字图象的表示方法…… 11
1.1.1　亮度、颜色与视觉 …… 11
1.1.2　图象的离散表示和量化 …… 14
§1.2　计算机磁带数据…… 18
1.2.1　陆地卫星磁带产品 …… 19
1.2.2　中国遥感卫星地面站 CCT 磁带…… 23
第二章　图象的校正…… 29
§2.1　辐射校正…… 29
2.1.1　辐射、辐射量与大气 …… 29
2.1.2　大气引起的辐射畸变及校正 …… 33
2.1.3　仪器引起的辐射畸变及校正 …… 41
§2.2　几何校正 …… 42
2.2.1　几何畸变产生的原因 …… 42
2.2.2　几何畸变的精校正 …… 49
2.2.3　几何变换及多种应用 …… 56
第三章　图象增强…… 62
§3.1　空间域增强技术——辐射增强…… 63
3.1.1　直方图与积累直方图 …… 63
3.1.2　线性变换 …… 66
3.1.3　非线性变换 …… 70
3.1.4　直方图均衡化 …… 71
3.1.5　直方图规定化 …… 75
§3.2　空间域增强技术——几何增强…… 78

3.2.1 卷积的模板化 …… 79
3.2.2 平滑 …… 82
3.2.3 锐化 …… 86
§3.3 频率域增强技术 …… 96
3.3.1 付立叶变换 …… 97
3.3.2 平滑 …… 106
3.3.3 锐化 …… 109
§3.4 其它增强技术 …… 112
3.4.1 密度分割 …… 112
3.4.2 假彩色合成 …… 114
3.4.3 差值法 …… 115
3.4.4 比值法 …… 120
§3.5 多光谱变换 …… 121
3.5.1 多光谱空间 …… 121
3.5.2 K-L 变换 …… 122
3.5.3 Kauth-Thomas 缨帽变换 …… 132
第四章 数字图象的分类——专题图象的生成 …… 144
§4.1 概述 …… 145
4.1.1 光谱类别类信息类别 …… 145
4.1.2 分类 …… 147
§4.2 非监督分类 …… 149
4.2.1 聚类方法 …… 149
4.2.2 等混合距离法 …… 154
4.2.3 信息类别的确定 …… 156
§4.3 监督分类 …… 159
4.3.1 判别规则 …… 160
4.3.2 最大似然判别 …… 162
4.3.3 最小距离判别 …… 167
4.3.4 训练区的选择 …… 169
4.3.5 检验 …… 170
§4.4 分类技术的改进 …… 173

4.4.1 聚类与监督分类 …… 175
4.4.2 特征提取 …… 176
4.4.3 分类树 …… 183
4.4.4 邻域分类介绍 …… 184
4.4.5 多种信息的复合 …… 186
第二部分 地理信息系统（GIS）…… 191
第五章 地理信息系统的基本概念…… 191
§5.1 什么是地理信息系统 …… 191
5.1.1 定义 …… 191
5.1.2 空间信息 …… 198
5.1.3 GIS 的基本组成和类型 …… 202
§5.2 空间数据编码和数据格式 …… 209
5.2.1 概述 …… 209
5.2.2 矢量数据 …… 212
5.2.3 网格数据 …… 223
5.2.4 矢量数据转换成网格数据 …… 239
5.2.5 网格数据转换成矢量数据 …… 247
第六章 地理信息系统的主要组成部分…… 259
§6.1 数据的输入与输出 …… 259
6.1.1 数据的采集和输入 …… 259
6.1.2 输入设备 …… 266
6.1.3 数据的输出 …… 272
6.1.4 输出设备 …… 274
§6.2 地学数据的管理与分析 …… 278
6.2.1 数据库系统 …… 278
6.2.2 GIS 与一般数据库系统的区别 …… 290
6.2.3 地学数据分析操作的主要功能 …… 296
6.2.4 模型分析 …… 312
第七章 地理信息系统数据源的几个问题…… 323
§7.1 数字地形模型 …… 323

7.1.1 意义 …… 323
7.1.2 数字地形模型的生成 …… 325
§7.2 遥感数据是重要的信息源 …… 341
7.2.1 遥感系列解译图作为信息源 …… 341
7.2.2 GIS 数据库的快速更新 …… 345
7.2.3 遥感信息与非遥感信息的综合分析 …… 348
7.2.4 GIS 与遥感图象处理的结合方式 …… 351
§7.3 GIS 数据的规范化和标准化 …… 353
7.3.1 规范化和标准化的任务 …… 353
7.3.2 数据的选取(附录) …… 355
第八章 地理信息系统的建立和应用 …… 361
§8.1 地理信息系统的建立 …… 361
§8.2 地理信息系统的应用 …… 365
8.2.1 在自然资源管理中的应用 …… 365
8.2.2 在城市管理中的应用 …… 371
§8.3 遥感数据与地理信息联合系统 …… 376
附录：常用卫星、传感器和光谱通道表 …… 380
参考资料 …… 385

绪　论

不接触物体而探测物体的有关信息，称为遥感。利用遥感手段获得遥感信息有二种方式：主动遥感和被动遥感。从遥感平台上发出能源到地面，接收反射回来的信息是主动遥感，如：微波遥感中的侧视雷达；依赖于外部能源的遥感，如依赖太阳，测量地面对太阳能的反射是被动遥感。无论是主动遥感还是被动遥感方式，接收到的信息都记录在胶片上或磁带上。胶片上记录的图象信息是模拟信号，用照相机或扫描器获得，通过照相或行扫描的方式把信息记录在乳胶上。磁带上记录的图象信息是数字信号，是用不同类型的扫描器对被测目标扫描后以数字的形式记录在磁带上。

传感器获得的信息中包含有丰富的内容，对遥感影象的判读解译可以应用在农林、水利、海洋、气象、地质、环境保护等各个方面。为了使地学工作者从影象中观察到更多的内容，需要对原始影象作技术上的处理，这种处理技术就称为图象处理。记录在胶片上的影象用光学方法直接作各种处理，以提取其中丰富的信息是光学图象处理；磁带上的信息则送入计算机内提取所需要的结果，这是数字图象处理或叫自动图象处理；若首先将胶片经过模数转换使模拟量转换成数字量再送入计算机处理，或先经过计算机处理后的图象使数字量转变成模拟量成象在胶片上，再作光学图象处理，这种过程称为光学计算机混合处理。

数字图象的技术始于本世纪 20 年代，随着图象计算机处理技术的发展，地学工作者也认识到数字方法在气象研究及国土利用开发等方面的巨大潜力。特别是航天事业的发展，各种探测卫星

带有各种传感器陆续上天，大量的信息和像片传送到地面，遥感技术面临的问题是：首先，定性的描述不能满足需要，必须向定量方向发展，提出各种数量化的结果；其次，遥感信息量的膨胀，各种卫星遥感资料不能及时处理出来提供使用，必须提高资料的处理速度。在这种形势下，遥感数字图象处理作为计算机图象处理的一个重要应用方面得到了迅速的发展，并使处理方法越来越趋于成熟。

遥感数字图象处理主要包括图象的校正、图象的增强和图象的分类等部分。图象的校正是因为卫星或飞机中的传感器接收地面的信号发生了变化，因而需要经过校正恢复图象原来应有的面貌。例如：地面反射的信息经过大气到达传感器时，不仅带有与地面物体性质有关的反射信息，还带有大气散射而来的辐射能，使得辐射的总强度发生了变化。在分析图象与地面物体性质的关系时就必须首先分离出大气的影响而恢复原有的辐射。再如：卫星运行时其飞行姿态会发生俯仰、偏航、翻滚等微小的变化，引起接收地面信号时比例尺的变化，这种几何畸变也必须经过校正而得到恢复。图象的增强处理是把原有的一幅图象经过某些数学计算变成一幅新的图象，新图象和原有图象相比更有利于目视解译，整个图象更清晰或某些特征更突出。例如：对比度的增强可以使灰暗不清的图象变得黑白分明并且易于辨认某些细节，边缘增强可以突出黑白变化分明的部分，而使目视解译所需要的边界信息更加清楚，这时的图象从整体印象看与原有的图象大不相同，却更接近判读者的需要，或更有利于进一步的处理。图象的分类是图象处理中深入的一步，方法很多，这里主要应用"统计模式识别"的理论和方法对遥感图象中的特征进行识别，期望通过计算机的计算得到定量的类别结果。分类处理后的输出结果应该是专题图象。为了得到比较成功的分类结果，常常需要专业人员的某些先验知识，如对分类区域的了解和事先对被分物体光谱特性或其它特性

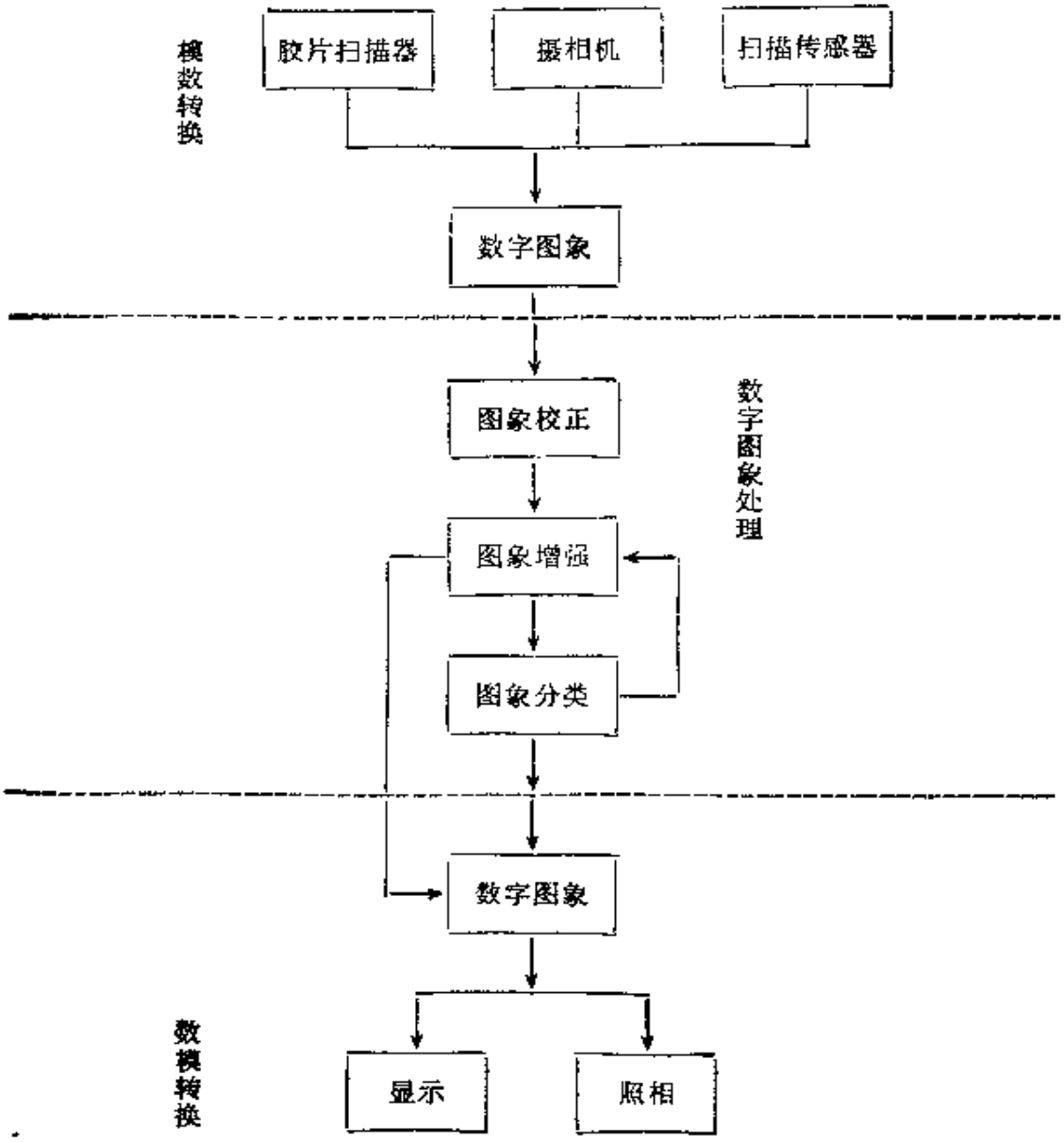


图 1　遥感数字图象处理主要流程

的了解，也需要在计算机工作过程中加入人的干预，即做一些人机交互的工作，或在分类结果基础上做一些分类后的工作，以提高这种专题图的可用性和可理解性。以上提及的几种处理常常是相关的。为了成功地进行分类，常常先要完成校正、增强等工作产生一幅适合分类的较好图象；有时分类后的图象还要做进一步的增强

处理。因而，几种处理彼此相互补充甚至可看成系列式的处理过程(图1)。遥感图象处理还有更进一步的计算方法，可在学完本课程后作为后读课程继续深入研究。

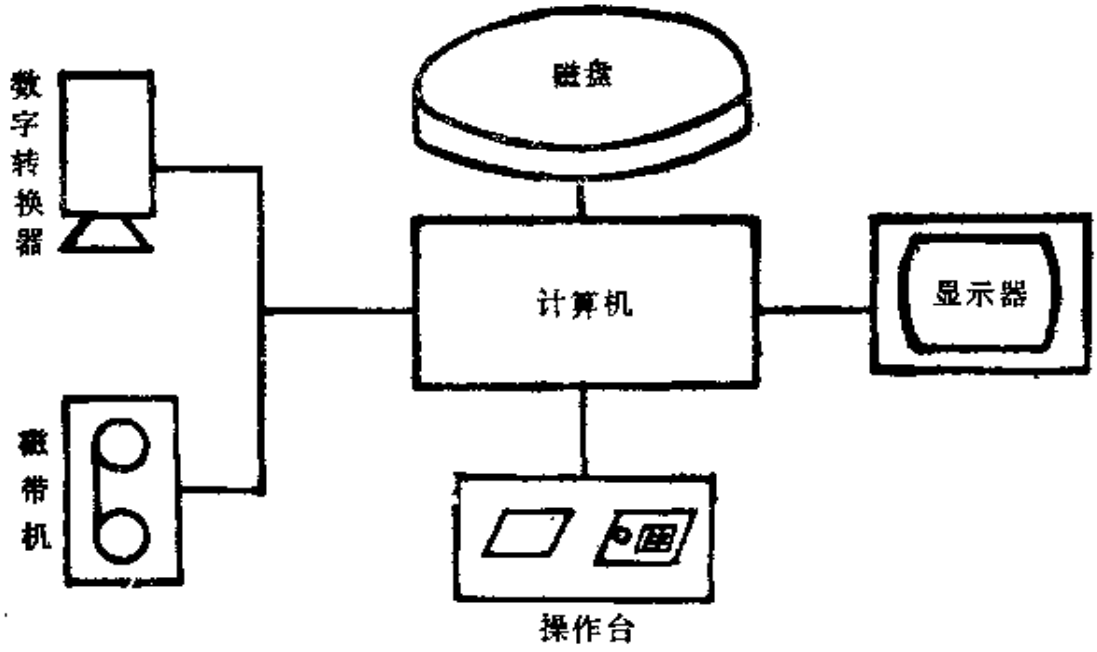


图 2　基本图象处理系统配置

遥感图象处理技术需要一定的硬件支持。硬件系统的主要组成部分如图 2 所示。数字转换器是把透明胶片或象片转换为计算机所能接受的数字量，常用的有带有模数转换的电视摄象机、转鼓式扫描仪等。由于透明片或照片上各点对光的透射或反射强度不同，因而经过数字转换器以后得到不同的数字信号，基本上保留了原有胶片上的图象特征。磁带机可以直接输入记录在磁带上的数字信号。磁带上的信息是从卫星或飞机上的传感器接收装置得到，处理过后的信息也可送入磁带上存贮起来。输入计算机后的数据存贮在磁盘中，计算处理时从磁盘中取出，处理后的新图象数据仍送回磁盘存贮。由于遥感图象的数据量一般都很大，因此需要大容量的存贮空间，否则将给处理工作带来极大的不便。

计算机是整个遥感图象处理系统的核心。计算机可以是中型及包括阵列处理的大型计算机系统，也可以是小型机，甚至微机系统，也可以是带有微机的图象专用处理机。选择哪一种计算机取决于处理图象的工作量及对速度的要求。显示器是遥感图象处理设备中不可缺少的一部分，输入的数字信号转换成可观察的视频信号显示在屏幕上，使用户可以看到接近于照片的图象，从而决定下一步如何处理。前面已经提到，人机交互是遥感处理中不可缺少的一个环节，因此必须具备一个操作台，操作台上可以有键盘、鼠标器、专用的功能键和跟踪球或操作板和光笔等设备。操作人员通过这些设备和机器“对话”，操作和显示中间结果从而控制整个图象的分析处理步骤、选择方法、排定次序和改变参数等，必要时再输入新的处理程序。所以，从某种意义来说，应当把操作者也算成图象处理系统的一部分。

随着遥感技术应用越来越广泛，一方面只靠光谱特征的分类技术不能满足实际工作对精度的要求；另一方面，简单定量描述也已不能满足需要，于是对于从静态到动态，从现状描述到预测预报，提出了新的要求。这些要求的实现，单纯依靠遥感数据源是不够的，需要各种描述自然资源的专题地图，如：地形、土壤、植被、水文、地质、矿产、土地利用、行政界限和人口等数据作为辅助的信息源一起分析，手段也将更加多样和复杂，因而产生了遥感技术和另一技术——地理信息系统结合的趋势，并使这种结合向高级发展形成综合的技术领域。

地理信息系统的研究是从六十年代初期开始的，最早的较为成熟的地理信息系统是加拿大地理信息系统（CGIS），这个系统1963年开始研制，从处理加拿大土地调查获得的大量数据逐步发展到1971年正式运行，成为六七十年代世界上较大和较完善的地理信息系统。在这期间美国、瑞典、法国等国也都发展起来，1968年国际地理联合会（IGU）的地理数据，遥感和处理小组委

员会成立，1978 年国际测量工作者联合会（FIG）规定其第三委员会的主要任务是研究地理信息系统问题，各方面机构都组织了不少有关地理信息系统的讨论会。1980 年 D. F. Marble 等编辑出版了“空间数据处理计算机软件”三卷一套的报告，总结了 1979 年以前各国能收集到的已有地理信息系统及有关计算机软件的情况。八十年代以来，我国的地理信息系统研究也蓬勃发展起来，1987 年召开了第一次北京国际地理信息系统讨论会，相应的实验室也得到发展。与此同时，在一些高校研究生中开设了地理信息系统引论课程，地理信息系统的研究逐步深入到许多应用领域，显示了广阔的发展前景。

初期地理信息系统，主要为资源清查服务，送入计算机中的各种自然资源专题图件可以迅速地得到查询、检索和分析、显示。并以计算机自动制图为基础，逐步扩大其应用范围和功能，使地理信息系统发展成在计算机软硬件支持下，空间数据的存贮、更新、查询、检索、运算、分析、显示和应用的技术系统。这里，空间数据是指按照地理坐标或空间位置输入的数据及它们的属性。

八十年代以来，计算机性能提高很快，而价格却大大下降，为地理信息系统的发展创造了条件，无论是硬件技术还是软件技术，无论是数据的输入、存贮、运算和输出，还是地理信息的管理，都有突出的进展，使系统动态性和及时性加强，处理能力和精度也都得到提高。

地理信息系统的目的是自然资源的科学管理、综合研究和开发利用。利用地理信息系统作为工具可以作很多工作，例如：资源的分析评价、动态监测、情况预测及辅助决策等。根据不同的具体应用，建立侧重面不同的系统，如：以某个专业、问题或对象为主要内容的专题信息系统；以某个地区为其研究和分析对象的区域信息系统；提供成套信息分析、处理和制图手段的综合信息分析处理系统。

地理信息系统是以研究和处理各种空间实体和空间关系为主要特征。因而在技术上它与遥感图象处理技术有所区别，例如：在数据结构上，不仅有网格结构，还常常使用矢量结构以及其它结构；在数据来源上，不仅有地图数据、统计数据，还有遥感数据等多种数据源；在数据库的管理系统中，不仅有一般数据的数据库管理功能，更重要地还有空间位置的管理功能，因而突出了地理信息的特点；在地学数据的分析能力上，不仅有一般图形分析操作的能力，还进一步发展了模型分析的能力，对于地学中的复杂现象，上升到某些规律性的研究。尽管在这方面还很不成熟，但它已成为地理信息系统中不可缺少的一部分。计算机制图学是地理信息系统的基础部分，系统中处理的各种图形结果，不仅能显示在监视屏上，还必须实现硬拷贝输出，因而掌握计算机制图学的知识和技术应该是学习地理信息系统的准备。

地理信息系统在硬件设备上，由于使用多种数据源以及地图图形信息输入和计算机绘图输出的需要，常常需要数字化图形输入设备和绘图输出设备。比较普及的一种数字化图形输入设备是带有按键光标的数字化板，它与图象处理设备中的数字转换器不同，可以将地图上的特征分解成点、线和多边形这种简单特征，以矢量结构的记录输入计算机。经过计算机的各种运算处理，在绘图输出设备上绘出图件作为结果或产品。比较普及的输出设备是笔式绘图仪，在计算机控制下，自动绘制地图，并更换颜色和符号，画出图例，作出注记等。当然，高挡次的设备还有很多。图 3 为最基本的地理信息系统配置。这种配置在输入上以地图数据作为主要的数据源，可以完成地理信息系统的工作，但对遥感数据作为信息源则有限制。因而，为了实现遥感信息与地理信息的结合，较为理想的配置是结合图 2 和图 3。这种系统将对遥感与地理信息系统综合发展创造良好的条件。例如：美国喷气推动实验室（JPL）建设的影象信息系统 IBIS(Image Based Information on System)



图 3　基本地理信息系统配置

成为图象处理系统 VICAR（Video Image Communication and Retrieval）的一部分，使整个系统兼有遥感图象处理和地理信息系统的双重功能，既以图象为基础，又注意到与其它数据的使用。

综上所述，遥感与地理信息系统技术已逐渐走到一起并结合起来。从地理信息系统的角度，遥感数据将作为其重要的数据源，使系统不仅限于更好地描述现状和管理信息，更重要地可用于数据的更新，从而扩大了系统的应用范围，加强了系统的生命力；另一方面，从遥感的角度，地理信息系统又是遥感图象处理系统的扩大和合理延伸，非遥感信息的输入可以提高遥感数据的处理精度，使分类结果更具有实用性，使数据应用深度和广度上更上一层楼。可见，它们的结合是技术发展的必然，并正显示出明显的社会经济效益。

航天航空遥感信息在图象处理与地理信息系统支持下有着广泛的用途，我国地质、石油、煤炭、林业、水电、铁道、气象、航天等部门都设有专门机构处理和研究遥感与地理信息系统，使遥感信息得到更好的应用。以资源卫星为例，我国对资源卫星的应用提出的目标是：

（1）国家与城市地图更新；

（2）土地资源图件、数据更新；

（3）草场、森林资源图件、数据更新；

（4）主要农作物识别和大面积估产；

（5）水资源的估算和管理；

（6）自然灾害监测与预报；

（7）城市化效应与工业污染监测；

（8）海洋环境与海岸带监测；

（9）地质区测与找矿；

（10）全球环境的动态监测。

显然，应用搞得越好，遥感图象处理和地理信息系统所产生的社会经济效益越大，学科的发展也会越快。

第一部分　遥感数据的计算机处理

第一章　遥感图象数据的基本知识

§ 1.1　数字图象的表示方法

1.1.1　亮度、颜色与视觉

利用卫星遥感手段得到的数字产品，经过加工处理可以变成胶片或象片，也可以将数字产品送入计算机后从显示屏上显示出来，这就是我们所说的“图象”。人眼通过对图象的观察，利用视觉效果和本身的专业知识进行目视解译、分析或决定处理方案。因而图象本身的特征和人眼的视觉效果都很重要。图象主要分为黑白图象和彩色图象。

一、黑白图象

黑白图象只有黑白的变化，指白色、黑色和深浅不同的灰色。对于物体的黑白，它代表了物体的光反射率的变化；对于光来说，黑白变化相应于白光的亮度变化，当白光亮度非常高时，人眼看到白色；当光的亮度很低时，人眼看到灰色；无光时为黑色，这种亮度变化在人眼视觉上是明度的变化，愈接近白色，明度越高；愈接近黑色，明度越低。虽然亮度与明度相关，但明度还受视觉感受性和过去经验的影响。所以常用亮度对比来表示被观察对象在视场中的清晰程度。亮度对比是视场中对象与背景的亮度差和背景亮度之比。亮度对比常用 C 表示，则

$$C = \frac{\Delta L}{L_{背景}} \tag{1.1}$$

式中 ΔL 为给定的对象与背景的亮度差。对象亮度大于背景亮度 $\Delta L = L_{对象} - L_{背景}$，背景亮度大于对象亮度 $\Delta L = L_{背景} - L_{对象}$，白纸背景上的黑字就属于这种情况。$C$ 越大，视觉亮度差异越大，例如在黑色背景上放一灰色物，由于对比大，看起来灰色物变得十分明亮若背景换成白色则物体变得灰暗。如果 ΔL 是视觉恰可察觉的亮度差异，则 C 为一定背景亮度下的亮度差别门限值。

二、彩色图象

彩色图象有各种颜色的变化。不同波长的光形成不同的颜色。表 1.1 列出光谱颜色波长及范围。一般来说，波长改变 0.001～0.002μm 时，人眼可以看出颜色的差异，在整个光谱上，人眼可以分辨出一百多种不同的颜色。

表 1.1 光谱颜色波长及范围

颜 色	波长（μm）	范围（μm）
红	0.70	0.64～0.75
橙	0.62	0.60～0.64
黄	0.58	0.55～0.60
绿	0.51	0.48～0.55
蓝	0.47	0.45～0.48
紫	0.42	0.40～0.45

彩色有三种特性：明度，色调，饱和度。明度与光亮度有直接关系。光的亮度愈高，人眼就愈感觉明亮，也就是有较高的明度；色调是彩色彼此相互区分的特征，它决定于进入人眼的辐射光谱组成对人眼所产生的感觉。根据波长的不同而表现为红、橙、黄、绿、蓝、紫等各种色调，对于象片，进入人眼的辐射光是象片对光源发出的光反射的结果，对于透明胶片，则是某些光从胶片上透射的结果，对于电视屏幕，是由屏幕上辐射的光；饱和度是指彩色的纯洁性。各种单色光饱和度最高，光谱中若加入白光成分，饱和度便降低，白光成分越多，饱和度越低，直到完全变成白光。

为了比较形象而简明地表示彩色的这三种基本特性，常用一个理想的示意模型——颜色立体来表示(图 1.1)，垂直轴代表明度的变化，由下至上由黑变白；水平圆周表示色调，光谱上的不同色调从红到紫，在圆周上顺时针递渐变化；水平圆周的半径表示饱和度，从圆周向圆心随半径的减小饱和度逐渐降低。虽然这是一个示意模型，但表现了三种特性及其相互关系。

三、颜色的混合

实验证明，所有的颜色，包括黑白系列的各种灰色、各种色调和饱和度的颜色，都能由红、绿、蓝三种颜色相加混合而产生，而这三种颜色中的任一个不能由其余两个相加产生，这红、绿、蓝三种颜色称为三原色。光的三原色相加混合产生其它颜色的光叫做加色法。加色法的示意图见图 1.2(a)。红、绿、蓝三色相加组成白色，红与蓝相加形成品红色，红与绿相加形成黄色，绿与蓝相加形成青色。随着三原色加入的数量不同产生其它各种颜色。彩色电视屏幕就是利用加色法原理。接收机组合成的红、绿、蓝信号，分别激励彩色显象管的三个电子枪或一个电子枪的三注电子束。三注电子束在管屏上分别激发红、绿、蓝三原色荧光粉，产生红、绿、蓝彩色影象。由于荧光屏上每一荧光点的面积很小，红、绿、蓝三个荧光点的总宽度对眼睛形成的视角极小，视觉的空间分辨能力不可能分辨出来。因此，红、绿、蓝三色光不同比例的混合在

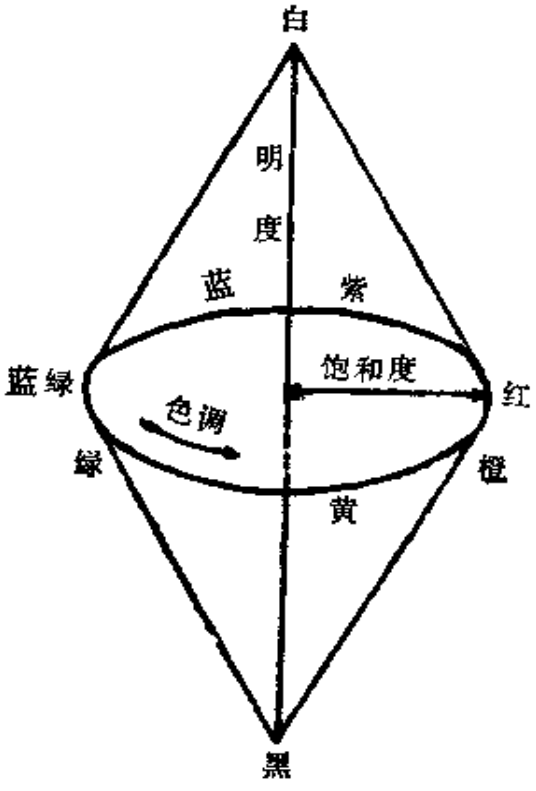


图 1.1　颜色立体

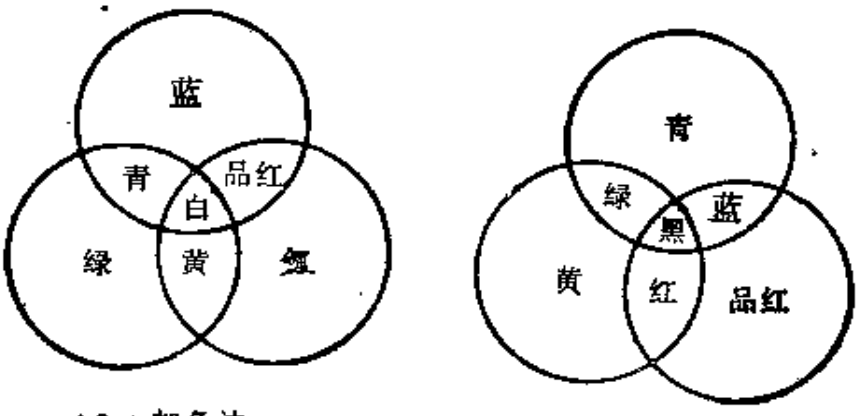


图 1.2　颜色的混合

视觉上引起白、黑和各种颜色的感觉。

在彩色涂料、印刷、彩色摄影中颜色混合则是利用与加色法相反的途径，即减色法。减色法的示意图见图 1.2(b)，减色法中是利用黄、品红和青色作为三种基本色的。

用人眼观察彩色图象，类似于亮度对比，也会有颜色对比。在视场中，相邻区域的不同颜色的相互影响叫做颜色对比，例如在一黄色背景上中间有一块白色或灰色时，眼睛注视白色中心部分几分钟，白纸会出现蓝色，这因为黄色和蓝色是互补色。由于颜色对比，背景与中心两颜色互相影响，使每一颜色的色调向另一颜色的补色方向变化，在这个现象中白色向蓝色方向变化。在两颜色的边界，对比现象最明显。在颜色立体的色调平面上，对角线附近的颜色为互补色。相邻的两颜色若是互补色，就会彼此加强饱和度。因而，在处理和观察彩色图象的色调时要注意颜色对比。

1.1.2　图象的离散表示和量化

透明胶片或象片上的黑白图象，由于曝光时照射在片子上各处辐射强度不同，因而图象上各处表现出的黑白程度不同，我们称之"灰度"不同。灰度有时也称作亮度或灰阶。由于彩色图象可以

看成三幅黑白图象分别加上红、绿、蓝三种原色而形成，所以这里只讨论黑白图象。透明胶片或象片上各处灰度的变化是连续的。如果沿图象上某一直线考察灰度的变化，画出来是一条连续变化的平滑曲线。若要把这种图象送到计算机中去处理，必须通过接在计算机上的摄象机或其它扫描设备，将图象模拟量转变成数字量，才能被计算机接收而加以处理。计算机接收的图象叫做数字图象。

计算机所接收的数字图象是把连续图象在空间上取样成离散表示，把连续变化的灰度分成等级，也可以说是灰度值量化（图1.3）。

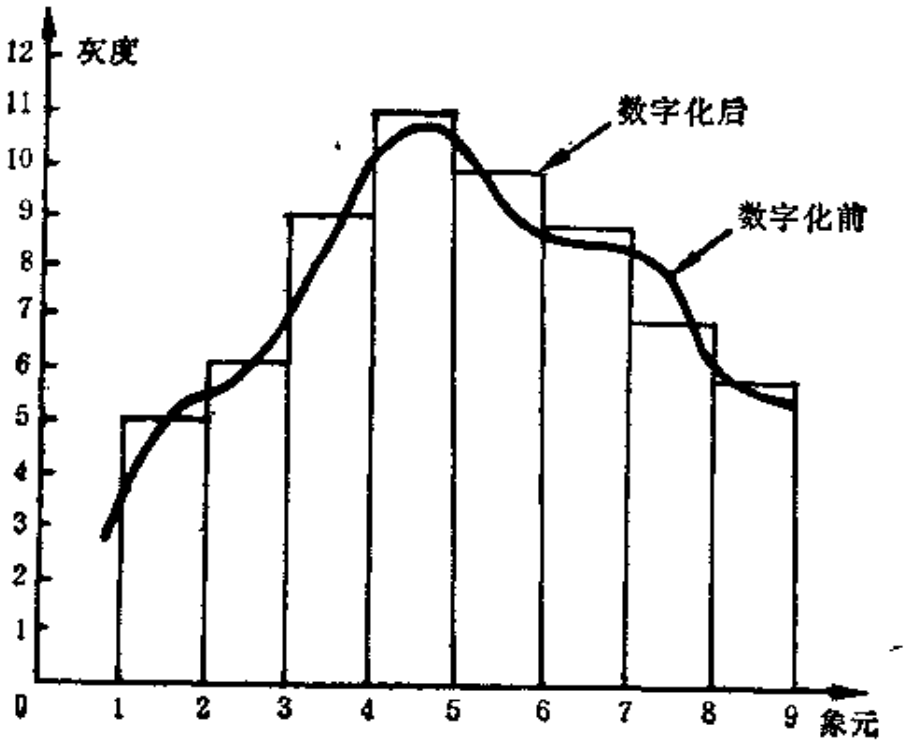


图 1.3　模拟量与数字量

图象是二维空间分布的，一幅图象可以由两个空间变量 X、Y 的实函数表示。这个函数值就是空间位置（x，y）处灰度变量的数值。图象有一定的大小，而且灰度值不能为负并有最大值。这

样，图象函数被定义在一个矩形区域 R 内的实函数，记作

$$0 \leqslant f(x,y) \leqslant G \qquad 0 \leqslant x \leqslant x_m$$
$$0 \leqslant y \leqslant y_m$$

其中 G 为灰度值的上界，x_m 和 y_m 分别为 X 方向和 Y 方向的最大范围，一般设图象左上角为坐标原点。

数字化一幅连续图象时，首先必须把连续空间变量等间隔取样，变成一个一个的离散值。这样，一幅图象可以看成一个矩阵。若在 X 方向上取 N 个点，在 Y 方向上取 M 个点，则矩阵为 $N \times M$。若 X 和 Y 方向上均取 N 个样点，则矩阵为 $N \times N$ 方形矩阵。考虑到方便和常用，今后只讨论 $N \times N$ 的情况，所得结论对于 $N \times M$ 也完全适用。

方形矩阵可表示为

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \cdots f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \cdots f(1,N-1) \\ & \cdots\cdots\cdots\cdots & \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \cdots f(N-1,N-1) \end{bmatrix}$$

这就是数字图象的数学表示，矩阵中的每一元素相当图象中的一个单元，又叫做象元或象素。每个象元的灰度值一般地也不再为实数，而是被量化成一个整数值。允许的总灰度级数是 2 的整数幂，即 $G = 2^m$，m 表示了每一象元在计算机中所需的位数 (bit)，例如：$m = 1$ 占一位，灰度值只能 2 种，0 和 1；$m = 2$，占二位，灰度值只能 4 种，0，1，2，3；…… $m = 8$，占八位，也就是一个字节 (byte)，那么，灰度值可允许 256 个等级，0、1、2、3…… 255 见表 1.2 和表 1.3。这样量化以后可以计算出一幅图象在计算机中占多大的存贮量。计算机中的存贮量多以字节 byte 为单位。以 $m = 8$ 为例，一个象元占一个字节，则一幅 512 × 512 大小的图象需要 262,144 个字节存贮空间。

遥感图象需要相当大的存贮空间。从卫星传感器接收的图象

表 1.2　二进制灰度级表示(以每象元3位为例)

位　值 $b_3 b_2 b_1$	灰度值	位　值 $b_3 b_2 b_1$	灰度值
000	0	100	4
001	1	101	5
010	2	110	6
011	3	111	7

表 1.3　数字图象辐射量化灰度值总数与位数关系

每个象元 bit 数 m	灰度值总数 G	最小灰阶(黑)	最大灰阶(白)
1	2	0	1
2	4	0	3
3	8	0	7
4	16	0	15
5	32	0	31
6	64	0	63
7	128	0	127
8	256	0	255

均为数字图象，以 6-bit 或 8-bit 的字长编码，也就是量化等级是 64 级或 256 级。经过地面站处理都变成 8-bit 数字产品。以 TM 的可见光与近红外六个波段为例，以一景图象大小 185 公里 × 185 公里约为 6,000 × 6,000 估算。将每一象元点的灰度数据都送入计算机需要约：6,000 × 6,000 = 36,000,000 (字节)

= 36 MB

若六个波段全部送入计算机作多波段全景处理需要约：

36MB × 6 = 216MB

这么大的存贮空间，没有大的计算机磁盘是无法容纳的，何况图象不单单是存贮，还要作进一步的计算和各种处理工作，对磁盘空间的要求就更大了。

为了减少存贮空间，以适应已有计算机的磁盘存贮能力和运算能力，必须压缩数据量。这就要从加大取样间隔和减少量化级数(比特数)着手。显然，取样间隔越小，即地面分辨率越高，量化级数越多，图象上反映地面细节越多，包含的各种信息量大，如 TM 影象无论从地面分辨率还是比特数都比 MSS 有改进。但有时，某些工作只是宏观的分析或某个专门方面的分析，不需要过多的细节，则可以加大取样间隔，或减少灰度等级。如对一景 TM 影象在 X,Y 两个方向上分别取样，每隔 10 个点取一个，图象变成约 600 × 600 大小，这时磁盘存贮空间可以缩小 10 × 10 = 100 倍。取样间隔过大或比特数太少，细节损失过多，会使图象不真实，或造成某些假象，如"假轮廓"的出现等。有时比特数减少了，如由 8-bit 降到 6-bit，而一个字节上空余的二位用另一个象元字节上的二位来填充又很不实用。所以常常一个象元还保留占一个字节。通常情况下，卫星图象采用 8 位、256 个灰度级来表示。至于采样间隔取多大为最佳，常常要考虑到卫星图象应用的需要作为选择的依据。当然如果计算机磁盘空间大小已限制死，采样间隔又不能再加大，只好减少计算面积，选择较小的幅面作运算了。

图象数据存贮量的压缩还可以用改变存贮记录格式的方法，请参看第五章。

§ 1.2 计算机磁带数据

卫星遥感数据计算机处理的数据来源有数字产品，也有照像产品。由于照像产品是从数字产品经过数字量到模拟量的转换产生出来，在送回计算机处理前要再一次扫描把模拟量转变回数字量才可以进行，多次变换有可能导致信息量的丢失。因此，在条件允许时，直接采用数字产品输入计算机处理为好。

卫星遥感的数字产品通常贮存在磁带上，便于保存和移动位置。为了使多种计算机系统都能方便地利用磁带输入卫星遥感数

据，各国卫星处理中心都采用统一的格式，由国际陆地卫星地面站运行会议（LGSOWG）的一个分会磁带标准工作组（TSWG）于1978年开始设计一种通用的计算机兼容带（简写为 CCT）格式。本节重点对陆地卫星的磁带产品作一介绍，其它卫星的产品，只要阅读用户手册，很容易找到和陆地卫星磁带格式上的区别，从而解决计算机处理时的输入问题。

1.2.1 陆地卫星磁带产品

一、产品生产的主要过程

陆地卫星的地面系统向卫星发送命令传送 MSS 等传感器所接收的图象数据，经过地面系统的一系列处理，生产出高密度磁带（HDT）产品，胶片产品和计算机兼容磁带（CCT）产品。整个过程大致分为六项内容：

第一项：处理用户订单，以确定应获取的数据。

第二项：安排飞行计划，适应用户的需要。

第三项：获得地面系统收到的图象和遥测数据。

第四项：遥测处理。这一处理产生校正的数据文件称作系统校正数据，是为下一项处理的需要而产生。这一处理过程可分为二个阶段：第一阶段处理是为了标定、验证、增强和平滑星上计算机提供的姿态和星历数据信息。第二阶段处理是计算景象中心时间和位置、景象标志、状态向量偏离标称向量的值和波段/扫描行偏移的调整值。

第五项：生产数字存档产品。这是主要的数据处理和计算工作，共有二个内容：辐射校正得到图象数据和得到几何校正所需的支持信息。在辐射校正阶段里，利用卫星和仪器系统参数建立一个辐射校正的查找表，输入图象的辐射值经过这一查找表就可用辐射校正后的值代替前值而完成校正。在几何校正阶段给出校正每一景象已知的系统性畸变所需要的数据，完成这一阶段的第一步是确定系统性畸变校正的模型；第二步是存有地面控制点时，产

生大地校正函数。如没有地面控制点，这一步也可不作；第三步是用大地校正函数或系统校正函数产生重新作水平采样和垂直采样所需内插矩阵及系数，最后，把辐射校正后的图象数据以波段序贯格式（BSQ）记录到高密度磁带（HDT）上，并记录上几何校正网格和系数等这些辅助信息，这种磁带如记录 MSS 数据则称为 HDT 存档 MSS 数据，又记为 HDT-AM 数据。

第六项：图象存档和产品生产。在数据中心把上一项工作得到的部分校正数据存入数据档案库中，并根据用户要求生产照像产品和 CCT 磁带产品等。

二、两种数据产品

送到一般用户手中的产品多为 CCT 磁带，这种磁带宽 1/2 英寸，通常是 2400 英尺长，有时也有加长带 3600 英尺长。使用这种磁带的磁带机是 9 数据磁道，记录密度有 1600 和 6250bpi（位/英寸）两种可以选用。前面提到的高密度磁带 HDT 是用于特殊的磁带机上，这种磁带 1 英寸宽，9200 英尺长，14（或 28,42）道数据磁道，记录密度 20,000（或 33,000）bpi，一般用户是不用的。

CCT 磁带产品分为二种，带有后缀 A 的是经部分处理的产品，带有后缀 P 的是完全处理的产品。如 MSS 产品可分为 CCT-AM 和 CCT-PM；TM 产品可分为 CCT-AT 和 CCT-PT。

部分处理的产品即 A 类数据，这种数据是已进行了辐射校正，还没有进行几何校正处理的数据，上面提到的存档数据就是这一种，表示为 CCT-AM、CCT-AT 等。

完全处理的产品即 P 类数据，这种数据是在辐射校正基础上进行了几何校正，得到完全校正的数据。采用地面控制点进行大地校正得到的就是完全校正和时相配准的数据，完成配准所用控制点可取自标准地图的大地控制点或取自以前已校正图象上的参考控制点。最后获得的图象采用通用横麦卡托（UTM）或地极球平面（PS）投影，具体依赖纬度值而定。或采用空间斜麦卡托

(SOM) 投影。P 类数据表示为 CCT-PM, CCT-PT 等。

用户订购 CCT 产品时，必须规定A类或P类数据，规定磁带记录密度 1600bpi 或 6250bpi 和磁带中扫描行记录格式。对于完全校正的P数据用户还可提出进一步作图象增强处理的要求选择内容，包括大气散射校正、对比度扩展和边缘增强(见第二章和第三章)。 P 数据也可在胶片上记录得到带有各种标记符号的胶片产品。

三、BSQ 与 BIL 格式

图象数据记录在磁带上，是以多个文件*组成的，每个文件又以若干个记录**的形式写在磁带上。磁带上大部分空间记录的是图象数据文件。当把磁带数据输入到计算机磁盘中时，必须按记录格式正确地读出图象数据，以便作进一步处理或显示图象。

图象数据记录有 BSQ 和 BIL 两种格式。 两种格式记录的磁带包含文件的种类相同，唯有图象数据文件的记录方式不同。见图 1.4 示意，图中 EOF 表示文件结束。

BSQ 是波段序贯格式，每一个波段组成一个文件，有N个波段就有N个文件。每一个文件中一个记录对应于图象中的一个扫描行，而且记录的顺序与扫描行的顺序相同，图象中有 n 个扫描行则每一文件含有 n 个记录。这种波段序贯格式是磁带或磁盘记录图象最常用的记录方式。它使读或写数据以及编程序运算都比较简单，单独提取波段也十分容易。一般地，专用图象处理系统或图象处理软件包都有读写 BSQ 格式的功能。

---

* 文件——由若干个逻辑记录构成的信息集合。这些记录可以是同一种类型的，也可以是不同种类型的。或在一般意义上说，表示在目的、形式和内容上彼此相似的信息项的集合。

** 记录——作为一个单位来处理的一组相连的数据。记录可分为逻辑记录和物理记录。逻辑记录是由彼此有关的、一组相邻的文件元素所组成。文件元素是可编址的最小信息项目，例如字节或字。物理记录通常总是密切地依赖于设备及其媒体特性的，可以是盘区、带区、字符行等。

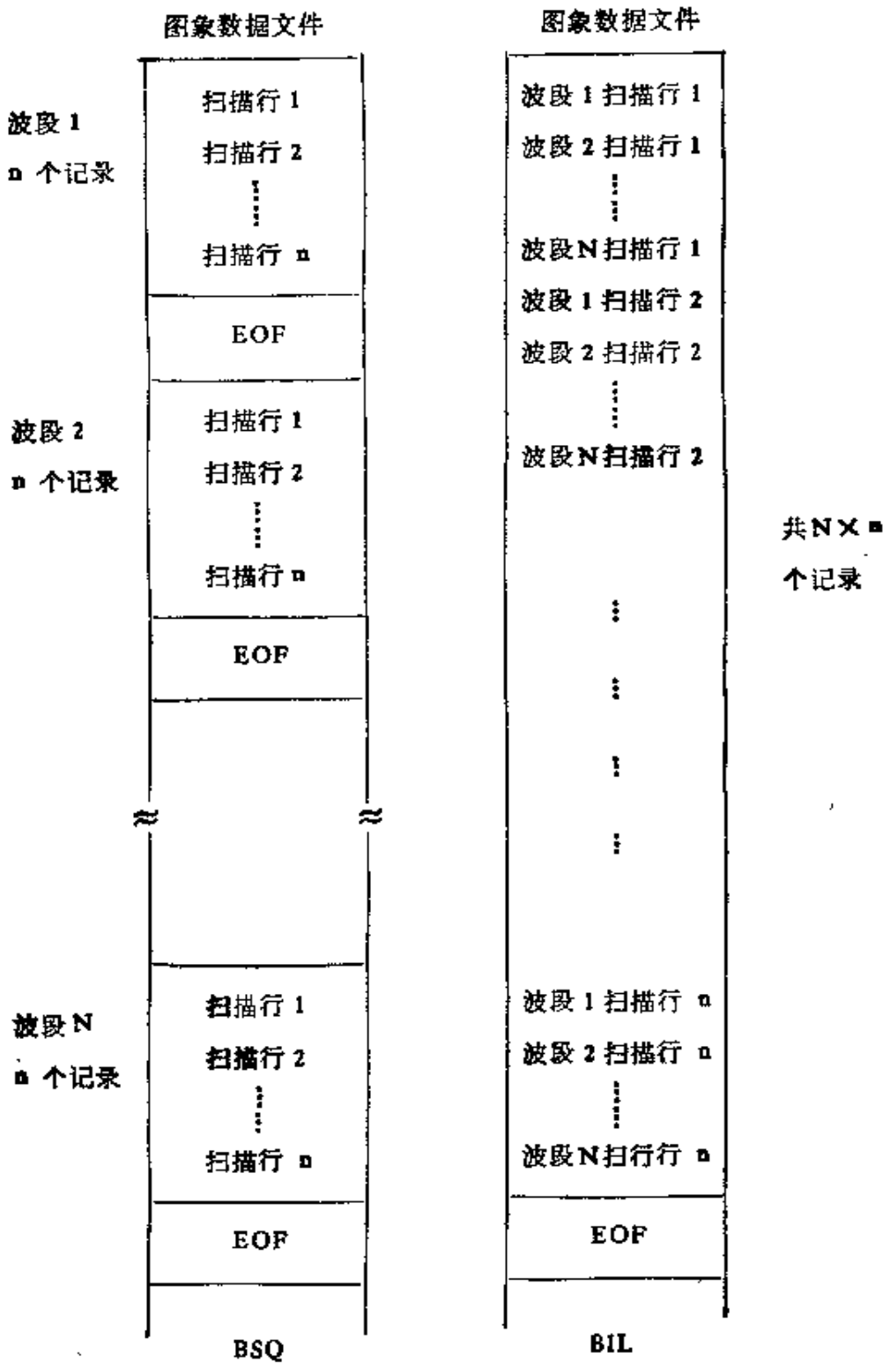


图 1.4 BSQ 与 BIL 记录格式示意图

BIL 是波段行交叉，每一个波段一个扫描行仍占一个记录，但排列顺序是按波段排列，即先排各波段的第一扫描行，再排各波段的第二扫描行……最后是各波段的第 n 扫描行，所有波段全部数据组成一个大数据文件，共 N × n 个记录。这种波段行交叉格式对于提取多波段子图象比较容易。例如：从一景图象的第一行开始提取左上角 512 × 512 大小的子图，只读取前 $N \times 512$ 个记录就够了，再从每个记录读取前 512 个象元。磁带后面的记录部分不必再读，节省了时间。在这个例子中，如果 BSQ 格式，需从每一波段文件上读取部分数据，磁带也必须把每个文件，特别是前 $(N-1)$ 个文件全部寻找一遍，比较麻烦。

1.2.2 中国遥感卫星地面站 CCT 磁带

一、中国遥感卫星地面站

1986 年 6 月我国建成了自己的卫星地面站。这个地面站的任务是接收、处理、存档和分发各种遥感数据。可以接收和处理陆地卫星 4 和 5 的 TM 和 MSS 数据，也具备接收法国 SPOT 卫星数据的能力。地面站分为接收站和处理站。

接收站在北京密云县，主要任务是捕获、跟踪卫星，接收卫星仪器数据和校正所需的遥测数据，并记录到高密度磁带（HDT）上供处理站作校正处理。

处理站在北京海淀区，主要任务是对记录在高密磁带上的数据回放输入、分路定幅；提取并处理磁带上的星载仪器校正数据，这些数据是作校正所必需的；最后对卫星图象数据进行几何校正和辐射校正并生成数字产品和照像产品。卫星数据处理的流程图见图 1.5。整个系统中包含各步骤处理所需的软件包，如：数据输入软件、仪器校正数据的校正软件、图象数据辐射校正软件、系统几何校正软件、地面控制点处理软件、精密几何校正软件、数字产品生成输出软件、照相潜影生成软件以及常用的地图投影软件包等。另外，用户可指定全球参考系统（WRS）* 参数或经纬度

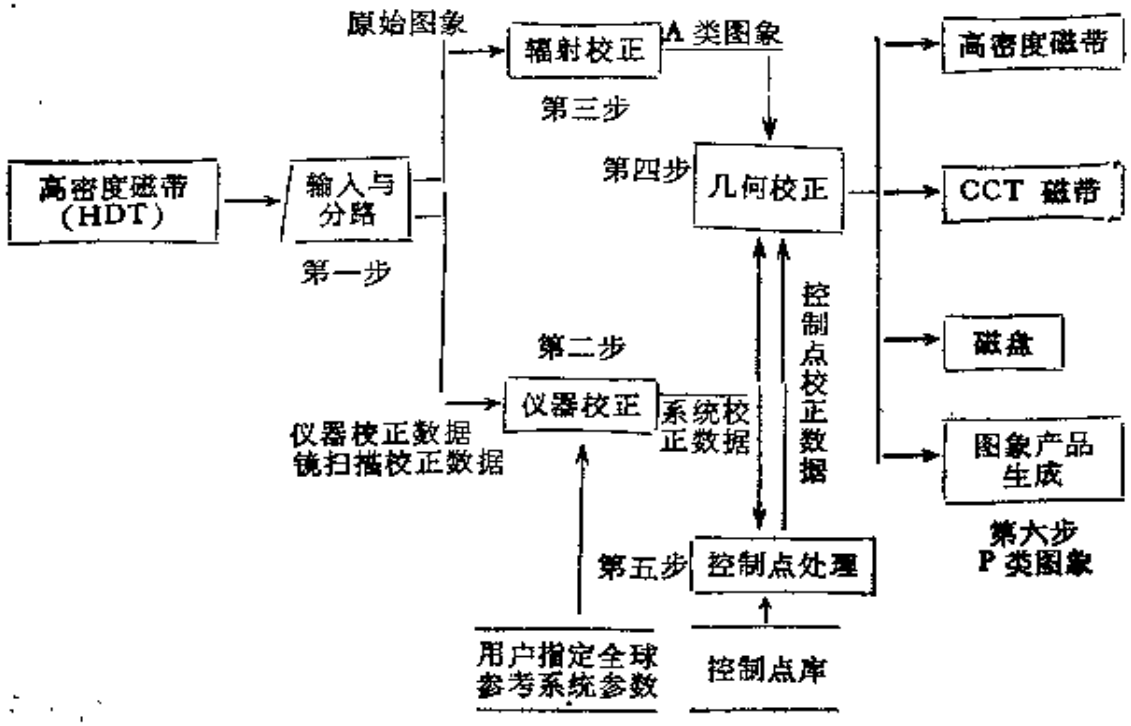


图 1.5　卫星数据处理流程图

区域，选择地面站库存的图象数据并浏览快视图象产品。照相处理室具备生产黑白与彩色胶片和象片的设备及质量控制检验设备等。

地面站的数字产品都采用国际标准格式波段序贯式（BSQ）记录在 6250bpi 或 1600bpi 的 CCT 磁带上，这些产品包括经过辐射校正的产品即A类产品（图 1.5 第三步后），系统校正产品即 PS 类产品(图中没经过第五步的第四步后）以及精密校正产品即 PG 类产品(图中经过第五步回到第四步后)。照像产品有 240mm 的彩色和黑白胶片、象片及快视产品供用户浏览，还可放大直至 1.2m 的最大幅面。

二、CCT 磁带格式

* 全球参考系统（WRS)——陆地卫星全球索引系统。由运行轨迹和行坐标确定标称景象中心。

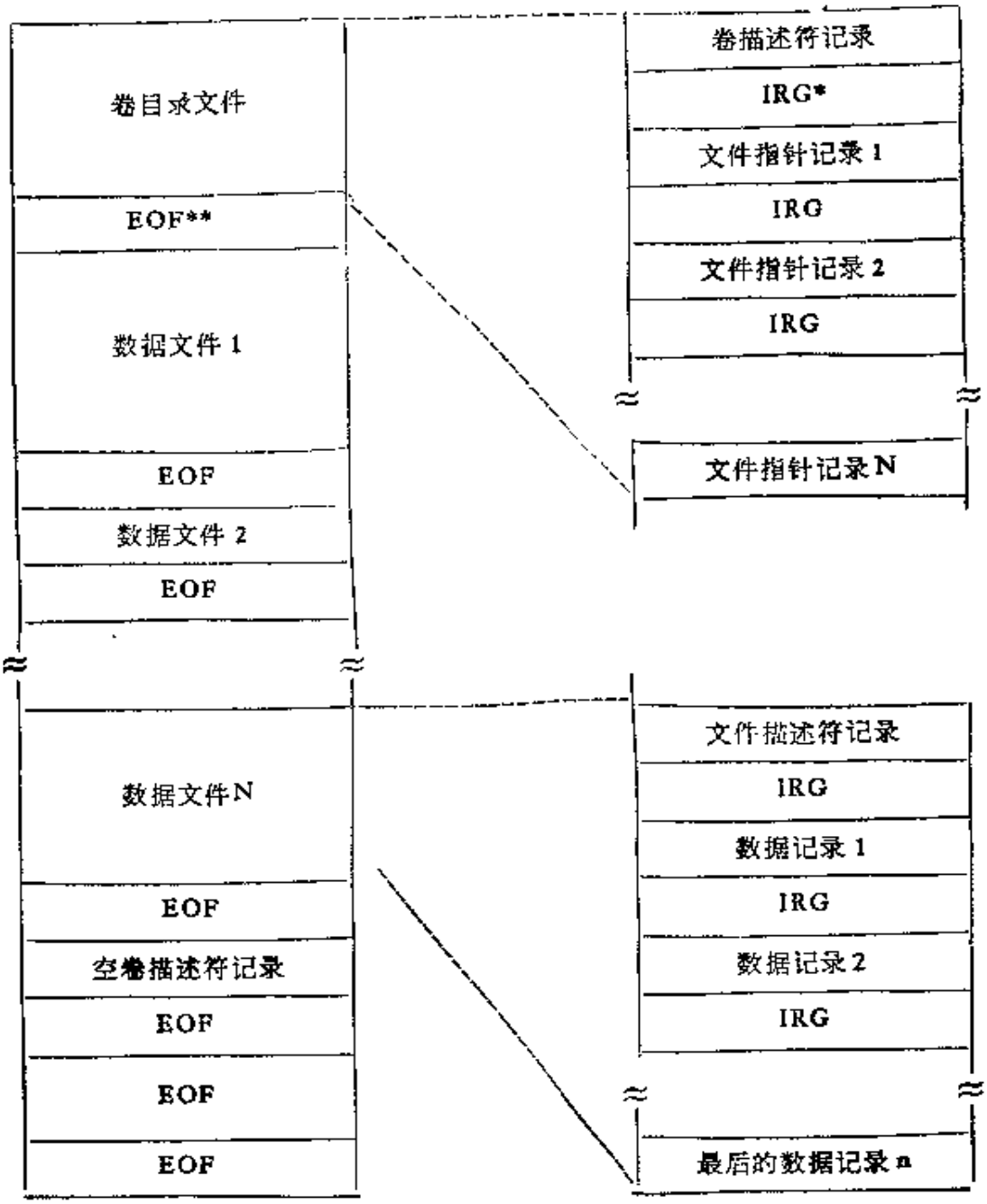


图 1.6　基本 CCT 磁带结构

中国遥感卫星地面站采用国际陆地卫星地面站运行会议（LGSOWG）格式，便于与其它地面站统一。这种格式的磁带在

* IRG: Inter-Record Gap 记录间间隔

** EOF: End-of-File Mark 文件结束标志

数据记录的基础上增加了“上部结构”（Superstructure），在“上部结构”中提供一个卷目录文件，内容有一般地描述带上的数据构成，并提供访问每个数据文件的指针。同时，对每个数据文件也在前面加一个文件描述符记录，用来描述文件内部的数据结构，并提供访问文件的某些域的指针。这些内容均为标识、描述和定位数据文件中的数据而设。图1.6中卷描述符记录给出了这个逻辑卷*的身份和本卷的文件数。文件指针记录N是指到第N个文件，说明这个文件格式和怎样去读文件。文件描述符记录说明怎样读这个文件和怎样发现关键数据。

对于A类的 TM 磁带记作 CCTATM。其中图象数据的磁带记录格式如图 1.7 所示。对于波段 1、2、3、4、5、7 这六个可见与红外反射波段。每一景为 6176 象元/行共 5984 行，在磁带上记录时每行记录 6656byte，因为每块（block）为 512byte，所以存

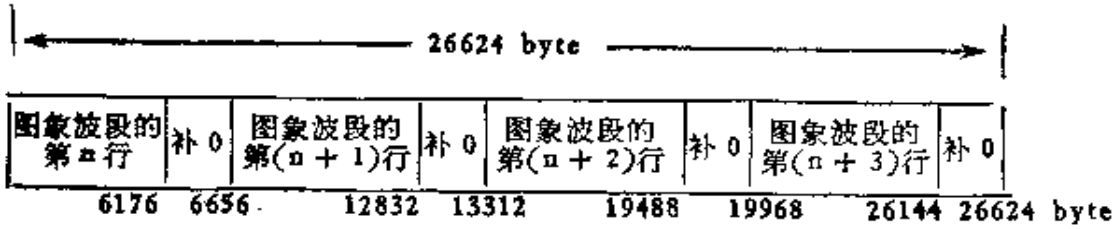


图 1.7 CCTATM 图象数据的磁带记录（波段 1—5,7）

在 13 个块中，而每个象元占 1byte，多余的空间用 0 补满；一个磁带记录总长为 26,624byte 正好为 4 个 6656byte 记录。也就是说，图象数据中每四行组成一个磁带记录长，一景图象共 1496 个磁带记录。第六波段热红外图象较小，每行 1544 个象元，占磁带

---

* 逻辑卷与物理卷——逻辑卷是一个或多个连续排列的文件的逻辑集合。一个逻辑卷含有一景单波段或多波段图象数据。当一个逻辑卷跨物理卷时，后续带卷的开头是重复的卷目录文件，所有逻辑卷均以一个空卷目录结束。

物理卷是指一个可卸下的磁带盘。一个物理卷上可含有一个或多个文件，也可能只含有一个文件的一部分。物理卷总是以一个卷目录文件开头，并在全卷最后一个记录之后跟有一个卷尾标记（EOV）。

2048byte 即 4 个块，多余的空间补 0。这样在一个 26,624byte 的磁带记录中可容纳 13 个 2048byte 记录，也就是 13 行图象数据，一景图象共 116 个磁带记录就够了。

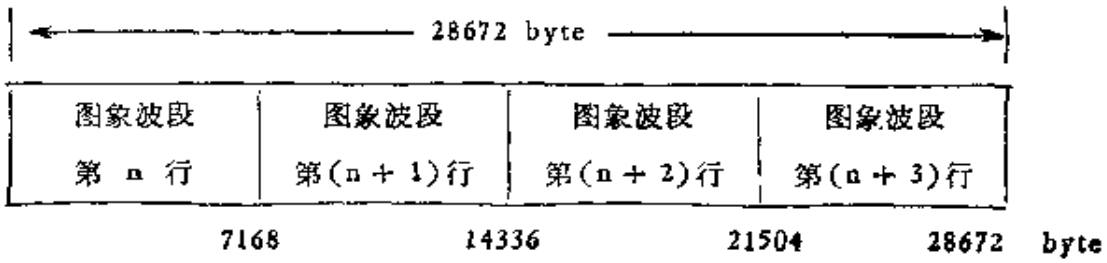


图 1.8 CCTPTM图象数据的磁带记录

对于 P 类的 TM 磁带记作 CCTPTM。其中图象数据的磁带记录格式如图 1.8 所示。每一景为每行 6967 个象元，共 5965行。在磁带上记录时，每一行 6967 个象元，记入 14 个块即 7168byte，多余的空间用 0 补满；一个磁带记录长为 28,672byte 包括 4 个 7168byte 的记录。也同样是图象数据每四行组成一个磁带记录，一景图象共 1492 个磁带记录。七个波段依次记录。

以上记录格式大大节省了磁带空间，少了许多记录间隔。以 CCTPTM 为例，采用这种格式记录一景 TM 影象如选用 1600bpi 的磁带记录密度，每盘 2400 英尺普通磁带(物理卷)可记一个波段数据，如换用其它通用记录格式，一个波段的数据就会记录不下，必须换用特殊的加长磁带或记录在两盘磁带上。这样，一景图象七个波段七盘磁带会不够用，将造成磁带数量过多，并且一景图象分成二盘，读写上也多有不便。当然使用这种格式也造成计算机输入上的一些不便，主要是一些单位计算机设备性能不够，不能阅读如此长的记录，需要先到其它计算机上，如 VAX 系列，作格式转换，再作输入。对于可以直接输入的计算机，读入时也要转变成一行一个记录的通用 BSQ 格式，便于进一步的计算，处理和显

示。

关于一景图象的其它注记资料，如卫星飞行情况、图象星下点位置坐标、太阳高度等等怎样记录的细节，需查阅各站的用户手册或产品介绍，这里不作赘述。

第二章　图象的校正

在理想情况下，卫星图象的灰度值只依赖于进入传感器的辐射强度；而辐射强度又只与太阳照射到地面的辐射强度和地物的光谱反射率有关，使图象上灰度值的差异直接反映了地物目标光谱反射率的差异，从而区分地物目标，解译图象。而实际上，由于大气层的存在，也由于传感器内检测器性能的差异，使得反映在图象上的信息量发生变化，减少了一些有用的信息，增加一些不必要的信息，使进入传感器的辐射值发生畸变，引起图形模糊、对比度下降等。另一方面，由于卫星飞行时姿态变化及地球形状、地表形态等因素影响，图象中地物目标的几何位置发生畸变。因此，必须尽可能地通过处理消除畸变，恢复图象的本来面目。这些工作在卫星地面站形成产品前可以做一些，但不可能全部都做。因此，必须了解一些引起畸变的原因及常用的校正方法。

§2.1　辐射校正

2.1.1　辐射、辐射量与大气

一、几个常用的物理量

遥感探测实际是对辐射量的测量，它适用于整个电磁波谱。

辐射能量和辐射通量　电磁辐射有能量。辐射能量的单位是焦耳。单位时间通过某面的辐射能量为辐射通量，单位是瓦。

通量密度　单位时间内通过单位面积的辐射能量称为辐射通量密度。被辐照物表面的辐射通量密度称为辐照度，用 E 表示。辐射体本身表面的辐射通量密度称为辐射出射度，单位是一样的，都是瓦/米^2。

辐射亮度　面辐射源的辐射强度称为辐射亮度。它定义为辐射源在某一方向的单位投影表面在单位立体角内的辐射通量。用

L表示(图 2.1), L的单位是瓦/米^2·球面度。

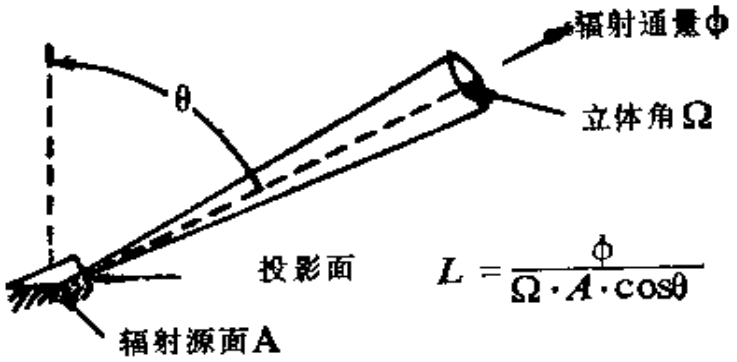


图 2.1 辐射亮度

对一般面辐射源,其辐射亮度随观察角度θ改变。但也有一些辐射源的辐射亮度与角度无关，这种辐射源称为朗伯源。广义地说,任何物体都可看作是个辐射源,其中一些较粗糙的表面，被辐照后就是一个较好的朗伯源，例如涂氧化镁后的表面。有时为了简化问题,也将某些物体近似地看作朗伯源。

反射率与透射率　在某一物质介面上半球部分反射的辐射总通量与入射的总通量之比称为反射率，用R表示。同样在介面上半球部分透射的总通量与入射的总通量之比称为透射率，用T表示。反射率和透射率常与方向和辐射的波长有关，因此也常常只考虑某一方向上以及某一狭窄波段处的反射与透射率。对于朗伯面，某一方向的反射率 $R_\theta=\frac{R}{\pi}$, π是球面度。

二、太阳的辐射

传感器所接收的可见光、近红外、中红外的辐射均来自太阳。而地面所接收的辐照度随波长不同而不同。图 2.2 画出了大气层外太阳的辐照度曲线。可以看出,在可见光区太阳的辐照度最大,随波长增大逐渐减小；图中另一条曲线是经过大气层后在标准海平面上太阳的辐照度曲线,经过大气层的吸收,对整个电磁波谱辐

照度普遍降低，而曲线下凹部分是光谱中被大气中水、二氧化碳、臭氧等分子特别吸收的部分，在这些波长上辐照度极大地衰减甚至为零。未被吸收的谱段称为大气窗口，遥感传感器所设置的波段都在大气窗口中。

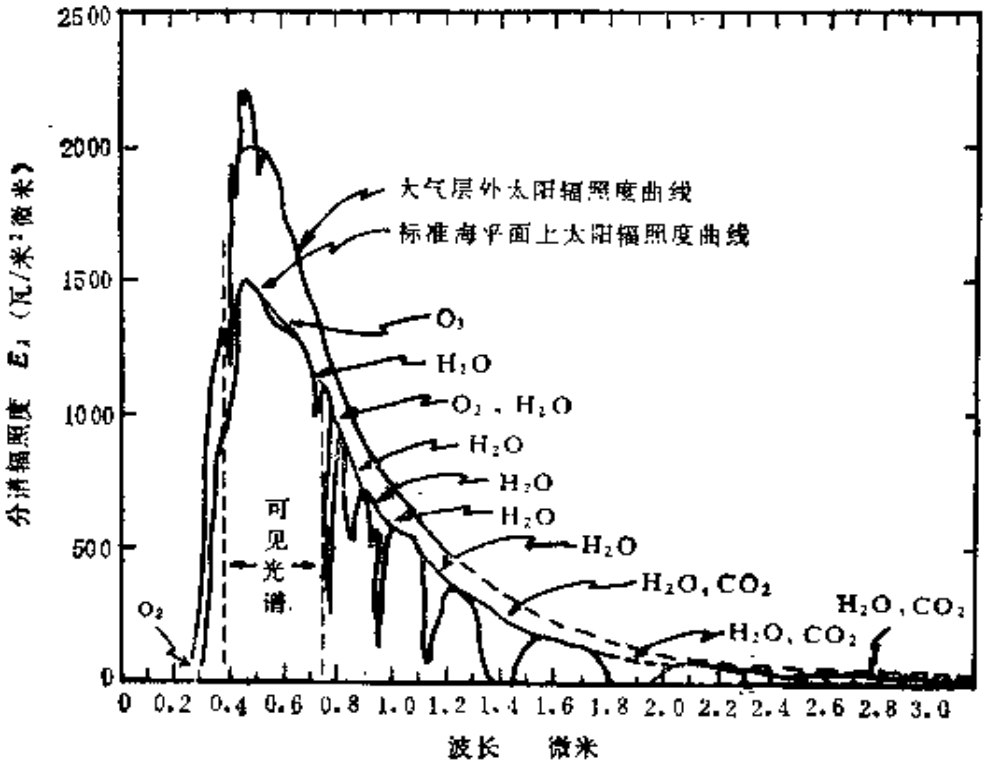


图 2.2 太阳的辐射

三、地物反射率

不同的地球表面物质，对各波段的反射率不同，见图 2.3。在图中，可以看到植被、水体和土壤反射率随波长变化的趋势，例如植被，在可见光区，大约波长 0.55μm 处有一小的尖峰，而到近红外区又有一较平坦的凸峰，因而在 MSS 影像中，比较四个波段的植被区域，会发现第一波段（0.5—0.6μm）比第二波段（0.6—0.7μm）亮度高；第四波段（0.8—1.1μm）亮度最高。第三波段（0.7—0.8μm）次之；在同一波段中可以根据光谱反射率的差异，从影像

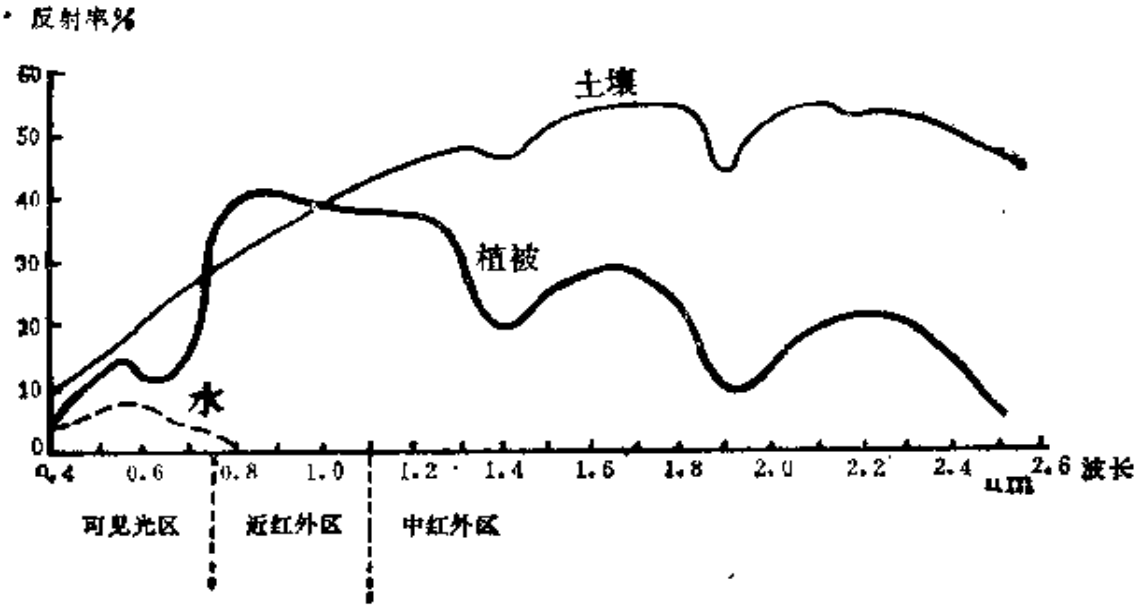


图 2.3　不同地物反射率曲线示意图

亮度的差别区别水、植被、裸土等不同的地物。从而使卫片得到不同程度的解译。即便同是植被，例如乔木、灌木、草类；生病虫害与健康农作物；同是土壤，盐渍土与非盐渍土等等在光谱曲线上都会有不同的差异，寻找差异大的波段或加以辅助的处理，可以提高解译精度。

四、大气散射

大气对电磁波的传播有很大影响。日出时太阳呈红色，晴朗的天空呈蔚蓝色，太阳光被物体遮挡，背阴的一面仍很明亮，等等。这些自然现象都是大气对太阳的辐射光散射而产生的现象。

电磁波在传播的路径上遇到原子、分子或气溶胶等小微粒时，会改变传播方向，向各个方向散开，这种现象就是散射。大气的散射有三种：空气分子比辐射波长小很多时，对这种波长的电磁波产生的散射是瑞利散射，散射强度与波长的四次方成反比($\propto\lambda^{-4}$)；烟尘、气溶胶等大小与波长相近的小颗粒产生的散射是米散射，其散射强度也与波长的几次方成反比关系，但数量关系受气候影响

较大，不确定；云、雾、霾等其大小比波长大很多，这时散射强度与波长无关，例如云呈白色，各种波长的光均被散射，这种散射是无选择性散射。

由于散射的影响，进入传感器的辐射量发生变化，使图象亮度值畸变。也就是说，进入传感器的辐射除了正常情况下地球表面物体反射的太阳辐射，还会增加大气散射后照射地面被反射的辐射通量，及周围地面反射后又被大气散射或由大气被太阳照射后直接散射的辐射通量等，这些影响的消除将在下面讨论。

2.1.2 大气引起的辐射畸变及校正

一、大气影响

在没有大气存在时，太阳的辐射照射到地面上单位面积的辐照度为：

$$E = E_0 \cdot \cos\theta$$

这里 E_0 为在窄波长段 $\Delta\lambda$ 范围内的总辐照度，它应为在 $\Delta\lambda$ 内辐照度的积分值；θ 是入射方向的天顶角。

假定地物表面较粗糙形成漫反射，或说，假定地表面是朗伯体，则某方向物体的亮度(反射的物体可以看成是一个辐射源)：

$$L_0 = \frac{R}{\pi} \cdot E$$

即

$$L_0 = \frac{R}{\pi} \cdot E_0 \cos\theta \tag{2.1}$$

这里 R 为地物反射率，π 是球面度。

大气的存在改变了 L 值。在入射与反射的路径上大气对各种波长的辐射有不同程度的吸收率，设入射方向天顶角为 θ，吸收率 T_θ；反射方向天顶角 ϕ，吸收率 T_ϕ。这一项变成

$$L_1 = \frac{RT_\phi}{\pi} E_0 T_\theta \cos\theta$$

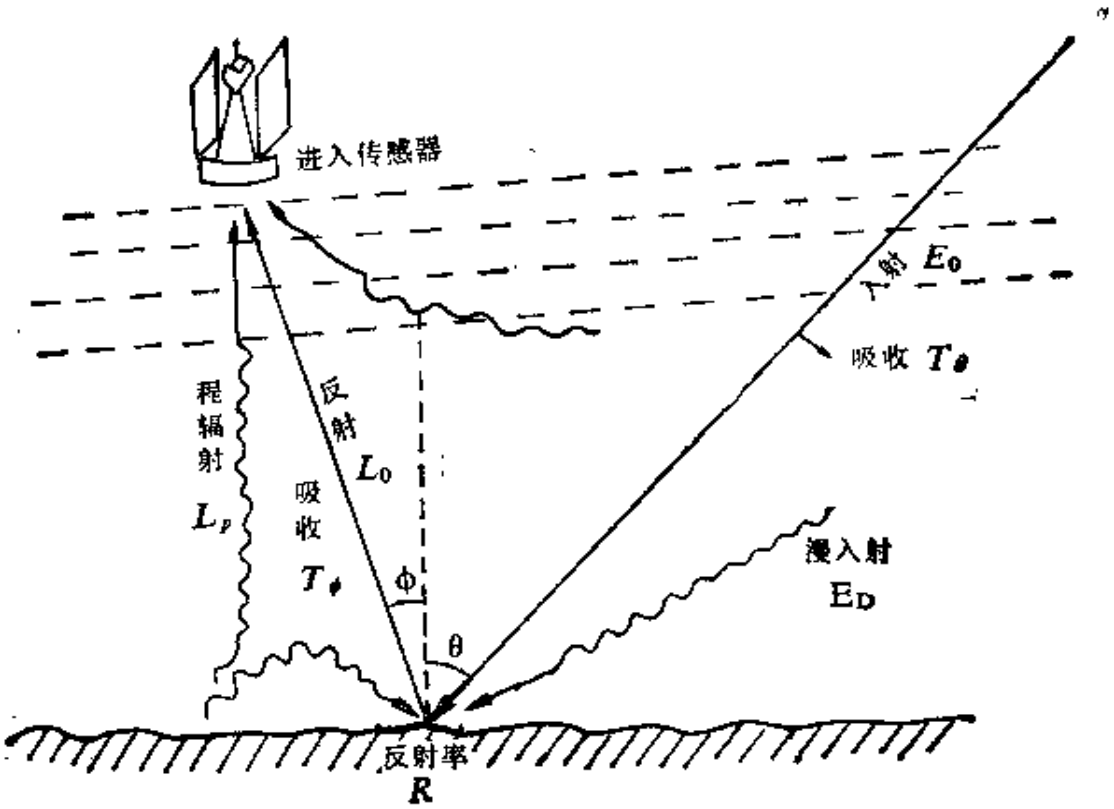


图 2.4　大气对辐射影响示意图

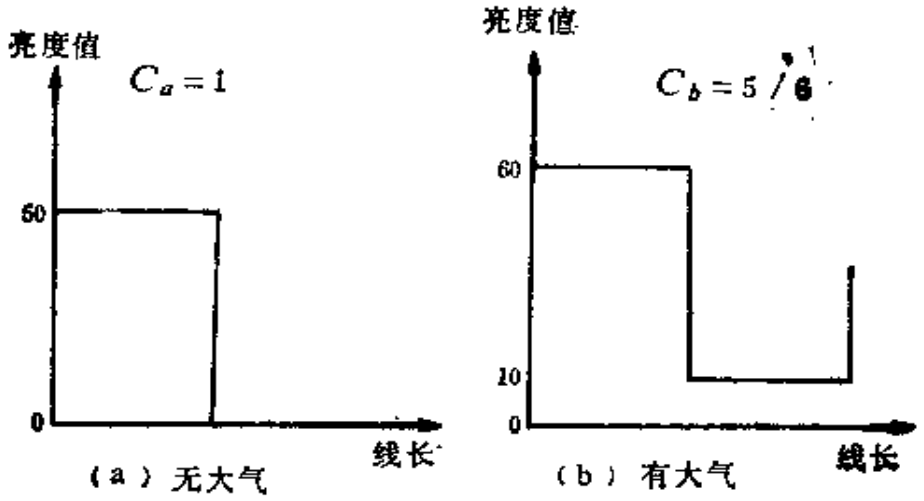


图 2.5　大气影响下图象亮度对比的变化

由于大气对入射辐射的散射，以及周围地物反射后的辐射回到大气中也被散射，散射的辐射各个方向都有，因此又重新漫入射被观察的地物，其辐照度为 E_D。经过地物的反射和反射路径上大气的吸收进入传感器，因此亮度还应加上一项：

$$L_2 = \frac{RT_\Phi}{\pi} E_D$$

如果这些散射光通过大气直接向上进入传感器，其辐射亮度用 L_p 表示，叫做程辐射度。

因此，在大气影响下，实际到达传感器内的辐射亮度不再是(2.1)式所表示的值，而成为前面分析的三项之和，即

$$L = L_1 + L_2 + L_p$$

所以

$$L = \frac{RT_\Phi}{\pi}(E_0 T_\theta \cos\theta + E_D) + L_p \qquad (2.2)$$

比较(2.1)与(2.2)式可知，大气的影响使图象亮度值普遍增大，从而降低图象对比度，造成图象质量下降。例如图 2.5 所示，图象中某一剖面，无大气时白处亮度值 50，黑处亮度值为 0，从式(1.1)可知亮度对比 $C_a = \frac{50-0}{50} = 1$，若有大气影响，黑白处亮度均增加 10，则亮度对比变成 $C_b = \frac{60-10}{60} = 5/6$。可见 $C_b < C_a$。

二、大气影响的公式校正

当传感器接收地物通过大气传递来的信息时，将公式(2.2)中模拟量 L 数字化，每个象元得到数字亮度值(或灰度值) C，传感器接收到的最大亮度与最小亮度分别用 L_{max} 和 L_{min} 表示，于是亮度 L 可以写作

$$L = CK + L_{min} \qquad (2.3)$$

其中 $K = (L_{max} - L_{min})/C_{max}$，$C_{max}$ 为图象上的最大亮度。

在作大气影响校正时，利用（2.2）式和（2.3）式，并对图象接收时的自然条件作测定，经过计算，找到各波段地物反射率与图象数字亮度值之间的数学关系，从而用这种关系修正图象亮度，使图象上象元之间的亮度变化真正反映了不同象元地物反射率之间的变化关系。这种图象可以认为是纠正了大气影响后的图象。

校正步骤为[74][75]：

1. 测量卫星飞过时星下地区的气温、相对湿度、大气压及能见度等大气条件。

2. 从温度和湿度计算水分子吸收影响，从能见度估计米散射的影响，再与瑞利散射影响一起求出大气的光学厚度 τ，这样大气的入射透过率 T_θ 和反射透过率 T_ϕ 都可借助公式 $T=\exp(-\tau\sec\alpha)$ 求出。α 为天顶角，入射角为 θ，是卫星通过该地上空时的天顶距，反射角为 ϕ，当影象在星下时，ϕ 可为零，即 $\alpha=0°$。

3. 根据波段先求出无大气时的地面入射辐照度，进而求出经过大气进入地面的总辐照度，即（2.2）式括号内部分。

4. 从瑞利散射，米散射及大气吸收计算程辐射度 L_p。

5. 将步骤 2、3、4 计算结果代入（2.2）式，得到

$$L=a_1R_b+b_1 \tag{2.4}$$

式中 a_1 与 b_1 为求出的常数值，R_b 为波段 b 对应的地物反射率，L 为此波段进入传感器的辐射亮度。

6. 计算式（2.3）中 K 值，找到对应波段传感器在卫星飞过时的最大辐射亮度和最小辐射亮度值 L_{max} 和 L_{min}，根据传感器记录的 bit 数可知最大灰度级数，如 6-bit，则 $C_{max}=63$，由此求出 $K=(L_{max}-L_{min})/C_{max}$。

7. 将 K，L_{min} 代入（2.3）式，得

$$L=a_2C_b+b_2 \tag{2.5}$$

式中 a_2 与 b_2 分别为 K 和 L_{min} 的值，C_b 为波段 b 每一象元

对应的亮度值，L 为此波段该象元位置对应的辐射亮度。

8. 联立 (2.4) 与 (2.5) 式，两式 L 对应相等，因而找到 R_b 与 C_b 的线性关系：

$$R_b = a_3 C_b + b_3 \tag{2.6}$$

式中 a_3、b_3 为常数

9. 重复步骤 2—8，求出其它波段 R_b 与 C_b 的关系。

10. 将图象中每一波段所有象元的亮度值代入 (2.6) 相应等式，换算成反射率 R_b 值，从而消除了大气影响产生的辐射畸变，只有反映地物特性的反射率值这一因子留下。解决了图象降质问题。

弗斯特 (Forster) 用一实际情况作了计算。他采用陆地卫星2的MSS 第七波段即 0.8—1.1μm，1980 年 12 月 14 日上午 9:05 过澳大利亚悉尼上空，当时的气温 29℃，相对湿度 24%，海拔 30m 处大气压 1004 毫巴，能见度 65km。计算结果，当时大气的光学厚度 $\tau = 0.15$，根据卫星通过时太阳天顶角 38° 得到 $T_\theta = 0.827$，$T_\phi = 0.861$，(2.2) 式括号内部分是 186.6wm^{-2}，$L_p = 0.62 wm^{-2}Sr^{-1}$ (Sr 为球面度单位)，于是得

$$L = 51.5R_7 + 0.62$$

又从传感器得到 $L_{max} = 39.1\ wm^{-2}Sr^{-1}$，$L_{min} = 1.1\ wm^{-2}Sr^{-1}$，$C_{max} = 63$ 级，所以 $K = 0.603 wm^{-2}Sr^{-1}$/级，于是得

$$L = 0.603C_7 + 1.1$$

两式联立得

$$R_7 = 0.0118C_7 + 0.0094$$

同理，可以算出其它波段的换算公式，如

$$R_5 = 0.0044C_5 + 0.005$$

等等。

除这种方法以外，也还有相似的方法解决这一问题，但因这类

方法比较复杂，又需要取得卫星飞过时的地面资料，这些资料常常拿不到，因此，在实际应用上受到一定限制。另一方面，有时也不需要计算得那么精确，只要粗略作一些校正，去掉主要的大气影响便可以满足要求，也可以使计算过程简化。

三、大气影响的粗略校正

用较为简便的方法粗略校正大气的影响主要是想办法去掉式(2.2)中 L_p 这一项，即程辐射度，从而使图象质量大大改善。至于式中其它部分如漫人射等影响，还可以通过其它方法如比值法(见3.4.4)等进行校正去除。

程辐射主要来自米散射，它的大小与 $\lambda^{-\alpha}$ 成比例，(α 不定，可能 0—4)，也就是说波长越长，散射越小，以 MSS 为例，第四波段(0.8—1.1μm) 散射影响最小，甚至可以粗略认为是零，然后三、二、一波段，影响逐渐增大。

严格地说，程辐射度的大小在图象内不同象元位置应该有所不同，这是因为受大气条件、太阳照射方向和时间的变化而制约，但这三种变化十分微小而且难以估计，通常认为程辐射度在一个有限的面积内，如一幅图象内，只与波段有关。也就是说，同一波段一幅图象的程辐射度是一个常数值。

(1) 直方图最小值方法

直方图（见 3.1.1）是一种统计和分析的表示方法。作一二维空间，横坐标代表图象中象元所具有的灰度值，纵坐标代表每种灰度的象元数占总象元数的百分比。因此，从直方图统计中可以找到一幅图象中最小的灰度值。

假定在图象中有一区域有极低的辐照度，如由于地形起伏产生的阴影区或云块产生的影区，或者反射率很低，如清水，这时图象上对应象元的灰度值应为 0，但实际不为 0，这多出来的数值应是程辐射进人的结果，根据程辐射度大小与波长的关系，长波段存在的灰度最小值可能接近于零或就等于零（图 2.6）。随着波长减

小，在对应地区这个值增大。因此，校正的方法为每一波段每个象元都减去本波段的最小值，使图象亮度的动态范围得到改善，提高了图象质量。

这种方法的局限性在于，有些图象找不到如此低亮度的区域，特别是当地物反射率高而太阳高度角又较大时就更困难，必须采用其它方法。

（2）回归分析法

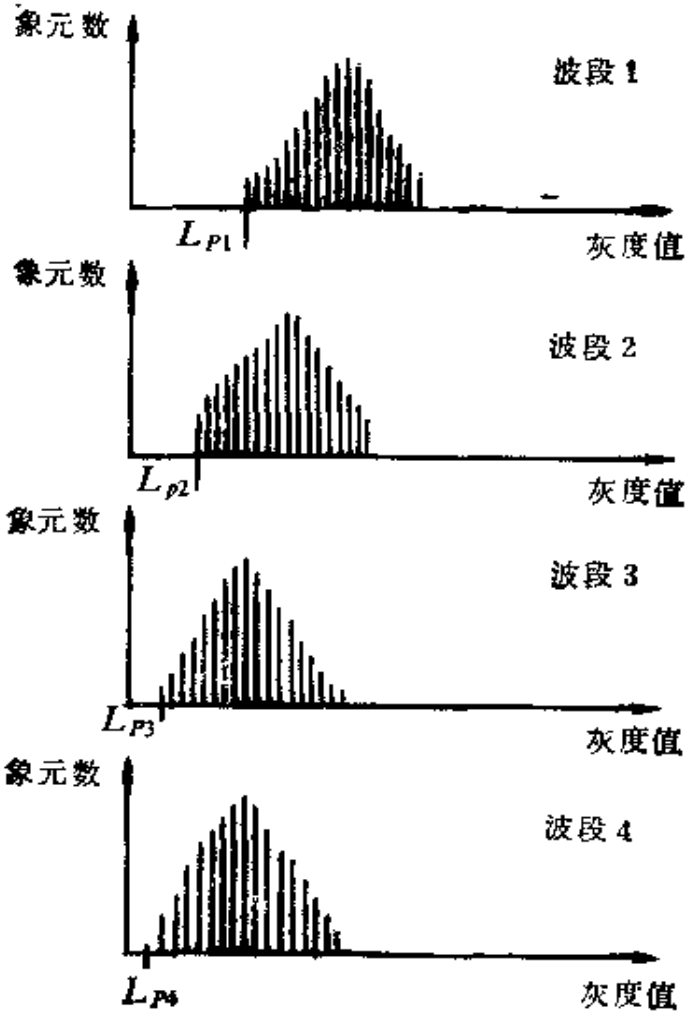


图 2.6　MSS 各波段直方图最小值（$L_{P_1}L_{P_2}L_{P_3}L_{P_4}$）

仍假定波长最长的波段程辐射率近似为零，如 MSS 中的 4 波段，设为波段 a，为了找到其它波段的程辐射度，用其它波段的亮度与第 a 波段相比，如第 1 波段设为波段 b，画出 b 与 a 波段的二维光谱空间，即横坐标为 a 波段亮度，纵坐标为 b 波段亮度，每个对应象元在坐标里点一个点。由于波段之间的相关性一定能通过回归分析，找到一条直线与 B_b 轴相交

$$B_b = \beta B_a + \alpha \tag{2.7}$$

α 是直线在 B_b 轴上的截距，β 是斜率，见图 2.7。

$$\beta = \frac{\sum(B_a - \bar{B}_a)(B_b - \bar{B}_b)}{\sum(B_a - \bar{B}_a)^2}$$

$\bar{B}_a$，$\bar{B}_b$ 分别为第 a 和第 b 波段亮度平均值，因而求出

$$\alpha = B_b - \beta B_a$$

α 是波段 a 中亮度为零处在波段 b 中所应具有的亮度，可以认为，α 就是波段 b 的程辐射度。从波段 b 中每个象元亮度减去 α，便去掉大气程辐射影响。依次用同样方法可以去掉其它波段的影响。

（3）协方差矩阵法

假设地表为朗伯体表面，且地物比较均匀，也可以用协方差矩阵法求程辐射度。

设 a 为已知程辐射度的波段，假定波长最长的波段 $L_p^a = 0$ 如：MSS 波段 4，b 为所求程辐射度的波段，如：波段 1。$\bar{B}$ 为平均值，V 是波段图象协方差矩阵的特征向量值*。则程辐射度可以用公式

$$L_p^b = \bar{B}_b - \frac{\bar{B}_a}{V_a} \cdot V_b \tag{2.8}$$

来求，从波段 b 每个象元亮度值减去 L_p^b，使图象得到校正。

这种方法计算的结果与回归分析法计算结果相比，十分相近，

---

* 请参阅概率统计方面参考书

可以得到类似的处理结果[76]。

2.1.3 仪器引起的辐射畸变及校正

一、产生的主要原因

卫星传感器内常常一个波段有多个检测器同时工作，接收来自不同地域条带的信号。如在陆地卫星MSS中每一波段有6个检测器，TM 中每一波段有 16 个检测器，而 SPOT 卫星的 HRV 传感器的全色波段则有6000个之多。这些检测器的性能不可能制作得完全没有差别。在辐射能量进入检测器并转变成信号输出时，这种转变是线性关系，如果检测器全部相同，线性的斜率（或叫增益）应该相同，但这往往很难做到；另外，当没有辐射进入检测器应该没有信号，而实际上却有微弱信号产生，使得线性关系又在信号轴上产生一个截距（或叫暗流），而且各检测器截距不相同。见图 2.8。检测器的这种性能上的差异导致接收的图象不均匀，产生条纹。有时检测器甚至不是线性特性，因误差很小，在此不予考虑。

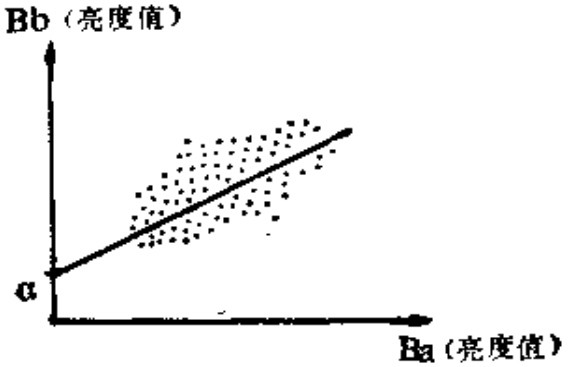


图 2.7 回归分析求截距

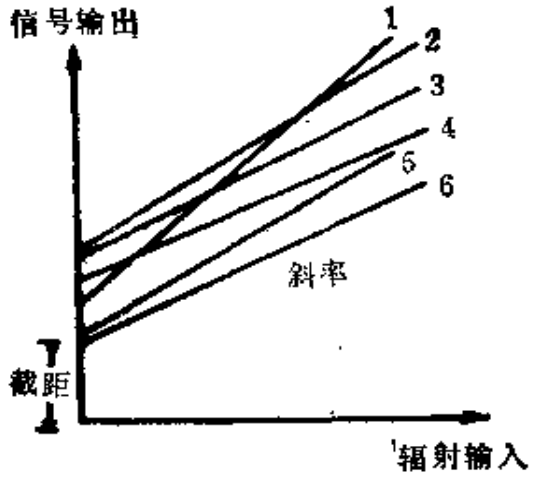


图 2.8 六个检测器性能差异

二、校正

由于仪器本身产生的辐射畸变，多数在产品到达用户手中以

前已被资料处理中心校正。因为在设计传感器时已经考虑到这种校正，并在系统内安装了“较准楔”，以提取为今后校正所需的数据。

有时，拿到用户手中的图象数据有条纹出现，这就需要自己进行校正。下面介绍一种不用辅助数据的校正方法。

假设图象上几个检测器扫描的对象比较均匀，可以认为对应于同一检测器所得象元亮度值(灰度值)的均值和标准差应和其它检测器对应的象元亮度的均值和标准差相同。例如对 MSS 的一个波段的第 (1 + 6n)行，(2 + 6n)，(3 + 6n)，(4 + 6n)，(5 + 6n)，(6 + 6n) 各行 (n = 0, 1, 2, ···) 象元分别求均值和标准差，应该对应的均值和标准差分别相等，如果不相等，说明检测器不均匀，需要校正。

在校正时，以某一检测器对应的象元亮度均值和标准差为准，或以用户自己指定的均值和标准差为准，校正其它检测器与之匹配。校正公式为：

$$G = \frac{\sigma_a}{\sigma_b} G_0 + m_a - \frac{\sigma_a}{\sigma_b} \cdot m_b \tag{2.9}$$

式中 G_0 为校正前象元亮度值，G 为校正后象元亮度值，m_a, m_b 分别为作为校正标准的均值和被校正数据的均值，σ_a，σ_b 分别为作为校正标准的标准差和被校正数据的标准差。校正以后，可以达到去掉条纹的效果。

§2.2 几何校正

2.2.1 几何畸变产生的原因

有多种因素可以引起遥感图象几何位置上的变化，产生行、列的不均匀，象元大小不等，形状不规则等多种畸变。归纳起来，主要是由地球、卫星、传感器产生。畸变的图象给解译分析，位置配准造成困难，因此必须弄清畸变原因后加以校正。

一、地球自转造成的影响

无论是 MSS、TM，还是 NOAA 系列的 AVHRR 或 SPOT 的 HRV，都是在卫星前进的过程中传感器对地面扫描得到图象。对一幅图象自上面第一行扫描开始至下面最后一行扫描结束需要一段时间，在这一段时间中，地球自西向东在旋转，大致与卫星前进的方向垂直。除 AVHRR 在卫星降段和升段都接收图象外，多数卫星均在降段接收，也就是自北向南运动。这样，地球的自转相对于卫星向右，由于相对运动的效果，使卫星的星下位置在卫星前进的过程中逐渐向左移动，产生偏离。扫描行距第一行越远，左偏也越大。对于卫星升段自南向北运动中接收图象，偏离方向正好

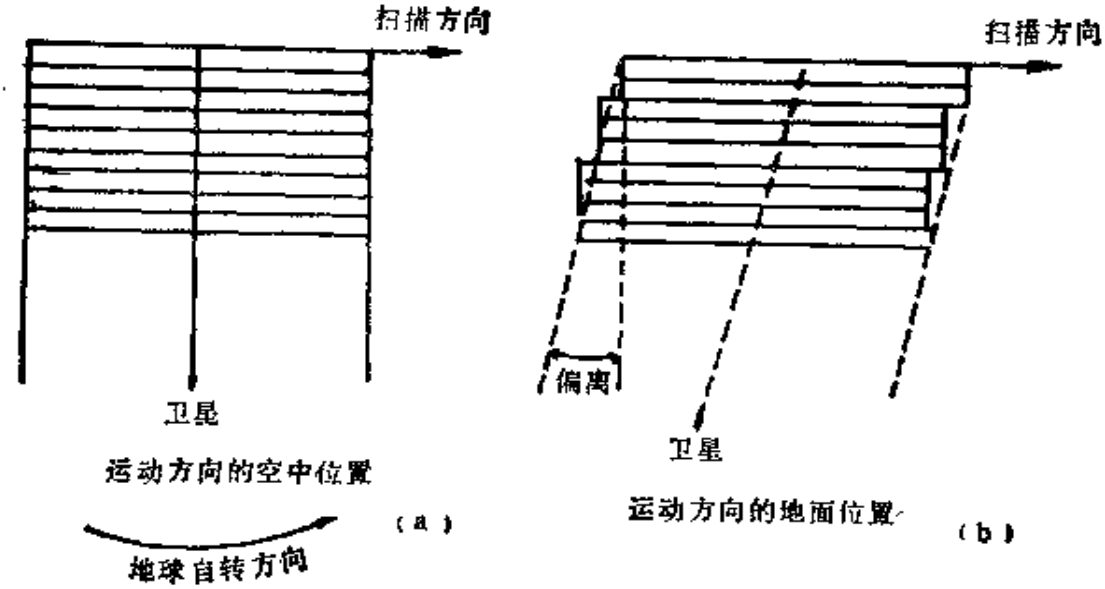


图 2.9　地球自转引起的偏离示意图

相反。

图 2.9 表示了地球自转造成的卫星图象畸变，(a) 图表示从传感器中取得的图象，卫星运动方向垂直于上下底边，图象呈矩形。(b) 图表示实际扫描时对应的地面位置，由于地球的自转，卫星运动时偏离了垂直于上下底边的方向，星下位置向左移动，因

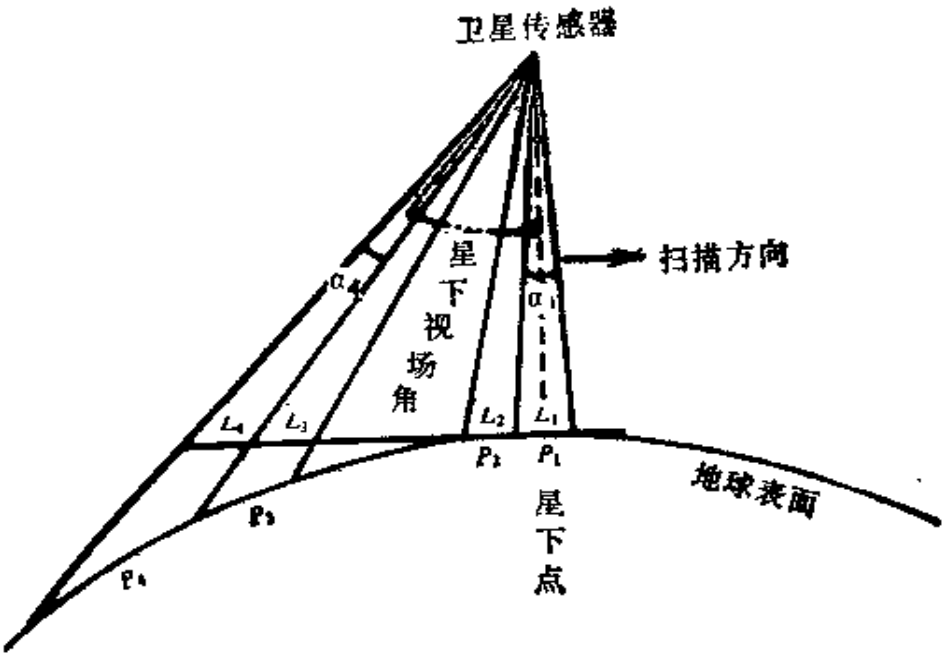


图 2.10　地球表面曲率引起畸变

此（b）图也应该是校正地球自转影响后的实际图象情况。

二、地球表面曲率的影响

地球是一椭球体，粗略地说，地球是球体，因此，地面表面各处都是弯曲的。当卫星前进时，一边扫描一边前进，在前进方向上每次扫描对应的地表长度很小，如 MSS 只有约 80 × 6 = 480 米。其它传感器对应的数值也很小，在这个长度数量内，地面可以看作平坦的，不必考虑地面曲率的影响。而在垂直于卫星前进的方向则不然，地面曲率的影响有时还很大。这从图 2.10 可以看出，如果地面无弯曲，扫描器扫描过程中的每一次取样间隔，是星下视场角的等分间隔，对应于地面的瞬时视场宽度应是图中 L_1、L_2、L_3、L_4，等。显然，对应于传感器为中心的相同的张角 $\alpha_1 = \alpha_4$，L_1 和 L_4 不等，但差别较小。如果考虑地面曲率的影响，则对应的地面宽度是图中 P_1、P_2、P_3、P_4 等，P_1 与 P_4 的差别远大于 L_1 和 L_4 的差别，即 $P_4 - P_1 > L_4 - L_1$。可见，这个影响是必须校正的。而且，距星下点越远，畸变越大，从图中看 $P_4 - P_1 > P_3 -$

$P_1 > P_2 - P_1$。

地球表面曲率的影响程度，对不同的卫星及传感器有所不同。对于陆地卫星和 SPOT，由于卫星飞行高度低，星下视场角也不大，整个扫描覆盖地面不到 200 公里，如同图中 P_1 与 P_2，可以认为曲率的影响很小，即 $P_1 \approx L_1$，$P_2 \approx L_2$，因此对于 MSS、TM 或 SPOT 的 HRV，有时不作曲率校正也可以满足对图象位置精度的要求。而对于 NOAA 等极地气象卫星，飞行高度 833km，扫描宽度可达 2,700km，在如此宽的范围内，地面弯曲造成的影响很大。特别是在扫描视场的边缘地带，由于视场大，本身已造成象元宽度比天底点处象元宽度大了 2.89 倍(见全景畸变分析)，考虑了地球表面曲率后，经过计算可知，边缘象元宽度是中心象元宽度的 4.94 倍。由此看来，这个影响就是不容忽视的。

三、全景畸变

全景畸变是由于传感器扫描角度较大引起图象的一种畸变。图 2.11 表示了这种畸变的原因和畸变的表现。

(a) 图表现畸变原因。当传感器扫描时，取样间隔为等角间隔，但星下点中心象元处卫星高度是 h，边缘处象元与卫星距离增大，因此所对应的垂直线度加大，即 $l_4 > l_3 > \cdots > l_2 > l_1$。这个垂直线度就等于垂直于扫描方向上象元的边长，也就是说象元的上下边长越往边缘越加大，见 (b) 图中 l_4 和 l_1，这可能导致图象边缘处行间重叠，但影响不太大，一般可以忽略。

在扫描方向上，实际对应的地面宽度是 L_1、L_2、L_3、L_4 等，而且 $L_4 > l_4$，$L_3 > l_3$ …… 越往边缘，偏离越大，每个象元对应的地面宽度越大，见图 (b) 中 L_4 与 L_1，这种偏离对于陆地卫星和 SPOT 卫星传感器，由于最大扫描角较小，可以忽略，如对陆地卫星象元长度增大 2%。而 AVHRR 由于扫描视场大，如前面已提到它的边缘象元比中心象元宽度大 2.89 倍，这种畸变就不能容忍了。许多航空扫描器也是如此。

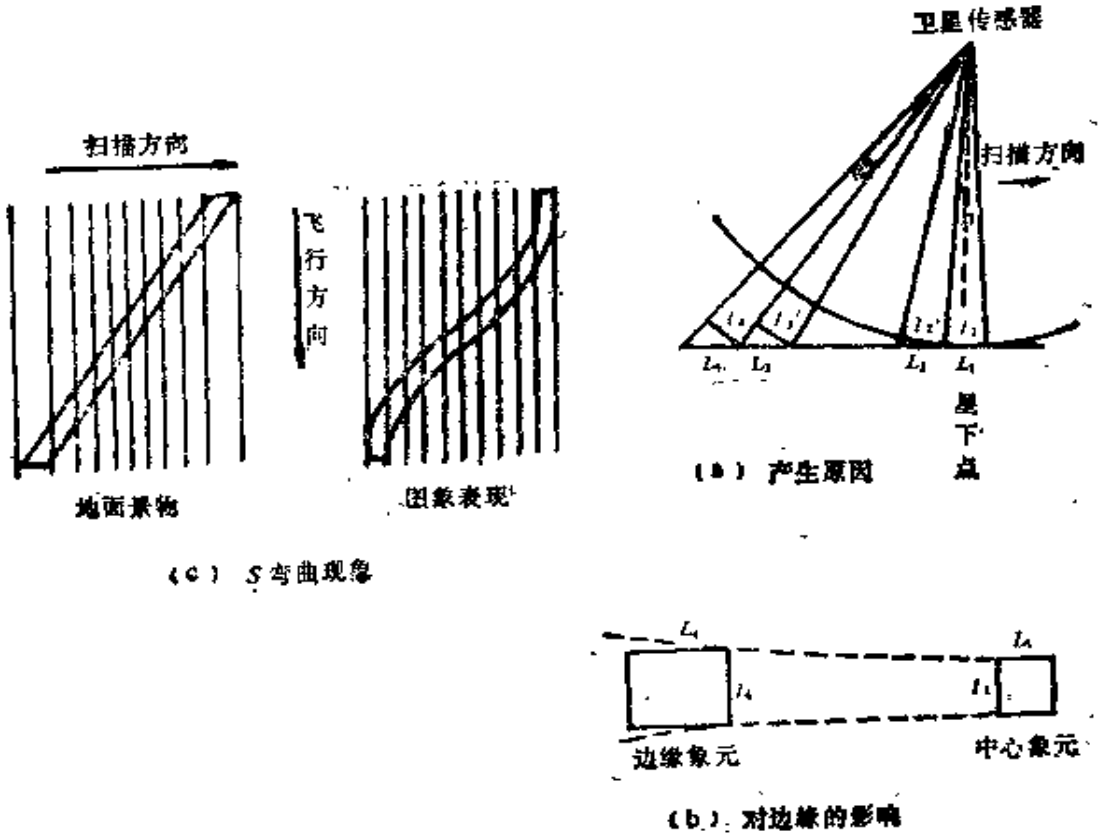


图 2.11　全景畸变

(a) 产生原因　(b) 对边缘的影响　(c) S 弯曲现象

由于对于大视场角传感器，边缘处一个象元对应的地面宽度加大，但在图象上所记录的仍是一个象元大小，与中心象元在显示上大小没有区别，这样势必造成边缘处的景物在图象显示时被压缩，如（c）图所示。假定地面真实景物有一条线，成象时中心象元线窄，边缘象元线宽，而显示时由于各象元一样大小，边缘处景物被压缩，使直线被显示成反 S 形，这种现象叫 S 形弯曲，是全景畸变的表现形式。对全景畸变实行校正后应恢复地面景物的本来面目，也就是中心象元窄，边缘象元宽。

四、遥感平台位置与运动状态引起畸变

遥感平台指载有传感器的卫星，也适用于载有传感器的飞机。

航天飞机等。这里我们以介绍卫星为主。

(1) 高度　卫星发射时虽然有标称高度，但飞行过程中受各种力学因素影响，会产生与原标准高度的偏离。因为，卫星的轨道只是接近圆形，严格说是一椭圆轨道，加上地球形状本身也是椭球体，所以卫星高度是变化的。传感器扫描视场角不变，高度越高，扫描行对应的地面长度越长，反之高度越低，低于标准值，则扫描行变短造成卫星前进中图象宽窄的变化，如图 2.12(a)。

这种因高度引起的宽窄变化也会同时影响到卫星前进的方向，导致图象象元在上下方向上的加宽与变窄。加宽时会产生行与行间重叠，变窄时会产生行与行间缝隙，但对卫星影象影响很小。

(2) 速度　卫星的椭圆轨道导致卫星运动速度一定不均匀。其它因素也会影响飞行速度。速度快时扫描带超前，速度慢时扫描带落后，都会导致图象在卫星前进方向上即上下方向上的位置错动，如图 2.12(b)。有时也会产生行间缝隙或重叠现象。

(3) 俯仰　卫星姿态在整个图象形成过程中也有很大影响，卫星的俯仰变化会引起图象上下方向的变化。由于星下点俯时后移，仰时前移，导致行间位置错动，或整个图象的位置变化，如图 2.12(c)。

(4) 翻滚　卫星姿态的翻滚是偏离了原水平方向，以卫星前进的方向为轴旋转了一个角度，导致星下点在扫描线方向上偏移，整个图象行会向翻滚角引起偏离的方向错动，如图 2.12(d)。这种翻滚在卫星前进过程中发生，因而图象行的错动逐渐变化导致畸变。

(5) 偏航　卫星前进过程中偏离了原来的前进航向，称为偏航。由于航向偏转一个小的角度，必然引起扫描行方向的变化，以致整个图象的倾斜畸变，如图 2.12(e)。图中所示夸大了变化，实际上变化是很小而且缓慢的。

以上所分析的几种变化都是卫星本身造成的影响，这些影响与

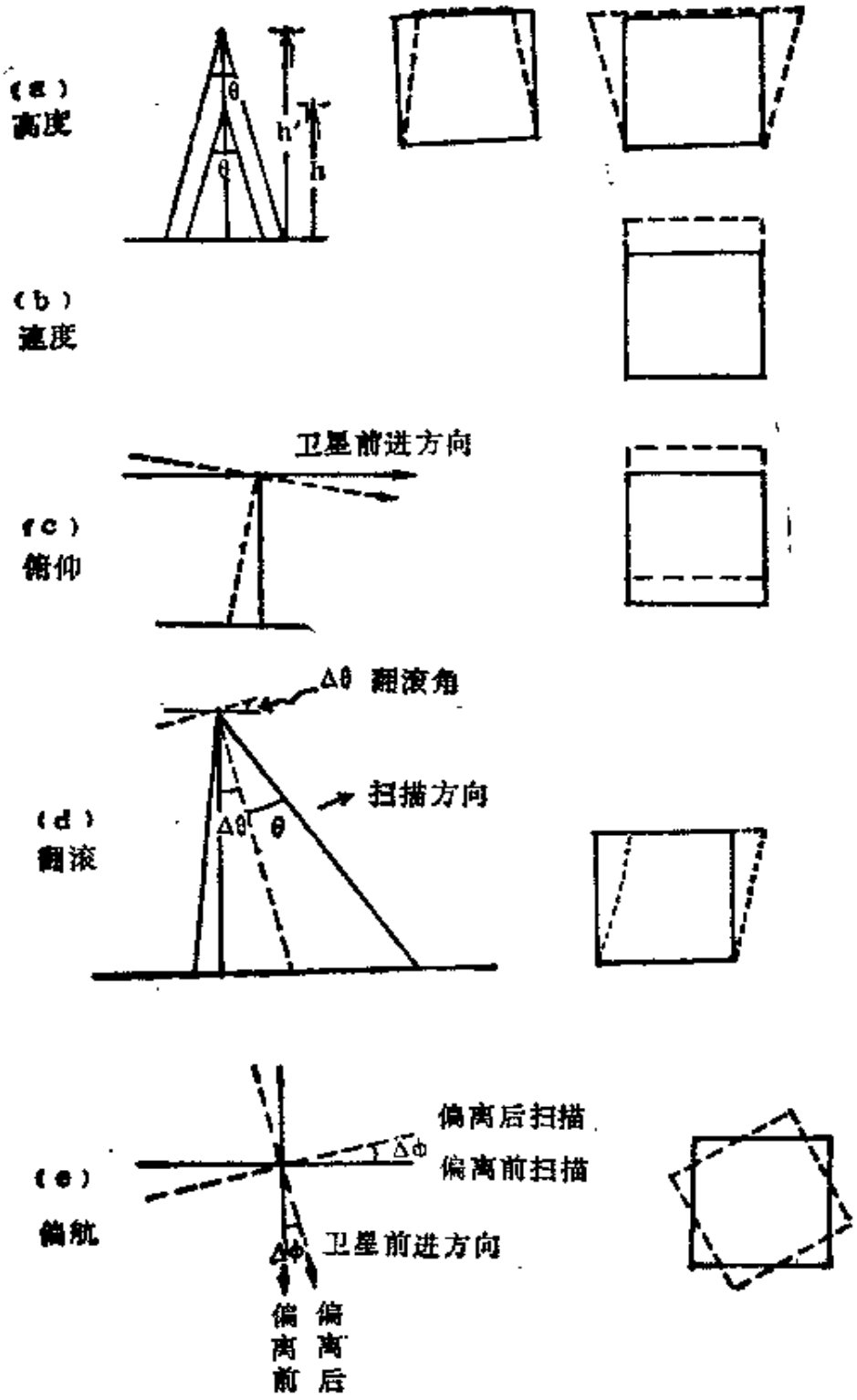


图 2.12　卫星位置与运动状态改变对图象的影响

前面几种有所不同，它们由随时变化的卫星位置和姿态产生，因此，校正时必须取得有关卫星的辅助数据。

其它遥感平台，如载有传感器的飞机，在飞行过程中也会产生上面的五种位置和运动状态的变化，只是产生的原因与卫星不同，引起图象畸变的结果与前面分析相同。因此也需要获得飞机飞行中的各种参数作为辅助数据，使图象得到较精确的校正。

五、传感器的影响

(1) 扫描时间　扫描器在扫过一个视场角的过程需要时间，与此同时，在这段时间内卫星已向前飞行一段距离，因此在某一扫描行结束时，位置已比这一行开始时的位置超前了一些而偏离了原扫描方向。例如 MSS 的一个扫描行 185km 长，在结束时超前了 200 多米，对于气象卫星 AVHRR 超前就更多了。

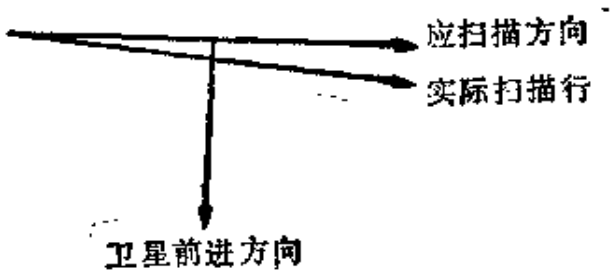


图 2.13　扫描时间引起扫描行超前

(2) 其它　还有一些由传感器本身特性造成的影响，如扫描镜扫描过程中速度不均造成扫描时地面距离的非线性增长；以及检测器各行采样数不一致等问题。另外象元点对应地面长宽不一样的采样间隔也会造成误差等。

2.2.2　几何畸变的精校正

所有引起几何畸变的因素综合效果使所得图象数据在辐射校正后必须进行几何校正。根据产生畸变的原因，利用计算公式和取得的辅助数据可以进行系统校正，有时称作粗校正。这项工作常常就在卫星资料处理中心完成，那里有专门进行系统几何校正的软件包。得到的校正后的产品是 PS 类产品，见 1.3.2。由于卫星上仪器提供的姿态信息一般来说满足不了几何校正所要求的精

度。例如：陆地卫星的 MSS，每个卫星姿态的分量如能精确到 0.1 毫弧度，才能达到图象精确到一个象元，而对同步气象卫星的可见光红外自旋扫描辐射计则需空间飞行姿态精度在 24 微弧度以内。实际上这个条件是很难达到的。因此，前述的校正是粗略的，图象产品在做定量解译以前还需要用户作进一步的工作，使图象的几何位置符合某种地理坐标系统，与地图配准，并调整亮度值，也就是利用地面控制点作精密校正，又叫精校正。

精校正后的产品是 PG 类数据，也可以在卫星资料处理中心完成。完成后的产品如果坐标系统需要改变，或要和另外的地图或图象配准，则仍可以用控制点精校正方法作配准处理。

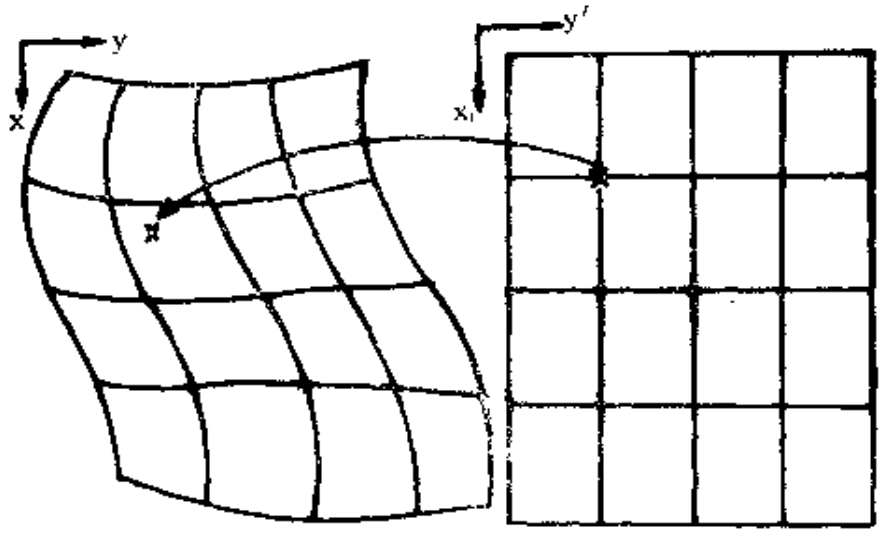
如果拿到的图象数据没有经过几何校正，也无法得到系统校正数据，不能利用公式进行计算，也可以直接采用下述方法，从而得到比较精确的图象数据。

总之，掌握精校正的方法十分重要。对于图象的校正、配准、镶嵌以及多时相或多种图象的复合分析都是一种不可缺少的方法。

由于对于校正后图象的精度要求不同，方法的复杂程度也不同。精度越高，计算量越大，耗费机时也越多。所以，只要结果满足要求，计算不必太繁。这里介绍的是最常用的方法——利用二元多项式再采样。

一、位置计算

原始的被畸变的图象象元点间的对应地面距离是不等的，如图 2.14(a)，但在图象上仍表示为等间距的网格点。校正后的图象亦是等间距的网格点，以地面为标准也是符合某种投影的均匀分布点，如图 2.14(b)。这些点对应到图象上可以看作象元的中心。因此，一定可以找到一种数学关系，描写变换前图象坐标 (x,y) 与变换后图象坐标 (x', y') 之间的换算。而且可以分析，整数 (x', y') 的象元点在原图象坐标系中一般地不在整数 (x, y) 点上，也就是说，不在原图象元的中心处。所以第一步的工作是把校



（a）校正前　　（b）校正后

图 2.14　几何精校正

正后图象中的每一点找到校正前图象中的对应位置。

两个图象点间对应关系，一般描述为数学关系：

$$\begin{cases} x = f_x(x', y') \\ y = f_y(x', y') \end{cases} \tag{2.10}$$

这个数学关系常表示为二元多项式一次、二次或三次或更高次表达式

$$\begin{cases} x = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x'^i y'^j \\ y = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x'^i y'^j \quad (n = 1, 2, 3, \cdots) \end{cases} \tag{2.11}$$

以二元二次多项式为例，这个式子展开后可以写为

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{11}x'y' + a_{20}x'^2 + a_{02}y'^2 \\ y = b_{00} + b_{10}x' + b_{01}y' + b_{11}x'y' + b_{20}x'^2 + b_{02}y'^2 \end{cases} \tag{2.12}$$

计算采用最小二乘法。首先寻找两个图象已知的对应点，称作控制点。这些控制点在两个图象上的坐标分别已知。使用最小二乘法和已知控制点坐标求出未知的系数 a_{ij} 和 b_{ij}，于是找到

了两种图象间数学关系表达式(2.11)的具体表示。然后，依次代入校正后图象每个象元点的坐标，求出相应的 x 和 y 值，完成了位置计算。

这里要注意选择控制点的问题。

(1) 控制点的数目　控制点的多少决定了位置计算(2.11)式的最高次数。按照解方程组未知数与方程个数必须相同的原则，一次多项式至少选取 3 个控制点，得到 6 个坐标数，可求出未知的 6 个系数；二次多项式至少选取 6 个控制点，列出 12 个方程分别求出 12 个系数；三次多项式至少选取 10 个控制点；以此类推，对于 n 次多项式，控制点的最少数目为 $(n+1)(n+2)/2$。

为了使校正后的图象各处校正效果都比较好，必须使控制点选取在图象各处且分布比较均匀，特别是边界，四角要有控制点，以避免图象校正不能满幅。在地面特征变化较大的地区也要多选一些以提高准确度。因此控制点数一般要大于最低值。增加控制点数目和增加多项式次数可以提高精度。现在有一种较多采用的方案为：控制点在 4 至 7 个时，用双线性变换，公式为：

$$\begin{cases} x = a_{00} + a_{10}x' + a_{01}y' + a_{11}x'y' \\ y = b_{00} + b_{10}x' + b_{01}y' + b_{11}x'y' \end{cases}$$

控制点为 8 至 19 时用二次多项式；控制点为 20 至 49 时用三次多项式；控制点为 50 以上用四次多项式并不再增加次数。因为再继续增加控制点和增加次数，位置精度增加很少而计算量却增加很多，浪费了机时。

(2) 选择的目标　选择控制点时如果以地面坐标为标准，又叫地面控制点，记作 GCP。有时也用已有的地图、校正好的图象等作为选择控制点的参考。

为了保证控制点本身的准确，一般选用在图象上易分辨且目标较小的突出特征，很容易用目视方法辨别出来。如道路的交叉点、河流的分叉或弯曲处、海岸线弯曲处、小岛屿、飞机场等，而且

这些特征在研究的时间范围内没有变化。在被校正图象的边缘处，要想办法选取控制点，不要漏掉。因为这种曲面的拟合，特别是高次曲面，在控制点以外的区域会按区域内的变化趋势继续延伸，外推的结果会产生较大的错误，反而增加了畸变。这一点要引起特别的注意。有时为了弥补控制点的不足，在边缘附近或无特征点的地区选取计算出的控制点，如求重心坐标或求延长线间交点位置，当然这样会增加计算的复杂性。

二、亮度值内插计算

由于位置计算后找到的对应 x 和 y 值，多数不在原来象元的中心如图 2.14(a)，因而必须重新计算新位置的亮度值。一般地，新点的亮度值介于邻点亮度值最大和最小值之间。根据校正后图象的应用要求，有三种方法可以选择，它们都是内插计算：

(1) 最近邻再采样　取被计算的点周围相邻的四个点，比较它们与被计算的点 (x, y) 的距离，哪个点距离最近，就取哪个点的亮度作为 (x,y) 点的亮度值 $f(x,y)$。设最近点坐标为(k,l)则

$$\begin{cases} k = \text{Integer}(x + 0.5) \\ l = \text{Integer}(y + 0.5) \end{cases}$$

Integer 代表不作四舍五入直接取整数。这样点 (k, l) 的亮度值 $f(k,l)$ 就是点 (x,y) 的亮度值 $f(x,y)$。见图 2.15 即 $f(x,y) =$

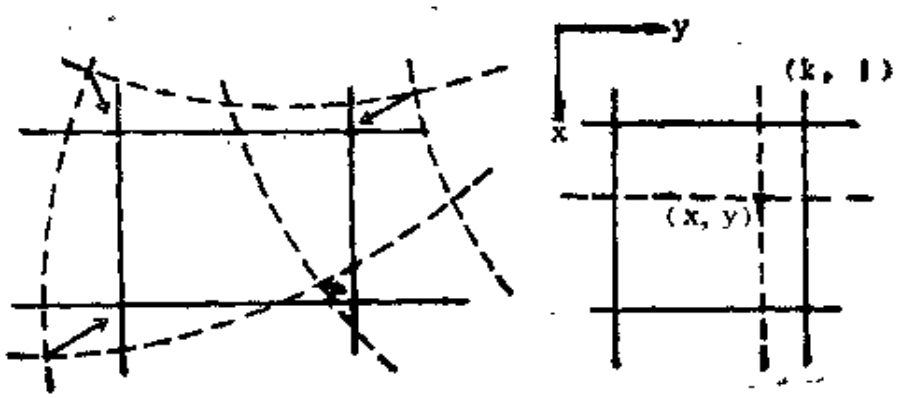
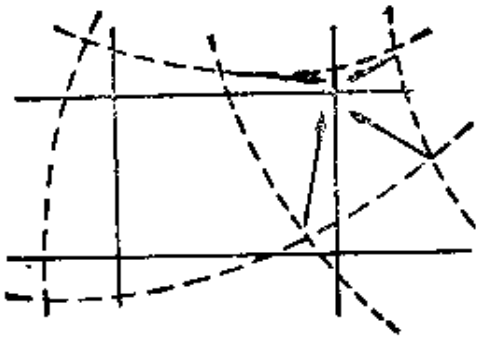


图 2.15　最近邻再采样

$f(k, l)$。



这种方法计算简单，节省计算机机时。在几何位置上误差为 ± 0.5 象元。但原图象中某些线状特征会被扭曲或变粗成块，影响了精确度。

（2）双线性内插　取被计算亮度的点（x，y）周围四个

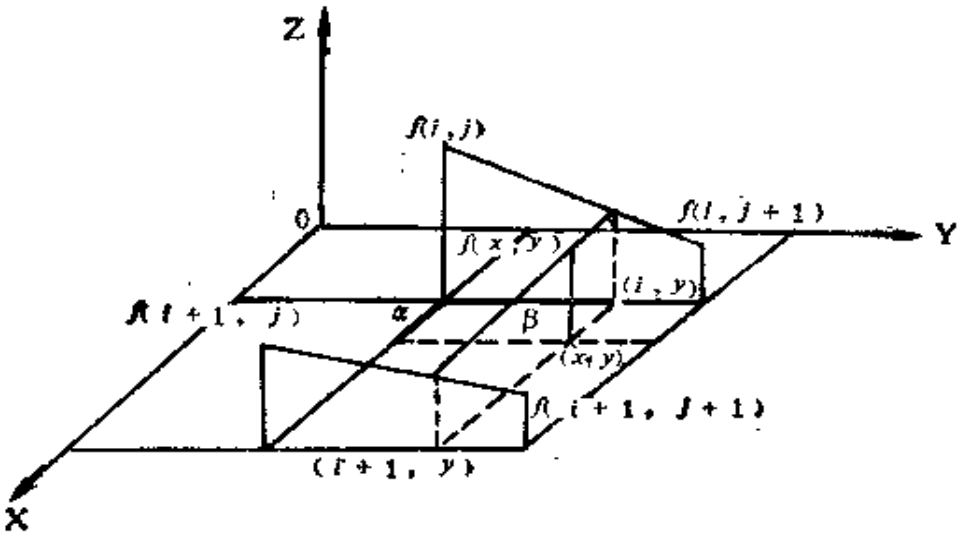


图 2.16　双线性内插

邻点，利用 x 方向和 y 方向进行三次内插，得到（x，y）点的亮度值 $f(x, y)$，这就是双向线性内插法。具体计算时，设 $\alpha = x - i$，$\beta = y - j$，如图 2.16。先计算 y 方向的二个内插值 $f(i, y)$ 和 $f(i+1, y)$，图中坐标点处的高度代表这点的亮度值，同方向两点间距离为 1，由内插公式可以推出：

$$f(i, y) = \beta f(i, j+1) + (1 - \beta) f(i, j)$$

$$f(i+1, y) = \beta f(i+1, j+1) + (1 - \beta) f(i+1, i)。$$

然后，再计算 x 方向，这时 $f(i, y)$，$f(i+1, y)$ 成为二个端点，总内插公式为：

$$f(x,y)=(1-\alpha)[\beta f(i,j+1)+(1-\beta)f(i,j)]$$
$$+\alpha[\beta f(i+1,j+1)+(1-\beta)f(i+1,j)] \quad (2.13)$$

其中 i 和 j 的位置也通过 x, y 确定: $i=\text{Integer}(x)$, $j=\text{Integer}(y)$。(2.13)式对全幅图象中每个对应的(x, y)点各计算一次。

这种算法与最近邻采样方法相比，线状特征的块状化现象减少，精度提高，但计算量随之增加。双线性内插会减少图象分辨率，对图象起到平滑的作用，使对比度明显的分界线变得模糊，这是在应用时要注意的问题。

(3) 三次卷积内插　更高次的内插方法是取被计算的点周围相邻的十六个点，如图 2.17 所示。根据采样理论，把一组样点组成一个连续的内插函数，并可以证明，这种三次多项式内插过程实际是一种卷积计算，故把这种方法称为三次卷积，其证明过程从略。

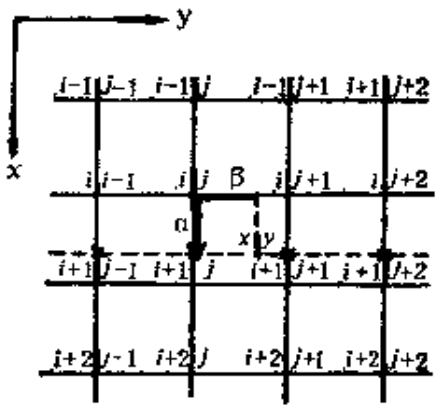


图 2.17　三次卷积内插

在计算时，先计算 x 方向，计算出四个内插值 $f(x,j-1)$, $f(x,j)$, $f(x,j+1)$, $f(x,j+2)$。计算公式为:

$$f(x,m)=\alpha^2(\alpha-1)f(j+2,m)+\alpha(1+\alpha-\alpha^2)f(j+1,m)+(1-2\alpha^2+\alpha^3)f(j,m)-\alpha(1-\alpha)^2f(j-1,m) \quad (2.14)$$

其中 $m=j-1, j, j+1, j+2$ 各算一次如图 2.17“×”处。

令
$$\alpha=x-i, \quad \beta=y-i,$$
$$i=\text{Integer}(x), \quad j=\text{Integer}(y)$$

然后，再计算 y 方向，利用 (2.14) 式的计算结果，用同样方法再次内插，得

$$f(x,y)=\beta^2(\beta-1)f(x,j+2)+\beta(1+\beta-\beta^2)$$

$$\times f(x,j+1)+(1-2\beta^2+\beta^3)f(x,j)$$
$$-\beta(1-\beta)^2 f(x,j-1) \qquad (2.15)$$

内插计算时，需对全图象的每一个对应的（x，y）点，用式(2.14)计算四次，用(2.15)式计算一次。可见计算量是相当大的。

这种高次的内插方法提高了校正图象的质量，视觉效果较好，细节表现也较清楚，常用于目视解译。但这种方法对控制点的均匀性要求较高。另外象元的亮度是由内插算法计算出来的，不是原始传感器接收的值。因此，在进一步用校正图象借助于亮度特征作分类计算时(第四章)，会使结果的准确率受到影响。

2.2.3 几何变换及多种应用

前面主要从几何畸变产生的因素分析阐述了几何校正或一般地称作几何变换的常用方法和目的。实际上，图象几何上的变换不单单为了克服卫星飞行过程中产生的几何畸变，其应用范围很广。

一、简单几何变换

简单几何变换是指图象的上下左右平移，顺时针逆时针旋转或它们多种运动的组合，这种变换可以是整个图象对每一象元作同样的变换，也可以在变换后插入一些新象元或部分象元变换。

选择哪种变换主要根据变换的目的而定。如原图偏离了南北方向在图幅上下方的习惯，找出偏离角作一旋转即可。再如象元大小对应于地面的长和宽不一样时，由于象元在屏幕上显示为方形，需作单方向的位置压缩，压缩后的方向上再用内插方法补充象元，以保证方形象元能够对应于方形的地面景物，等等。

这种变换运算比较简单：

对于平移，只要确定在 x 方向和 y 方向分别平移的象元数，然后将平移量分别加到 x 和 y 上，成为新图象的行和列数 u 与 v。设 x 方向向下平移 a 行，y 方向向右平移 b 列，则新行列数为

$$\begin{cases} u = x + a & (a>0, \text{向下}, a<0 \text{向上}) \\ v = y + b & (b>0, \text{向右}, b<0 \text{向左}) \end{cases} \qquad (2.16)$$

对于旋转，只要确定旋转角 α，利用坐标旋转的几何变换方法，可以得到新的行列数

$$\begin{cases} u = \text{Integer}\,(\cos\alpha \cdot x - \sin\alpha \cdot y) + 1 \\ v = \text{In teger}\,(\sin\alpha \cdot x + \cos\alpha \cdot y) + 1 \end{cases} \tag{2.17}$$

($\alpha > 0$，顺时针，$\alpha < 0$，逆时针，u，v 为整数)。

对于象元的长宽调整，以陆地卫星 MSS 为例，取样行为 80m，列为 57m。则行方向需要调整，其比值为 $80/57 \approx 1.4$。因此，若新坐标在水平方向不变，即 $v = y$，则垂直方向压缩为 57m 长一个象元，以原象元中心为准，则 $u = \text{Integer}[1.4(x - 0.5)] + 1$，这样会产生空行，由内插相邻行对应列象元补上。若行不变，$u = x$，则水平方向扩成 80m 一个象元，以原象元中心为准，$v = \text{Integer}\left[\frac{57}{80}(y - 0.5) + 1\right]$。其它传感器接收的图象可作类似处理。

当需要多种运算时，可以逐个依次完成。

二、地图投影变换

为了使遥感图象上的地物位置更加明确，并且和地图上地物位置的表示方法一致。有时需要将遥感图象变换成某种地图投影的平面坐标。

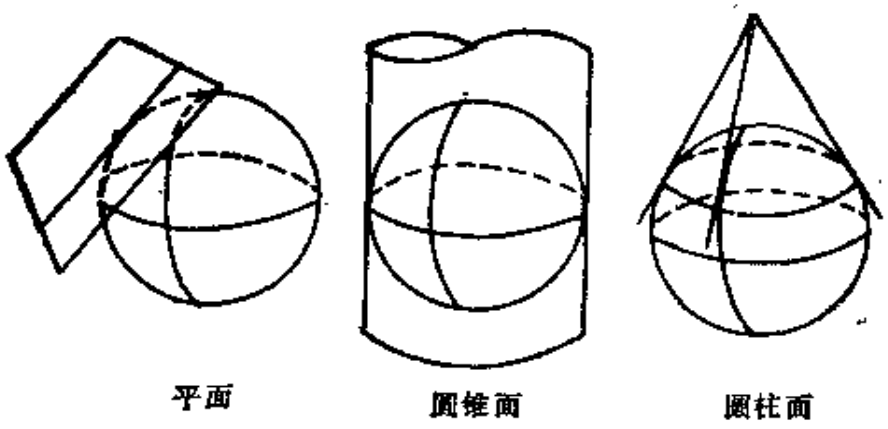


图 2.18a　三种投影面

地图投影把地球表面看作椭球面或球面。将上面各点投影到

一个平面或圆柱面或圆锥面上(图 2.18a),其中圆柱面或圆锥面都可以展开成为平面。地球表面点的经、纬度和投影后平面坐标的关系可以用数学关系式进行计算。由于投影时会产生距离、角度和面积上的畸变。因此常采用一种投影方式保持某种几何量不变,如特定方向上距离不变的等距投影,角度不变的等角投影和面积不变的等积投影。由此产生了多种投影方式:除了投影面几何形状不同,投影面与地球几何表面可以相切也可以相割(图 2.18b)。投影面的位置可以是正向、横向和斜向(图 2.18c)。

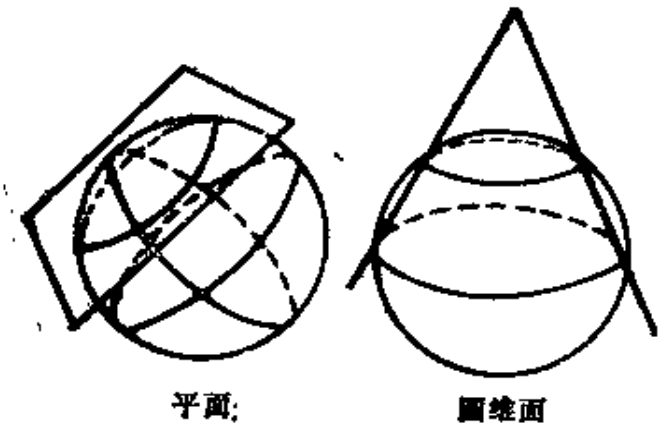


图 2.18b 投影面与地球面相割

常用的投影方式有等角圆柱面投影的高斯-克吕格投影和麦卡托投影,我国所用地形图均采用高斯-克吕格投影;以极点为中心切点的平面投影叫球极平面投影,用于绘制极区地图;等角圆锥面投影是朗伯投影,圆锥顶点在旋转轴的延长线上,适用于南北方向较窄而东西方向延伸的地

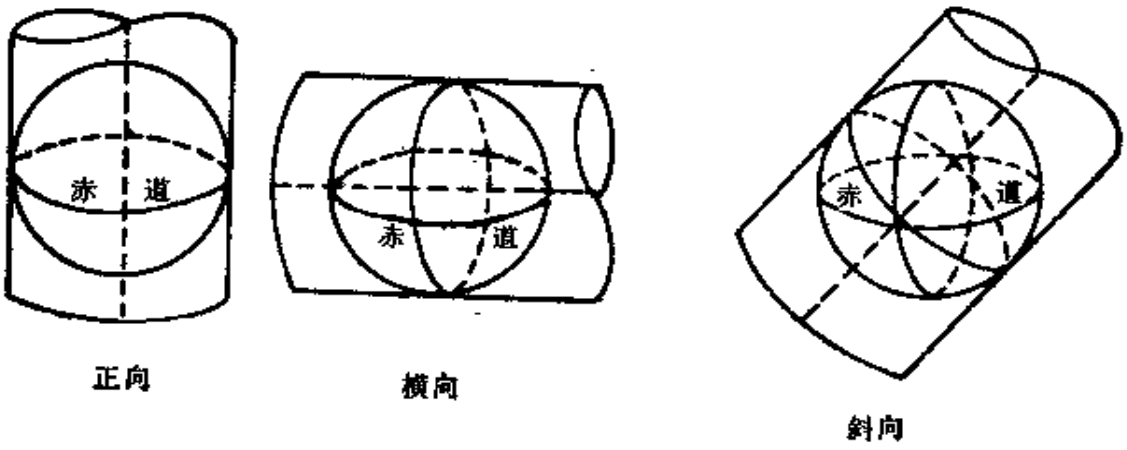


图 2.18c 投影面位置不同

区图；通用横麦卡托投影，简写 UTM，是横向保角圆柱面麦卡托投影为基础的网格系统，在卫星地面站经过精校正的卫星影象常采用 UTM 投影。这种投影系统不包括两极地区，在南北纬 80° 之间每隔 6° 绘制一条经线作为中央经线，东西各延伸 3° 划为一区，覆盖矩形网格，全球共 60 个地区，在同一区内比例尺畸变均匀。 各种投影平面坐标与地理经纬度之间都有数学公式可以换算。

实现遥感图象到地图投影坐标的变换也可采用前面所讲的地面控制点方法（见 2.2.2）。即：变换前后的坐标之间关系可以表示成二元 n 阶多项式，用多个已知坐标的控制点和最小二乘法求出系数后，一一对应地找到每个象元在原图象中的位置，再选用适当的亮度值内插计算方法找到对应的亮度值。之所以用多项式表示遥感图象与地图投影图象之间的关系，因为两种图象坐标间的变换实际上要经过三种中间变换：先从遥感图象坐标变成以经度和纬度表示的地理坐标，再从地理坐标变成投影平面的平面笛卡尔坐标，最后从投影平面坐标加入网格变成网格式的投影图象坐标，成为输出图象。这些变换过程都有复杂的数学公式，运算复杂并且耗费大量计时，因此，采用控制点方法，实现遥感图象坐标到投影坐标之间直接换算。一般地，可以满足对精确度的要求，从而使变换易于实现。

三、图象配准

不同传感器采集的图象，同一传感器不同时间采集的图象，尽管图幅大小一样，例如 512 × 512，象元之间却往往不能一一对应，一幅图象上的河流交叉点，在另一幅图象同一位置象元可能是农田，这就需要进行几何变换使河流交叉点在各幅图象中位于同一象元，这个工作称为配准。配准后的图象之间可以进行重叠，成为一幅多层的图象，类似于多波段图象。各层子图大小完全一样，象元一一对应均为同一地物。这些配准的图象对于今后作图象分

析及建立地理信息系统的模型分析都有极大的用处。

配准的方法有二种:

一种是图象与图象配准。这种配准可以是二幅遥感图象，也可以是将地图通过扫描送入计算机，使遥感图象与地图配准。作法是选择一幅图象或地图作为基准图象，其它图象都与它配准。这时，地面控制点只需在两幅图上选择目标明显的对应象元，然后用(2.2.2) 节描述的方法计算被校正的图象。

另一种方法是两图象都校正到同一地图投影平面上。作法是分别作地图投影变换，然后找到对应位置实现配准，如果图幅大小不相匹配，要调整到同样比例尺，同样大小以便作进一步的分析工作。

四、图象镶嵌

当需要一幅较大地区的图象包括有若干景影象时，需要将相邻景的影象拼在一起形成整幅，这个工作是镶嵌。镶嵌所用的影象可能是同一轨道的相邻景，也可能是不同轨道的相邻景或不同时间的相邻景。这些图象拼接时会发现在相邻处无论从位置上还是从亮度上都不匹配。因为每景图象几何畸变与辐射畸变均不相同。

为了做到相邻景位置匹配连接良好，除了同一轨道的相邻景在匹配时比较简单以外，其它影象均要采用 (2.2.2) 节描述的几何校正的方法。与配准类似，可以以某一景影象为基准，也可以以某种地图投影为基准。在作几何校正时，特别是以影象为基准，必须保证镶嵌的相邻景图象有较大的重叠区，以便选择足够多的控制点和足够大的分布区域以保证几何校正的精确性。

镶嵌时，拼接处几何位置匹配良好后，两景图象还会有亮度上的差异，而造成边缘相接不连续或叫假边缘现象。这时需要调整两景图象的亮度使其变化一致，或令一景亮度为基准图象亮度，另一景亮度调整得与基准图象亮度变化一致，让边界结合处亮度差

异最小，消除假边缘现象。这种亮度一致化的方法将在第三章中阐述。

五、图象分析

图象分析是在图象配准的基础上作进一步的工作。它的内容很多，应用范围很广泛，这里仅举出几个方面说明，在地理信息系统的章节将作详细叙述。

将多波段、多时相的遥感影象配准后形成多层图象可以作多维的分类，如土地利用、土壤、植被等的分类，提高分类精度。

不同传感器影象配准后叠加成一幅，可以改善影象的质量。如：SPOT 影象和 TM 影象配准后显示成一幅彩色影象，TM 可以弥补 SPOT 的波段分辨率不足，SPOT 可以弥补 TM 的空间分辨率不足，合成后的影象效果很好。

将遥感影象和地图配准后叠加在一起显示，可以正确地分析遥感影象中地物的位置和行政界限，提高分析的精度，并且可以进一步绘制地图或更新地图中不大正确的部分，产生新的地图。

不同时间同一景物的影象配准后，可以定量分析在这段时间间隔内地面的变化情况，例如：大雨过后水域的变化；森林火灾时着火点区域的变化；植被区域的增加或减少等，起到数据更新、动态监测和分析变化趋势等作用。

利用某些地图作辅助信息，例如地形高度和坡度等改善分类效果已成为遥感和地理信息系统结合的常用方法。

第三章　图象增强

有些图象看起来目视效果较差，例如对比度差、有噪声(图象上有不正常的亮或黑的象元及线条等)，这种图象直接影响目视解译和判读；有些图象总的看起来尚好，但对所需要的某些信息，如灰阶较低的部分或边缘部分等看不清楚，而对不需要的其它信息可能很强。有些图象波段数目很多，如TM图象，信息量很大却又没有突出主要的信息，造成进一步处理的困难。图象增强技术就是为了解决这些问题，通过图象增强，提高图象的目视效果，减少或丢掉不大需要的信息，突出解译者感兴趣的特征，并为进一步的图象信息提取作好预处理工作。

图象增强的方法很多，根据增强的目的不同而选择不同的方法。增强的目的主要有：

改变灰度等级，提高对比度；

消除边缘或噪声，平滑图象；

突出边缘，锐化图象；

形成彩色图象；

减少波段个数，突出某些信息特征。

可以选择的增强技术主要有：

空间域增强；

频率域增强；

彩色增强；

多光谱图象增强。

图象增强技术在遥感数据处理中十分重要，增强处理后的图象可以直接用于分析判读，或作为图象产品提供各种应用领域使

用；增强后的图象也可作为进一步分类的准备从而提高分类精度。

§3.1 空间域增强技术——辐射增强

空间域指图象平面所在的二维空间，也就是在图象平面上直接针对一个一个象元点进行处理，处理过后象元的位置不变。

空间域的增强是增强技术中最基本的部分。它包括利用直方图人为地改善图象的灰度和对比度，利用模板作图象运算平滑图象或锐化图象。这包括辐射增强和几何增强。辐射增强主要是孤立点的运算，而几何增强要考虑周围的点作邻域运算。

辐射增强改善图象的辐射特性，也就是直接改变图象中象元的亮度值或灰度值。人眼鉴别图象时能分辨 20 级左右的灰度级，而电视屏幕、照相胶片或其它成象设备显示黑白图象时，显示灰度的动态范围要大得多，例如计算机监视屏幕，通常可以显示 8 比特，也就是 256 个灰度级，也有其它规格。辐射增强能够使一幅图象充分利用成象设备，达到最佳的动态范围，大大改善目视效果。例如原图只有 100 个灰度级，增强处理可以把这 100 个级别拉伸到 0～255 灰度级之间来显示，使图象对比度提高，质量改善。

辐射增强主要利用直方图的分析，作为指导的基础。

3.1.1 直方图与积累直方图

直方图是以统计图表示图象灰度值(即亮度值)与象元数之间的关系。确定图象中象元灰度的范围，以适当灰度间隔作为单位长，选取表示灰度的横坐标。统计某一灰度间隔的象元在图象中出现的数目或占总象元数的百分比；选取象元统计值作为纵坐标。画出条形统计图，这就是直方图。

举一简单例子说明，图 3.1 代表一幅 5 × 5 的数字图象，最大灰度值为 15，最小灰度值为 2，按照直方图要求先统计各灰度间隔的象元数或比例值，在本例中灰度间隔取 1 结果列入表 3.1。

表 3.1　直方图统计表

灰度值(亮度值)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
象元数	0	0	1	1	2	1	1	2	4	4	2	2	1	2	1	1

根据表列值，画出条形统计图，即直方图，见图 3.2(a)。直方图反映进入传感器辐射量的统计分布规律，而不包括它们的空间信息，即位置信息。在图象包含大量象元的前提下，假定象元亮度是随机分布的，这时分布函数应该是正态分布。具有这样一种概率统计的思想，我们可以从一幅图象的直方图形态大致推断出图象质量的好坏。图象的灰度值是离散变量，因此直方图是离散的概率分布。将各条形最高点连成一条包络线，纵坐标的比例值就是某灰度出现的概率密度，包络线近似看成图象相应的连续函数的概率分布曲线。一般地说，包络线的形态越接近正态分布曲线，说明图象越接近假定条件，图象对比度也比较合适；如果直方图峰值位置偏向灰度值大的一边，图象偏亮，反差较小；如果直方图峰值位置偏向灰度值小的一边，图象偏暗，反差亦较小(图 3.3)。利用直方图来分析图象的质量是图象分析的基本方法，常常有目的改变直方图形态，从而改善图象的质量。

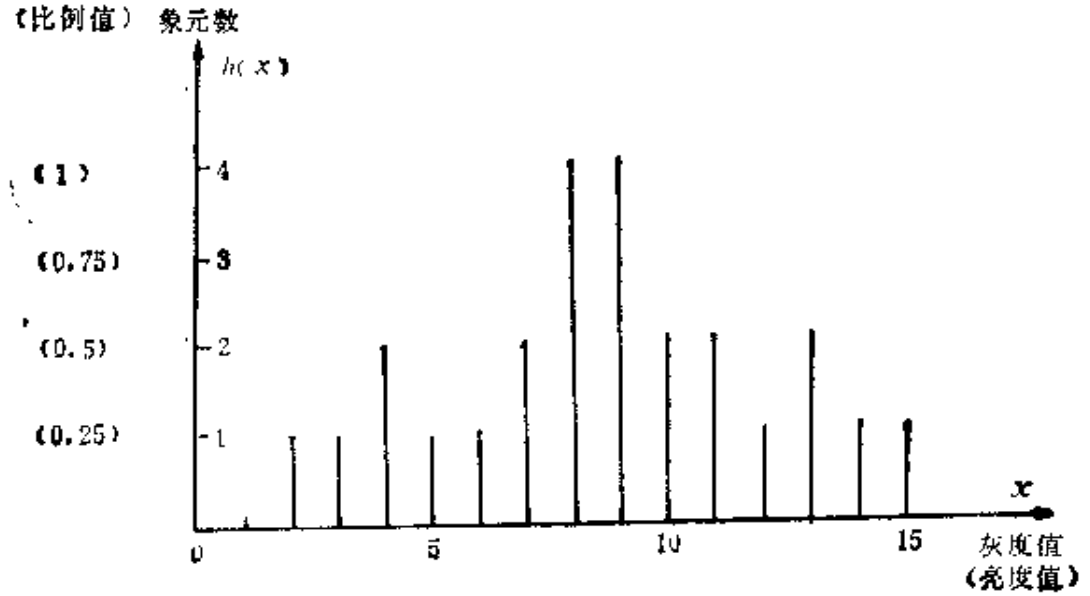
4	3	7	6	8
2	4	8	9	9
5	8	9	13	10
7	9	12	15	11
8	11	10	14	13

图 3.1　数字图象

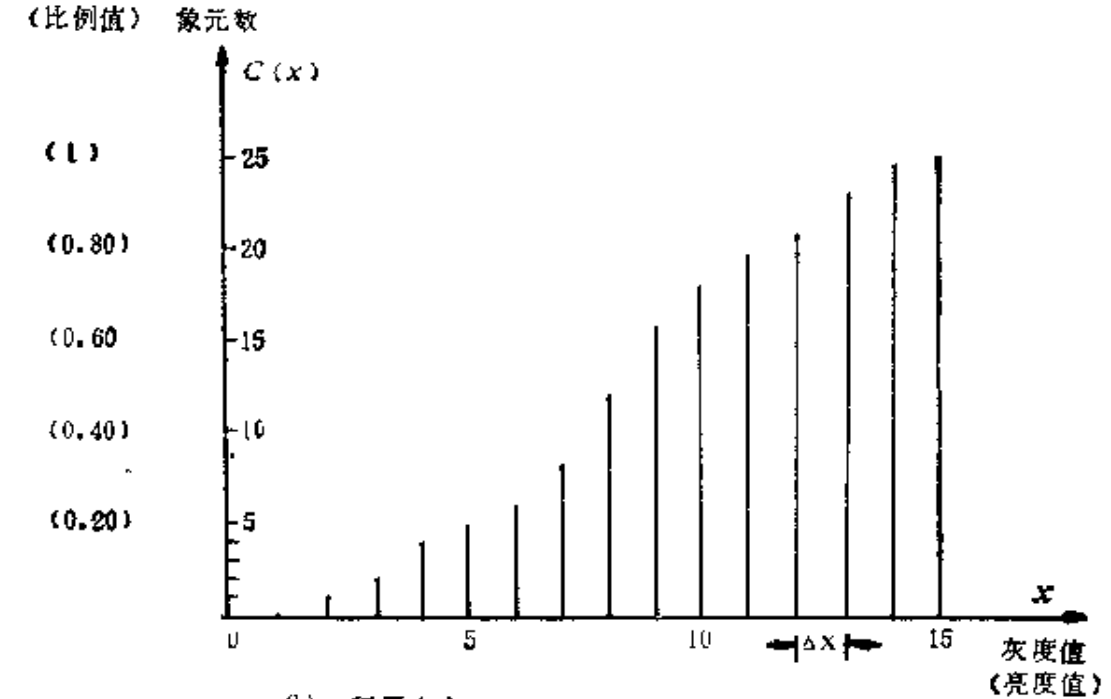
统计某一灰度值和这一灰度值以下所有象元的数目或占总象元数的比值作出的直方图，是积累直方图。积累直方图可以看作积累离散概率分布。仍以图 3.1 的图象为例，按积累直方图的要求作出各灰度值的积累统计值，设 $h(x)$ 为离散概率密度函数即象元比例值，x 代表灰度值，则积累比例值或百分比

$$c(x_k)=\sum_{i=0}^{k}h(x_i)\qquad k=0,1,\cdots,L-1$$

这里 $L-1$ 为最大灰度值。统计结果列于表 3.2（见 68 页）。

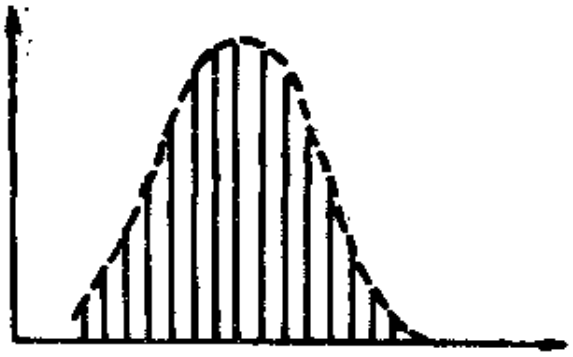


(a) 直方图

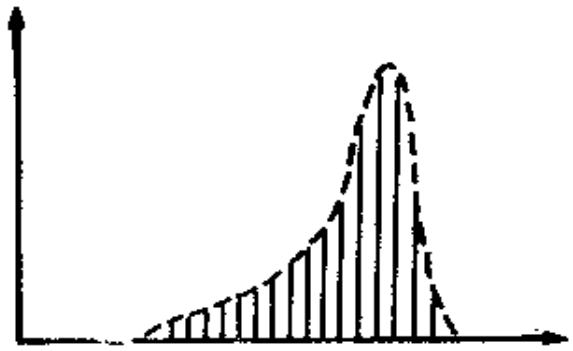


(b) 积累直方图

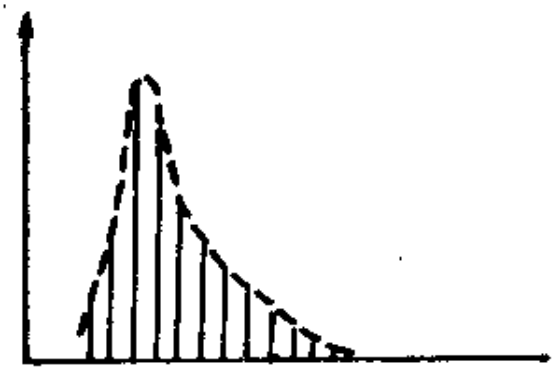
图 3.2 图象直方图与积累直方图



正态



偏亮



偏暗

图 3.3　各种直方图

根据表列画出积累直方图见图 3.2(b)，利用积累直方图，观察灰度从小到大时象元数的变化规律，也可以分析出图象对比度的情况。对于灰度偏暗的图象，在灰度小的部分象元数增长很快，对于灰度偏亮的图象，在灰度大的部分象元数目增长快等等。而积累直方图更重要的利用是在图象增强时作为变换函数，下面将作讲解。

3.1.2　线性变换

为了改善图象的对比度，作象元灰度值的变换，如果变换函数是线性或分段线性的，这种变换就是线性变换。

如图 3.4(a) 所示，变换前图象对比度较差，灰度范围窄，表示在 x_a 轴上最小灰度值为 a_1，最大灰度值为 a_2 变换后图象对比度提高、灰度范围扩大，表示在 x_b 轴上，最小值为 b_1，最大值为 b_{10}　因

为变换关系是直线，变换方程可写为

$$\frac{x_b - b_1}{b_2 - b_1} = \frac{x_a - a_1}{a_2 - a_1} \qquad \begin{pmatrix} a_a \in [a_1, a_2] \\ x_b \in [b_1, b_2] \end{pmatrix}$$

于是

$$x_b = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}(x_a - a_1) + b_1 \qquad (3.1)$$

通过直线方程(3.1)可以把$[a_1, a_2]$范围内任一 x_a 值变换成 x_b，从而使原来较窄的直方图(图 3.4(b))变化成范围较宽的直方图（图 3.4(c))，有时称之为直方图拉伸。拉伸后的图象灰度动态范围增加，对比度改善，提高了图象质量。图象的变化随直线方程的不同而不同。直线与横轴夹角大于45°时，拉伸图象，灰度范围扩大。直线与横轴夹角小于45°时，则压缩图象，灰度范围缩小。

有时为了更好地调节图象的对比度，采用分段线性的变换方法。取几个间断点，每相邻

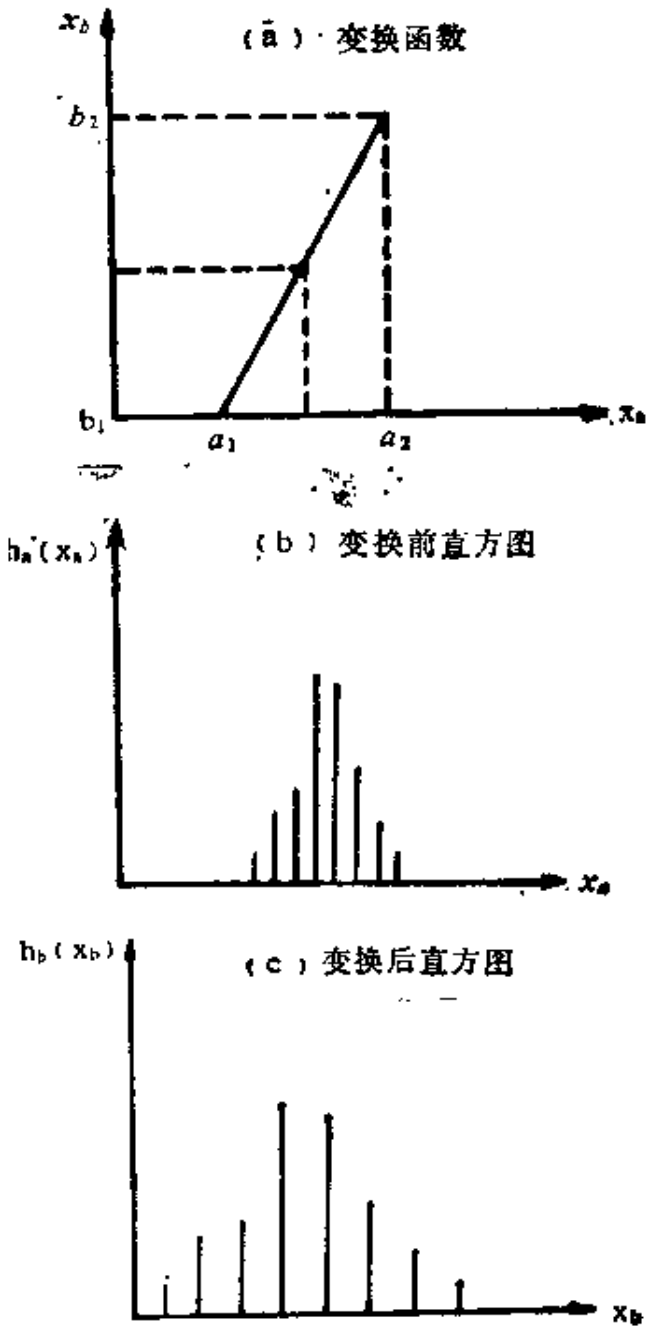


图 3.4　线性变换

表3.2 积累直方图统计表

灰度值x_k(亮度值)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
积累象元数	0	0	1	2	4	5	6	8	12	16	18	20	21	23	24	25
积累比例值$c(x_k)$	0	0	0.04	0.08	0.16	0.20	0.24	0.32	0.48	0.64	0.72	0.80	0.84	0.92	0.96	1.00

两间断点之间是一段线性变换的线段，每段直线方程不同，可以拉伸，可以压缩，根据处理的需要由用户确定间断点的位置。

仍以图 3.1 的图象为例，采用分段线性变换，从起点算起，间断点取作 (0, 0), (6, 2), (11, 12), (15, 15) 共三个线段，见图 3.5(a)，从图中可看出，第一、三段为压缩，第二段为拉伸。由式 (3.1) 可对每个线段分别列方程为：

$$\begin{aligned} x_b &= \frac{1}{3}x_a && x_a \in [0, 6],\ x_b \in [0, 2] \\ x_b &= 2x_a - 10 && x_a \in [6, 11],\ x_b \in [2, 12] \\ x_b &= \frac{3}{4}x_a + \frac{15}{4} && x_a \in [11, 15],\ x_b \in [12, 15] \end{aligned} \tag{3.2}$$

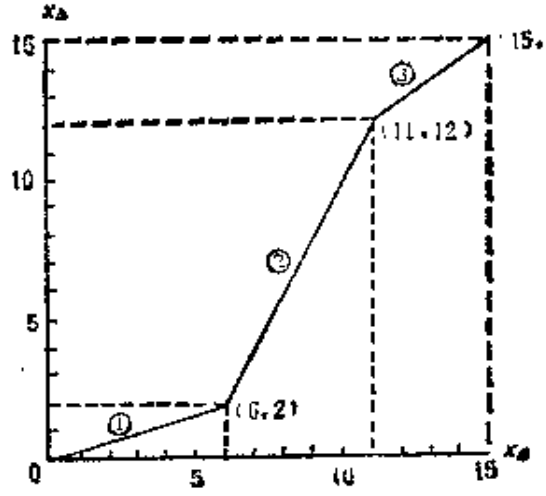
由式 (3.2) 可以计算出原灰度值变化后应具有的灰度值，结果见表 3.3。

表 3.3 分段线性变换前后灰度对比

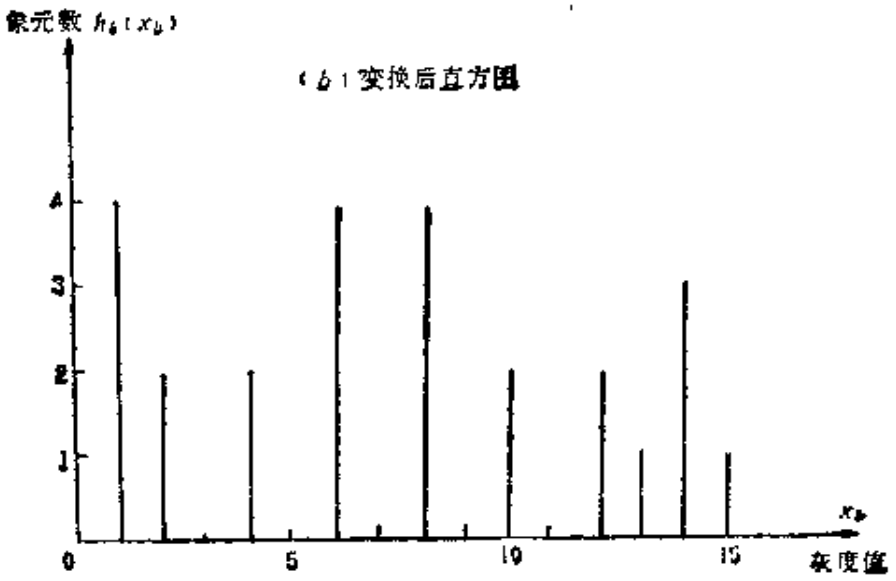
变化前灰度值x_a	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
变化后灰度值x_b	0	0	1	1	1	2	2	4	6	8	10	12	13	14	14	15

表中变化后的灰度值如在计算过程中得小数，那么四舍五入取整，以便满足离散图象灰度的要求。从表中可以看出，压缩的部分，灰阶数变少，原有的灰阶合并，如 4, 3, 2 都变成 1；拉伸部分灰阶间隔增大，由 1 变成 2。整个变化后的图象在图 3.5(c) 画出，直方图形态也改变(图 3.5(b))，两边变挤、中间变稀。变换的结果突出了原灰度从 6 至 11 部分的信息，忽视了其它两端部分信息。

(a) 变换函数



(b) 变换后直方图



(c) 变换后的图象

1	1	4	2	6
1	1	6	8	8
2	6	8	14	10
4	8	13	15	12
6	12	10	14	14

图 3.5　分段线性变换实例

线性变换的方法很多。主要根据变换后的要求，有目的选取间断点的位置，决定拉伸哪一段的灰度或压缩哪一段的灰度范围。也可以只处理一部分灰度。

3.1.3 非线性变换

如果变换函数是非线性的，这种变换是非线性变换。非线性变换常用对数变换、指数变换以及列表查找法。

对数变换主要用于增强暗部分，即拉伸灰度低的部分。其数学表达式为

$$x_b = b\log(ax_a + 1) + c \tag{3.3}$$

x_a 为变换前图象每个象元的灰度值，可以从零起始；x_b 为变换后图象对应象元的灰度值；a, b, c 分别为可调整的参数，由用户指定以改变调整幅度。x_b 的值用四舍五入的方法取整型离散值。

指数变换主要用于增强亮部分，即拉伸灰度高的部分。其数学表达式为

$$x_b = be^{ax_a} + c \tag{3.4}$$

其中，x_a, x_b, a, b, c 的意义与式 (3.3) 相同。

列表查找法也经常用到，将变换前后的灰度列入表中，不必考虑服从什么数学式子，变换时只要从表中查到对应值代换原值即可。这种方法经常用于图象处理专用机中，将查找表硬件化(叫做 look up table) 可以直接得出结果。

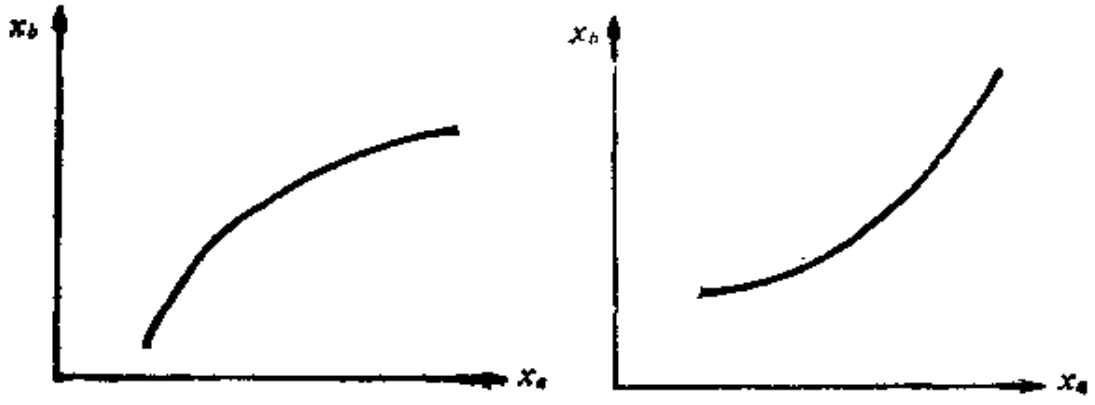


图 3.6 对数变换 (左)与指数变换 (右)

3.1.4 直方图均衡化

为了增强对比度，改善目视效果，有时也用拉伸扩展中区，压缩两头的方法，也就是产生一幅灰度较为均匀的图象，为了达到这个目的，必须使一般的直方图对应的图象变换成均匀的直方图对应的图象。这种方法是直方图均衡化。即必须找到这一特殊的变换函数。其示意图见图 3.7。 为了说明问题方便，先用连续函数分析，讨论理想情况，其原理也适用于离散图象。（a）图为原图直方图，（b）图为变换函数，（c）图为变换后的直方图，灰度值均匀，对应于任一灰度出现的概率 $h_b(x_b)$ 相同。 可以证明，变换函数就是原图象的积累直方图曲线。证明如下：

在（a）图取一狭窄 Δx_a，经过变换后，对应于 Δx_b。直方图中阴影部分面积分别对应为 Δx_a 和 Δx_b 所具有的象元数。所以两部分阴影面积相等，因而

$$\Delta x_a \cdot h_a(x_a) = \Delta x_b \cdot h_b(x_b)$$

当 $\Delta x_a \to 0, \Delta x_b \to 0$ 时，

$$h_b(x_b) = h_a(x_a) \frac{dx_a}{dx_b} \tag{3.5}$$

从图中 （c），均衡化后从最小灰度值 0 到最大灰度值 $(L-1)$ 总面积为 $h_b(x_b) \cdot (L-1)$，也就等于总象元数 N。 即

$$h_b(x_b) \cdot (L-1) = N$$

$$h_b(x_b) = \frac{N}{L-1} \tag{3.6}$$

将式 (3.5) 代入 (3.6)

$$\frac{dx_b}{dx_a} = \frac{L-1}{N} \cdot h_a(x_a)$$

$$dx_b = \frac{L-1}{N} h_a(x_a) \cdot dx_a$$

两边积分

$$x_b = \frac{L-1}{N} \int_0^{t-1} h_a(x_a) \cdot dx_a \tag{3.7}$$

分析 (3.7) 式是由 x_a 到 x_b 的变换函数，其中 $\int_0^{l-1} h_a(x_a)\,dx_a$ 正是原图象的积累直方图函数值，$L-1/N$ 为常数系数或叫拉伸因子。可见，积累直方图就作为直方图均衡化的基本变换函数。如果均衡化后概率 $h_b(x_b)=1$，则 $N/L-1=1$，变换函数便直接成为积累直方图本身了。对于实际图象的离散值，式 (3.7) 可以改写为*

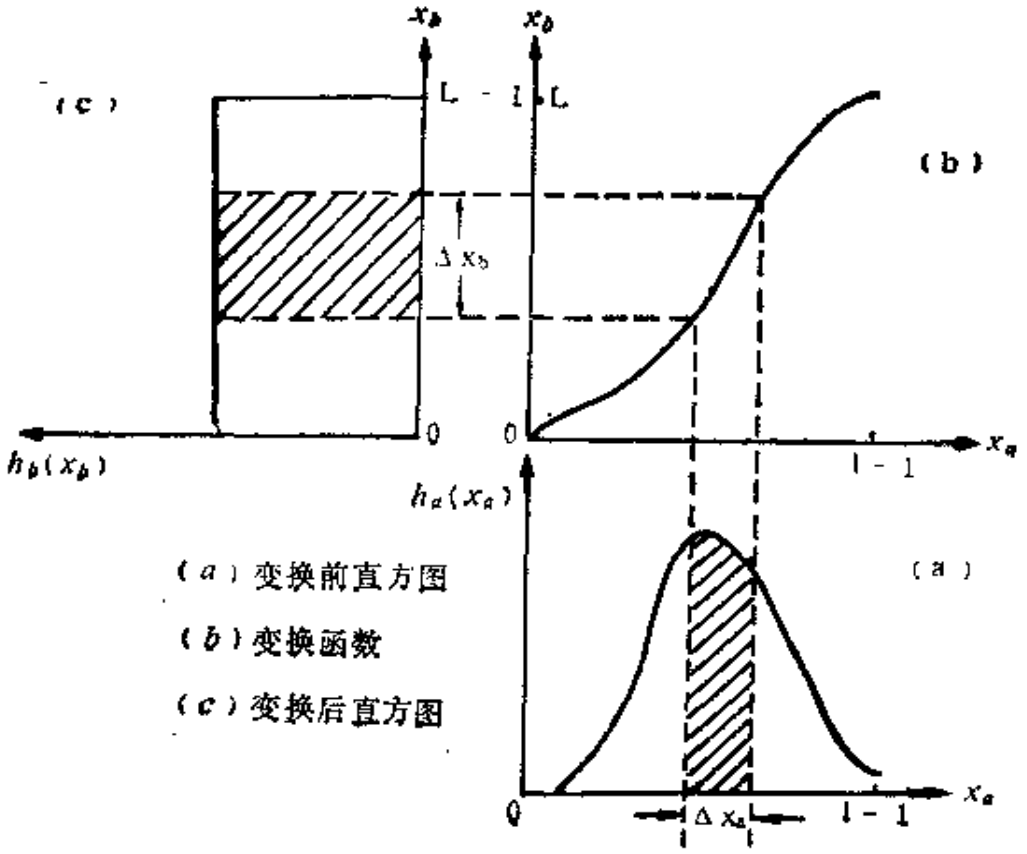


图 3.7　直方图均衡化示意图

---

* 注：在实际计算时，如设 $N=1$，$L_{min}\neq 0$，式(3.8)也可改写为

$$x_b^k = L_{min} + (L_{max} - L_{min}) \cdot \sum_{i=0}^{k} h_a(x_a^i)$$

如果是归一化的，即 $\frac{N}{L-1}=1$，则式(3.8)成为

$$x_b^k = \sum_{i=0}^{k} h_a(x_a^i)$$

$$x_b^k = \frac{L-1}{N} \sum_{i=0}^{k} h_a(x_a^i), \quad k = 0, 1, \cdots, L-1 \quad (3.8)$$

x_b^k 取整数

具体实现直方图均衡化，步骤如下：

（1）统计对应每一灰度值的象元数和象元积累值，如果设总象元数为100%，则象元数及积累值为百分数。

（2）根据变换函数方程(3.8)求出均衡化后对应的新灰度值，并四舍五入整数化。

（3）由原直方图统计值对应找到新直方图的统计值，画出新直方图。

（4）改变原图每个象元灰度值，形成均衡化后的新图象。

2	1	5	4	7
1	2	7	10	10
3	7	10	14	11
5	10	13	15	12
7	12	11	14	14

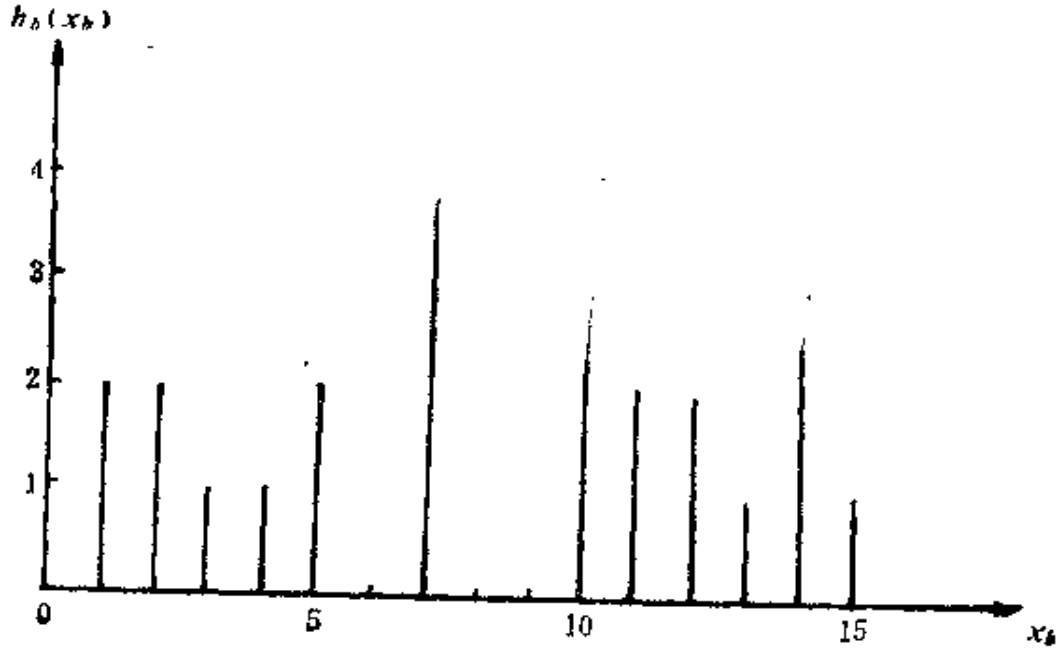


图 3.8 直方图均衡化实例

(上)均衡化后图象 (下)直方图

仍以图 3.1 所示图象为例，按上述步骤逐项计算统一列于表 3.4 中。为了使读者一目了然，表 3.1 与 3.2 的数据也一并列入(因数据较少，没列比例值)，其中 $N=25, L-1=15$，因此拉伸因子 $L-1/N=0.6$。

按照计算结果画出均衡化后的直方图和数字图象(图 3.8)。从直方图可以看出，其形态并不是如图 3.7(c)中的理想化直线，这是因为图象是离散函数，只能是接近均匀的近似值。中部实现了拉伸，灰阶 8 和 9 变成了 7 和 10，而两端实现压缩，2 和 3，13 和 14 被合并。直方图均衡化可使亮度集中于中部的图象改善。也可作为中间结果进一步处理。

直方图均衡的处理对某些图象是不适宜的，例如对某一灰度

表 3.4　直方图均衡化查找表生成实例

原灰度值 x_a	象元统计值 $h_a(x_a)$	积累值 $\sum_{j=0}^{k} h_a(x_a^j)$	拉伸后值 $\frac{L-1}{N}\sum_{j=0}^{k} h_a(x_a^j)$	新灰度值 x_b	新象元统计值 $h_b(x_b)$
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	
2	1	1	0.6	1	2
3	1	2	1.2	1	
4	2	4	2.4	2	2
5	1	5	3.0	3	1
6	1	6	3.6	4	1
7	2	8	4.8	5	2
8	4	12	7.2	7	4
9	4	16	9.6	10	4
10	2	18	10.8	11	2
11	2	20	12.0	12	2
12	1	21	12.6	13	1
13	2	23	13.8	14	3
14	1	24	14.4	14	
15	1	25	15.0	15	1

值所占象元比值异常大时，假定图象中有一很大区域为黑色背景，0 象元比例很大。均衡化后，这些象元灰度值改变了但仍保留同样的象元数，这使均衡化结果很差，需要去掉一些黑色区域减少象元数或改用其它方法增强图象。

3.1.5 直方图规定化

将图象的直方图按规定的形式变化形成一幅新的图象，是直方图规定化。被规定的直方图可以是一幅参考图象的直方图。这种变换，使两幅图象的亮度变化分布规律尽可能地接近；被规定的直方图也可以是人为指定的数学关系而无图象作参考，使变换后图象的亮度分布接近这种数学分布。

从原理上讲，直方图规定化是把两个直方图都作均衡化，变成相同的归一化的均匀直方图（见 p72 注释）。这个均匀直方图起到媒介作用，只要把原直方图均衡化，再对参考图象作一均衡化的逆运算就可以了。图 3.9 为原理示意图。

设$T(x_a)$为原图象直方图均衡化的变换函数，$G(y_c)$为参考直方图均衡化的变换函数，变化后的灰度值均为 Z_b。由上面讨论可知

$$Z_b = T(x_a) = \sum_{j=0}^{k} h_a(x_a^j)$$

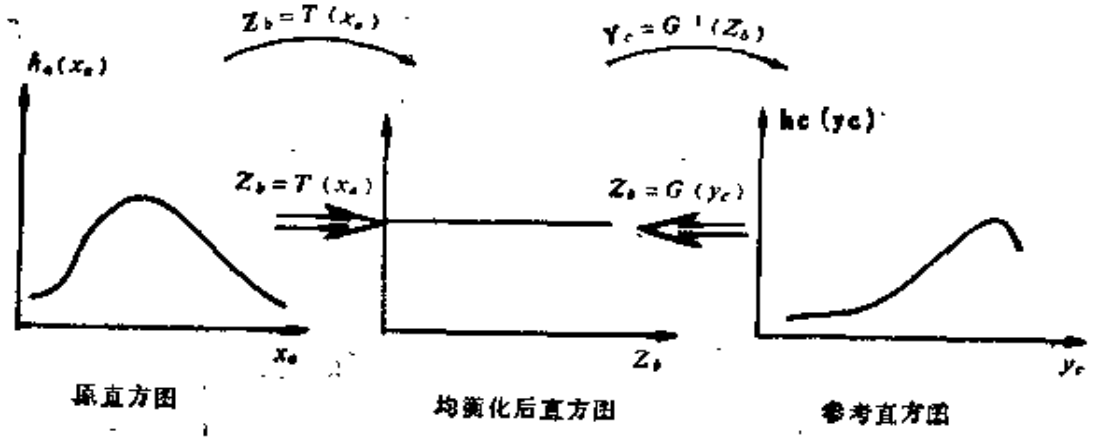


图 3.9 直方图规定化原理示意图

表 3.5　直方图规定化查找表实例

原归一化灰度值 x_o	象元统计 $h_o(x_o)$	归一化积累值 $T(x_o)$	对应积累值 $G(y_c)$	对应新灰度值 y_c	新象元统计 $h_d(y_d)$
0	0	0			
1/15	0	0			
2/15	1	0.04	0.08	9/15	2
3/15	1	0.08	0.08		
4/15	2	0.16	0.2	10/15	4
5/15	1	0.20	0.2		
6/15	1	0.24	0.2		
7/15	2	0.32	0.44*	11/15	6
8/15	4	0.48	0.44		
9/15	4	0.64	0.68	12/15	6
10/15	2	0.72	0.68		
11/15	2	0.80	0.88	13/15	3
12/15	1	0.84	0.88		
13/15	2	0.92	0.96*	14/15	3
14/15	1	0.96	0.96		
1	1	1	1	1	1

附表　参考直方图统计

归一化灰度 y_d	象元统计 $h_c(y_c)$	归一化积累值 $G(y_c)$
9/15	2	0.08
10/15	3	0.2
11/15	6	0.44
12/15	6	0.68
13/15	5	0.88
14/15	2	0.96
1	1	1

*：计算对应值时，采用近似方法。在此例中 0.32 正是附表中 $G(y_c)$ 值 0.2 和 0.44 的中值，根据四舍五入的原则，采用 0.44；同理，0.92 是 0.88 和 0.96 中值采用 0.96。

和

$$Z_b = G(y_c) = \sum_{j=0}^{k} h_o(y_c^j)$$

所以

$$y_c = G^{-1}(Z_b) = G^{-1}[T(x_o)] \tag{3.9}$$

这里均衡化的变换函数采用归一化形式，即拉伸因子为 1，这时可设 $N = 1, L - 1 = 1$，其它值相应变成小数或分数。

具体实现直方图规定化时，步骤如下：

(1) 求出原图的直方图；

(2) 求出原图的积累直方图 $Z_b = T(x_o)$；

(3) 求出参考图象的直方图或确定参考直方图;

(4) 求出参考积累直方图 $Z_b = G(y_c)$;

(5) 对应于每一灰阶 x_a 的积累值 Z_b，在参考积累直方图中找到对应的灰阶 y_c 的值 y_d，一般地说，这个值不是整值需四舍

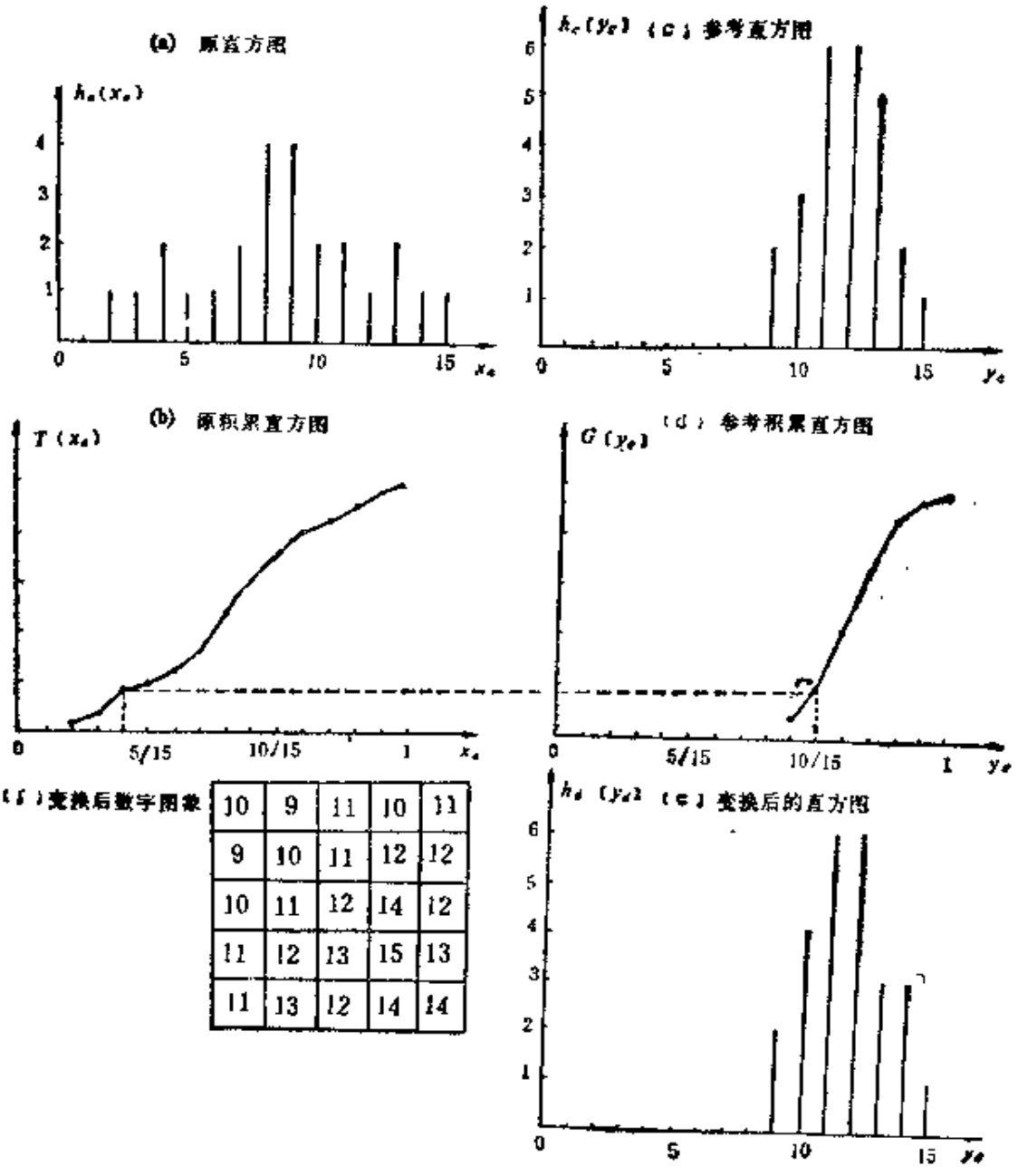


图 3.10 直方图规定化实例

五入求整，或在相近的 Z_k 值中寻找对应的整数值；如G为数学公式可直接求值；

(6) 将原直方图中的象元概率密度值对应到新灰阶值上求出新直方图；

(7) 改变象元灰度值，形成规定化后的新图象。

仍以图 3.1 示意的图象为例，作规定化处理，参考直方图为图 3.10(c)。 按上述步骤计算过程列于表 3.5，其中的灰度值和积累值采用归一化数据，对应积累值可在参考直方图统计的附表中查到，并用四舍五入原则选用最近邻对应值；再在附表中找到对应的归一化灰度值 y_c；最后，新象元统计值由原象元统计按所含灰度范围合并而得。图 3.10 表示了运算过程和结果，图中 (e) 是变换后的直方图，由于离散图象和近似运算，结果不可能和参考直方图完全相同，但已非常接近。图中 (f) 表示变换后的数字图象，灰度范围完全在 9 至 15 的高端。这里要说明，由于采用归一化中间运算，参考图象的灰度范围可以与原图象灰度范围不一致，比较它们的分数可以做完全同样的运算，最后变换图象时再恢复灰度值。

§ 3.2 空间域增强技术——几何增强

除了在整体上改善图象的质量以突出某些信息外，还可以有目的的突出图象上的某些特征，突出边缘或图象纹理等，例如：勾画湖泊或河流的边界，描绘某种地形形态轮廓，突出某一特定方向的线性结构；也可以有目的的平滑某些特征，例如：去掉传感器接收处理过程中产生的"噪声"点，削弱起伏过强的地形信息，突出平缓部分以便作进一步的工作。这种处理目的性较强。处理后的图象从整体上看可能与原来的图象大不相同，丢失了不少信息，但却突出了需要的部分或削弱了不需要的信息部分。从这个意义上来说，图象质量改善，信息量丰富了。这就是几何增强的作用。

几何增强从方法上强调了某象元与其周围相邻象元的关系，不象辐射增强只把象元看成孤立点。因此采用空间域中的邻域处理方法，有时也叫做“滤波”。本节中介绍利用模板作空间卷积的方法。这种方法容易掌握并且计算简单，对于没有现成软件包的地方，自己编写程序进行处理也非常方便。

3.2.1 卷积的模板化

两个函数 $f(x)$和 $g(x)$的卷积记作 $f(x)*g(x)$，它定义为积分

$$f(x)*g(x)=\int_{-\infty}^{+\infty} f(\alpha)\,g(x-\alpha)\cdot d\alpha \qquad (3.10)$$

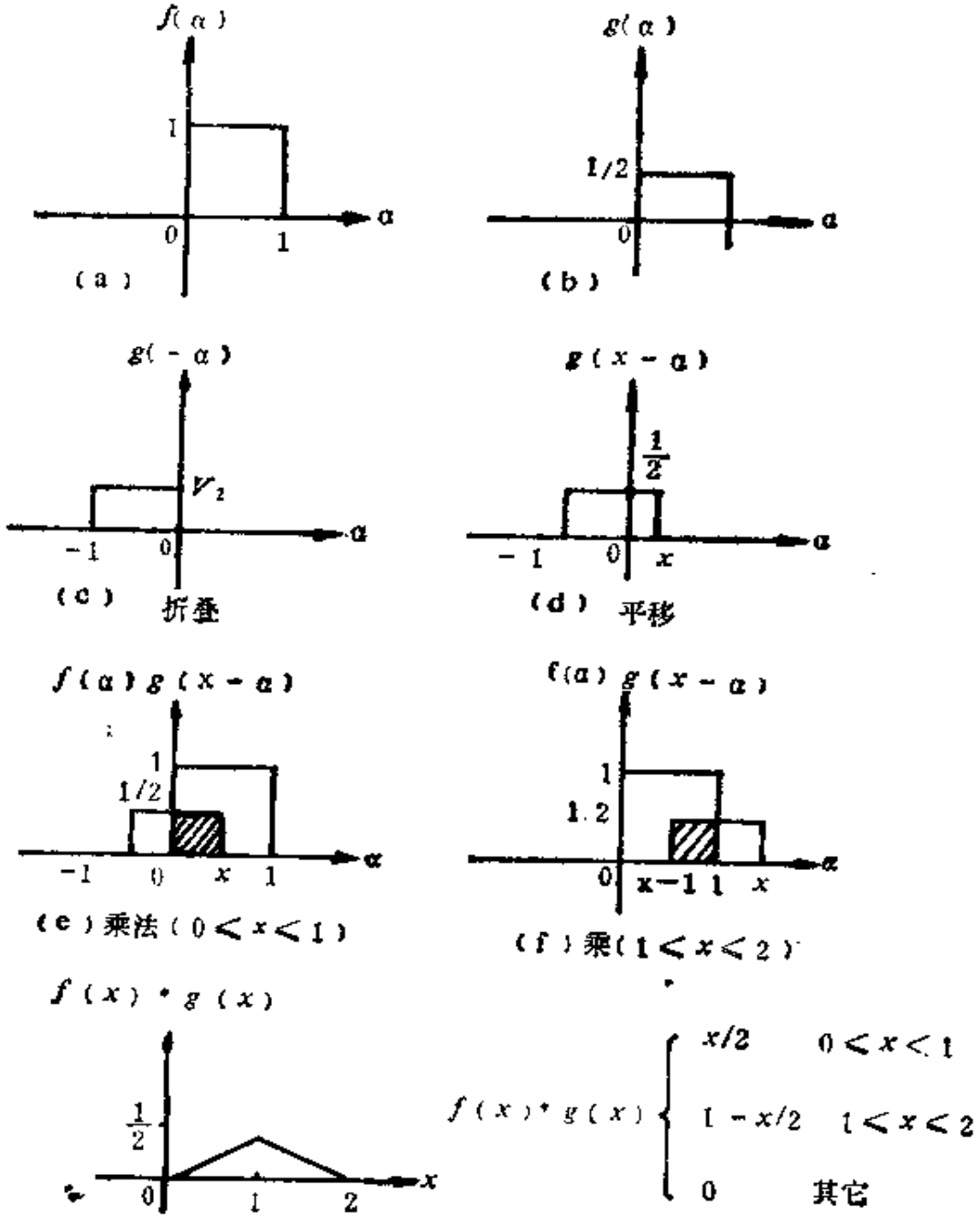
α 是计算过程的中间变量，又叫伪变量。这个定义的几何意义是把函数 $g(\alpha)$ 在二维直角坐标系中，绕纵坐标对称折叠，相当于旋转 180° 形成函数 $g(-\alpha)$，再在自变量上加入 x，相当于沿横坐标向右平移 x，形成函数 $g(x-\alpha)$，这个函数与函数 $f(\alpha)$ 对任意给定的 x 做乘法，并对乘积从$-\infty$积分到$+\infty$。实际上在坐标系中是取两个函数重叠部分的面积为计算结果（图 3.11），这个定义是针对一维连续函数而言。对于连续函数的二维卷积，形式上与一维类似。有函数 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$，二维卷积定义为积分：

$$f(x,y)*g(x,y)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int f(\alpha,\beta)\cdot g(x-\alpha,y-\beta)\cdot d\alpha d\beta \qquad (3.11)$$

这个积分意义与一维类似，只是将二维空间换成了三维空间，对称折叠轴也变成了二个。

这里讨论离散变量的二维卷积，以便解决图象处理中的问题。离散卷积的原理与连续卷积基本相同，只是其变量是从连续函数中抽样而来，积分运算将被求和所代替；连续变量有无穷个值，可以从$-\infty$增至$+\infty$，而图象大小是有限空间。因此对于 x,y 或 α,β 都是有区间的离散变量。离散卷积可以表示为：

$$r(x,y)=f(x,y)*g(x,y)$$



$$f(x)*g(x)\begin{cases} x/2 & 0<x<1 \\ 1-x/2 & 1<x<2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

图 3.11　一维连续函数卷积实例

$$-\sum_{\alpha=0}^{M-1}\sum_{\beta=0}^{N-1} f(\alpha,\beta)\cdot g(x-\alpha,y-\beta) \qquad (3.12)$$

这里，M和N表示式中讨论的图象为 $M\times N$ 大小。

这样的卷积运算怎么实现呢?可以认为，(3.12) 式中，$f(\alpha,\beta)$ 代表原来的图象，也就是增强前的图象，$r(x,y)$ 代表增强处理后的图象，$g(x-\alpha,y-\beta)$ 是一个被指定的函数，它可以看作是一个比起 f 小很多的小图象，例如：3×3，5×7 或 7×7 等。类似前面对连续函数卷积的分析，可以认为，函数绕 α，β 两轴分别旋转 180° 进行折叠，形成 $-\alpha$ 和 $-\beta$。为了直观，将这个函数改写成 $g'(\alpha-x,\beta-y)$ 更容易理解。这个函数有时称作系统函数 $g(x-\alpha,y-\beta)$ 的旋转形式。在实际计算时，将原图象值 $f(\alpha,\beta)$ 与旋转的系统函数 $g'(\alpha-x,\beta-y)$ 分别相乘再加在一起得到新的图象值 $r(x,y)$。变量 (x,y) 与变量 (α,β) 的原点 $(0,0)$ 为同一个点，计算出的 $g'(\alpha-x,\beta-y)$ 小图象的原点 $(\alpha-x,\beta-y)=(0,0)$ 一定在图象 $f(x,y)$ 上是移动的。假定这个小图象为 3×3，则 x 只能从 0 到 $M-3$，y 只能从 0 到 $N-3$，也就是说新生成的图象比原图象行列数各少二。假定小图象为 5×5，则新生成的图象为 $(M-4)\times(N-4)$ 大小，依此类推。称这个小图象或旋转的系统函数为模板。这样二维的卷积运算在图象中可以用模板的运算来实现。

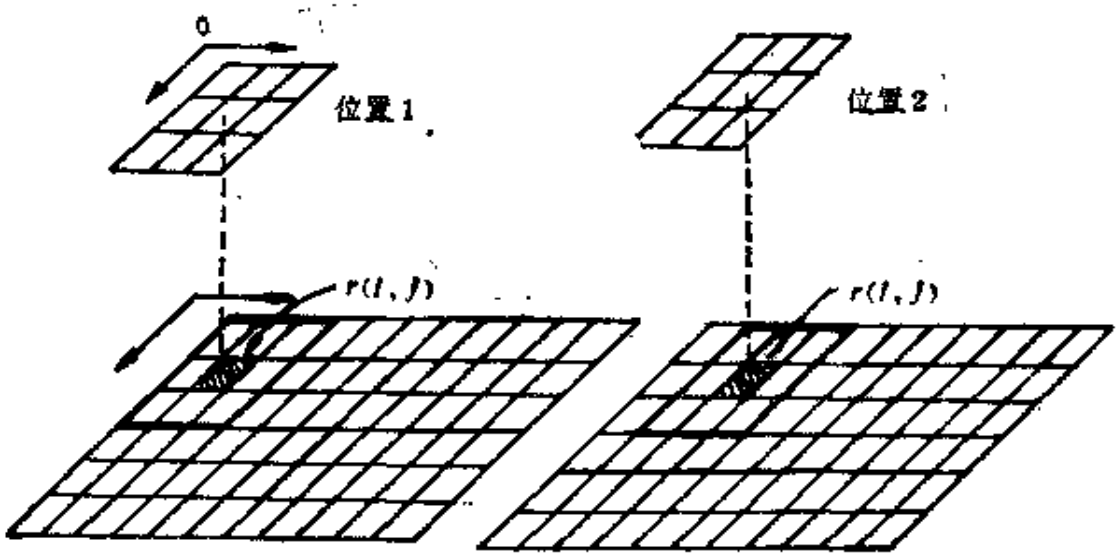


图 3.12　模板计算及移动

模板的运算方法示意图如图 3.12。从图象原点开始，左上角开一窗口与模板同样大小，图象窗口与模板象元灰度值对应相乘再相加。假定模板大小为 $M \times N$，窗口为 $\phi(m,n)$ 模板为 $t(m,n)$，则模板运算为

$$r(i,j) = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \phi(m,n)\, t(m,n) \qquad (3.13)$$

计算的结果 $r(i, j)$ 放在窗口中心的象元位置，成为新象元的灰度值，然后沿同一行向右移动模板到位置 2，图象上的窗口也对应移动，重新按(3.13)式计算并把结果放在新窗口的中心象元位置。依次进行，逐行扫描，直到全幅图象扫描一遍结束，新图象生成。

从示意图可以看出，当模板放在图象左上角时，产生的象元位于第二行第二列，模板移动到右侧或上、下位置时也有类似情况，新图象比原图象左、右各少一列，上、下各少一行；若模板 5×5，则各少二行。其它类推。为了使新图象与原图象同大，对于 3×3 模板，可在原图象上或新图象上，上、下、左、右各加一行或一列象元，令所加象元的值与相邻象元相同，可实现图象大小不变（图 3.13）。由于新象元放于窗口中心，所以模板行列数均用奇数，而且常常行列数相同。

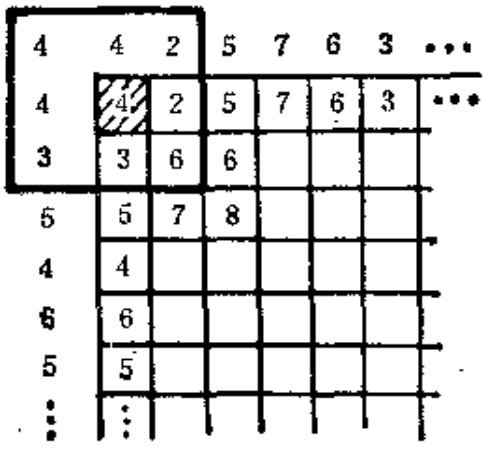


图 3.13　模板运算后图象大小不变

模板运算简便易行，遥感数据在处理或某些预处理时常常用到。

3.2.2　平滑

在图象中亮度变化突然或变化幅度较大时，通过平滑可以减少变化的梯度，使亮度平缓渐变。平滑的模板方法大致包括如下几种。

一、均值平滑

均值平滑方法将每个象元点在以它为中心的邻域内取平均值代替该象元的值，以达到去掉尖锐"噪声"，即亮度值特别高的孤立点和平滑图象的目的。假定邻域范围取 $M \times N$，则均值计算为：

$$r(i,j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \phi(m,n) \tag{3.14}$$

M和N常用相同的值计算，平均变成：

$$r(i,j) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{M} \phi(m,n)$$

这个运算可以用 3 × 3 的模板运算实现，这时模板为：

$$t(m,n) = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}$$

有时也可以不取中心值，用周围八个点平均值代替中间值，这时模板为：

$$t(m,n) = \begin{bmatrix} \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & 0 & \frac{1}{8} \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} \end{bmatrix}$$

可以避免过高的中心值影响平均值的升高。

邻域平均方法在去掉尖锐"噪声"点的同时，有时将图象灰度的起伏或边缘也削弱过多，造成图象模糊。为了克服这种现象，对噪声不太明显的图象，常常采用阈值 T，当灰度值与平均值的差异小于阈值时，取均值；大于阈值时，取原值。这样，可以平滑同类区域内的起伏，而保留边缘处大起大落的灰度变化。其计算式为：

$$r(i,\ j)=\begin{cases}\dfrac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\phi(m,\ n)\\ \quad 当\left|\dfrac{1}{MN}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\phi(m,\ n)-\phi(m,\ n)\right|<T\\ \phi(m,\ n)\qquad 其它情况\end{cases}\tag{3.15}$$

这里，ϕ为原图象窗口象元灰度值。T的选取与图象有关，常常要在实验中确定。当然，如果专门想去掉边缘，可以采取相反的情况，让差值大于阈值时取平均，只不过这种情况在实际应用中较少用到。

二、中值滤波

中值滤波是在以象元点为中心的 $M\times N$ 邻域范围内取灰度中值代替该象元的值，以达到去掉尖锐"噪声"和平滑图象的目的。也就是说，将该窗口内所有象元按灰度值大小排序，取中间的值为中心象元的值，所以一般地，$M\times N$ 取奇数。窗口运算与模板运算相同，按列按行依次扫描全图，从左至右，从上至下，一遍完成。

中值滤波以中值代替平均值，起到滤波器的作用，同时又可使某些亮度起伏保留，不致于削得太平坦。下例表示一 4 × 4 的图象用 1 × 3 的窗口做中值滤波的结果，最左和最右边列不能取满窗口，因而保留原值，从中间两列情况看，灰度变化趋势保留，冒尖噪声 9 被去掉了。

例：$\begin{bmatrix}2&3&2&1\\0&1&9&3\\0&3&1&4\\3&5&7&6\end{bmatrix}$ 取 1 × 3 窗口中值滤波 $\Longrightarrow$ $\begin{bmatrix}2&2&2&1\\0&1&3&3\\0&1&3&4\\3&5&6&6\end{bmatrix}$

中值滤波与均值平滑有其共同点而又有区别，选择哪一种方法为好要根据图象的特点和处理的目的决定。图 3.14 通过几个例子说明它们之间的相同和不同之处。例子为一维函数可代表一个一维图象，窗口 $N=5$，从左到右进行扫描。图中（a）为一阶梯

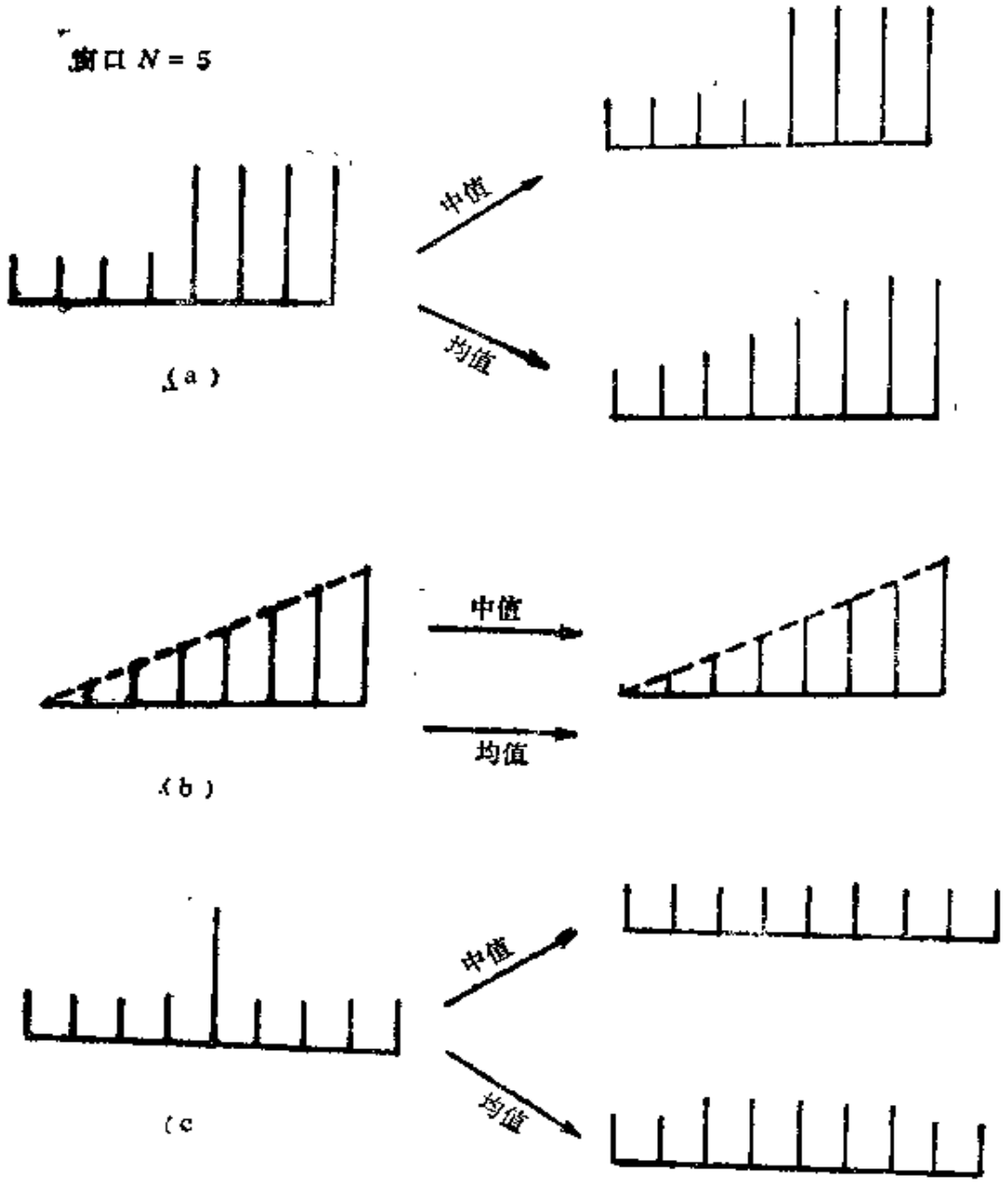


图 3.14　中值滤波和均值平滑的比效

函数，中值滤波后函数保持不变，阶梯保留，而均值平滑后阶梯消失，边缘模糊成渐变状；(b) 为一斜坡函数，无论是中值滤波还是均值平滑都和原函数形式一样。说明两种处理对这种类型的函数影响不大；(c) 为噪声干扰，用中值滤波去掉了噪声没改变原函

数，而均值平滑产生了起伏。二种处理方法对不同图象作用不同，在使用时要分析决定。窗口的大小也要慎而取之。

3.2.3 锐化

为了突出图象中的边缘、线状目标或某些亮度变化率大的部分，需要锐化图象，有时通过锐化，直接从图象中提取需要的信息，方法简单，节省机时。

一、罗伯特（Roberts）梯度

由梯度定义，图象函数 $f(x,y)$ 的梯度为：

$$\nabla f(x,y) = \frac{\partial}{\partial x} f(x,y) \cdot \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} f(x,y) \cdot \vec{j} \qquad (3.16)$$

梯度的模为各分量的平方和再求平方根，记作：

$$|\mathrm{grad}f| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \qquad (3.17)$$

梯度反映了相邻象元之间的灰度变化率，在图象中如果存在边缘，在边缘处一定有较大的梯度值，而图象中的较平滑部分，灰度变化较小，一定有较小的梯度值。对于常数图象，各点梯度值为零。可见找到梯度较大的部分，就可以找到边缘，以不同方式用梯度值代替边缘处象元的值，能达到突出边缘部分锐化图象的目的。

式(3.17)的连续函数导数形式，运用于数字图象，可用求差的形式作近似运算使计算简便。求差近似的方法很多。设 $\nabla_1 = \frac{\partial f}{\partial x}$，$\nabla_2 = \frac{\partial f}{\partial y}$ 则：

$$|\mathrm{grad}f| = \sqrt{\nabla_1^2 + \nabla_2^2} \qquad (3.18)$$

也可以近似表示为：

$$|\mathrm{grad}f| \cong |\nabla_1| + |\nabla_2| \qquad (3.19)$$

下面介绍的是交叉差分方法，又叫罗伯特梯度。设

$$\nabla_1 = f(i,j) - f(i+1,j+1)$$
$$\nabla_2 = f(i+1,j) - f(i,j+1)$$

可代入(3.18)式计算梯度，也可代入(3.19)式计算则更简单：

$$|\mathrm{grad}f| \cong |f(i,j) - f(i+1,j+1)| + |f(i+1,j) - f(i,j+1)| \quad (3.20)$$

用模板可以表示为：

$$\nabla_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \qquad \nabla_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

相当于开一个 2 × 2 窗口，用模板 ∇_1 计算后取绝对值加上模板 ∇_2 计算后的绝对值。这种运算的示意图见图 3.15，$f(i,j)$为中心象元的值，用交叉的方法可检测出象元与其邻域在上下之间或左右之间或斜方向之间的差异。对于一幅图象的每一象元从左到右，从上到下扫描一遍，求出各点梯度，只有最后一行和最后一列不存在 2 × 2 的窗口，这时可用前一列或前一行的梯度值代替，以保持全图的完整，或在原图上补上重复的一行和一列。

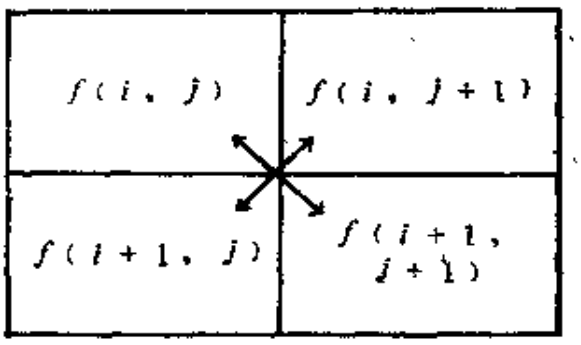


图 3.15　罗伯特梯度的计算

求得各点的梯度等于做完图象的锐化工作大部，下一步应该产生一个梯度图象，以达到突出边缘的目的。一般地说，就用各点的梯度值代替原值。

$$r(i,j) = |\mathrm{grad}f(i,j)| \quad (3.21)$$

这样得到的图象已完全失去了原图的面目成为一边缘图象，梯度大的位置亮度大，梯度小的位置亮度较小，平滑的地区几乎是黑色。由于遥感影象包含信息量大，象元的值之间差异是普遍的，有时为了突出主要的边缘信息，采用设定一个非负阈值的方法，只突出大于阈值的梯度值部分信息。方法有如下几种：

(1) 保留大于等于阈值的梯度值，其它值保留原象元值，形成背景

$$r(i,j)=\begin{cases}|\mathrm{grad}f(i,j)| & 若\ |\mathrm{grad}f|\geqslant T\\ f(i,j) & 其它值\end{cases}\tag{3.22}$$

(2) 以固定灰度值 L_g，如 255，代替边缘，其它保留原值背景

$$r(i,j)=\begin{cases}L_g & 若|\mathrm{grad}f|\geqslant T\\ f(i,j) & 其它值.\end{cases}\tag{3.23}$$

(3) 保留边缘梯度变化，去掉原图背景，用固定值 L_b，如0，代替形成黑背景

$$r(i,j)=\begin{cases}|\mathrm{grad}f(i,j)| & 若\ |\mathrm{grad}f|\geqslant T\\ L_b & 其它值\end{cases}\tag{3.24}$$

(4) 形成边缘的二值图象。例如 255 和0二种值，只有黑和白：

$$r(i,j)=\begin{cases}L_g & 若\ |\mathrm{grad}f|\geqslant T\\ L_b & 其它值\end{cases}\tag{3.25}$$

这里，阈值的选取与图象的特征和处理的目的有关，常常要在实验中通过分析图象数据来确定。至于方法的选择主要看是否保留边缘处的梯度变化规律和是否保留原背景值来决定。

二、索伯尔 (Sobel) 梯度

一种改进的梯度计算方法是索伯尔方法。在(3.18)和(3.19)的计算中，设：

$$\begin{aligned}\nabla_1=&[f(i-1,j+1)+2f(i-1,j)+f(i-1,j-1)]\\&-[f(i+1,j+1)+2f(i+1,j)+f(i+1,j-1)]\end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned}\nabla_2=&[f(i-1,j+1)+2f(i,j+1)+f(i+1,j+1)]\\&-[f(i-1,j-1)+2f(i,j-1)+f(i+1,j-1)]\end{aligned}\tag{3.26}$$

(3.19)式的近似方法较为多用，如用模板表示可记为：

$$\nabla_1=\begin{bmatrix}1&2&1\\0&0&0\\-1&-2&-1\end{bmatrix},\qquad \nabla_2=\begin{bmatrix}-1&0&1\\-2&0&2\\-1&0&1\end{bmatrix},$$

示意图见图 3.16，$f(i,j)$ 为中心象元的值。索伯尔计算较多地考虑了邻域点的关系，由只用 3 个邻域点到用 9 个邻域点，因而从检测边界的角度看将更加精确。

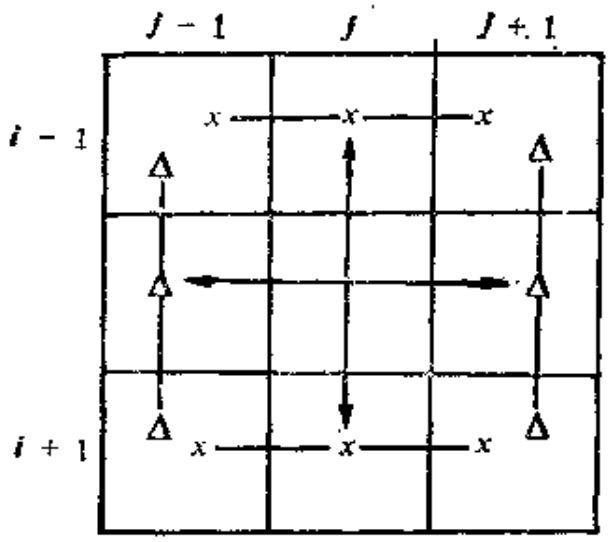


图 3.16　索伯尔梯度计算

梯度图象产生的方法与罗伯特梯度一样，(3.21)，(3.22)，(3.23)，(3.24)，(3.25) 都适用于索伯尔梯度方法。

例：

图 3.17(a)表示一个 8×8 数字图象，在第 4 和 5 列之间，第 4 和 5 行之间均存在边界或灰阶梯度。图 3.17(b) 为利用罗伯特方法用式 (3.19) 和式 (3.21) 得梯度图象，最后一行和最后一列是加入重复值后的结果。图 3.17(c) 为利用索伯尔方法用式 (3.19) 和式 (3.21) 所得另一梯度图象。通过增加双行双列使梯度图象保持与原图象同大小。

注意图中 (b) 与 (c) 中边界的位置，(c) 中的边界是两个象元宽度，(b) 中边界则是取交界处的一边，这种现象提醒我们在处理线性特征如一个或两个象元宽的线条形景物时，要特别谨慎地选取处理方法。

三、拉普拉斯 (Laplace) 算法

拉普拉斯算法是从拉普拉斯算子近似而来。

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{3.27}$$

对于离散情况，二阶导数改用差分表示，设

5	5	5	5	10	10	10	10
5	5	5	5	10	10	10	10
5	5	5	5	10	10	10	10
5	5	5	5	10	10	10	10
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5

(a) 原图

0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	5	10	10	10	10
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 罗伯特方法

0	0	0	20	20	0	0	0
0	0	0	20	20	0	0	0
0	0	0	20	20	0	0	0
0	0	0	20	30	20	20	20
0	0	0	10	20	20	20	20
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(c) 索伯尔方法

图 3.17　罗伯特与索伯尔方法实例

$$\nabla_1^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, \quad \nabla_2^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial y},$$

$$\nabla^2 f = \nabla_1^2 f + \nabla_2^2 f \tag{3.28}$$

又设

$$\nabla_1 f(i+1,j) = f(i+1,j) - f(i,j)$$
$$\nabla_2 f(i,j+1) = f(i,j+1) - f(i,j)$$
$$\nabla_1^2 f(i,j) = \nabla_1 f(i+1,j) - \nabla_1 f(i,j)$$
$$\nabla_2^2 f(i,j) = \nabla_2 f(i,j+1) - \nabla_2 f(i,j)$$

所以，可以推导出

$$\begin{aligned}\nabla_1^2 f(i,j) &= \nabla_1 f(i+1,j) - \nabla_1 f(i,j)\\ &= [f(i+1,j) - f(i,j)] - [f(i,j) - f(i-1,j)]\\ &= f(i+1,j) + f(i-1,j) - 2f(i,j)\end{aligned}$$

同样地

$$\nabla_2^2 f(i,j) = f(i,j+1) + f(i,j-1) - 2f(i,j)$$

因而

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(i,j) &= \nabla_1^2 f(i,j) + \nabla_2^2 f(i,j)\\ &= f(i+1,j) + f(i-1,j) + f(i,j+1)\\ &\quad + f(i,j-1) - 4f(i,j)\end{aligned} \tag{3.29}$$

(3.29) 式表达的具体计算式用模板运算可以表示成模板

$$s(m,n) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

也就是说取某象元上下左右四个邻点的值相加减去该象元值的四倍，作为这个象元的新灰度值。

拉普拉斯模板运算求出的值与梯度值不同。梯度运算得到图象上的空间灰度变化率，只要有灰度变化就有变化率。而拉普拉斯方法求的是变化率的变化率，是二阶微分，因而它不检测均匀的变化。这样可以更加突出那些灰度值突变的位置。图 3.18 为一拉普拉斯方法实例。原图与图 3.17(a) 类似，只是左上角成为渐变灰度，见图 3.18(a)。经过模板运算后，边界处保留有一个或二个象元宽的值，其它处不论是常数还是变化率一致的左上角均为零，见(b)，这里出现了灰度为负的情况。实际图象显示时灰度为正，可

5	6	7	8	9	10	10	10
5	6	7	8	9	10	10	10
5	6	7	8	9	10	10	10
5	6	7	8	9	10	10	10
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5

(a) 原图

0	0	0	0	0	−1	0	0
0	0	0	0	0	−1	0	0
0	0	0	0	0	−1	0	0
−1	−1	−2	−3	−4	−6	−5	−5
1	1	2	3	4	5	5	5
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 模板运算后

6	6	7	8	9	11	10	10
6	6	7	8	9	11	10	10
6	6	7	8	9	11	10	10
7	7	9	11	13	16	15	15
4	4	3	2	1	0	0	0
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5

(c) $r(i,j)=f(i,j)-\nabla^2 f(i,j)$

图 3.18　拉普拉斯方法实例

以用加一个常数的方法解决。

有时，也用原图象的值减去模板运算的结果或结果的整倍数，即

$$r(i,j)=f(i,j)-k\nabla^2 f(i,j) \tag{3.30}$$

图 3.18(c) 是 $k=1$ 的实例，从图中可以看出，原图象作为背景保留下来，而边界之处加大了原来的对比度，使边界位置更加突出，实现了尖锐化。

拉普拉斯方法采用的模板不是唯一的，有时也用下列模板运算：

$$t(m,n)=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & -8 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix} \text{ 或 } \begin{bmatrix}0 & -1 & 0\\ -1 & 5 & -1\\ 0 & -1 & 0\end{bmatrix}$$

前面这种运算用八个邻域点代替 4 个邻域点。

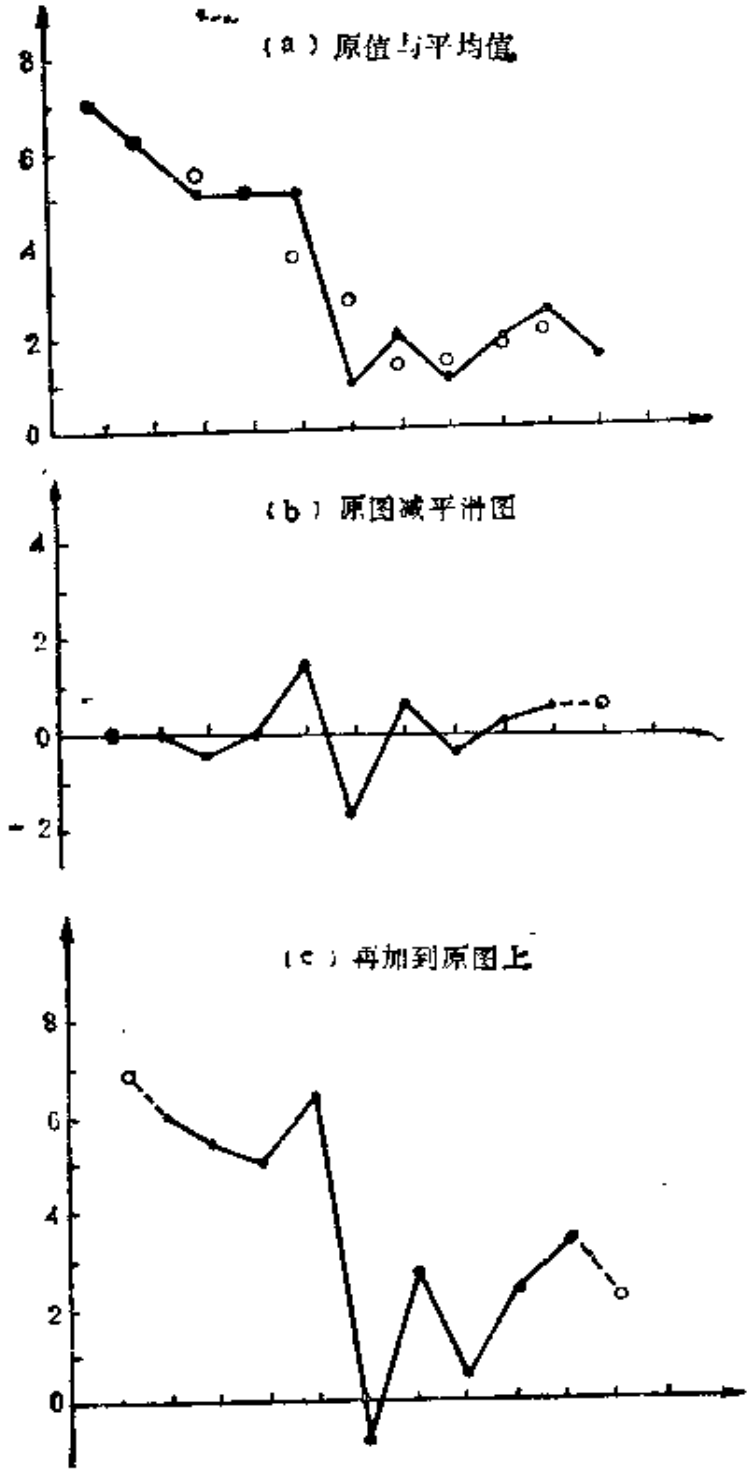


图 3.19　减平滑方法一维实例

四、减去平滑图象的边缘增强

边缘的增强还可以用几步实现，每一步的运算都是简单的算术运算，步骤如下：

(1) 用平滑的方法作出平滑图象。

(2) 用原图减去平滑图象的对应值，得到边界图。

(3) 将减法图象加到原图上，得到对比度加大的尖锐化图象。

图 3.19 是减平滑方法的一个一维实例。原图有边界也有起伏见 (a)，经过三个步骤，最后的结果明显加大了边界处的对比度，也增大了起伏，对于渐变部分则没有什么太大影响。见 (c)。

分析减平滑方法可知，尽管步骤不同，实际上这种运算还是拉普拉斯方法，现将 (3.29) 式作一改写：

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(i,j) &= [f(i+1,j)+f(i-1,j)+f(i,j+1)\\ &\quad +f(i,j-1)]-4f(i,j)\\ &= -5\{f(i,j)-\frac{1}{5}[f(i+1,j)+f(i-1,j)\\ &\quad +f(i,j+1)+f(i,j-1)+f(i,j)]\}\end{aligned} \tag{3.31}$$

式中中括号乘 $\frac{1}{5}$ 是象元与四邻点的平均值，大括号内是原图减平滑图象，所以前二步实际是拉普拉斯运算，步骤 (3) 实现了 (3.30) 式的计算，只不过改变了 (3.31) 式的系数。

五、利用各种模板作定向检测

前面所述方法没有指定特定的方向。在实际处理时，常常有目的的检测某一方向的边、线或纹理特征，因而选用不同的模板。常用的模板为：

(1) 检测垂直边界

$$t(m,n)=\begin{bmatrix}-1&0&1\\-1&0&1\\-1&0&1\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}-1&2&-1\\-1&2&-1\\-1&2&-1\end{bmatrix}$$

(2) 检测水平边界

$$t(m,n)=\begin{bmatrix}-1&-1&-1\\0&0&0\\1&1&1\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}-1&-1&-1\\2&2&2\\-1&-1&-1\end{bmatrix}$$

(3) 检测对角线边界

$$t(m,n)=\begin{bmatrix}0&1&1\\-1&0&1\\-1&-1&0\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}1&1&0\\1&0&-1\\0&-1&-1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}-1&-1&2\\-1&2&-1\\2&-1&-1\end{bmatrix},\ \begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}$$

类似的模板种类还很多，可以在实验中选择，这里不一一列举。

1	1	1	13	14	15		0	0	36	39	0	0		0	0	0	0	0	0
1	1	1	13	14	15		0	0	36	39	0	0		0	0	0	0	0	0
1	1	1	13	14	15		0	0	24	26	0	0		0	0	12	25	39	41
1	1	1	1	1	1		0	0	12	13	0	0		0	0	12	25	39	41
1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0

(a) 原图　　(b) 垂直方向边缘检测 ($T=10$)　　(c) 水平方向边缘检测 ($T=10$)

图 3.20　方向模板实例

图 3.20 用实例说明方向模板的作用，图中 (b) 是使用垂直模板 $\begin{bmatrix}-1&0&1\\-1&0&1\\-1&0&1\end{bmatrix}$ 运算的结果并用阈值 $T=10$，保留大于等于 T 的值，其它为 0，图中 (c) 使用水平方向检测模板 $\begin{bmatrix}1&1&1\\0&0&0\\-1&-1&-1\end{bmatrix}$ 使用阈值 $T=10$。二图分别检测了垂直边缘和水平边缘。

六、利用局部统计量作增强

选择窗口如：3 × 3，5 × 5，7 × 7 等，求窗口内象元灰度值的统计量，计算中心象元的新灰度值，移动窗口对每一象元进行灰度值代换，直到扫完全图。计算方法如下：

(1) $$r(i,j)=\frac{f(i,j)}{\sigma_{i,j}} \tag{3.32}$$

其中 $\sigma_{i,j}$ 为窗口内的局部标准差。本式可作边缘增强。

(2) $$r(i,j)=m_{i,j}+k[f(i,j)-m_{i,j}] \tag{3.33}$$

其中，$m_{i,j}$ 为局部均值，$k=\frac{\sigma'_{i,j}}{\sigma_{i,j}}$，$\sigma'_{i,j}$ 为指定的局部标准差，k 的值可以调整。

当 $k=0$ $r(i,j)=m_{i,j}$ 为均值图象；

当 $k=1$ $r(i,j)=f(i,j)$ 为原图象；

当 $0\leqslant k<1$ 平滑；

当 $k>1$ 锐化；

本方法计算复杂，在实际中较少使用。

§ 3.3 频率域增强技术

图象中亮度值(或灰度值)随位置变化的频繁程度可以表达为频率，这种频率不是物理中常描写的随时间变化的频率，例如声波的振动快慢，电机的转动快慢等，而是一种随位置变化的空间频率。空间频率可以模拟前一种频率进行分析。对于边缘、线条、噪声等特征，例如丘陵地区的沟壑、河溪、湖泊边界，海岸线、大差异的地表覆盖交界等均属于高频率的特性。对于粗糙的结构或较大面积的稳定特征，例如生长类似植被的平原，较大块的沙漠，海面等均属于低频率的特性。因此，平滑处理保留图象的低频部分削弱高频部分，而锐化处理则保留图象的高频部分削弱低频部分。

本节介绍通过傅立叶变换将图象数据从空间域变到频率域，利用滤波器保留其中的低频或高频部分，从而达到平滑或锐化的

目的。

3.3.1 傅立叶变换

令 $f(x)$ 为连续函数，$f(x)$ 的傅立叶变换定义为

$$F(u)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\exp\left[-j\,2\pi ux\right]dx \tag{3.34}$$

其中 $j=\sqrt{-1}$，x 为实变量。

如果函数 $f(x)$ 的傅立叶变换 $F(u)$ 已知，则可以作反变换求 $f(x)$。

$$f(x)=\int_{-\infty}^{\infty} F(u)\exp\left[j\,2\pi ux\right]du \tag{3.35}$$

(3.34) 与 (3.35) 两式被称为傅立叶变换对。由于 $f(x)$ 是一个实函数，其傅立叶变换通常是复数。对于二维连续函数 $f(x,y)$，其傅立叶变换定义为：

$$F(u,v)=\int_{-\infty}^{\infty}\int f(x,y)\exp\left[-j\,2\pi(ux+vy)\right]dxdy \tag{3.36}$$

反傅立叶变换的形式为

$$f(x,y)=\int_{-\infty}^{\infty}\int F(u,v)\exp\left[j\,2\pi(ux+vy)\right]dudv \tag{3.37}$$

成为二维傅立叶变换对，式中

$$\exp\left[-j\,2\pi(ux+vy)\right]=\cos 2\pi(ux+vy)-j\sin 2\pi(ux+vy)$$

所以从三角函数可知 u，v 是频率变量，具有周期性。设 $R(u,v)$ 代表复数的实部，$I(u,v)$ 代表复数的虚部，用 $|F(u,v)|$ 表示傅立叶变换的模或叫 $f(x)$ 的傅立叶谱，则：

$$|F(u,v)|=\left[R^2(u,v)+I^2(u,v)\right]^{1/2} \tag{3.38}$$

注意，$f(x,y)$ 是在空间域中的二维函数，而傅立叶谱函数

$|F(u, v)|$ 是在频率域中的二维函数。

对于图象，连续函数在每一坐标轴上被抽样，成为离散函数。函数形式有些变化，对于一幅 $M \times N$ 大小的图象经过二维傅立叶变换和傅立叶谱计算仍为 $M \times N$ 大小，这时，二维离散傅立叶变换为

$$F(u, v) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \exp\left[-j\, 2\pi\, (ux/M + vy/N)\right] \tag{3.39}$$

式中 $u = 0, 1, 2, \cdots, M-1$; $v = 0, 1, 2, \cdots, N-1$

反傅立叶变换相应地成为

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \times \exp\left[j\, 2\pi (ux/M + vy/N)\right] \tag{3.40}$$

式中 $x = 0, 1, 2, \cdots, M-1$; $y = 0, 1, 2, \cdots, N-1$

对于我们常用的图象 $M = N$，是一方形图象，这时，

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \exp\left[-j\, 2\pi\, (ux + vy)/N\right] \tag{3.41}$$

式中 $u, v = 0, 1, 2, \cdots, N-1$

反傅立叶变换为

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \times \exp\left[j\, 2\pi\, (ux + vy)/N\right] \tag{3.42}$$

式中 $x, y = 0, 1, 2, \cdots, N-1$

傅立叶谱仍由式 (3.38) 决定。

二维傅立叶变换有许多性质，这里只就遥感图象处理中常用的性质作一简介：

一、可分离性

傅立叶变换对中的二个变量可表示成分离形式，对于 $N \times N$ 的情况

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \exp\left[-j\,2\pi ux/N\right] \times \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y)\exp\left[-j\,2\pi vy/N\right]$$

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \exp\left[j\,2\pi ux/N\right] \times \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v)\exp\left[j\,2\pi vy/N\right]$$

$$u, v = 0, 1, 2, \cdots, N-1;\ x, y = 0, 1, 2, \cdots, N-1 \tag{3.43}$$

这个性质使傅立叶变换的实际计算简单化，可以对变量依次计算，例如先设 y 不变，对 x 取变换

$$F'(u, y) = \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp\left[-j\,2\pi ux/N\right] \tag{3.44}$$

再设 u 不变，对 y 取变换，得最后结果

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} F'(u, y) \exp\left[-j\,2\pi vy/N\right] \tag{3.45}$$

现以图 3.21(a) 所示图象为例作一傅立叶变换：

(1) 设 y 不变，对 x 变换，由 (3.44) 式

当 $y = 0$，

$$F'(u, y) = F'(u, 0) = \sum_{x=0}^{3} f(x, 0)e^{-j\frac{2\pi ux}{4}}$$

设 $u = 0$,

$$\begin{aligned} F'(0,0) &= f(0, 0)e^0 + f(1, 0)e^0 \\ &\quad + f(2,0)e^0 + f(3,0)e^0 \\ &= 1 + 1 + 0 + 0 = 2 \end{aligned}$$

设 $u = 1$,

$$\begin{aligned} F'(1, 0) &= f(0,0)e^0 + f(1,0)e^{-j\frac{\pi}{2}} + f(2, 0)e^{j-\pi} \\ &\quad + f(3, 0)e^{-j\frac{3\pi}{2}} \\ &= 1 + (-j) + 0 + 0 = 1 - j \end{aligned}$$

设 $u = 2$,

$$\begin{aligned} F'(2, 0) &= f(0, 0)e^0 + f(1,0)e^{-j\pi} \\ &\quad + f(2,0)e^{-j2\pi} + f(3,0)e^{-j3\pi} \\ &= 1 + (-1) + 0 + 0 = 0 \end{aligned}$$

设 $u = 3$,

$$\begin{aligned} F'(3,0) &= f(0,0)e^0 + f(1,0)e^{-j\frac{3\pi}{2}} + f(2, 0)e^{-j3\pi} \\ &\quad + f(3, 0)e^{-j\frac{9}{2}\pi} \\ &= 1 + j + 0 + 0 = 1 + j \end{aligned}$$

这是第一列的对 x 变换数据。

同样地,可以求出

当 $y = 1$,

$$F'(u,y) = F'(u,1) = \sum_{x=0}^{3} f(x, 1)e^{-j\frac{2\pi ux}{4}}$$

$F'(0, 1) = 2$, $F'(1, 1) = 1 - j$, $F'(2, 1) = 0$,

$F'(3, 1) = 1 + j$

当 $y = 2$,

$$F'(u,y) = F'(u,2) = \sum_{x=0}^{3} f(x,2)e^{-j\frac{2\pi ux}{4}}$$

$F'(0,2) = 0$, $F'(1,2) = 0$, $F'(2,2) = 0$,

$F'(3,2) = 0$

当 $y = 3$,

$$F'(u,y) = F'(u,3) = \sum_{x=0}^{3} f(x,3)e^{-j\frac{2\pi ux}{4}}$$

$F'(0,3) = 0$, $F'(1,3) = 0$, $F'(2,3) = 0$,

$F'(3,3) = 0$

全图对 x 的变换结果列于图 3.21(b)。

(2) 设 u 不变,对 y 变换,由 (3.45) 式

当 $u = 0$,

$$F(u,v) = F(0,v) = \sum_{y=0}^{3} F'(0,y)e^{-j\frac{2\pi vy}{4}}$$

设 $v = 0$,

$$\begin{aligned} F(0,0) &= F'(0,0)e^{0} + F'(0,1)e^{0} \\ &\quad + F'(0,2)e^{0} + F'(0,3)e^{0} \\ &= 2 + 2 + 0 + 0 = 4 \end{aligned}$$

设 $v = 1$,

$$\begin{aligned} F(0,1) &= F'(0,0)e^{0} + F'(0,1)e^{-j\frac{\pi}{2}} + F'(0,2)e^{-j\pi} \\ &\quad + F'(0,3)e^{-j\frac{3\pi}{2}} \\ &= 2 + (-2j) + 0 + 0 = 2 - 2j \end{aligned}$$

设 $v = 2$,

$$\begin{aligned} F(0,2) &= F'(0,0)e^{0} + F'(0,1)e^{-j\pi} \\ &\quad + F'(0,2)e^{-j2\pi} + F'(0,3)e^{-j3\pi} \\ &= 2 - 2 + 0 + 0 = 0 \end{aligned}$$

设 $v = 3$,

$$F(0,3)=F'(0,0)e^{0}+F'(0,1)e^{-j\frac{3\pi}{2}}+F'(0,2)e^{-j3\pi}+F'(0,3)e^{-j\frac{9\pi}{2}}$$
$$=2+2j+0+0=2+2j$$

类似地，可以求出

当 $u=1$，

$$F(u,v)=F(1,v)=\sum_{y=0}^{3}F'(1,y)e^{-j\frac{2\pi vy}{4}}$$

$F(1,0)=2-2j$，$F(1,1)=-2j$，$F(1,2)=0$，

$F(1,3)=2$

当 $u=2$，

$$F(u,v)=F(2,v)=\sum_{y=0}^{3}F'(2,y)e^{-j\frac{2\pi vy}{4}}$$

$F(2,0)=0$，$F(2,1)=0$，$F(2,2)=0$，$F(2,3)=0$

当 $u=3$，

$$F(u,v)=F(3,v)=\sum_{y=0}^{3}F'(3,y)e^{-j\frac{2\pi vy}{4}}$$

$F(3,0)=2+2j$，$F(3,1)=2$，$F(3,2)=0$，

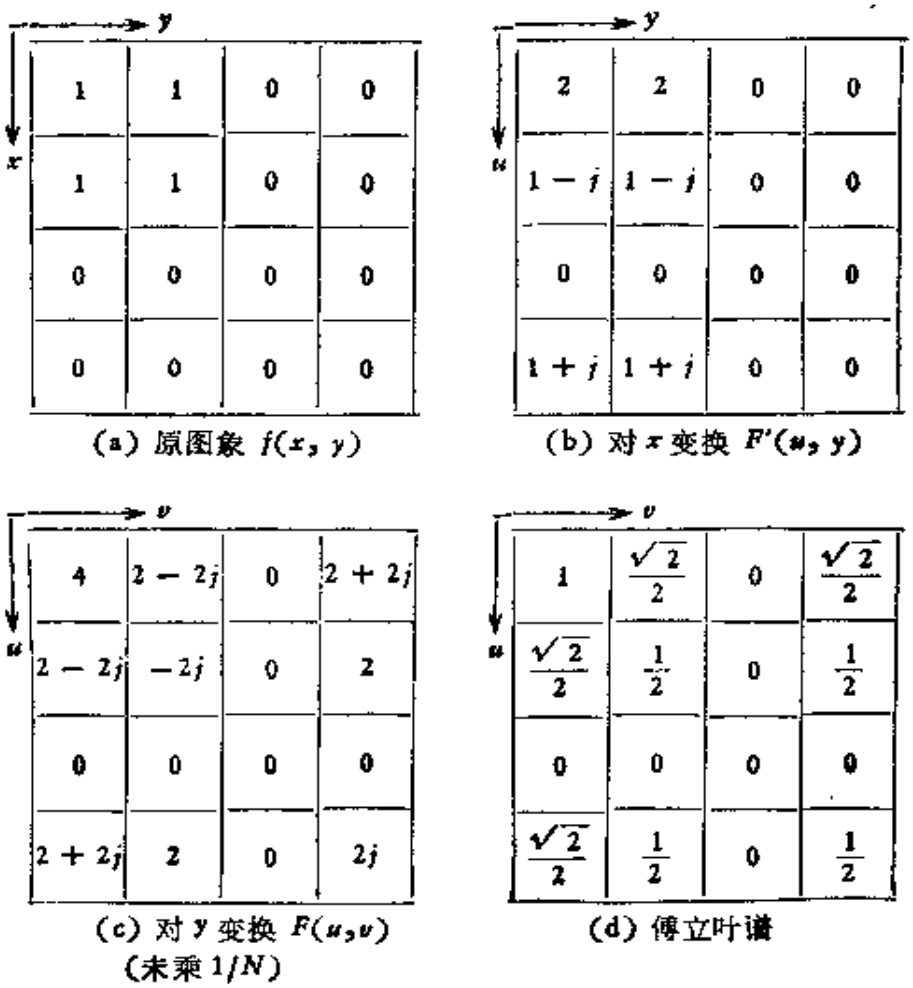
$F(3,3)=2j$

全图对 y 变换的结果列于图 3.21(c)，按式 (3.45) 最后还应对每一数值乘上系数 $1/N$，在本例题为 1/4，通常这个系数是无关紧要的。

(3) 求傅立叶谱

对图中 (c) 中每一象元值，乘以系数 1/4 后，按式 (3.38) 求模，可以得到傅立叶谱函数，画成数字图象的值见图 3.21(d)

从此例可以了解傅立叶变换的计算过程，并知计算是很繁锁的，特别是当 N 比较大后，每个数的计算都要完成 N 项的指数计算并相加。为了减少运算步骤和时间，特别是节省计算机的机时，产



(a) 原图象 $f(x, y)$　(b) 对 x 变换 $F'(u, y)$

(c) 对 y 变换 $F(u,v)$ (未乘 $1/N$)　(d) 傅立叶谱

图 3.21　傅立叶变换实例

生了“快速傅立叶变换”，简写 FFT，它实现了一维快速计算。由于有可分离性，图象的傅立叶变换用二次一维 FFT 实现完全没有困难。许多计算机都有 FFT 的专门软件包，图象专用处理机并把图象傅立叶变换的程序硬件化了。

二、平移

为了简化叙述，将式 (3.36) 和 (3.37) 所表示的傅立叶变换对记作：

$$f(x,y) \Longleftrightarrow F(u,v)$$

那么现有性质

$$f(x,y)\exp[j2\pi(u_0x+v_0y)/N]\Longleftrightarrow F(u-u_0,v-v_0) \tag{3.46}$$

这种性质为平移，也就是左式的傅立叶变换等于右式，而右式的傅立叶反变换等于左式，频率面原点移动到 (u_0,v_0)。

常用的情况是 $u_0=v_0=N/2$，也就是对于 $N\times N$ 的图象，在傅立叶变换后，希望频率平面的原点移动，从原图象的原点 (0,0) 移动到 $(N/2, N/2)$ 即频率图象平面的中心，这时

$$\exp[j2\pi(u_0x+v_0y)/N]=e^{j\pi(x+y)}=(-1)^{x+y}$$

因此 (3.46) 式成为：

$$f(x,y)(-1)^{x+y}\Longleftrightarrow F(u-N/2,v-N/2) \tag{3.47}$$

就是说，只要将原图象乘 $(-1)^{x+y}$，傅立叶变换后的频率平面原点将移至频率图象面的中心。

三、周期性和共轭对称性

周期性的表现为：

$$\begin{aligned}F(u,v)&=F(u+N,v)=F(u,v+N)\\&=F(u+N,v+N)\end{aligned} \tag{3.48}$$

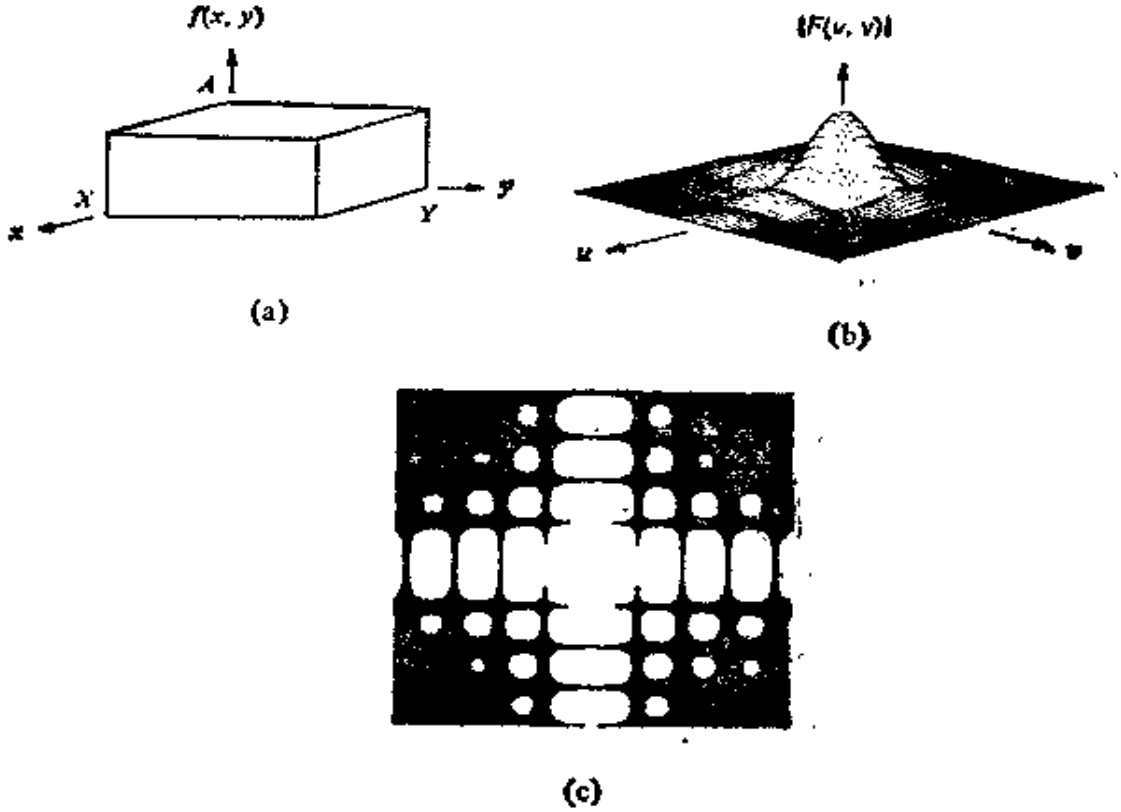
共轭对称性的表现为：

$$F(u,v)=F^*(-u,-v) \tag{3.49}$$

$*$ 代表共轭。也就是说，这个变换函数是轴对称的，并且是以 N 为周期的周期函数。一般来说，傅立叶变换后，对于 u，v 轴从 0 到 N 的一个周期区间有一半是某一周期，另一半却是另一周期的对称部分。为了恰好在 $N\times N$ 的频率平面表现一个周期的内容，必须用 (3.47) 式表示的平移特性，取 $(N/2, N/2)$ 为新的原点，利用其周期性和共轭性展示出一个周期的全部内容，如图 3.22(b) 至 (c)。

四、卷积定理

3.2.1 节中已提到过卷积的意义和作用，这里进一步引入卷积定理，二维卷积定理为：



(a)　　(b)

(c)

图 3.22　傅立叶变换实例

(a) 原二维函数　(b) 傅立叶谱　(c) 强度函数

$$f(x, y) * g(x, y) \Longleftrightarrow F(u, v)G(u, v) \qquad (3.50)$$

和

$$f(x, y) \cdot g(x, y) \Longleftrightarrow F(u, v) * G(u, v) \qquad (3.51)$$

这些离散函数都是周期函数。为了讨论图象的方便，这里仅取从零开始的一个周期讨论。如果 $f(x, y)$ 与 $g(x, y)$ 的周期不等，即图象大小 $M_f \neq M_g$ 和/或 $N_f \neq N_g$，则取 $x = 0, 1, \cdots (M_f + M_g - 1)$，$y = 0, 1, (N_f + N_g - 1)$，没有值的位置补 0，使其周期相同，而问题简单化。

本书中卷积定理主要用于增强。由于较复杂的二维函数卷积计算比较困难，于是，利用卷积定理将函数 f 和 g 分别求出傅立叶变换 F 和 G，并且相乘。根据 (3.50) 式，将乘积进行反傅立叶变

换就可以得到卷积计算的结果 $f(x,y)*g(x,y)$。变换 $G(u,v)$ 的形式，可以取得不同的卷积结果，从而达到不同的增强目的。若 $f(x,y)$ 代表原来的图象，$r(x,y)=f(x,y)*g(x,y)$ 为卷积后的增强图象，则 $G(u,v)$ 称作“传递函数”。

通过傅立叶变换，到频率域中作增强运算，或平滑，或锐化，关键在于选择不同的“传递函数”。由于有快速傅立叶变换（FFT）的软件包或不少图象处理器中 FFT 的硬件化，这项运算做起来并不困难和费时。

3.3.2 平滑（低通滤波法）

为了削弱边缘、线条、噪声等高频信息而保留较为平滑的图象即低频信息，必须设计一种传递函数 $G(u,v)$，使其在频率域内起到滤波器的作用，阻止或抑制高频通过却不阻止低频信息通过，这种滤波器叫做低通滤波器，它可以起到平滑图象的作用。

具体做法是：

(1) 对原图象 $f(x,y)$ 作傅立叶变换，得到 $F(u,v)$。

(2) 选择滤波传递函数 $G(u,v)$ 或称选择低通滤波器。

(3) 计算 $R(u,v)=F(u,v)\cdot G(u,v)$。

(4) 对 $R(u,v)$ 作反傅立叶变换，得到

$$r(x,y)=f(x,y)*g(x,y)$$

这便是平滑后的结果（图 3.23）。

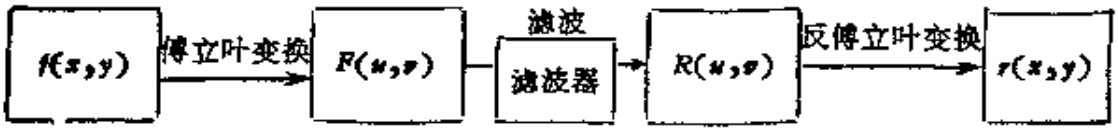


图 3.23 频率域增强过程

可选用的低通滤波器有：（参见图 3.24）

一、理想滤波器

设频率域二维空间内，从某点到频率平面原点的距离为

$$D(u,v)=[u^2+v^2]^{1/2} \qquad (3.52)$$

则理想滤波器的传递函数

$$G(u,v)=\begin{cases}1 & \text{当 } D(u,v)\leqslant D_0\\ 0 & \text{当 } D(u,v)>D_0\end{cases}\quad(D_0\geqslant 0)\qquad(3.53)$$

D_0 的大小在使用时根据需要指定，也就是说让比 D_0 小的低频频率全部通过，比 D_0 大的高频频率全部阻止。

二、巴特沃思（Butterworth）滤波器

$$G(u,v)=\frac{1}{1+[D(u,v)/D_0]^{2n}}\quad(n=1,2,3,\cdots)\qquad(3.54)$$

或

$$G(u,v)=\frac{1}{1+(\sqrt{2}-1)[D(u,v)/D_0]^{2n}}\qquad(3.55)$$

设$G(u,v)$为最大值的某一分数值的那个 $D(u,v)$ 点为截止频率。在这里 $D(u,v)=D_0$ 时为截止频率，$G(u,v)$ 的最大值为 1，对于 (3.54) 式 D 为截止频率时 $G=0.5$，(3.55) 式 D 为截止频率时 $G=1/\sqrt{2}$，D_0 在使用时根据需要确定。

三、指数滤波器

$$G(u,v)=e^{-[D(u,v)/D_0]^n}\qquad(3.56)$$

或

$$G(u,v)=e^{[\ln(1/\sqrt{2})][D(u,v)/D_0]^n}\quad(n=1,2,3,\cdots)\qquad(3.57)$$

这里，(3.56) 式 D 为截止频率时 $G=1/e$，(3.57) 式 D 为截止频率时，$G=1/\sqrt{2}$，截止频率 D_0 在使用时确定。

四、梯形滤波器

仍定义 D_0 为截止频率，再规定一个 D_1，令 $D_1>D_0$，则梯形滤波器传递函数为：

$$G(u,v)=\begin{cases}1 & \text{当 } D(u,v)<D_0\\ \dfrac{1}{D_0-D_1}[D(u,v)-D_1] & \text{当 } D_0\leqslant D(u,v)\leqslant D_1\\ 0 & \text{当 } D(u,v)>D_1\end{cases}$$

(3.58)

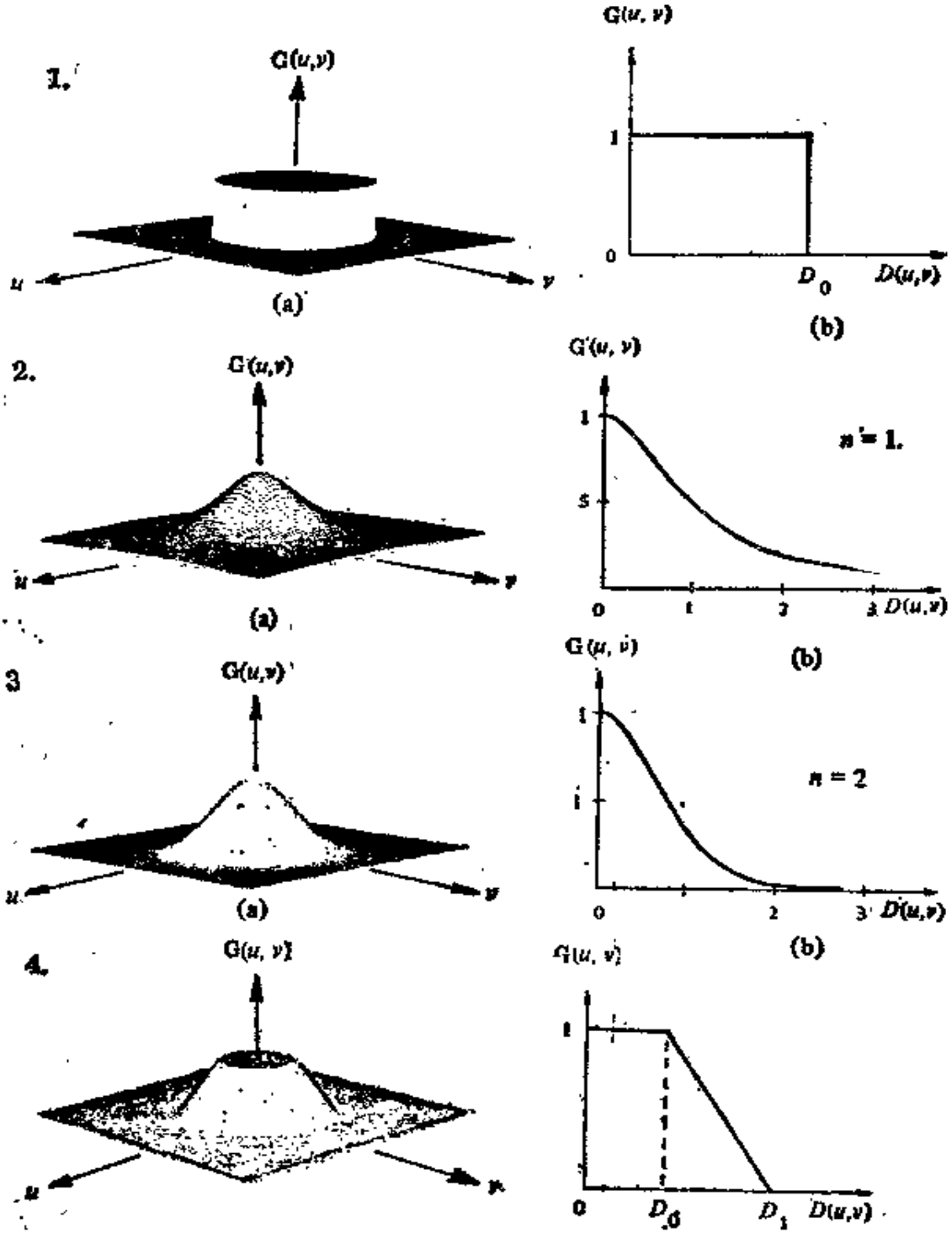


图 3.24　几种低通滤波器

1.理想低通滤波器　2.巴特沃思低通滤波器

3.指数低通滤波器　4.梯形低通滤波器

几种滤波器各有其特点，总的说能起到去噪声和平滑边缘的作用，但方法和参数的选择会产生不同程度的付作用，即使图象模糊，或产生一些不连续的边缘，牺牲了图象的清晰度。因此在使用时要特别注意。在遥感图象中比较多用的是指数滤波器，可以简化为，$G = A + Be^{CD}$ 其中 A，B，C 均可规定，但参数如何选择才能得到最佳图象，主要依靠经验。

3.3.3 锐化(高通滤波法)

与低通滤波法完全相反，高通滤波法是设计一种传递函数 $G(u,v)$，使其在频率域中让高频信息通过却阻止低频信息，起到高通滤波器的作用，达到突出图象边缘信息，加大对比度，实现图象锐化的目的。

在具体做法上与低通滤波法完全相同，只是选用的滤波器为高通滤波器(图 3.23)。

可选用的高通滤波器也与低通滤波器类似(参见图 3.25)。

一、理想滤波器

$$H(u,v) = \begin{cases} 0 & \text{当 } D(u,v) \leqslant D_0 \\ 1 & \text{当 } D(u,v) > D_0 (D_0 \geqslant 0) \end{cases} \tag{3.59}$$

其中 D 仍由式 (3.52) 决定、 D_0 在使用时规定，比 D_0 大的高频频率可以全部通过，而比 D_0 小的频率全部被阻止。

二、巴特沃思滤波器

$$G(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u,v)]^{2n}} \tag{3.60}$$

或

$$G(u,v) = \frac{1}{1 + (\sqrt{2} - 1)[D_0/D(u,v)]^{2n}} \quad (n = 1,2,3\cdots) \tag{3.61}$$

仍定义 D_0 为截止频率，当 $D = D_0$ 时，对于 (3.60) 式 $G = 0.5$，对于 (3.61) 式 $G = 1/\sqrt{2}$。

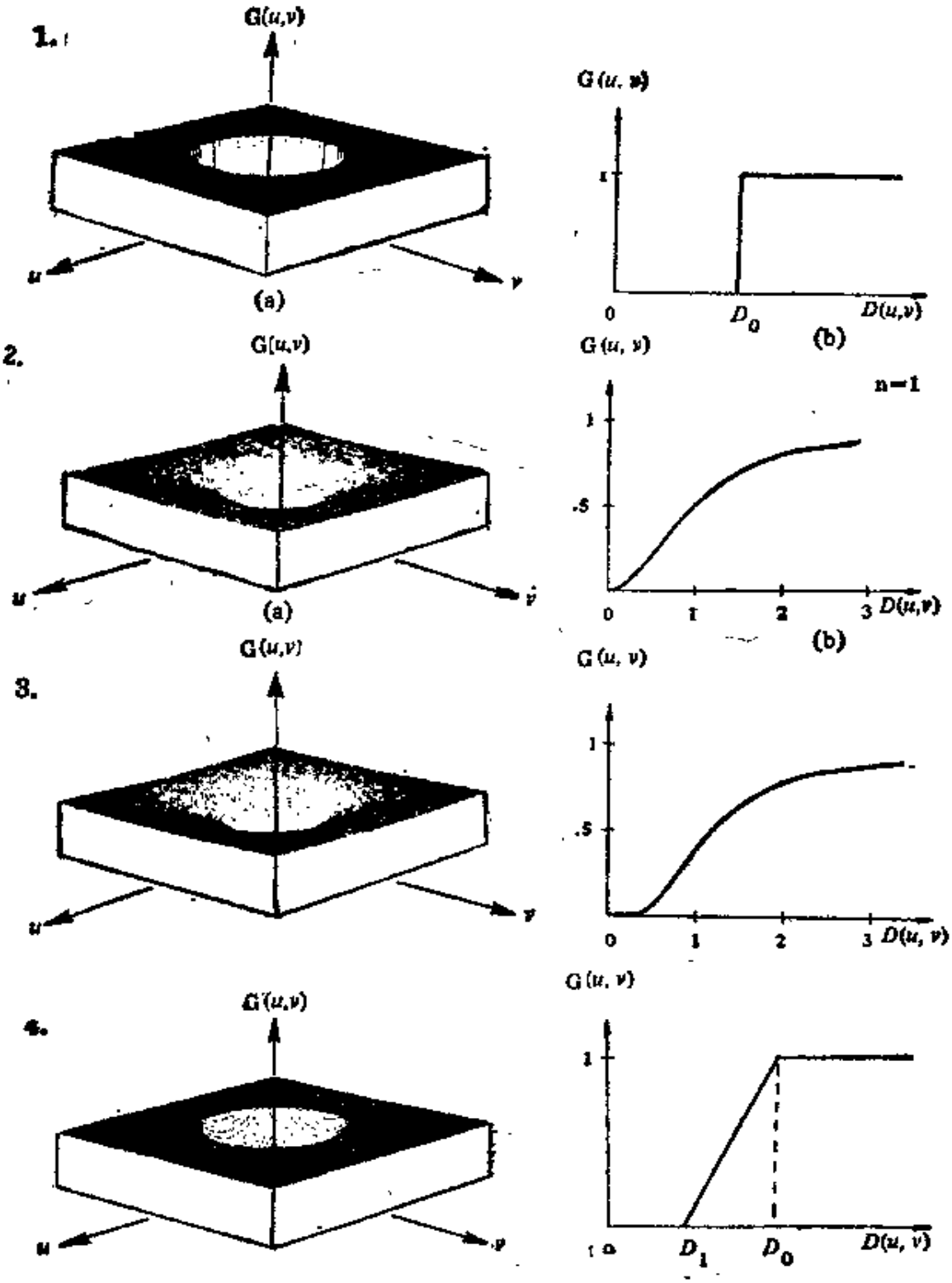


图 3.25　几种高通滤波器

1.理想高通滤波器　2.巴特沃思高通滤波器　3.指数高通滤波器

4.梯形高通滤波器

三、指数滤波器

$$G(u,v)=e^{-[D_0/D(u,v)]^n} \tag{3.62}$$

或 $$G(u,v)=e^{[\ln(1/\sqrt{2})][D_0/D(u,v)]^n}\quad(n=1,2,3\cdots) \tag{3.63}$$

对于 (3.62) 式，$D=D_0$ 时 $G=1/e$，对于 (3.63) 式 $D=D_0$ 时，$G=1/\sqrt{2}$，

四、梯形滤波器

$$G(u,v)=\begin{cases}0 & \text{当 } D(u,v)<D_1\\ \dfrac{1}{(D_0-D_1)}[D(u,v)-D_1] & \text{当 } D_1\leqslant D(u,v)\leqslant D_0\\ 1 & \text{当 } D(u,v)>D_0\end{cases} \tag{3.64}$$

这里 $D_0>D_1\geqslant 0$，D_0 与 D_1 均为规定值。

以上几种高频滤波器除了通过高频分量以外，采用了不保留低频或保留少部分低频的方法。但从前人处理的经验看，效果还有问题，主要是低频分量不够，图象效果差，因此有时把传递函数 G 加上一个常数以保留一部分低频，并且在整个滤波结束后再作灰度调整处理，以提高影象的质量。

五、高斯滤波器

这是在频率域的高斯形态高通滤波器，它的一般形式为

$$G(u,v)=Ae^{(D-D_0)^2/B} \tag{3.65}$$

A，B 为规定的参数，其在频率域的剖面形状如图 3.26 所示。由于保留部分低频及高低频之间的过渡，在遥感图象增强时常

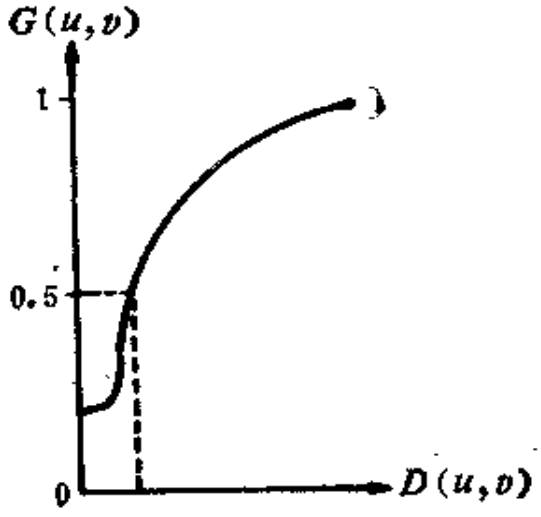


图 3.26 高斯滤波器

用这种方法，但参数选择的经验对于处理结果仍旧是很重要的。

§3.4 其它增强技术

为了提高图象的视觉效果，或者从图象中去掉某些不需要的信息以便突出其它信息，或者有目的的提取某些信息，还可以用一些较为简单的方法来实现。这里主要介绍以下几种：

- 彩色增强
  - 密度分割
  - 假彩色合成
- 多图象算术运算
  - 差值法
  - 比值法
  - 混合运算法

3.4.1 密度分割

上面所介绍的都是单独一个波段一个波段的分别增强处理，处理前后均为黑白图象，图象中的信息差异是以灰度值不同表现出来的。以 8 比特象元图象为例，有 256 层灰度级，但是，人眼睛对灰度级的分辨能力较差，对一般观察者的正常眼睛，只能分辨 20 级左右的灰度级，视觉效果受到影响；为了能使人眼观察到更多的灰度层次，充分发挥计算机的灰度分辨能力，采用对图象上色的办法。因为人眼睛对彩色的分辨能力远远大于对黑白灰度的分辨能力。

对黑白图象按灰度分层给予不同彩色色调和明度的处理，称为伪彩色处理或叫密度分割。

遥感图象产生灰度差异的基础是地面物体对不同波段太阳辐射的反射率不同，因此，找到某波段实地地物反射率差异的特点，按照这种差异设置灰度分层的分割点，如图 3.27 中 a、b、c、d，……每二个相邻的分割点之间属于一层。给予同一编码数值，如 1、2、3，……使灰度分布成为阶梯状，每一种编码数值再赋同一颜色。进行这种处理时，如果计算机系统没有彩色显示，令符号

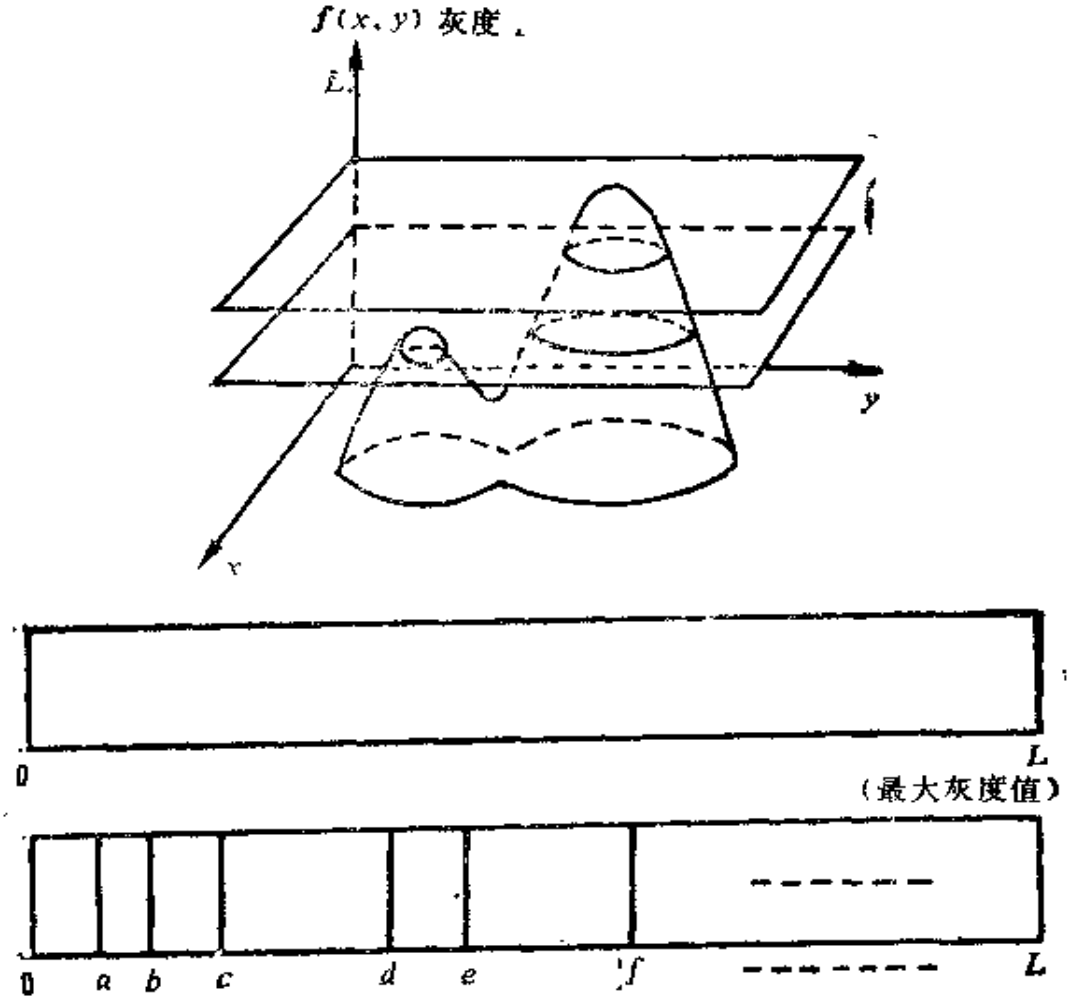


图 3.27　密度分割示意图

与编码一一对应，可以在打印机上用符号打印出密度分割的编码结果；如果有彩色显示系统，则可以显示出各种彩色，直观地表现增强的效果。

密度分割中的彩色是人为加上去的，带有任意性，与原来地物的颜色毫无关系，只和灰度有关，叫做伪彩色。使用了伪彩色后，提高了分辨力，观察者可以看到原来黑白图象上看不清的信息。如果分层方案与地物光谱差异对应较好，可以分出地物的类别。例如在红外波段，水体的吸收很强，在图象上表现接近黑色，这时取低灰度作为分割点，可以分离出水体；而砂地反射率高，取较高灰

度作为分割点，可以从亮区彩色分离出砂地等等。只要摸清地物的光谱规律，就可以得到较好的密度分割图象。

3.4.2 假彩色*合成

通过彩色实现图象增强还可以利用三个多光谱波段合成的方法。在合成时，一个波段赋予红色，一个波段赋予绿色，第三个波段赋予蓝色，利用红、绿、蓝三原色光合成原理形成彩色图象显示于屏幕（见图 3.28）。三个波段的选择可根据增强的目的人为决定，不必考虑原来波段所代表的颜色，这样合成后的彩色图象一般不是原来地物的真实颜色，所以叫做假彩色合成。

MSS 影象没有蓝色波段，三个波段合成后均为假彩色，TM 影象有蓝色波段 TM1、绿色波段 TM2，红色波段 TM3，将波段 3，2，1 分别赋予红、绿、蓝三色可以得到近似的真彩色图象。因为赋予的颜色与原波段所代表颜色相同，由于这种图象类似于彩色照像，在多光谱图象分析判读时很少使用。实际应用中，对于 MSS 通常是波段 4、2、1 合成，即第 4 波段赋予红色，第 2 波段赋

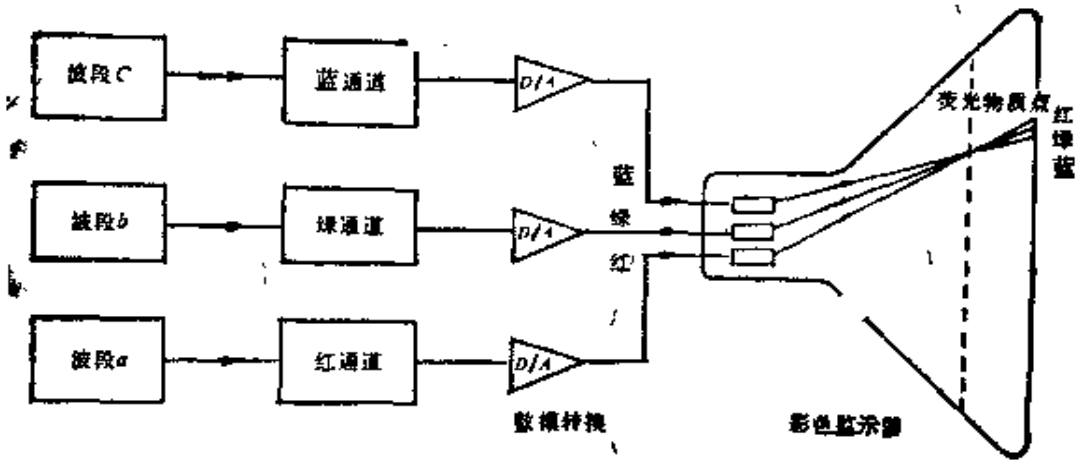


图 3.28 图象彩色合成示意图

予绿色，第 1 波段赋予蓝色，这样形成的假彩色图象叫标准假彩色

* 注：伪彩色和假彩色的区别是来自英文 "Pseudo color" 和 "False color"。中文意义差别不大，但实际方法完全不同。

合成影象。类似地，对于 TM 则是选择与 MSS 对应的近红外、红、绿波段，即 4、3、2 三个波段分别赋予红、绿、蓝颜色合成而得。

为了使彩色影象突出某一方面的信息或显示较丰富的信息，常需选用最佳合成方案。现以 TM 影象为例说明[41]，由于 TM 波段数多，反映地物光谱特性也较丰富，有可能选取更能突出地物特性的波段。比如选用 4 幅 TM 数字图象实验，发现：(1)各波段之间具有一定的相关性，从而造成信息的不独立。TM2 和 TM3 之间，TM5 和 TM7 之间相关性最强，TM4 和 TM6 之间相关性最弱；(2) 直方图分析，由于实验地区地物类型包括山区、平原、海岸带等，通过直方图的级数分析信息量的多少，得到 TM5 亮度值级数最多，因而信息量最大；而 TM2 正好相反，信息量最少。(3) 根据希望突出的地物类型，组合形式最好不同，因而得到以下三种合成方案：

TM4、5、3 彩色合成，即依次赋于红、绿、蓝颜色。这个方案亮度级数多，相关性少，有时优于标准 4、3、2 彩色合成，可以突出水体、城乡、山区、平原及线性特征等。图象中水体为蓝色，城乡色调偏暗，地物类型信息丰富。许多人认为这个合成方案最优。

TM4、5、7 彩色合成，可以突出平原区某些植物和地面高温点，这时农田和林地显示效果较好。

TM5、3、1 彩色合成，可以突出海岸带水下滩槽、礁石、潮间带、盐田等，由于加了 TM1 还可用于水道测量、污染观测及海岛调查等。

实际工作中可选用的合成方案还很多，可根据不同的应用目的在实验中分析寻找。例如有文章认为在大宗作物面积监测中以 TM2、3、4，TM3、4、5，TM2、4、7 三种组合方案最佳等等[42]。

3.4.3 差值法

两幅单波段的图象，在完成空间配准后作差值运算，可以达到某种增强的效果。差值运算就是两幅同样大小的图象对应象元的

灰度值相减。相减后的象元值有可能出现负值，找到绝对值最大的负值$-b$，将每个象元的值加上这个绝对值 b，使所有的值成为零或正值，以便显示器可以显示图象。如果得到的值超出了设备允许的动态范围，例如：动态范围为 0～255，而求得的值变正后大于 255，则需乘一正数系数 a，保证数据在设备的动态范围之内。设差值运算后的图象为 $f_D(x, y)$，两幅图象为 $f_1(x, y)$ 与 $f_2(x, y)$，则：

$$f_D(x,y) = a\{[f_1(x,y) - f_2(x,y)] + b\} \qquad (3.66)$$

处理后的图象如显示效果不好，可以作进一步辐射增强以加强视觉效果。

差值运算的目的主要有：

(1) 根据光谱差异分出某些类别

若同时相两个不同波段的图象是完全配准了的，同时都完成了辐射校正，可以认为，对应象元的差值反映了同一地物光谱反射率的差异。以图 3.29 为例，观察几种地物的光谱曲线，假定用

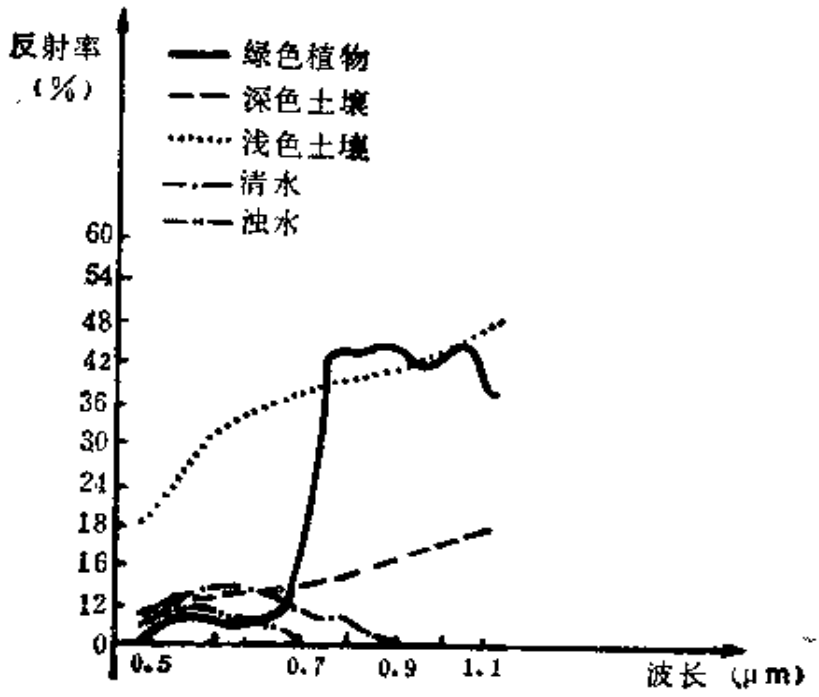


图 3.29　几种反射光谱曲线

MSS 分析，那么在第 4 波段（0.8～1.1μm），植被和浅色土壤反射率接近，无法从图象上分开，而在第 1 和 2 波段，植被又和深色土壤以及水反射率接近无法分开，这时作差值运算（MSS4—MSS2），由于植被光谱曲线，这个差值最大，其它土壤和水的反射率在这二个波段差异较小，因此在差值图象上植被的亮度将明显大于其它四种，从而很容易找到植被分布的区域位置和面积。当然，如果图象上还有其它地物，需放在一起分析以决定差值的方案。

（2）确定一段时间内的变化

同一地区不同时相的影象，经过配准后相减，可以找到某地的明显变化。例如森林火灾发生前后的变化，火灾发生前森林的位置，在另一幅不同时相的影象上不见了，出现另一种灰度值，经过相减可以通过高亮度找到明显变化的位置，由于其它地区变化不大，特别是对于不同年份同一季节的图象，变化甚微，因而突出了火灾区。如使用彩色，效果会更好。有时，也可以用二幅彩色合成图象对应波段相减，得到突出变化的新彩色图象。

（3）边缘增强

为了突出图象中的边缘，可以将一幅图象移动一行和一列，然后与原图象对齐相减，相当于在行和列的方向上求差分，以达到增强的目的。

3.4.4 比值法

比值法是两个不同波段的影象，经过配准后象元值对应相除的运算（须保证除数不为 0），相除以后会出现小数，可以乘以系数并取整，调整到显示设备允许的动态范围内，设 $f_R(x, y)$ 为比值影象则

$$f_R(x,y) = INT\left[a\frac{f_1(x,y)}{f_2(x,y)}\right] \tag{3.67}$$

INT 为取整，同 Integer。为加强视觉效果，还可以进一步利用辐射增强技术，如对数变换等。有时，比值后会增强图象中原有的某

些噪声，处理时须注意。

比值法可以解决的问题主要有：

(1) 去掉地形影响

遥感影象生成时，由于地形起伏以及太阳斜射地面，使得向阳面和阴影处辐射量有很大不同，特别是山区，阴影面积很大，这样就会产生同一地物(例如植被)，反射能量有很大不同，在影象上形成亮度差异，这给影象的判读解译造成了困难，更给今后的计算机分类工作造成困难。因此地形影响的消除常常成为计算机进一步处理和分类必不可少的预处理步骤。

现用公式解释比值法去掉地形影响的原因：

在理论上需作如下假定：地球表面属于朗伯体表面且地物反射规律服从点光源照射到朗伯体表面的数学模式；当辐射通过大气层时不同波段的辐射传播函数成比例，即不同波段的辐射通量值成比例。这时，影象成象时接收的辐射可以看成直射地面辐射的反射部分、漫散射光和大气雾霾的散射光三部分合成。参考式(2.2)，简化公式，可做如下讨论。

对于太阳直射地面的象元部分，有式：

$$G_d(x,y,b) = R(x,y,b)\cdot I(b)\cos\theta(x,y) + R(x,y,b)\cdot D(b) + L_p(b) \quad (3.68)$$

其中：G_d：图象中象元的亮度值

x 和 y：象元坐标

b：影象波段

R：地物反射率

I：太阳照射地面的辐射通量

θ：太阳光线的入射角，与地形和位置有关，记作 $\theta(x,y)$

D：散射光漫入射产生的辐射通量

L_p：大气程辐射度

式(3.68)中的三项对应于(2.2)式的三项，忽略系数 $\frac{T^{\phi}}{\pi}$，I 与

$E_s T_\theta$ 相关，D 与 E_D 相关，突出了位置 (x, y) 及波段 b 的影响。首先，校正程辐射度 L_p 的影响（见 2.1.2），设去掉 L_p 后的亮度为 G'_d

$$G'_d = G_d - L_p \tag{3.69}$$

然后，波段 b_1 与波段 b_2 相比，得到亮度比值为：

$$\frac{G'_d(x,y,b_1)}{G'_d(x,y,b_2)} = \frac{R(x,y,b_1)[I(b_1)\cos\theta(x,y) + D(b_1)]}{R(x,y,b_2)[I(b_2)\cos\theta(x,y) + D(b_2)]} \tag{3.70}$$

根据所设后一种假设可知：

$$\begin{cases} I(b_1) = aI(b_2) \\ D(b_1) = aD(b_2) \end{cases} \tag{3.71}$$

a 为比例因子，将 (3.71) 代入 (3.70)，得：

$$\frac{G'_d(x,y,b_1)}{G'_d(x,y,b_2)} = \frac{R(x,y,b_1)\cdot a\,[I(b_2)\cos\theta(x,y) + D(b_2)]}{R(x,y,b_2)\;[I(b_2)\cdot\cos\theta(x,y) + D(b_2)]}$$

$$= a\cdot\frac{R(x,y,b_1)}{R(x,y,b_2)} \tag{3.72}$$

对于太阳不能照射的阴影部分，$I = 0$，(3.68) 式成为

$$G_i(x,y,b) = R(x,y,b)\cdot D(b) + L_p(b) \tag{3.73}$$

去掉 L_p 后

$$G'_i(x,y,b) = R(x,y,b)\cdot D(b) \tag{3.74}$$

求比值

$$\frac{G'_i(x,y,b_1)}{G'_i(x,y,b_2)} = \frac{R(x,y,b_1)\cdot D(b_1)}{R(x,y,b_2)\cdot D(b_2)}$$

$$= \frac{R(x,y,b_1)\cdot a\cdot D(b_2)}{R(x,y,b_2)\cdot D(b_2)}$$

$$= a\cdot\frac{R(x,y,b_1)}{R(x,y,b_2)} \tag{3.75}$$

由 (3.72) 和 (3.75) 可以看出，经过初步辐射校正，去掉 L_p 后，再作比值运算，可以去掉地形因子 $\cos\theta$ 的影响，无论是太阳照射的区域还是阴影区域，都毫无例外地只与地物反射率的比值

有关。当然，由于假设只是理想情况下才成立，实际情况很复杂，因此不能认为比值法可以完全去掉地形影响，确切地说是抑制了地形起伏造成的亮度变化。

(2) 提取植被或其它地物信息

利用光谱反射率的差异作比值可以突出影象中植被的特征从而提取植被类别，或估算绿色生物量。通常把能够提取植被的算法称作植被指数。

常用的植被指数有：MSS4/MSS2；TM4/TM3 以及 AVHRR2/AVHRR1 等，通常认为多光谱图象中近红外/红这一比值与植被有定量关系，可以用来估算绿色生物量，这是由于植物叶子细胞结构在近红外的高反射和叶绿素对红光的强吸收，使这个比值很高。甚至在生物量很高时达到饱和，使比值影响在植被区域呈现高亮度，从而提取出植被信息。

为了提取其它地物信息也常用比值，例如 TM5/TM6，可以突出大片白陶土蚀变区域。同时，经过消除植被的影响可有助于半干旱地区的找矿、石油、作土壤图和岩性成图等方面工作。

多光谱图象的信息增强也常常采用混合算术运算来完成，例如近红外与红光波段的差和比常作为植被覆盖较低时的植被指数，即：

$$\text{近红外}-\text{红}/\text{近红外}+\text{红}$$

对于 MSS、TM、AVHRR 均适用。再例如，MSS4-MSS3/MSS2-MSS1 在显示隐伏断裂带方面作用较显。这样的例子很多，许多文章总结了突出某种信息的各种方案和实验成果，在此不再一一例举。

§3.5 多光谱变换

遥感多光谱影象波段多，信息量很大，但数据量也太多。为了不使信息丢失，常常需要进行多波段运算，以致耗费大量机时和占

据大量磁盘空间。§3.4 节中提出的方法简单易行，不失为提取信息的好方法，但许多地物信息的提取组合方案还需要对其物理特性作研究并进行大量实验，在经验的基础上作出直观的选择。

本节提出二种新的多光谱变换的方法，针对多光谱图象各波段之间的相关性，设法减少各种信息之间的冗余度，达到保留主要信息量，降低数据量的目的。同时，通过变换，可以使某些信息增强以至提取出来，也可以为进一步的分类处理作好准备。这二种变换为：(1) Karhunen-Loève 变换，简称 K-L 变换，又叫主成分变换；(2) Kauth-Thomas 变换，简称 K-T 变换，又叫缨帽变换。

3.5.1 多光谱空间

对于遥感多光谱影象中的象元点，为了研究它们的特性和规律，建立一个 n 维坐标系，每一坐标轴代表遥感影象每一波段的灰度值，而每个象元对应于坐标空间中的一个点，这就是多光谱空间。例如：以 TM 波段 4 和波段 3 为例，研究这二个波段，可以建立一个二维直角坐标系，即二维光谱空间，以 X_1 轴代表波段 4，

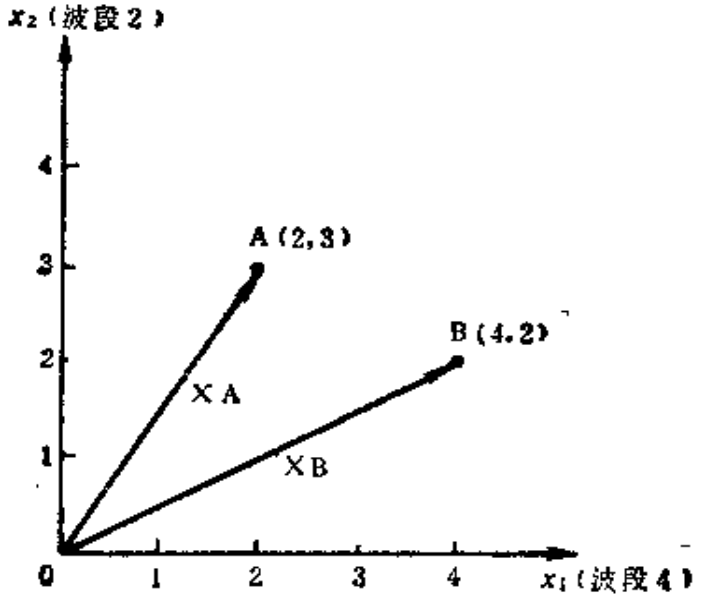


图 3.30 二维光谱空间

以 X_2 轴代表波段2，A 点代表一个象元，它在波段 4 灰度值为 2，在波段 2 灰度值为 3。 B 点代表另一象元，它的灰度值在波段 4 为 4，波段 2 为2(图 3.30)。对于三个波段建立三维光谱空间，可以作三维空间坐标系，若有四个、五个甚至更多波段，则建立四维、五维直到 n 维坐标系，这样三个以上的多维空间将无法用几何图形直观地画在纸上，只有想象这样一个空间，其中坐标轴之间两两垂直，每个象元则是空间中的一个点。

这种空间只表示各波段光谱之间的关系，而不包括任何位置信息，例如，图3.30中我们无法知道点 A 或点 B 在原图象上的行列位置，只知道它在多光谱空间中的位置，可见，这个光谱空间和以前所谈图象空间意义是不同的。

象元点在光谱空间中的位置还可以表示成一个 n 维向量，这个向量由 n 个分量组成，每个分量代表这个点在各坐标轴上的投影（灰度值），如果某点矢量记作 $\mathbf{X}$，则在 $\mathbf{X}$ 空间中矢量

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}$$

在图 3.30 中

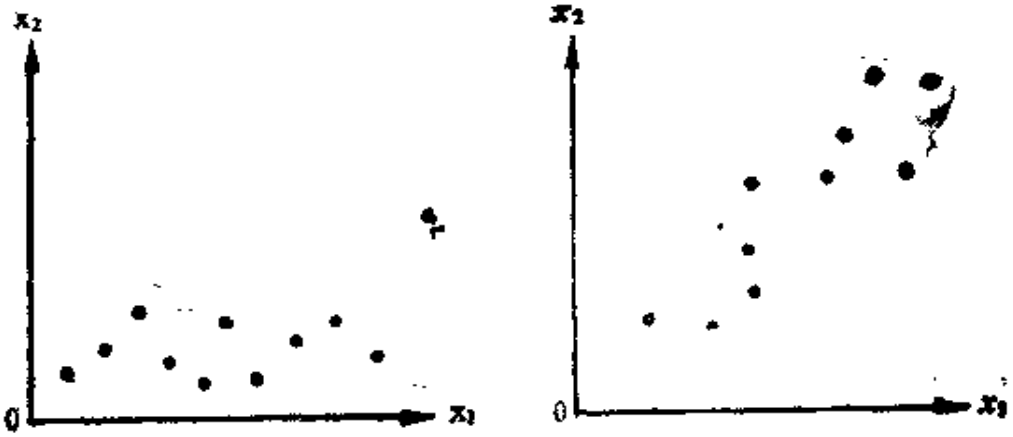
$$\mathbf{X}_A=\begin{bmatrix} x_{A1} \\ x_{A2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{X}_B=\begin{bmatrix} x_{B1} \\ x_{B2} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 4 \\ 2 \end{bmatrix},$$

由于二维和三维空间可以作出几何图形，比较直观。下面的解释和讨论将以二维和三维为主，所得结论都可以推广到任何维数的光谱空间。

3.5.2 *K-L* 变换

一、原理

K-L 变换是离散 Karhunen-Loève 变换的简称，这种变换又叫做主成分变换或霍特林变换（Hotelling）。 变换是对图象实行一个线性变换，导致多光谱空间坐标系的旋转，但这种旋转不是任



（a）不相关　　（b）相关

图 3.31　相关性示意图

意方向而是有一特定方向，为了保证这一特定方向，线性变换时每一矢量必须乘一个特殊矩阵。为了避免大量的数学推导和分析，这里只介绍图象变换的原理，而不多叙述其中的数学理论。

（1）相关性

每一象元点作为一个多维矢量在多光谱空间中占有一个位置。分析所有矢量在空间中的位置，可以发现它们的分量之间的关系，有些分量之间是相关的，有些分量之间是不相关的。现以二维光谱空间为例说明这个问题。见图 3.31，设二个坐标轴为 X_1 和 X_2，这个空间可叫做 X 空间，分析 X 空间中的矢量 X_i，如果这些点大体分布在坐标空间角 X_1OX_2 平分线方向上，那么比较这些点的分量值，当 x_1^i 增大或减少时，x_2^i 也必定增大或减小。我们说对于这些矢量分量 X_1 与 X_2 之间相关性很高，或说 X_1 与 X_2 相互影响，独立性差。相反地，如果这些点大体分布在平行于 X_1 轴或平行于 X_2 轴时，当 x_1^i 增大或减小时，x_2^i 几乎不受什么影响，或当 x_2^i 增大或减少时，x_1^i 几乎不变化，这就是说分量 X_1 与 X_2 之间相关性很小。如果象元点的分布完全沿着其中一个轴，那么这二个分量相关性等于零。对于多维空间问题，可以对各分量中两两分量的相关性分别分析，再作一数学表述，这就需要引

$$
\begin{aligned}
\Sigma_x &= E[(\mathbf{X}-M)(\mathbf{X}-M)^T] \\
&= E\left\{\begin{bmatrix} x_1-m_1 \\ x_2-m_2 \\ \vdots \\ x_n-m_n \end{bmatrix}[(x_1-m_1),(x_2-m_2),\cdots\cdots(x_n-m_n)]\right\} \\
&= E\left\{\begin{bmatrix} (x_1-m_1)(x_1-m_1) & (x_1-m_1)(x_2-m_2)\cdots\cdots(x_1-m_1)(x_n-m_n) \\ (x_2-m_2)(x_1-m_1) & (x_2-m_2)(x_2-m_2)\cdots\cdots(x_2-m_2)(x_n-m_n) \\ \vdots & \\ (x_n-m_n)(x_1-m_1) & (x_n-m_n)(x_2-m_2)\cdots\cdots(x_n-m_n)(x_n-m_n) \end{bmatrix}\right\} \\
&= \begin{Bmatrix} E[(x_1-m_1)(x_1-m_1)] & E[(x_1-m_1)(x_2-m_2)]\cdots\cdots E[(x_1-m_1)(x_n-m_n)] \\ E[(x_2-m_2)(x_1-m_1)] & E[(x_2-m_2)(x_2-m_2)]\cdots\cdots E[(x_2-m_2)(x_n-m_n)] \\ \vdots & \\ E[(x_n-m_n)(x_1-m_1)] & E[(x_n-m_n)(x_2-m_2)]\cdots\cdots E[(x_n-m_n)(x_n-m_n)] \end{Bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2\cdots\cdots\sigma_{1n}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2\cdots\cdots\sigma_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2\cdots\cdots\sigma_{nn}^2 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.76}
$$

人协方差矩阵。定义 $\mathbf{X}$ 空间所有矢量的协方差矩阵（见 124 页）

这个矩阵中每一元素

$$\sigma_{ij}^2 = E[(x_i - m_i)(x_j - m_j)]$$

$$= \frac{1}{K-1}\sum_{l=1}^{K}(x_i^l - m_i)(x_j^l - m_j) \quad i,j = 1,2\cdots n \tag{3.77}$$

$$m_i = E[x_i] = \frac{1}{K}\sum_{l=1}^{K} x_i^l \tag{3.78}$$

其中，x_i^l 为第 i 波段第 l 个象元的亮度值，x_j^l 为第 j 波段第 l 个象元的亮度值，K 为总象元数，m_i 和 m_j 分别为第 i 和第 j 波段象元亮度的平均值，T 表示矩阵的转置。矩阵中对角元素就是 $\mathbf{X}$ 空间中各分量的方差，非对角元素是空间中两个分量 x_i 和 x_j 之间的协方差，式 (3.76) 可以看出协方差矩阵是对称矩阵。

在协方差矩阵中的非对角元素即两分量的协方差 $\sigma_{ij}^2(i \neq j)$ 可以反映出两个分量间的相关性，这个数值与对角元素之比越大说明相关性越大。如果两分量之间相关性很小如图 3.31(a) 的情况，各点在坐标空间中分布与某一坐标轴接近平行，对另一坐标轴而言将分布在较窄的范围内，也就是说这个轴各点的坐标分量与均值分量接近，差值趋于零，因此由乘积所求出来的协方差也接近于零。这种两两分量之间的相关性可以用一个相关矩阵表示

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & & & \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

对角线元素都是 1，表示自相关。其它元素是互相关系数

$$r_{ij} = \frac{\sigma_{ij}^2}{\sigma_{ii}\sigma_{jj}} \qquad (i \neq j) \tag{3.79}$$

这里 $|r_{ij}| \leqslant 1$，从式中可以看出相关系数与协方差有密切关系，

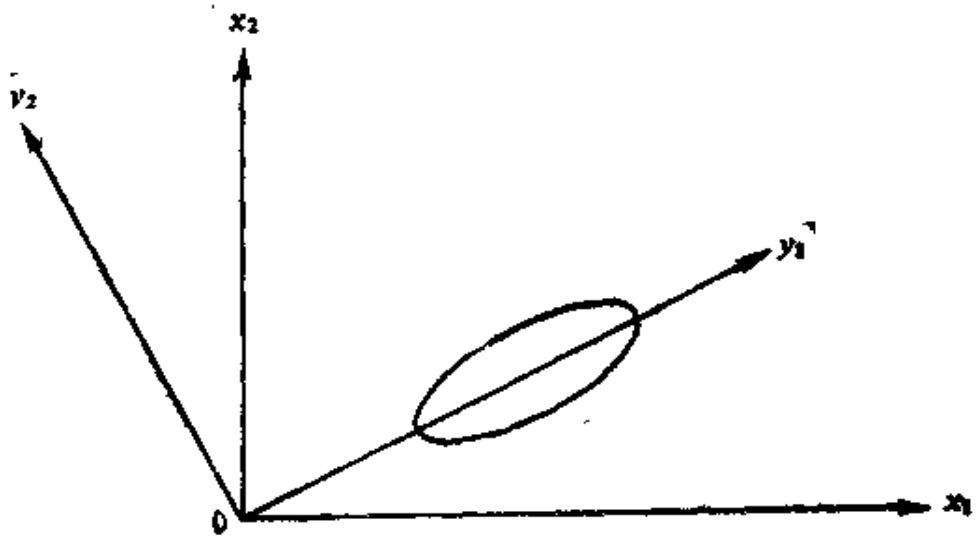


图 3.32　坐标旋转示意图

如果两个分量无相关性，一定 $\sigma_{ij}^2 = 0$，因为这时 $r_{ij} = 0$。可见，如果在多光谱空间内，各分量之间均不相关，那么，在 X 空间各矢量的协方差矩阵一定是一个对角阵

$$\Sigma_x = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & & \sigma_{nn}^2 \end{bmatrix} \tag{3.80}$$

（2）空间变换

令多光谱空间进行一旋转变换，由 X 空间变为 Y 空间，旋转是绕原点进行的。现以二维空间为例说明，假定所有象元在 X 空间的分布类似椭圆形态。从图 3.32 可以看出，x_1 与 x_2 两个分量对于这些象元是高度相关的。现建立新的坐标系 y_1oy_2，即 Y 空间，使同样的象元分布在 Y 空间内表现为 y_1 与 y_2 分量互不相关，也就是 Y 空间的协方差矩阵是对角阵。从几何意义上看，y_1o 轴必须穿过椭圆的长轴。这样的旋转变换在数学原理上是用一矩阵 A 乘以每个 X 空间的矢量实现一线性变换得到，

$$\mathbf{Y} = A\mathbf{X} \tag{3.81}$$

按照定义，Y 空间所有象元矢量的协方差矩阵

$$\Sigma_y = E[(Y - M_y)(Y - M_y)^T] \tag{3.82}$$

其中 M_y 为各矢量在 Y 空间的均值向量，A 为常数矩阵，可以从期望运算中提出，即

$$M_y = E[Y] = E[AX] = AE[X] = AM_x \tag{3.83}$$

M_x 为各矢量在 X 空间的均值向量。所以由 (3.81) (3.82) 和 (3.83) 得

$$\Sigma_y = E[(AX - AM_x)(AX - AM_x)^T]$$

根据 $[AX]^T = X^T \cdot A^T$

$$\Sigma_y = A \cdot E[(X - M_x)(X - M_x)^T]A^T$$

$$= A \cdot \Sigma_x \cdot A^T \tag{3.84}$$

为了达到旋转变换的目的，由前面分析可知，必须使 Y 空间的协方差矩阵是对角阵。根据数学中矩阵对角化的原理，只要使矩阵 A 是 X 空间协方差矩阵 Σ_x 的特征向量矩阵的转置矩阵，一定能得到 Σ_y 是对角矩阵，而且这个矩阵的对角元素是 Σ_x 的特征值组成。

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{3.85}$$

特征向量矩阵 Φ 是一个 $n \times n$ 的矩阵，由 n 个特征向量组成，对应于每一个 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots \lambda_n$。

$$\Phi = [\varphi_1 \varphi_2 \cdots \varphi_n]$$

$$= \begin{bmatrix} \varphi_{11} \varphi_{21} \cdots \varphi_{n1} \\ \varphi_{12} \varphi_{22} \cdots \varphi_{n2} \\ \vdots \quad \vdots \\ \varphi_{1n} \varphi_{2n} \cdots \varphi_{nn} \end{bmatrix}$$

这里每一个特征向量

$$\varphi_1 = \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{12} \\ \vdots \\ \varphi_{1n} \end{bmatrix}, \quad \varphi_2 = \begin{bmatrix} \varphi_{21} \\ \varphi_{22} \\ \vdots \\ \varphi_{2n} \end{bmatrix}, \quad \cdots \quad \varphi_n = \begin{bmatrix} \varphi_{n1} \\ \varphi_{n2} \\ \vdots \\ \varphi_{nn} \end{bmatrix}.$$

相应于两个不同实数特征值的特征向量是正交的，这样，旋转变换的变换矩阵：

$$A = \Phi^T = \begin{bmatrix} \varphi_{11} \varphi_{12} \cdots \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} \varphi_{22} \cdots \varphi_{2n} \\ \cdots\cdots \\ \varphi_{n1} \varphi_{n2} \quad \varphi_{nn} \end{bmatrix} \tag{3.86}$$

只要找到了矩阵 A，就可以利用式（3.81）求出每个象元对应的 Y 空间的每一分量，从而完成这一线性变换，这个变换就是 K-L 变换。

（3）K-L 变换分析

由前面的分析和数学原理可知：

利用矩阵 A 所做的线性变换，对于新的坐标空间，协方差矩阵 Σ_y 实现了对角化，因而象元在 Y 空间的两两分量之间互不相关。

经过特征矢量矩阵的转置矩阵作为变换矩阵变换后，新的坐标轴正是沿着数据分布的主要分量的方向，这就是特征矢量的方向，如图 3.33 对于二维空间如果数据分布是一椭圆，那么特征矢量正好位置椭圆的两个轴上。若特征值的排列经过调整 $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_n$ 由大到小排列，那么 ϕ_1 一定在半长轴方向，ϕ_2 一定在半短轴方向。如果是多维的，则轴长一定依次递减。均值 M_x 在椭圆(或椭球)的中心。

特征值正是变换后新坐标的方差值，所以椭球的半轴，由大到小刚好等于 $\sqrt{\lambda_1}$，$\sqrt{\lambda_2}$，$\cdots$ $\sqrt{\lambda_n}$。特征值的大小可以反映这一

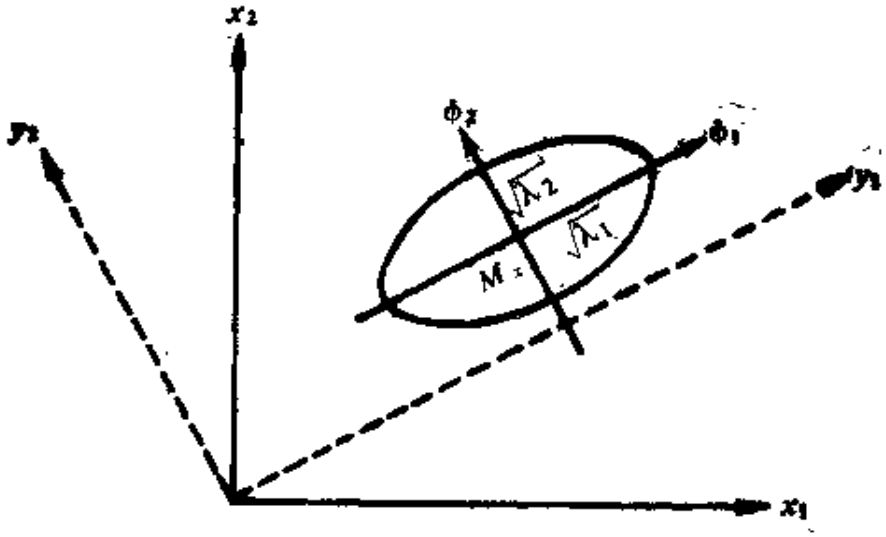


图 3.33　特征值和特征向量

方向上主分量所具有信息量的多少，也指明了每个分量的相对重要性。事实上，第一主分量方向 λ_1 很大，常常占全部特征值的百分之八十以上，因此第一主分量包括了全部信息量的大部分。以后，第二主分量、第三主分量所含信息量依次减少。到 λ_n 几乎等于零。因此所含信息也几乎等于零。由于 K-L 变换对不相关的噪声没有影响，所以当信息减少时，便突出了噪声，最后的分量几乎全是噪声信息。

在遥感图象中，四波段 MSS，或七波段 TM 等图象，经过主分量的变换，①多光谱空间变成了新的主分量空间，虽然失去了原有的光谱意义，但可以只取第一，前二或前三主分量，既包含了绝大多数地物信息，又减少了数据量。以 TM 为例，如只取前三个主分量，波段数减少，使数据量减少到43%，实现了数据压缩，减少贮存空间；②由于在这些主分量中，噪声相对减少，突出了主要信息，达到了增强图象的目的。如将主分量图象再次增强处理并作假彩色合成其增强效果更佳；③在以后进行的分类处理中也可以用这种变换进行特征选择，既减少了维数又可得到更佳的分类效果。此外，在遥感数据传输中还有其它作用，不再赘述。

二、实例说明

遥感多光谱图象实行 K-L 变换的步骤如下：

(1) 计算被研究的一组象元，可以是整幅图象也可以是感兴趣的一个区域内，它的均值向量 M_x(3.78) 和协方差矩阵 (3.76, 3.77)。

(2) 求出协方差矩阵 $\sum_x$ 的特征值和对应的特征向量，由式

$$|\sum_x - \lambda I| = 0 \tag{3.87}$$

I 为单位矩阵，解这个行列式可求出解 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots \lambda_n$。按从大到小顺序排列，$n$ 为多光谱图象的波段数。再针对每一个特征值求出对应特征向量。对应 λ_i，特征向量 φ_i，解 n 个方程组

$$[\sum_x - \lambda_i I] \cdot \varphi_i = 0 \quad i = 1, 2, \cdots n; \quad \varphi_i = \begin{bmatrix} \varphi_{i1} \\ \varphi_{i2} \\ \vdots \\ \varphi_{in} \end{bmatrix} \tag{3.88}$$

(3) 根据式 (3.86) 和 (3.81) 作 K-L 变换，把原多光谱图象中的每一个象元矢量 $\mathbf{X}$ 变换成新象元矢量 $\mathbf{Y}$，$\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \cdots y_n]^T$

(4) 根据需要选择其中三个分量，用空间域增强技术增强每一分量图象的对比度，最后用彩色合成方法形成假彩色显示图象；也可以只取一个成二个分量。

(5) 将所得黑白或彩色图象进行判读解译或作进一步分类处理等。

现以一个 2 × 2 的二波段图象为例说明，见图 3.34，最大灰度值为 4，四个象元点坐标列于图上。

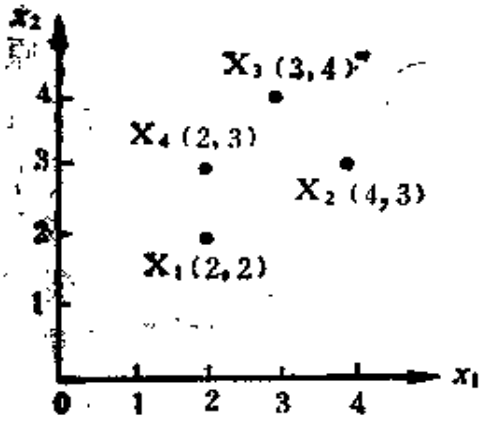


图 3.34 实例图

由式(3.78)求出每一均值分量

$$m_1 = (2 + 4 + 3 + 2)/4 = 2.75,\ m_2 = 3$$

由式(3.76)(3.77)求出 Σ_x，列于表3.6。由式(3.87)可求出特征值，式

$$\begin{vmatrix} 0.92 - \lambda & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

得

$$\lambda^2 - 1.59\lambda + 0.51 = 0$$

$$\lambda_1 = 1.14,\ \lambda_2 = 0.45$$

表3.6 计算协方差矩阵

象元号	$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$	$X - M = \begin{bmatrix} x_1 - m_1 \\ x_2 - m_2 \end{bmatrix}$	$(X - M) \cdot (X - M)^T$
1	$\begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.75 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.56 & 0.75 \\ 0.75 & 1 \end{bmatrix}$
2	$\begin{bmatrix} 4 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.25 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.56 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
3	$\begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.25 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.06 & 0.25 \\ 0.25 & 1 \end{bmatrix}$
4	$\begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.75 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.56 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
			$\Sigma_x = \begin{bmatrix} 0.92 & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 \end{bmatrix}$

则

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} 1.14 & 0 \\ 0 & 0.45 \end{bmatrix},$$

由式(3.88)，先计算对应 λ_1 的特征向量 φ_1：

$$\begin{bmatrix} 0.92 - 1.14 & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 - 1.14 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{12} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{cases} -0.22\varphi_{11} + 0.33\varphi_{12} = 0 \\ 0.33\varphi_{11} - 0.47\varphi_{12} = 0 \end{cases}$$

由于矩阵 Φ 为正交阵，$\Phi^{-1}=\Phi^T$，于是将特征向量归一化有

$$\begin{cases}\varphi_{11}=1.27\varphi_{12}\\ \varphi_{11}^2+\varphi_{12}^2=1\end{cases}$$

解得

$$\varphi_1=\begin{bmatrix}0.79\\0.62\end{bmatrix}$$

用同样方法解出

$$\varphi_2=\begin{bmatrix}-0.62\\0.78\end{bmatrix}$$

所以

$$A=\Phi^T=\begin{bmatrix}0.79 & -0.62\\0.62 & 0.78\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.79 & 0.62\\-0.62 & 0.78\end{bmatrix}$$

最后，由式(3.81)可以计算出 Y

$$\begin{bmatrix}y_1\\y_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.79 & 0.62\\-0.62 & 0.78\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix}$$

得

$$Y_1=\begin{bmatrix}2.82\\0.32\end{bmatrix},\quad Y_2=\begin{bmatrix}5.02\\-0.14\end{bmatrix},\quad Y_3=\begin{bmatrix}4.85\\1.26\end{bmatrix},$$

$$Y_4=\begin{bmatrix}3.44\\1.1\end{bmatrix}$$

各点的 Y 坐标位置画于图 3.35。比较原来的 X 坐标，第一主分量 y_1 接近 x 空间的对角线位置。由于特征值 $\lambda_1\gg\lambda_2$，这个分量代表了图象的主要信息。从图中可以看出，坐标旋转后原来象元间的欧几里德距离不变，这也是 K-L 变换的性质。由于象元的 Y 坐标与原 X 坐标值完全不同，它仍代表图象的亮度值，但已完全不含有原来的光谱特性和波段间的光谱关系，在判读新图象时需要重新建立解译标准，摸清规律。另外，由于变换后 Y 分量可能出现负值，为了显示图象，还需加上一个常数，使所有的亮度值为正。

3.5.3 Kauth-Thomas 缨帽变换

上面所述主成分变换是线性变换的一种。1976 年，Kauth 和

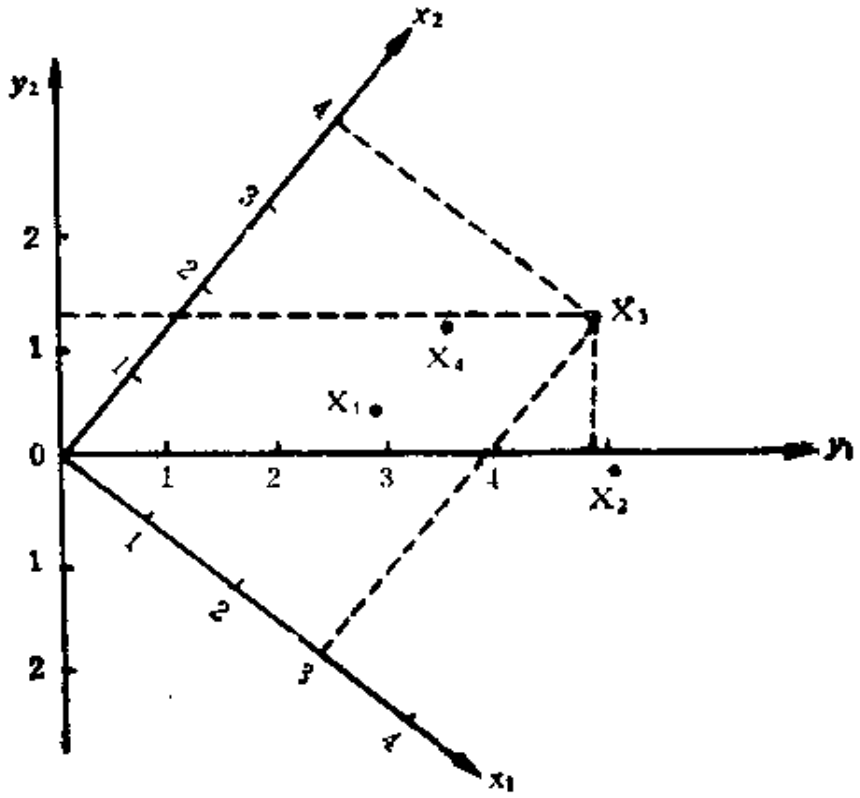


图 3.35　变换前后坐标的变化

Thomas 发现了另一种线性变换，使坐标空间发生旋转，但旋转后的坐标轴不是指向主成分的方向，而是指向另外的方向，这些方向与地面景物有密切的关系，特别是和植物生长及土壤有关。这种变换既可以实现信息压缩，又可以帮助解译分析农业特征，因此有很大的实际应用意义。

一、原理

目前对这个变换的研究主要集中在 MSS 与 TM 两种遥感数据的应用分析。在此先以 MSS 为例介绍，然后再推广到 TM 数据，对于其它数据来源，还可进一步研究。

Kauth-Thomas 变换，简称 K-T 变换，又有所谓"缨帽变换"的形象称呼，这种变换着眼点在于农作物生长过程而区别于其它植被覆盖，力争抓住地面景物在多光谱空间中的特征。

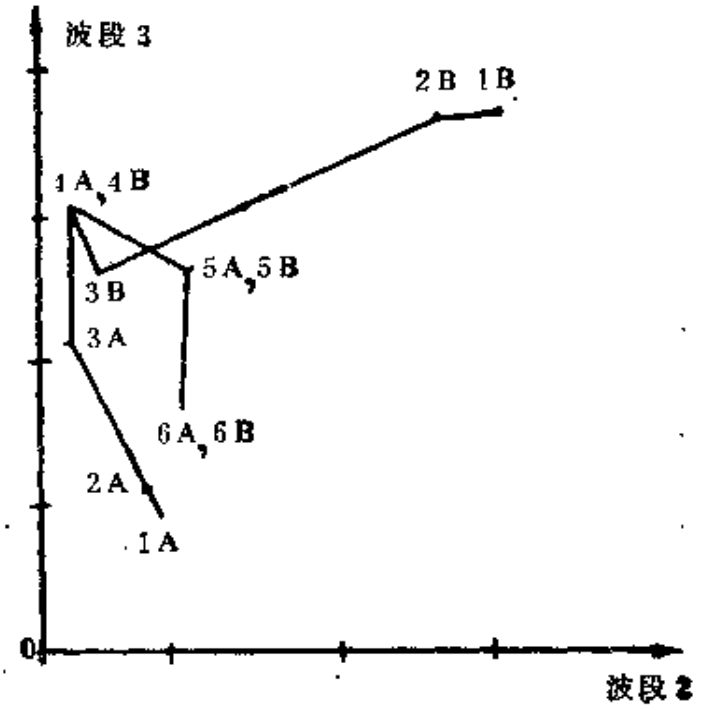


图 3.36 小麦生长线实例

A. 暗土 B. 亮土

1.裸土 2.发芽 3.生长期 4.成熟期 5.变黄期 6.衰老期

(1) MSS 数据

首先研究 MSS 数据[70]，以 MSS2 和 MSS3 为例，选择二种不同的土壤样本，一种深色土壤，光谱特性是暗的，另一种浅色土壤是亮的。将这二种不同土壤上种植的小麦，选择不同的生长期，把这些象元放在 2 维光谱空间相应的位置上，于是形成了二条农作物小麦的生命发展线，构成一个三角形的形状(图 3.36)，从暗土生长线可以看出，由于叶绿素在植物生长过程中增加，覆盖度加大，土壤较暗，表现为第 3 波段亮度加大而第 2 波段亮度减少，这正符合 3.4.4 中分析的植被指数问题，近红外反射强而红光反射低的规律。到了 4 的位置便是绿色小麦生长的顶峰，小麦光谱占上风，土壤被覆盖，因此，$4A$ 和 $4B$ 交合到一点。然后一起变黄和衰老。

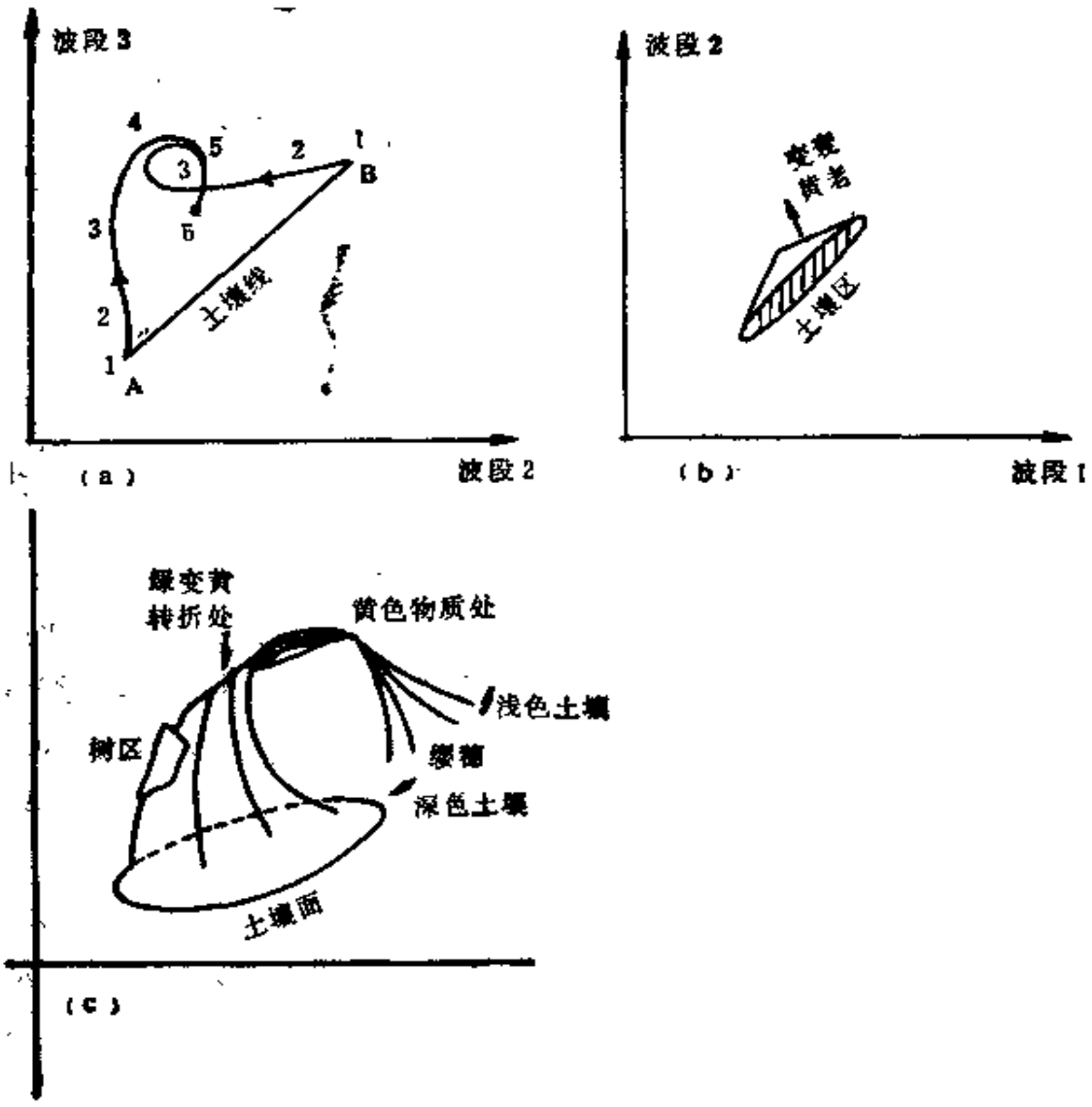


图 3.37 绿帽的分析

(图中 A，B，1～6 含义同图 3.36)

将这个例子推广，对于一般农作物生长过程见图 3.37。首先，选择第 2 波段和第 3 波段的子空间(图中 a)，当植物还没发芽，各种裸露的土壤，由深色土壤逐步过渡到浅色土壤形成一条土壤线，由土壤线各点作起始点都能勾绘出一条农作物的生长线。图中只画出了最深和最浅的两点起始的生长线。1 处时为裸土，此时只反

映了土壤本身的光谱特性，2 处为农作物破土出露，随着农作物生长，植被覆盖面也越来越大；与此同时，由于太阳光在偏东方入射，使得植物阴影的影响增加，象元光谱成为作物、阴影及土壤的综合效应的反映。这时，对于深色土壤，阴影影响不大，所以随着作物覆盖的增加，波段 3 绿色植物近红外的反射急骤增大，生长线上升；对于浅色土壤，阴影影响较大，减少了原象元中高亮度的土壤光谱影响。所以尽管绿色作物近红外光谱反射随着覆盖的增加而增加其影响，但综合效应并没使这条生长线升高。直到农作物成熟期的到来，即图中标号 4 处，绿色覆盖达到高峰，几乎不能得到土壤的信息，也没有明显的阴影区，两条生长线便合为一点，不再有区别。可以推理，其它土壤类型的生长线也必定到达这里，汇合后一起运动再继续发展，便是农作物的成熟变黄，生长线向回折返，离开绿色生物量点，经过标号 5 处光谱特性继续变化，直到衰老死亡到达标号 6 处。待农作物全部收获完毕，地面状态恢复，从标号 6 处应该各自回到土壤线上的起点位置，深色土壤 $1A$ 处或浅色土壤 $1B$ 等等。

这种发展变化的过程如果表示在波段 1 和波段 2 所构成的子光谱空间，则形态发生变化，土壤线变成了土壤区域，而且作物从生长到成熟前的过程也发生在同一区内，只有变黄以后才离开这个区向外发展，见图中 b。

把土壤和农作物生长过程在 MSS2-MSS3和 MSS1-MSS2 二个平面的投影综合并画到三维空间，便形成图中 c 所描绘的形态。这里土壤反射光谱形成土壤面，农作物则从土壤面开始生长，几乎沿着垂直于土壤面的方向沿不同路线，形成绿色植物区，到交汇处开始折返，并会聚于黄色植物区。最后又应回到它原来出发的土壤面起点处。这一三维立体形态看起来很像一顶带着缨穗的帽子，衰老处象一束缨子，土壤面就象帽口，由这一外观的想像形成了另一个名子"缨帽变换"。帽子的前部有一特殊的树区，这是由

于树冠的光谱特性决定的。

缨帽在三维空间的位置不是完全不变的，首先在生长过程中，由于作物种植的密度和叶子覆盖的多寡影响阴影的大小，从而路径有所不同；另外大气中的雾霾、水蒸气、云层等都不同程度地影响缨帽，造成土壤面的位移和旋转以及整体形态的变化；不同地区的资料以及不同的农作物也会产生差异。但无论怎样不同，缨帽形态的规律是相同的。

为了最大限度地观察这种规律，并用规律指导分析和进行土壤或农作物的判断，必须对坐标空间作一变换使坐标系实现平移和旋转。通俗地说，变换后我们能够看到缨帽的最大剖面，而不是只看到某一方向或某平面上的较小投影。因此，这一变换是线性变换。变换后新的坐标轴将代表明确的景观意义，可以与地物直接联系。变换公式为：

$$\mathbf{U} = R_1\mathbf{X} + r \tag{3.89}$$

式中 $\mathbf{X}$ 为象元的矢量表示，$\mathbf{U}$ 为变换后新空间的象元矢量，其各分量表示变换后每一通道的象元亮度值。r 为避免出现负值而加的常数。R_1 为一变换矩阵，行与行之间相互正交，可以取

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.433 & 0.632 & 0.586 & 0.264 \\ -0.290 & -0.562 & 0.600 & 0.491 \\ -0.829 & 0.522 & -0.039 & 0.194 \\ 0.223 & 0.012 & -0.543 & 0.810 \end{bmatrix}^*$$

变换后 $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix}$，四个分量多数有明确地物理意义。$u_1$ 叫亮度分量，主要反映了土壤信息，是土壤反射率的变化的方向；u_2

* 严格地说，在不同条件下，由于缨帽整体形态的变化，变换矩阵系数也应作相应的调整。

叫绿色物质分量；u_3 叫黄色物质分量，它们分别反映了植物的绿度和黄度，黄度说明了植物的枯萎程度；只有最后一个分量没有什么意义，在几何坐标中是一个无意义轴（non-such）。这几个分量都互相垂直。K-T 变换在实际应用时舍掉第四个分量，只取三个。在新的空间里数据结构更加清楚，分布面加大，而且数据量受到压缩，还可以从中研究大气散射等物理影响。因此，这种变换有很大实际意义。

（2）TM 数据

近年来，研究由 MSS 数据转向 TM 数据。1984 年，Crist 和 Cicone[71] 提出了利用 TM 数据作 K-T 变换的变换矩阵，仍采用公式（3.89）将 R_1 改为 R_2，这时 $\mathbf{U}=R_2\mathbf{X}+r$

$$R_2=\begin{bmatrix} 0.3037 & 0.2793 & 0.4743 & 0.5585 & 0.5082 & 0.1863 \\ -0.2848 & -0.2435 & -0.5436 & 0.7243 & 0.0840 & -0.1800 \\ 0.1509 & 0.1973 & 0.3273 & 0.3406 & -0.7112 & -0.4573 \\ -0.8242 & -0.0849 & 0.4392 & -0.0580 & 0.2012 & -0.2768 \\ -0.3280 & -0.0549 & 0.1075 & 0.1855 & -0.4357 & 0.8085 \\ 0.1084 & -0.9022 & 0.4120 & 0.0573 & -0.0251 & 0.0238 \end{bmatrix}$$

对应的 $\mathbf{X}=(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6)^T$ 是 TM 波段 1，2，3，4，5，7，的值变换后 $\mathbf{U}=(u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6)^T$，这六个新的分量中前三个分量与地面景物有明确的关系，u_1 为亮度，u_2 为绿度，而 u_3 与 MSS 不同，定义为湿度；其它三个分量 u_4，u_5，u_6 还没发现与景物的明确关系，没有定义。这样，很容易将 TM 的六个波段——1，2，3，4，5，7，经过 K-T 变换压缩成三个分量(或波段)。

分析前三个分量的实际物理意义：

亮度，实际是 TM 六个波段的加权和，反映了总体的反射值。由于中红外波段的影响，TM 的亮度值与 MSS 的亮度值不完全相等，但两者有很大的相关性。因此，TM 亮度不等于土壤变化的主要方向，这一点与 MSS 数据不同；

绿度，TM 绿度与 MSS 的绿色物质分量很相近，甚至几乎

相同。因为从变换矩阵 R_2 中第二行系数看，较长的红外波段 5 和 7 有很大抵削，剩下是近红外与可见光部分的差值，反映了绿色生物量的特征。用亮度和绿度二分量组成的二维平面可叫做“植被视面”。

湿度，与 MSS 相比，这个分量定义了一个完全不同的特征，从变换矩阵第三行分析可知，这个分量反映了可见光与近红外(1—4 波段)与较长的红外(5.7 波段)的差值。定义为湿度的根据是 5.7 两个波段对土壤湿度与植物湿度最为敏感。湿度和亮度二分量组成的二维平面可定义为“土壤视面”。

湿度与绿度组成的第三个面称为“过渡区视面”。这样的三维空间就是 TM 数据进行 K-T 变换后的新空间，可以在这样一个空间，对植被，土壤等地面景物作更为细致、准确的分析。

二、实例分析和比较

以 TM 数据为例，经过 K-T 变换后原有的缨帽形态如何？由于二维平面分析直观和简单，因此选用缨帽的投影面或视面来进行，三个视面分别是：植被视面、土壤视面和过渡区视面。让我们来寻找自然景物特性在这些视面上表现出怎样的曲线，以便了解这些新的 TM 信息的规律性。这里，除了分析农作物的生长过程，也分析一些其它自然景物以扩大对 K-T 变换后信息的了解。

(1) 农作物生长

图 3.38 表示了农作物在破土生长到衰老全过程在三个视面上的位置，植被视面图基本上与 MSS 的情况相同，图 a 中靠近亮度的底边区域可以认为是土壤线，各种不同类型的裸土位于这里，虚线代表某作物的生长过程，点 2 附近为植物发芽生长，植物本身叶子增长引起绿度增加，而植物阴影也随之扩大，在非黑土中引起亮度降低，直到裸土和阴影几乎完全消失而被植物覆盖。绿度和亮度在这一过程中都增加，如图中点 3 附近。当农作物进入衰老枯

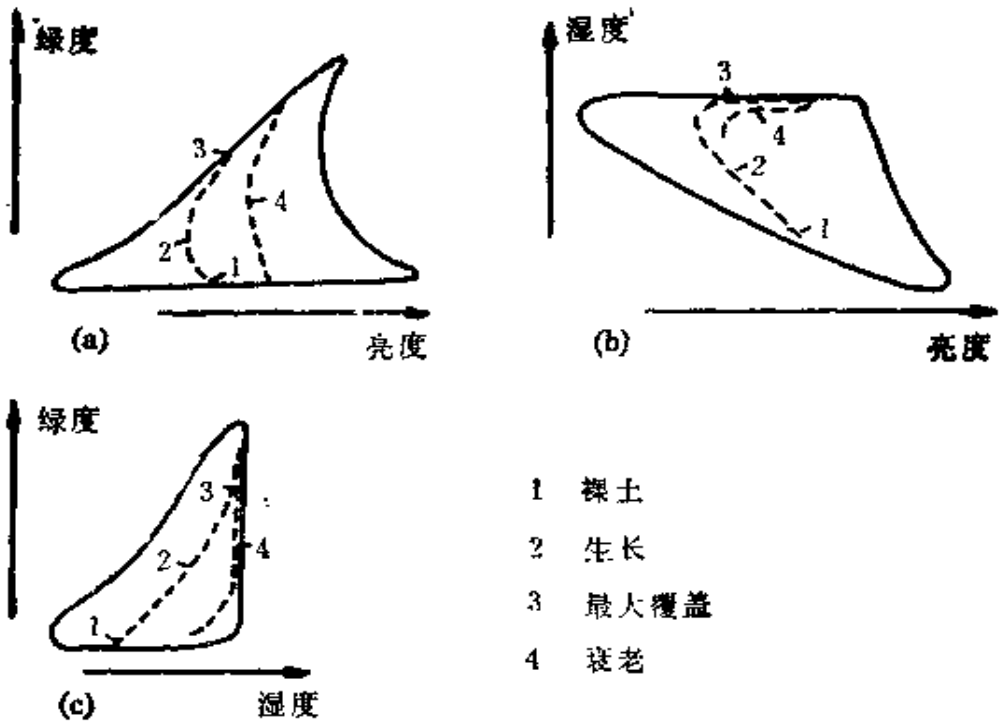


图 3.38 农作物生长光谱视图

(a) 植被视面 (b) 土壤视面 (c) 过渡带视面

整阶段，绿度会迅速降低，亮度也会有变化，并且随农作物不同而不同。土壤视面中除了亮度增加了湿度这个新分量，图中坐标没有标明原点位置。仅仅表示了各分量增长的方向。这是因为没有使用常数 r [(3.89)式]，湿度常为负值。在图 (b) 中虚线表示的植物生长过程中，湿度逐步增加，直到点 3 位置，已进入了与植被视面的交界处，再继续生长，亮度不断增加，而湿度却基本保持恒定。这是因为近红外成分降低而可见光成分增加，造成总效应不变。在土壤视面中，没有所谓的土壤线，裸土可以落在数据分布区域的任何一个点上，这点与 MSS 数据不同。过渡视面结合了土壤视面和植被视面，裸土部分点 1 附近落在土壤视面上(图 c 下线)而点 3 以后将落在植被视面上(图 c 右线)，因为点 1 时完全是土壤

信息而点 3 以后完全是植被信息。其它既有植被信息又有土壤信息的部分则落在过渡带视面上，这也是名称的由来。象元点在这一平面的不同位置可以反映出植被与土壤混合的情况。这点值得很好研究。

(2) 其它景物

Crist 和 Cicone 选用了几个其它景物与庄稼一起作对比分析，发现 K-T 变换在分析其它景物时也有很好的前景。所选用的景物有：森林，清水，浊水。图 3.39(a) 是植被视面，(b) 土壤视面和(c)过渡带视面。从图中可以看出植被视面中森林的位置与 MSS 中树区类似，说明了这个视面的共同点。主要的区别在于湿度这个量，从图中可以看出森林和水湿度都高于其它类型，水体可以用湿度解释，而森林则因为森林中阴影造成，浊水湿度大是因为混浊水体的可见光反射率较高引起。可见，所谓的

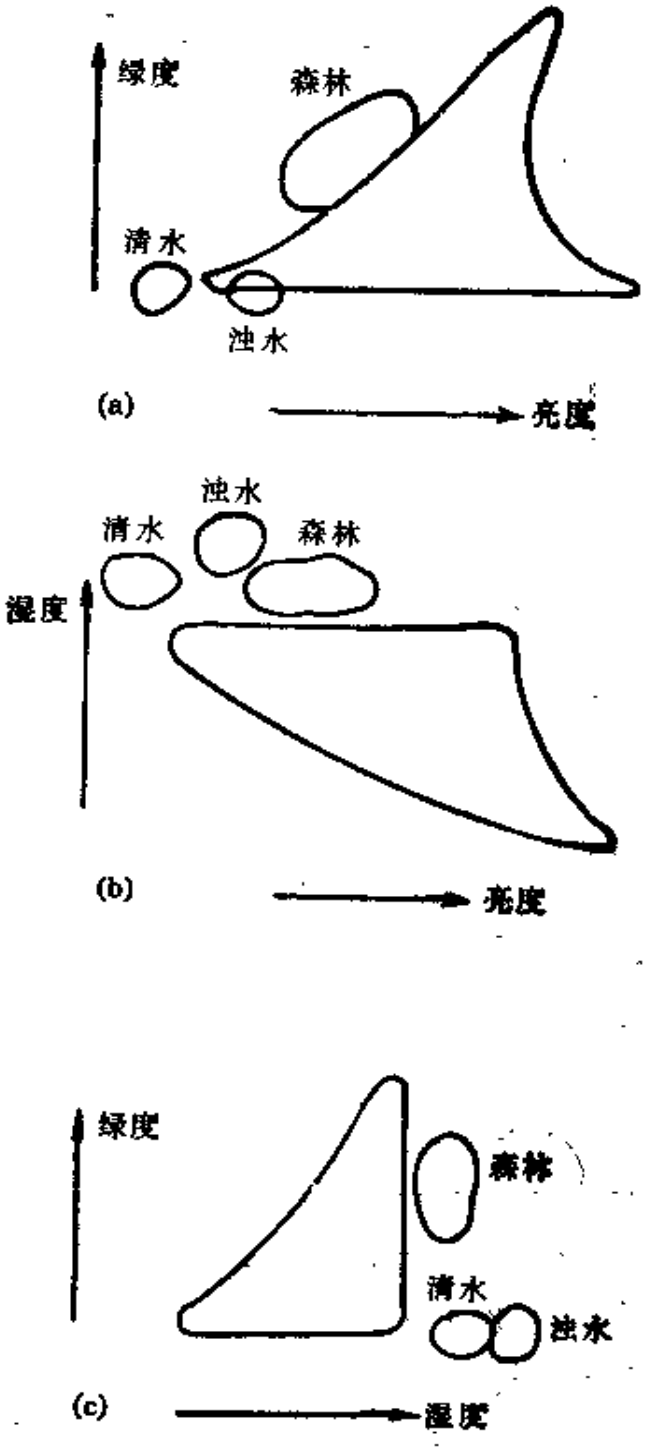


图 3.39 其它景物与农作物比较分析

"湿"除了真正的湿度外，还要分析它们的光谱差异进行说明，从这个例子可以看出，利用 TM 数据作 K-T 变换可以较好地把森林同农作物或自生植被数据区分开。

（3）比较

利用我国雁北地区 TM 数据进行盐渍土的盐渍程度分析，并与其它变换和增强方法作一比较，可以看出 K-T 变换在分析实际地物时有其独特的一面。

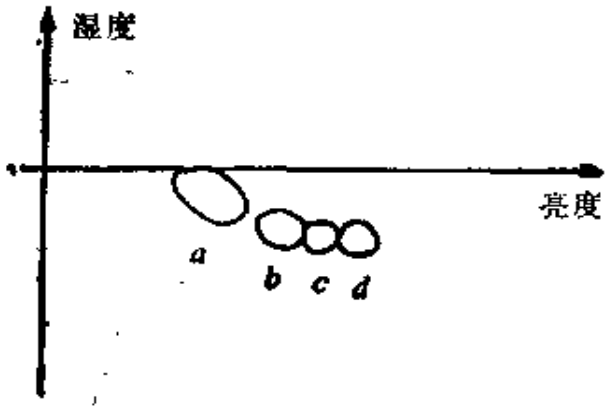


图 3.40 不同土壤在土壤视面的位置
(a) 非盐渍化土 (b) 轻度盐渍化土
(c) 中度盐渍化土 (d) 重度盐渍化土

考察这一地区经过 K-T 变换后的亮度通道与湿度通道，按照遴择的典型区：非盐渍化区，轻度盐渍化区，中度盐渍化区和重度盐渍化区分别作出各区在土壤视面中的位置，可以得到图 3.40 的分布情况。盐渍化程度越高，反射率越高，亮度越大。盐土地区往往是一片白色的"光板地"不长庄稼，这里反射率最高，亮度也最大；湿度的导出反映可见光和一个近红外波段与其它二个近红外波段反射率的差异，随着盐渍度的降低和农作物覆盖的增加，湿度渐渐增大；在 a 的左上方应该是河流、水库等水体的位置，湿度最大，亮度最小。从图中可以看出利用 K-T 变换区分不同盐渍程度可能效果较好。表 3.7 是一次实验结果，这是一个比较粗略的统计，只比较了 K-T 变换和 K-L 变换前三个分量以及假彩色合成的分类结果与 1:10 万土壤盐渍度图的面积误差，没有作逐点位置对比。分类是按盐渍程度和水域区分，具体分类方法见第四章。从这个结果可以看出，K-T 变换后分类效果最好，这是因为 K-T 变换后每个分量

特征的地学意义明确，舍去的大部分是不重要的信息，三分量合成后效果较好；而 K-L 变换前三个分量合成虽然保留了主要的信息，但地学意义不明确，提取的成分仍是各种信息的综合反映，不能获得 TM 数据的复杂结构和分离出明确的土壤信息。从物理意义上说，主成分的特征平面偏离了象元数据所散布的实际平面。因此影响了分类效果；假彩色合成仅从颜色上给予了增强，因此效果也不会很好。由此说明了 K-T 变换在实际应用中的特殊意义。

表 3.7　分类结果比较表

数据源 \ 类别 / 类别相对错误率(%)		盐化区	重度盐渍化区	中度盐渍化区	轻度盐渍化区	非盐渍化区	水域	没有分类的象元部分
1	K-T 变换后（前三分量）	0.3	3.7	−0.3	−4.1	−0.5	0.5	0.4
2	K-L 变换后（前三主成分）	1.5	6.5	−2.7	−9.3	0.3	3.7	0.0
3	假彩色合成（波段 4, 3, 2）	1.0	12.8	12.0	−23.4	−0.2	−2.4	0.2

第四章　数字图象的分类
——专题图象的生成

遥感所得图象数据的应用常常是将遥感数据经过解译，最后形成各种专题图象或专题地图供地学工作或其它工作使用。这种解译有二种方法：一种是目视方法。凭光谱规律、地学规律和解译者的经验从影象的亮度、色调、位置、时间、纹理、结构等各种特征推出地面的景物类型。如土地利用、土壤类型、地貌、地质、森林分布、水系等，并画出相应的专题解译图。"陆地卫星象片太原幅农业自然条件目视解译系列图"(1981 年)就是一例；另一种是计算机方法，常称作定量分析。利用数学模型经过计算机运算将数字影象进行分类，从而生成专题图象。下面将详细讨论这种处理所用的数字模型和处理中的方法选择。一般来说，利用计算机的定量分析可以较精确地计算面积，还可细分到单个象元，并可利用每一级灰阶的差异直至 256 个灰度级(8 位)，这是目视解译不可能做到的；但计算机处理时在考虑目标物的形状、位置及它们的空间相关性时要比目视解译困难，常常因此而影响定量分析的正确率。

在实践中，经过增强处理的图象有时直接送去解译和应用。有时则经过计算机分类再送出。但专题图象常常图斑小，类别分布细碎，还要经过一些进一步的处理才可能形成专题地图。由于计算机定量分析的快速和定量的优越性，人们在不断研究如何提高分类的精度，并利用专家经验，使分类结果达到可用和可推广的水平，直至计算机直接生成专题地图。

§4.1 概述

4.1.1 光谱类别与信息类别

为了将各波段影象中象元的亮度值与地面景物特征联系起来，必须发现其中的规律性。由地物反射率曲线可知，在不同的波段各种地物反射率有差异。图 4.1(a) 是雪、沙漠、小麦、湿地反射率曲线的例子，按 MSS 波段 1，2，3，4 分段，可以看出各段中它们反射率的差异。

任意选取卫星影象同一景中的二个或二个以上的波段，以每一波段的亮度(灰度)为轴作多光谱空间，可以发现，对应于地面同一类地物的象元点在多光谱空间内位置都靠得很近，有聚集的倾向。如图 4.1(b) 中，由于几类地物反射率在波段 1 和波段 3 的不同，凡同一类型的地物，如湿地，亮度接近，并且在波段 1 亮度最小，在波段 3 亮度也最小，因此在二维波段 1—3 空间中湿地位置在左下角区域；而小麦亮度在波段 1 较小，在波段 3 却较大，位于光谱空间的左上角等等。这种同类聚集的特性说明，如果按照地物类别聚集的规律把多光谱空间划分为若干个子空间，每一子空间包含有一个类别，这样就可以把图象中未知的象元进行分类，把它们分配到各自的子空间中去。

这种完全按照光谱特征在多光谱空间内聚集的类别，有时称为光谱类别；那些与地面实际景物对应的类别又可以称为信息类别。在光谱空间中聚集的光谱类别如能直接与实际地物对应，则又是信息类别，象图中的雪地、沙漠、小麦和湿地都是信息类别与光谱类别一一对应的。

由于自然界的情况是复杂的，反映在图象象元亮度中的信息常常是多种影响的综合，而同一种地物也有许多差别。如湿地，由于所含水分不同，在光谱空间会形成不同的光谱类别；如土壤，由于土壤类型不同也会形成不同的光谱类别。在实际处理时，植被、

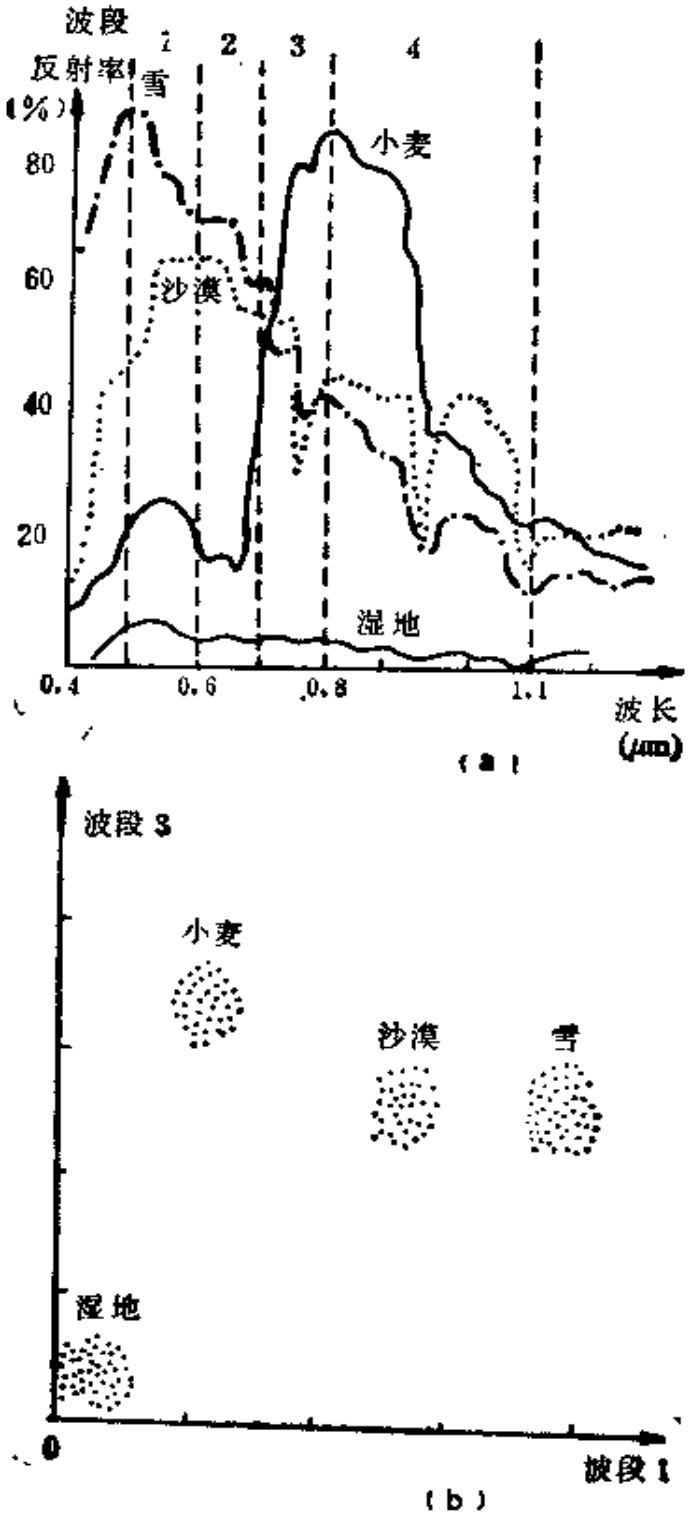


图 4.1　在多光谱空间中的地物类别(以 MSS 为例)

地形、含水量等都会引起同种信息类别的亮度变化，这种现象有时也称为同物异谱。即一种信息类别包含有几种光谱类别。有时在同一光谱类别中有不同的信息类别，例如：干湖床的明亮表面与大沙丘陡峭的向阳坡面的光谱不易分开，这称为异物同谱。因此，当利用光谱特性分类分出光谱类别后，要找到光谱类别与信息类别的关系，从而进一步找到信息类别，或者通俗地说，把每种光谱类别与具体地面景物类别对上号，或将光谱类别再进一步区分出信息类别(见 7.2.3)，以得到正确的分类结果。

4.1.2 分类

对于遥感图象上的每一象元点或叫模式，识别出它们各自的类别，并与地面实际类别联系，这种技术就是遥感数据的分类技术。分类，或模式分类，是模式识别技术的一个分支。这里主要介绍遥感中常用到的统计模式识别方法，而不涉及其它模式识别内容。因此在本章中称之为分类技术。利用分类技术，对图象进行有效的定量分析和描述。

多波段影象中的象元点由于其取样的随机性，可以表示为一个随机矢量或模式 $\mathbf{X}=[x_1, x_2, \cdots, x_n]^T$，$x_1, x_2 \cdots x_n$ 也可以叫做特征，这时的 $x_i(i=1, 2, \cdots n)$ 不一定是原始图象中的波段，也可以是波段的各种组合和变换后的一个图象分量。分类的目的在于找到 $\mathbf{X}$ 属于哪个类别。分类前的预处理除了前面叙述的校正和增强等工作外，一项重要的事情是确定分类所用的信息源，也就是选用的 n 个特征是否合适。是否可以找到最佳的 m 个特征，使 $m<n$，而分类结果却很好，这样可以减少计算的时间和花费，这个过程就是特征选择。例如：经过 K-L 变换后的前几个主分量作为分类信息源；经过比值变换后的图象与原图象波段重新组合；或者经过特殊数学计算找到可分性最好的最佳分类波段，等等。经过特征选择后的随机矢量（又可叫做特征矢量）$\mathbf{X}=[x'_1, x'_2, \cdots, x'_m]^T$ 送入分类器分类。

分类器的种类很多，但主要分为二大类：一类是非监督分类，这种分类没有什么先验知识，依据给定的数学模式分出光谱类别，得到结果后再设法将光谱类别逐一地与信息类别挂钩得到可用的结果；另一类是监督分类，监督分类需要有先验知识，利用对所研究的地区类别的了解，划分出“训练区域”，确定判别函数，求出参数，用以“训练”计算机作下一步的分类工作。这种分类得到的结果一般可以直接分出信息类别，分类结果也较好。上述过程可以用图4.2表示。

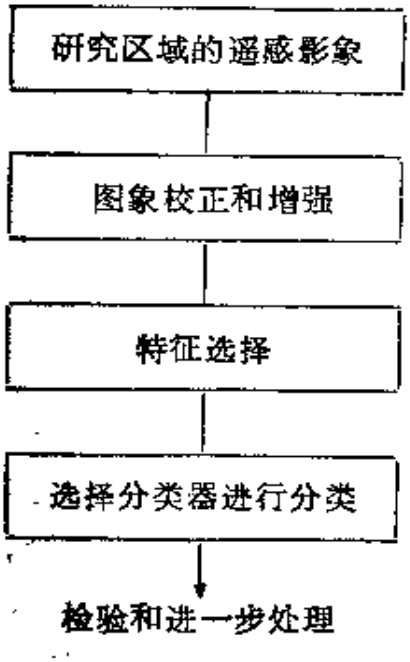


图 4.2　图象分类

进入传感器的信息由于受传感器空间分辨率和光谱分辨率的限制，常常得到混合的信息，有时，地物本身就是混合在一起的，例如植被覆盖下的土壤。因而，不存在理想的分类器。如图 4.3 所示，假定选择 TM 波段 4 和 2 进行土壤、植被和水的分类，其中土壤和植被在此二维特征空间的分布有重叠现象，虚线代表分类边界，可见在这种情况下水体可以分出却不可能将土壤和植被完全分开。也可能有一些象元如图中 N，不属于这三类中的任何一种。因而未被分类。那些本来是土壤却被分到植被类，或本来是植被却被分到土壤类的象元都应属于错分。因此，不管使用什么分类器，分类后都必须进行检验，错分象元所占比例越小，则分类结果越佳。

对地物进行分类时，都会或多或少地在特征空间里出现这种类别重叠的区域，特别是分界线附近的象元，其模糊性尤其明显，可以分到这一类，也可以分到那一类。所以为了减少分类中的错误，要想办法寻找一个特征空间使类别间的重叠最小，还要尽量使

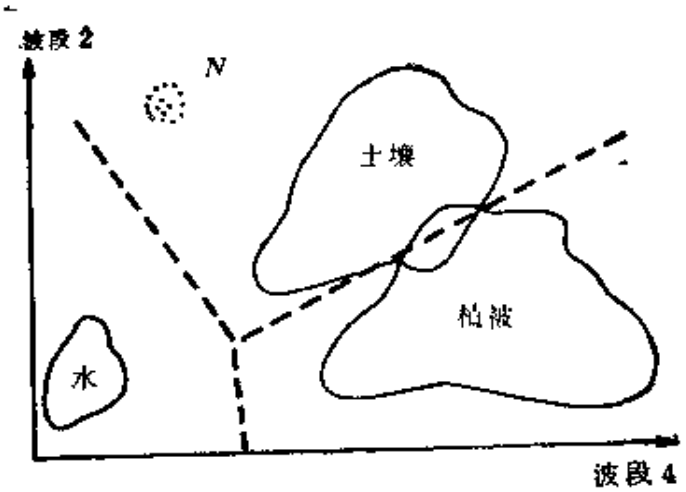


图 4.3　分类中错误的产生

分类边界放在最佳位置，减少分类的模糊性。这说明特征选择和分类器的选择的重要性。

§ 4.2　非监督分类

非监督分类按照特征矢量在已选择的特征空间中类别集群的特点进行分类。这种分类方法由于不需要有特别的先验知识而使用十分普遍。尤其是对一幅图象刚开始分析的时候，或者某一地区如荒漠、沼泽等地面调查困难时，采用这种方法对地面情况作初步调查，或用这种方法随时间不同作某一地区的跟踪监测都很有效。非监督分类中常用的方法是聚类法。

4.2.1　聚类方法

聚类方法可以得到光谱类别。这种方法假定不知道特征矢量的概率分布，但认为同一类别的特征矢量在特征空间内完全聚集成团状，每个团都有一个中心。这些团内点的数目越多，亦即密度越大或点与中心的距离越近，就越可以肯定，它们是属于一个类别，所以点间的距离成为重要的判断参量（相似性测度）。同一类别中点间的距离一般来说比不同类别点间距离要小。也可以认为，

一个点属于某一类，一定与这个类别中心的距离比与其它类别中心的距离小。由此，只要找到密度较大的团的中心作为聚类中心，以最近距离作为判定点从属类别的原则，通过迭代确定所有点的光谱类别。

一、距离的定义

常用简单的求距离方法，统称明氏距离 (Minkowski) 它的通用表达式为

$$d_{ij}(q) = \left[\sum_{k=1}^{n} |x_{ik} - x_{jk}|^q\right]^{1/q} \tag{4.1}$$

d_{ij} 表示 i 点和 j 点间的距离，n 是特征数，x_{ik}，x_{jk} 分别为第 k 个特征 i 点、j 点的值，q 为参数。

当 $q = 1$ 时，

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^{n} |x_{ik} - x_{jk}| \tag{4.2}$$

这个距离叫出租汽车距离或城市块距离。在二维空间里可以看出，这种距离是计算两点之间的直角边距离，相当于城市中出租汽车沿城市街道拐直角前进而不能走两点连接间的最短距离，它的名称也由此而来。

当 $q = 2$ 时，

$$d_{ij} = \left[\sum_{k=1}^{n} (x_{ik} - x_{jk})^2\right]^{1/2} \tag{4.3}$$

这就是欧几里德距离，即几何直角空间里两点的直线距离。它比前者更为精确，但由于这种计算方法有乘方和开方，比较花费机时，所以常采用出租汽车距离。

在这里，距离是作为相似度测量应用的。距离越小，相似度越大。

二、聚类过程

聚类过程是逐次迭代的过程。目前通用的各种软件在编写时总框图是类似的，仅在细节处理上如初始中心的选择，类别的合并分裂等略有不同的修改。

1. 确定最初类别数和类别中心。这二步有较大的随意性，因无先验知识，只能在以后逐步调正。例如对于四个特征的聚类，可选取 16 个类别，每一特征选取二个位置。以这个分量图象的积累直方图来划分，取在轴上积累值分别等于 1/3 和 2/3 的两个值，即取第 k 特征 $\sum_{j=0}^{x} P_k(j) = 1/3$ 和 $\sum_{j=0}^{x} P_k(j) = 2/3$ 的 x 值，这样，四个轴共形成 $N = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16$ 个点，这就是 16 个类别的初始类别中心。

也有根据数据选取类别数和类别中心的方法。通过多维直方图，选取数据分布的峰值作为初始聚类中心，这样做减少了前者的随意性，但开始前工作量增大，并可能有些峰是重叠分布形成，这样产生的类别中心将是混合类别。

2. 计算每一个象元所对应的特征矢量与各聚类中心的距离。以四个通道为例，设第 i 类中心坐标为 $(m_i^1, m_i^2, m_i^3, m_i^4)$，那么第 j 个点到第 i 类中心的出租汽车距离为 $d(X_j, M_i) = |x_j^1 - m_i^1| + |x_j^2 - m_i^2| + |x_j^3 - m_i^3| + |x_j^4 - m_i^4|$。

3. 选与中心距离最短的类别作为这一矢量的所属类别。若 $d(X_j, M_i) < d(X_j, M_k)(k = 1, 2, \cdots n, k \neq i) i, k$ 均为类别序号，则 x_j 被判定属于第 i 类 ω_i，即 $x_j \in \omega_i$

4. 计算新的类别均值向量。以第 i 类为例，

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} X_j^i \quad (n \text{ 为第 } i \text{ 类 } X \text{ 向量个数})$$

5. 比较新的类别均值与原中心位置上的变化。若位置发生了改变，则以新的类别均值作为聚类中心，再重复第 2 步以下的步骤，进行反复迭代操作。

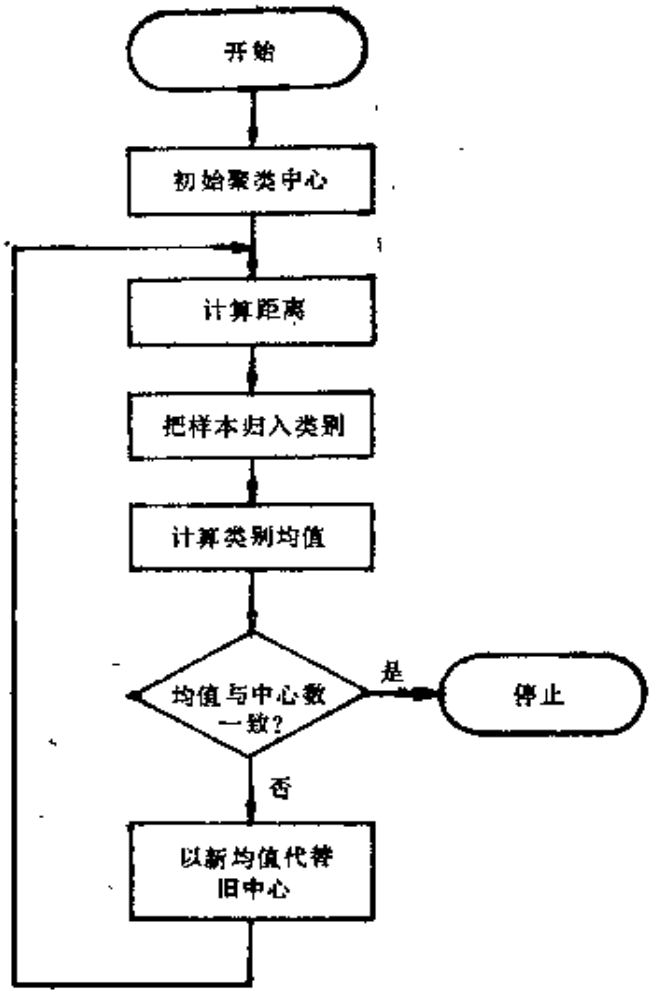


图 4.4　聚类主要运算框图

6. 如果聚类中心不再变化，计算停止。

这一主要运算步骤框图和示意图见图 4.4 和图 4.5。

在实际作聚类时，有时经过多次迭代还不能停止，有时由于数据本身的聚类特性不大好，类别重叠或一些零散点远离各个聚类中心或过少的点自成中心等，这些都会影响聚类结果。因此规定一些附加的约束，以提高分类质量。这些约束主要有：（1）设置一个拒绝类。如果这些点距离各类中心都很远，则属于拒绝类而不

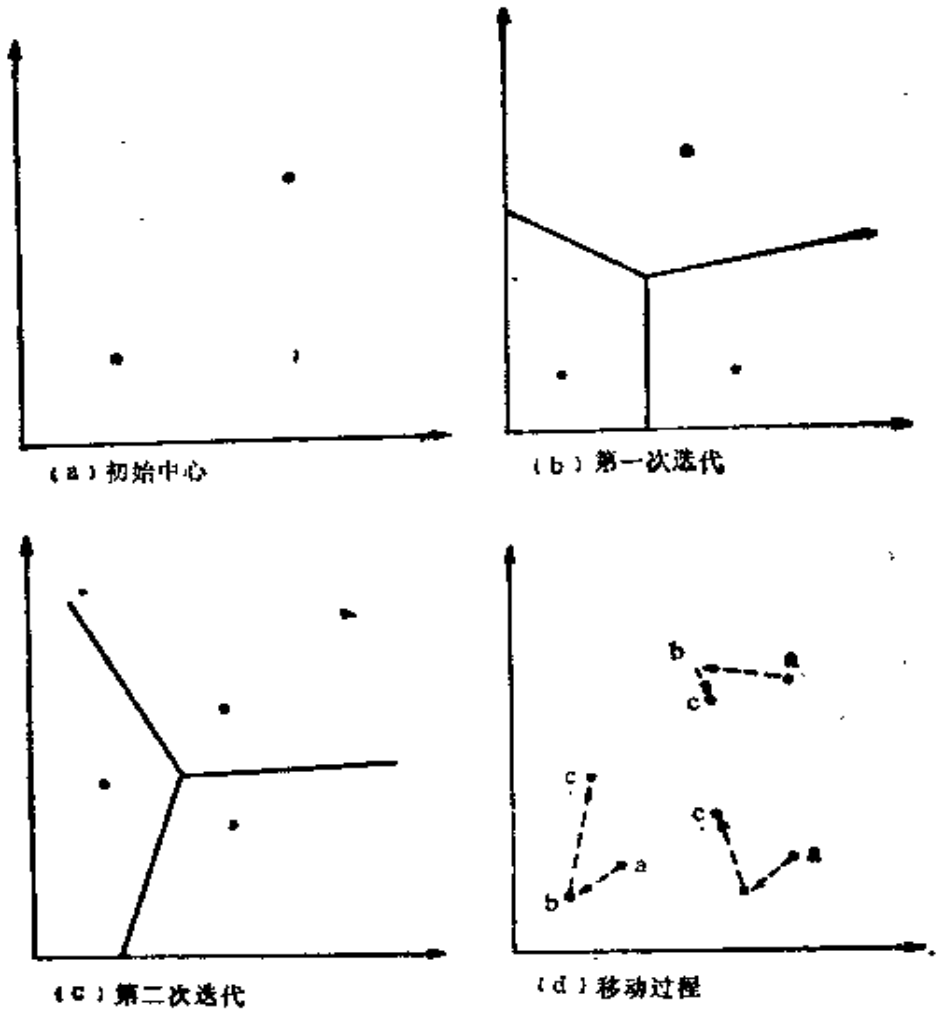


图 4.5　迭代过程中聚类中心的移动

被分到某一类中。设拒绝参数为 $T_{拒}$，d_{ij} 为最小距离，且 $d_{ij}>T_{拒}$ 则 X_i 属于拒绝类。(2) 类合并。当两个聚集中心过近时，将其并为一类。设距离合并参数 $T_{合1}$，如果两类均值距离小于或等于 $T_{合1}$，两类合并成一类；若两类均值距离大于 $T_{合1}$，则保留这二类。另一种情况，当分到某一类的象元数过少时，去掉此类合并到最近的类别中去。设数目合并参数 $T_{合2}$，计算分类后每类象元数占总象元数的百分比，若百分比小于或等于 $T_{合2}$，寻找距这一类均值距离最近的类别合并；若百分比大于 $T_{合2}$，这一类被保留。类合并在步骤 4 后进行，完成后，需要重复步骤 4 计算各类均值向

量。(3) 类分裂。有时数据在特征空间某些方向上分布过宽或分布过密，在这一类别中可能不止一个集群中心，这时可以作进一步的分裂。办法仍是检查每一类的象元总数占各类象元总数的百分比。设定一个百分比阈值作为分裂与否的参数 $T_分$，如果所求百分比中，某值大于或等于这一参数，则对应的类别将被分裂，否则被保留。如果这一类被分裂，要选定二个新的聚类中心，首先计算类别均值向量 $M=(m^1, m^2, \cdots, m^n)^T$，以及标准差向量 $S=(\sigma^1, \sigma^2, \cdots, \sigma^n)^T$，则规定新的聚类中心为：

$$M_1 = M + S = (m^1+\sigma^1, m^2+\sigma^2, \cdots, m^n+\sigma^n)^T$$

和 $$M_2 = M - S = (m^1-\sigma^1, m^2-\sigma^2, \cdots, m^n-\sigma^n)^T;$$

这一步在第 4 步时加入，如果需要分裂。则在计算 M_1，M_2 后回到步骤2。(4) 停止。按照前面所述，应在迭代过程中聚类中心不再变化便停止计算得出结果，但实际运算时，这个过程可能很长，迭代次数很多，每次变化很小，浪费机时。因此在满足精度要求时可以提前结束。一般也采用类别均值变化的阈值作为参数 $T_停$，如果连续两次迭代其所有类别均值变化均小于或等于 $T_停$，则停止，否则继续迭代。有时也采用规定迭代次数的方法，比如预计迭代八次结果尚好，则八次结束。这种方法可代替步骤 6。

上述附加的方法可以改善聚类的效果，因为给予专家干预运算和加入经验的可能。这主要通过几个参数的选择。选用几个参数和什么参数值带有很大的随意性，经验丰富的专家通过合适的参数可以把分类结果调整得更为合理。分类结束时，每一类别赋予一个序号 1，2，……n。

本节介绍的方法也可叫 ISODATA (迭代自组织数据分析或动态聚类)，本方法除了调整象元类别外，也调整总类别数或增或减。实际常用的软件包总是根据需要先选择好总类别数，以后迭代过程中便不再分裂，只采取合并等步骤。

4.2.2 等混合距离法

这种方法重点在"分"而不是"聚"，最初由美国斯坦福大学应用。它是另一种非监督分类，过程如下：

1. 建立初始分类中心，利用式：

$$G_i = M + S\left[2\left(\frac{i-1}{N_g-1}\right)-1\right] \quad i = 1,2,\cdots N_g$$

来建立中心，式中 G_i 是分类中心，i 代表类别序号，由 1 至 N_g，M 为均值向量，维数由特征空间维数决定；S 为标准差向量；由上式可知，在开始时，如选二类 $N_g = 2$，则中心为 $G_1 = M - S$，$G_2 = M + S$；如选三类 $N_g = 3$，则中心 $G_1 = M - S$，$G_2 = M$，$G_3 = M + S$；如选四类 $N_g = 4$，$G_1 = M - S$，$G_2 = M - \frac{1}{3}S$，$G_3 = M + \frac{1}{3}S$，$G_4 = M + S$；等等。

2. 按最小距离规则分类，同聚类方法第 2 第 3 步。

3. 计算分类后各类的均值 M 及标准差 S。

4. 设定一个标准差的阈值 s_0 作为检查是否继续分裂的参数，如果某类数据在特征空间某些方向上分布过宽，也就是有一个或一个以上的标准差值大于或等于这一参数，则这类将继续分裂，否则停止分裂。继续分裂时，哪个方向上标准差大于等于 s_0，哪个方向上生成二个中心 $m^i + \sigma^i$ 和 $m^i - \sigma^i$。例如：一个四维特征空间中某类均值 $\mathbf{M} = (m^1, m^2, m^3, m^4)^T$，标准差为 $S = (\sigma^1, \sigma^2, \sigma^3, \sigma^4)^T$。如果 $\sigma^1 < s_0, \sigma^2 < s_0, \sigma^3 > s_0, \sigma^4 > s_0$，则必须分裂，两个新的中心为 $\mathbf{M}_1 = (m^1, m^2, m^3 - \sigma^3, m^4 - \sigma^4)^T$ 和 $\mathbf{M}_2 = (m^1, m^2, m^3 + \sigma^3, m^4 + \sigma^4)^T$；然后重新回到步骤 2

5. 停止。当所有的标准差都小于 s_0 时，停止。

6. 关于合并与分裂的附加约束。这些附加方法基本上与聚类方法相同，是为了提高分类速度和质量而设立，它的基本内容也类似：(1) 两个类别中心过近时合并，这里类间距离采用规范化距

离公式：

$$d_{ij}=\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\frac{(m_i^k-m_j^k)^2}{\sigma_i^k\cdot\sigma_j^k}}^{*} \tag{4.4}$$

其中字母下角标 i，j 表示类别序号，上角标 k 表示光谱空间的特征序号。(2) 类别中象元占总数百分比过少时合并，过多时分裂。(3)可规定最多类别数，满足要求时停止，等等。这些都需专家选择参数、调整分类结果，细节参考 4.2.1。这种分类示意图见图 4.6。



图 4.6 等混合距离分类示意图

非监督分类的方法还有其它改进方法，例如聚类时初始中心的选择，除了上述方法，为了节约机时，也有所谓“一次通过聚类”，即扫描全图，以第一行的各点为准，根据预定距离决定初始类别和初始聚类中心；第二行开始聚类，随时聚类随时计算统计值进行调整，直到全图扫描一遍，聚类也已结束；也有的方法利用多维直方图的峰值作为初始聚类中心再进行聚类和调整；等等。每种改进方法都有其优点和局限性。总之，在实际分类中，可以根据数据的特点、时间、花费、精度等各方面的因素作必要的调整和改进，在“聚”或“分”的基础上发展出许多好的算法。

4.2.3 信息类别的确定

非监督分类根据光谱特性分出的光谱类别，每一类给予一个标号 1，2，3，……n，一共 n 类，一般地，拒绝类作为第 0 类而无实际意义。分类后光谱类别需要找到对应的地面景物，也就是信息类别，使每一个标号都代表一定的地面覆盖类型。

---

* 这个距离考虑了 σ_i 和 σ_j 更为科学，这是因为当两类均值间距离不变时，由于 σ_i 或 σ_j 增大，导致两类分布重叠部分加大，因而错误率增大。

分类后的图象，若有 n 类就只有 $(n+1)$ 级灰阶 0，1，2，……n，输出时，给各灰阶以不同符号，用打印机打印出来，也可以在监示屏上显示。在显示黑白影象时，类别标号成为灰度。由于灰阶对比度过低，不能看清楚类别图形，所以常采用伪彩色的办法显示：每一标号给予一种颜色，按红、绿、蓝三原色以不同比例配成，得到分类的彩色图象，以便对比。可对比的资料种类很多，最好的办法是实地调查，选几个类别典型区域，对照分类图象，一一确定每一标号的类别内容。这种办法准确度较高，但花费较大，而且有时实现起来很困难；有时也可以利用专题地图或综合地图对照分析；或者利用黑白、彩红外等航空照片对照；或者其它一些参考数据，逐个标号确定。

在实际确定信息类别时，常常光谱类与信息类不是一一对应的。由于同物异谱现象的普遍存在，要测定的地物在光谱空间的散布情况不同，这就需要将二个或二个以上的光谱类归并入同一种信息类。一般情况下是分类过程中根据光谱类中心距离，较近的归并到一起，距离过远的就用人为干预的方法在分类完成后作补充归并。例如[53]：某地区 MSS 影象作非监督分类，分出 34 类，为了归并一些类别并与信息类挂钩，可以只采用较为重要的二个波段：波段 4 和波段 2，画出二维空间，求出 34 类的均值并找到在坐标空间的位置；然后对这些均值点用求最小距离的方法再次聚类，得到 10 个类别，最后找出对应的地物，见图 4.7，可以看出，虽然已作一次归并，也并不是一类对一类的。由于寻找的是灌溉的庄稼，它的分布较宽，因此右下角三个圆的区域全属于这一类，其它如裸土也类似。确以信息类别后再人为地加以归并，如将属于 a 类的三个标号统一成一个标号，得出最后结果。

有时，确定类别名称也可以根据分类后的类别均值在光谱空间中的位置，例如波段 4 和波段 2，再测得或查出被测各类地物光谱反射率对应在同一空间中的位置，比较两者，如果位置相同，则

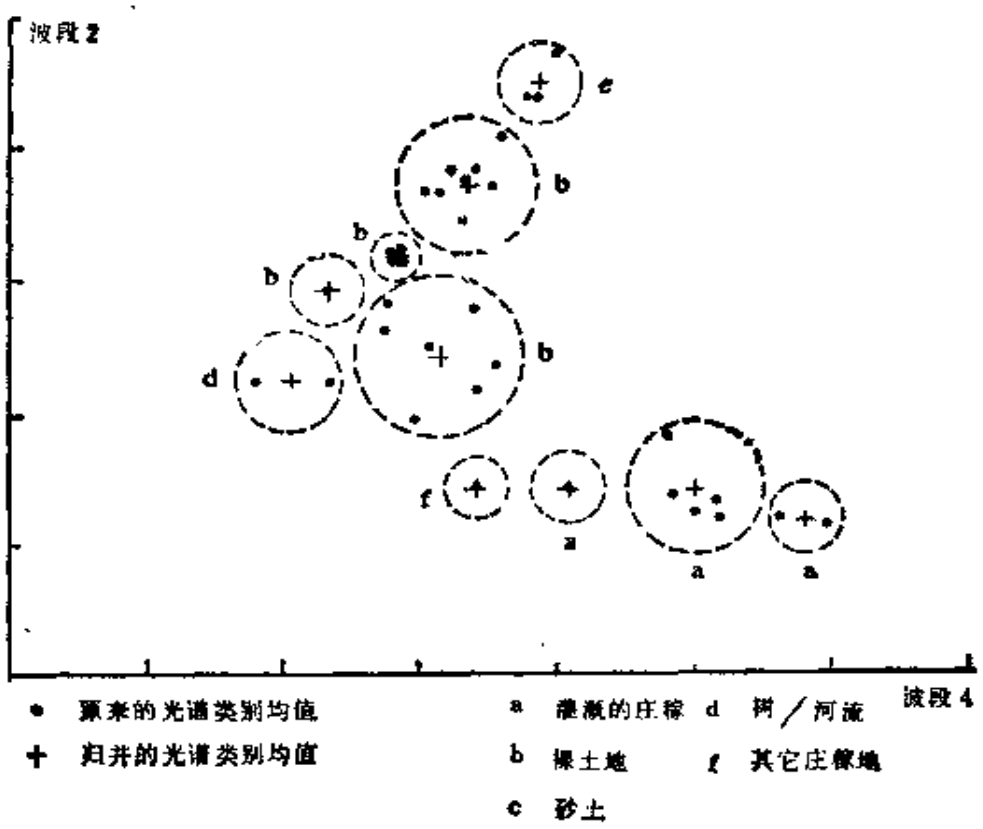


图 4.7　光谱类别与信息类别实例

可以判定出此类的地物性质，如水体光谱反射率在这一平面坐标的左下角，分类后某类均值也在这一位置范围。如果手中没有其它参考资料，则可以确定这一类是水体。当然，这种确定信息类别的方法只考虑一种因素，比较粗糙。但在仅知光谱反射规律的条件下，还是可行的。

上述方法均属后验，在一切未知的条件下先分类，再作补充检验工作。

非监督分类的方法简便，省时，虽然精度不太高，但在无法得到先验知识的情况下，仍不失为一种好的不可缺少的方法；有时又作为其它分类方法的先行步骤（见4.4.1），也表现出了它的优越性。

§ 4.3 监督分类

监督分类是在有先验知识的条件下进行的。在被分类的区域内选择典型区域作为子区，子区中的各种类别地物在图象中的位置早已清楚。可以用这些已知的象元数据求出参数，确定各类判别函数的形式。这一过程可以看作"训练分类器"或计算机"学习"的过程。然后将未知的象元数据代入各个判别式，一般地，哪一类判别式的值最大，就把这个象元归入哪类。逐个象元分类后得到分类图象需经检验，得到分类正确率。只要错误率较小，可以接

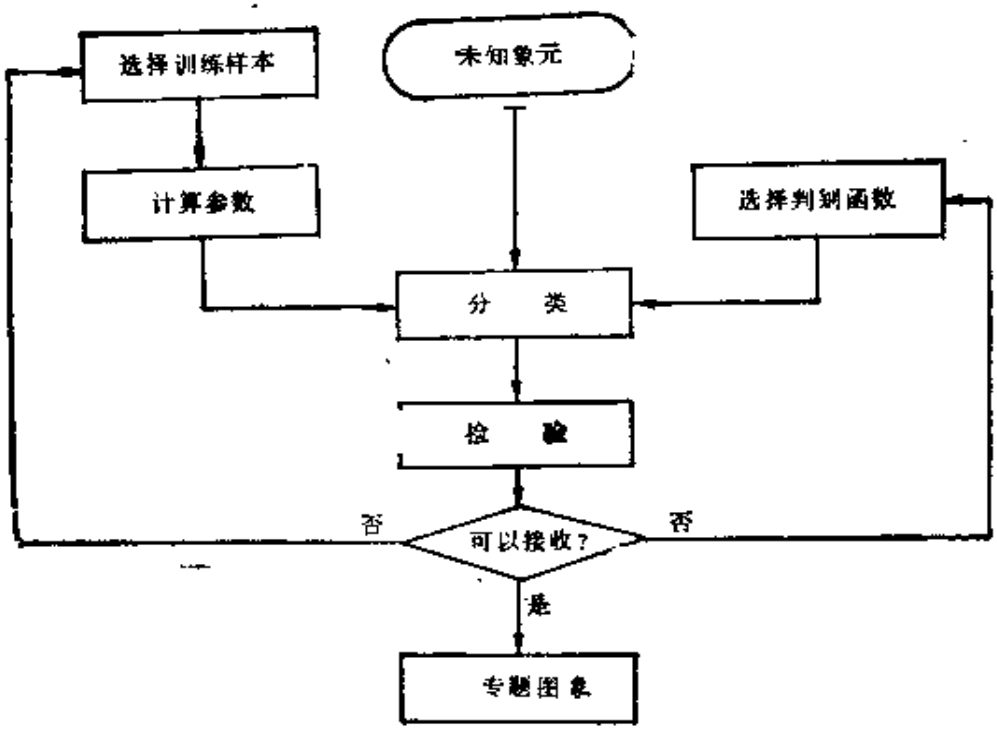


图 4.8　监督分类流程

受，分类便结束，得到信息类的专题图象。如果错误率较大，则需要重新选择训练区；或者这种判别函数无法获得较好的分类结果，那末只好重新考虑选择另外的判别函数分类，或辅以其它改进方

法，直到获得较为满意的分类图为止。 这一处理过程框图见图 4.8。

4.3.1 判别规则

属于某类地物的象元，或称样本，用 n 个通道的分量作分类，可以表示成 n 维空间的随机向量，或叫模式：

$$\mathbf{X}=\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_n\end{pmatrix}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T$$

$x_k(k=1,2,\cdots n)$ 为各个分量，分类时的判别函数为 $g_i(\mathbf{X})$ $(i=1,2,\cdots m)$，m 为分类的类数。 $g_i(\mathbf{X})$ 的形式可以选择，并且 $g_i(\mathbf{X})$ 中的参量值由已知训练区样本计算得到。

将未知的样本 $\mathbf{X}$ ——代入每一类的判别函数 $g_1(\mathbf{X}),g_2(\mathbf{X}),\cdots g_m(\mathbf{X})$ 计算其值，然后比较大小，若 $g_i(\mathbf{X})$ 的值在 m 个值中最大，那么 $\mathbf{X}$ 判为 i 类，即 $\mathbf{X}\in\omega_i$，ω_i 代表第 i 类，图 4.9 为判别规则示意图。

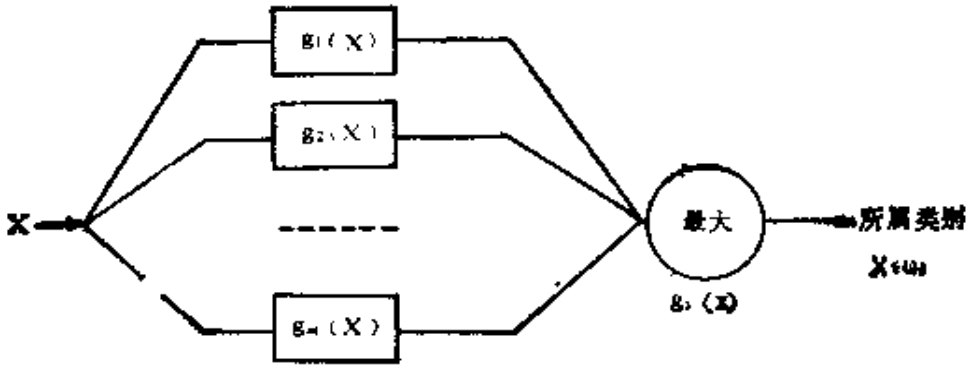


图 4.9 判别规则

现以一简单例子作示意说明，假定作两波段分类，共有两类 ω_1 与 ω_2，把二维特征空间分成二个子空间，示意图 4.10，分量 x_1

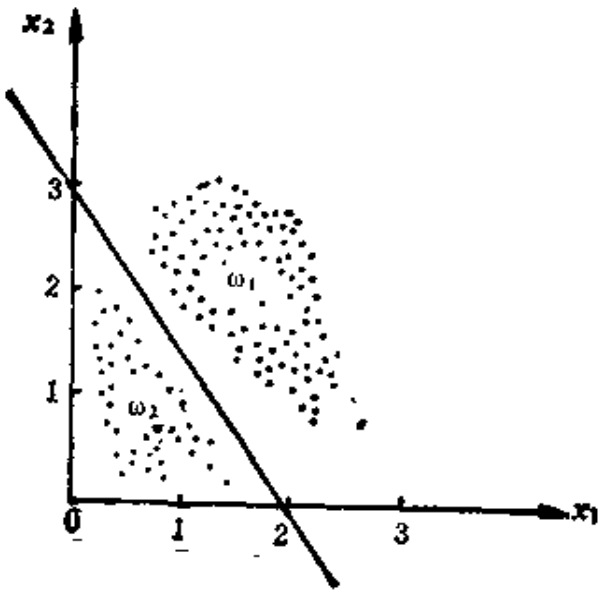


图 4.10　判别实例

和 x_2 分别代表两个波段的亮度值。两类的分界线过 $\mathbf{X}_1=\begin{pmatrix}2\\0\end{pmatrix}$ 和 $\mathbf{X}_2=\begin{pmatrix}0\\3\end{pmatrix}$，设两类的判别函数分别为线性函数：

$$g_1(\mathbf{X})=4x_1+5x_2 \qquad \text{对应 } \omega_1$$
$$g_2(\mathbf{X})=x_1+3x_2+6 \qquad \text{对应 } \omega_2$$

判别边界以线性函数表示为

$$g_1(\mathbf{X})-g_2(\mathbf{X})=0$$

即

$$3x_1+2x_2-6=0$$

对未知象元作判别时，求出 $g_1(\mathbf{X})$ 与 $g_2(\mathbf{X})$，哪个大判为哪类。如求 $\mathbf{X}=\begin{pmatrix}2\\2\end{pmatrix}$ 属于哪一类？将 $x_1=2$，$x_2=2$ 代入 $g_1(\mathbf{X})$ 和 $g_2(\mathbf{X})$，求出 $g_1(\mathbf{X})=18$

$g_2(\mathbf{X})=14$

$g_1(\mathbf{X})>g_2(\mathbf{X})$ 则 $\mathbf{X}\in\omega_1$

或代入 $g_1(\mathbf{X}) - g_2(\mathbf{X}) = 3x_1 + 2x_2 - 6 = 4 > 0$ 则 $\mathbf{X} \in \omega_1$。

若求 $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ 属于哪一类？同样地，将 $x_1 = 1$，$x_2 = 1$ 代入

$$g_1(\mathbf{X}) = 9$$

$$g_2(\mathbf{X}) = 10$$

$g_2(\mathbf{X}) > g_1(\mathbf{X})$ 则 $\mathbf{X} \in \omega_2$。

或 $g_1(\mathbf{X}) - g_2(\mathbf{X}) = 3x_1 + 2x_2 - 6 = -1 < 0$ 则 $\mathbf{X} \in \omega_1$。

对照图 4.10 可以直观地看出，结论正确。

因此可知，寻找判别函数是关键之一，这就是决定论方法，判别函数有线性函数，有非线性函数。下面将介绍遥感中常用的正态函数及参数估计方法。

4.3.2 最大似然判别

最大似然判别是遥感图象数据最常用的一种监督分类方法，它利用了遥感数据的统计特征，假定各类的分布函数为正态，按正态分布规律用最大似然判别规则或叫 Bayes 准则进行判决，得到较高正确率的分类结果。

一、最大似然判决规则

从概率统计分析，要想判决某位置的向量 $\mathbf{X}$ 属于哪一类别，实际上，判别函数要从条件概率

$$P(\omega_i/\mathbf{X}) \quad i = 1, 2, \cdots m$$

来决定，ω_i 代表第 i 类别，共有 m 类，P 表示在模式 $\mathbf{X}$ 出现的条件下，$\mathbf{X}$ 为 ω_i 类的概率等于多少。这里不考虑地面上的地物类别在一个象元内混合的情况，认为一个象元 $\mathbf{X}$ 应该只属于一个特定的类别。由于这个特定的类别是未知的，我们只有想法找到属于每一类的可能性，然后比较它们的大小，哪一种类别出现的概率大，就把这个位置的象元判归哪类，也就是

如果 $$P(\omega_i/\mathbf{X}) > P(\omega_j/\mathbf{X})$$

对 $$j \neq i, \quad j = 1, 2, \cdots m$$

成立，则　　$x \in \omega_i$

这样的判决比较合理，或说风险最小，错误概率最小。

根据概率理论中的贝叶斯公式（Bayes），可以求出条件概率

$$P(\omega_i/\mathbf{X}) = \frac{P(\omega_i)P(\mathbf{X}/\omega_i)}{P(\mathbf{X})} \tag{4.5}$$

公式中 $P(\omega_i)$ 是每一类别 ω_i 的先验概率，也就是在被分类的图象中类别 ω_i 出现的概率，例如 ω_i 的象元数占整个图象 20%，则这一类 $P(\omega_i) = 0.2$。$P(\mathbf{X}/\omega_i)$ 是类别 ω_i 的概率分布，它表示在 ω_i 这一类中象元 $\mathbf{X}$ 出现的机会，所有属于 ω_i 的象元出现的概率密度已知后，可以画出 ω_i 的概率分布曲线。有多少类别就有多少分布曲线。由此可知如果有一个已知的训练区域，用这些已知类别的象元作统计，可以求出各类的分布 $P(\mathbf{X}/\omega_i)$ $i=1,2,\cdots,m$。式(4.5)中 $P(\mathbf{X})$ 表示不管什么类别 $\mathbf{X}$ 出现的概率，这里

$$P(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{m} P(\mathbf{X}/\omega_i)P(\omega_i) \tag{4.6}$$

从式中可以看出 $P(\mathbf{X})$ 与类别 ω_i 无关，是对各类来说的一个公共因子，在比较大小时不起作用，因此，作判别时可将 $P(\mathbf{X})$ 去掉，这时判决函数

$$g_i(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X}/\omega_i)P(\omega_i) \tag{4.7}$$

判别规则为：

如果　　$P(\mathbf{X}/\omega_i)P(\omega_i) > P(\mathbf{X}/\omega_j)P(\omega_j)$

对　　$j = 1, 2, \cdots, m,\ j \neq i$

成立，则　　$\mathbf{X} \in \omega_i$

二、正态分布

从概率统计的角度看，类分布 $P(\mathbf{X}/\omega_i)$ 形式多种多样。在遥感分类中，将变量 $\mathbf{X}$ 看作随机变量，它在图象上代表一个象元点，遥感图象象元的数量很大。可以认为，对某一类别 ω_i，$\mathbf{X}$ 的概率分布近似于正态分布。

对于一维正态分布，或者说只有一个波段的遥感图象，类分布为：

$$P(x/\omega_i) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} e^{-(x-m_i)^2/2\sigma_i^2} \tag{4.8}$$

这里，m_i 是第 i 类的 x 均值，σ_i 是标准差，作无偏估计

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n_i - 1}\sum_{j=1}^{n_i}(x_j - m_i)^2 \tag{4.9}$$

n_i 是类 ω_i 的象元数，j 为象元标号。

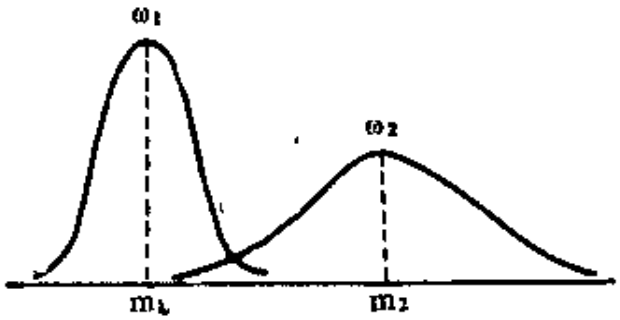


图 4.11　一维正态类分布

一维正态分布几何形态见图 4.11。不同类别的分布形态不同，主要是参数 m_i 与 σ_i 不同。

常用的分布是多变量正态分布，这时类分布为：

$$P(\mathbf{X}/\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}|\sum_i|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} \times (\mathbf{X} - M_i)^T \sum_i^{-1}(\mathbf{X} - M_i)\right] \tag{4.10}$$

式中 N 是参加分类的特征数(或波段数)，M_i 为均值向量，$\sum_i$ 为类别 i 的协方差矩阵，其估计值为：

$$M_i = \frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}\mathbf{X}_j \tag{4.11}$$

$$\sum_i = \frac{1}{n_i - 1}\sum_{j=1}^{n_i}[(\mathbf{X}_j - M_i)(\mathbf{X}_j - M_i)^T] \tag{4.12}$$

n_i 是类 ω_i 的象元数目，j 为象元标号，T 为矩阵的转置。图 4.12

是二维正态类分布图，平行于坐标平面的截面是等值椭圆面。

有了 $P(\mathbf{X}/\omega_i)$ 表达式，很容易建立判决函数 $g_i(\mathbf{X})$。观察式(4.10)，$(2\pi)^{N/2}$ 是个常数，对于比较大小不起作用，可以去掉；剩下的部分乘 $P(\omega_i)$ 计算起来很不方便，乘法与乘方太多，为了简化运算，判决函数取对数的形式，这样，(4.7)式改为：

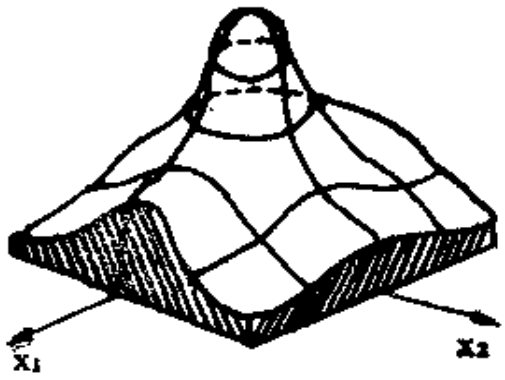


图 4.12　二维正态分布

$$g_i(\mathbf{X}) = \ln P(\omega_i) - \frac{1}{2}\ln|\sum_i| - \frac{1}{2}(\mathbf{X}-M_i)^T\sum_i^{-1}(\mathbf{X}-M_i) \quad (4.13)$$

在实际应用时，如果取各类的先验概率 $P(\omega_i)$ 相同，那末比较时，先验概率这一项也可以去掉，再约去 1/2，得到：

$$g_i(\mathbf{X}) = -\ln|\sum_i| - (\mathbf{X}-M_i)^T\sum_i^{-1}(\mathbf{X}-M_i) \quad (4.14)$$

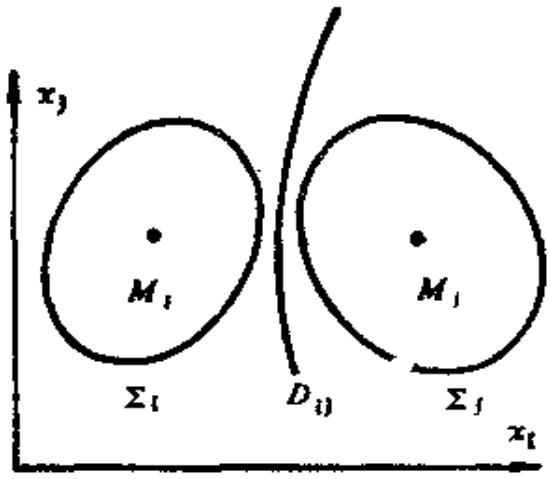
按照前述，只要求出各类中，最大的 $g_i(\mathbf{X})$ 类别，则 $x\in\omega_i$。

从图 4.11，4.12 可以看出，正态分布在均值处有一峰值，然后逐渐降低，几何图形在坐标上的投影有一定的规律性，如二维情况，在坐标平面上的等概率投影是椭圆或圆；三维时则在三维空间形成椭球或球。再继续增大维数，在多维坐标空间里投影图形叫做超椭球体但无法绘出。而且，不同类别椭球之间一定有判别边界，找到了两类之间的分界，也很容易把两类分开，如 4.3.1 简单实例所作二维平面中两类的判别边界。与实例类似，多维正态分布中任何两类之间的判别边界也表示为：

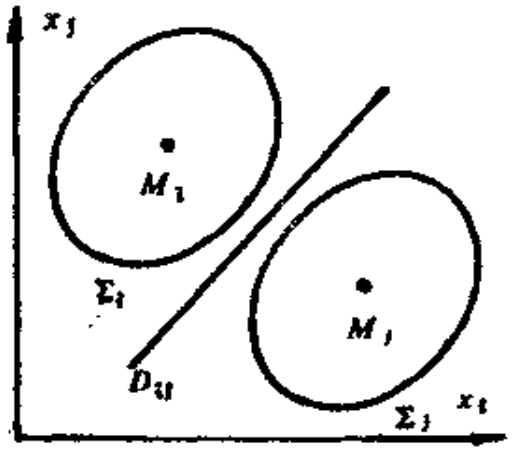
$$g_1(\mathbf{X}) - g_2(\mathbf{X}) = 0。$$

图 4.13 给出了协方差影响的两种不同正态分布投影及它们的判

别边界在二维空间的形态。



(a) $\Sigma_i \neq \Sigma_j$



(b) $\Sigma_i = \Sigma_j = \Sigma$

图 4.13 二维坐标面上的正态分布投影及两类判别边界

三、分类步骤

现归纳最大似然判别方法主要步骤：

(1) 确定需要分类的地区和使用的波段或特征分量数(见 4.4.2)，检查所用各波段或特征分量是否相互已经位置配准；

(2) 根据已掌握的典型地区地面情况，在图象上选择训练区(见 4.3.4)；

(3) 计算参数，根据选出的各类训练区的图象数据代入式 (4.11) 和 (4.12)，计算 M_i 和 Σ_i，确定先验概率 $P(\omega_i)$；

(4) 分类，将训练区以外的图象象元逐个逐类地代入 (4.13) 式，如果先验概率相同，则代入(4.14)式，对于每个象元，分几类就计算几次，最后比较大小，选择最大值得出类别；

(5) 产生分类图，给每一类别规定一个值，如分十类，就定每一类分别为 1,2,……,10，分类后的象元值便用类别值代替，最后得到的分类图象就是专题图象。由于最大灰阶值等于类别数，在监视器上显示时需要给各类加上不同的彩色，或者用不同的符号

在打印机上打出分类图，供目视检查；

（6）检验结果，如果分类中错误较多，需要重新选择训练区再作以上各步，直到结果满意为止（见 4.3.5）；

（7）硬拷贝输出，打印绘图，拍照或用成象设备输出结果，提供使用。

4.3.3 最小距离判别

最小距离判别类似于非监督分类中介绍的聚类方法，以模式点（象元）与均值点在特征空间（模式空间）中的距离为主要判别依据。不同的是，最小距离判别在有先验知识的前提下进行。方法仍旧是先选择训练区，计算参数，与最大似然判别不同处在于，这种方法不需要计算协方差矩阵，只需计算均值向量，用特征空间中训练样本的均值点的位置作为聚类中心，进行被分类的点与各类中心点的距离比较，距离哪个类别中心最近就判为哪一类。

这时判别函数可从距离公式求出。由式（4.3），特征空间中表示为向量$\mathbf{X}$的某点到第 i 类中心的距离为：

$$d(\mathbf{X},M_i)=\left[\sum_{k=1}^{n}(x_k-m_{ik})^2\right]^{1/2}\qquad n\text{ 为波段总数}$$

根据矩阵运算规则，上式可以改写成：

$$d(\mathbf{X},M_i)^2=(\mathbf{X}-M_i)^T(\mathbf{X}-M_i)$$

展开后

$$d(\mathbf{X},M_i)^2=\mathbf{X}^T\mathbf{X}-2M_i^T\mathbf{X}+M_i^TM_i^{*}\qquad(4.15)$$

为了使判别函数形式简单，不同距离相比较时的公共项可以删去，上式中删去 $\mathbf{X}^T\cdot\mathbf{X}$ 项，设判别函数为

---

* 因为 $\mathbf{X}$，M_i，$(\mathbf{X}-M_i)$ 都是列向量才可以这样展开。也可以利用向量的点积公式得到

$$\begin{aligned}(\mathbf{X}-M_i)^T(\mathbf{X}-M_i)&=(\mathbf{X}-M_i)\cdot(\mathbf{X}-M_i)\\&=\mathbf{X}\cdot\mathbf{X}-2M_i\cdot\mathbf{X}+M_i\cdot M_i\\&=\mathbf{X}^T\mathbf{X}-2M_i^T\mathbf{X}+M_i^TM_i\end{aligned}$$

$$g_i(\mathbf{X}) = 2M_i^T\mathbf{X} - M_i^T M_i \qquad (4.16)$$

去掉负号的原因是根据判别规则应求最大值，与最小距离的原则相反。这样，由判别规则，有 m 类

如果　　$g_i(\mathbf{X}) > g_j(\mathbf{X})$

即　　$2M_i^T\mathbf{X} - M_i^T M_i > 2M_j^T\mathbf{X} - M_j^T M_j$

对　　$j \neq i, j = 1, 2, \cdots, m$

成立，则　　$x \in \omega_i$

最小距离判别的主要步骤可简述如下：

（1）确定分类地区和波段，配准各分量；

（2）选择训练区；

（3）根据各类训练区图象数据代入式（4.11）计算 M_i；

（4）将训练区外图象象元逐个逐类代入（4.16）式，按判别规则比较大小，得到类别；

（5）产生分类图象；

（6）检验结果，如果错误较多需要重新选择训练区；

（7）硬拷贝输出专题图象。

最小距离判别与最大似然判别相比，最突出的优点是计算量小，只计算均值参量，而且矩阵计算也比较简单，因此这种方法节省计算机机时。另外，这种方法只用均值一个参数，避免用协方差矩阵，这样就避免了在样本数较少的情况下，协方差矩阵计算不准确而引起的误差。

最小距离判别也有限制之处，最大似然判别认为样本在模式空间各个分量上为正态分布，在多变量空间中形成椭圆或椭球分布，也就是各个方向上的散布情况不同，这样假设比较符合自然界随机变量的分布情况。而最小距离判别以距离作为标准，仅考虑均值位置，相当于假定各个分量上的分布相同，在多变量空间是圆或球形。这种假设有其局限性，这正是在正态分布中 $\sum_i = \sigma^2 \cdot I$ 对所有类别 i 成立的情形，即对所有类别协方差矩阵相等，且是对

角阵。这时式(4.14)($P(\omega_i)$ 相同)可以写成

$$g_i(\mathbf{X}) = -\ln\sigma^{2N} - \frac{1}{\sigma^2}(\mathbf{X} - M_i)^T(\mathbf{X} - M_i) \quad N\text{为特征数}$$

第一项与类别无关,可以去掉,再去掉系数,可得:

$$g_i(\mathbf{X}) = -(\mathbf{X} - M_i)^T(\mathbf{X} - M_i)$$

由本节前面的分析,可以得到(4.16)式,即:

$$g_i(\mathbf{X}) = 2M_i^T\mathbf{X} - M_i^TM_i$$

成为最小距离分类了。可见最小距离分类是最大似然分类的一种特例,当各类分布一致且先验概率相同时,两者等价。尽管如此,精度允许的情况下,仍常常使用这种比较简单的办法。

4.3.4 训练区的选择

在监督分类中选择训练区是重要的一步,训练区选择得准确与否,训练样本数是否足够,关系到分类精度的高低,所以这一步应该做好。

选择训练区的依据——最好的办法是选择一、二个典型区域,各类地物全有,进行实地调查,调查时对照将被分类的遥感影象,一一识别,在图上标好,再到计算机上将这些块数据提出。有时限于时间、地形、经费等客观因素不能实地调查,可以借助地图,或各种需要的专题图、航空像片、其它遥感数据的解译图等等,这些最好是与待分类的图象时间一致。如果在实际中不能做到这点,只好做近似处理,比如使用季节一致的航空像片和遥感解译图。在上述资料都没有的条件下也可以先作非监督分类,在分类结果中识别选择训练区,或用目视解译的经验在待分类图象上寻找醒目的类别目标作为训练区。当然,由此得来的训练区在数目上和准确性上都会受到影响。总之,选择训练区时,由于常采用人机交互方式进行,做分类工作的人员要有目视解译的能力,选择的类别样本分布越接近实际分布情况,分类结果将越正确。

训练样本选择后可作直方图,观察所选样本的分布规律,一般

要求是单峰，近似于正态分布曲线。如果是双峰，也就是好似二个正态分布曲线重叠，则可能是混合类别，需要重作。

训练样本的数目——由于训练样本数据用来计算均值和协方差矩阵。根据概率统计，协方差矩阵的导出至少需要 $N+1$ 个样本。这里 N 是多光谱空间的分量数，或经过选择的特征数。但这个数只是理论上的最小值，实际上，为了参数估计结果比较符合实际，样本数还应适当增多，又不致于计算量过大。美国遥感图象处理应用专家斯维恩(Swain) 和戴维斯 (Davis)曾主张实际应用中每一光谱类别获得 $10N$-$100N$ 样本数为好，这只是一个参考数，具体分类时还要看对图象的了解程度和图象本身的情况来确定提取的样本数量。

遥感图象的质量——选择训练区以前应对待分类的图象作一定的预处理工作，如辐射校正、几何校正及增强处理，以获得一幅比较清晰、对比度强、位置准确的图象以提高分类效果。因为质量较好的图象有利于目视解译，从而提高选择训练区的精确性。有时几何校正辐度很大，内插后的灰度不大精确，导致分类效果受影响，也可以先作分类，最后再作几何校正。如果只需要一个分类结果不要求位置精度，也可不作几何校正。总之，一切预处理均以有助于提高分类效果为准。

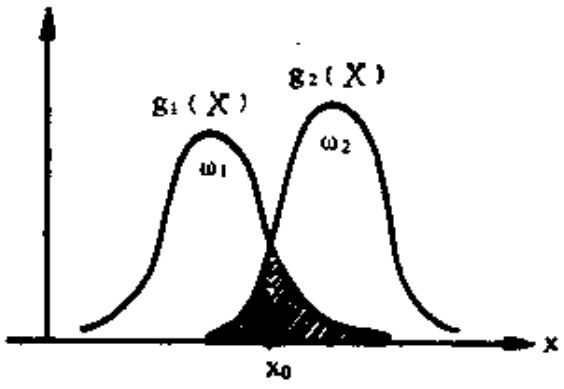


图 4.14　一维空间错误概率

4.3.5　检验

利用数学公式加先验知识作分类，只能尽可能接近自然特性，但不可能全部符合实际，所以作完分类计算有必要进行检验，计算一下分类错误率有多少。如果分类错误较少，例如 10% 以下，那么分类图可用，否则需要重新分类，重新选择训练区或改变

分类方法。这个可接受的分类精度也可由用户提出。根据图象质量、类别光谱差异、对训练区的了解程度、地形复杂程度等各种因素，以及使用要求确定一个适当的错误率标准。

现以最大似然分类为例，说明错误概率的意义。在理论上假定仅有一维二类如图 4.14 所示。由 (4.7) 式可得判别函数：

$$g_i(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X}/\omega_i)P(\omega_i)$$

图中，左峰代表类 ω_1，其纵坐标

$$g_1(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X}/\omega_1)P(\omega_1)$$

右峰代表类 ω_2，其纵坐标

$$g_2(\mathbf{X}) = P(\mathbf{X}/\omega_2)P(\omega_2)$$

两类之间分界处由式

$$g_1(\mathbf{X}) - g_2(\mathbf{X}) = 0$$

即

$$P(\mathbf{X}/\omega_1)P(\omega_1) - P(\mathbf{X}/\omega_2)P(\omega_2) = 0$$

决定。可以解出 x_0。在 x_0 左侧，$g_1(\mathbf{X}) > g_2(\mathbf{X})$，判为 ω_1，在 x_0 右侧 $g_2(\mathbf{X}) > g_1(\mathbf{X})$，判为 ω_2。但是，在 x_0 左侧，也有可能一些象元不是第一类，而属第二类，这时将会出现判错的情况。同样，x_0 右侧，也有属于第一类而判成第二类的情况。判错的可能性为错误概率，其大小就是图中阴影面积。其中，属于 ω_2 的 $\mathbf{X}$ 判为 ω_1 的错误概率：

$$E_{21} = \int_{-\infty}^{x_0} P(\omega_2) \cdot P(\mathbf{X}/\omega_2) \cdot dx \qquad (4.17)$$

属于 ω_1 的 $\mathbf{X}$ 判为 ω_2 的错误概率：

$$E_{12} = \int_{x_0}^{\infty} P(\omega_1) \cdot p(\mathbf{X}/\omega_1) \cdot dx \qquad (4.18)$$

总错误概率　　$E = E_{21} + E_{12}$*　　(4.19)

在实际上，对于多维情况，错误概率的计算将非常复杂。因此在应用时，往往采用简单实用的办法来估算错误率。

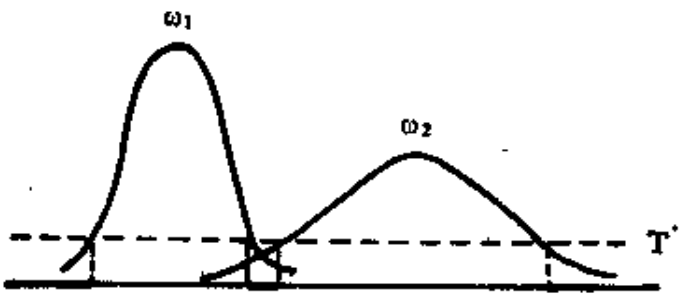
常用的估算方法是选取检验样本。一般地，在被分类的图象上，找一检验区，检验者应对本区非常了解。类似于训练区，各类样本及有代表性的地块都有，将实际地块的类别情况与分类结果在位置上一一对应，比较其一致性，一致为分类正确，不一致为分类错误。错误概率估计为

$$E = \frac{N_{错}}{N} \tag{4.20}$$

$N_{错}$为错误分类的样本数(象元数)，N为总样本数(象元数)。这种计算在先验概率相同的条件下可以较准确地反映这一分类的正确率。为了找到检验区，有时在分类初期实地调查、收集地图、分析遥感图象等工作时，有目的的选取较大或较多地块、较多样本数，一部分用作训练区，另一部分用作检验区；有时选取二部分困难，也可以以训练区的样本用作检验，这样做的问题是计算出的错误率一定偏低，只能作为错误概率下限来估计，实际的错误概率高于这个数值。

---

* 正因为重叠的分布造成错误概率，所以在分类时为了更加准确，可以采用阈值方法，设阈值为 T，如附图。



附图　"—"为拒分象元

如果

$$g_i(\mathbf{X}) > g_j(\mathbf{X})$$

且

$$g_i(\mathbf{X}) > T$$

对

$$j \neq i, j = 1, 2, \cdots m$$

成立，则

$$x \in \omega_i$$

阈值下面部分为拒分类，可避免重叠部分的分错情况。

(4.20)式所给的计算也可以用分类混淆矩阵表示，如表 4.1。

表 4.1　分类混淆矩阵实例

I \ J	1	2	3	4	5	6	7	8	类样本数	类正确率
1	154			2	7			12	175	0.88
2		208				14			222	0.94
3	15		192						207	0.93
4		2	1	253			6		262	0.97
5					230		20		250	0.92
6				43		213			256	0.83
7	2	1			6		235		244	0.96
8			17					392	409	0.96
总检验样本	2025		正确分类样本		1877		总正确率		92.7%	

左边一列表示已知类别样本 I，上边一行表示分类结果 J 类，例如第 1 类有 175 个样本，分到第 1 类的有 154 个象元，有 2 个分到第 4 类，有 7 个分到第 5 类，有 12 个分到第 8 类，因而正确率为 $154 \div 175 = 0.88$，依此类推。对角线的各元素总和是正确分类的样本数总和，在表中为 1877。按先验概率相同计算，总正确率为 92.7%，公式为：

$$R = \text{总正确率} = \frac{\text{正确分类样本数}}{\text{总检验样本数}} \times 100\% = \frac{N_{正}}{N} \tag{4.21}$$

(4.20)和(4.21)式之和应为 100%。如果先验概率不同，则总正确率应为各类分类正确率的加权和：

$$R = \sum_{i=1}^{m} P(\omega_i) \cdot R_i \quad i = 1,2,\cdots,m \tag{4.22}$$

§ 4.4　分类技术的改进

无论是监督分类还是非监督分类，都是依据光谱特性的点独

立的单一分类方法。由于实际情况的复杂性，这种分类有很大局限性，因此，产生了许多改进方法，目的在于提高分类结果的正确率。

仅仅依据光谱特性分类有一定的局限性。这种方法对于地面地物较单一，而且地物光谱差距较大时，可以得到较好的效果，而对有些地物则不然，例如：覆盖的下伏物，象植被覆盖下的土壤，传感器所接收的是全覆盖的植被光谱或不完全覆盖的植被与土壤的混合光谱，这种光谱规律如果不是和土壤有明确的相关关系，要想分出土壤类别，比较困难；另外，对于所谓"异物同谱"现象也比较困难，不同地物却是相似的光谱特征，仅仅根据光谱不可能分出它们。例如：不同的森林生长在不同的海拔高度上，通过光谱分析只知道全是森林地区，这时要想分出层次，必须借助于地形这一参量，不同高度森林品种不同。

点独立的分类也有相当的局限性。所谓"点独立"是认为遥感图象中每一象元的信息仅仅来自于地面上与象元对应区域。实际上，由于光散射的作用，相邻象元的光谱信息会相互影响，图象象元亮度所反映的信息应该是以中心象元为主，并混有相邻象元的影响；另外，从地物本身的分布特性来讲也往往是相互关联的。例如：成片的由多个象元组成的地块，由某种地物覆盖，假定是植被，结果却分类成在植被象元中间包围着几个象元的岩石，这与实际不符，可能是由于这几处植被覆盖度过低，或者其它原因引起的分类错误。

分类方法的改进有多种途径：为了克服点独立分类的局限性，采用了邻域分类；在用单一方法分类精度不高的情况下，常交替使用不同的处理方法。例如：非监督分类与监督分类混合使用；在数据量过多的情况下，进行特征提取等。近年来，由于各种卫星资料越来越多，多种信息的复合应用越来越发展。不光是遥感信息的复合，还有遥感与非遥感信息的复合，突破了单一信息源和只

依靠光谱特性的限制，使图象质量大大提高。不仅有利于目视解释，更有利于计算机分类精度的提高，并发展到地理信息系统和专家系统技术(见第五章)。

下面介绍几种主要的改进方法。

4.4.1 聚类与监督分类

监督分类需要利用先验知识寻找训练区，并且对训练区中各类分别作直方图，其直方图形态必须接近于正态分布，至少应该是单峰值而不是双峰值。这种预先的工作也可以在计算机的协助下进行，这就是非监督分类方法与监督分类方法的结合。主要步骤是：

1. 聚类　从待分类的图象中选择几个子区，从目视观察，这几个子区基本上包括了所要分类的各种类别信息。对子区作聚类，计算分出的光谱类别统计量。

2. 识别　使聚类得到的结果与地面覆盖的实际地物（信息类别)一一对应起来。作到这点，仍需要对照聚类图进行实地调查，或从地图、专题图等参考资料得到。在这一步，有时 2 至 3 个光谱类对应于一个信息类，因而得到合并；有时某一光谱类没有对应地物时，也可以去掉。也可选二个主要波段，找出各类均值，若两类均值位置过近，使类别椭圆有重叠，即分类效果太差时，还得返回第一步并调整参数，直到较为满意。

3. 特征选择　上一步分析时如果发现哪个特征(分量或波段)分类效果差，可以去掉（4.4.2)。

4. 最大似然分类　依据第 3 步所确定的特征及第 2 步所确定的类别，以这些类别象元作为监督分类的训练区象元作待分类图象的最大似然分类，并按分类结果给每个类别以对应于地物的类别标号。

根据经验，由于借助于聚类方法来选择训练区，有时可以提高分类速度，并解决单纯监督分类时选择训练区的困难，特别是在无

先验知识可用的条件下，这是一条解决问题的途径。另外，通过人机交互选择训练区时，往往尽可能选择单一类别，而实际上却有些象元在 80m 或 30m 见方的范围内（MSS 和 TM 象元分辨率）类别混合在一起，特别是类别与类别的边界地带，常出现混合象元，最大似然分类时有可能将这些象元归入拒分类。而聚类时却会将它们分到某类，使类别边界较清楚，体现了这种混合分类方法的优点。

当然，要想利用这种分类方式得到较好的结果，最重要的还是实际经验。有人提出，在作子区聚类时应一个子区一个子区分开作，效果更好，但由于研究对象不同，并不是普遍都能适用，还要在具体应用时选择处理。

4.4.2 特征提取

遥感数据由于是多光谱测量，波段多、数据量大，例如 MSS 四个波段，TM 七个波段，还有更多波段的航空航天传感器。在分类时，特别是用最大似然分类方法，要对每一类计算均值和协方差矩阵，以及判别时的比较，计算量是相当大的。实际上，并不是每一个波段都是分类时最好的信息源，有时一些波段之间高度相关，因此，能否选择性地去掉一些对分类贡献不大的波段，使精确度变化不大。在作分类时所使用的波段或波段组合称为特征，所以这个选择过程称作特征提取或特征选择。这样做常常可以减少特征数或提高分类效果，达到减少计算量的目的。

一、方法

特征提取的方法很多，常用的有以下几种：

1. 最佳分类特征的经验选择

这种选择常常是在多次实验的基础上，而且要求实验者有丰富的专业知识，对被分类的地物特征十分了解，对图象上的目视标志清楚。实验主要是各种合成方案对比，选择一种最佳合成图象，使图象上的被分类地物所处区域亮度差异明显，色调界限较分明，

有利于利用光谱特性(亮度特性)进行分类,通常分类效果较好。

例如:提取植被信息可用 AVHRR2 — AVHRR1/AVHRR2+AVHRR1 或 TM4 — TM3/TM4 + TM3 (见 3.4.4), K-T 变换(见 3.5.3); 作某些湖体内部类别区分, 可用 MSS 4/3, 2/1, 3/2 三种特征(湖北洪湖水域资源调查资料); 石油调查可用 MSS1/2, ?/3, 2/4 (河北含油构造处理资料)等等。

2. K-L 变换后的主成分选择

K-L 变换(见 3.5.2)把坐标旋转到数据散布最大的几个方向上。一般来说,取前几个主分量,可以集中所需要的信息, 达到特征减少的目的; 有时根据不同的目的也可选取其中某个或某几个主分量, 例如: 研究火灾区域主成分 3 和 4 效果好。分析时也可用原图某个波段与主成分配合使用,提高效果。

图 4.15 示意 K-L 变换的一种效果,在二维空间 x_1、x_2 中,两类正态信息 ω_1、ω_2, 其分布如图,在 x_1 和 x_2 方向上判别边界分别为 x_1^0 和 x_2^0; 经过变换后的第一主成分 y_1, 这时判别边界为 y_1^0, 可见只有 y_1 这一个特征便可以分开 ω_1 和 ω_2 两类。

3. 典型分析减少特征

典型分析与主成分分析类似,也是进行一坐标变换,使坐标系旋转到另一方向上。在这方向上,类别内部数据集中,而类别之间分离,有利于分类。或者说,类间方差较大,类内方差较小。其示意图如图 4.16, 图中原空间为二维 x_1x_2 空间, 有二个类别 ω_1、ω_2, y_1 为主成分变换后的第一主成分, 图中可以看出, 在这种情况下 y_1 特征不能很好地分离 ω_1 和 ω_2, 而 z_1 轴是作典型分析变换后的轴, z_1^0 为判别边界点,可见,典型分析可以解决主成分分析不能解决的问题,达到减少特征提高分类效果的目的。

下面简单介绍典型分析, 对于更多的数学推导和理论分析不作介绍。

(1) 原理

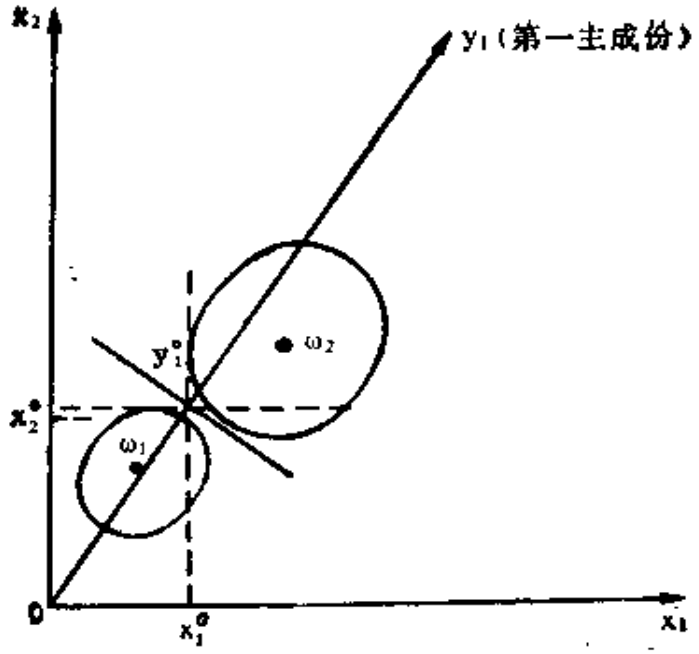


图 4.15　K-L 变换减少特征示意图

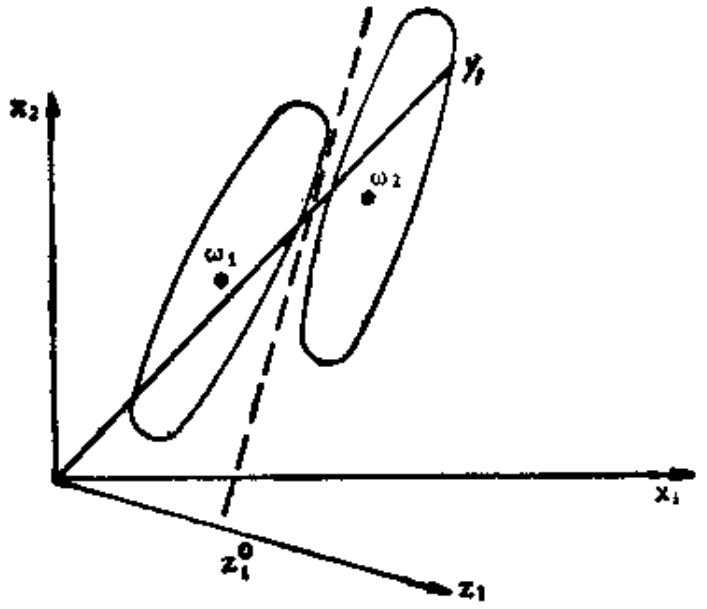


图 4.16　典型分析减少特征示意图

典型分析之所以能使类别分开，主要是在典型轴的方向上类别的可分性最好。而这种可分性对于一维，是以类间方差与类内方差的比值来度量的，即：

$$\lambda = \sigma_A^2/\sigma_w^2 \tag{4.23}$$

σ_A^2 为类间方差，σ_w^2 为类内方差。对于多维情况则用协方差矩阵来表示。类内协方差矩阵表示为：

$$\Sigma_w = \left[\sum_{i=1}^{M}(n_i - 1)\Sigma_i\right] \Big/ \sum_{i=1}^{M} n_i \tag{4.24}$$

Σ_i 为第 i 类的协方差矩阵，共有 M 类，n_i 为第 i 类象元数。类间协方差矩阵为

$$\Sigma_A = E[(M_i - M_0)(M_i - M_0)^T] \tag{4.25}$$

E 为求期望，M_i 为第 i 类均值向量，M_0 为整个数据均值向量

$$M_0 = \frac{\sum_{i=1}^{M} n_i M_i}{\sum_{i=1}^{M} n_i} \tag{4.26}$$

这样：

$$\lambda = \frac{\sigma_A^2}{\sigma_w^2} = \frac{D^T \Sigma_A D}{D^T \Sigma_w D} \tag{4.27}$$

其中，D 定义为一组特别的向量之一，只要 λ 达到最大值，D 的方向就是类别可分性最好的方向即典型轴方向，另外的 λ 所对应的其它方向逐渐降低其可分性。所以典型分析就是寻找 D，以此为依据作线性变换而达到特征提取的目的。

（2）方法

变换公式与一般线性变换公式相同，为：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{BX} \tag{4.28}$$

其中 $\mathbf{X}$ 为变换前的向量(代表象元)，$\mathbf{Y}$ 为变换后的向量，其分量为变换后的象元亮度，$\mathbf{B}$ 是由 n 个 $\mathbf{D}$ 向量组成的矩阵，$\mathbf{B} = (\mathbf{D}_i^T,$

$\mathbf{D}_1^T, \cdots, \mathbf{D}_n^T)^T$ n 为特征数。为了求出 $\mathbf{B}$，必须求出特征值 λ 和它所对应的 $\mathbf{D}$，$\mathbf{D}$ 是变换后新坐标空间的坐标轴方向向量，λ 是新轴方向上方差的比值如式 (4.23)，满足方程

$$(\Sigma_A - \lambda\Sigma_w)\mathbf{D} = 0 \tag{4.29}$$

则对于所有的 λ 和所有的 $\mathbf{D}$，应满足方程：

$$(\Sigma_A - \Lambda\Sigma_w)\ \mathbf{B} = 0 \tag{4.30}$$

这里，Λ 是由 $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$ 组成的对角阵。从而求出各个 λ 和 $\mathbf{D}$。

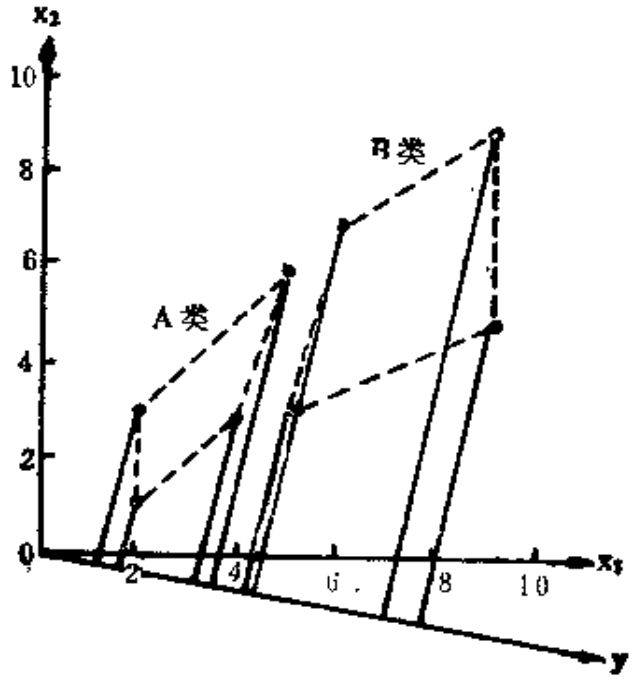
与主成分变换相比，相似的是 $\mathbf{D}$ 也是特征值 λ 所对应的特征向量，不同的是典型分析有约束条件

$$\mathbf{B}^T\Sigma_w\mathbf{B} = I \tag{4.31}$$

即变换后的类内协方差矩阵是单位矩阵，并且要做到减少特征，至少要有一个 λ 为零，这是可以实现的。

例题：[73]

有二维二类数据如附图所示，在 x_1x_2 空间需要分类。为使二个特征变



例题图　可分类的第一典型轴(图中 y 轴)

成一个特征，现作一典型分析变换，使数据类别在第一典型轴上可分，目的是寻找这种变换的变换系数矩阵，最终实现变换，以便在一维空间实现分类。先求出

$$\Sigma_{A类}=\begin{bmatrix}2.25 & 2.59\\ 2.59 & 4.25\end{bmatrix},\quad \Sigma_{B类}=\begin{bmatrix}4.25 & 3.00\\ 3.00 & 6.67\end{bmatrix}$$

因每类点数相同，式(4.24)，求类内协方差矩阵 Σ_w 可以简化为求平均

$$\Sigma_w=\frac{1}{2}(\Sigma_{A类}+\Sigma_{B类})=\begin{bmatrix}3.25 & 2.80\\ 2.80 & 5.46\end{bmatrix}$$

由(4.25)式求得类间协方差矩阵

$$\Sigma_A=\begin{bmatrix}8.00 & 5.50\\ 5.50 & 3.78\end{bmatrix}$$

为求出 λ 和 $\mathbf{D}$，用式(4.29)，为得到非平凡解，必须满足

$$|\Sigma_A-\lambda\Sigma_w|=0$$

代入数据

$$\begin{vmatrix}8.00-3.25\lambda & 5.50-2.80\lambda\\ 5.50-2.80\lambda & 3.78-5.46\lambda\end{vmatrix}=0$$

解得 $\lambda_1=2.54$，$\lambda_2=0$，可见只有一个典型轴存在 $(\lambda_2=0)$。再代入(4.29) $(\Sigma_A-2.54\Sigma_w)\mathbf{D}=0$

得

$$\begin{bmatrix}-0.26 & -1.59\\ -1.59 & -10.06\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_1\\ d_2\end{bmatrix}=0$$

由式(4.31)有

$$[d_1d_2]\begin{bmatrix}3.25 & 2.80\\ 2.80 & 5.46\end{bmatrix}\begin{bmatrix}d_1\\ d_2\end{bmatrix}=1$$

两式联立，解出

$$d_1=-0.633,\ d_2=0.101\quad \mathbf{D}=\begin{bmatrix}d_1\\ d_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.633\\ 0.101\end{bmatrix}$$

这样，得到变换关系

$$\mathbf{Y}=\mathbf{D}^T\mathbf{X}$$
$$=[-0.633\ \ 0.101]\mathbf{X}$$

于是实现了典型分析变换。

二、判断可分性—— J-M 距离

在存在多种特征提取方案时，在分类前，为了判断哪种方案最好，分类后错误率最低，或判断哪个或哪几个特征可分性最好，常使用 J-M 距离 (Jeffries-Matusita 距离)： 两种类别分布之间的 J-M 距离定义为：

$$J_{ij}=\left\{\int_x[\sqrt{P\ (\mathbf{X}/\omega_i)}-\sqrt{P\ (\mathbf{X}/\omega_j)}]^2\,d\mathbf{X}\right\}^{1/2} \tag{4.32}$$

这可以看作两类 i 和 j 之间的平均距离测度，对于正态分布类别，上式可改写成：

$$J_{ij}=[2(1-e^{-\alpha_{ij}})]^{1/2} \tag{4.33}$$

其中

$$\alpha_{ij}=\frac{1}{8}(M_i-M_j)^T\left(\frac{\Sigma_i+\Sigma_j}{2}\right)^{-1}(M_i-M_j)$$

$$+\frac{1}{2}\ln\frac{\left|\frac{\Sigma_i+\Sigma_j}{2}\right|}{|\Sigma_i|^{1/2}|\Sigma_j|^{1/2}} \tag{4.34}$$

M_i，M_j 与 Σ_i，Σ_j 分别是 i 类 j 类的均值和协方差，α_{ij} 又可称为 Bhattacharyya 距离(贝特卡瑞雅距离)。由于 α_{ij} 大则 J_{ij} 大，α_{ij} 小则 J_{ij} 小。 Bhattacharyya 距离也可以作为可分性度量的一种距离测度。

对于多类情况，总的 J—M 距离为

$$J=\sum_{i=1}^{M-1}\sum_{j=i+1}^{M}P(\omega_i)P(\omega_j)J_{ij} \tag{4.35}$$

M为总类别数，$P(\omega_i)P(\omega_j)$ 分别为 i 类和 j 类的先验概率。

一般来说，两类光谱类别均值之间的距离越大，两类的 J—M 距离也越大，可分性越好，其变化的快慢受协方差矩阵影响。可以说，当 J—M 距离增大时，这两类分类的正确率就越高，当增大到

一定程度，两类均值之间距离再继续增大，J—M 距离将达到“饱和”，这时，可以认为可分性达到最好，分类时正确率应该是百分之百。当然，实际上是没有百分之百的。

因此，J—M 距离的大小可以用来衡量几种分类特征组合的可分性好坏。选取几种组合方案，在训练区内，使用已知象元计算 J 值，取 J 值最大时的方案，可以在分类前预见分类结果的优劣及决定采用哪种特征提取方法。

判断可分性还可以利用散度或变换散度来测量，在此不作介绍。另外，对于最小距离分类方法，由于没有用到协方差矩阵这个参数，可分性的测量常用距离测度，如 (4.3) 式，计算简单但是不能估计出分类的正确率。

4.4.3 分类树

对于多种类别的分类，当一种特征组合不能同时分出多种类别时，可以采取逐步分类的方法。把要分的类别分成层次，先做大类别的分类，得到第一次结果。分出的每一大类各作进一步的分类，分类时只用已分到本大类的象元，分类方法可以更换，选取的特征也可以更换，以提高这一组类别的可分性，如此进行，越分越细，直到所有类别全部分出为止。

将这种逐次分类的方法画成示意图，类似树状称为分类树或信息树。每分类一次成为一层，每个结点往下分叉，其形状类似图 4.6。不同的是图 4.6 表示一种分类的过程，而分类树则表示多次分类过程。每一次分类可以只分两类(又称序贯分析)，也可以多类。

例如：土地利用的分类，要想一次分类解决问题很难做到。一些植被光谱特征十分接近，分类时需有辅助处理，形成新的特征组合，因此，第一层先分出云、地表水、裸土、人工设施和植被；第二层专门提出植被类别区分类，设法分出自然植被和人工植被；第三层再作处理分别从自然植被中分出森林、灌木和草地，从人工植被中

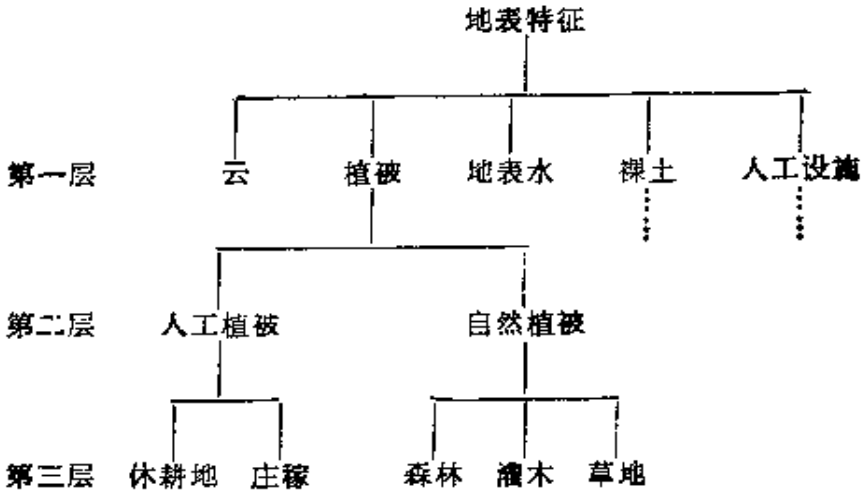


图 4.17　分类树

分出庄稼地和休耕地，如图 4.17 所示。这样或许休耕地和草地光谱很相近，但由于休耕地的地块夹杂在庄稼地中已被分入人工植被，再次分类时就避免了二者混淆的可能。当然在每一层的分类方法上还是要认真研究的。

分类树的思想主要建立在地物特征的复杂性上，分层处理时力求每一层的类别特征突出，可分性较好，使处理较为容易。因此，如何分组对结果影响很大。

4.4.4　邻域分类介绍

前面各种分类方法都是基于单个象元的光谱信息，即各象元之间信息是独立的(点独立)。这个出发点有一定的局限性，因而不可避免地带来较大的分类误差。 因为自然界的景物极其复杂，物体本身的光谱性质总带有周围许多环境因素的影响，使不同类别的物体常具有相近的亮度值，给分类带来了困难。如果在考虑对一个象元判别的时候，不仅依据它的光谱亮度，还考虑它的空间位置、背景信息，也就是考虑一个象元与它周围邻近象元的关系，这样可以提高分类的精度。

邻域分类就是在分类过程中依据光谱信息和空间信息的综

合，某些具有相似光谱性质的类别，可以根据它们的邻域结构得以区分，有可能减少整个分类过程的错分率。

由于邻域之间的关系随着距离的增大而减少，只有相邻接的几个元素才影响大，远处象元之间影响小，可以不予考虑。因此邻域分类实际上只考虑某个象元上下左右四个相邻象元，或周围八个象元的影响，如图 4.18 所示。

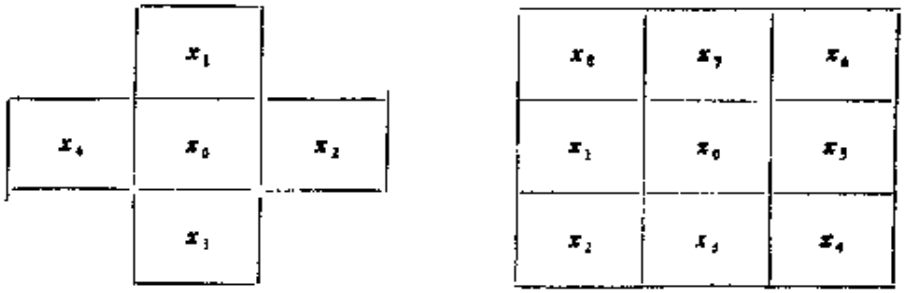


图 4.18　四邻域与八邻域

以四个邻点为例，根据最大似然判别法则，当点独立分类时，如果 x_0 出现的条件下 ω_i 的可能性 $P(\omega_i/\mathbf{X}_0)$ 最大，则 $\mathbf{X}_0$ 判归类别 ω_i，即 $\mathbf{X}_0 \in \omega_i$。邻域分类则要考虑不只 $\mathbf{X}_0$，还有 $\mathbf{X}_1$，$\mathbf{X}_2$，$\mathbf{X}_3$，$\mathbf{X}_4$，所以，判别原则改为：如果

$$P(\omega_i/\mathbf{X}_0,\mathbf{X}_1,\mathbf{X}_2,\mathbf{X}_3,\mathbf{X}_4) > P(\omega_j/\mathbf{X}_0,\mathbf{X}_1,\mathbf{X}_2,\mathbf{X}_3,\mathbf{X}_4)$$

对　　$j = 1, 2, \cdots m, j \neq i$

成立，则　　$\mathbf{X}_0 \in \omega_i$

设邻点 x_1，x_2，x_3，x_4 的类别分别为 θ_1，θ_2，θ_3，θ_4，因此求概率不仅与邻点位置还与邻点类别有关，利用 Bayes（贝叶斯）公式，

$$P(\omega_i/\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4)$$
$$= P(\theta_0 = \omega_i/\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4)^*$$
$$= \frac{P(\theta_0 = \omega_i, \mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4)}{P(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4)}$$

---

* $\theta_0 = \omega_i$ 表示象元 $\mathbf{X}_0$ 属于 ω_i 类。

$$
\begin{aligned}
&- \Big\{ \sum_{i_1=1}^{m} \sum_{i_2=1}^{m} \sum_{i_3=1}^{m} \sum_{i_4=1}^{m} P(\theta_0 = \omega_i, \mathbf{X}_0, \theta_1 = \omega_{i_1}, \mathbf{X}_1, \theta_2 = \omega_{i_2}, \mathbf{X}_2, \theta_3 \\
&= \omega_{i_3}, \mathbf{X}_3, \theta_4 = \omega_{i_4}, \mathbf{X}_0) \Big\} \Big/ \{ P(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4) \} \\
&- \Big\{ \sum_{i_1=1}^{m} \sum_{i_2=1}^{m} \sum_{i_3=1}^{m} \sum_{i_4=1}^{m} P(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4) / \theta_0 = \omega_i, \theta_1 \\
&= \omega_{i_1}, \theta_2 = \omega_{i_2}, \theta_3 = \omega_{i_3}, \theta_4 = \omega_{i_4}) P(\theta_0 = \omega_i, \theta_1 = \omega_{i_1}, \theta_2 \\
&= \omega_{i_2}, \theta_3 = \omega_{i_3}, \theta_4 = \omega_{i_4}) \Big\} \Big/ \{ P(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4) \}
\end{aligned}
\tag{4.36}
$$

在比较时，分母对比较大小不起作用，所以主要求分子。

比较大小时计算量将是非常大的，根据判别法则，对每个象元点都要分别求出它归为各类的概率，在求每一类概率时都要各个邻点归为各类的各种组合可能全考虑到。如只考虑 x_1 与 x_4 两个邻点，对于二类，则要考虑 $\theta_1 = \omega_1$，$\theta_4 = \omega_1$；$\theta_1 = \omega_1$，$\theta_4 = \omega_2$；$\theta_1 = \omega_2$，$\theta_4 = \omega_1$；及 $\theta_1 = \omega_2$，$\theta_4 = \omega_2$ 的四种情况，由此可以看到计算工作的复杂性。为了解决这个问题，常常在运算时作一些假设使问题简单化，或建立过程模型，如马尔可夫过程模型等以帮助问题的解决。

实验表明，邻点所用多少直接影响分类的正确率。如使用二个邻点正确率为 87%，六个邻点正确率为 95%，而八个邻点正确率为 97%。当然，随正确率的提高计算量也会大大增加。对地物类别试验划分发现[15]，这种分类对于消除噪声与斑点有利；改正由于类别交界处混合象元引起的交界处“破碎”现象；这种方法比逐点分类结果有更好的连通性和象元的空间集群性。

4.4.5 多种信息的复合

随着对遥感数据定量分析精度要求的提高，以及计算机价格的降低及计算机技术的进步，又由于近年来遥感数据来源的增多，

多种信息的复合技术越来越多地用于分类和其它定量分析。

一、多种遥感信息的复合

多种遥感信息主要指不同传感器接收的遥感图象数据，在位置相互配准后，形成新的多波段或多时相的复合图象。由于不同传感器接收的数据地面分辨率与光谱分辨率多有不同，新复合的图象使它们的优点互相补充，取长补短，提高地面分辨率或提高光谱分辨率，产生一幅高质量的图象，可用于目视解译分析或进一步的计算机定量分析。在选取复合方案时，一定要有利于解译或处理，优于原来的各个分量。

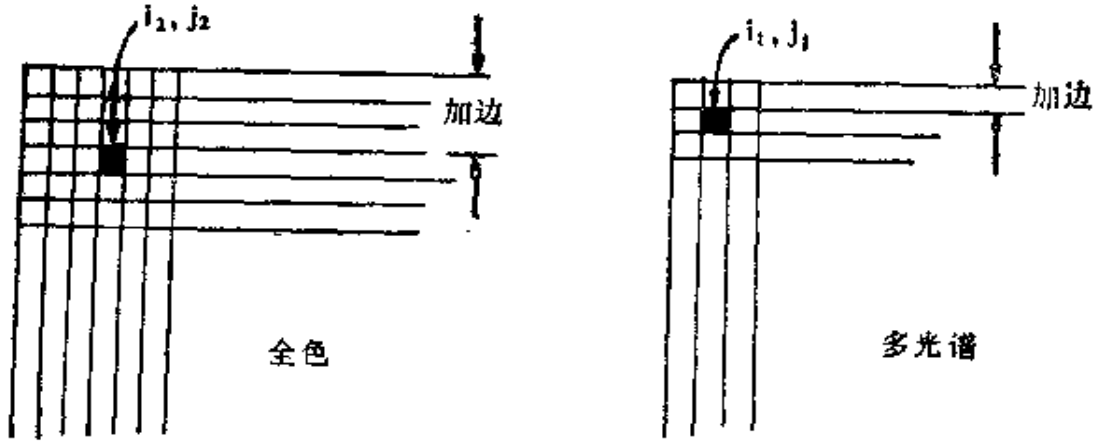


图 4.19　相关标准窗口和搜索区示意图

下面列举几个复合实例：[43][44]

(1) 法国地理院处理 SPOT 图象时，将多光谱图象和全色图象配准，对于同时获取的两种图象，经过几何纠正，使多光谱图象的地面分辨率明显提高。

在做法上，首先对多光谱图象进行内插，使它和全色图象具有相同的象元密度。再在屏幕上对同一地区两张图象对照，选出均匀分布的相对纠正点 20 至 30 个，用多项式方法求相对纠正系数，然后对全色图象进行灰度重采样，完成两类影象的相对纠正。这一步是建立在原两类图象象元地面分辨率不相同 (20 米和 10 米)的

基础上(参考第一章)。

下一步是进行多光谱图象的辐射改正，如图 4.19。以多光谱图象为准，对多光谱图象中象元 (i_1, j_1) 作辐射改正，以该象元为中心开 3 × 3 的标准窗口；同时，在全色图象相应位置范围内，对象元 (i_2, j_2)为中心的移动窗口计算相关系数，找到具有最大相关系数 ρ 的象元 (i_2, j_2)

$$\rho = \frac{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij} \cdot y_{ij} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2 - \bar{y}^2}} \tag{4.37}$$

则 (i_1, j_1) 的改正值，可按下式计算：

$$G(i_1, j_1) = \alpha \cdot \rho \cdot [g(i_2, j_2) - \bar{g}] + \bar{G} \tag{4.38}$$

式中 G 代表多光谱影象灰阶，g 代表全色影象灰阶，$\bar{G}$、$\bar{g}$ 分别为各自窗口内象元灰阶平均值，α 为系数。这样多光谱图象的三个波段都进行了辐射改正。最后，将三个波段的结果合成，得到配准的多光谱影象。

(2) 将 MSS 图象、侧视雷达(SLAR)图象*和气象卫星图象进行复合，研究洪水监测。

以花园口黄河段为试验区，首先利用控制点通过多项式内插作几何纠正和配准，然后将多种图象复合并分类。分类方法为最大似然判别方法。

从原信息特征看，多时相的气象卫星图象，虽然地面分辨率较

---

* 侧视雷达 (Side looking Airborne Radar) 简称 SLAR。一般这种技术用于获得波长在微波范围的遥感图象数据。微波电脉冲以相对于垂直方向的一定入射角向飞机一侧辐射，一些能量从地面散射并返回被飞机接收到，从返回的信号强度可以获得地球表面的信息。这种传感器主动发出信号又接收返回信号的方式又称为主动遥感。

粗，但覆盖范围大，同步性强，能昼夜获取信息；可记录洪水发生发展过程，作动态监测；MSS 图象具有多时相多波段特征，几何性能好，分辨率适中，可有效地获取洪水信息；侧视雷达可全天候获得洪水动态信息，是跟踪和实时监测洪峰的最佳信息。经过复合和分类，可与各自单独分类作一比较：从单独分类情况看，MSS 图象可区分洪水、静态水、水田、旱田、湿地等信息；侧视雷达图象能突出水体和线性地物如水陆边界、居民地、道路、水渠等；气象卫星图象只能划分水体、高滩、水田湿地三大类。而从复合分类情况看，MSS 图象与侧视雷达图象复合，不仅可获得洪水、水田、旱地等地物，亦可获得大堤、水渠等线性地物；MSS 图象与气象卫星图象复合，增加了气象卫星图象的碎部信息，校正了某些因子(如云)导入的误差，使这种图象在洪水监测中更具实用意义。

(3) SPOT 与 TM 复合的假彩色合成图象

南皮试验区 SPOT(1986, 5, 15) 与 TM(1985, 6, 25) 的假新色合成图象，由 SPOT 波段 3，TM 波段 5 和 4 分别赋予红、绿、蓝合成。在相当程度上体现了 SPOT 图象空间分辨力高，TM 图象具有中红外光谱信息的特点与优势，使原来使用其中一种图象数据难以识别或易混淆的地物变得清晰可辨。例如果园、麦地(水浇地)、春播地(旱地)、苜蓿地等在复合图象上都呈现不同色彩而易区分；村镇居民点的轮廓边界得到明显改善；田块、渠系、道路网等更加清晰。表明采用图象复合技术能进一步提高第二代资源卫星的应用价值。(中科院遥感卫星地面站遥感信息分析应用研究室提供)

二、遥感信息与非遥感信息的复合

遥感信息与非遥感信息的复合可以包括各种来源的遥感图象数据和地形图，各种专题图等非遥感数据例如：地质、气象、水文、土壤、地貌、植物等；行政区划、人口、土地、经济收入等。根据分析内容的需要而选择。在分析时一定要做到空间位置上配准。总

之，这些非遥感数据的添加提高了遥感数据分析的效果，可以完成许多单纯遥感信息不能实现的工作。（请见 7.2.3节）

为了实现遥感与非遥感信息的复合，需要建立空间数据库，对大量数据存贮、恢复、操作、分析和显示，这些功能的完成，需借助于下面介绍的地理信息系统技术。

第二部分　地理信息系统（GIS）

第五章　地理信息系统的基本概念

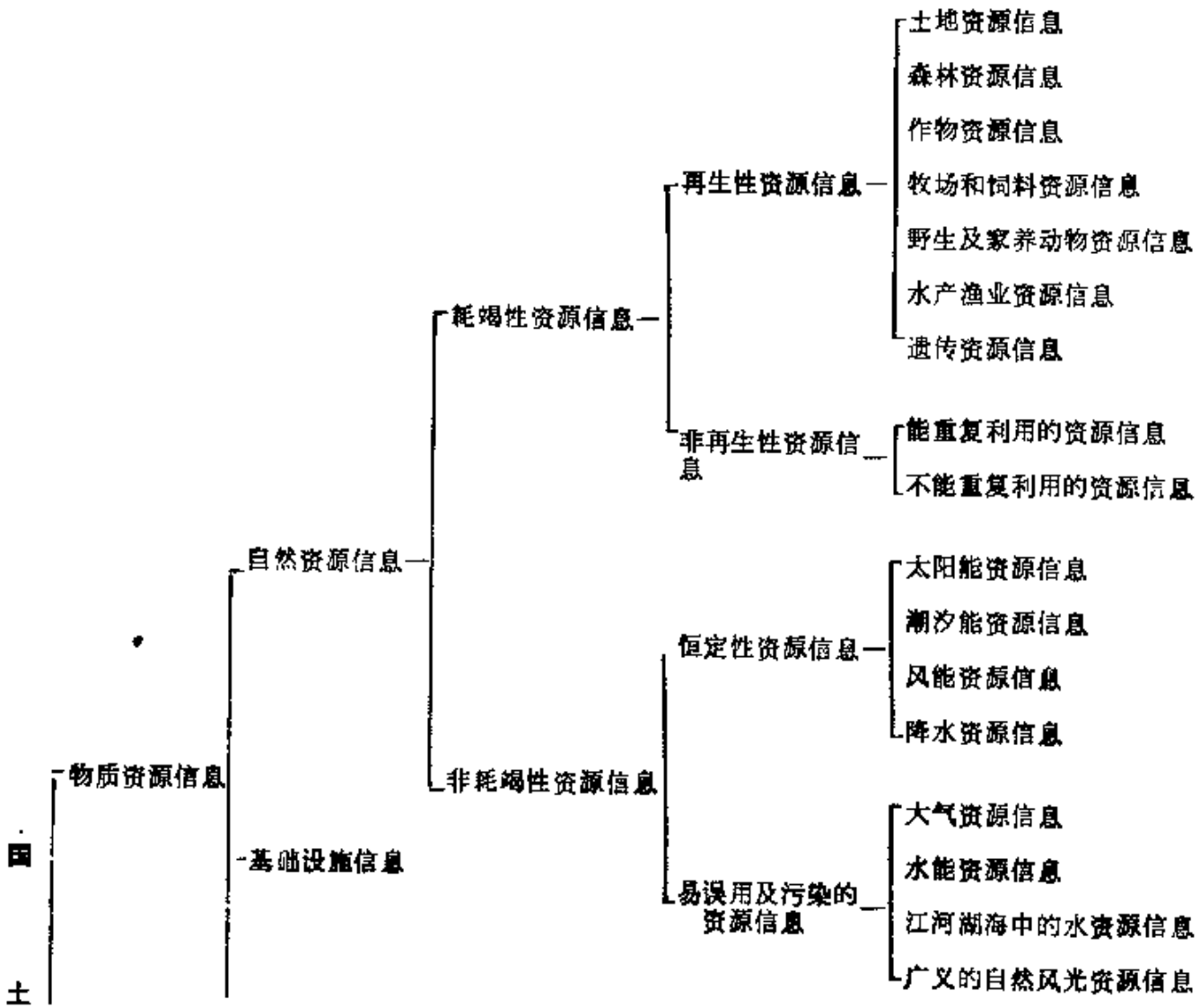
§5.1　什么是地理信息系统

长期以来，地学工作者的重要任务之一是通过地图这一工具，实现对空间数据的收集、存贮、分析和显示。地图上的标记通过人的解译，恢复原来的各种信息：　位置信息和非位置信息。　例如：某点的位置可以从地图上利用坐标读出经度与纬度；两点间的相对位置可根据方位和距离确定；　任一点的高度值可从地形图上读出；　土壤类型可从土壤类型图上读出等等。为了便于解释和理解，所有地图都画有图例。

随着计算机技术的发展，用计算机帮助人们解决复杂的分析，首先必须做到用计算机来完成对空间数据的收集、存贮、分析和显示，过去用地图解决的一些问题现在使用新的技术——地理信息系统来完成。这种技术需要借助于计算机硬件设备和特殊的软件包，广泛地连接地学数据的空间关系、时间关系，同时又逐渐与遥感数据的处理联系起来，成为一有广泛应用和发展前景的新领域。

5.1.1　定义

如何对“地理信息系统”这一名称作学科理论上的严格定义还没有统一的叙述。因为地理信息系统的内容还在不断地增加，对于具备了哪些功能的系统就可以叫做“地理信息系统”没有统一的看法。因而同样是一个系统，在功能上可以差异很大。对于名称，


国土
物质资源信息
自然资源信息
基础设施信息
耗竭性资源信息
非耗竭性资源信息
再生性资源信息
非再生性资源信息
恒定性资源信息
易误用及污染的资源信息
土地资源信息
森林资源信息
作物资源信息
牧场和饲料资源信息
野生及家养动物资源信息
水产渔业资源信息
遗传资源信息
能重复利用的资源信息
不能重复利用的资源信息
太阳能资源信息
潮汐能资源信息
风能资源信息
降水资源信息
大气资源信息
水能资源信息
江河湖海中的水资源信息
广义的自然风光资源信息

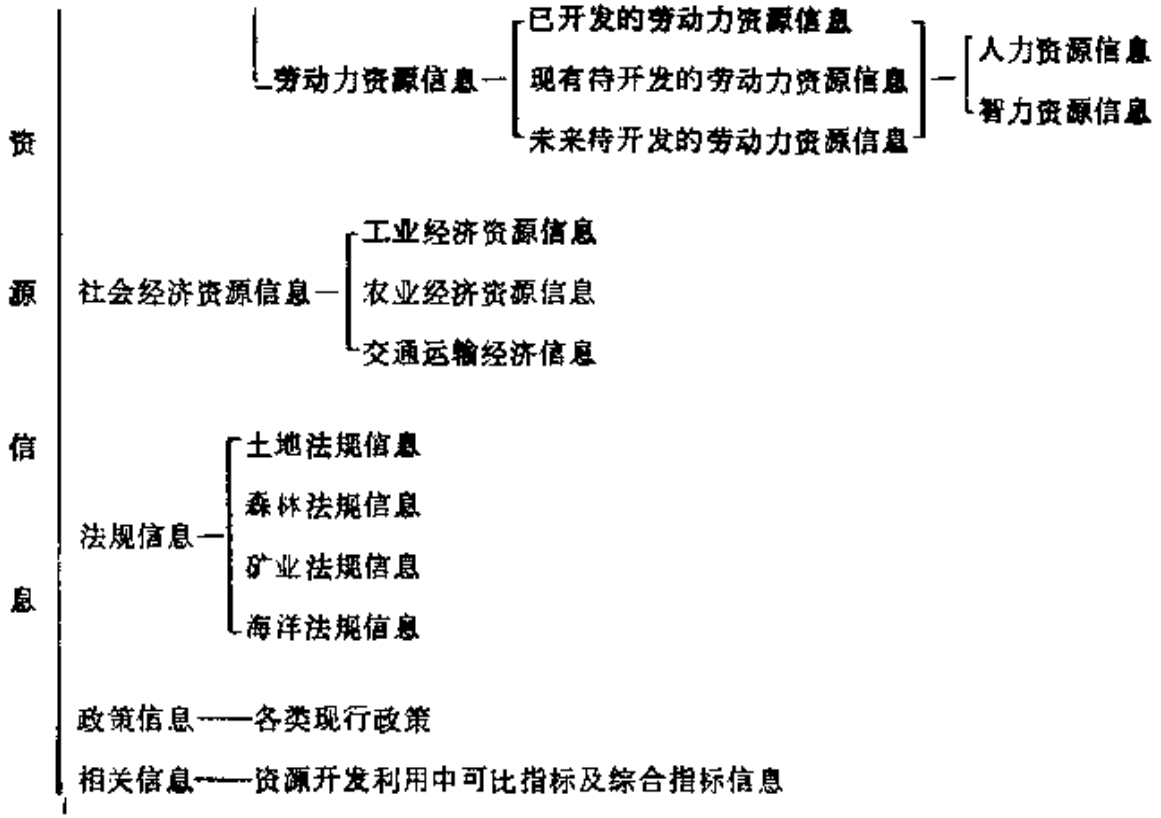


图 5.1　国土资源信息研究的范围

都用“地理信息系统”（Geographic Information System）作为总的名称，简称 GIS。但对于每一单个具体系统，可以由作者决定各种名称。如：加拿大地理信息系统、资源与环境信息系统等。一般地认为，地理信息系统（下与 GIS 通用）定义为：

地理信息系统是一种在计算机软硬件支持下的，空间数据输入、存贮、检索、运算、显示、更新和综合分析的应用技术系统。

所谓信息，是指数据、消息中所包含的意义，它不随载荷的物理设备形式的改变而改变。从广义上说，“信息是一个抽象的概念，它是自然界和人类社会中一切事物的表征，它具有物质性，但不是物质本身，它的存在决不能离开它作为它的载体的物质。因此，可以说它是社会共享的人类一切知识、学问以及从客观现象提炼出来的各种消息的总和。”[24]所谓地理信息可以理解为与地学研究有关的信息范围。随着 GIS 研究范围的扩大，地理信息的范围也在扩大，例如：我国在国土资源信息研究中把国土资源信息归纳为物质资源信息、社会经济资源信息、资源法规信息、各类现行政策信息及相关信息。每一类信息又都可再分成子类。自然资源信息就又可细分为人类可利用的自然生成物，如土地、水、大气、岩石、矿物、生物及其群集的森林、草场、矿产、陆地、海洋等，还有生成这些成分的环境如太阳能、地球物理和化学能源，象植物的光合作用、地热现象等；劳动力资源信息包括人力资源，指人口和劳力的数量，和智力资源，指人口的质量。国土资源信息研究的范围见图 5.1。种种信息以各种形式出现，如文字、图象、图形、语言、声音等，这些信息进入计算机后，均变成了数字或字符。若原来信息就是数据或文字可直接输入计算机内，若原来的信息是物理量，如光谱的辐射，或是地图信息，则需将这些信息转变成数字量，即在第一部分提到的模/数转换。通过传感器及转换记录装置将辐射值变成数字图象，通过数字化仪将地图上的图形数字化，然后送入计算机。因而数据成为信息的具体表现，数据则代表了信息。对信

息的处理成为对数据的处理，如存贮、检索、计算等，得出结果。最终，这些结果还必须通过相反的转换，恢复其文字、图象、图形等本来面目，成为具有实际意义的信息。

所谓系统，指为形成有组织的整体，按一定的相互关系统一起来的方法、技术和程序的集合体。从广义上说，“系统是由两个或两个以上可以互相区别的要素构成的集合体。各要素之间存在着一定的联系，且能适应环境变化经常保持其功能，以达到最优目标。”[32]或者更具体地说，是为实现某些特定的功能，由必要的人员、设备和方法等所组成的集合体。这个集合体有秩序地组合去实现统一的目标。现在所讨论的地理信息系统正是这样一个集合体，为实现地学研究的某个目标，接受信息，并根据时空分析，产生新的信息。这个系统可以分成若干个子系统，子系统还可以分为子子系统等等，所有子系统构成一个整体，互相既独立又关联。系统和外界环境经常有信息的交换和更新，但这些都不会影响作为系统的基本功能。地理信息系统是一个人造系统，它既有由中央处理机，输入输出及终端装置等外围设备组成的计算机硬件系统；又有由原理、准则、方法等构成的由程序实现的计算机软件系统。地理信息系统还包括一个数据库，存贮可共享的数据。数据库的管理和更新等工作是靠软件系统中的数据库管理系统实现的。有经验的人也是非常重要的一部分。

地理信息系统一个突出的特点是注意力集中在空间实体（entity）及它们之间的相互关系，常常用来分析和处理一定地理区域内分布的现象或过程，或对自然资源与环境管理作出的规划决策提供支持。这要求地理信息系统中表示空间实体的数据一定是空间数据。

空间数据的基本特征是位置特征与非位置特征或属性。位置数据指地理空间的位置，例如某一事物所在的经度和纬度；两个事物之间的相对位置等；非位置数据又称作属性数据，指一些实际现

象或特征：类别、名称、值等，例如：高程、土壤类型、植被覆盖类型、降雨量等。为了在数据库中正确地记录并存贮空间数据，经常包括有多种数据结构，如：网格结构(或栅格结构)、矢量结构以及标量等，并能实现在不同比例尺时相互转换，以适应不同的需要。表示位置的数据也能使用于不同的地理坐标系统下并进行相互换算。

地理信息系统应实现对空间数据的输入、存贮、恢复和使用，无论各个系统在功能上差异多大，这几个基本功能都应具备。输入功能可将不同形式和不同比例尺的空间数据送入数据库中。可送入的数据包括模拟图象、数字图象、地图、统计图、表格和数据、文字等；然后存贮起来，存贮时变换为计算机格式，保存在物理设备——计算机磁带或磁盘中，供随时使用；数据恢复时由数据库管理系统实行对数据的检索、查询、运算和显示，同时还能进行数据更新、改变比例尺或改变地图投影；对于各种数据可作综合分析——统计分析、模型分析和其它类型的分析；最后将结果用图象、图形、表格、文字等输出，供用户使用。所有上述子功能完全具备的系统是比较完全的系统，功能较强。一些系统只可以输入部分数据类型，或仅能检索、查询不能分析，这种系统可以适应较专门的工作。

加拿大地理信息系统（CGIS）由处理加拿大土地调查的大量数据发展而来，从 1963 年开始至 1971 年正式进行，是 GIS 发展早期世界上较大和较完善的地理信息系统。现通过一例说明地理信息系统可以完成的工作：考虑 Ottawa-Hull 城市区附近的土地利用情况，以便作城市规划，实现在保护农业的情况下指导城市面积的增长。本例回答以下两个问题：(1) 1964 年到 1973 年期间有哪些土地从农业用地改为城市用地？(2) 哪些土地今后可以进一步用于城市化而不影响农业？

这个工作如果手工计算，工作量十分大，而用计算机处理则比

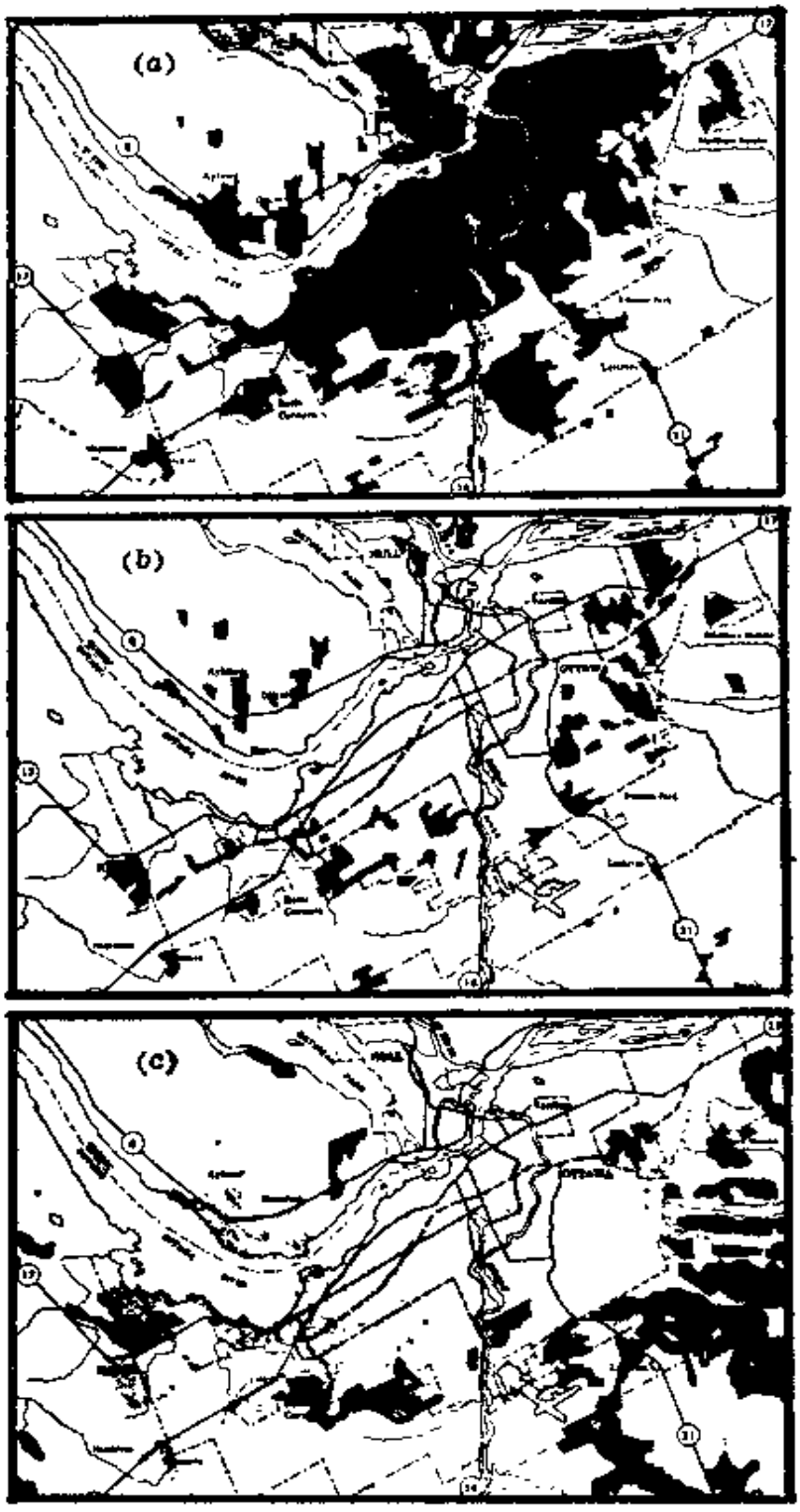


图 5.2　利用 GIS 进行土地利用分析规划实例

较简单：将各种土地利用类型给以不同符号送入数据库中，如B表示城市建筑区，G表示果园和葡萄园，Z表示水域等等，以便统计各类土地利用的面积值。分别输入1964年、1968年和1973年的土地利用图，通过比较分析，可以得到1964年到1968年和1968年到1973年分别有哪些农田被城市所利用，结果可以打印成表格，列出面积和百分比，也可以用图显示。图5.2(a)为1973年的土地利用图，黑色表示城市用地。(b)为1964年到1973年间新增加的城市用地区域。这就回答了第一个问题。要回答第二个问题，必须确定哪种类型的土地可以发展城市，哪些类型是适宜发展农业的土地，用这些条件去分析现有的土地类型，经过比较，得到适宜城市发展而不侵占好的农田或其它必要用途的相应区域。图5.2(c)黑色区域是分析后得到可以发展城市的土地。

5.1.2 空间信息

地理信息系统所用地理数据有突出的位置特征，与其它信息系统不同，它讨论的是空间信息，也正因为如此，使GIS的管理工作变得非常复杂。

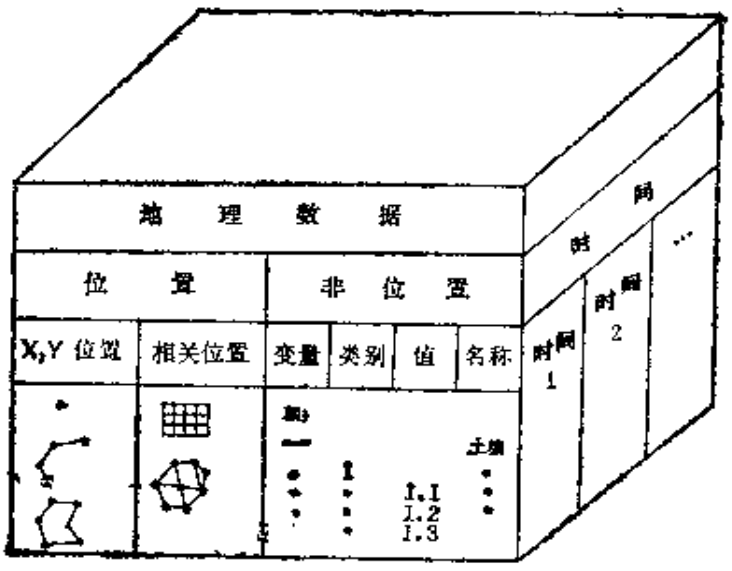


图5.3 空间数据的特征

一、空间数据的基本特征

前面已提到空间数据的两个基本特征：位置特征与非位置特征，严格地说，这二个特征又都与时间有关。三者关系示意图见图5.3。

位置表现为点的坐标位置和相关位置，坐标位置可以用直角坐标系的 x,y 坐标表示，许多点的坐标连在一起可以形成线或多边形。相关位置又叫拓扑位置，例如：网格(栅格)表示或者网络状表示，知道一个点的位置就可以知道其它点与这个点的相对位置，上、下、左、右或距离长短等。在地图上，通过观察地图可以得到这些关系，如北京在天津的西北，读者可以从图中解释出来，而在GIS 中，这种空间关系要靠拓扑结构来描绘。

非位置的数据也叫做属性数据。它本身不表示位置，但它的每一个数值又总是和某个位置联系在一起。属性数据可以逐级分类分层。 如考虑土壤这一类型，研究土类分为 1. 草甸土，2. 沼泽土，3. 石质土……，每一土类又可分为亚类，如草甸土类，又可分为 1.1. 平川草甸土，1.2. 岗川草甸土，1.3. 山川草甸土，1.4. 沼泽化草甸土……，以及土属土种再作细分。属性数据和每一个点联系，知道了每个点的属性，这一区域的专题图也就有了。

位置和属性不总是同时出现的，有时只有位置，例如地下管道图，就可以只有管道的位置走向，而不添加任何属性特征。有些既有位置又有属性，例如高程图，必须知道某点高程多少，既有点的位置又有属性高程。

无论是位置数据还是属性数据都与时间密切相关，如气压图，某点的气压随时间而改变，因而气压图也应随时间改变，这种图随时间变化比较快；有些属性变化不太大，但时间尺度加大后也还是变化的，如土壤的盐渍度随季节而变化，淋溶期和积盐期有很大不同。地形的变化较小，但也要注意时间尺度，比如滑坡的增加，水土流失的影响等。总之空间数据与时间是相互依赖的。

在管理空间数据的时候，由于位置、属性及时间的相互依赖，造成管理的特殊性，根据不同的要求进行检索，例如：属性不变时找到空间位置或空间位置一定时找到属性或确定不同时间的变化，这实际上可以看成是在三维空间中解决问题，而一般数据库仅有一维或二维空间。

二、地理要素在 GIS 中的空间表示

一幅地图，无论其中的信息多么丰富，所有反映在地图中的地理要素，都可以归纳成三种基本要素：点状要素，线状要素和面状（或多边形）要素。点、线、面是位置数据的基本组成部分。

点状要素，如：乡、镇所在地，商店、博物馆位置，井架等。这些对象在图上被表示成一个点，用坐标表示成一组 x, y。线状要素，如：河流、公路、输电线等，在图上表示为许多点连接在一起的一条折线，或近似一条平滑的曲线，用坐标表示则是一组 x, y 一 $x_1y_1, x_2y_2, \cdots x_ny_n$。面状要素又称为多边形，如：湖泊、水库、乡界、土壤类型界线等，它们在图中均表示成多个点连在一起的封闭折线，组成多边形，点数密集时，可近似看成封闭曲线组成的一个面，如图 5.4 所示。图中的符号和文字表示了不同的属性关系。

三种要素的表示与地图比例尺关系很大，同样的研究对象在两幅图上点、线、面的分布可以不同，这是因为任何一幅地图都有一定的比例尺，它影响着地图的分辨率和精度，以及同样大小的地图所包括的范围。比如：同是一座县城，在 1:5 万的图中是一个多边形，而到 1:100 万的图上就成为一个点，许多细节不能表现出来。对于线的描述，从大比例尺到小比例尺，由于采样点少，会出现形状的畸变；面状区域，则合并面中的小块区（见图 5.5）。从小比例尺变到大比例尺时，如果取样点数不增加，如：线状，在小比例尺图上是平滑的曲线，而在大比例尺图上由于放大后分辨率提高，曲线中的点间距离增大，看起来会成为折线。因此，增大比例尺必须相应地增多取样点数。

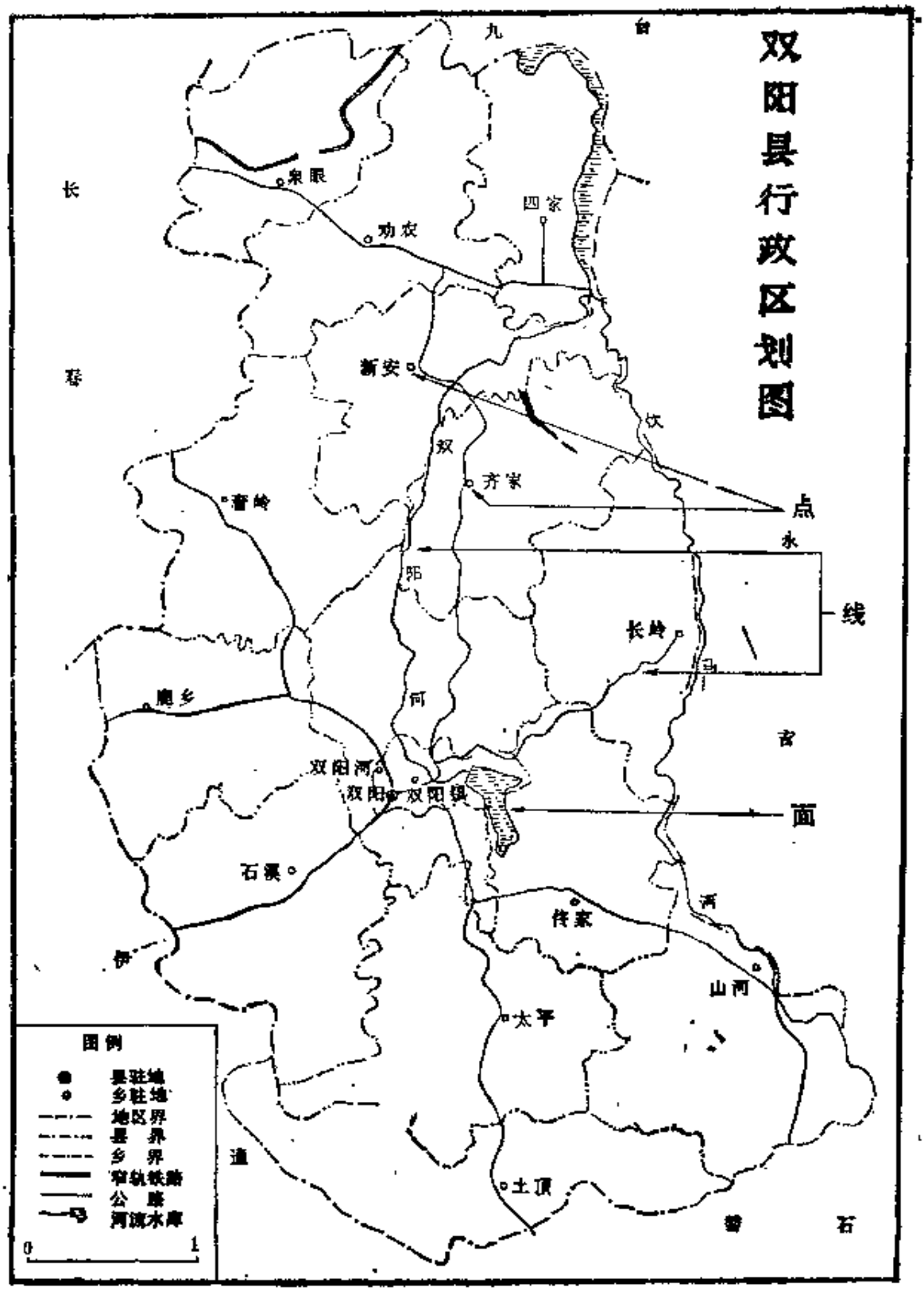

双阳县行政区划图
九
台
长
春
市
双
阳
区
界
线
点
面
东眼
四家
劝农
新安
齐家
奢岭
长岭
鹿乡
双阳河
双阳
双阳镇
石溪
伊
通
河
山河
太平
土顶
营
石
图例
县驻地
乡驻地
地区界
县界
乡界
窄轨铁路
公路
河流水库
0
1

图5.4 三种基本要素

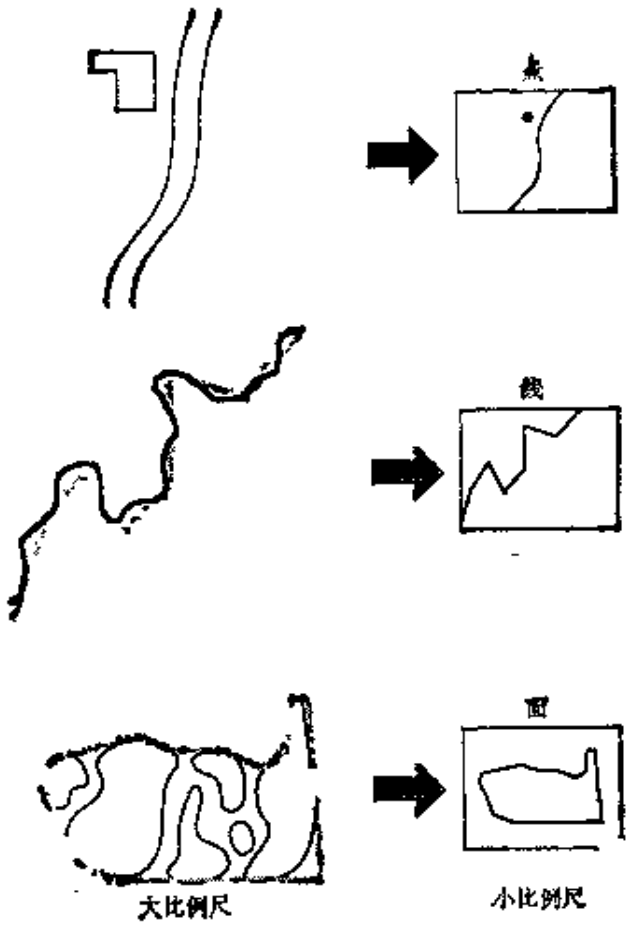


图5.5 三种要素的产生

5.1.3 GIS 的基本组成和类型

下面从不同的方面介绍 GIS 的基本组成，并归纳其类型。

一、主要组成

从各种组成在 GIS 中所起的作用不同，可以分为以下五个组成部分：

1. 硬件：指 GIS 所需要的基本设备。这些设备用来存贮(如磁带、磁盘等)，处理(如：计算机主机、图形或图象处理专用机等)和显示(如：监视器、各种终端屏幕等)。对象主要是数字地图数据或数字图象数据等。

2. 软件：包括机器运行所需的各种程序及有关资料，如：操作系统、编译程序、汇编程序、专用程序、GIS 数据库管理系统、各

种分析程序以及使用分册、说明等。主要作用是完成各种 GIS 应有的操作。

3. 数据：GIS 研究所需要的各种数据，包括数字化了的地图数据、经过数字转换的图象数据、分析用统计数据等等。

4. 过程：GIS 工作时，为了得到问题的解答而执行的一步一步的动作。不少系统在执行时，为了方便用户使用目录选择方式，又称作点"菜单"方式，作哪个动作就点哪项；也有的系统使用命令方式，让用户根据自己所要做的事情，打入命令，由系统完成，可以一个命令做一个动作，也可以一个命令完成一系列动作，也就是命令过程。

5. 专家：对 GIS 了解，知道怎样使用系统，这是最重要的。有些系统不能被人完全了解，因而不能发挥出全部作用，更不能进一步发展系统。创造 GIS 的工作量很大，常以"人年"作为计量工作的单位，因此软件价格昂贵，如不能恰当使用，不但造成很大浪费，也不能完成预期的工作。从这个意义上说，专家的作用也是不可忽视的。

二、逻辑组成

关于地理信息系统的组成，从不同的角度出发有各种不同的说法。归纳起来，所有的地理信息系统，基本上由三个大的部分组成：1. 数据输入子系统。 2. 数据存贮、管理和分析子系统。3. 数据输出子系统。 由于这种分析着眼于各子系统工作的内容、功能和过程，而不是物理设备和方法，因而称为逻辑组成。不管系统大小，不管系统硬件由什么设备组成，不管系统内包括什么类型的数据，这三个基本的子系统都不可缺少(图 5.6)。

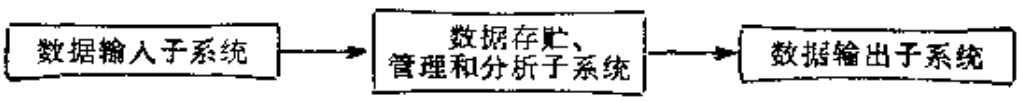


图 5.6 GIS 组成(一)

每一个子系统就其工作内容还可以再分出更小的部分或不同的路线。

数据输入子系统，有时也称为数据采集加工子系统。在这一子系统中将根据 GIS 的需要而采集的各种数据送入计算机内，并加工成数据库可接受的数据格式。可输入的数据多种类型，采集方式也各不相同。主要的数据类型是各种图件，通过数字化设备，将其变成数字量后进入计算机磁盘，形成文件；另一种数据类型是遥感数据：包括航空遥感数据和航天遥感数据，如：航空照片，侧视雷达影象、卫星影象、数字图象数据等等；对于这种数据第一部分已作详细介绍。第三类数据是在地面测量、考察、收集、总结的资料，包括考察数据、试验结果、照片、文字报告、各种统计资料等。这些数据多从键盘敲入。最后，还有直接从其它信息系统提供的数据，只要数据格式可以互相转换，也是可以接受的。每一个系统都规定有自己的一种或几种数据格式，因而数据进入计算机磁盘，形成文件后，如数据格式与本系统规定的不符，必须按规定变换后方可进入数据库，成为可以用户共享的数据。

数据存贮、管理和分析子系统，是地理信息系统的核心部分。这一子系统又可简单分成二块，一部分是数据库管理子系统部分，数据库管理系统（Data Base Management System）常简称为 DBMS，是最重要的部分，它与普通数据库管理系统不同，它不但要管理普通的属性数据库，更主要是管理空间数据，能够提供存贮、编辑、检索、查询、运算、显示、更新空间数据的能力(§ 6.2)。另一部分是模型分析子系统部分，这部分主要根据 GIS 的应用，利用地学分析方法和地学模型得到结果，达到分析评价、动态监测、辅助决策、制定规划、情况预测中的一项或几项目的。目前，GIS 中这部分能力比较薄弱，刚刚开始起步，早期的系统多数没有或少有这种能力。随着地学规律的研究越来越向定量化方向发展，预示着模型分析在 GIS 中的作用会越来越强。

数据输出子系统把前面计算、分析或判断的结果用各种形式记录下来，或作长期保存，或提供给用户使用。这里，用户指需要GIS应用分析结果的个人或单位：专家、专业部门、领导机关、决策者等。输出的产品可以贮存在磁带或磁盘中(软盘或活动硬磁盘)。这主要是为了保存结果，以便再输入机器中供阅读或与其它GIS交换数据。更多地输出产品是硬拷贝，也就是直接供人们阅读的文本或图片，包括绘出的图件、照片或底片、报告、表格、统计图等等。

三个子系统总是顺序排列，具体框图见图5.7。

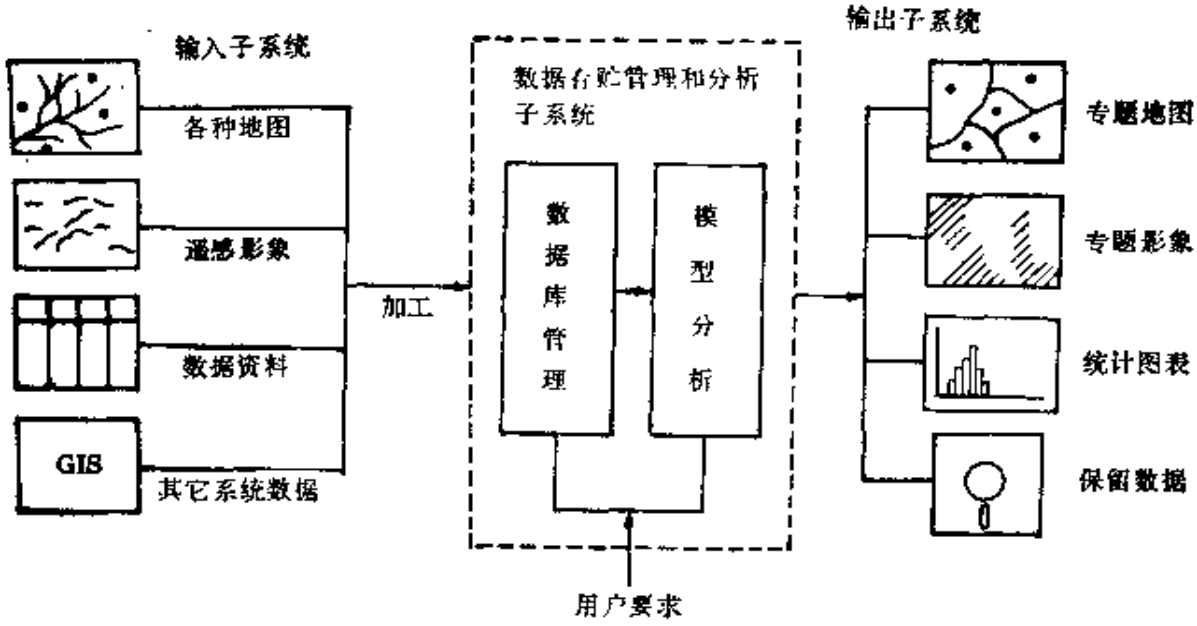


图5.7 GIS 组成(二)

三、硬件系统

GIS 的建立首先必须有一个硬件系统作为保证。这里，我们把硬件系统的规模分为四个级别，一般来说，规模越大，工作能力越强。当然，对 GIS 来说，没有好的软件系统，硬件的能力也不能得到充分发挥。

最简单的硬件系统是由计算机的中央处理机*、磁盘和图形终

* 中央处理机包括计算系统的两个基本部件，即运算器和控制器。余下的三个基本部件是存贮器、输入和输出装置。

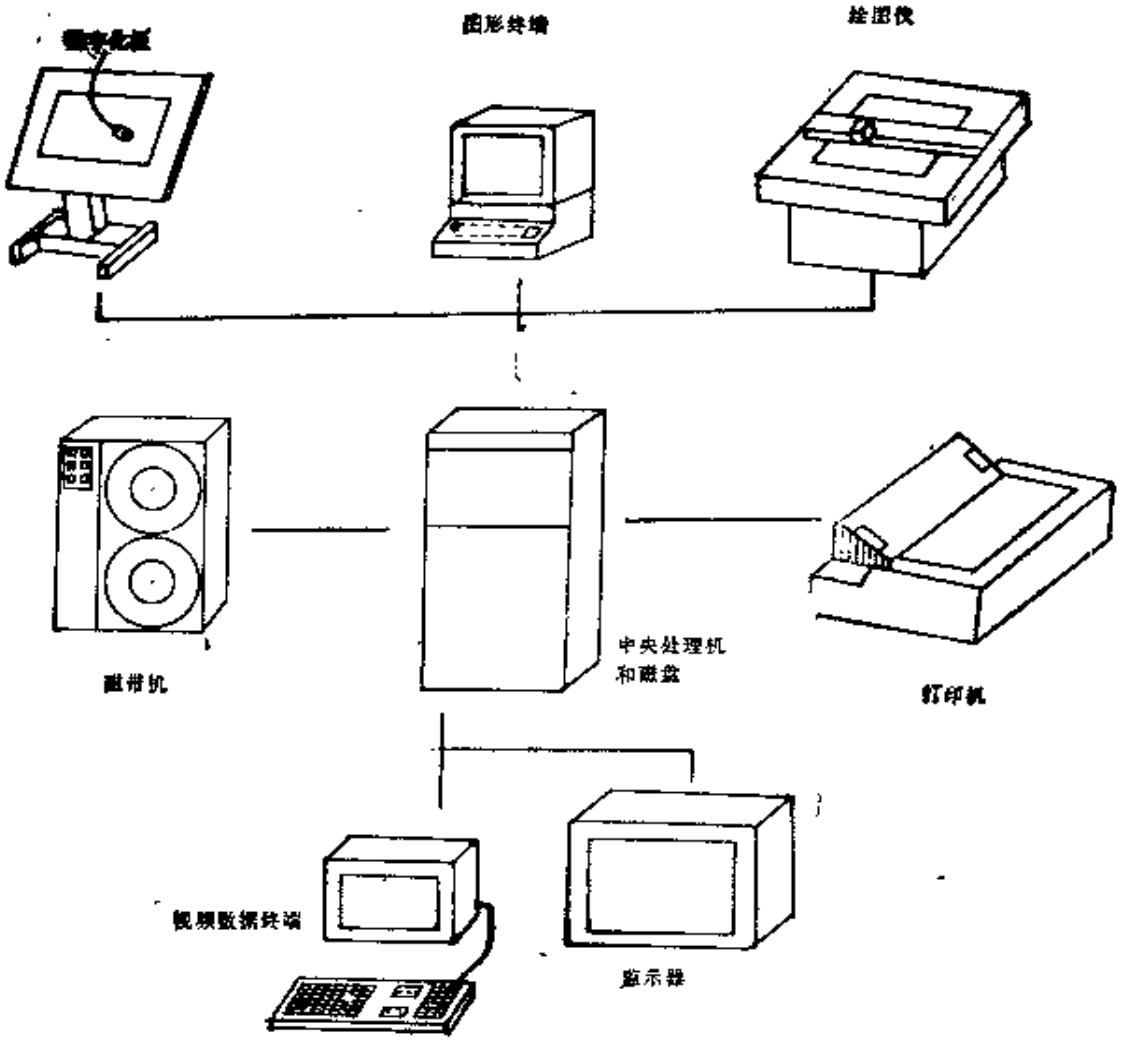


图 5.8　GIS 硬件系统

端组成，最好再加一台打印机。如果用微型计算机，监视器使用彩色屏幕并带有相应的彩色图形卡。这样的系统可以做比较一般的工作，如查询、检索和分析等。由于输入和输出外围设备不完备，只能用键盘敲入统计或属性数据，或采用别的系统上输入的空间数据，因而在数据种类、数据量、数据更新及成果输出等方面都受到限制。打印机可以打印图表、图象、数据、报告，有了打印机可以提供硬拷贝输出成果，使用起来将会方便得多。

一般来说，GIS 的硬件系统除了中央处理机、键盘、图形终端

和打印机外，还应具备数字化板和绘图仪。如果用微机系统，则除了有图形功能的微机、打印机外，还加上数字化板和绘图仪。数字化板可以将各种地图数字化，变成数字量送入计算机磁盘内。绘图仪可以输出各种图件，GIS 的结果可以画成专题地图，提供用户使用。这样的系统有条件完成 GIS 的任务，进行空间数据的输入和输出以及查询、检索、运算、更新、分析等工作。要注意的是，为了使可存贮和处理的数据足够多，计算机内存*和磁盘空间(外存贮器)要足够大，普遍微型机内存 512K 字节，硬(磁)盘 20M 字节空间，空间越大，存贮数据量越大，处理数据时可处理的幅面越大。图形终端作为监示屏幕可供用户使用 GIS 时观察，更重要地可以进行人机交互的工作，如：编辑、删改、增加、更新图形数据。用户一边观察图形，一边发出命令，并观察命令执行的结果，决定下一个命令，提高了 GIS 的功能。屏幕可显示的彩色数目越多，图形显示越精细，分层越多，则分辨率越高，图形准确率越高。总之，有了这样的硬件系统，可以较好完成 GIS 的软件功能。缺点是不能输入图象数据，缺少遥感图象数据源。

完备的 GIS 硬件系统为克服上述不足，在具备以上各种硬设备后，再增加一个图象处理工作站。这个工作站包括一台磁带机，可以直接输入 CCT 遥感磁带数据；视频数据终端和高分辨率彩色监示器，这个监示器一般可显示 512 × 512 象元，因而可以处理和显示遥感图象并送入 GIS，与图形数据一起分析(图 5.8)。如果有条件还可加入图象扫描输入设备和影象输出设备，使照片可以直接变成数字影象存贮，分析结果也可直接成象。当然这种设备十分昂贵。这样的系统可以输入、处理、输出各种类型的数据，建立一个功能相当强的 GIS，完成很多一般系统不能完成的工作，实现遥感和地理信息系统的综合应用。同样地，在实际应用时，还必须建立一个相当好的软件系统才能有效地发挥硬件的功能，这是

* 可由运算器直接访问的存贮器，又叫内存贮器。

不可忽视的。

最后，也可以说是今后的目标：实现 GIS 间的联网，计算机主机和它的外围设备既可以自成系统，计算机又和其它计算机系统连接，直接输入其它 GIS 的数据，或输出成果，这叫做数据的共享。也可以设备共享，如果本工作站设备不够使用，便将数据送入其它计算机内处理，使用其它系统的存贮空间或外围设备，减少了输入同样数据或购买同样设备的浪费，节约了资金，提高工作效率。对没有条件联网的系统，可以采用磁带或微机软盘作为交换数据的媒介，实现 GIS 间的数据共享。

目前我国的 GIS，以第二和第三种规模为多。

四、地理信息系统的类型

地理信息系统的类型，按目前发展的情况，可以分为三类：

1. 专题信息系统　以某个专业或某个问题作为研究对象而建立的地理信息系统，这种系统应用范围有限。如：旅游信息系统、森林资源管理信息系统、水生保持规划信息系统、草场资源管理信息系统、城市交通管理信息系统等等。这些系统强调专业目标，在本专业范围内可以推广，因而既可以应用于一个区域，也可以应用于另一个区域，比如利用城市交通管理系统，送入 A 区的各种数据可以管理 A 区交通，若送入 B 区的各种数据则可以管理 B 区的交通。

2. 区域信息系统　以某个区域的综合研究作为目标而建立的地理信息系统。这种系统强调其区域性，如：黄土高原(重点产沙区)信息系统，县级微型计算机地理信息系统，加拿大地理信息系统，日本国土信息系统，马里兰自动地理信息系统等。地区大小各不相同，国家级、省级、县级不等。

有些系统既有专业性又有区域性，应在系统名称之前冠以地区名，如：三川河流域水土保持规划系统，它是专题信息系统，但又有地区性。因为由于自然条件不同，三川河流域的水土保持模

型对别的流域，可能不大合适，可以认为兼有两者特点。

3. 信息分析处理系统　一般来说，这种系统作为提供成套信息分析，处理和制图手段的技术系统，可以用来处理各种专业，也可以处理区域研究中的问题。它比较重视作为工具的职能，而不象前两者，更注重于应用，例如：智能地理信息系统、ARC/INFO地理信息系统、地图分析程序系统、网格数据库系统、专题和统计制图系统、地理库文件系统等等。其中，我国引入的比较成功的商用系统之一 ARC/INFO 地理信息系统基本上适用于某些资源管理和制图的需要；专题和统计制图系统在小型和大型计算机上被用于自然资源管理：森林蓄积量、植被、地质、土壤及人口制图、环境计划和评价等许多方面；类似的例子还有很多，不再一一列举。

§5.2 空间数据编码和数据格式

5.2.1 概述

将地理信息系统的地理数据转换成适合计算机处理的数字或字符，并可以还原成原来的形式，这个转换过程就是空间数据编码。这里，地理数据主要指各种地图和各种遥感影象数据。

一、空间数据编码的两种主要类型

空间数据编码主要有两种类型：矢量编码和网格（栅格）编码。矢量，在计算机图形中是指一个有向线段，每个有向线段用有序的特征点数据来表示，而有向线段的集合就构成了图形。所以地图中各种地物的位置关系被表示成一组组数据串。这种编码方式主要针对以点、线、多边形为基本要素的地图和图形，不适用于遥感影象。网格，是将地图或图象分成若干行和列组成的格网，按每个格网作为一个点对全图扫描采样，得到每点的属性数据（又叫特征值）。网格编码后的全图是规则的阵列，与图象数据格式相同，因而数字遥感影象就是网格编码。

空间数据有位置和属性两个特征，编码后的数据必须具备这

二个特征。矢量编码主要表现位置特征，除了点位置(x, y)外，还表现拓扑关系，以便很容易找到点、线，面之间的相对位置。属性特征，总是和位置特征联系在一起，但记录方式多样，比如可以记录在表示线的数据之前或之后，象等高线的高程值，也可以单独记录一个文件，象土壤类型图中每一地块的类型值和字符，等等。网格编码的阵列中元素值代表了每个点的属性，因而主要表现属性特征，而对位置则可以用行与列的坐标来表示。位置之间的相互关系用行和列之间的相互关系体现，这些行和列的位置又是和具体地理坐标紧密联系，可以互相换算。 可见两种编码方式在侧重点上有所不同。有些地理信息系统只有矢量编码方式，如商用ARC/INFO 地理信息系统。有些地理信息系统只有网格编码方式如网格数据库系统。从目前情况看，不少系统发展两种编码方式的兼容制，以利于遥感数据在 GIS 中的使用。作为过渡，在两种数据格式兼有的 GIS 还不成熟时，有不少单位采用一套硬件系统二套软件系统的方式解决这个问题。也就是图象处理软件包和地理信息系统软件包，使地理信息系统可以接受图象处理后的图象数据，以便综合分析，实现矢量数据和网格数据的兼容。

二、属性编码

地理数据中的属性各种各样，如高程值、植被、矿产、人口、产值等等。要使这些属性转换成计算机可以接受的数字和符号，也需要编码。属性编码一般按照各自的分类系统决定，以长春市双阳县遥感解译为例，根据土壤发生学原则和具体区域特征，定出土壤分类系统土类和亚类编码方式，如表 5.4 所示，而得到土壤类别编码，如：草甸型水稻土用 82 代表，沼泽化草甸土用44表示等等。这种编码方法的用途十分广泛。

有时多个属性可以按照预先规定的格式，在计算机中存放一组数据，作为一个记录，如：道路属性如表 5.1：这里，道路类型分：1——高速公路，2——干线公路，3——主要公路，4——住宅区街

表 5.1

道路类型	长度	路面材料	宽度	行车道路	路名
2	2891.5(米)	混凝土	22(米)	4	东南大街

道，5——未铺完的公路，因此，这是干线公路。路面材料分：混凝土，柏油和砾土，也可以不用标号，直接写入。其它属性有路长2891.5米，路面宽22米，有4道行车线及东南大街的路名。为了使这些属性和其位置记录联系，可以通过表示道路的线号（特征号）联系，每个属性记录和位置记录前加一项线号，以便检索时可以同时检索出属性和位置，如：属性记录如表5.2：

表 5.2

线号(特征号)	道路类型	长度(米)	……
1	2	2891.5	……

位置记录如表5.3

表 5.3

线号(特征号)	x、y 坐标
1	$x_1y_1, x_2y_2, \cdots x_ny_n$

$x_1y_1 \cdots x_ny_n$ 为平面坐标系中1号线段所代表公路上点的坐标值。

在网格编码时，为了使属性值可以代替图象的灰度值，便于在监示器上显示，常用连续的整数1，2，3……分别代表各类属性。显示时，每种属性(灰度)赋予不同的彩色，便于目视识别。

三、编码与数据压缩

选取哪一种编码方式　采用矢量编码还是网格编码，主要根据研究的对象或 GIS 本身的软硬件要求。但如何编码，怎样编码较好，这类问题除了与存取速度、使用方便程度联系外，还和数据

表 5.4　长春市双阳县遥感解译土壤分类系统(部分)*

土类	编码	亚　类	编码	土类	编码	亚　类	编码
暗棕壤	1	暗棕壤	1			沼泽化草甸土	4
		白浆化暗棕壤	2	沼泽土	5	沼泽土	1
		生草暗棕壤	3	新积土	6	新积土	1
白浆土	2	白浆土	1			草甸新积土	2
		潜育白浆土	2	石质土	7	石质土	1
黑土	3	黑土	1	水稻土	8	沼泽型水稻土	1
		白浆化黑土	2			草甸型水稻土	2
		草甸黑土	3			黑土型水稻土	3
草甸土	4	平川草甸土	1			白浆型水稻土	4
		岗川草甸土	2			冲积型水稻土	5
		山川草甸土	3				

* 略去了土属和土种的分类系统表

所占存贮空间密切相关。即在保持信息的前提下，最大限度地压缩数据量，使所占计算机存贮空间达到最小。在遥感图象处理过程中采用的特征抽取(见 §4.4)也是一种数据压缩的方式。GIS中，由于所讨论的数据量很大，占计算机存贮空间过大，因而提高了对计算机硬件的要求：需要大容量磁盘和较大内存空间，以保持其贮存和运算功能，从而增加了系统所需资金。为此，设计多种编码方式以达到减少数据量的目的。一些编码方式可以在很大程度上缩减数据量，但解码复原时会产生失真。一般来说只要失真在允许的保真度范围内便认为可用；另一些编码方式称为无误差编码，也就是可以根据编码完全重建原图。下面在介绍编码方式时只介绍目前常用的几种无误差编码方式，如：网格编码中的行程编码、四叉树编码，矢量编码中的拓扑编码等等。这些编码方式已被一些系统采用，并在实验中逐步完善。

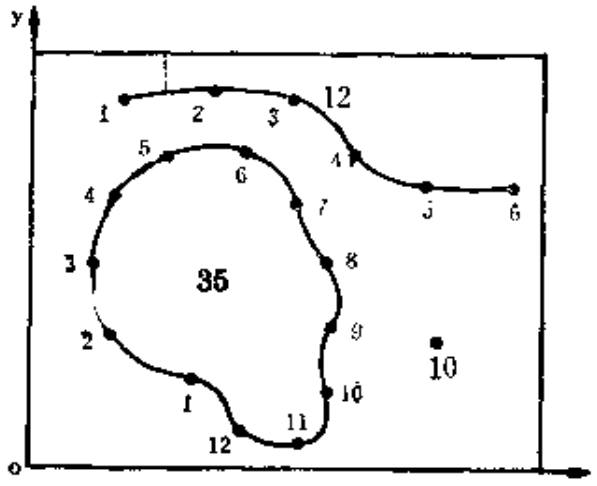
5.2.2　矢量数据

矢量编码后的数据结构是矢量格式。矢量格式有多种，无论哪一种都是以点、线、面(多边形)这三个基本要素来表示。无论是

地形图还是专题地图，地图上的各种特征的位置与它们位置间的相互关系都可以用矢量格式表示出来；属性特征则或者用符号、数值编码表示，或者用不同颜色来表示，也有时不表示，如：输电网、铁路网等。总之，在矢量格式中主要表现位置特征。

一、x、y 坐标方式

从概念上讲，任何点、线、面都可以用直角坐标系坐标点 x、y 来表示。这里，x、y 可以对应于地面坐标经、纬度，也可以对应于数字化时所建立的平面坐标系 x 和 y。对于点，则是一组(x,y)；对于线，则是多组$(x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3\cdots, x_ny_n)$；而对于多边形，也是多组$(x,y)$坐标，但由于多边形封闭，坐标必须首尾相同。这些点是由光滑的曲线间隔采样而来。同样的曲线长度，取点越多，以后恢复时越接近原曲线，失真越少。反之，取点过少，恢复时就会成为折线。图5.9(b)中点、线、面的 x,y 坐标点文件可以写成图5.9(a)



(a) 坐标表示

	特征码	位置坐标
点	10	x,y
线	12	$x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3, x_4y_4, x_5y_5, x_6y_6$
面	35	$x_1y_1, x_2y_2, x_3y_3, x_4y_4, x_5y_5, x_6y_6,$ $x_7y_7, x_8y_8, x_9y_9, x_{10}y_{10}, x_{11}y_{11}, x_{12}y_{12}, x_1y_1$

(b)

图 5.9 点、线、面的 x、y 坐标点文件表示

的形式；

这种记录方式如果是多个相邻的多边形，对于公共边将需要数字化二次，因而同一条边记录二次，造成重复(图 5.10)。但由于编码容易、直观，且恢复原图也容易，仍不失是一种可应用的方法。

实际应用中，常根据地图的具体情况在这种记录的概念基础上作一定改动，特别是对于专题地图，需要将专题属性加到文件内，因此按照线矢量的方向加入拓扑关系，即左多边形特征和右多边形特征，[详见(二)]矢量的两端按矢量所指方向分为起点和终点，如图 5.10，公共边中点 1 和点 6 间矢量有以下两种表示（表 5.5)：第一行代表矢量方向从 1 指向 6，第二行代表矢量方向从 6 指向1，一旦方向改变，起点和终点、左多边形和右多边形均互相交换。但总的来说，仍以 xy 坐标为主，属 xy 坐标方式。

现举一例说明这一类记录方式：

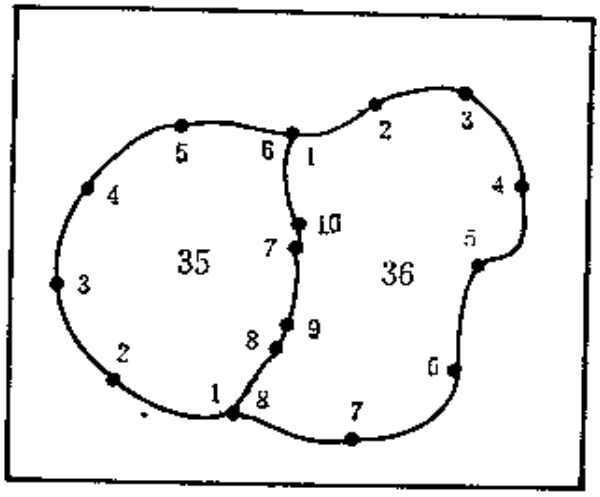


图 5.10　相邻多边形

表　5.5

起点	终点	左多边形	右多边形
1	6	35	36
6	1	36	35

例：美国农业部制图和地理信息系统室提供的土壤类型图数据，记录在磁带上供用户使用。其记录格式为矢量格式，从土壤分类专题地图数字化而来。 共三个文件，文件结构分别为：（参考图 5.11）

（1）头文件：共六个记录，每个记录 72 个字符占一行(表 5.6 和表 5.7)。

表 5.6

字符数 / 记录号	1—30	31—45	46—72
1	数据组名(原图类型)	比例尺	数字化的地区名
2	数字化的工作部门名称	数字化时间	

表 5.7

字符数 / 记录号	1—2	4—10	12—18	20—28	30—40	43—50	52—61	62—72
3	SW	x（英寸）	y（英寸）	“经度”(英文字)	经度值	“纬度”(英文字)	纬度值	—
4	NW	x	y	“经度”	经度值	“纬度”	纬度值	—
5	NE	x	y	“经度”	经度值	“纬度”	纬度值	—
6	SE	x	y	“经度”	经度值	“纬度”	纬度值	—

前二个记录是一般介绍，后四个记录为原图四角的坐标值(数字化板上坐标)和地面对应的经纬度值，为今后恢复时定位或几何校正用。

（2）土壤线数据文件：包括全图所有土壤类型之间的边界线及土壤和水体(湖泊、水库等)的边界。 所有的坐标值都是数字化板坐标，以英寸为单位。每一个记录不超过 24 个字符。每一条边界线包括 (N_i-1) 个点(如图 5.10 中点 1，8，7，6 为一条边界线)，作 N_i 个记录，对于边界线 1，格式如表 5.8，对于边界线 2 至 M 见

表 5.9（共M条边界）；（其中 $i = 2\cdots\cdots M$）

表 5.8

记录号 \ 字符数	1—5	6—10	11—15	16—24
1	左土壤类(字符)	右土壤类(字符)	坐标点记录数 (N_1-1)	——
记录号 \ 字符数	1—7	8—14	15—21	22—24
2	x_1	——	y_1	——
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N_1	x_{N_1-1}	——	y_{N_1-1}	——

表 5.9

记录号 \ 字符数	1—5	6—10	11—15	16—24
1	左土壤类	右土壤类	坐标点记录数 (N_i-1)	——
记录号 \ 字符数	1—7	8—14	15—21	22—24
2	x_1	——	y_1	——
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N_i	x_{N_i-1}	——	y_{N_i-1}	——

*"——"代表空

（3）土壤类别名称数据文件：包括所有土壤类别名称及水，每一名称放在这一类的多边形区域中，设置一个标号点（或叫种子点），以便今后恢复时确定每一多边形的属性。这里，每一记录不超过 28 个字符，格式如表 5.10，共K个多边形。

这种编码主要目的是提供数据资料，基本上没有考虑独立的多边形，因而在 GIS 中检索、查询比较困难，还需要做进一步的修改。

表 5.10

记录号 \ 字符数	1	2—11	12—13	14—20	21	22—28
1	"T"	土壤名或水(字符)	"X"	x_1	"Y"	y_1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
K	"T"		"X"	x_k	"Y"	y_k

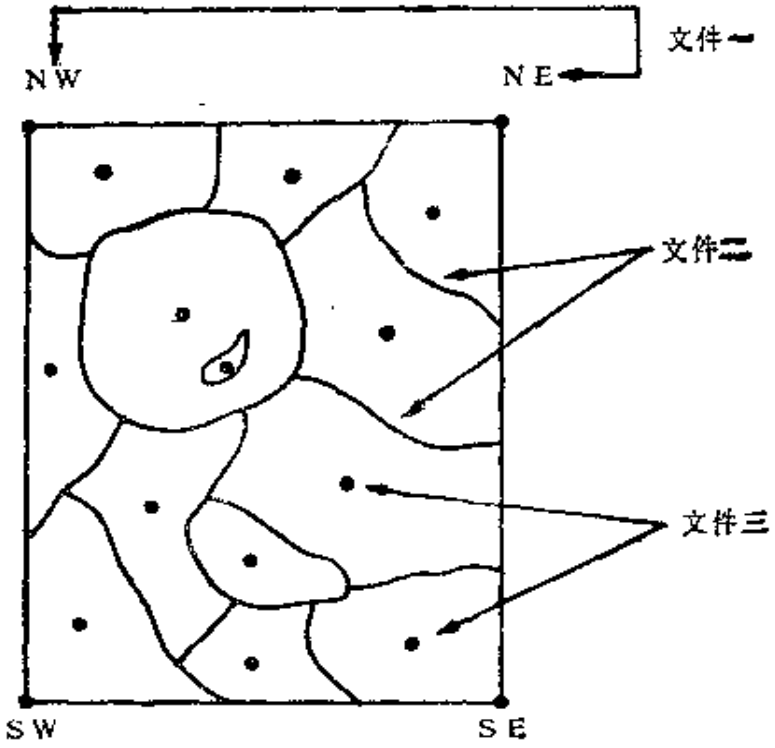


图 5.11 实例示意图

二、拓扑方式

拓扑编码方式是强调点线面三要素相互位置关系的一种编码，典型实例有双重独立地图编码，又可简称 DIME (Dual Independent Map Encoding)。

这种数据编码方式是比较最早和最常用于 GIS 的方式，由美国人口统计局发展起来。DIME 建立城市街道网和统计单位如：街区，人口统计区等的数据库，并实现自动和半自动的编辑和分

析。 也可以用于土地利用等多种信息系统的自动编辑和分析。DIME 主要特征便是前面提到过的拓扑概念。

1. 一般特点

图 5.12 是一个以点、线、面组成的多边形示意地图，也可以说是编码网络地图，图中由 7 个节点，11 条连接线，作为 5 个基本多边形的边界，其拓扑编码方式如表 5.11：（图形周围的空间定义为

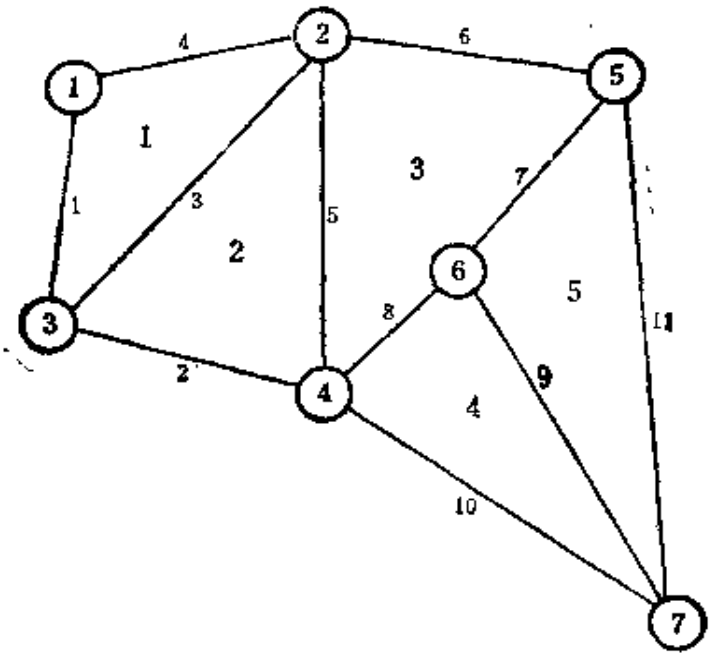


图 5.12 点、线、面组成多边形网络地图

多边形 0）这种记录表现了点、线、多边形之间的空间位置关系，而并不需要定义距离。便于编辑，也很容易查询、检索，或根据某点或某多边形为基础重新排序，从而找到所有与某节点有关的线和多边形，或与某多边形有关的点和线。如图 5.12 中节点 6 是线 7，8，9 的起点或终点，有邻接关系的多边形是 3，4，5，多边形 3 有关的点是 2，4，6，5，线是 5，8，7，6 等等都可从上述记录中查出。可见，任一点、线或多边形都可作为检索的指针。

这个编码也可加入节点的 x、y 坐标编码表，从而得到地图元

表 5.11

线号	右多边形	左多边形	节点1	节点2
1	1	0	3	1
2	2	0	4	3
3	2	1	3	2
4	1	0	1	2
5	3	2	4	2
6	3	0	2	5
7	3	5	5	6
8	3	4	6	4
9	5	4	7	6
10	4	0	7	4
11	5	0	5	7

素的确定坐标位置。这对于弧线的确定常常是不可缺少的，因为弧线需要多个点连接而成。图 5.12 中节点坐标可记录为（表 5.12）：这里，x、y 是坐标值，当坐标系原点或 x、y 轴方向改变时，x、y 的值也会相应改变。

表 5.12

节点号	x 坐标值	y 坐标值
1	23	8
2	17	17
3	29	15
4	26	21
5	8	26
6	22	30
7	24	38

图 5.13 的图形与图 5.12 中的图形不同，其边界不只是两点组成的直线，还有折线和曲线作为边界，这些边界是由三个或更多的点组成，如折线 1 有三个点，曲线 2 和 4 由更多的点组成。

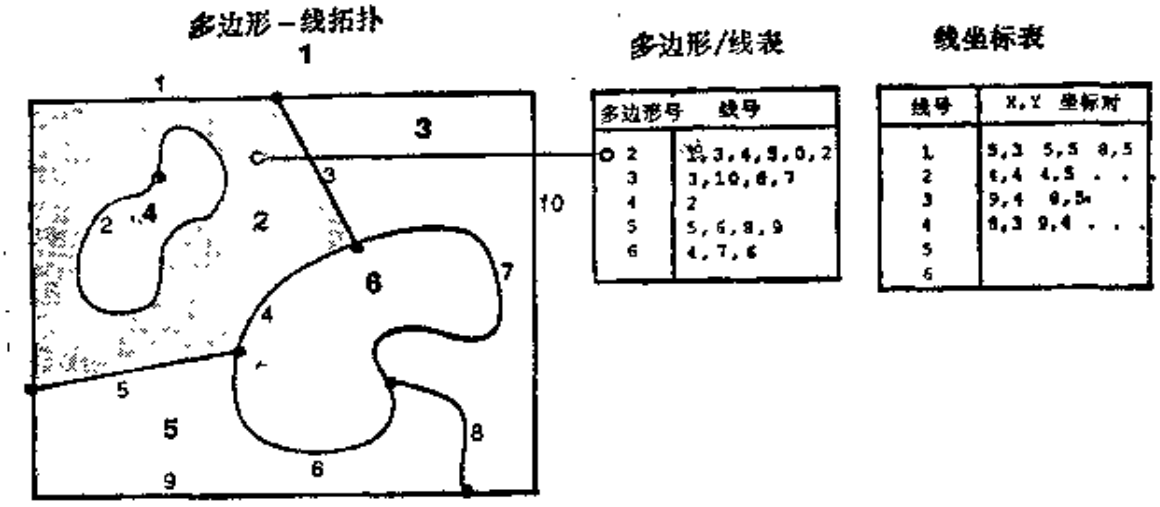


图 5.13 多边形中的岛

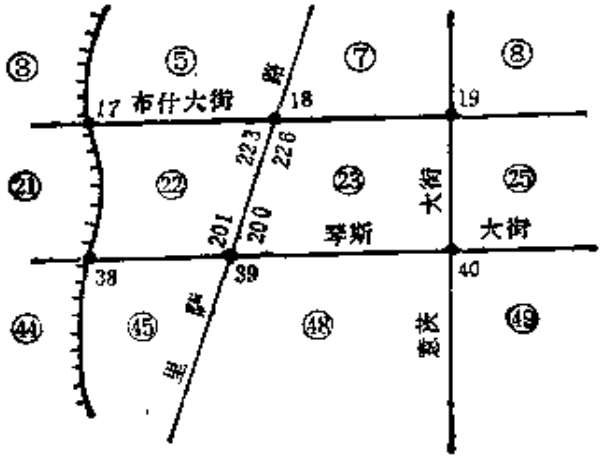


图 5.14 DIME 实例

有时，多边形中还包围一个多边形，如：农田中的鱼塘（见图 5.13 中的 4），这个小多边形不和另外别的多边形相邻，这种被包围的小多边形称为“岛”。岛的边常常只用一条曲线和一个点表示。列表时岛边列在外围多边形的边界线中。在此图中，多边形 2 包围岛 4。那么列表时，多边形 2 的边是 1，3，4，5，同时也要列上线 2，并在 2 前加0，表示 0 后面的线 2 是岛的边界线。见多边形和线表。

2. DIME 特点

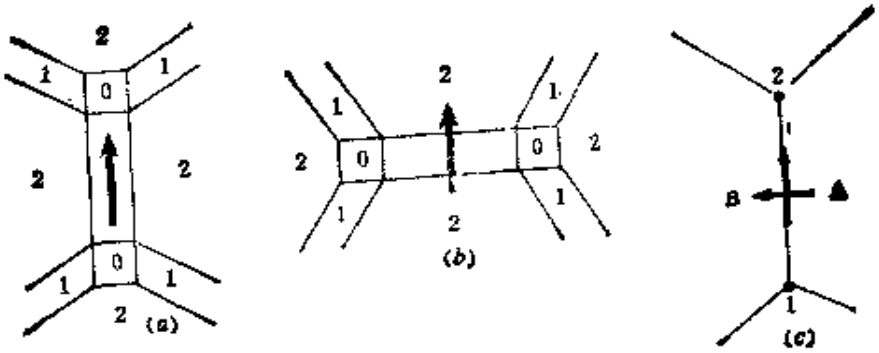
地址编码指南(简写 ACG) 是双重独立地图编码(DIME) 文件的一个实例。图 5.14 是一个街区图，它包括的内容有：街名、街道类型(普通道路还是大街等)、交叉点的编号、街区编号、每一段街道两交叉点(节点)空间的最低房门牌号和最高房门牌号，奇数和偶数分别位于街道两侧。这样，在 DIME 记录中，对每一段街道提供了线段、节点和面积网的拓扑描写。以里萨路节点 18 到 39 之间的路段为例，其记录如下(表 5.13)：

表 5.13

街道名	街道类型	地址范围				起始节点	终止节点	左街区	右街区
		奇数		偶数					
		低	高	低	高				
里萨	道路	201	223	200	226	39	18	22	23

如前面所述，矢量表示是有方向性的，起始节点和终止节点决定了边界线的方向，因而左街区和右街区也由相对位置而决定。一旦起始节点和终止节点交换顺序，左街区和右街区也必须交换位置，如上表中顺序 39,18;22,23 改变成 18,39,23,22。

双重独立编码即 DIME 编码和成功之处在于它的双重性，也就是边界和上边界 (boundaries and coboundaries)。设点为 0 元素，可以理解为代表 0 维；设网络的线段部分，即线，为 1 元素，代表 1 维；设多边形或面为 2 元素，代表 2 维。从拓扑角度看，这些元素可定义有序的关联关系：二个 0 元素形成 1 元素的边界，方向可以从一个节点到另一个节点，二个 2 元素形成 1 元素的上边界，方向可以从一个面(或多边形)到另一个面(或多边形)。如图 5.15(*a*) 和 (*b*) 所示，在 (*c*) 图中，当线 *l* 方向从节点 1 到节点 2 时，面 A 在右边，面 B 在左边，而对于它的双重有序关联关系，上边界可说明在面 A 指向面 B 的方向上，结点 2 在右边结点 1 在左



(a) 二个 0 元素指引 1 元素方向 (b) 二个 2 元素指引 1 元素方向 (c) 实例

图 5.15 双重有序关联关系

边，多个节点链接可围成多边形。这一特点唯一地确定了点、线、面三个要素之间的相互关系。利用计算机检查 0 元素和 1 元素的边界关系及 2 元素和 1 元素的上边界关系，可以实现全图的自动编辑和分析、校正输入图形过程中的错误，十分方便。

双重独立编码方式应用范围很广，多用于人口普查，将人口或其它指标与地址匹配起来；城市管理，如市政建设计划；计算机制图，如道路网、人口分布等；情况分析，如交通情况等。体现了拓扑结构的优越性。例如：可以通过空间关系分析城区情况：从车站到学校走哪条路线最近，东城区包括哪些街道，某公共汽车走过哪些城区等等。土地利用，数字地形数据等也可以用这种编码经过改进而实现计算机的存贮、编辑和分析。

目前，还有许多类似的矢量编码方式，经过各种改进，可适用于不同的信息类型，应用越来越广泛。如：直接在 DIME 基础上发展的综合拓扑地理编码参考系统（简称 TIGER），还有链状双独立方式，ARC/INFO 系统矢量编码等等。具体使用时，对每一系统的编码方式需作深入了解，它们在基本概念上是相同的，在记录方式上却各不相同，各有自己的特点。

用拓扑结构编码的一个突出优点是节省了存贮空间。这是因为在 x、y 坐标表示中每一多边形都要记录全部点的 x、y 坐标，因

此相邻多边形的公共边上的点被记录二次，整个图形有许多公共边，造成数据冗余度很大。而拓扑方式，对每条线只列出一次点的坐标，相互关系只列线号，因而使记录数大大减少，也不会使坐标点数量超过限制。因此，可以认为拓扑编码是矢量编码的一种压缩形式，目前被广泛采用。

5.2.3 网格数据

空间数据的网格编码是用阵列的方式表示数据的特征。阵列或格网中每一数据值表示属性，而位置关系隐含在行、列数之中。这些行、列值既表示了地物的空间坐标或地理坐标，又可以间接分析出不同目标的相互位置关系，网格中每一元素的值，对于属性编码的地图如专题地图，就是其编码数值；对于不表示属性的图如铁路网，可以用 0 和 1 表示，有铁路为 1，无铁路为 0 等，作为标识码。总之，对网格数据，属性表示是明显的。

一、一般表示方法

网格数据的得到相当于将一透明方格图覆盖在地图之上，每

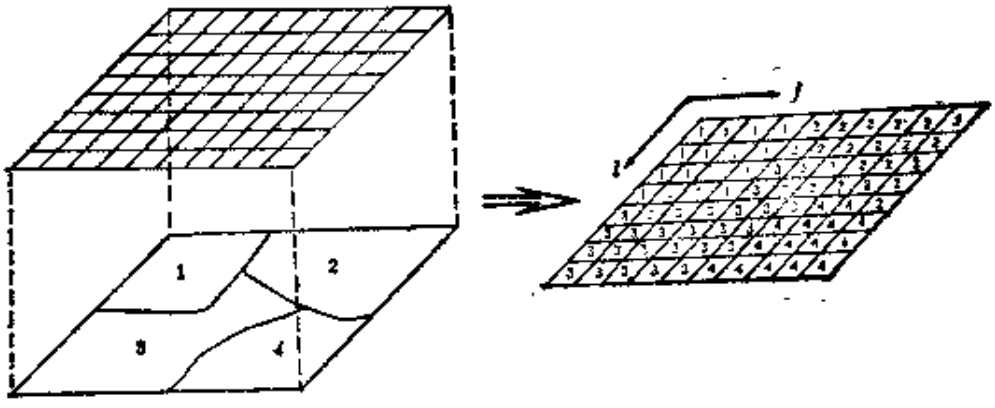


图 5.16 网格数据

一单位格子覆盖部分的属性数据便成为图中各点的值，如图 5.16 所示，则每一数值的位置由网格的行和列的值来表示。一般以左上角为原点，则行 i 和列 j 可以表示为：

行 i	列 j	值
1	1	1
1	2	1
⋮	⋮	⋮
5	5	3
⋮	⋮	⋮
8	10	4

可以看出，网格编码的概念与遥感图象编码是一样的，所不同的是数据的物理意义，遥感图象中每一个象元，也可称为元素的值，反映传感器接受的辐射量的强弱，而网格地图则表示地形图或专题地图等的属性值。进入计算机以后，图中每一象元或元素的值都是计算机可接受的数据，它们不再有什么区别。用监示器显示时，这些值又可以称为灰阶，用不同的亮度或灰度表现在图象上或通过摄影机拍摄在照片上，或设置不同的符号在打印机中打印出来。

1. 取值的方法

图 5.16 中的网格覆盖后，常常会在同一格子下对应于地图上

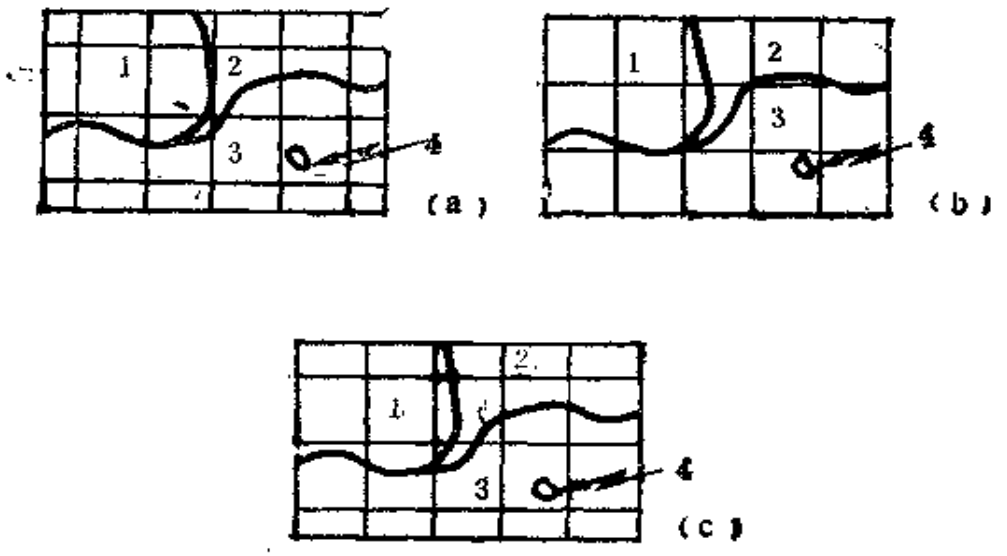


图 5.17 取值方法

几种不同的属性值，而每一元素只能取一个值，在这种情形下，有不同的取值方法：

中心点法　网格中心对应的值作为本元素的值。为了寻找中心方便，覆盖使用的格网常常使交点与网格单元的中心对准，而不是边缘，这时读数据只考虑网格交点所对应地图上的值，因此中心点法也可以叫做“网格交点归属法”。如图 5.17(a) 此图成为：

1 1 2 2 2
1 1 2 3 3
3 3 3 3 3

长度占优法　当覆盖的格网过行中心部位时，横线占据该格内的大部分长度的属性值定为本元素的值。如图 5.17(c)格网线覆盖时，格网横线放在行中心线上，格网竖线不变，此图成为：

1 1 2 2 2
1 1 1 3 3
3 3 3 3 3

面积占优法　以网格单元内占据最大面积的属性值定为本元素的值，如图 5.17(b)用这种取值方法得到：

1 1 2 2 2
1 1 3 3 3
3 3 3 3 3

重要性法　这种方法对于特别重要的地理实体，其所在区域尽管面积很小或不在中心，也采取保留的原则，如：稀有金属矿产区域等，因此图 5.17(b) 便成为：

1 1 2 2 2
1 1 3 3 3
3 3 3 4 3

因为属性为 4 的区域为重要区。

2. 记录方式

网格数据可由多种途径得到：手工输入对设备要求最低，虽然费工时但容易实现。例如：用透明网格覆盖于图上并将读数送入计算机内，送入时可以用数字化板输入，也可以直接从终端键入；利用扫描设备直接对地图扫描可以得到二值（0 和 1）网格图象；利用航空像片象对的立体观察扫描可以得到地面高程的网格图；等等。当然，其它类型的数据也可以经过变换或插值计算成为网格数据(5.2.4)。一般地，一幅图形成一个文件存贮于磁盘。

为了存取和计算方便，多数系统是采用一行一个记录的方式，从左到右，从上到下，符合一般扫描方式，如图 5.18。

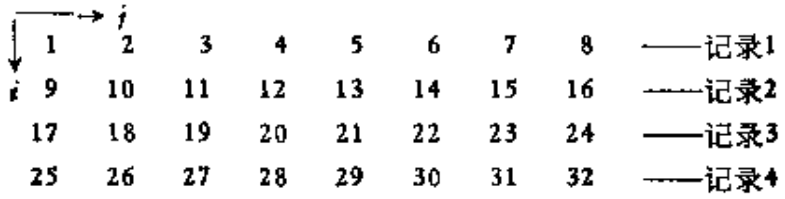


图 5.18　网格记录

有些系统，如图象处理工作站，为了显示和某些处理的方便，采用一块一个记录，如以 128 列×4行为一个记录；也有些系统，第一行从左到右，第二行从右到左，第三行再从左到右，如此重复，等等，对于具体系统，要注意其数据记录的说明。

对于需要存贮多种专题空间数据的情况下，选取同样大小的区域和同样大小的网格，比例尺也相同，这时每个网格包括两种或两种以上地理属性，可有以下三种记录方式：

独立文件方式——每一专题独立形成文件。

联合矩阵方式——在一张图中每个元素值表示二个或多个属性联合叠置（overlay）或综合叠置，如图 5.19。

多通道方式——类似于多波段遥感图象使用多个通道，将每种专题图放在不同的通道中，形成一个多通道文件，一起存取，便于分析。由于互相独立，在需要的时候，也可以只读其中若干个专

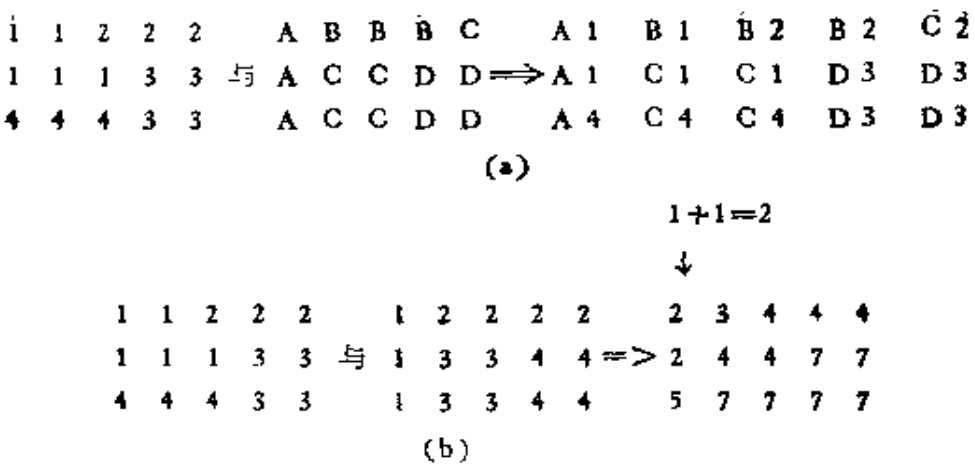


图5.19 联合叠置(a)和综合叠置(b)

题图幅。

3. 特点

网格编码方式与矢量编码方式相比有不同的特点。

首先，由于网格记录方式与遥感数据相同，使遥感图象数据很容易进入地理信息系统，成为信息源的一部分，只要位置和分辨率适当，可以和地图数据配准，实现多种数据的综合分析、运算及更新。这为地理信息系统开拓了更广泛的应用领域。

其次，使用计算机作处理比较方便，特别是作空间定位分析，而且许多图象处理所用的成熟计算方法和程序很容易被地理信息系统引进，存取和编程比较容易，显示成象和打印输出方法简单。

第三，与遥感图象相同，每一网格元素对应于地面一定大小的区域，这就是分辨率，它反映了数据的精度。显然，分辨率越高，也就是说每个元素代表的地面越小，精度越高，与此同时，图幅的数据量会成平方地增加，造成计算机存贮量增大和计算速度减小，这就产生了矛盾，因而分辨率不能无限制地提高。

第四，数据冗余。特别是对于专题地图，一个区域为同一属性值时，往往相邻元素属性值相同，却要一个一个重复记录，占据不必要的存贮空间，造成浪费。

为了克服网格格式存贮冗余度大的缺点，一些系统采用无误

差压缩编码方式来改善这种情况。

二、行程编码

行程编码（Run Length Encoding），又叫游程编码或变长栅格压缩式，是一种网格的压缩方式，也是常用的图象编码中比较简单的方式之一。它可以减少图象中信息的冗余度，使记录图象比特数大大减少，以便较快地传送各种图象和压缩图象的存贮量。在地理信息系统中，行程编码可以用来存贮数据，特别是专题数据，达到减少存贮量的目的。行程编码有一维行程编码和二维行程编码，这里，只讨论一维行程编码。

1. 编码方式

比较一行内相邻元素的值，具有连续相同值的同行元素的数目叫做行程。当相邻元素的值不同时，就开始下一个行程。在行程编码中，将原图只表示属性的数据阵列变成数据对（$g_i l_i$）的序列，这里，g_i 表示属性值，l_i 表示行程。具体编码方式有所不同，可以按列编码也可以不按列编码。

图 5.20 为一网格编码图，同一行中有连续相同值时，把属性值放在最后一列的位置上，见（b）图。

按列编码时，行程终点的位置以列数记录，又可以叫做行程终点编码。图 5.20(a)可以记为：

3 A 5 B 7 D 10

5 E 1 A 4 C 5 B 7 D 10

4 A 3 C 6 B 9 D 10

4 E 1 A 2 C 8 B 10

2① C② 6③ D 10

① 本行内属性变化的次数

② 属性

③ 行程终点列数

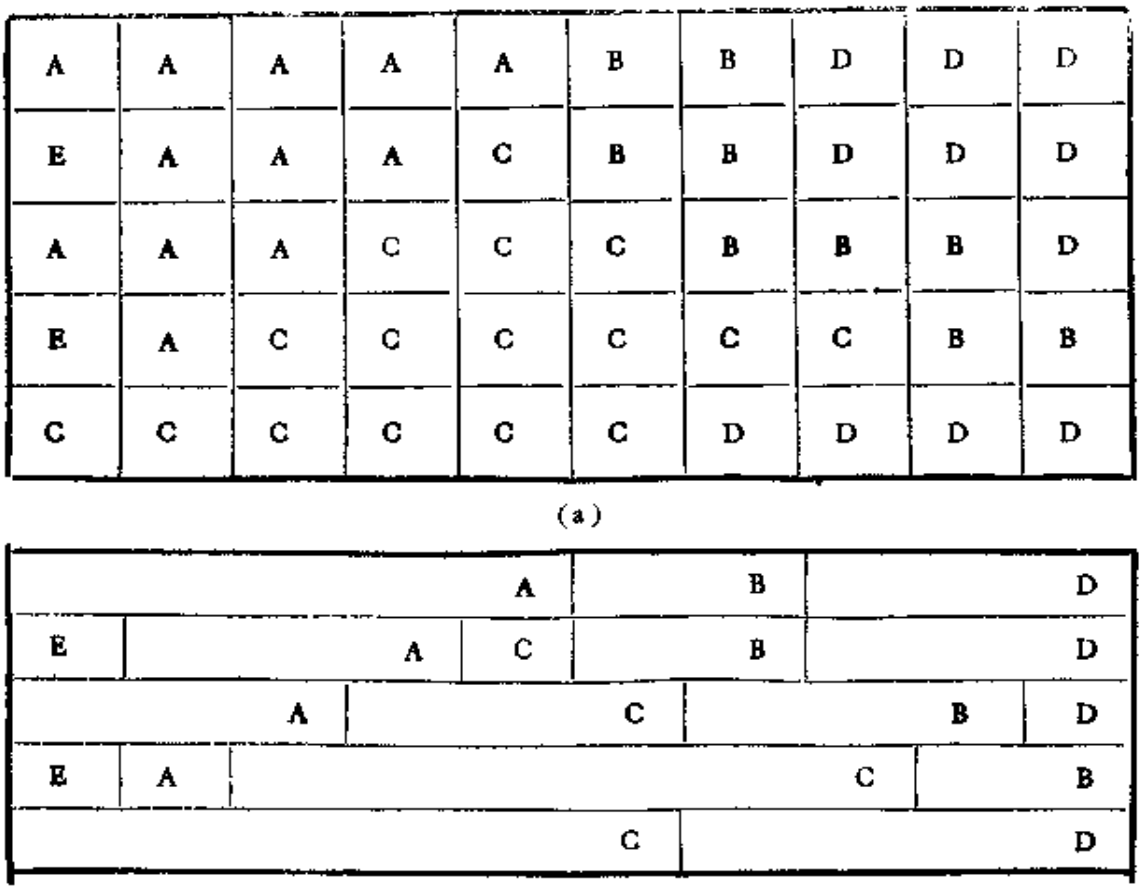


图5.20 行程编码示意

也可以只记录属性和行程终点列数，而从列数的变化可以推断行数的变化，在连续记录时，只要列数为 10，下一个属性便是下一行的记录内容，即记作：

A 5 B 7 D 10
E 1 A 4 C 5 B 7 D 10
A 3 C 6 B 9 D 10
E 1 A 2 C 8 B 10
C 6 D 10

这种编码恢复原图是很容易的。

不按列数编码时，行程终点位置以行程长度确定，又可叫做行程长度编码。这样图 5.20(a) 可以记为：

A 5 B 2 D 3

E 1 A 3 C 1 B 2 D 3

A 3 C 3 B 3 D 1

E 1 A 1 C 6 B 2

C 6 D 4

这种记录方式的缺点是位置不清，当连续记录时，要注意原图的总列数(列数相加为 10)以便恢复。

2. 特点

无论哪一种记录方式，每一行程都用二个值记录：g_k，l_k，在一行内，如果有 n 个行程，则记录为 $g_1l_1, g_2l_2, \cdots g_nl_n$。显然，属性(或叫特征值) g_k 的变化次数可以从 1 (一行中所有的元素具有相同的值)到 N (一行中所有元素的值都不相同)，而行程 l_k 相应地可以从 N 变到 1，这里，N 是一行中包括的列数。如果一幅图中，大多数行程大大地小于 N，这个编码就不大有效。因为总记录的比特数并没减少或减少得很少。相反，g_k 的变化次数越少，l_k 越长，记录总比特数越少，压缩比越大。可见，行程编码有一定的适用范围。

行程编码适用于类型区面积较大的专题图、遥感影象分类区集中的分类图、黑白分明的二值图(黑与白)等；而不适合于高程值连续变化的地形图、灰度值渐变的遥感影象图以及类别区域分散、面积小的分类图等等。

有时为了减少数据的存贮量，除了应用行程编码，还同时应用联合矩阵式文件，使多种专题图的存贮量大大减少(图 5.21)。

三、链式编码

网格数据表示的图如果是等值线图形或元素的值呈梯度分布类似于等值线时，可以采用链式编码，达到数据压缩的目的。

这种编码主要根据图形是数值相同封闭曲线而寻迹追踪的原则，它属于数字空间处理的图象编码又叫弗利曼码。在 GIS 中也

常常借用这种编码的原理来处理数据。

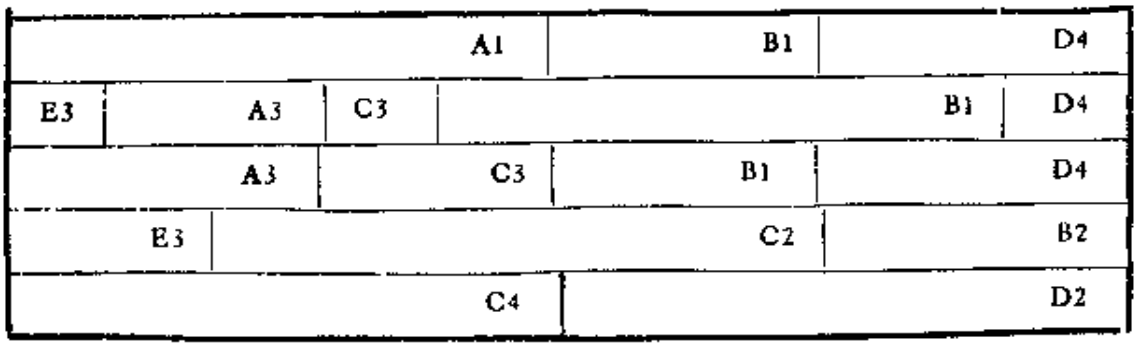


图 5.21　联合矩阵方式与行程编码同时运用示意

图 5.22 是一示意图，(a) 为一等值线图形，(b) 为追踪等值线时的编码原则：对于中间元素，周围八个相邻元素中哪个与中间元素数值相同。取上方元素为 0，其余沿顺时针方向依次为 1，2,3,4,5,6,7。编码方式如(c)所示：首先找到同一等值线的起始点，从全图的左上方扫描，从左至右，从上至下，先扫第一行，如遇到没有记录过的点就是起点，如没有这样的点就再扫第二行从左至右，直到发现没有记录过的点，而且数值也不为零，这就是一条等值线的起点。记下起点的值及 x、y 坐标(行和列数)，并记下这个等值线的编号。然后，以顺时针方向寻迹，找到相邻的等值点，并按 (b) 的方式编码，如遇到不能闭合的支叉，可有不同方法处理：可以原路返回，也可以记下支叉起点和结束点，再从起点处进入另一条路径。最后，结束一条等值线后，再开始搜寻下一条等值线，两条等值线之间设立分隔标识码。这样图 5.22(c) 可以记录为：

等值线号	等值线值	起点行	起点列	链码
1	100	2	4	22332435576557670101 1

链式编码舍掉了非等值线处的记录数据，只记录有等值线值的数据，并且用跟踪方法编码，实现了压缩的目的。但这种记录方式应用面较窄，只针对某些图形，而且作图形之间的运算困难。

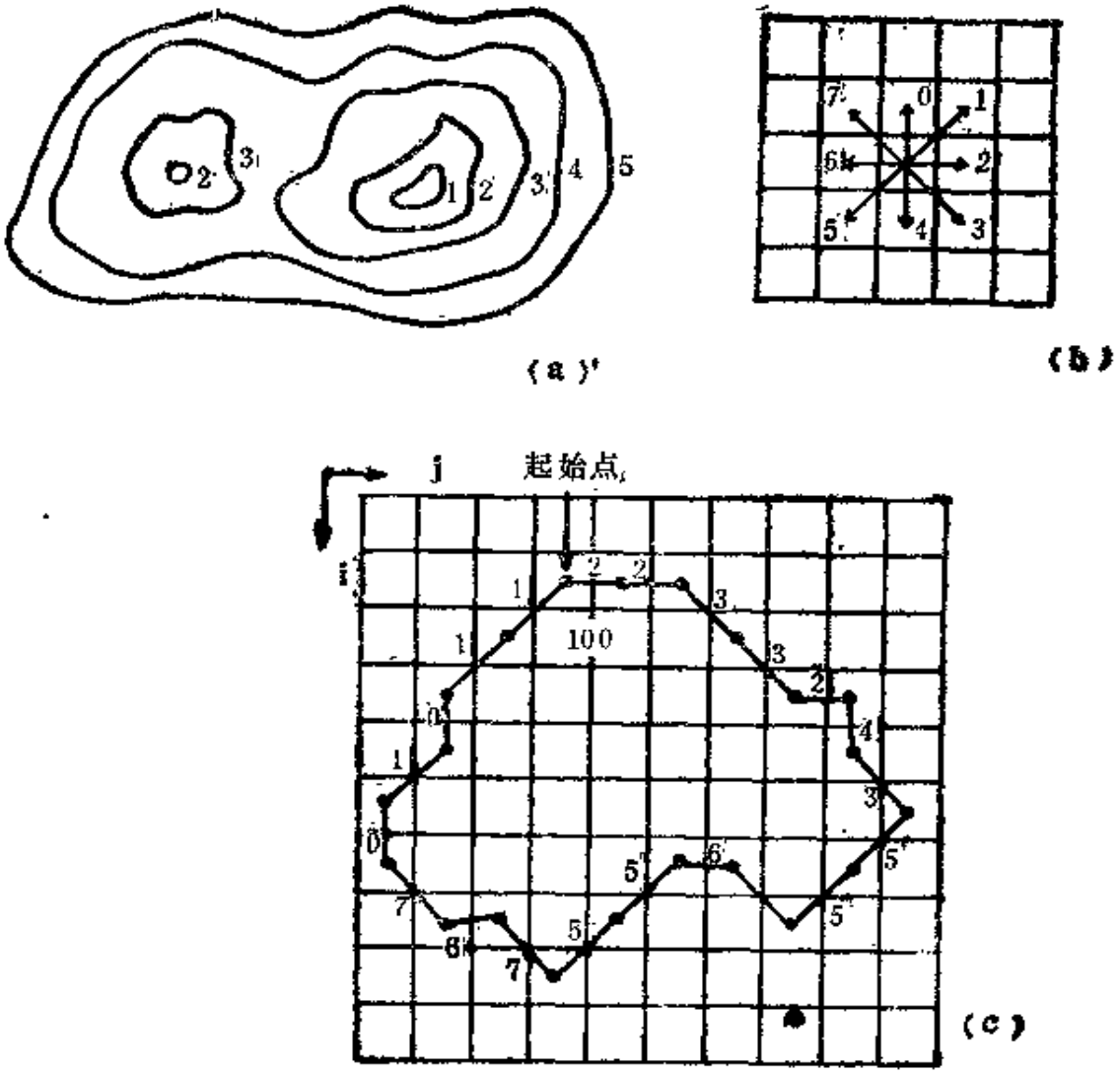


图 5.22　链式编码

因而在 GIS 中用来存贮数据，运算时常常先恢复原记录方式再运算；也可以用链式编码的原理，作为网格数据转变成矢量数据的一种过渡形式。（参考 5.2.5）这方面的应用，还有待进一步探索。

四、四分树编码

四分树编码（Quadtree encoding）又可以译作四叉树，或四元树编码。它是一种特殊的图象数据结构形式。目前，已有一些地理信息系统采用四分树编码作为整个系统基本的数据存贮、图形操作和运算的记录方式，取得了成功的经验。但实现商用化或成为可推广应用的 GIS 还有差距。这里，作为数据压缩的一种编码方式，介绍一些四分树的编码特点。

所谓"四分树"是指将一个图象包括的区域分成四个大小相同的部分，类似三角中的四个象限，我们把这四个部分按照地图上的位置记作西南（SW）、东南（SE）、西北（NW）、东北（NE），而每一个部分又可以进一步作四等分。如果把没划分时作为 0 层，第一次划分作为 1 层，则这次再划分便是 2 层，将划分后的每部分再次划分成四等分，便成为 3 层……依次划分，直到划分到每一象元不能再划分(图 5.23)。但是，这种划分并不是所有部分都分到

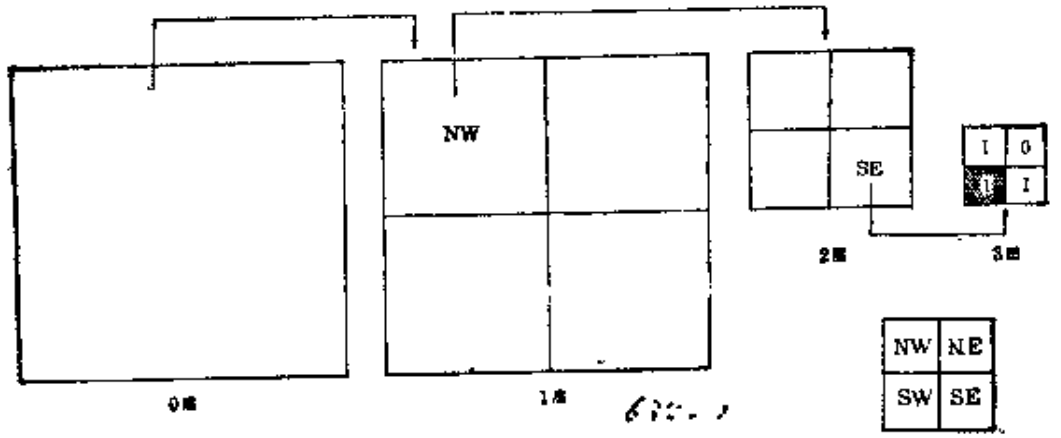


图 5.23　分解过程

象元止，而是当在任一层划分完后，都要考察每一部分，若在一部分中每一象元的属性值都相同或近似相同，那么这一部分，或这一象限将不再分解，而是把所有象元(或元素)合并成一个大的单位，这个大单位只用一个属性数值表示，省略了每一个象元的记数，节省了存贮量。

图 5.24 是一个四分树的简单实例，原图(a)是一个 8×8 的简

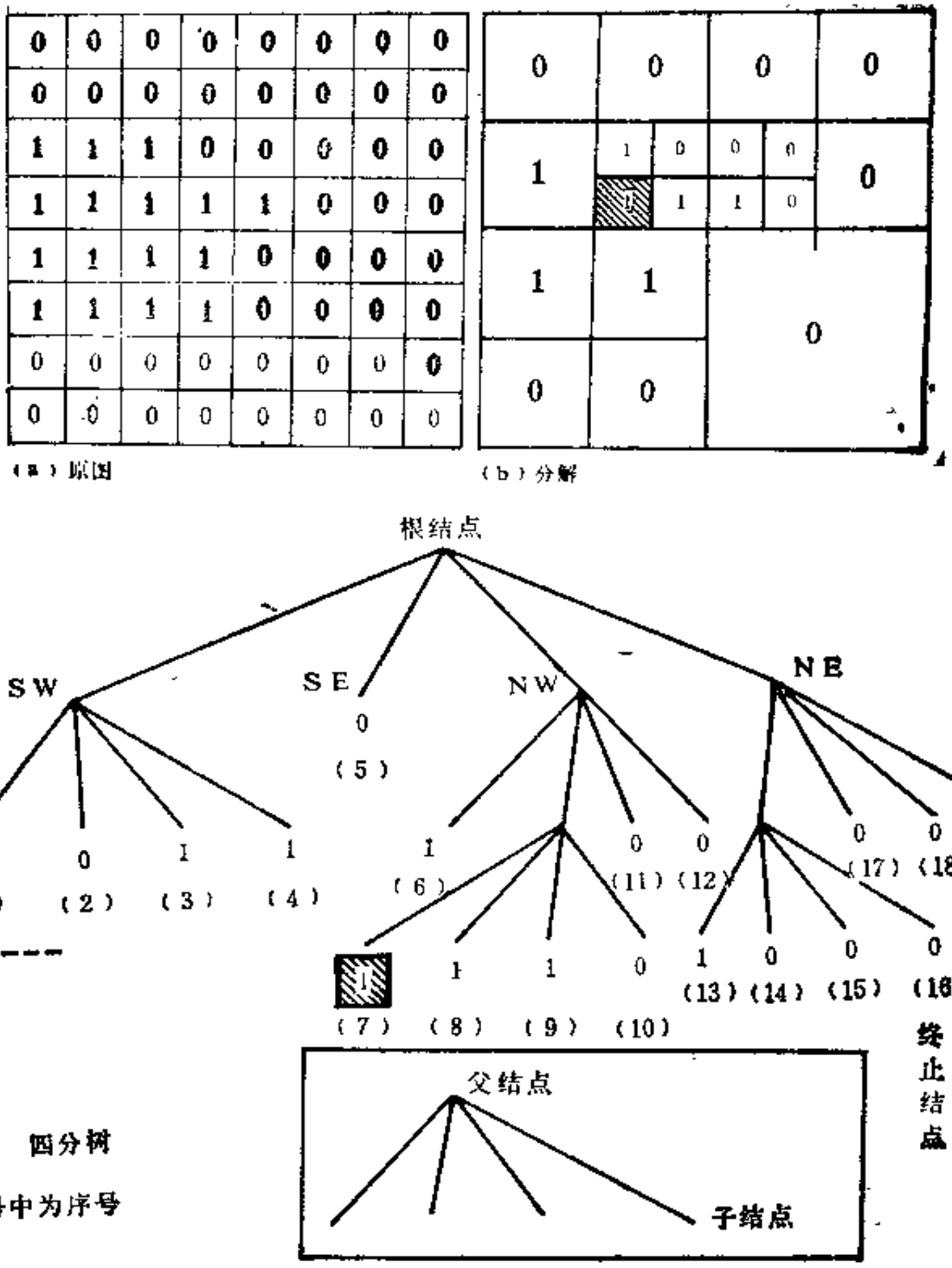

0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
1 1 1 0 0 0 0 0
1 1 1 1 1 0 0 0
1 1 1 1 0 0 0 0
1 1 1 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
(a) 原图
(b) 分解
根结点
0层---
1层--- SW
SE
NW
NE
2层--
3层-------
0 (1) 0 (2) 1 (3) 1 (4)
0 (5)
1 (6)
1 (7) 1 (8) 1 (9) 0 (10)
0 (11) 0 (12)
1 (13) 0 (14) 0 (15) 0 (16)
0 (17) 0 (18) 0 (19)
终止结点
父结点
子结点
(c) 四分树
括号中为序号

图5.24 四分树实例(一)

单网格图。其大小也可以记作 $2^3\times2^3$，这是因为为了使四分顺利进行到象元级，原始图象必须是 $2^n\times2^n$（n 为正整数）大小。如果不符合条件应补零至 2 的 n 次幂。为了简单起见，假定这是一个专题图，某种类型地物如砂土所在地定为 1，而其它非砂土地物所在地属性定为 0。按照上述四分的原则分解此图，得到（b）所示分解图，凡在某一层象限中各象元数值相同，均为 1 或均为0，那么这一象元变成一个单位。在本例中，最多分解到 3 层。这里，把层数称作深度，则最大深度是 3 层，每一层的宽度(即边长包括的象元个数)可以用式表示：

$$\text{宽度}=2^{(\text{最大深度}-\text{目前深度})}$$
$$=2^{(\text{最大层数}-\text{目前层数})}$$

如第二层宽度为 $2^{3-2}=2$，也就是第二层中一个单位宽包括二个象元(见图 5.23)。

图 5.24(c) 是四分树结构的形象结构图。其形状是倒着的树形，最上边为 0 层，只有一个结点，称为根结点好似树根。每一结点可以往下分出四支，从左至右，按观察顺序在本例中依次为西南、东南、西北、东北，以后每层都以此顺序观察。分出后的结点叫做“子结点”，子结点中还可以再往下分解的结点又叫做“父结点”，再分出的结点又是“子结点”，依次往下，直到不可再分的“终止结点”，终止结点好似树叶，因而形成树状。每一次结点分叉都对应一层，由此层数得到深度之名。（c）图中每一个终止结点处都列上了这一结点的属性值，在本例中只有 0 和 1。这样，属性值的存贮可以按图中从左到右，从下到上的顺序存贮，排列如下：

0 0 1 1 0 1 1 1 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 ···(a)

这些终止结点的位置记录起来比较复杂，要和计算机内的存贮方式联系起来。下面以(c)图中左起第七个结点为例说明这个结点地址是如何得到的：这一点在图中的位置在图 5.23 和图5.24 中用阴影表示，在第三层的西南点。表示它的位置包括二个部分

内容：深度和行与列的位置，假定 16 位计算机内以右边四位代表深度。按二进制计数法，深度 3 记作 0011；左边位数记录按层表示的行列数，在每一个四分的单位中，本例都以左下角为原点，从 0 行 0 列开始，方位西南、东南、西北、东北依次行列坐标为：0,0;0,1;1,0;1,1(见图 5.25(a))，这样可以分析出这一点每一层的坐标位置分别为 1, 0; 0, 1 和 0,0，(图 5.25 (b))，这个坐标位置按层的顺序依次记在深度的左侧（见图5.25 (c))，这一点的位置便记为：

1 0 0 1 0 0 0 0 1 1

根据二进制与十进制的换算，自右至左每一位代表 $2^{(位数-1)}$ 依次为

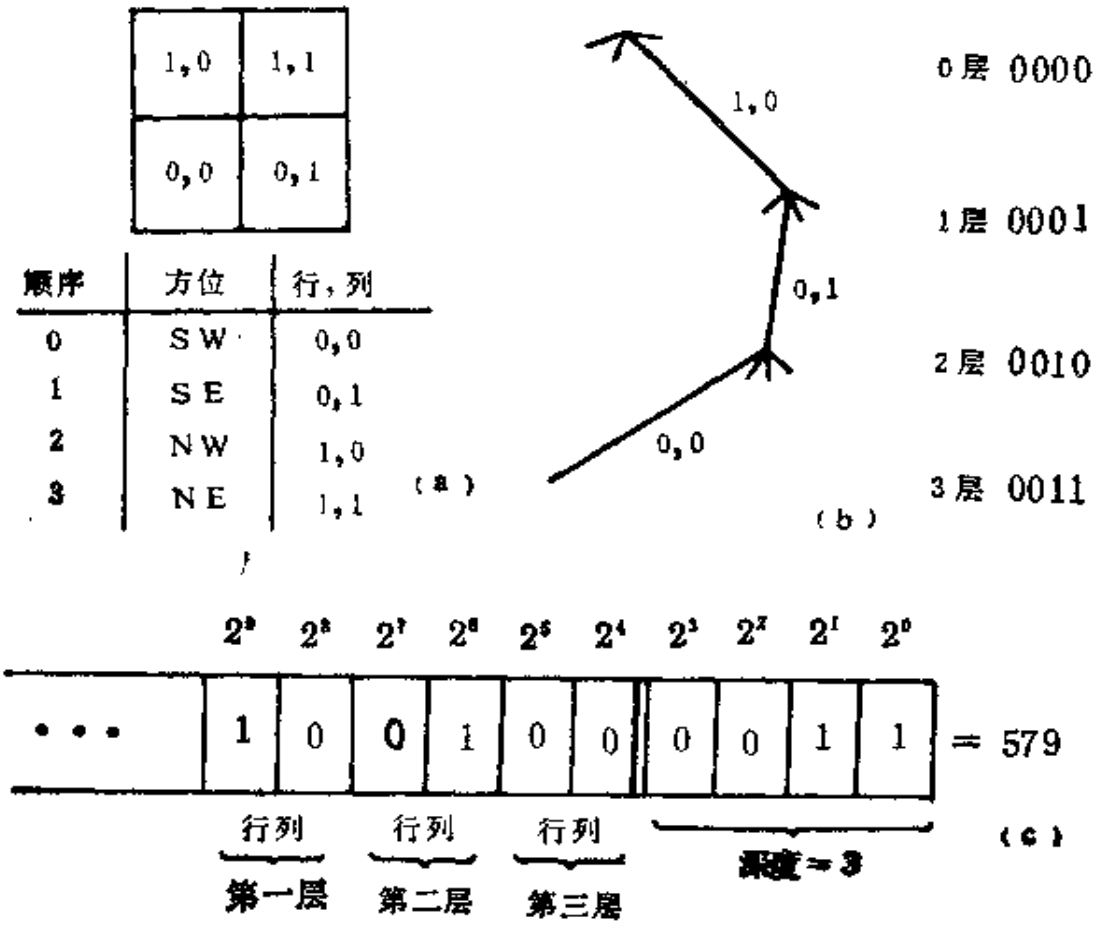


图 5.25　四分树位置编码实例(一)

$2^0, 2^1, 2^2, \cdots\cdots$最大深度为 3，左侧便得 6 位，深度不够 3 的也补零到 3 层。以便保持各点都是 6 位。因此，上面二进制数等于十进制 579。

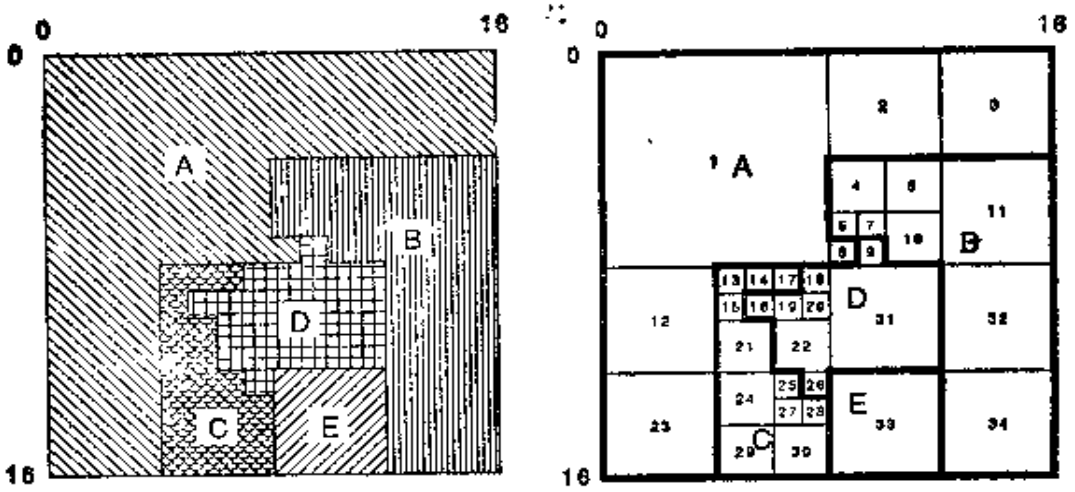
同样地，可以依次求得树上各终止结点的地址，自左至右各点位置为：（图 5.24(c) 中括号内表示序号）

2, 66, 130, 194, 257, 514, 579, 595, 611,
627, 642, 706, 771, 787, 803, 819, 834, 898,
962 ···(b)

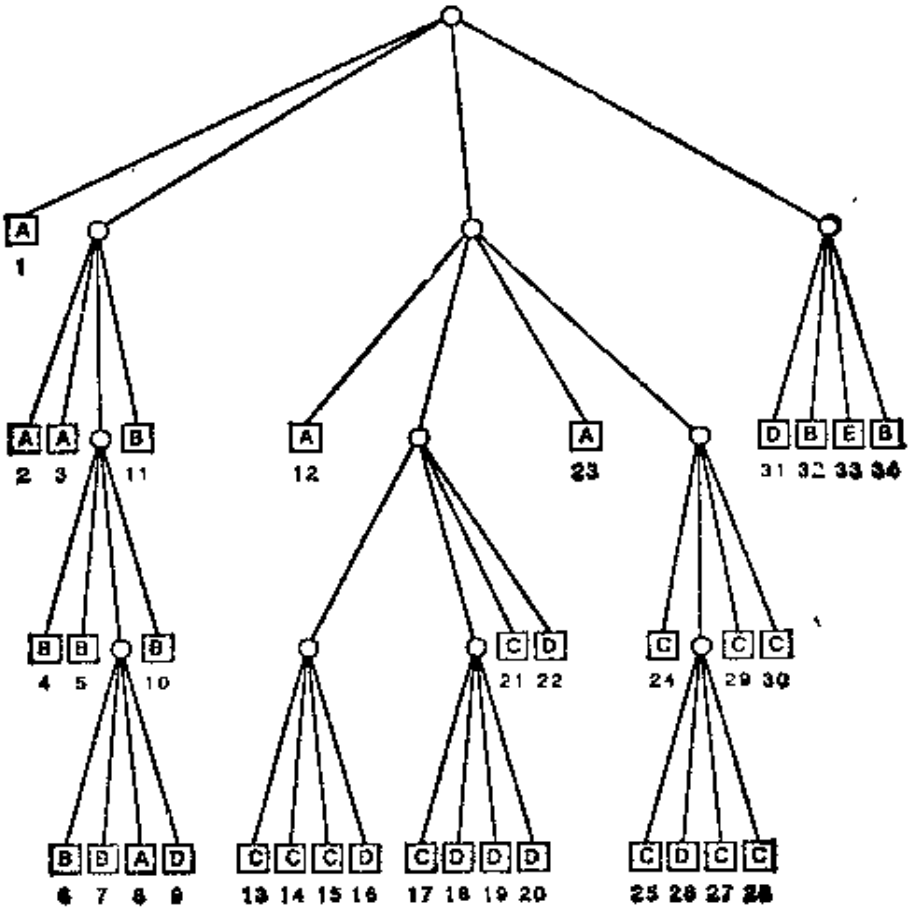
(a) 与 (b) 合在一起便记录了位置和属性的全部信息。可见，这种数据结构比原来每个元素都记录的网格数据在数据量上少了很

表 5.14 结点位置编码对照

结点序号(自左至右)	二进制	十进制
1	0 0 0 0 0 0 0 0 1 0	2
2	0 0 0 1 0 0 0 0 1 0	66
3	0 0 1 0 0 0 0 0 1 0	130
4	0 0 1 1 0 0 0 0 1 0	194
5	0 1 0 0 0 0 0 0 0 1	257
6	1 0 0 0 0 0 0 0 1 0	514
7	1 0 0 1 0 0 0 0 1 1	579
8	1 0 0 1 0 1 0 0 1 1	595
9	1 0 0 1 1 0 0 0 1 1	611
10	1 0 0 1 1 1 0 0 1 1	627
11	1 0 1 0 0 0 0 0 1 0	642
12	1 0 1 1 0 0 0 0 1 0	706
13	1 1 0 0 0 0 0 0 1 1	771
14	1 1 0 0 0 1 0 0 1 1	787
15	1 1 0 0 1 0 0 0 1 1	803
16	1 1 0 0 1 1 0 0 1 1	819
17	1 1 0 1 0 0 0 0 1 0	834
18	1 1 1 0 0 0 0 0 1 0	898
19	1 1 1 1 0 0 0 0 1 0	962



(a) 原图(属性 A、B、C、D、E)　　(b) 分解(原点左上,顺序 NW, NE, SW, SE)



(c) 四分树

图 5.26　四分树实例(二)

多，实现了压缩数据的目的。数据系列（b）的得到见表 5.14。很显然，图形同值的面积越大越集中，四分树对数据压缩的效果越显著。如果相邻象元数值变化频率高，如：遥感影象灰度值逐渐变化，梯度不明显，这时，使用四分树的优越性就不大明显，反而在编码上太繁锁了。

另外，四分树记录中，有了地址和值，也就是知道了位置和属性，这一图形就被确定下来。寻找其规律性可以完全恢复原来的图形，并且进而进行图形操作和其它 GIS 所需要的运算。图 5.26 是另一四分树实例[69]。所不同的是本例以左上角为原点，记录顺序则改为西北、东北、西南、东南，并且属性不再是 1，而是 A、B、C、D、E。所用分解方法与上例相同，不再赘述。

上面仅举二例说明四分树编码的基本概念。实际上象其它编码一样，有多种四分树存贮方式，针对不同的对象，解决存贮空间和运算速度等问题。并且，除了这里介绍的区域四分树外，还有点四分树、线四分树，可以分别重点记录图形中的点、线、面要素等。如何利用四分树数据结构建立地理信息系统，完成 GIS 的各项功能，又能使系统较为广泛地推广应用，还在研究。

5.2.4 矢量数据转换成网格数据

由于技术发展的历史原因，存在各自独立的矢量数据的地理信息系统和网格数据的地理信息系统。为了在一个系统中可以兼容二种数据，以便有利于作进一步的重叠和复合分析，常常需要实现两种数据间的转换。

许多数据，如行政边界、交通干线、土地利用类别、土壤类型等都是用数字化的方法输入计算机，表示成为多边形或点线数据。有时也有直接用扫描方式输入网格、但因设备和软件昂贵，使用较不普遍。这种数字化后的矢量数据直接用于多种数据的复合分析将比较复杂。特别是不同数据在位置上要一一配准，寻找交点并进行分析。相比之下，利用网格数据，根据图象处理的原理进行这些

工作则容易得多。加之，土地覆盖和土地利用等数据常常从遥感图象中获得，这些数据都是网格数据。因此，矢量数据与它们的叠合分析更需要把矢量数据转换成网格数据。

矢量数据的基本坐标是直角坐标 x、y，其坐标原点一般取图的左下方，网格数据的基本坐标是行和列 (i,j)，其坐标原点一般取图的左上角。两种数据变换时，令直角坐标 x 和 y，分别与行和列平行。由于矢量数据的基本要素是点、线、面，因而只要实现点、线、面的转换，各种线划图形的转换问题基本上都可以得到解决。

一、确定网格元素的大小

网格元素(象元)的大小实际也是网格分辨率。根据原图的大小、使用精度要求和变换后所占计算机存贮空间等因素决定，例如：要和 TM 卫星图象匹配的一幅图，分辨率最好与 TM 分辨

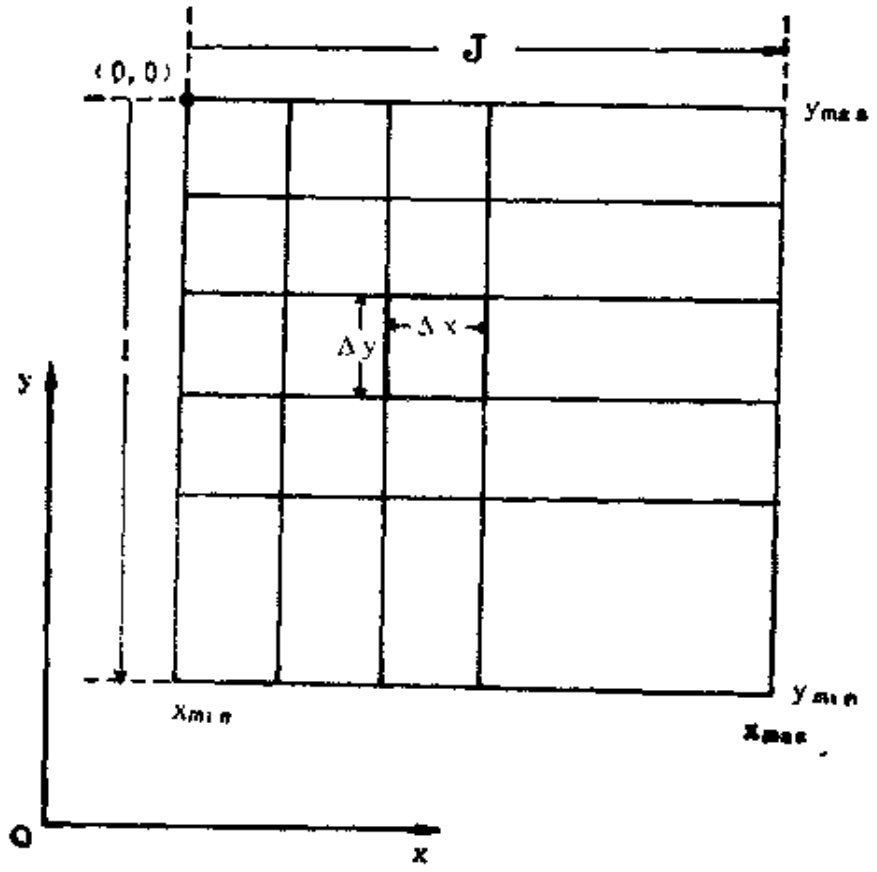


图 5.27　两种坐标关系

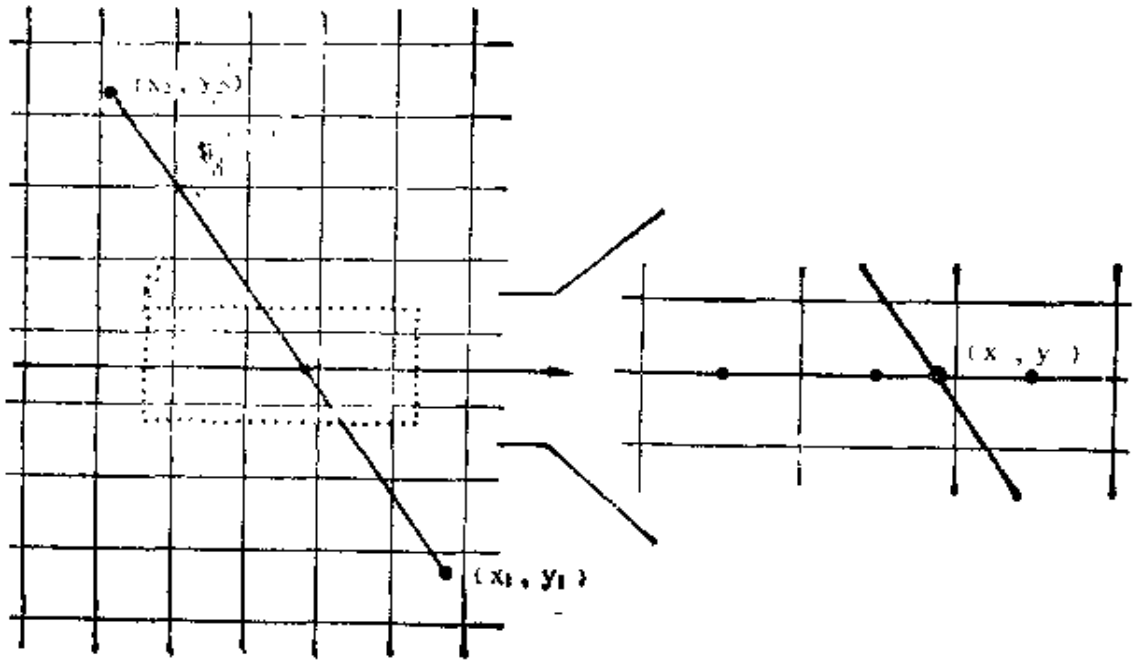


图5.28　线的变换

率相同，取作 30×30m。考虑以这样的精度，变换后图象大小是否合适。再如：地形图的变换就要考虑地形的起伏变化，地伏变化较小，可以分辨率低些，即元素所代表的地块较大，反之，丘陵沟壑地区，必须分辨率高，以便较好地反映出地形变化的真实情况。

网格元素在 x,y 坐标系中的大小可以求出，用 Δx 和 Δy 分别表示元素的二个边长，x_{min}，x_{max} 表示全图 x 坐标的最小值和最大值，y_{min}, y_{max} 表示全图 y 坐标的最小值和最大值，I, J 分别表示全图网格的行数和列数。（见图 5.27）则它们之间的关系可以表示成：

$$\begin{cases} \Delta x = \dfrac{x_{max} - x_{min}}{J} \\ \Delta y = \dfrac{y_{max} - y_{min}}{I} \end{cases} \tag{5.1}$$

这里 I 和 J 可以由原地图比例尺，根据地图对应的地面长宽和网

格分辨率相除求得，取整数。

二、点的变换

点的变换十分简单，只要这个点落在哪个网格中就是属于哪个网格元素。其行、列坐标 i,j 可由下式求出：

$$\begin{cases} i = 1 + \text{Integer}\left(\dfrac{y_{max} - y}{\Delta y}\right) \\ j = 1 + \text{Integer}\left(\dfrac{x - x_{min}}{\Delta x}\right) \end{cases} \tag{5.2}$$

这里，Integer 表示取整数，由于计算机取整舍掉小数，所以实际网格行列数再加 1。最后，网格点的值用属性表示。

三、线的变换

曲线在数字化时输入多个点，形成折线，由于点多密集，折线在视觉上形成曲线，因此相邻两点之间是直线。只要知道直线转换网格的方法，曲线和多边形边的转换就可以完成。

假定一线段两端点之间经过若干个网格元素（至少一个），如图 5.28 所示，两端点坐标已知，为 $(x_1,y_1)(x_2,y_2)$，则要确定直线经过的中间网格，只要先确定中间那一行的中心坐标 y，例如由(5.2)式先标出两端点的行数 i 为 3 和 6；那么需要知道直线经过的 4、5 两行哪个网格与直线相交，因为行数已知，主要计算列数，计算时，先找到 4 行 $(i-4)$ 中心的 y 值是多少，这可以由 Δy 和 y_{max} 求出

$$y = y_{max} - \Delta y \cdot \left(i - \frac{1}{2}\right) \tag{5.3}$$

则 x 为

$$x = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}(y - y_1) + x_1 \tag{5.4}$$

由 x 值再从 (5.2) 式可以求出这一点的 j 值。同样方法可以计算第 5 行 $(i-5)$ 的 j 值。

依次用同样方法找到直线经过的每一网格，并用本直线的属

性值(特征值)去填充这些网格，完成直线的转换。对于曲线或多边形边上的每条直线作连续运算，可以完成曲线或多边形的交换。整个过程 x,y 计算顺序也可以交换，先求列数 j，再求行数 i。读者可以根据图形的方向自行选择，计算过程相似。

四、面的填充

网格化后的数据记录方式为属性直接表示，即网格元素（象元)的值用属性表示，因而多边形内各点的值不能表示成背景值 0，而应与多边形边的网格值相同，多边形内面域必须用属性值填充。

填空的方法很多，为了填充准确，必须使计算机能正确地判断多边形内的元素与多边形外的元素。一个必要条件是多边形严格封闭，没有缝隙，这在数据数字化输入时应已编辑检查完毕。

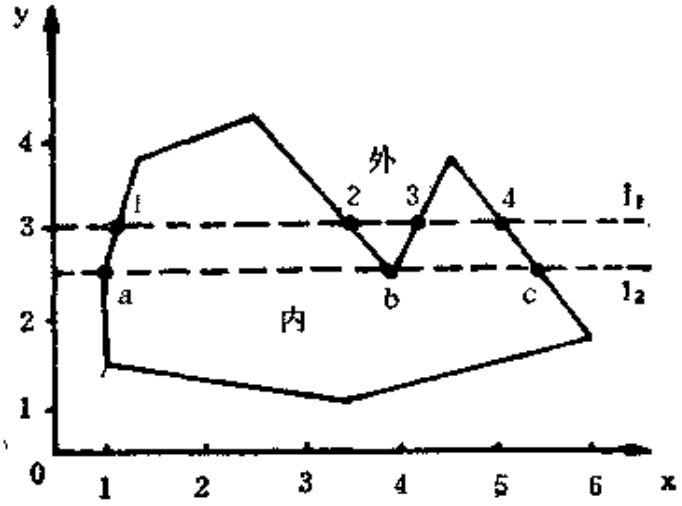


图5.29　多边形内外

1. 方法一

从一点向外发出一条射线，与多边形的边相交，如果交点是奇数，这一点在多边形内；如果交点是偶数，这一点在多边形外。为了方便，都从 y 轴开始沿平行于 x 轴方向作扫描射线，见图 5.29，与多边形应有偶数交点，2 点或 4 点，如图中 l_1 有 4 个交点，这时，两两坐标点之间应为多边形内，即 x_1 与 x_2 之间，x_3 与 x_4 之间，它们的 y 值相同。但有时会出现某种奇异性，如扫描线 l_2，与

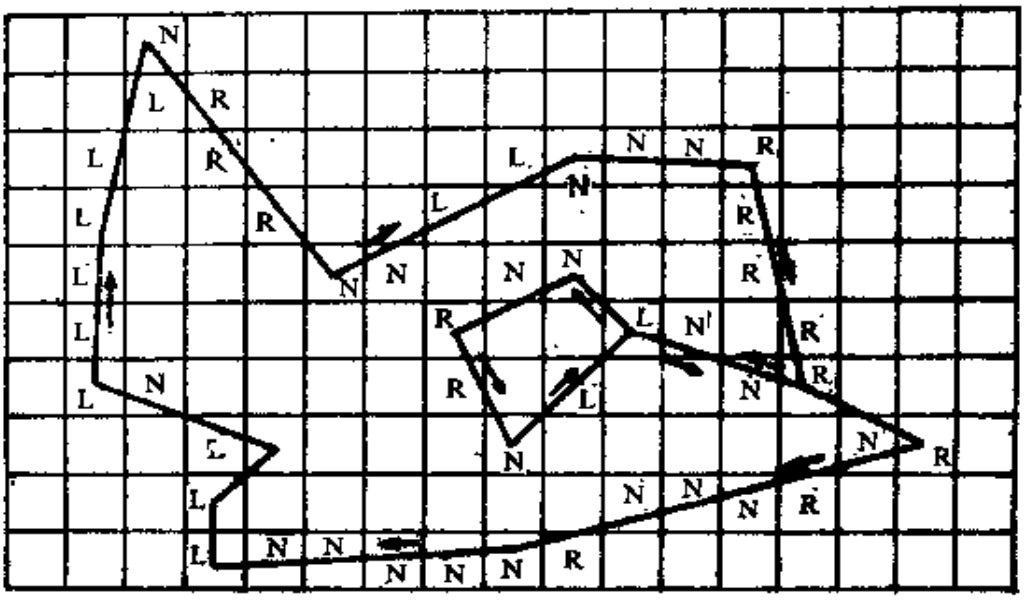


图 5.30　方法一

多边形只有奇数交点 3，这里 b 点为特殊点。这种情况下，要利用邻点进行分析，在 a 与 c 点附近 y 坐标单调减少或单调上升，而 b 点则上升与下降都有，因此 b 点为 y 的极值点。对于极值点可以删除也可读两次，也就是 x_a 与 x_b 之间，x_b 与 x_c 之间，都判断为多边形内的点，即作为填充属性的点。

根据以上分析，采用对多边形边上网格点进行判断的方法，见图 5.30，设多边形内有岛，要填充的是多边形与岛中间的区域。暂时用一线将两者连通，为了统一，规定多边形边的跟踪为顺时针方向，中心岛的跟踪为逆时针方向，这样可以保证被填充的区域一定在边线前进方向的右方。具体作法是，从某元素点开始跟踪边线，将边线经过的每一元素赋予字符 R、L、N 中的一个，直到回到起始点结束。其中，R 代表右边，行数一直增加的元素为 R；L 代表左边，行数一直减少的元素为 L；N 为中，凡是前面分析的顶点元素（行值与附近元素相比达到最大或最小的元素），或者在 L 与 R 之间，与相邻元素行数相同的元素均赋予 N。最后，逐行扫描，以多边形的同一属性值填充所有 L 与 R 之间的元素，将 0 改为属性值，

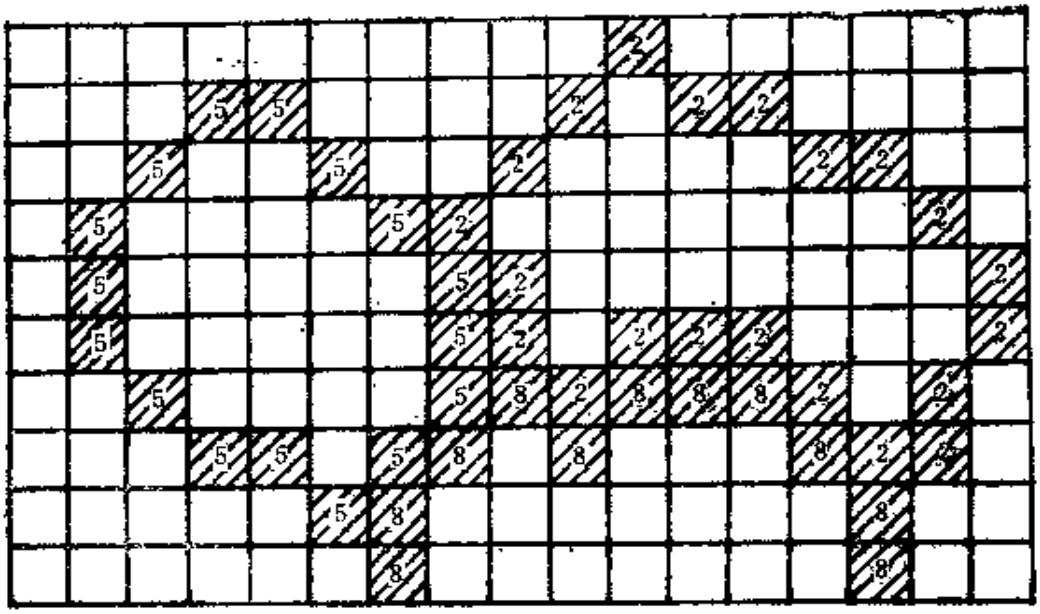


图 5.31　方法二

L、R、N 元素恢复原属性值。

2. 方法二

对于属性(特征值)不同的多边形，例如土壤类型图，可以先将每个多边形独立跟踪赋予各自的属性，构成边界网格图，令公共边界不同类网格不重叠，如图 5.31。

然后作一次自上至下，自左至右的扫描，使所有多边形内的 0 值元素"向左看齐"，均与左边界的值取得一致，即多边形值为 5 的内部元素全取 5，多边形值为 2 的内部元素全取 2，与左边界 2 看齐，其余类推，一次完成填充。

有时，在构成边界网格图时，公共边只服从一边属性，厚度是单元素而不是双元素，例如，规定保留多边形左边和上边时，图 5.31 中 5 和 2 的公共边只保留多边形左边界2，2 和 8 的上下公共边只保留上边界 2(指行数相同的元素)。这种作法对于下一步的扫描填充完全没有影响。

3. 方法三

一些矢量数据文件属性与位置分开记录，或用标号文件记录

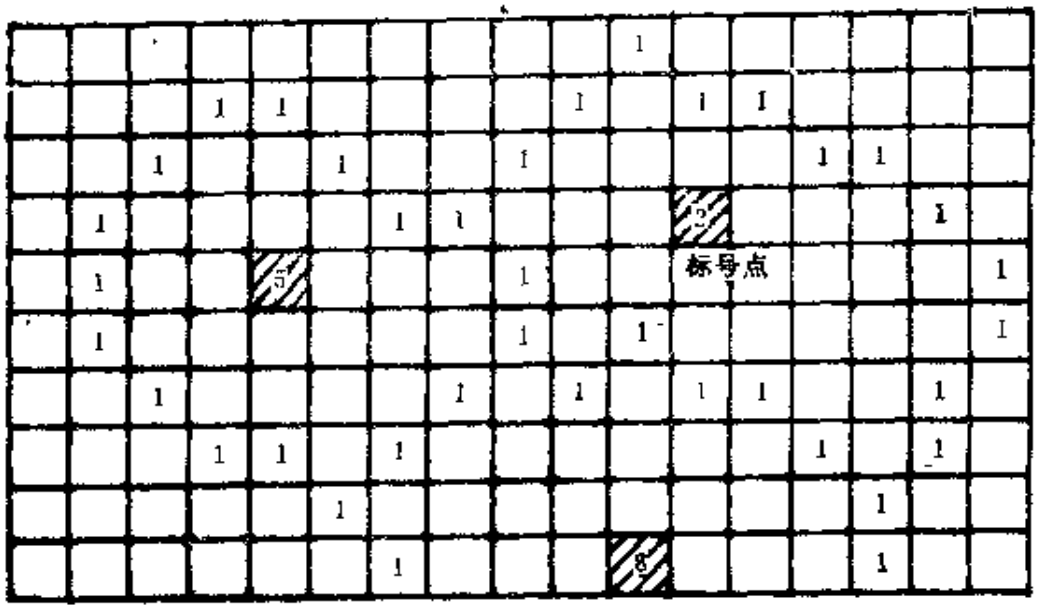


图 5.32　方法三

多边形内标号的位置和属性。这时，可以在转换网格数据时，全部用 1 记录各个多边形的边，同时转换所有类型的标号并记录其属性值，如图 5.32 所示。

利用点的扩散方法，即从标号点向四周邻域扩散，使邻域的值与中心值相同，直到边界为止。中心填充完毕后，将边界值，利用靠向一边的规定，例如靠左靠上，使所有边界的 1 值与左或上相邻元素属性值相同，成为一幅分类图。

五、注意的问题

矢量数据变成网格数据并不困难，但由于矢量数据记录方式各不相同，实际完成时还会遇到一些技术问题，这里仅提出交叉处的问题。

多边形之间的公共边原来只是一条交界线，转变成网格后，或为有一定宽度的界线，产生了一定的近似性。特别是几条线交叉处，一个网格元素中包括了相邻的几种类别，转换时只能用其中的一种类别作为交叉点所在元素的类别，这种误差应在允许的范围内。如果提高精度，减少误差，必须提高分辨率，使一个网格元素

(象元)对应地面尺度变小，如分辨率由 100×100 米一个元素提高到 50×50 米一个元素，但计算量和存贮空量将随之增加四倍。这种网格数据原有较大的冗余，分辨率的提高更大大增加了冗余量，因而必须选择适当。

交叉点还会引起另一种问题。当原有专题图等数字化输入计算机时，为了保持原图的精度，每条曲线输入的点往往十分密集，这样，转换成网格时就不会出现直线变换那种填充线元素的情况，而是多个输入点在一个网格元素中。如图 5.33 所示。这种情况如果发生在两类交界处问题还不大，只要取其中一类作为元素类别，另一类的部分便是误差，当然，严格说，应取面积大的那一类。如果发生在图中的多类交界处，应该取哪一类呢？粗糙地作法是任选一类作为元素的类别都行，那末就可以顺序变换输入点为网格，后面变换的点将前面点覆盖，最后一个变换的点是什么类别属性，这个元素点就是什么类别。这样做，运算起来简单，但精度较低，会造成一些边界属性不连续。为了精确，可以采取多点占优法，哪个类别输入在同一网格中的点多，这一网格点就属于哪个类别。这样做法，计算量将增加。还可以采用其它一些方法来改进运算，提高精度，尽可能使变换后的图接近原图。

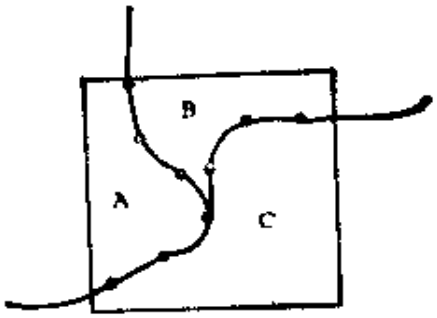


图5.33 多个点进入一个元素

5.2.5 网格数据转换成矢量数据

有些地图或专题图经过一定处理，去掉文字断点，用扫描方式送入计算机，记录为网格数据，再变换成矢量数据存贮、分析和成图，如加拿大地理信息系统的作法。另外，网格图或遥感分类图象，为了存贮或笔绘成图等目的，也需要变换成矢量数据。因此这一工作十分必要。

网格数据转换成矢量数据比相反的转换要复杂得多，主要是因为对于网格图象要求较严格，使预处理的工作量最大，有些图象在外形上距离线划图很远，就不可能进行转换。所有的预处理工作可以归结为把网格图象处理成近似线划图的二值图形，即只有0和1的图形，每条线必须一个象元宽度，独立点或断点不能太多，其主要流程如图5.34。如果是完全填充的分类图，需要进行边缘提取，将中心的填充部分变成背景值0。如果是具有图形状的一定线宽的图象，我们权且称之为扫描图，因为它可以由扫描得到，(也可以从其它处理中得到)，对这种图需要细化处理，使线宽收缩至1个象元。编辑工作可以修正一些不足之处，如小的间断点连接、噪声去除等，最后用矢量方式记录处理后的图形。

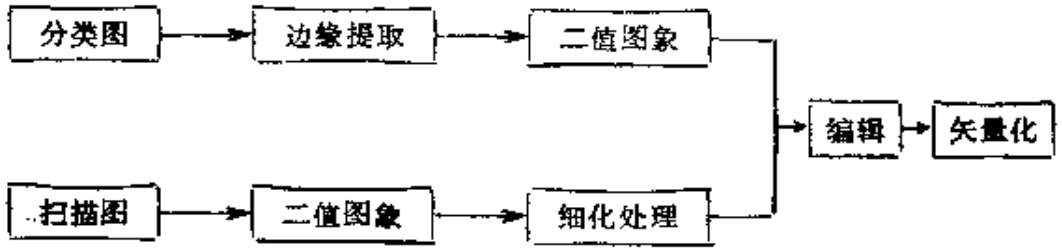


图 5.34　网格数据转换成矢量数据

边缘提取在图象处理部分已经讲过，这里不再重复。只是处理时要注意对分类图的修饰，如大面积类别中小"岛"的删除，使类别区域比较整齐，去掉细碎部分，便于划分界限。整个处理针对不同图象，可以采取不同方法。边缘提取后，取一阈值得到0,1的二值图象。这一过程的效果如何，主要取决于分类图象是否接近专题图，如果分类结果不整齐，有许多散斑，那么，要想矢量化是很困难的。

细化处理是个比较复杂的计算过程，粗做和细做差别很大，方法也很多，可从不同角度加以讨论。在这里，介绍其中的二种。

一、细化方法一——检测突出法

1. 预备知识

由于处理过程中涉及二值图象，因而先介绍几个有关的二值

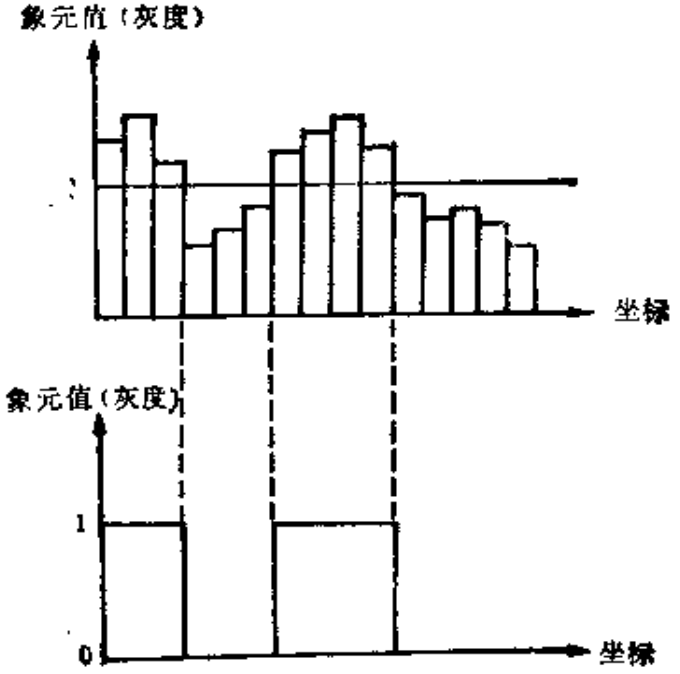


图 5.35　二值化　上：原图　下：二值图

图象的概念，并采用图象处理中一些名称。

二值化处理——

设一阈值 t，(图 5.35)则二值图象 $T(i,j)$ 为

$$T(i,j)=\begin{cases}1, \text{当 } f(i,j)\geqslant t \text{ 时}\\ 0, \text{当 } f(i,j)<t \text{ 时}\end{cases} \tag{5.5}$$

$f(i,j)$ 为原图象，二值图象中图形用 1 表示，背景用 0 表示。

邻接——

$x_4(NW)\ (i-1,j-1)$	$x_3(N)\ (i-1,j)$	$x_2(NE)\ (i-1,j+1)$
$x_5(W)\ (i,j-1)$	$x_0(i,j)$	$x_1(E)\ (i,j+1)$
$x_6(SW)(i+1,j-1)$	$x_7(S)(i+1,j)$	$x_8(SE)\ (i+1,j+1)$

图 5.36　x_0 的邻域

两个象元互相存在于 4-邻域或 8-邻域中的时候，把它们叫做互相 4-邻接或 8-邻接。

图 5.36 中 x_1, x_3, x_5, x_7 是象元 x_0 的4-邻域，$x_1 \sim x_8$ 是象元 x_0 的8-邻域，x_0, x_1（或 x_3 或 x_5 或 x_7）是 4-/8-邻接，x_0, x_2（或 x_4 或 x_6 或 x_8）是 8-邻接。

连接——

对于二值图象中具有相同值的两个象元 a 和 b，所有和它们具有相同值，并且各个 P_i 和 P_{i-1} 4-/8-邻接的象元系列 $P_0(=a), P_1, P_2, \cdots, P_{n-1}, P_n(=b)$ 存在时，象元 a 和 b 叫做 4-/8-连接。这个象元系列叫做 4-/8-路径。 如图 5.37 中 a 和 b 点为连接，c 和 d 点为连接。

删除象元的原则——

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0_c	0	0	1	1_a	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0_d
0	1_b	1	1	1	1	0	0	0

图 5.37 象元连接

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1_a	0
0	1_d	0	1	1	1	1	0
0	1	0	1	1_e	1	0	0
0	1_b	1	1	1	1	0	0
0	1	1	0	1_c	0	0	0
0	1	0	0	1	0	0	0

图 5.38 删除原则

细化二值图象时，为了寻找一条中间的线，而又完全不改变原图形的形象，必须删掉周围对于图形面貌贡献不大的象元，使这些象元的值由 1 变成背景值 0。为此，删除象元的原则是使图象的连接性不变，即不改变原图形的拓扑关系，保证各连接部分不分离，不结合，原图中的孔不消灭也不生成。如图 5.38 中象元 a, b 可以删除，c, d, e 不能删除，因为删 c 使图形分离，删 d 消灭了

孔，删 e 生成孔。

另外，细化时，各线的端点和突出部分对于保持原图形象起重要作用，删除时端点保留，突出部分在细化时要谨慎删除以保留原形。

2. 细化过程

本方法主要通过检测图形的突出部分逐步迭代完成。每一步迭代都删掉外层的一些象元。其思路是保留核心象元、突出象元和它们的连接象元，如图 5.39 中所表示的图形，K_i 为保留的核心象元，P_i 为保留的突出象元，B_i 为保留的连接象元，周围空方格为删去的象元；保留下来的三部分组成新的图形 $S_i(i$ = 迭代次数)，再重新寻找 K_{i+1} P_{i+1} 和 B_{i+1} 直迭代到核心消失。再将最后得到的图形变换成 8-连接的单象元宽度的图形。

各主要步骤如下：

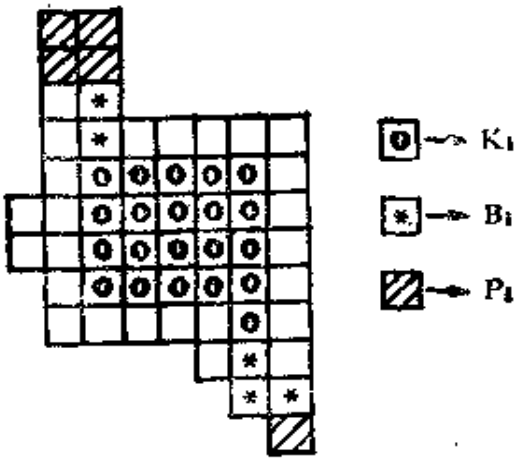


图 5.39　象元的删除和保留

(a) 确定核心象元集合 k_i

扫描全图，凡是 1-象元（象元值为 1）周围 8-邻域都是 1-象元，那么这个象元就是核心象元 k_i，规定核心象元赋予值 4。如图 5.40(a)

(b) 确定突出部分象元集合 P_i

进行二次全图扫描，第一次正向扫描，方向自左至右，自上至

下，逐点计算；第二次反向扫描，方向为自右至左，自下至上，逐点计算。计算方法为连续局部运算，令正向扫描后象元值为 f_1，$S_{h,k}$ 为象元 (h, k) 的值，f_1 满足下列条件

$$\begin{cases} \text{若 } S_{h,k}=0,\ f_1(S_{h,k})=0 \\ \text{若 } S_{h,k}\neq 0, f_1(S_{h,k})=\max(S_{h,k}, S_{h-1,k-1}-1, \\ \qquad S_{h-1,k}-1, S_{h-1,k+1}-1, S_{h,k-1}-1) \end{cases} \tag{5.6}$$

反向扫描后象元值为 f_2，f_2 满足

$$\begin{cases} \text{若 } f_1(S_{h,k})=0,\ f_2(S_{h,k})=0 \\ \text{若 } f_1(S_{h,k})\neq 0,\ f_2(S_{h,k})=\max(S_{h,k}, S_{h,k+1}-1, \\ \qquad S_{h+1,k+1}-1, S_{h+1,k}-1, S_{h+1,k-1}-1) \end{cases} \tag{5.7}$$

图 5.40(b) 是计算的结果，其中值 1 的元素是突出部分象元 P_i。

(c) 确定连接集合 B_i

经过上述计算，K_i 和 P_i 之间有值为 2 和 3 的象元，这些象

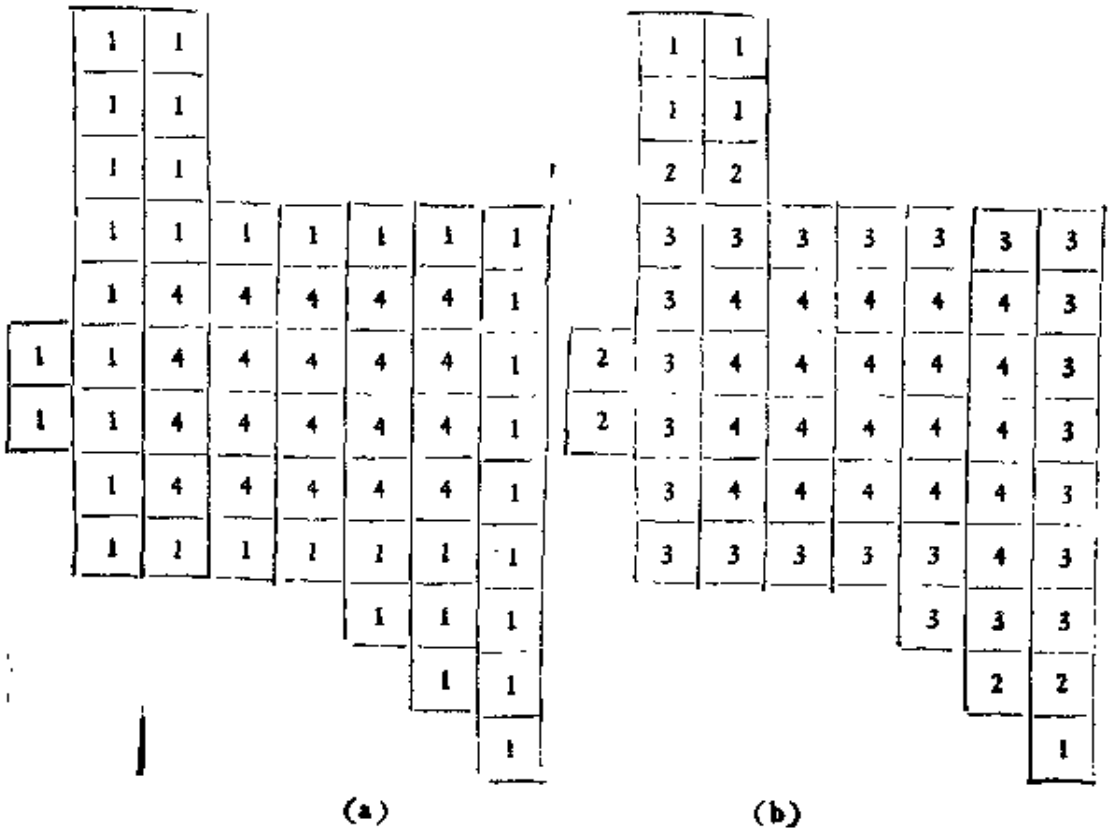


图 5.40 确定 K_i 和 P_i

元多数都可删去，只需留下连接 K_i 和 P_i 的象元，如图5.39 中 * 号部分，这部分连接象元的集合为 B_i。

K_i, P_i, B_i 三部分集合是一次迭代结果。

(d) 确定 8-连接集合

多次迭代直到核心象元消失后迭代停止。为了寻找 8-连接的集合，删掉其它不必要的象元，采取的方法是：第一步，重新计算停止迭代后的图象，经过一次扫描，由每一象元的 4-邻域值，计算新值 $e_{h,k}$：

$$e_{h,k} = [2(W + N) + E + S + 1] \tag{5.8}$$

这里 E、W、S、N 分别为象元东、西、南、北四个邻域象元值。第二步，保留 8-邻域中最大的值，其它值可以删去，但不能删掉使图形分离的象元，也就是要保证 4-/8-连接。图 5.41 中画圈为保留值，其它值均删为 0。第三步，4-邻接的象元可转换成 8-连接，删去无用象元，只要此象元满足下列条件之一：

$$\left.\begin{aligned} E \cdot S \cdot (N + W - NW + 1) &\geqslant 1 \\ W \cdot S \cdot (N + E - NE + 1) &\geqslant 1 \\ N \cdot W \cdot (E + S - SE + 1) &\geqslant 1 \\ N \cdot E \cdot (W + S - SW + 1) &\geqslant 1 \end{aligned}\right\} \tag{5.9}$$

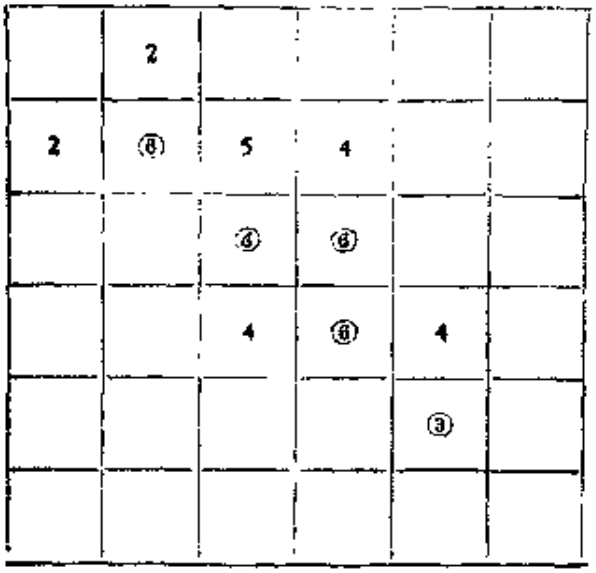


图 5.41 保留值

0	0	0	0	0	1
1	1	0	1	1	0
0	1	0	0	1	0
	(a)			(b)	

图5.42　中心象元可删（a）与不可删(b)

如图 5.42(a) 中心象元可以删去，(b) 中心象元不可删去。达到8-连接后，所有保留的图形象元仍用 1 值，背景用 0 值。

整个运算过程也可以写作：

1. $i = 0$
2. 确定 K_i
3. 若 $K_i = 0$，转向9
4. 确定 P_i
5. 删除象元，保留 $P_i \cup B_i$
6. 令 $S_{i+1} = P_i \cup B_i \cup K_i$
7. $i = i + 1$
8. 转回 2
9. 变换 S_i 成为 8-连接单宽度集合 T
10. 停止

图 5.43 是一个计算过程的实际例子，前六步是六次迭代，最后三步是上述（d）中的三步运算，共九步完成。

这种细化方法适用于各种二值图象，处理结果非常好，但处理过程较长，费机时[72]。

二、细化方法二

这里介绍的方法最初为加拿大地理信息系统（CGIS)所采用，以后也有一些系统使用类似的方法。

细化之前所用网格数据仍为二值数据，由转鼓式扫描图形而得到。由于有一定线宽，所以宽度不止一个象元。这种数据存贮量大，冗余度高，以 76 × 76 cm 大小的地图为例，大约需 56,250,000 位（bits）的存贮空间，细化后以矢量方式存贮可大大减少存贮量。

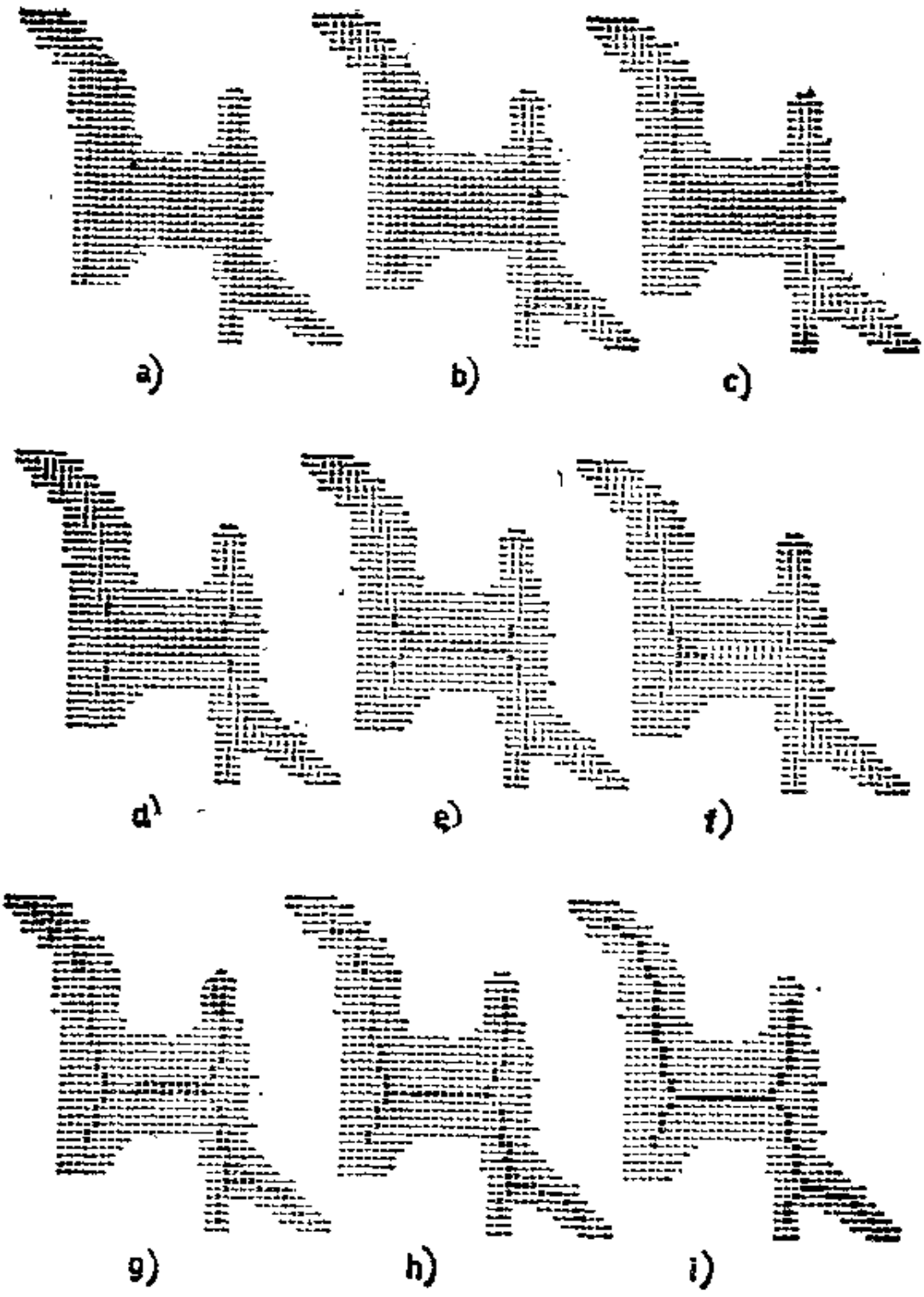


图 5.43　细化方法实例

图 5.44 是一幅原图，细化的方法如下：

第一步，求 V 值。扫描全图，凡是1-象元则用 V 值代换原值。求法是：

$$V = f(i,j) + f(i-1,j) + f(i-1,j+1) + f(i,j+1) \tag{5.10}$$

也就是用1-象元的值 1 加上北、东、东北三个相邻象元的值，其和为 V 值。图 5.45 是图 5.44 的 V 值图。

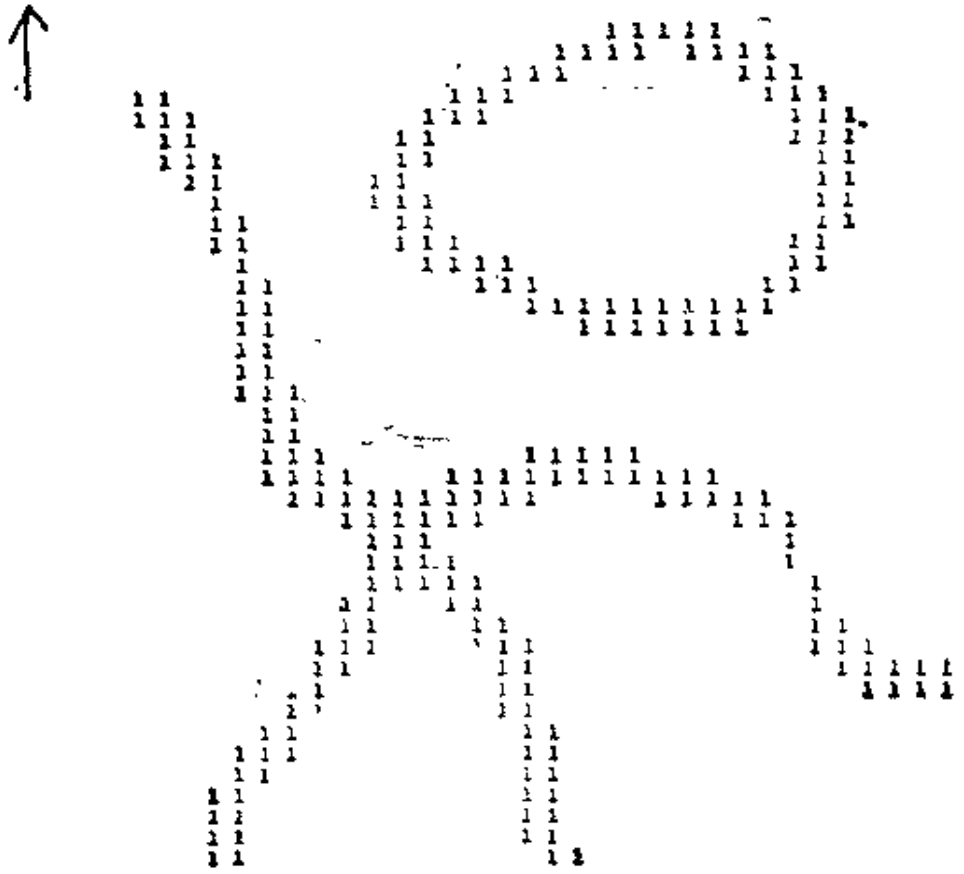


图 5.44　扫描输入的地图图象实例

第二步，保留最大值。删去其它值，同时保持线的连通。这种方法所用数据来源于线划图形，与上面一种方法不同，扫描输入的网格图形，不可能有很宽的连续数据，因此保留下来的最大值，一般都在线的中间位置。

第三步，链码表示。按前面介绍过的链式偏码方式，用表格记下每一线段的开始点坐标和结束点坐标，从起点开始逐步追踪，记下方向链码直到结束点。然后开始下一条线，重复上述过程，所有线段追踪完毕后，程序停止。图 5.46 表示每一个 V 值象元用方向的链式编码值代换后的图形数据。每一数值代表追踪的下一个元素的方向。从图中可以看出，在这个实例中，追踪是沿逆时针方向前进的。

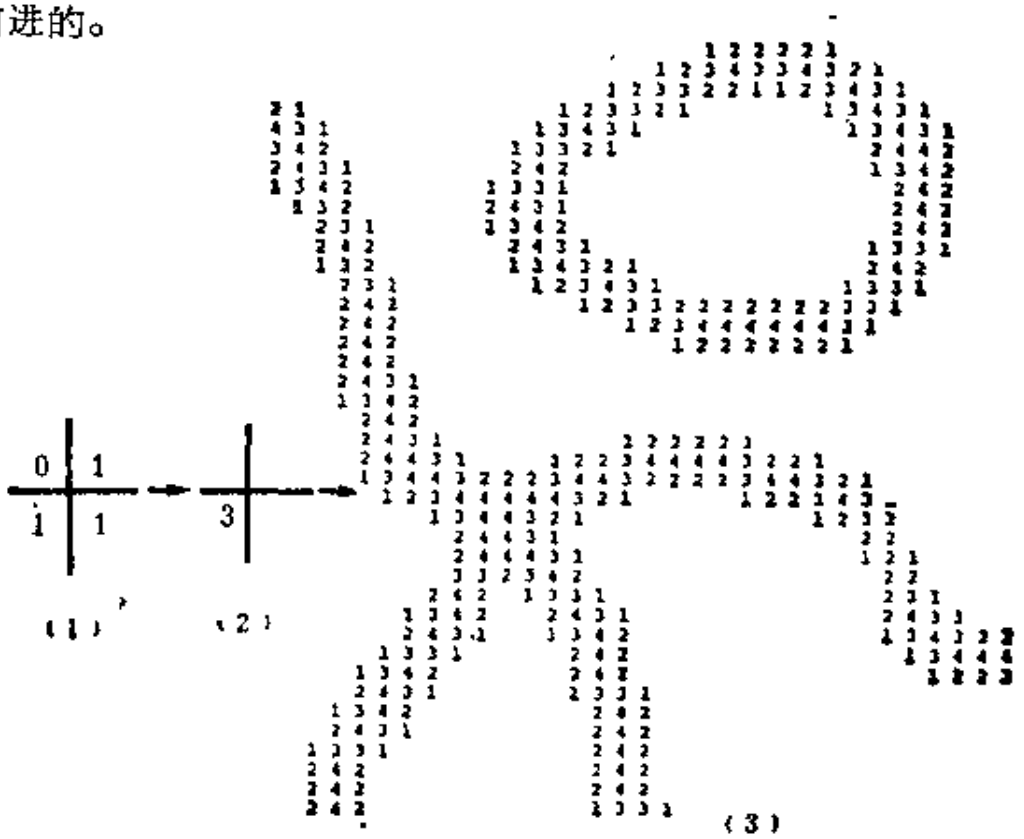


图 5.45 V-值图

这里要注意的是，求 V 值最大值的方法对于更宽的图形，会出现多个最大值并列的现象，因而不能一次成功。所以这种方法对于原图形数据要求较高，但处理方法简单。

三、变换坐标

细化后的图象可以直接变换坐标成为矢量格式文件，也就是将网格 (i,j) 坐标变成直角坐标 (x,y)，成为式(5.2)的逆运算。

参考图 5.27，设 $i=0, j=0$ 的网格原点坐标为 (x_{min}, y_{max})，则以每个网格中心点为准变换成直角坐标：

$$\begin{cases} x = x_{min} + \left(\Delta x \cdot j - \dfrac{\Delta x}{2}\right) \\ y = y_{max} - \left(\Delta y \cdot i - \dfrac{\Delta y}{2}\right) \end{cases} \tag{5.11}$$

$\Delta x, \Delta y$ 分别为网格单元对应的 x, y 坐标宽度。

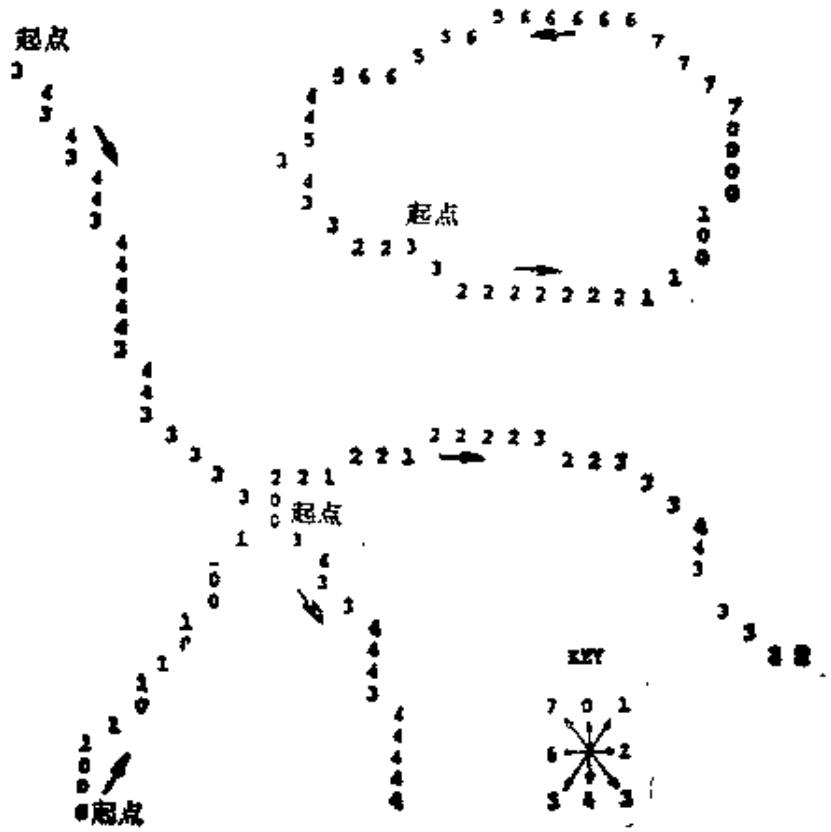


图 5.46　方向链码

变换时同样可用搜索追踪的方法完成，用扫描方法找到一条线段起点，计算并记录这一点 x, y 值，再在8-邻域中搜索非 0 象元，计算并记录相应的 x, y 值，……直到线段终点。再搜索下一条线段的起点，如此循环，完成全图。

第六章　地理信息系统的主要组成部分

本章将对图 5.6 和图 5.7 给出的地理信息系统组成框图各部分进行必要的解释。先介绍“头”和“尾”——输入和输出，再介绍核心——管理与分析。

§ 6.1　数据的输入与输出

6.1.1　数据的采集和输入

一、意义

将地理信息系统所需要的数据收集起来，经过初步的加工整理送入计算机，再经过计算机的编辑、检查等预处理过程，进入数据库。这一过程是数据的采集和输入过程。完成这一过程的 GIS 部分常被称为输入子系统。

数据的输入子系统不仅仅是整个 GIS 的组成部分之一，它又是全系统的基础。完成数据的采集和输入常常有大量的基础工作要做。在目前从设备发展的水平和社会的一般经济能力看，手工的输入工作还要在相当一个时期是主要的输入方式，计算机全自动输入只能部分地实现。有些计算机的自动输入，也要做人工预处理工作，例如：地图的转鼓扫描输入就需要用人工先准备好较高质量的线划图形地图而不能用原始地图。因此，从工作量来分析，输入子系统的工作量将占建立整个系统总工作量的一半以上，有人甚至估计，占 70%。从重要性来看，没有数据的输入，就没有数据库的实体，更不可能进行数据的分析和结果的输出。整个系统就成为没有实际意义的空架子，没有任何应用的可能性。可见，数据的输入又是建立地理信息系统不可缺少的一部分。从系统的

质量考虑，输入的数据应该是精确可信的，除了客观存在的因素外，输入数据应准确无误，否则将会影响以后分析评价结果的正确性。总之，采集和输入数据是一项既简单又繁锁的工作，但无论从哪个角度考虑，都不可忽视。

二、数据采集的范围

前面已介绍了地理数据的三个基本要素：点、线、面，由此把信息分解成计算机可以接收的图形方式。通过以矢量和网格两种主要的编码方式送入计算机数据库存贮或分析。除了这二种编码方式的数据外，地理信息系统还常常需要一些常规数据如文字表格数据等。可见信息源的范围很宽，通过传统手段获得的信息，例如实地考察，和通过现代手段获得的信息，例如卫星资料，都可作为地理信息系统的信息源。根据建立系统的目的和范围决定取舍，和根据信息表示的方式决定输入计算机的方法。

数据采集的范围，从信息记录方式看，有以下几种：

1. 图件

图件资料是地理信息系统最主要和基本的数据来源。这里的图件资料主要指各类地图。历来，地图就是地学工作者工作不可缺少的工具，从地图上可以直观地，形象地反映出研究对象的位置和属性，它们的定性和定量关系，从而获得大量的信息，并分析出自然、社会经济等事物的内在联系。这些从地图上可读出的信息，帮助地学工作者做了大量的工作。今天，使用先进的计算机，它仍旧是不可缺少的工具之一，只不过需要我们模仿人工绘制地图和阅读地图的方式，使计算机做出类似的工作，减少手工工作，方便用户，提高分析能力。

不同的研究对象产生了不同的地图。城市、县城、居民点以及矿点、井位、事故发生处、旅游景点等分布图是以点为主的地图数据；河流、公路、电网、地下管道网、城市交通路线等分布图是以线为主的地图数据；湖泊、海洋、行政区、自然资源如土壤图、植被图、

社会经济如人口分布等各种分布图是以面(多边形)为主的地图数据;有些综合了各种数据,成为比较全面的地图。宏观地总体分析一个较大地域可以用小比例尺地图;相反,对某一地区研究细节时使用大比例尺地图,或只研究单一对象时用专题地图以及显示分析、预测、评价、结果的派生图等等。

目前,我国已完成覆盖全国除台湾省外的全部地区的1:2.5万,1:5万或1:10万大比例尺地形图,以及缩编的全国1:20万,1:50万及1:100万比例尺地形图,1:100万全国地质图,并开始编制全国1:100万系列专题图,如土地利用、土地资源、土地类型、土壤、地貌、植被、草场等一系列的自然资源的基础信息图件。

把地图输入到计算机中是数据输入的主要工作,是不可缺少的一部分。输入时可选用不同的编码方式以及使用不同的设备。

2. 遥感信息

本书第一部分已对遥感信息的概念作了详细介绍。利用航空或航天遥感所获得的大量数据,可以方便地探测人迹难以到达地区的资源,也可以实现较大地区数据的快速更新,充实和丰富了地理信息系统的数据来源。遥感影象还可以修正和编制地图,例如:SPOT 卫星立体象对的影象可以编制1:10万地形图,更新1:50万地图。陆地卫星影象开展许多方面的资源清查,如:寻找矿点、小麦估产、地磁异常分析等等,这些分析结果都可以成为地理信息系统的数据源。随着技术水平的提高,遥感数据也将成为地理信息系统不可缺少的一部分(§7.2)。

遥感数据的最初形式都是网格数据,分为模拟和数字两种。模拟数据是胶片形式:透明正片、透明负片或黑白照片,真彩色或假彩色照片等。来源是航空、航天。这些片子要通过模拟量转换成数字量的 A/D 转换装置送入计算机内。数字数据存贮在计算机磁带或微机软盘上,来源多为飞机和卫星上的扫描记录装置,可以直接由计算机读出,并显示于监视屏上成为图象。

在地理信息系统中使用遥感数据，将提高系统对硬件和软件的要求，在硬件上需有实现图象处理的基本配置，在软件上需做到矢量数据与网格数据的兼容和互换，方便运算和分析。

3. 统计数据

统计数据在分析中常常起着重要的作用，如社会经济等信息。统计资料多以表格形式记录，可以键入(用键盘敲入)或磁带输入计算机。若以图形显示出来，更加直观。这种数据能存贮在属性数据库中，在地理信息系统中与其它矢量或网格表示的图象数据一起分析。

4. 实地考察测量数据

常年观测的台、站如气象站、水文站等，它们获得宝贵的第一手资料数据。这些数据对于丰富地理信息系统的数据源也十分重要。有些没有台、站的地区或缺乏资料的地区，需要实地考察获得数据。这些数据形式是不规则的离散点值，键入计算机后根据坐标和测量值可以用拟合方法找到等值线或拟合曲面，以二维或三维透视图显示出来，或用插值方法计算各网格点的值，可以与其它数据复合分析。

5. 文字报告

有时为获得较为系统的资料，也将文字报告送入系统，在定量工作中辅以定性说明或作文字解释，这在进一步发展的“专家系统”中较为多用。

三、数据的筛选和加工

上述各种数据采集后，根据所建系统的性质做一筛选，确定哪些输入哪些暂不输入计算机，可根据数据使用的必要性和使用频数确定。精选的结果减少信息冗余，避免占据过多的磁盘空间。精选过程中应估算数据量的大小，例如图件内容不同，线的密度不同，因而数字化时工作量也明显不同，图 6.1 (a) 是水系图，(b)是地形图，按它们的密度平均计算，(a) 图平均每平方厘米 2.59 厘



（a）地表水系图　　（b）地形图等高线

图 6.1　线密度比较

米线长，(b) 图平均每平方厘米 88.72 厘米线长，这样，从工作量来看，(b) 图是 (a) 图的 34 倍多。选用不同的比例尺也会出现同样的情况。因此正式入机前要作好预备工作。

确定必须输入的数据后，还要对数据进行一番加工处理，因为采集到的数据只是“生”的数据，加工的过程有所不同，大致为如下几项内容：

1. 确定分类系统和标准，把信息分类归纳、分层分级，以便今后和其它部门纵向或横向统一，拓宽系统的可用面。

2. 区别原始数据和可派生的数据，有些数据可以从其它数据中产生，这种数据属于派生数据。只要将原始数据作为基本数据送入计算机内，派生数据可由计算机产生而不必直接输入，这样也可以减少输入的数据量。

3. 属性编码统一，有统一标准的要使用统一标准，如全国行政区代码可以统一。

4. 采用的数据值尽量核实准确，精度取得一致，注意时间和空间坐标的关系。

5. 使用遥感分类或解译数据时，需做好预处理工作，如果是先成图再数字化进入 GIS，要将图清绘好；如果直接从计算机送入，要将分类图尽可能加工成专题图，也就是对分类图做好整理修饰工作，再送入 GIS。

6. 无论哪一种数据均保证线条清晰，文字工整，摆放整齐，妥为保存，以免在任一细小的环节上出差错。

四、图件数字化过程

需要输入的数据，统计数据、实测数据、文字表格数据多是从键盘录入的，遥感数据，数字量可从磁带机直接读入，模拟量可以扫描自动输入。一些别的系统提供的数据，也可以从磁带、软盘或联网计算机系统读入。然而，最大量的工作还是图件的数字化，由于目前数字化的工作以人工跟踪输入为主，自动化程度较低，其正确程度容易受操作者的技术熟练程度、工作经验以及工作是否疲劳等因素的影响，因而输入过程中的检查和编辑十分重要。

数字化过程可以由图 6.2 所示的框图表示。

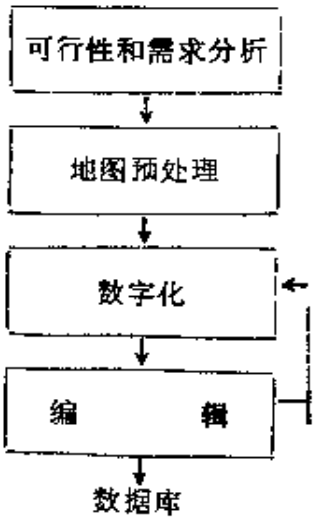


图 6.2　数字化过程

可行性和需求分析主要是数字化之前的制定计划过程，根据对工作的要求估计工作量和所需时间，人员以及硬件和软件要求，预算所需经费。再根据已有的硬、软件环境和经费等条件确定工

作是否可行。如果可行，就做出计划：①建立数据字典，列出所有的实体即所研究的对象和对应的属性码。②提出规格要求如建立的文件结构及报告规格等。③验收要求，如精度标准等。

地图的预处理是把不符合要求的地图再做加工，或者根据需要重新清绘，或者加入需要的符号或标记等，直到数字化所需要的内容全部符合标准。

数字化主要使用数字化仪手扶跟踪而完成。需要一定的软件支持。不同系统所使用的软件包各不相同，但大致步骤相似，并记录成矢量格式。其步骤主要有：①初始化，地图要素入机前，先要输入一些基本数据：如图名、编号、比例尺、使用的地图投影、单位（长度和面积）等。②选择图上已知坐标的明显标识点三个以上作为控制点记入文件，这样便把数字化板上的坐标系与用户规定的坐标系联系起来，以后再输入的数据点都可由此一一对应地找到用户指定坐标系的坐标值。③确定图形显示的窗口，一般比数字化图件略大一些，这只是为在数字化过程中便于直观检查，与计算机的存贮无关。④数字化，手扶光标小键盘，用十字丝跟踪，如果输入单个点，可用点操作方式；如果输入直线，可用线操作方式，输入两个端点后，自动连成一条直线；如果输入曲线，可用跟踪操作方式，按住按键一直跟踪曲线，从起点到端点，自动按设定的增量记录跟踪过程中的取样点坐标，并在图形屏幕上显示出已数字化的对应曲线。⑤根据屏幕显示，发现有错，可及时删去已数字化的线段，否则将一直进行，直到全图数字化完毕。⑥加上标题、注记、标号点、图例、必要的符号等，完成全图，存入磁盘。以上步骤完成后，如果开窗放大，就会发现在小比例尺显示时未能发现的很多错误，下一步的编辑工作，可以修改图形直至满意为止。

编辑工作量的大小取决于数字化工作的质量，上一步工作细致，正确率高，编辑工作可以大大减轻，否则，编辑起来也是很麻烦的。为了做好编辑，一般的软件都具有显示、放大、缩小、开窗、移光

标、改变颜色、指示、选择等方便的图形显示功能，便于用户在图形终端可以实行人机交互的操作。编辑功能主要有：点的增加、删除、移位；线的增加、删除、加点断开、恢复、平滑、移位、修改等；多边形的封闭、建立、着色；文字与符号的添加、删除、移位、修改等。操作者可以看着屏幕放大图形，操纵键盘或光标工作，十分方便。软件包功能越强，编辑功能越强，对操作者越方便。直到全图检查一遍，所有数字化过程中不恰当地方，均按照原图修改完毕。

编辑过程发现数字化的图件错误太多，修改困难时，或者需要增补数字化部分，可送回上一步重新数字化。

最后，完成编辑工作的地图文件送入数据库存贮*。

6.1.2 输入设备

地理信息系统输入数据可用的设备型号很多，就目前我国普遍使用的情况看，仍以国外生产的设备为主，国产的也有一些。这里只从类别上对较普遍使用的设备作一概括说明。

按照 GIS 输入数据的范围归为四类：数字化数据、需要转变成网格的模拟数据、需要矢量化的地图数据、离散数据及表格文字。根据数据类别的不同，所需要的输入设备各不相同。

数字数据指按照一定格式记录在磁带或磁盘上的数字化数据，如：卫星遥感、航空遥感扫描记录的图象数据文件，已经数字化好的矢量数据文件或其它数据文件，如其它 GIS 系统的文件，这些数据直接输入计算机磁盘中便可使用。所用设备主要是计算机外围设备：磁带机或小型机、微机使用的软盘。

需要转变成网格的模拟数据主要指透明片或照片，黑白或彩色的二种。它们的主要来源一种是遥感影象，另一种是需要网格化的图件。使用的设备主要有：摄象扫描输入设备、转鼓式扫描输入设备、摄象机。立体航空像对可以使用解析立体测图系统，直接记录网格点高程值，但设备昂贵。有时输入图件也用数字化仪读入网

* 更详细的描述请参阅计算机制图学的有关书籍。



图 6.3　磁带机

格交点数据进入网格化，但用得较少。输入后的网格数据可以输入地理信息系统数据库，也可以与图象处理系统联机，先做图象处理后再送入地理信息系统。

需要矢量化的地图数据是各种地图或由遥感解释绘制的图件等，使用设备主要是数字化板。

离散的数据及表格文字需要人机时使用键盘终端直接敲入。

下面分别介绍几种常用的输入设备：

磁带机——属计算机外围设备，使用磁带密度有 800，1600 和 6250 bpi（每英寸位元）三种，也可以其中二种或三种兼容，磁带用1/2 吋，9 道记录。现较多使用 1600 bpi 和 6250 bpi，如 TM 磁带，由于数据量大，常用高密度记录（图 6.3）。专为微机使用的磁带机也有多种如：8000 bpi，9 道记录。

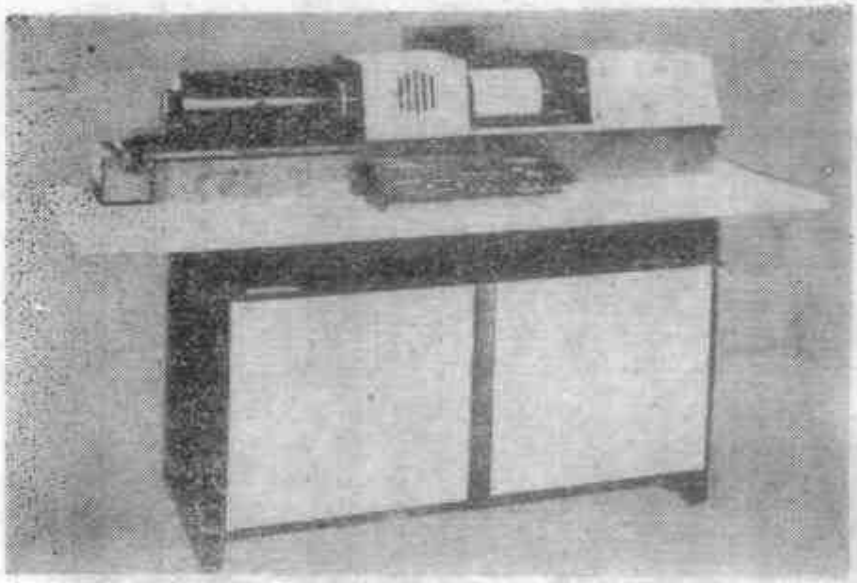


图 6.4(a)　转鼓扫描仪 C-4500

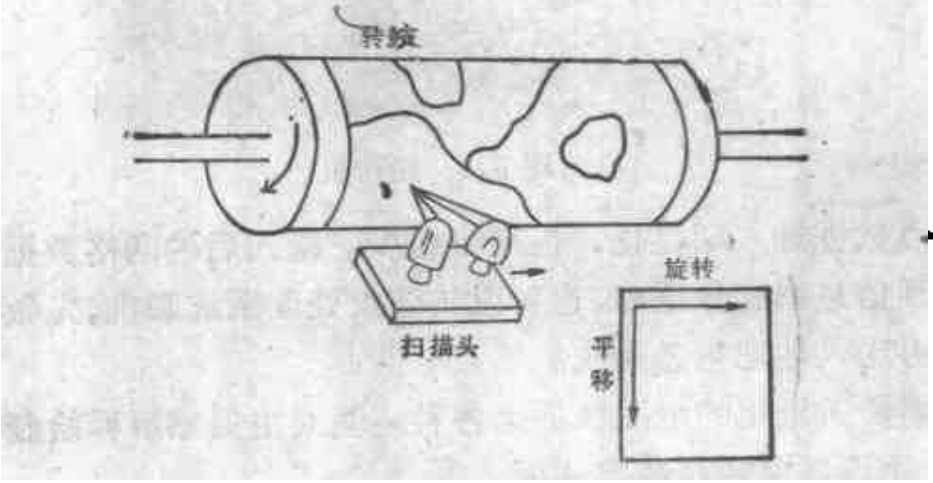


图 6.4(b)　转鼓扫描仪扫描原理示意图

软盘——小型机上常用 512KB（千字节），8 吋双面双密度盘，微机上常用 360 KB，5.25 吋单面或双面双密度，或 1.2MB(兆字节)，5.25吋高密度盘，也有 1MB 的 3 吋半盘。

转鼓式扫描仪——是利用滚筒旋转扫描的图象输入和输出装置。将输入的原图卷于筒上当转鼓带动图象旋转时，利用光电转换作用，原图各处对光反射或透射的强弱转换成电流的强弱，用数

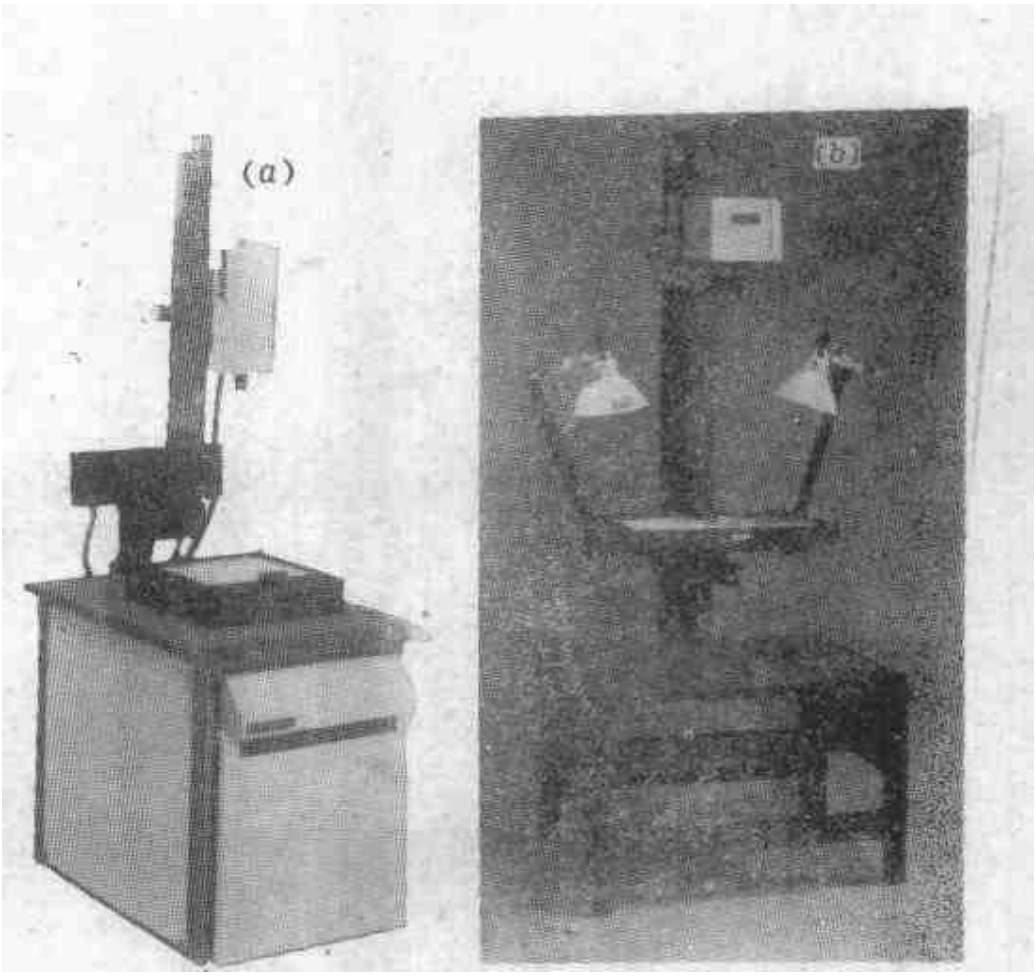


图 6.5 (a) 电视摄象机及光桌 (b) 高分辨率Eikonixscan78/99 及光桌

字记录并输入计算机。转鼓的旋转使扫描头沿着原图的行横向扫描，扫描头沿着水平方向移动，即沿着原图行号增加的方向纵向扫描。每固定间隔读取数据，直到全图读完(图 6.4)。

转鼓扫描仪的特点为：

分辨率高，可达 12.5μm～500μm/象元宽。

图象质量好，图形失真小，均匀。

输入尺寸一般为 25 × 25 cm，有的可达 75 × 96 cm 大小，可以满足需要。

输入时间长，占机时多，操作较不方便。价格昂贵。

摄象机——也是一种 A/D 转换的输入装置，靠扫描完成。摄象机种类很多，常用的有电视摄象机和固体器件摄象机。电视摄

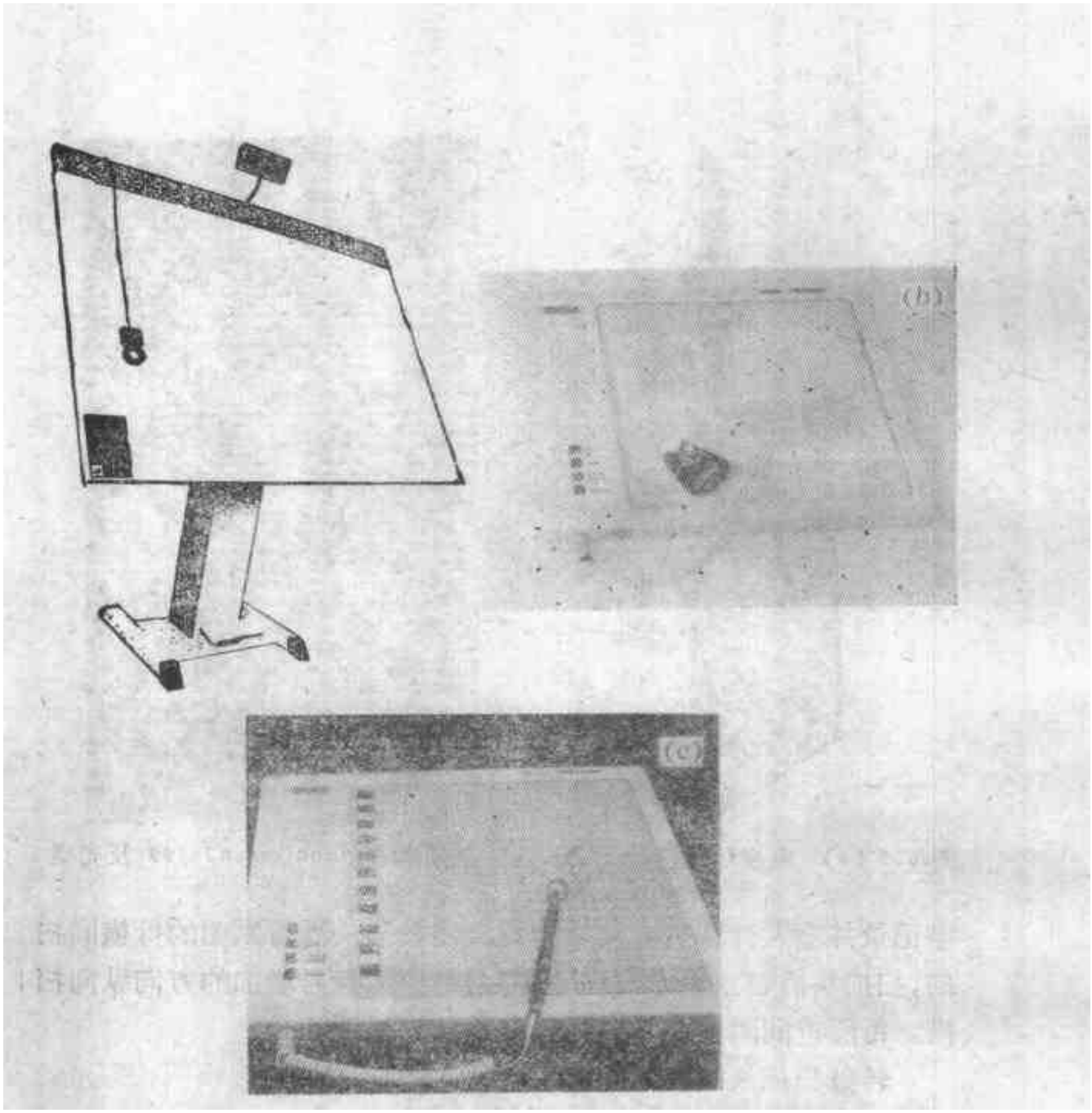


图6.6　不同的数字化板（a)(b）和选用的光笔（c）

象机核心是摄象管，输入时分辨率可以达到 1024 × 1024,256 种灰度级或更多。但输入的图象会产生光源不均、失真和边缘光减弱、混入电噪声等现象，使精度受到影响。固体器件摄象机核心是固体摄象器件，与前者相比，这种摄象机有很大优点，如分辨率高，可达 2048 × 3000，灰度级可达 4096 级。若采用 2048 × 2048 的

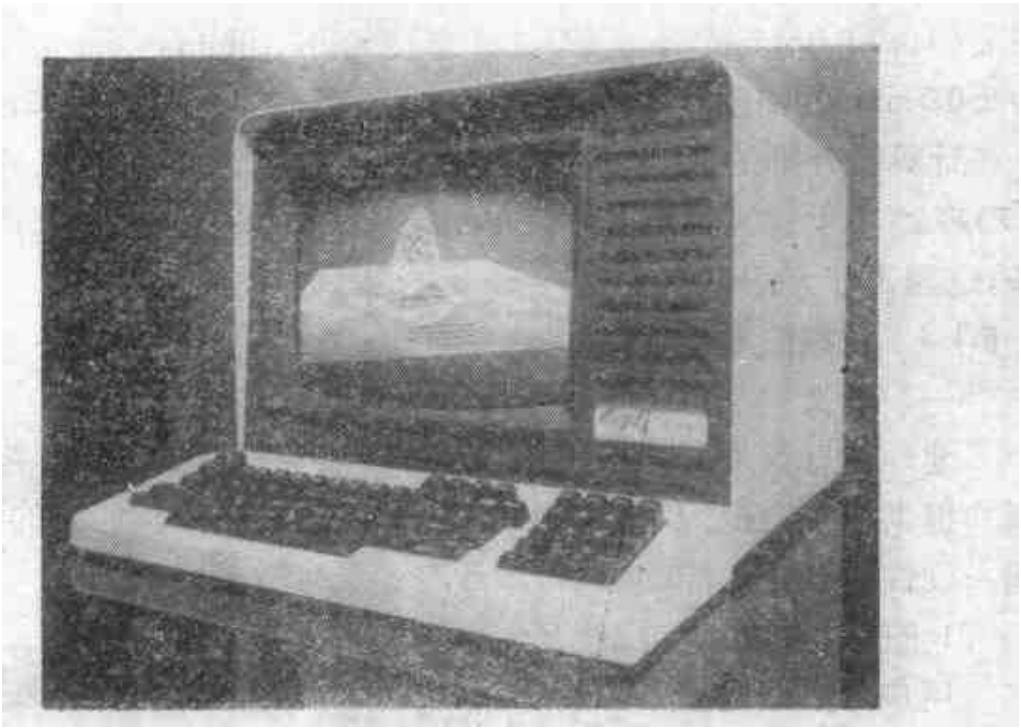


图 6.7　图形终端(可与数字化板配合使用)

分辨率,对于一幅 30 × 30cm 的影象，每一象素宽为 176.4 μm,而 512 × 512 分辨率的电视摄象机为 595.3μm，此外失真度也比电视摄象机低,扫描速度比转鼓扫描仪高,而且轻便,省电,读取姿势比较自由。缺点主要是读取范围较小,聚焦不够理想,仍存在光学系统失真现象等。(图 6.5)

数字化板——是地理信息系统不可缺少的输入设备，它利用笔或光标人工跟踪图形,记录位置,建立计算机文件。不同数字化板制造原理不同，使用最多的是电磁耦合方式和静电耦合方式。

电磁耦合方式(图 6.6c)是平面下有许多金属环，它与笔尖上的线圈产生电磁耦合,从而检测出笔尖位于哪个环内及环的位置。

静电耦合方式(图 6.6a.b) 是在平面下布上线状电极,绝缘板上的光标与之耦合产生耦合电容，从而检测出位置。光标是一个十字丝,交叉点对准目标,有导线相连,可随意移动，光标旁有 1—16个键,每个键设定不同的记录方式和其它作用,用以加强数字化板的功能。使用光标比使用光笔精确度高,通常可达±0.1 mm 的

精度和±0.02mm 的分辨率，文件厚度允许 10mm。 而使用光笔为±0.5mm 的精度和±0.02mm 的分辨率，文件厚度允许 2mm。

计算机外围的 GIS 输入设备还有一些，例如图形终端（图 6.7）等。关于计算机本身和计算机终端，因属一般计算机系统设备，这里不作介绍。

6.1.3 数据的输出

一、意义

地理信息系统所贮存的数据及进行各种分析的结果，需要为用户提供服务。根据 GIS 的存贮内容的多少，分析能力的强弱，输入硬件和软件功能的强弱，服务内容也有所差异。

1. 查询、检索

用户对数据提出各种要求，系统给予用户各种需要的数据，这些数据事先已存贮在系统中。如：提取某一地区的数据，绘成地图，或只提取某一专题数据显示在屏幕上，或某一时间范围的数据等等，如 1989 年某县的土地利用状况。

2. 分析

地理信息系统的分析功能可以从已贮存在数据库中的数据获得分析结果，回答用户的质询，并常常以图形直观地回答这些问题，或绘图仪绘出相应的图件。如： 1989 年与 1979 年相比，土地利用状况有哪些变化，农田减少多少，用图表示，这是利用两种数据的比较得到结果；再如：建造一个旅馆，要求离公共汽车站近，离火车站近，离商业区近，最好不超过二公里，寻找一个候选地点有哪些，用表格列出并用图表示；这必须利用交通图和商业网点图的数据，用空间分析的方法等等。

3. 统计

地理信息系统根据用户的要求计算出各种统计量，并以表格或图形方式显示或打印出来，提交给用户，如：区域的面积、周长，可由区域地图中的多边形计算出来。 再如：某些地区农作物

产量，老人、中年人、儿童各有多少，占总人口百分比多少，等等。

4. 评价、预测、规划

如果地理信息系统具有更全面的功能，也就是进行模型分析，可以提供评价或预测或规划等结果，如：通过潜在的沉积物运载量的计算，得出土壤侵蚀类型的评价结果，作出土地合理利用的定量分析，提供报告。

综合 GIS 的上述服务范围，系统的输出部分必须具有提供产品的能力。

二、输出产品类型

系统的输出可以分为硬拷贝和软拷贝二种。硬拷贝是指记录在胶片、照片或纸面上的产品，可以送给用户、专家们使用的；软拷贝主要指显示在屏幕上的图象图形、文字图表结果，不能拿走。这里，主要涉及硬拷贝输出。

1. 图件

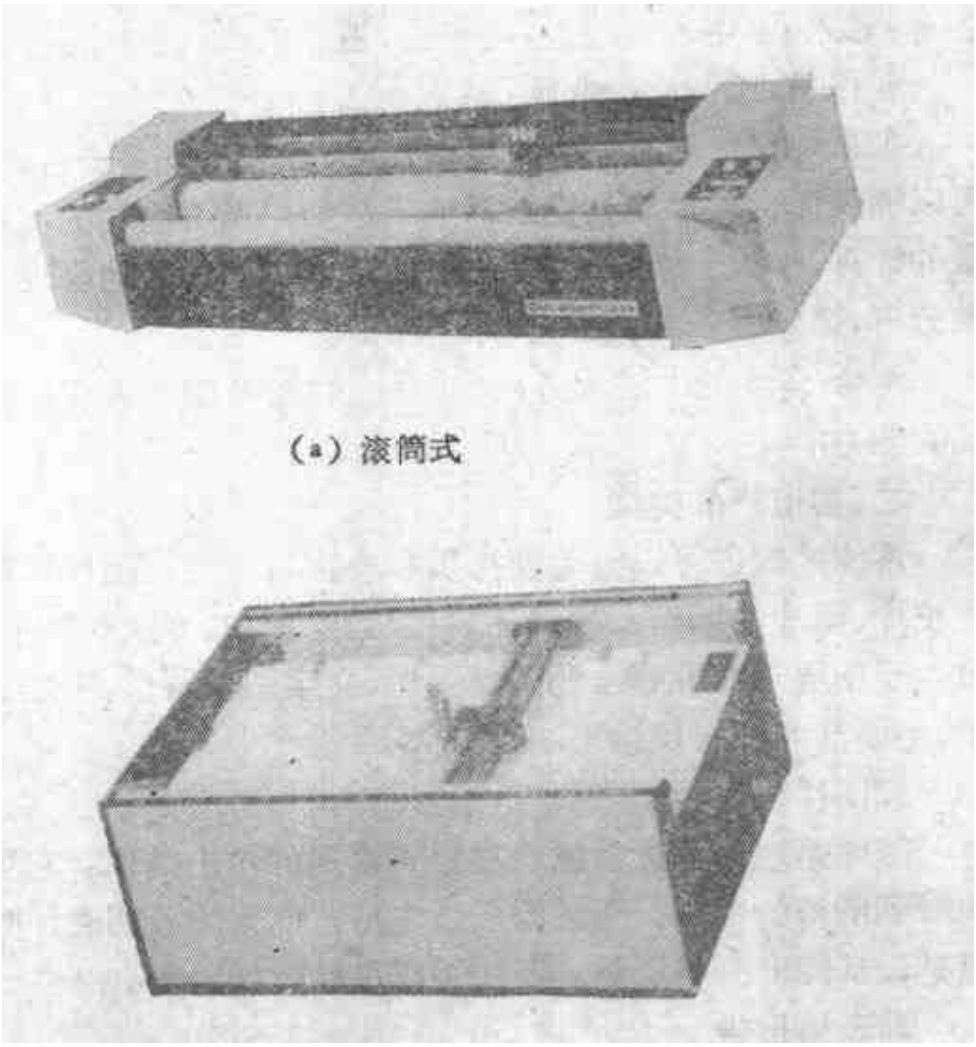
图件是地理信息系统最重要和常用的输出类型。它可以直观地看到所得的资料，而且信息量丰富，位置关系明确，时空关系清楚，从图上一目了然。图件可以用绘图仪绘出。

2. 表格报告

这也是地理信息系统常用的输出类型，很多统计、评价、预测、规划以及其它分析的结果都离不开表格报告和统计图形。一个最基本的地理信息系统配置，也必须有表格报告和统计图形的输出设备，即打印机。

3. 图象照片

网格数据很容易输出成胶片或照片。图象处理和分析后的影象，分类后的专题影象，评价结果做成的影象都可以作为结果形成硬拷贝。影象输出的装置很多，有转鼓式扫描仪、彩色打印机、彩色喷墨绘图打印机、摄象机、静电彩色绘图打印机、激光绘图打印机、各种照相设备等。



(a) 滚筒式

(b) 平板式

图 6.8 绘图仪

4. 备用数据

一些数据文件为了保存起来或提供给其它系统使用等目的，需要记录在磁带或磁盘上，可以长期保存备查，也免于万一文件因故丢失而丢掉信息。

6.1.4 输出设备

这里只介绍几种常见的 GIS 硬拷贝输出设备，不可能将所有类型全部一一介绍。

绘图仪——由计算机带动自动绘制图形、图表的设备，由电机控制 x 和 y 二个坐标轴上笔的移动，可以移动到直角坐标系的任一位置，同时控制笔的起落。这种笔式绘图仪分为滚筒式和平板式(图 6.8)。滚筒式使用滚筒装置，绘图时笔沿架子在一维 y 方向上运动，纸在与之垂直的 x 方向上运动。绘图时，有的绘图仪可以记录较长的纸，但不利于边画边观察。也有滚筒下带一平板，可边画边观察，但纸要事先裁好。平板式，纸的大小固定，随绘图机大小而不同，绘图时绘图笔作二维运动。由于纸固定在记录面上，工作时不移动，因此记录精度优于前者，也利于观察。

绘图机的笔有单笔，4 笔，8 笔，12 笔等多种，可以绘制彩色图。笔的种类也很多，如圆珠笔、油质墨笔、水质墨笔、制图墨水笔等等。

绘图机的精度一般很高，分辨率可达 0.05—0.0125 mm，绘图速度可达 400—1000 mm/秒。

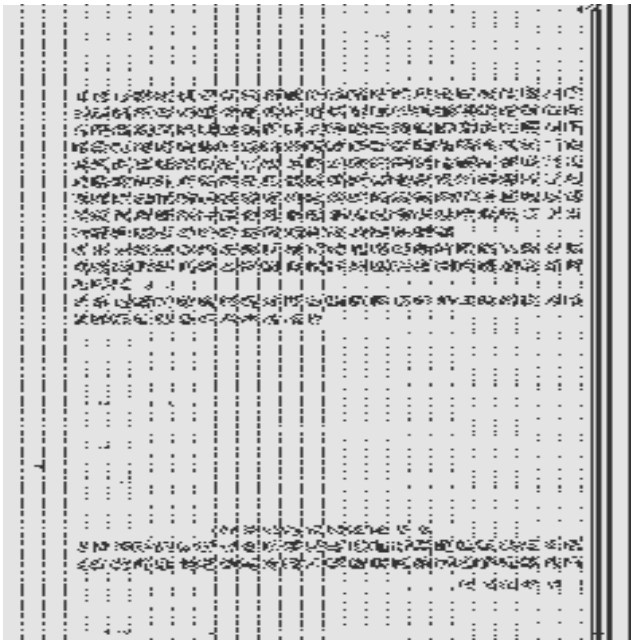


图 6.9 彩色打印绘图仪

彩色打印绘图仪——是应用于图象网格数据的点阵式打印输出设备。可用于彩色绘图和文字打印双重目的。与彩色喷墨绘图

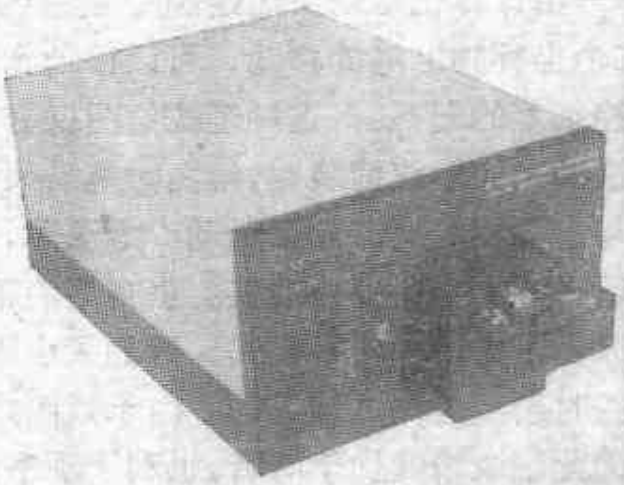


图 6.10　彩色图象记录仪

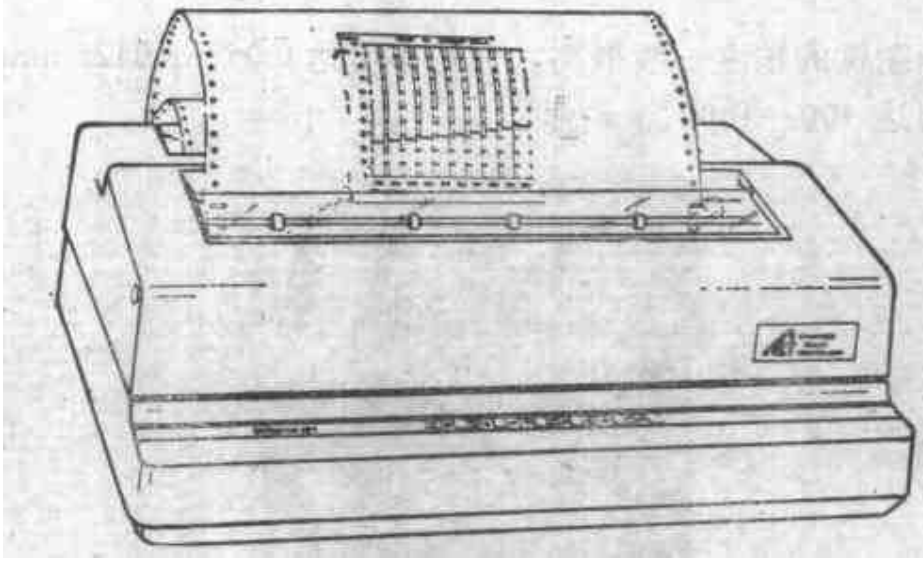


图 6.11　彩色喷墨打印机

仪和静电绘图仪相比要便宜得多。其长和宽的点阵分辨率可达 100 × 144，纸配准精度为 0.013cm，能产生 1～256 种彩色。这种设备便宜，产生的图象一般可用(图 6.9)。

彩色图象记录仪（照象机)——用于图象网格数据的照像设备。只要是图象形式，不论是图象、地图或统计图表都可拍摄下来。所用的片子也多样化，可用普通胶卷、幻灯片，也可用透明片或

一次成象片（Polaroid）等。凡监视屏上显示的图象，均可拍摄下来，成象大小有 3.5mm，4×5 英寸，8×10 英寸等多种(图6.10)。

彩色喷墨打印机——用于图象网格数据和字符的输出设备。利用黄色、品红色、青色三种基本颜色和黑色的墨水组成而得多种颜色，各色墨水通过过细的喷嘴喷出，喷出的强弱和时间都受到控制，并且一行一行地扫描前进，直到全图喷射记录完毕。在纸上得到一张与显示屏幕完全相同的彩色图象。

不同的彩色喷墨打印机纸张规格不同。分辨率可达每厘米16个点至每厘米 60 个点，形成 125 种彩色。 也可以打印字符（图6.11)。

静电打印绘图机——利用静电原理完成绘图机和行印机的功能。可以获得绘图软件包所绘各种图形，如天气图、地形图等以及统计图表、文字，实现高速的高对比度的静电输出图象。其分辨率可达每厘米 39 个点或每厘米 78 个点。有的静电记录甚至达到每

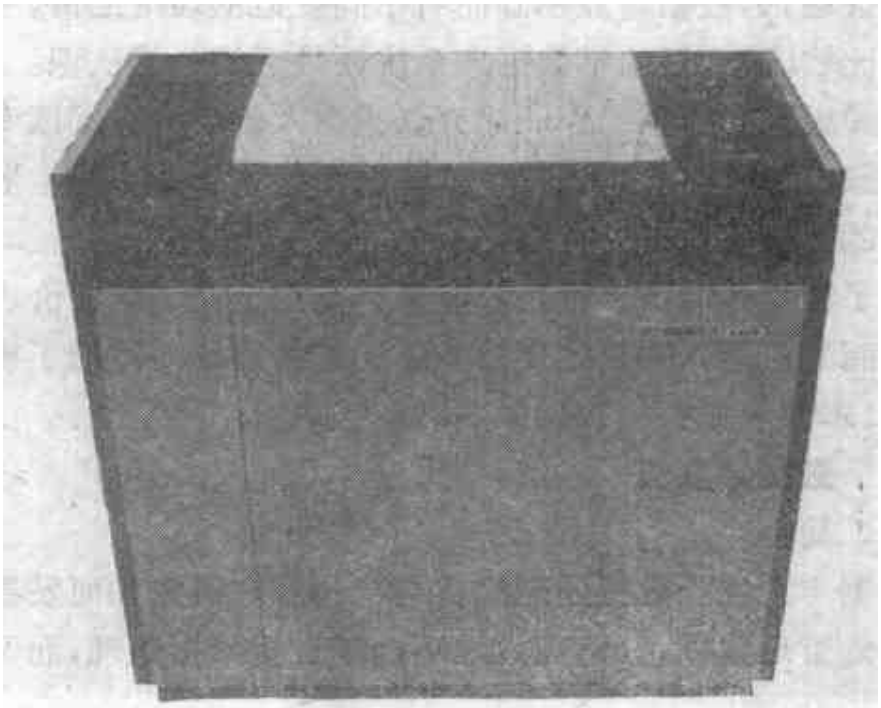


图 6.12 静电打印绘图机

毫米 12～16 个点的高分辨率和每分钟 3000 行的高速记录。并可以用普通纸记录，这将大大减少使用的费用(图 6.12)。

此外，兼有输出和输入功能的设备如转鼓扫描仪，磁带、磁盘前面已作介绍。近来，激光打印机正在推广，逐步扩大其用户范围。

以上各种设备都在计算机的控制下完成工作，有一些也可以直接与监视屏联接而直接输出。所有这些设备都可作为计算机的外围设备完成 GIS 的输出功能。可以在配置系统时，选用其中的一、二种，最好是矢量数据输出与网格数据输出设备各一种，根据建立系统的目的、用途以及经费预算的可能性全面考虑决定。

§6.2 地学数据的管理与分析

地理信息系统管理大量的地学数据，这些数据存在数据库中，供用户使用，因此需要有数据库管理系统。地学数据的管理与一般数据管理，因数据特点不同而有不同。但从理论上讲，一般数据库系统比较成熟，对地学数据库系统还缺乏统一的认识。因此，我们先对一般数据库系统作一简介，(更深入的理论需阅读专门的书籍)，再通过地理信息系统与一般的数据库系统的区别，来认识地学数据的管理问题。

为了加强地理信息统系的应用，特别是在环境评价、预测、规划等方面的应用，随着地理信息系统的发展逐步增加了模型分析的内容，本节选择实例加以说明。

6.2.1 数据库系统

一、简介

数据库系统是数据处理的核心机构。它研究如何妥善地保存和科学地管理数据，如何高效地巧妙地进行数据处理，而又花费最少。

在没有数据库系统时，数据是靠文件来管理。对于用户来说，

各自使用各自的文件，数据结构不一样，存取数据有关的程序针对性强，数据文件改变，程序就不再运行。由于没有统一的管理，数据不能共享，完整性和安全性都没有保证。因此，产生了数据库和数据库管理系统（DBMS），或者统称"数据库系统"。

数据库——具有较高的数据独立性，较少的冗余并且相互间有联系的文件集合叫数据库。数据库都置于数据库管理系统DBMS的集中管理下。

数据库管理系统——是一个管理数据库的软件系统，是数据库系统的核心。它完成数据的存贮这一复杂过程，而不必让用户了解工作的细节，用户只知道如何逻辑地、抽象地使用数据。有了这样的软件系统代替以前的仅用文件的系统，可以减少数据冗余，实现数据共享。也可以解决数据的完整性和安全性问题，因为这些都放在一个系统内统一考虑。

二、数据模型

计算机所能处理的对象都是数据，而这些数据又都是自然界中一切客观事物在计算机世界中的表示。有了数据，还要用一定的模型来描述数据之间的内在联系，也就是描述自然界中事物之间的关系，这就产生了数据模型。

1. 从实体到数据

一切信息都用数据表示，而信息是反映事物的物理状态，所以从事物本身过渡到数据有一个转变过程，这个过程，常常用术语"世界"来描述：现实世界——信息世界——计算机世界或数据世界。

现实世界中描述的术语主要有实体和属性。实体是指客观存在并可相互区别的事物或抽象事件。例如：某地点的地形、人口、地质情况，或考察、评价结果等等。性质相同的同类实体的集合叫实体集，如：整个地区的地形、人口、地质情况，是区域内许多地点的地形的集合，人口的集合，地质情况的集合等。属性是实体具有

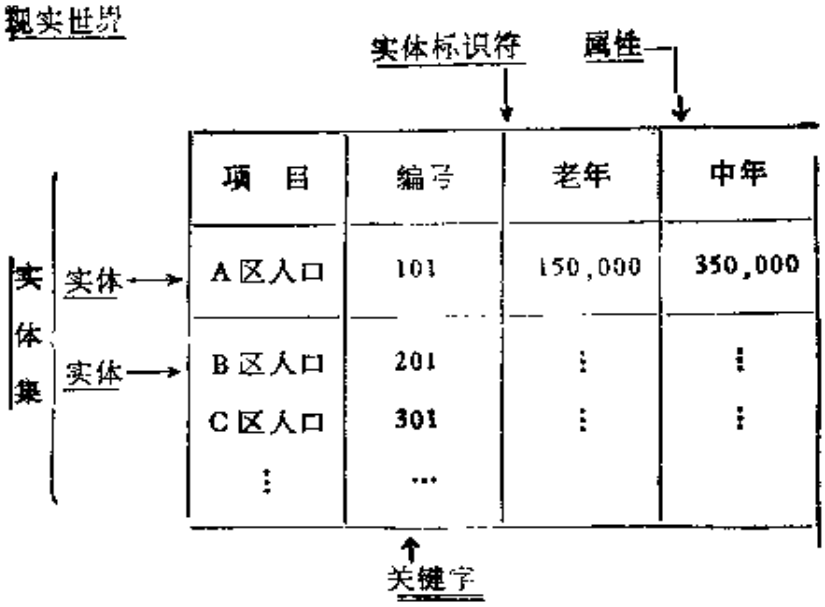
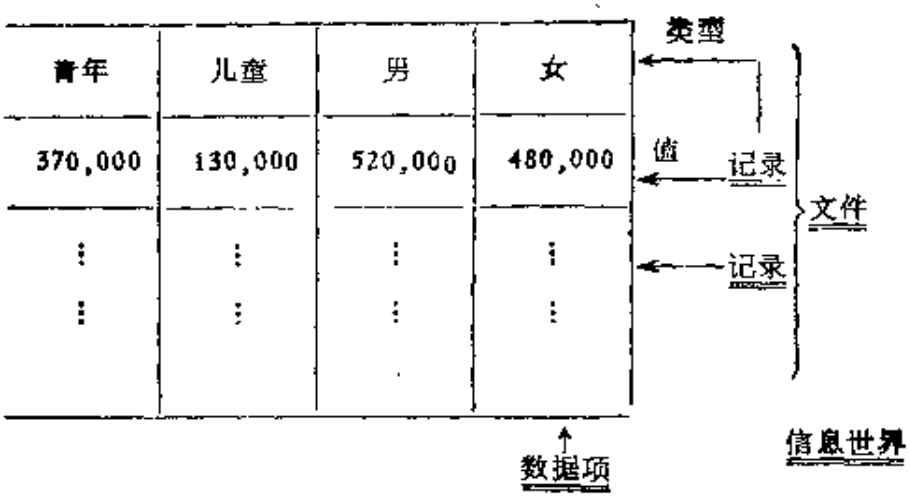


图 6.13 现实世界与

的某一特性，例如，地形这一实体可以有高程、道路、冲沟、居民点、河流等属性，人口这一实体可以有老年、中年、青年、儿童、男性、女性等属性。能将一个实体与其它实体区别开的属性集叫实体标识符。

信息世界中有一套与现实世界完全不同的术语表述，但与现实世界中的表达有对应关系。因为信息本身就是用一种人为的标记来记录现实世界中的实体及其特性，这种人为的标记可以是文字也可以是符号或数字，人们看到这些标记就会明白它所代表的是什么事物。这些标记是人们把现实世界中的事物总结、选择、归类后得到的。信息世界中使用的术语主要有数据项、记录、文件和关键字，这些术语和现实世界的对应关系为：数据项（或字段、数据元素）——属性，是标记实体属性的符号集；记录——实体，是描述实体的符号集；文件——实体集，是描述一个实体集的符号集，是同类记录的集合；关键字——实体标识符，是用符号或数字标识实体的描述符，它可以表示某一记录并与其它记录相区别。这一对应关系，以人口为例，见图 6.13。



信息世界实例说明

计算机世界与信息世界的区别在于，信息世界中的信息可以是文字、符号、数字或其它，而在计算机世界中所有的信息都只能用数字表示，并且必须转换成二进制。例如采用 ASCII 码可以把所有的英文字母、数字和符号转换成二进制代码，可见计算机世界就是数据世界。利用编译系统、汉字编译系统等软件可以完成信息世界到计算机世界的转换，把用户使用的数据形式转化成机器存贮的数据形式，而这一切工作对于用户来说不需要了解得很清楚，用户只需要了解工作的逻辑关系而不必了解物理关系。所谓“逻辑”是适合用户观点和习惯的用语，是抽象的概念的用语，如逻辑结构、逻辑记录等。所谓“物理”是指具体的存贮介质或设备，如物理结构、物理记录等都是描述实际存贮数据情况的。这里，不讨论“物理”上的各种情况。

描述实体的数据是互相关联的。实体内部的联系，就是记录内部数据项(字段)间的联系，实体与实体之间的联系，就是记录之间的联系。数据库系统就是要考虑实体与实体之间的联系，这种关系有多种多样，归纳起来，有三种：① 1—1 关系，如北京市有一

个市长，市长只能在一个市内任职，两个实体北京市和北京市长是1对1；② 1—m关 系，如北京市有多个区，一个区只能属于一个市，北京市和区是1对多的关系；③ m—m 关系，如老师和学生，老师和每个学生有关，学生又和每位老师都有关，它们是多对多的关系，多对多中包含了1对多，1对多中又包含了1对1。

表示实体及实体之间联系的模型叫数据模型，数据模型是数据库系统的关键和核心，建立什么样的数据模型就决定了建立什么样的数据库管理系统。常用的数据模型有层次模型、网状模型和关系模型。

2. 层次模型

实体之间的联系用树形结构来表示，这种模型叫层次模型。

树形结构是用倒挂的树来表示，如图 6.14。树由结点和连线组成，最顶端的结点称为"根"，除根外某一结点上方所联结的结点称为父结点，父结点下方所联结的结点称为子结点。一个父结点可以有一个子结点，也可以有多个子结点。没有子结点的结点称为"叶"。每一个结点代表一个记录，或确切地说代表一个记录类型。因而层次模型也可以定义为以记录类型为结点的定向有序树。这样的数据模型表达了实体之间1对1和1对多的关系。满

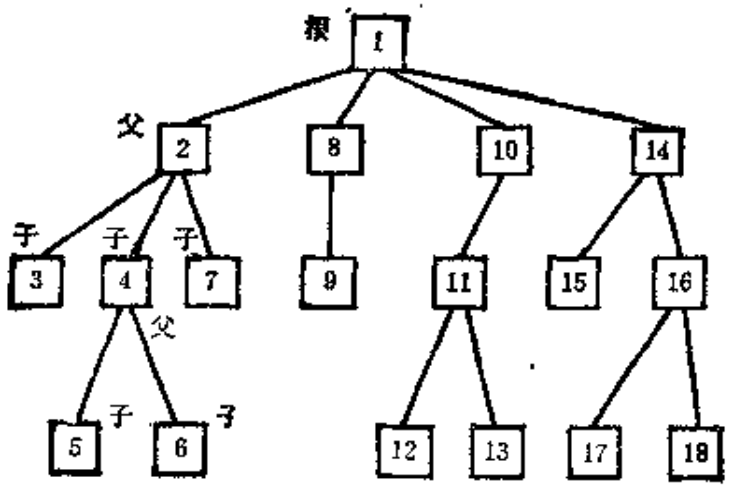


图 6.14 层次模型

足层次模型的条件是：

（1）仅有一个没有父结点的最高结点，这个结点就是树的根；

（2）除根外，其它结点有且仅有一个父结点与之相连。

以上条件的存在使层次模型不能处理多对多的实体系。

例如，以农作物为例说明层次模型的结构，如图 6.15。

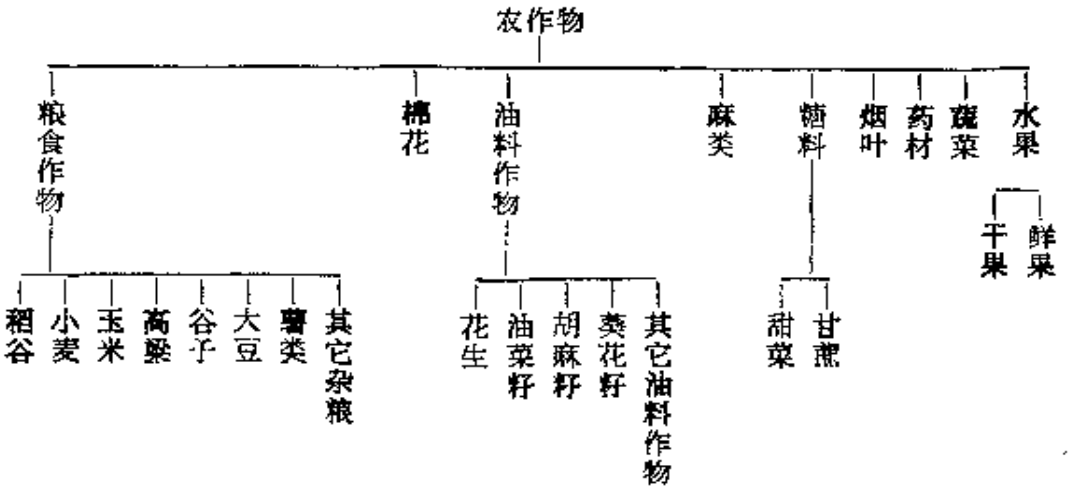


图6.15　农作物层次模型结构

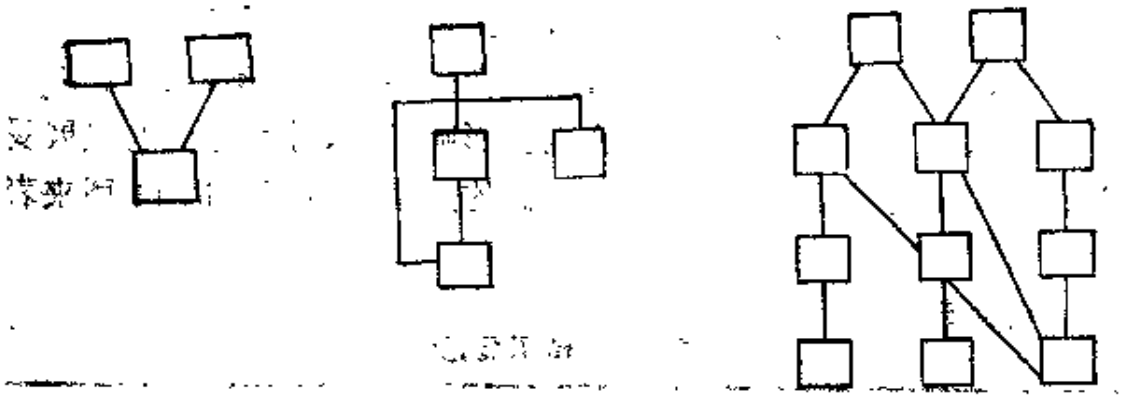


图 6.16　网状模型

3. 网状模型

为了改善层次模型，使多对多（m—m）的关系也可以处理而产生了网状模型。网状模型一个结点可以有多个父结点，形成了网络。它是层次模型进一步的发展，在网状模型中，至少有一个结点有二个或二个以上的父结点；并且根结点不一定只有一个，也就

是可以有一个以上的结点无父结点。这样，表示记录的结点之间可以有二种或二种以上的联系，结构更加复杂。图 6.16 是几种网状结构的例子。

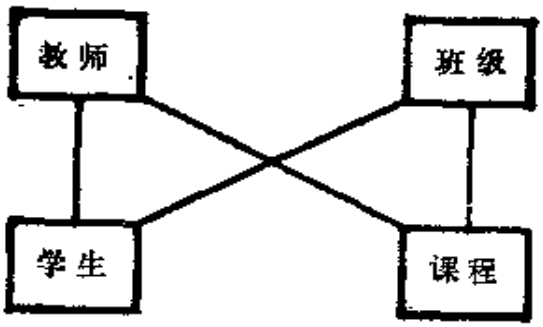


图 6.17　网络实例

这样的例子在现实中很多，例如学校中师、生，班级和课程之间呈网状关系，教师对学生讲授课程，学生被教师教，同时又属于某个班级，课程是某些教师教的，而且是某个班级的课，它们的关系可以用网状模型来表述。所有实体间的关系都用连接线(指针)表示如图 6.17。再如讨论国土资源中自然资源、环境因素、产品生产和基础设施四部分之间的关系，也呈网络状。工、农、畜牧等各类产品要利用自然资源来生产，而生产需要基础设施，又会影响环境；教育、卫生、交通等基础设施也会影响环境，并且它们的发展受产品生产和自然资源的制约。它们的关系也可用网状模型来表示。

4. 关系模型

表 6.1　借阅登记表

阅览证号	图书总编号	借　期	还　期
88002	36201	5.1	5.20
87008	36202	5.1	5.25
87020	36203	6.10	6.30
89040	36204	7.3	8.2
86050	36205	8.20	未还

表 6.2　借阅者记录表

姓　名	阅览证号	班　级
李　刚	88002	二年级
马　画	87008	三年级
孟　音	87020	三年级
周　平	89040	一年级
曾　红	86050	四年级

表 6.3　图书记录表

图书总编号	书　名	作　者	位　置
36201	数字图象处理	王小明	1 号
36202	遥感概论	刘　燕	1 号
36203	地理信息系统	董　平	3 号
36204	数据库系统	赵　英	3 号
36205	计算机制图学	吴志山	2 号

用表格数据来表示实体和实体间联系的模型叫关系模型。

在关系模型中，与层次和网状模型不同处在于，关系模型的文件表达了二个内容：①实体本身数据；②实体之间的联系。这种联系不是象前面两种模型用连接线(指针)表示，而是用表格中存放的关键字来表示的，这是关系模型的主要特点。这样关系模型十分方便地处理了多对多（m—m）的关系。现以某系资料室借阅表格为例来说明关系模型。表 6.1 是借阅登记表，上面列有阅览证号和图书总编号两个实体间的联系，为了弄清楚这些号码所表示的具体含义，必须到另外两个表格中去寻找，这一表格和另外两个表格的联系就要靠关键字，表 6.1 中第一个关键字是阅览证号，扫描表 6.2 寻找相应的关键字，例如 87020 则可以找到姓名孟音和三年级这样的属性值；同样地，扫描表 6.3 寻找对应于表 6.1 的另一个关键字即图书总编号 36203，则可以得到书名为地理信息系统，作者董平，放在 3 号书架，这些信息是图书的属性。多种

图书和多个借阅者形成多对多的关系，通过表格使这些关系一目了然，关键字是检索的依据。

在表格中，每一列表示属性，是数据项或字段，各列之间必须相异，不能重复，每列中最上格表示属性的"型"，其它格表示"值"这些值有相同的取值范围。表格中的行表示实体，是一个记录，从第二行开始每一行相当于一个记录的"值"，而第一行则是记录的"型"。这里行与列的次序无关，可以调换。这些概念与前面所讲是一致的，参考图 6.13。那么所谓关系就是整个表格文件，列出的三个表格文件就表示了三个关系。

对比图 6.13 和表 6.1、6.2、6.3，不难发现，从实体的关系转化成关系模型比转化成层次或网状模型要方便得多，也直观得多，只要把所有的实体和属性用关系表格表示出来，再把与实体有关的其它信息也用另外的关系表格表示出来，就得到关系模型了。因而目前比较流行的数据模型就是关系模型。地理信息系统中现在比较著名的系统也是使用关系模型所对应的关系数据库。

三、关系数据库

对应于一个关系模型的所有关系的集合称为关系数据库。

关系数据库的例子已有一些，如：美国 IBM 加利福尼亚圣·荷塞实验室研制的关系数据库管理系统 SYSTEM R，效率高而功能比较完备，最初用于 IBM370 的 VM/370 操作系统上；美国加利福尼亚大学伯克里分校研制的关系数据库管理系统 INGRES 是小型机上的实用系统。我国最为普及的是微机上使用的 dBASE-III、IV 等关系数据库管理系统，著名的地理信息系统软件 ARC/INFO 中的 INFO 部分也是关系数据库管理系统。

关系模型中的数据操作，使用语言灵活方便，表达能力和功能都很强，用户只要指出做什么，而不需要知道是怎么做的。也就是说，用户只要指出他所用到的数据及限制条件，而不必知道系统内部的工作过程是怎样。这一点深受用户欢迎，使关系数据库具有

生命力和发展前途。

dBASE-III 软件优点很多，它可以方便地建立、修改和删除一个文件，灵活地进行数据的添加、删除、编辑、修改、查询、打印等，还可以进行一般的算术运算和支持全屏幕编辑等。并且查找速度快、容易使用、数据类型多、文件种类多，是当今世界上的畅销软件之一，已被广泛地用于科研、生产、管理的许多领域中。在地理信息系统领域中，也有许多系统选用 dBASE 作为 GIS 中的数据库部分，存贮和检索属性数据，获得了成功。

四、数据库管理系统(简称 DBMS*)

计算机系统引进数据库技术后成为一个数据库系统，这个系统应由四部分组成：硬件、软件、数据库、数据库管理员。硬件资源包括主机 CPU、内存、磁盘、磁带和其它外部设备。数据库系统对内存要求很大，因为内存中需要有操作系统，部分数据库管理系统和缓冲区，加之数据量大，缓冲区要求也大。经常存放各种软件和数据的外存空间是磁盘和磁带，特别是磁盘空间也需要足够大。软件资源包括操作系统（OS），高级语言如 FORTRAN，C 等，数据库管理系统（DBMS）和用户编写的应用程序。数据库管理系统是软件部分的核心，它可以包括以下一些部分：

1. 语言处理

（1）模式描述语言，描述全局的逻辑数据结构；

（2）子模式描述语言，描述局部的即用户的逻辑数据结构；

（3）数据操纵语言，用户使用、操纵数据库的命令。这部分很重要，用户用它和高级语言来编写自己的应用程序；

（4）物理数据描述语言，又称为设备介质语言，描述物理数据结构，这部分内容对关系模型可不要；

---

* "数据库管理系统" 原文为 Data Base Management System 取字头得到简称 DBMS。

(5) 查询语言

2. 实用程序(系统建立和维护)

(1) 装配程序,用于装配数据库;

(2) 重组程序,用于重新组织数据库;

(3) 日志程序,用于更新操作;

(4) 恢复程序,在数据库受到破坏时用它来恢复数据库;

(5) 统计分析程序,统计一个用户空间的使用情况,文件的个数等。

3. 数据库运行控制程序

(1) 数据库管理程序;

(2) 并发控制程序;

(3) 数据存取程序;

(4) 有效性检验程序;

(5) 合法性检验程序;

(6) 存取控制程序;

(7) 数据更新程序;

(8) 完整性、安全性保护程序;

数据库管理系统从抽象的意义上讲可以分为三个层次:用户级、概念级和物理级,它们反映了从三个不同的角度观察数据库。在观察时不同分工的人员观察不同,也叫做"视图"(图 6.18)。这里,常用到术语"模式",用数据描述语言精确地定义数据模型的程序称为模式。对应于不同的模型有相应的模式。

用户级数据库对应于外模式,又叫子模式。是用户看到和使用的数据库,也叫用户视图,就是用户可以看到的部分数据的逻辑结构。用户根据这子模式,用询问语言或应用程序去操作数据库中的数据。至于数据在计算机中实际结构如何,用户是不知道也不必知道。

概念级数据库对应于概念模式,或叫模式。是对数据库的整

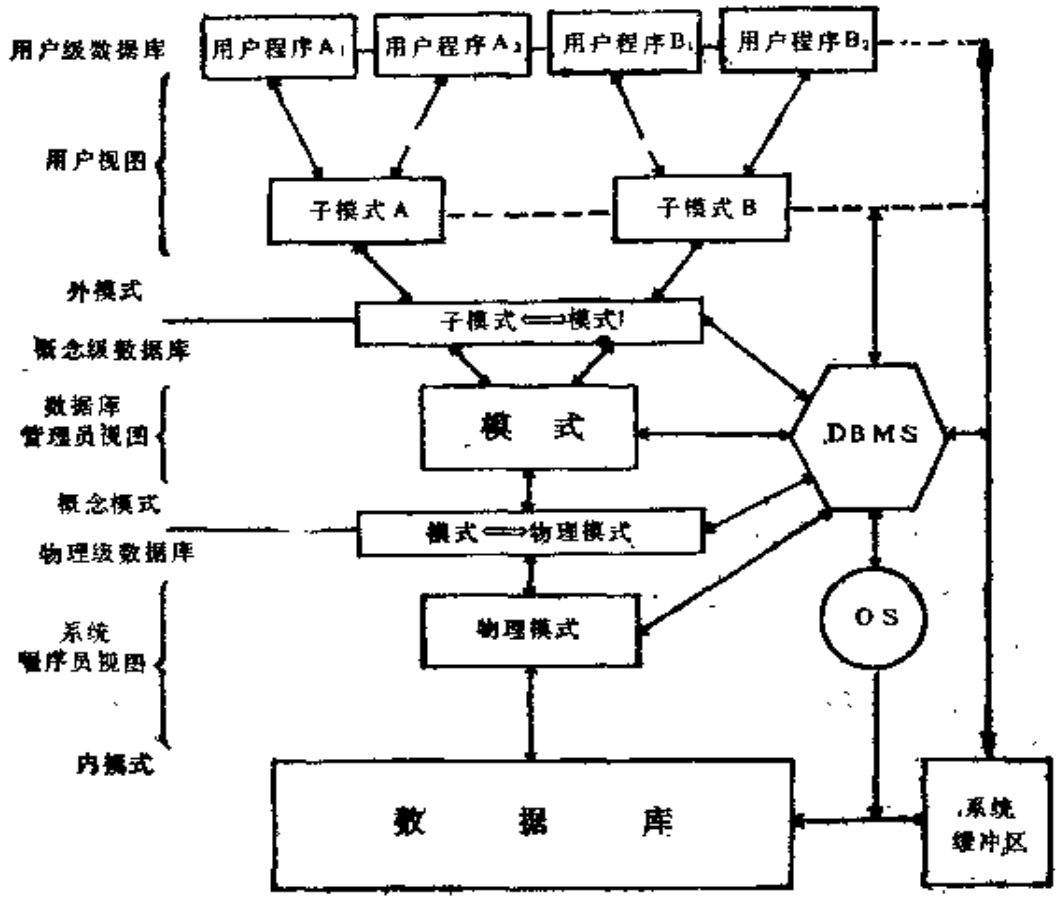


图 6.18 数据库系统结构与不同视图

体逻辑描述，这是数据库管理员看到的数据库，常常是用户视图的一个最小并集*，又叫数据管理员视图。这一级仍然只涉及数据库中所有对象的逻辑关系，而不是它们的物理情况，只是把用户视图有机地结合成一个逻辑整体，以便统一考虑。

物理级数据库对应于内模式，它包含数据库的全部存贮数据。这一层是数据库的最底层，是从系统程序员角度看的，他把存贮在内、外存介质上的原始数据加工，用一定的形式组成物理文件，并编制专门的存取程序，实现文件中这些数据的存取，所以物理级数据库也叫系统程序员视图。

* 并——设R与S为同类，则R与S的并是由属于R或S或同时属于R和S的部分组成的集合，记为 R∪S。

真正存在的数据库只是物理数据库，其它数据库都是抽象而来。但每一层的数据之间互相独立，使得用户的程序不依赖于物理数据而大大方便。DBMS 所做的工作主要是完成三级数据库之间的转换。当某应用程序读取一个数据时，通过 DBMS，由 DBMS 通过子模式到模式到操作系统 OS 到数据库到缓冲区等一系列过程，最后由 DBMS 将数据送给应用程序中的工作区使用这数据。它象一个向导，把用户对数据库的访问，从用户级带到概念级，再带到物理级，有效地实现三级之间的转换。它所做的工作可归纳为：

（1）描述数据库　把数据库描述语言所描述的各项内容从源形式转换成目标形式存放在数据库中供系统查阅；

（2）管理数据库　控制整个数据库系统运行；控制用户的并发性访问；执行对数据的安全、保密、完整检验；并对数据进行检索、插入、删除、修改等操作；

（3）维护数据库　其功能为初始时装入数据库；运行时记录工作日志；监视数据库性能；在有问题时重新组织数据库；必要时修改和更新数据库；发生故障时恢复数据库；

（4）数据通信　负责处理数据在系统各部分的流动。这一工作常与操作系统协同完成。

可见，DBMS 在数据库系统中的作用是极其重要的。

6.2.2 GIS 与一般数据库系统的区别

地理信息系统与一般数据库系统不同，根本的区别在于一般数据库只管理一种数据：属性数据，而地理信息系统则要管理二种数据，或者说是空间数据的二个部分：位置数据和属性数据。位置数据用拓扑模型组织地理数据，即数据由位置和拓扑关系组成：位置可用 x,y 坐标记录，拓扑关系记录弧、结点和多边形的相互关系，也可以用网格表示。属性数据则是一个完整的数据库系统，用以管理 GIS 所需要的统计数据、专题数据及其它特征数据。

dBASE 就常用来作为 GIS 的一部分使用。 GIS 将两种数据综合管理。可见，地理信息系统比一般的数据库系统更复杂，因而它有一套独特的管理方法。因为 GIS 技术发展时间很短，至今还有许多不成熟之处。

现以地理信息系统商用软件 ARC/INFO 为例说明地学数据管理上的某些特点。

ARC/INFO 是美国环境系统研究所(ESRI)在多年从事 GIS 软件开发和应用工作的基础上，80 年代初推出的 GIS 软件。它是两个系统的结合，即描述地图特征和拓扑关系的 ARC 系统与记录属性数据的关系数据库管理系统 INFO。这种混合数据模型兼顾了空间数据和非空间数据两种不同性质的数据特点，有效地实现了两类数据的操作、处理和管理。ARC/INFO 是把逻辑上的各组功能分别组织到不同的模块中，例如：所有制图编辑功能成为一组放在一个模块中，叫做 ARCEDIT，所有地图输出和绘图功能被分到另一组，这个模块叫 ARCPLOT 等等。于是 ARC/INFO 包括有许多子系统或模块，每一个子系统都有它自己的一组命令和逻辑功能。

ARC 是 ARC/INFO 的主要程序环境，它可以实现如下功能：

(1) 数据变换以实现系统调入数据和输出，这个功能为实现各种类型的数据输入与输出而设置的。

(2) 地图覆盖 (coverage)* 的数字化和编辑。

(3) 发现错误和检验地图数据的自动生成情况所使用的命令。

(4) 工作空间和文件管理操作：列清单、改名称、拷贝、删除和地图数据文件的描述。

---

* 覆盖——原文 coverage，指一个覆盖面或一个数据层，是 ARC/INFO，CGIS 等地理信息系统所用术语，表示一幅作为基本存贮单元的图。

(5) 坐标投影及其相互转换的功能，常用于图幅拼接和图幅叠置(图 6.19)，以保证位置配准。

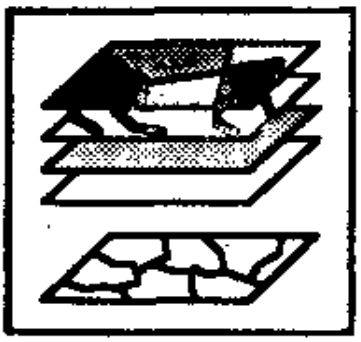


图6.19 地图叠置

(6) 特征属性的管理与操作。

(7) 分析操作，包括特征缓冲区设置、地图叠置、最近邻分析和统计报告等。

INFO 是一个完全的关系数据库管理部分，管理着在地图覆盖中与地理特征属性相联系的表格数据。这些表格作为 INFO 的数据文件存贮，ARC/INFO 与其联系并更新这些地图属性特征，使每一个地图特征置于相应的表格记录中。这些属性数据的处理和更新是通过在表格行与列上进行逻辑运算和算术运算而完成，其过程是 ARC/INFO 产生地图特征数据，然后 INFO 实现列表和进行统计分析。图 6.20 表明位置数据与表格属性数据间的关系，

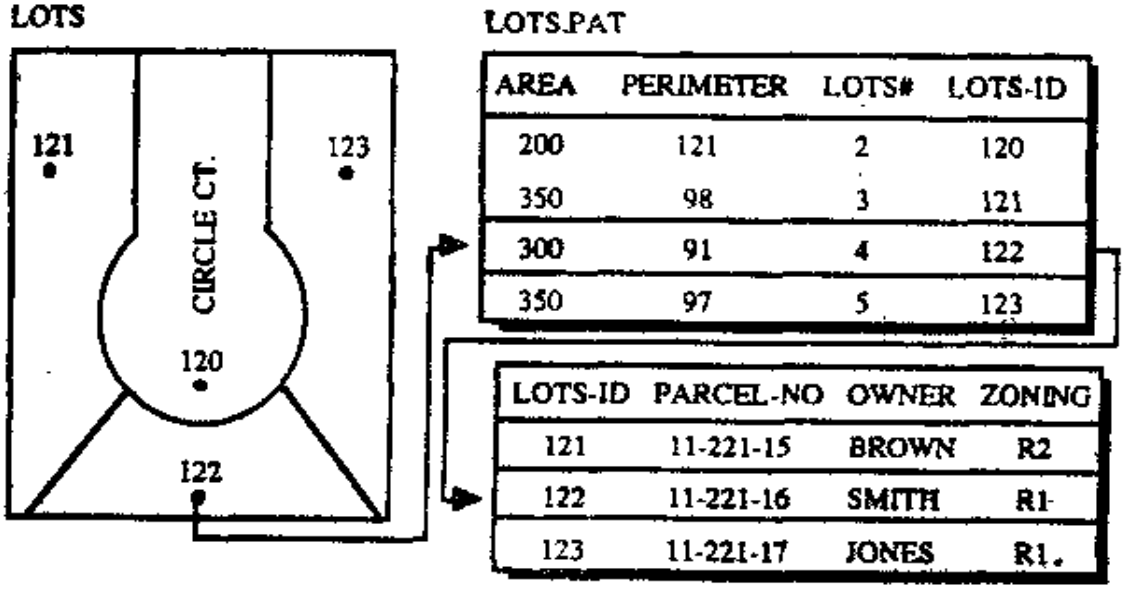


图 6.20 位置数据自动与表格属性数据相联接

标号为122的地块，关键字为 LOTS-ID*，通过它联系图幅 LOTS 和上、下两表，上表列出面积、周长和区域号（AREA，PERIMETER，LOTS#），下表列出逐级分区号（PARCEL-

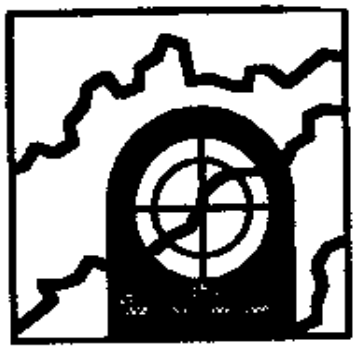


图 6.21 数字化

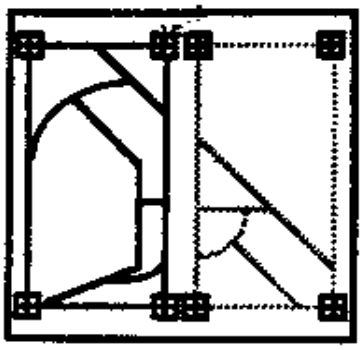


图 6.22 边缘匹配

NO），地产主（OWNER），所属地带（ZONING）。INFO 可以完成新数据文件的数据定义，已有数据文件的使用，数据的输入、更新、分类、查询等等，还可以和其它关系数据库接口，扩大应用范围。

此外，ARC/INFO 系统还有一系列的功能模块加强空间数据的输入、输出和管理，主要的模块有：

ADS（ARC 数字化系统）用于数字化和点、线、面特征的初步编辑。数字化时不需要专门处理左和右多边形标号，及"岛"多边形等，只要跟踪数字化，然后其它软件会自动生成和更新它们之间的空间关系。所有的工作是"菜单"式，也就是通过选择目录决定用户要作的事情，也可以开窗、放大、移动等帮助用户方便地工作（图 6.21）。

ARCEDIT 是图形和数据库编辑器，它把计算机辅助设计（CAD）功能和地理数据库的能力联系起来。这种结合可以产生高质量的地图，也能建立和维护复杂的 ARC/INFO 可以操作的

* LOTS-ID—LOTS 表示地块，ID 是 identification 的缩写，代表识别码或身份号。

地理数据库。 ARCEDIT 利用图形监视屏幕可以完成许多工作，如：诊断和修改数字化的错误，实现图幅放大、缩小，图幅边缘匹配(图 6.22)，加入文字注释，用其它图幅作背景显示，编辑属性特征。可以在屏幕上以人机交互的方式作地图编辑，如移动、拷贝、增加、删除、改形、更新，另外线段可以校正，锐角可以改成直角，产生平行线，转动图形和文字等等。 所有地图特征的变化都能传递到表格属性中，使其更新。

ARCPLOT 是系统的交互式制图和绘图子系统，完成系统的全部绘图任务，产生多种类型的地图图形。它带有丰富的符号库并包括字体编辑器，还有线、点、填充符号及文字串四种交互符号编辑器，可以根据不同的地理属性选择不同的符号。可以定位和改变比例尺，并产生指北箭头、图例、比例尺图线等，直到在屏幕上感到满意，然后存盘或在绘图机上输出，从而可以得到一幅高质量的地图(图 6.23)。

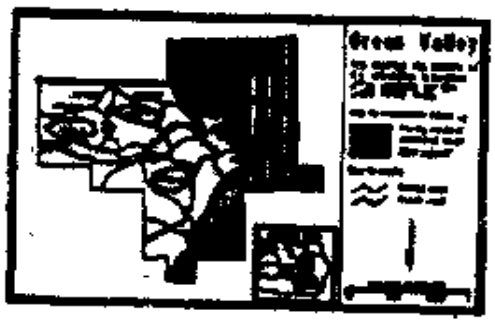


图 6.23 绘制地图

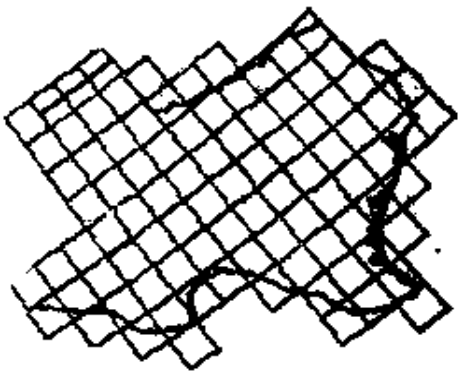


图 6.24 地图库

LIBRARIAN 是一个管理大型制图数据库的系统。它使用了空间库系统和内部的空间索引系统，可以高效率地插入、存贮和提取地理数据。用户将地理数据分成某种形状的区块，称为 tiles，它包括许多地理数据组来描述区域特点。地理数据组也用地理数据层来描述，例如：在城市数据库中可以包括居民区、街道、行政界线等许多层数据。 这种索引结构可以快速、完全地自动插入和

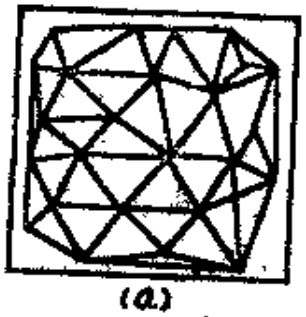
提取数据，而且所利用的存取过程不依赖数据本身。同时，拼地图接软件可以自动地把提取的数据连接成一完整的覆盖数据文件，用于以后的分析和显示(图 6.24)。分析和显示时，用户可提取感兴趣的地图变量，并建立数据库子集。

此外，为了进一步加强系统的功能，ARC/INFO 有一套补充的软件模块，提供一些特殊功能。例如：

NETWORK 实现两种功能——地址编码和地理网络分析。如：城市街道、电话线路等的分析和模型化，可以做的工作有：安排车辆路线，设施的最佳定位、最佳路径选择，分带分区等。如解决设计报纸投递区，火灾时寻找最近消防站，安排学生就近入学等问题。这一模块在城市规划中十分有用(图 6.25)。

TIN 是一组存贮管理和分析三维表面的软件。它用一组相邻而不重叠的三角形表示表面的小面，从而有效地产生各种表面模型(图6.26(a))。并且可以加入等值线、补充网格数据；可以计算坡度、坡向、体积、表面长、剖面，决定河网、山脊线以及三维表面的透视观察等等(图 6.26(b))。

COGO 是一个几何坐标子系统，



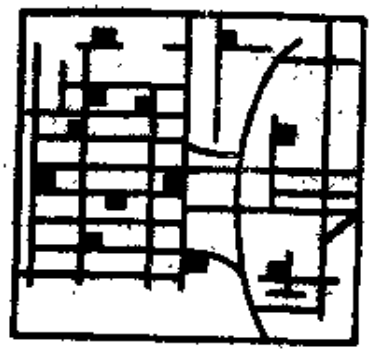


图 6.25　城市街道网络分析

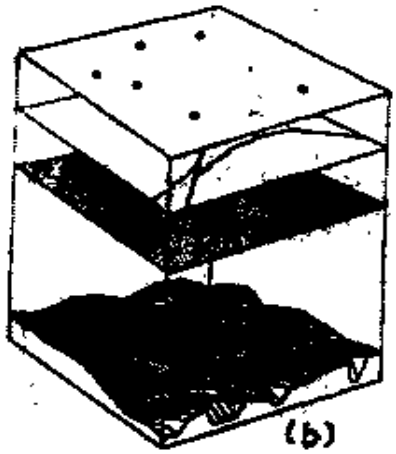


图 6.26　TIN 功能示意

主要帮助土地测量和土木工程师工作。

通过以上对 ARC/INFO 的简单介绍可以看出，GIS 对于空间数据有很强的处理能力，包括输入、分析和显示。它的关系数据库管理部分虽然与一般数据库管理系统有着共同的特点，但从整个系统功能来看，则有很大的区别。

6.2.3 地学数据分析操作的主要功能

本节主要从概念上介绍地理信息系统中具备的一般地学数据分析功能，具体运用时，不同的软件包在命令上和执行的步骤上都会有所不同。只要在概念上对功能理解清楚，运用起来不会困难。

1. 地理数据的分层

在地理信息系统中，根据不同的需要，把地理数据分层存贮，每一层就是一个基本图件，它是图件中地理特征及其相应的属性的逻辑集合。分层的依据很多，有时以要素分层，例如点、线、多边形分别放在不同的层上；有时也以研究对象分层，例如：电力网一层，排水管道网一层等，主要还以使用目的为准。这样存贮对于许多分析运算提供了方便，特别是层之间可以叠合作布尔运算。但要注意，作运算分析时，不同的层应在位置上配准，投影、坐标、比例尺均应一致。

图 6.27 是自然资源信息在应用时的一种分层，共有九个主要的层，其中第 1 层是区域单元，又分了七个子层，如图中 1.1 至1.7 它们是土壤类型，土地覆盖利用、地质类型、湖泊和水体、地表形态、流域、地形等，从第 2 层到第九层依次为：断层、高程、坡度坡向、河流、井位站、行政区、交通、感兴趣的居民点等等。图 6.28 是城市信息的一种分层，它从 1 到 8 包括街区、街道网、城市设施网、城市区域、地形、建筑、区域环境、河流及其它特征环境等等。每一层是一个基本图件，同时又贮存了一系列属性特征。例如：区域环境包括有土壤类型、植被、地质类型、水体、地表形态、河漫滩

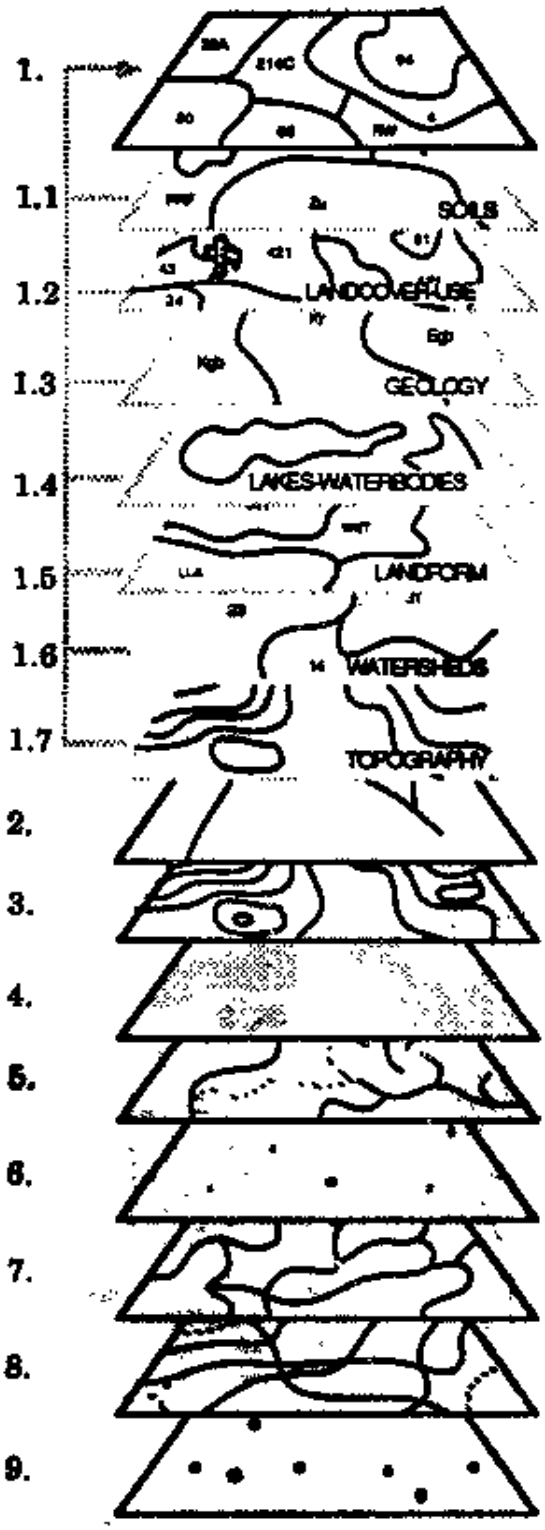


图 6.27　自然资源信息的分层例图

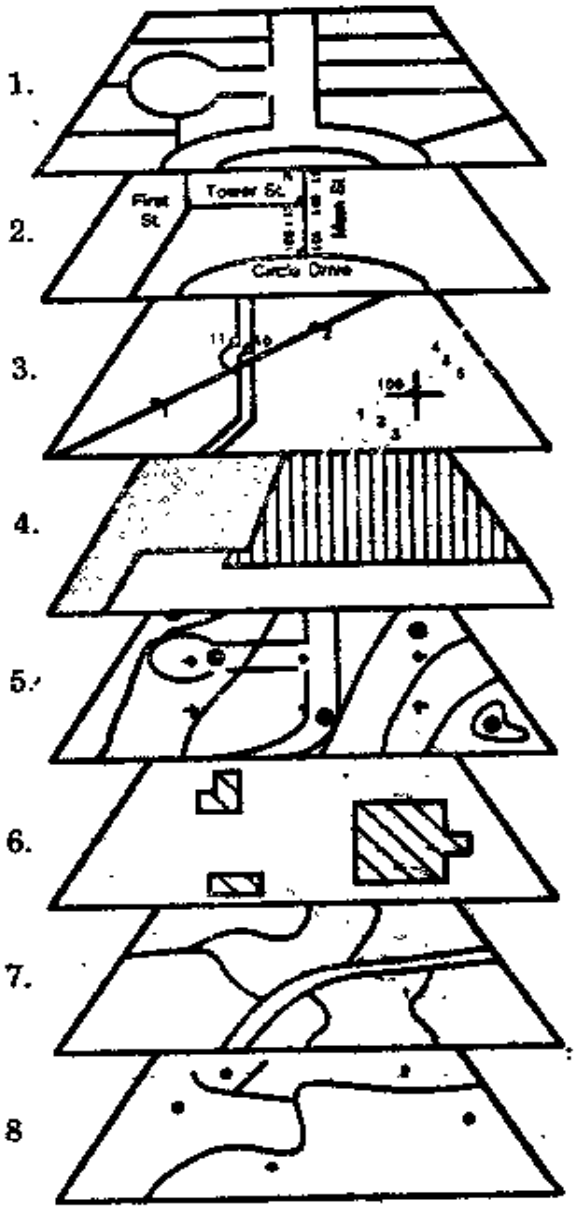


图 6.28　城市信息分层例图

等属性记录在数据库中。

用户需要检索其中某一图件的数据时，向系统提出要求，系统应做到以下几点：

2. 开窗放大

用户指出矩形窗口的范围，可得到这一窗口内的放大图。在已放大的图内，再指定一区域，可再次开窗放大。这样，可以观察到不同比例尺的地图(图 6.29)。

3. 抽取窗口信息

用户可根据自己的需要选择各种窗口，并提取窗口内的信息。信息所在的层也由用户指定。图 6.30 示意了各种窗口形状：点、不规则形、正方形、圆、弯曲的长条走廊形状等(见左图)，将窗口叠合在指定层上，舍掉窗口外的数据，留下窗口内的数据(见右图)。

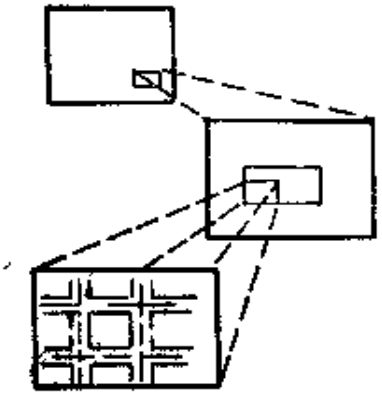


图 6.29 开窗放大

4. 抽取跨图幅的窗口信息

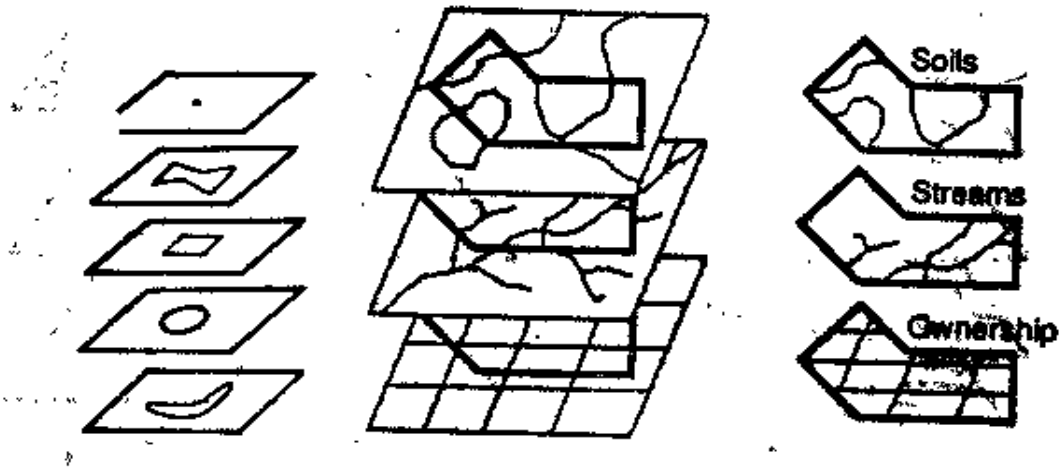


图 6.30 抽取窗口信息

有时需要的信息不在一张图纸上，即不在一个地图文件中，这时按相邻图幅的对应坐标找到每一图幅上的窗口位置，抽取相应

层上的信息。相当于开一个大窗口（图6.31）。

5. 布尔运算

有关集合和命题的运算是布尔（Boole）代数，用集合来讲是并集（∪）、交集（∩）和余集（¬）；用命题来讲是或（∨）、与（∧）、非（¬）。两者在某种意义上来说是等价的*。GIS 中把两个基本图件（层）看作集合，可以在图件之间进行集合运算，来分析某些结果。例如：

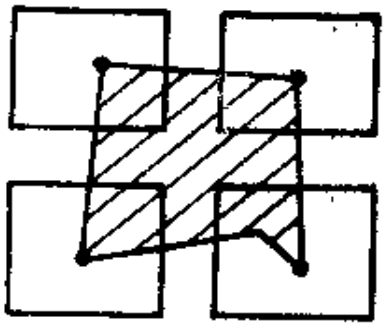


图 6.31 跨图幅的窗口

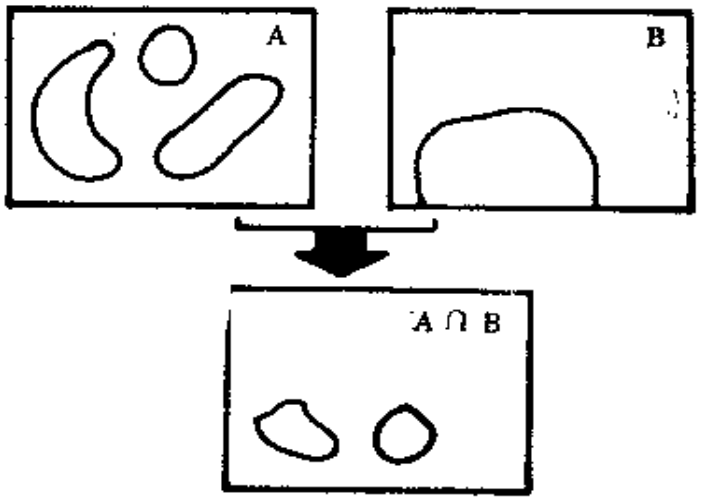


图 6.32 布尔运算

设 $U = \{x \mid 1989\text{ 年全区所种树木}\}$

$A = \{x \mid 1989\text{ 年春季全区所种树木}\}$

$B = \{x \mid \text{全区枣树林}\}$

则 $A \cap B = \{x \mid 1989\text{ 年春季全区所种枣树}\}$

---

* 议题局限的范围为论域U，U中一部分元素的全体叫U中一个集合，用 $A,B,C\cdots$ 表示。设 A 为论域U的集合，余集定义：$\neg A = \bar{A} = \{x \mid x \in U\text{但}\ x \notin A\}$；设 A、B 为论域U的两个集合，并集定义：$A \cup B = \{x \mid x \in A\ \text{或}\ x \in B\}$；设 A、B 为论域U的两个集合，交集定义：$A \cap B = \{x \mid x \in A\ \text{且}\ x \in B\}$。

只要有 A 与 B 两个图件，就可以求出 1989 年春季全区种枣树的范围，从而可以进一步求出面积、产量等一系列统计分析结果（图 6.32）。

由于输入工作常是多幅图，使用数字化板作手扶跟踪，受操作者及设备情况约束，因此形成图形文件后还要作些输入工作，修正成较好的图形。下面是图形输入后的整理功能：

6. 平滑

输入的图形，有时需要作进一步的加工，以便使线条更加平

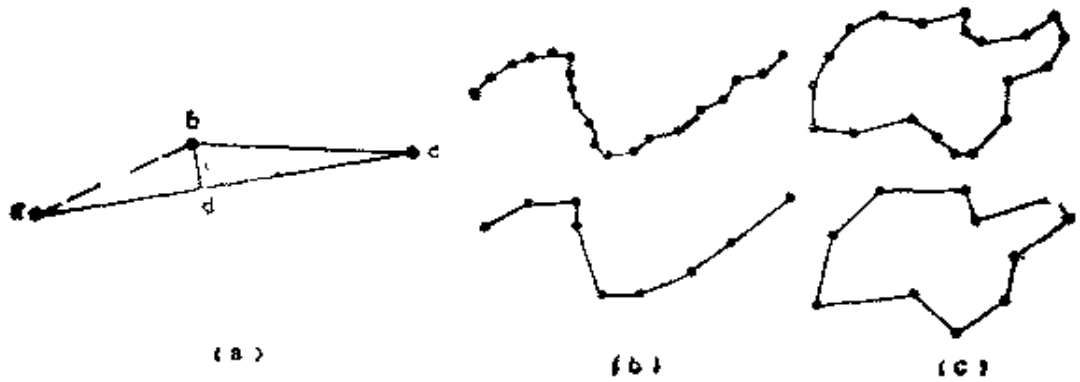


图6.33　平滑化

滑，这个过程如图 6.33 (a) 所示，有点 a、b、c，连接 ac，从 b 作垂线 bd ($bd \perp ac$)，bd 长为 l，设一小量 ε，如果 $l < \varepsilon$，则去掉点 b，保留 ac。这样做减少了不必要的输入点，使输入时由于手扶跟踪时手的抖动或其它技术原因形成的曲曲弯弯的线条，成为平滑的曲线(图 6.33 (b)(c))。它也是编辑工作的一部分，常常被称为细化(thinning)但这不同于网格图象中的细化过程 (5.2.5)。因此称作平滑。这里要注意的是多边形平滑时，多边形与相邻多边形交界处的顶点是不可删去的，否则会造成多边形形状的改变或间断、重合等情况的产生。

7. 边缘匹配

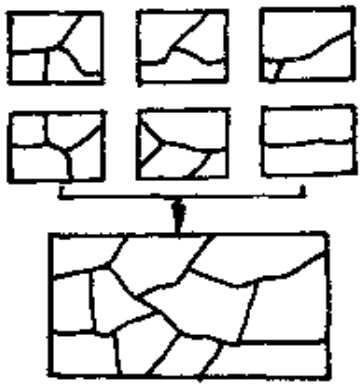


图 6.34　边缘匹配与合并

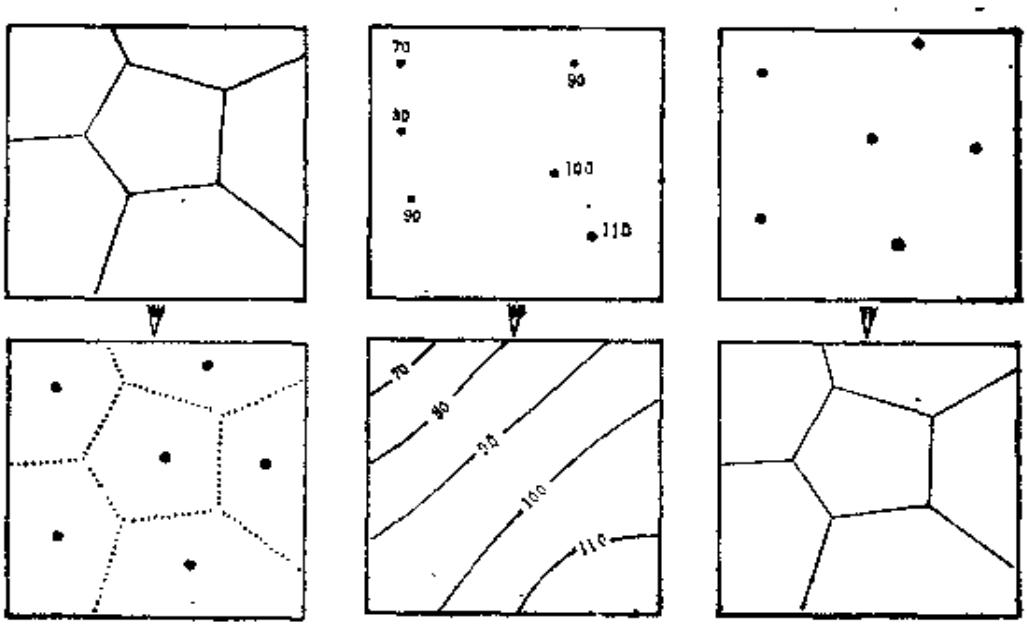


图6.35　计算中心　图6.36　等值线搜寻　图6.37　寻找近似边界

许多基本图件是一幅图的部分，在把它们镶嵌成一整幅时，要解决相邻图幅边缘匹配问题，将点、线坐标一一对应，以免位置的错动(图 6.34)。

通过输入数据可以推算或转换、派生出新数据。有以下几种功能：

8. 计算面中心

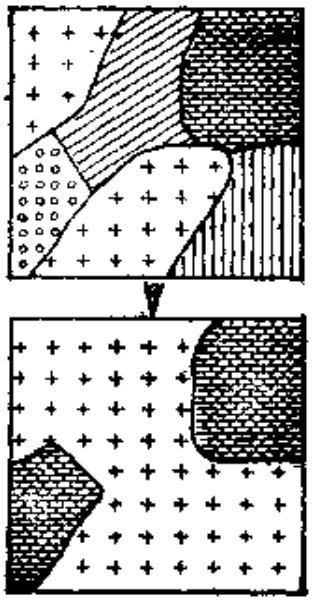


图 6.38　类别调整

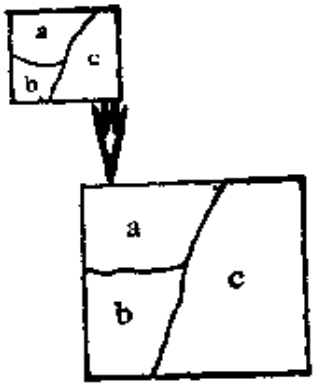
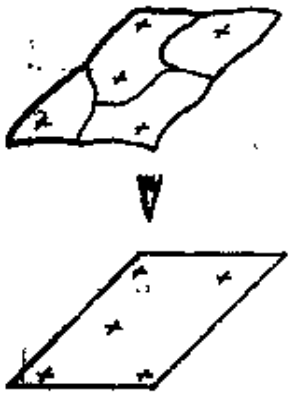
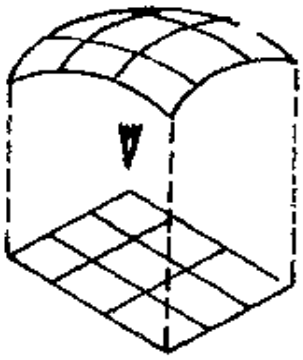


图 6.39　改变比例尺





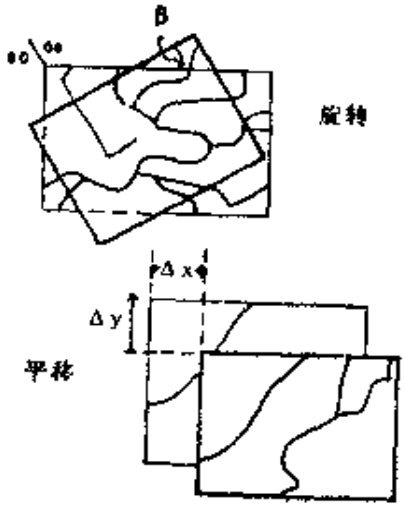


图 6.40　几何校正　　图 6.41　投影变换　　图 6.42　坐标平移和旋转

在已知多边形面的情况下，利用数学方法，计算出多边形的质心，即面中心的位置(图 6.35)。

9. 等值线搜寻

已知离散点的数值，搜寻或拟合出等值线并画出图形，如等高线、等压线等。从而实现实测值到图形的变换(图 6.36)。

10. 寻找近似边界

已知离散点的数值，以这些点作为多边形的中心，近似地寻找多边形的边界。如果不考虑属性特征的权重，则多边形边界就是几何中线相交部分组成。 这种功能可以使无法得到类别界线的地区，由采样结果分析出近似的空间关系(图 6.37)。

11. 类别调整

根据需要可以使相近属性的区域合并，合并后，同一类别中间原有的分界线应删去。这种功能常用于以多种属性为条件划分区域单元的工作中，也可以根据某种条件产生派生图。例如：土地资源评价图，从土地利用图、土地类型图等多种要素经过类别调整生成的新的类别图而得到(图 6.38)。

12. 矢量与网格数据类型转换

为了能够使用和组织多种数据，扩大系统用途，系统应能实现数据间的转换，特别是常用的两种数据结构：矢量与网格之间的转换(参见图 5.16)。

下面是描述地图数据本身的几种变化功能：

13. 改变比例尺

可按用户指定的比例改变地图比例尺，得到比例不同的另一幅图(图 6.39)。

14. 几何校正

输入的图形由于原图纸张本身变形或输入技术不过关或其它原因，造成几何畸变的产生。为消除位置上的误差需作几何校正，例如使用控制点技术等(图 6.40)。

15. 地图投影变换

地图所使用的坐标投影往往不同，常用的如高斯-克吕格投影、通用横麦卡托投影（UTM）等，进入系统后，为了叠合、配准等分析运算，必须统一到共同的坐标系统之下，必须完成不同投影之间的转换(图 6.41)。

16. 坐标平移与旋转

平移和旋转是坐标变换中最基本的功能，平移量的大小和旋转角度的大小可由用户指定，也可以根据控制点作计算(图 6.42)。

GIS 还有一些较为独特的作用：

17. 生成缓冲存贮区（buffer）

这一功能是对于点、线或多边形，在其相邻的范围内，按照指定的条件建立一个空间的范围，叫缓冲存贮区或缓冲区(图 6.43)。缓冲区实际上是独立的多边形区域，它的形态和位置与原来的图形有关。

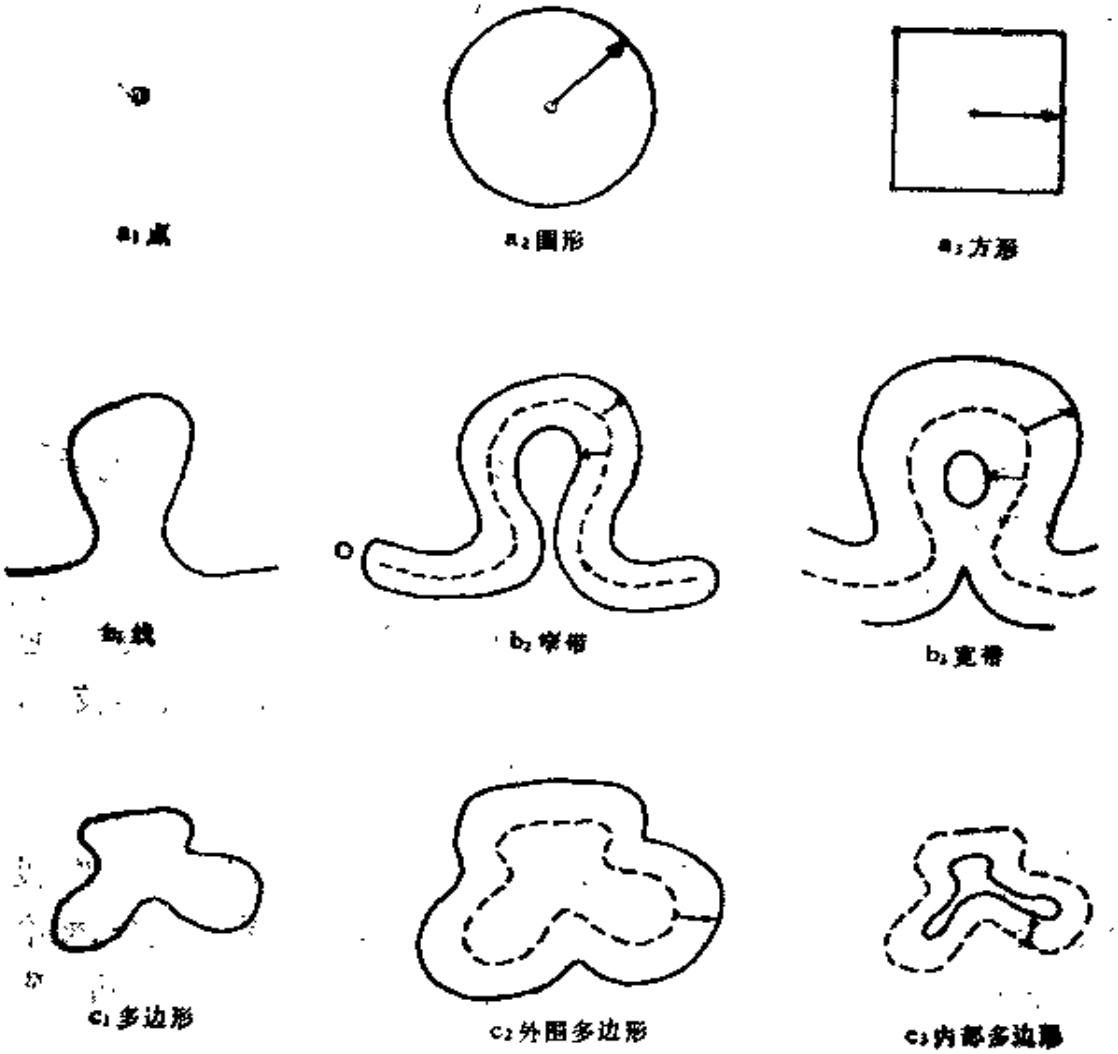


图 6.43　生成缓冲区

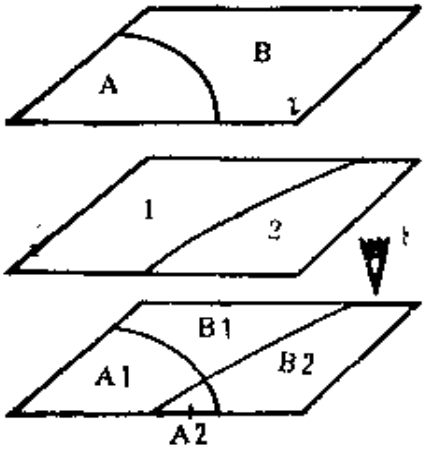


图 6.44 拓扑叠加

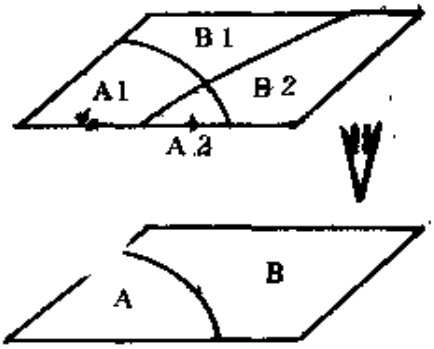


图 6.45 拓扑分解

建立缓冲区常常用来解决某一地理对象的邻近范围或不同地理对象的空间接近程度，例如：限定在河流周围一定范围内(假定为 1 公里)不许建造工业设施；要建造一个居民小区，某处周围 2 公里范围需要拆迁；等等。属于范围内的区域靠缓冲区来划定，并可以通过其它层的信息得到缓冲区内的其它属性特征。

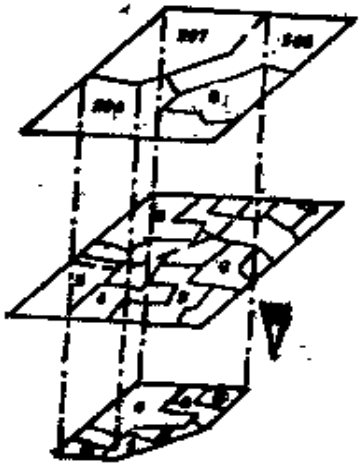


图 6.46 区域提取

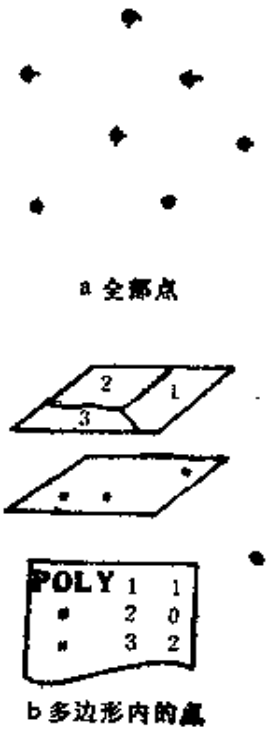
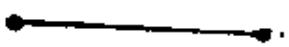


图 6.47 点的计数

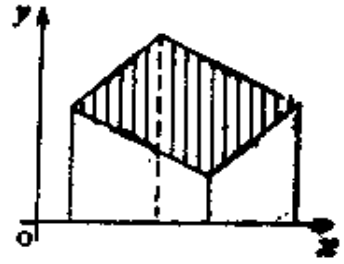


a 直线

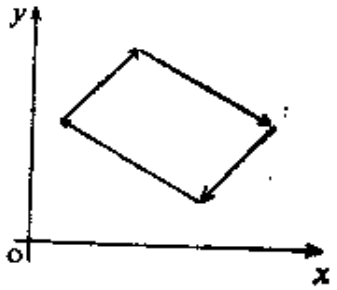


b 曲线

图 6.48　计算线距离



（a）面积



（b）周长

图 6.49　计算面积和周长

18. 拓扑叠加

两个基本图件叠合后，对应位置的属性特征相组合，产生新的属性特征。叠加后的新图件包括新的空间特征和新的属性关系，因而这种叠加是拓扑叠加(图 6.44)。

19. 拓扑分解

这是前一功能的逆运算，从组合的属性特征中分解出特征分量，而且是拓扑分解，既分解出空间特征，又分解出属性特征（图 6.45)。

20. 区域提取

两基本图件(层)叠合后，以某层中一个区域为准，提取另一个层中的特征，并作相应的区域统计计算。新的图件区域空间范围由第一层得到，区域内其它特征由第二层得到(图 6.46)。例如：东城区内的街道图由分区图和全市街道图叠合而来。这与抽取窗口

信息类似，但窗口为某图件中的一个区域。

以下功能有关测量问题：

21. 点的计数

点信息如着火点、井点、矿点等，可以在全区范围内计数，也可以在每个多边形内例如区域单元内计数，每个多边形内多少个点，并建立统计表格(图 6.47)。

22. 计算线距离

可以计算任意两点间的距离和由多个点组成的曲线距离，曲线距离可由两点间直线距离相加而得到(图 6.48)。

23. 计算面积和周长

以 x,y 坐标系为准，计算面积时，计算 y 值以下面积，按矢量方向，求出向右向左两个方向各自的面积，它们绝对值之差，便是多边形内面积值；周长便是线段长之和(图 6.49)。

基于网格结构的数据，系统有一些功能可以完成较为复杂的分析，它们有：

24. 选择最优通道

寻找两点之间的一条最优通路，往往是多种要素的综合考虑，例如选择一条修路的最佳方案，要考虑几种可能的方案，比较它们

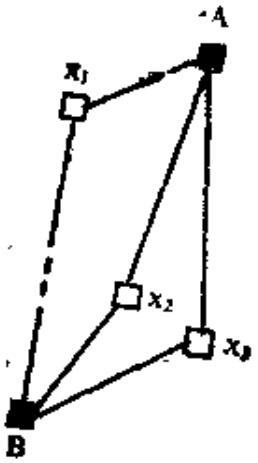


图 6.50 选择最优通道

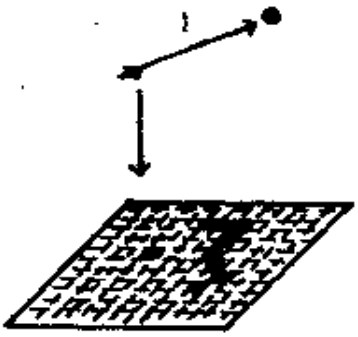


图 6.51 计算最近距离

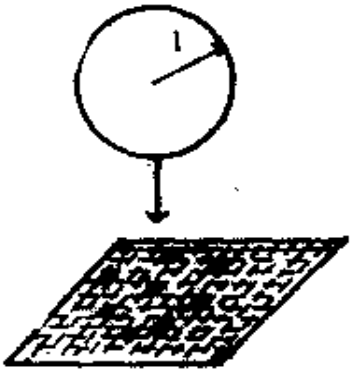


图 6.52 搜索半径

之间的经济价值、环境价值、社会价值等，得到一个花费最少价值最大的路线。可以把每一网格点在通过它时的价值计算出来，去寻找最优路线(图 6.50)。

25. 计算最近距离

从某一网格点到另外一条线中的那一点距离最近，这种运算可以用于许多方面，例如，从某一建筑物距离某一公路最近处在哪里，这里可设一汽车站；从某一位置距某河流最近处在什么地方，确定自来水厂的位置等等(图 6.51)。

26. 搜索半径

搜索以某点为中心，一定的半径内事件发生的次数，将搜索结果作为中心网格点的值代换原值。依次按行按列扫描全图，同时代换中心点的值，便得到新的网格图，每一点的值代表这一点周围一定搜索半径内的事件数。例如：犯罪出现的次数，井点的数目，个体户数等(图 6.52)。

27. 层间叠合运算

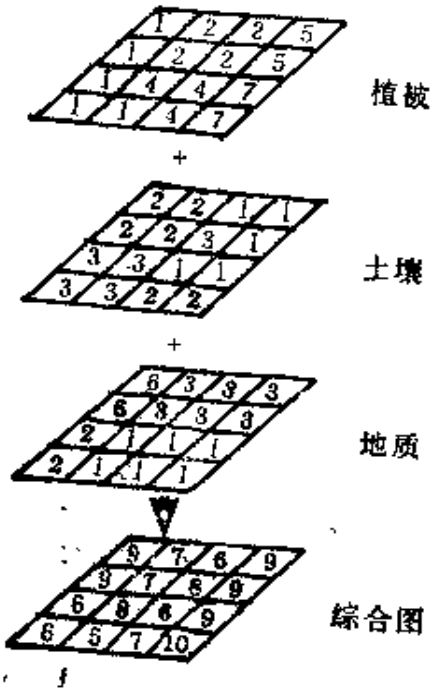


图 6.53　层间叠合运算

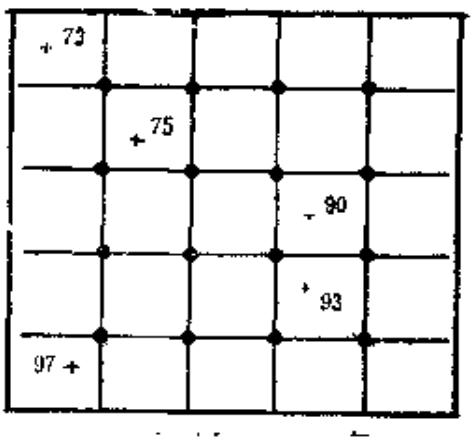


图 6.54　数字高程模型

在网格数据条件下，除了类似于拓扑叠加功能(18)和区域提取功能(20)，还可实现各层对应网格元素间的数学运算。各层叠加时，新图层的属性值可以是各层对应网格点的属性值相加减或乘除（除数中不出现0)等，也可以是对各层数据加入不同的权重进行数学运算(图 6.53)。

数字地形模型是地理信息系统中常用的数据，特别对于研究自然资源与环境时更是不可缺少的信息源，因此，数字地形模型的自动生成便是重要的功能之一，主要有以下几项：（详见 §7.1)

28. 数字高程模型

根据离散高程点进行内插计算，是得到各网格交点的高程数值的方法之一，这种网格结构的高程数据称为数字高程模型(DEM)（图 6.54)。

29. 等高线生成

利用离散高程点作拟合运算，得到一系列等高线，生成地形图。

30. 坡度和坡向

由数字高程模型各点的高程与它们邻点高程相比较，可以求出每一点的坡度和坡向。

31. 计算流域

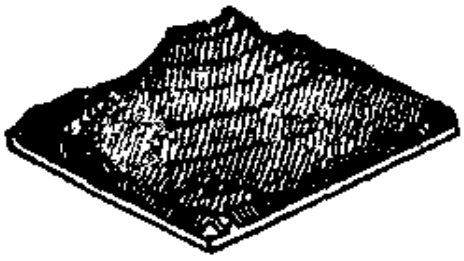


图 6.55　三维立体图

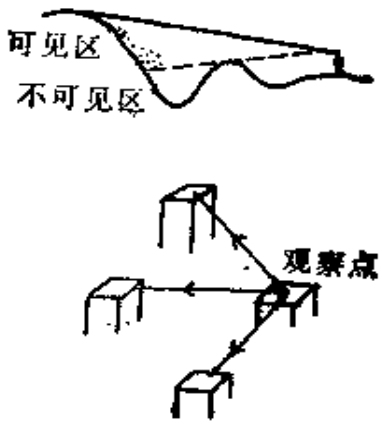


图 6 56　可视范围

通过数字高程模型计算，找到流域边界。相似方法也可以找到地形沟谷、排水系流等。

32. 剖面分析

按照指定直线或折线形状的剖面线分析高程的变化。

33. 三维立体图

从某一指定方向观察地形，输入俯视角，方位角和高度参数，可以得到不同的透视图。 这种通过数字高程模型得到的三维立体地形图，可以直观地看到地形的变化，加强视觉分析效果（图6.55）。

34. 可视范围

以数字高程模型为基础，可以找到在某一点对邻近地区的可视范围。 通过高度差计算出视线可以达到的网格点，并画出可视图（图6.56），进而可以计算面积等。

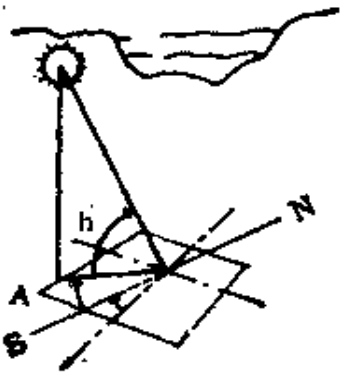


图6.57 太阳强度

35. 太阳辐射强度

利用太阳入射方向和坡度、坡向可以求出各点接收的太阳辐射强度(图 6.57)。

为了加强 GIS 在显示和输出上的效果，还应该具备一些辅助功能：

36. 删除细碎部分

在完成多边形的叠加以后，由于原多边形之间位置不能精确重叠，而造成新生成一些细小的多边形，这些小区会被误认为是一些特殊的类别，因此需要删除。 删除时可以规定一个删除面积阈值，比这个值小的面积区域两条边界合并而消失(图 6.58)。

37. 图幅控制点

为了保证图件(层)之间拓扑叠加或其它空间操作时位置匹配

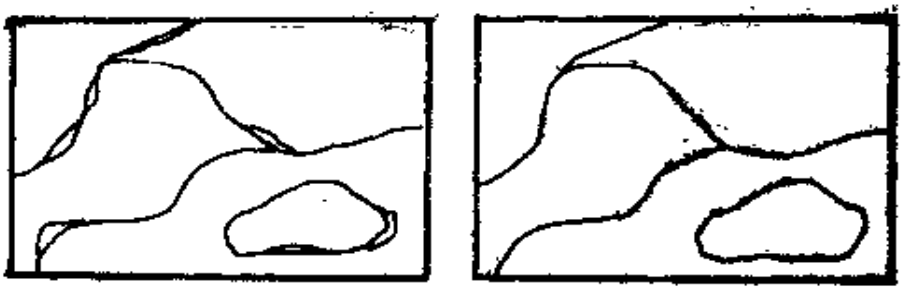


图 6.58　删除细碎部分　左：删除前　右：删除后

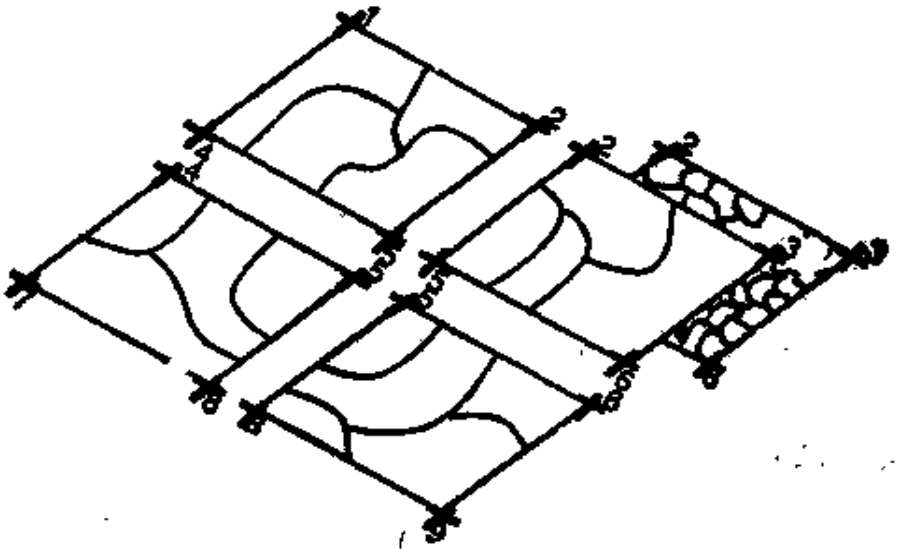


图 6.59　控制点

准确；每一基本图件输入时同时记录四个控制点，它们位于全图的四角，叠加时必须保证控制点位置精确一致；镶嵌拼图时邻接图件配准必须使相应控制点重叠。如图 6.59 中的数字点为控制点。

38. 图幅的拼接和分割

相邻的几幅地图分别数字化以后，可以在系统中拼接成一幅



图 6.60　图幅分割　左：原图　中：分幅　右：结果

大的图幅，同时，在需要时也可以分割成小图，每一小图单独成为一层(图 6.60)。

39. 标号、符号和文字的添加

图幅中可以适当添加标号如高程点；符号如网线、点划线、铁路线等；文字如地名、高程值等，并可改变字体，以增加地图的可读性。

40. 输入输出多样化

多种输入输出可以大大加强系统的能力，线划图、网格图、文字表格打印、磁带磁盘以及显示器的显示浏览都是必要的形式。

一个地理信息系统可以具备以上各种功能，也可以具备其中的主要部分，功能越多，执行起来越方便，反映出系统的能力越强。

6.2.4　模型分析

随着地理信息系统技术的发展以及地理信息系统应用范围的扩大，除了前述分析功能是系统中必要的组成部分以外，模型分析也逐渐发展成为管理和分析子系统中的一个重要部分，从而加强了整个 GIS 的分析能力，使 GIS 在自然资源环境分析、评价、预测、区域规划等方面发挥其优势。包括资源统计清查、环境动态监测、地理定量分析、自然灾害预测、环境变迁预估、决策的智能判断等。例如，土地资源利用信息系统(图 6.61)[58]需要输入 19 种基础图件或称单要素图件，在此基础上生成 5 种派生图件，这些图件的

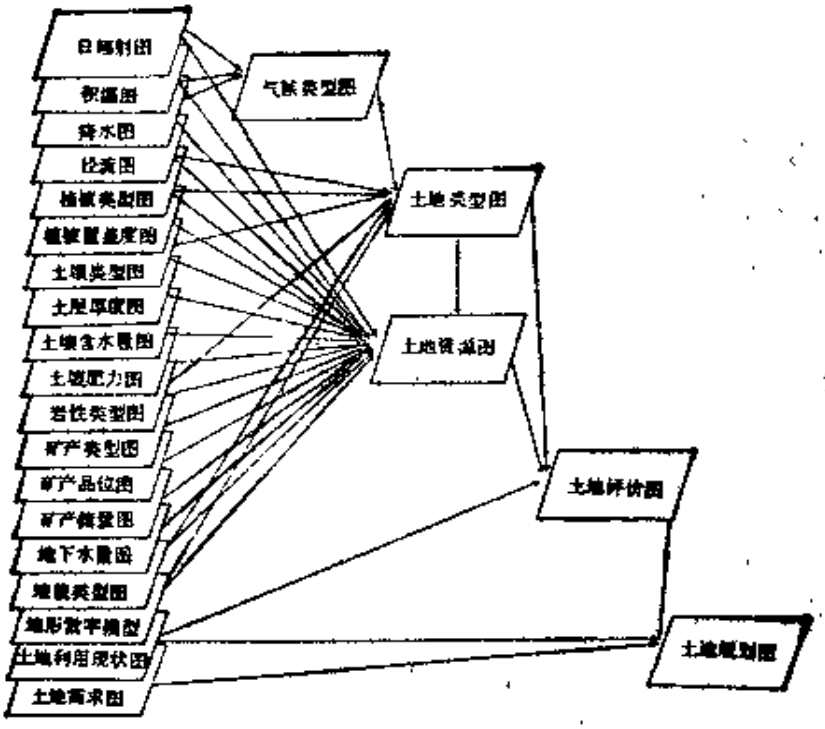


图 6.61　多个地学数学模型组成的土地资源利用信息系统

产生便是利用 GIS 技术作为手段通过地学模型实现，只要模型建立得较好，系统就会得到较为实用的结果。

由于 GIS 中的模型分析是目前正在研究的课题之一，而且涉及知识面广，如统计分析、系统工程、模糊数学、计量地理等各个方面。因此，这还是一个很不成熟的题目。另外，由于 GIS 建立的出发点和应用目的不同，常常需要建立不同的分析模型，例如土地利用规划模型、土壤侵蚀模型、作物估产模型、森林蓄积量模型、洪水预报模型、矿产勘探模型等。这些模型适用于某个地区或某个研究的问题，特别是一些复杂的区域性问题。但不能要求建立的模型都带有普遍意义。还因地学问题由定性研究发展到定量研究，尚有很多问题没有解决，能否在分析多种因素复杂的内在联系时，发挥 GIS 的优势，也在讨论研究之中。

从目前发展情况看，模型的建立主要包括二种类型：一种是

以一般计算数学方法作为建立模型的基础，根据特定研究对象的不同选定不同的参数，在统计分析模型中常用的方法有回归分析、聚类分析、判别分析、趋势面分析、主成分分析、时间序列分析、动态分析等；在规划模型问题中常用线性最优化方法及非线性最优化方法即函数极小化问题或目标规划问题。另一种是根据大量的地学要素分析、总结、归纳出的专门模型。通过模型用一些要素的值导出另一些要素，从而得出结论 。这部分又包括数学模型(或物理模型)和描述模型(或概念模型)，前者常用于 GIS，后者常用于专家系统。二者都是丰富的地学经验定量化的结晶，因而也常常具有区域性。以上实例目的在于帮助读者了解 GIS 中可使用的模型的一般形式，对于实例中所用模型本身的合理性与实用性不加评论。随着利用 GIS 进行模型分析这一课题的深入研究，必将出现更多更好的模型分析方法和子系统。

例一、水土资源合理利用规划模型[45]

这一模型的目的是针对某地区能源重化工基地确定水土资源在工农业之间的合理分配，选择合理方案，并论证煤炭和粮食的远景生产规模和合理的工农业部门结构。

选用多目标的优化问题，目标函数选择六个部门的有关变量，它们是：煤炭工业，除煤炭外其它工业，粮食、经济作物、木材、畜产品；资源约束选定四种：土地、水、劳动力、固定资产。

1.使用的主要公式是：

$$AX + Y = X \text{ 或 } (I - A)X = Y \tag{6.1}$$

式中 A $n \times n$ 投入产出系数矩阵；

Y $n \times 1$ 目标(最终需要)向量；

X $n \times 1$ 部门总产量(或产值)向量；

I $n \times n$ 单位矩阵；

解决多目标规划问题的方法之一是采用目标规划投入产出模型，其数学公式为：

$$\min Z = UD^{-} + WD^{+}$$

$$(I - A)X + D^- - D^+ = Y \qquad (6.2)$$

$$CX \leqslant R$$

$$X \geqslant 0$$

$$D \geqslant 0$$

式中：A, I, X, Y 定义与式(6.1)相同；C 是各部门产量或产值与所需资源关系的 $k \times n$ 矩阵；R 是可用资源数量的 $k \times 1$ 向量；U 和 W 分别为各目标优先因子的 $1 \times n$ 向量；D^+ 和 D^- 分别为对各目标之正、负偏差的 $n \times 1$ 向量。

2.使用的数据，主要是投入产出系数和资源分配系数，见表 6.4 和表 6.5，规定了目标优先因子(权重)矩阵 U, W。

表 6.4　2000 年投入产出系数表

消耗部门(投入) / 生产部门(产出)	粮食(万斤)	经济作物(万元)	木材(千立方米)	肉类(万斤)	煤炭(万吨)	工业(不包括煤炭工业)(万元)
粮食(万斤)	0.05	0	0	2.855538	0	0.013949
经济作物(万元)	0	0.011263	0	0	0	0.022481
木材(千立方米)	0.000006	0.000129	0	0	0.06	0.000168
肉类(万斤)	0	0	0	0	0	0.000012
煤炭(万吨)	0.000013	0.000453	0	0.000281	0.0134	0.001
工业(不包括煤炭工业)(万元)	0.025	0.02638	0.12	0.003	6	0.3

3.模型运行过程

模型运行过程是不断调整目标值和权重使之趋于合理的过程，往往选用几个方案进行比较。

4.结果

通过模型运算，得出六个部门的合理产量(值)规模，即 X 值，计算出五组 X 值，经过对五种方案比较得出合理方案如表 6.6，也可绘出线划比较图。

表 6.5　2000年资源分配系数表

	粮 I (万斤)	粮 II (万斤)	经 I (万元)	经 II (万元)
平原水浇地(万亩)	0.00125	0	0.005	0
平原旱地、坡地				
梯田(万亩)	0	0.0025	0	0.0125
林地(万亩)	0	0	0	0
草地(万亩)	0	0	0	0
水资源(万立方米)	0.3	0	1.2	0
劳动力(万人)	0.000227	0.000227	0.00065	0.00065
固定资产(万元)	0.177	0.177	1.4494	1.4494

	木　材 (千立方米)	肉　类 (万斤)	煤　炭 (万吨)	工业(不包括煤炭工业)(万元)
平原水浇地(万亩)	0	0	0.0003	0.000106
平原旱地、坡地				
梯田(万亩)	0	0	0.0003	0.000045
林地(万亩)	4.64	0	0	0
草地(万亩)	0	0.0256	0	0
水资源(万立方米)	55	0.3	1	0.044
劳动力(万人)	0.01538	0.00041	0.00183	0.000066
固定资产(万元)	30.879	1.096	78	0.666

表6.6　不同方案六个目标的远景规模和资源利用情况(以方案 I 为100)

	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV	方案 V
原煤	100	110	116	126	133
工业(不包括煤炭工业)	100	98.5	97.2	92.6	88.8
粮食	100	100	100	100	100
经济作物	100	97	95	95	95
木材	100	117	128	144	152
牧业	100	100	100	100	100
资源利用情况	100	99.6	99.2	97.8	96.6
非农业用地	100	98	96.8	96.3	96.7
平原水浇地	100	101	102	103	104
平原旱地、梯田、坡耕地	100	116	127	143	151
林地	100	100	100	100	100
牧地	100	100	100	100	100
水资源	100	100	100	99	98
劳动力	100	102	104	106	107
新增固定资产					

以上介绍了模型分析的框架及其输入输出的主要数据，这个例子代表了一种类型，类似的例子很多，如线性规划方法用于经济系统优化模型。还有聚类分析、回归分析用于农业区划、农作物单产与环境关系等等。这类模型分析的特点在于没有使用数据的空间特性，主要使用表格统计数据，也就是只与关系数据库有关。通过数学计算输出的是表格数据和曲线图，可以用打印机输出硬拷贝。

例二、黄土运载模型[46]

黄土高原地区面临土壤侵蚀的严重威胁，建立黄土运载模型的目的是预测土壤侵蚀的平均速度，评价和分析土地利用现状，为黄土地区土壤侵蚀的监测与管理，评价与规划提供科学依据。

1.公式

$$PSL = K \cdot C \cdot LS \cdot R \cdot P \cdot DR \qquad (6.3)$$

式中：K:为土壤侵蚀因子；C 为覆盖因子；LS 为长度坡度因子；R 为雨量因子；P 为实践因子；DR 为传递比率；PSL 是计算得到的潜在的沉积物运载量。

2.数据

主要使用数据为遥感 TM 图象，彩红外航空影象及 1:1 万比例尺的地形图、土地利用和土壤侵蚀图。利用 TM 影象进行计算机分类，经过一系列过程得到耕地、林地果园、草地和居民地四大类的分类结果；利用彩红外航空像片和野外调查，可以得到解释结果作为分类结果的比较以及得到土壤侵蚀类型图；利用地形图可以数字化得到数字地形模型，进而导出一系列派生结果。

3.计算

所有的计算均为逐个网格点(对应于地面 15×15 米)扫描完成。

图6.62说明了得到K因子的框图，由各点的平均坡度、沟谷密度和土壤侵蚀强度等级计算出各点的K因子。

对于耕地区域内各点，通过耕地和最近沟谷线的高差和最近下坡距离求 DR。

LS 由各点坡度和网格长度逐点求出。

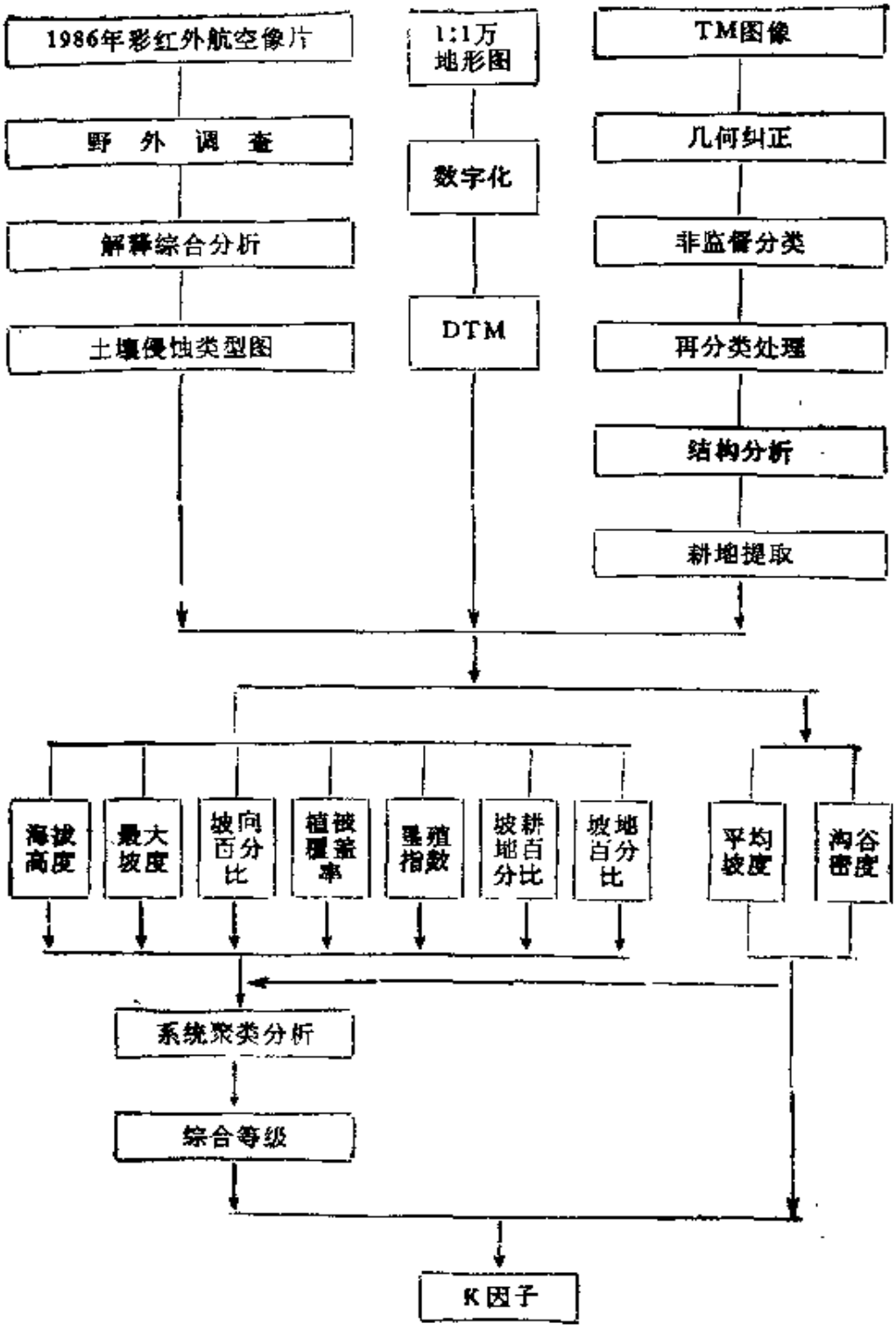


图 6.62 K因子获取基本框图

由分类得到的不同土地利用得到不同的 C,P 和 R 为常数（以上计算过程从略）。

最后由式(6.3)求出 PSL。

4.结果及应用

对于侯沟门流域作实验，将计算结果取平均后作一统计列于下表（表6.7),以大于 PSL 平均值和大于坡度 25°作为退耕面积的比较,可以对黄土地区的合理利用以及耕地的控制和管理提供新的依据,并可以进一步作动态分析,推算退耕后土壤侵蚀的变化。

表 6.7 分级比较

土壤侵蚀类型	大于 PSL 平均值的耕地面积（公里²）	小于 PSL 平均值的耕地面积（公里²）	大于 25° 的耕地面积（公里²）	小于 25° 的耕地面积（公里²）
鳞片状侵蚀类型	0.0138	0.0932	0.0591	0.0480
面状侵蚀类型	0.3360	0.8826	0.7187	0.4999
浅沟侵蚀类型	0.1707	0.3092	0.3097	0.1703
切沟侵蚀类型	0.8611	0.6347	1.2967	0.1991

本例是以地理信息系统作为支持,采用遥感信息作为信息源,以模型分析为主的研究。所有数据都逐个网格计算，利用地图单元的空间特征,这种模型发挥了 GIS 的优势，在整个区域空间搜索运算,快速完成。如果没有 GIS,每个点逐个输入逐个运算则要困难得多,也不可能用图象显示其中间结果。 而且也不可能做到各种地图单元空间配准。 因此这是一个利用地理信息系统特点,使用网格数据,完成模型分析的实例。

例三、在地理信息系统中建立模型库子系统[184]

前二例均为模型与属性数据关联或模型与空间数据库关联,解决问题的针对性很强也较单一。为了加强地理信息系统的实用性,增加解决问题的宽度和广度,地理信息系统中的模型开始向建立模型库子系统方向发展，模型库中存有多个模型，便于用户查询、检索,还可构造新模型，并具有管理和维护功能。模型库子系

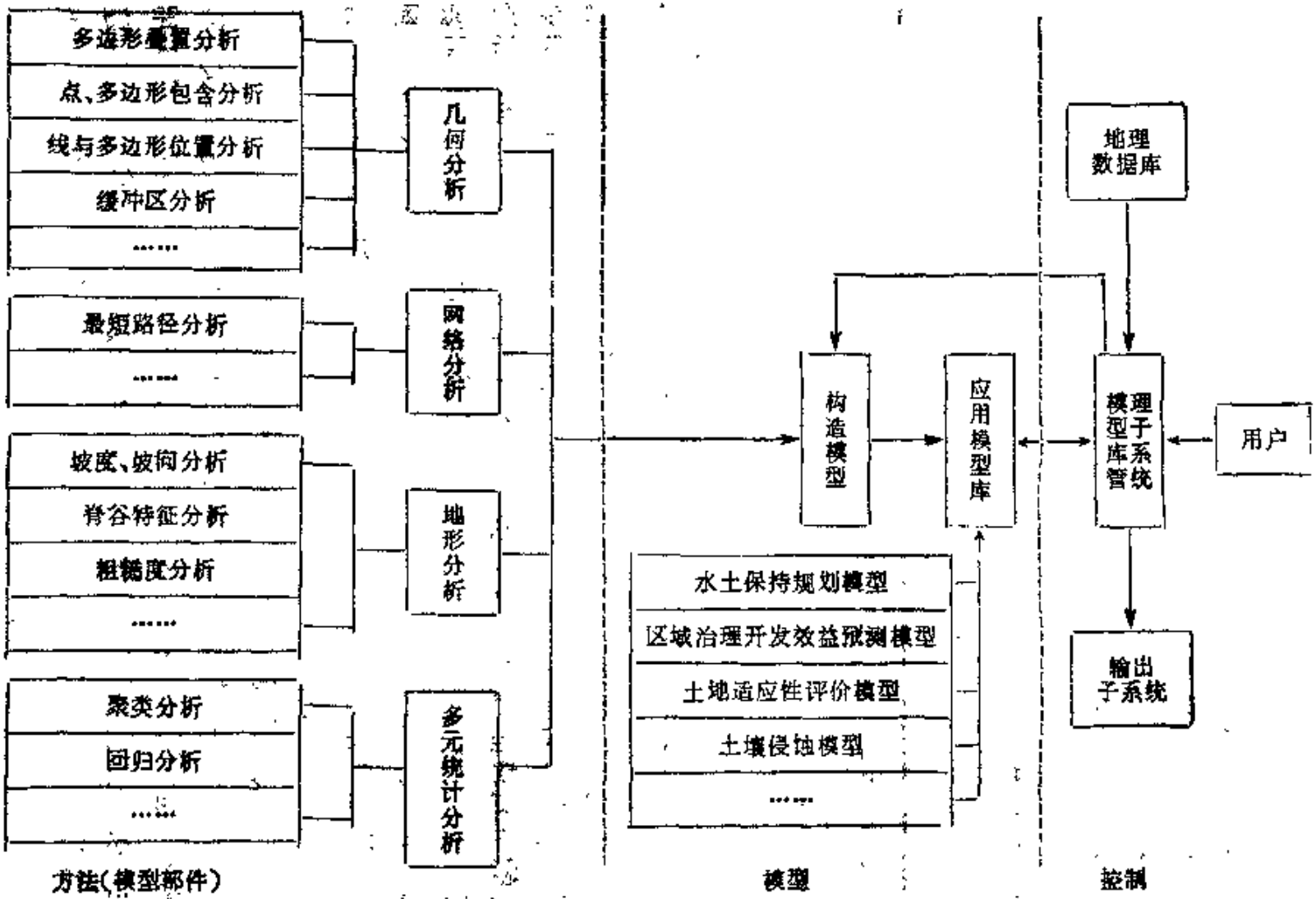


图 6.63　黄土高原三川河流域区域治理与开发信息系统模型库子系统结构

统可以实现模型库与数据库的通讯，达到模型共享，应用方便的目的。建立模型库子系统使地理信息系统的应用价值进一步提高。

以黄土高原三川河流域区域治理与开发信息系统中模型库子系统为例：

1.结构

这一子系统的构成见图6.63，除了友好的用户界面外，主要包括方法库，应用模型库和模型库管理系统。

方法库又可称作模型部件库，它由地理信息系统中所具有的分析功能组成，例如几何分析、网络分析、地形分析、多元统计分析等。选择其中的一种或几种方法可以作为构造新模型的基础。这部分内容如果在系统中已经存在，就不必重新装入，只要方便调用即可。

应用模型库是整个系统建立时已调试过的应用模型，在系统应用过程中新构造的模型也放在这一部分。

模型库管理类似于数据库的管理功能，它还可以删改模型，如有不合适之处，可以重新构造模型或改变某些参数等。

模型计算所用数据可从数据库调入，计算结果可以从输出子系统输出。

2.应用模型库

建库时已装有四个模型：水土保持规划模型；治理开发效益预测模型；土地适宜性评价模型；土壤侵蚀模型。

水土保持规划模型和区域治理开发效益预测模型在数学基础上类似于例一，均以多目标线性规划为计算方法，改变变量内容和约束条件，加入专家经验，实现2000年的县级或乡级小流域的土地利用规划和全三川河流域最佳效益预测。

土地适宜性评价模型和土壤侵蚀模型运用了多种专题数据和地形数据的叠置运算建立模型，与例二有相似之处。表6.8是县级土地适宜性评价因素的指标体系，按照在这一标准中每一网格点中各层数据的类别综合确定评价的级别。土壤侵蚀模型则是利用公式

$$W = K^{\alpha_1} \cdot C^{\alpha_2} \cdot H^{\alpha_3} \cdot P^{\alpha_4} \cdot D_g^{\alpha_5} \cdot S^{\alpha_6} \cdot R^{\alpha_7}$$

其中，K 为与土壤抗侵蚀能力有关的参数；C 为水保措施因子；H 为半径流深（mm）；P 为植被覆盖度；D_g 为沟谷密度（km/km²）；S 为坡度；R 为汛期降雨量（mm）；W 为最后计算出的年侵蚀模数（$T/km^2 \cdot$ 年）$\alpha_1 \sim \alpha_7$ 根据实测资料用岭迹法作正交回归分析得到，区域不同系数有所不同。这二种

模型都是根据输入系统的专题图集经过对应网格点用模型计算得到结果图形，可以在屏幕上显示图形结果，或从输出系统中绘图输出。

表 6.8　土地适宜性评价因素指标

评价因素＼级别	一	二	三	四	五	六
坡度(度)	<3	3～8	8～15	15～25	25～35	>35
海拔(米)	<1000			<1400		
土壤肥力	高	较高	中等	中下等	低	
土壤质地	中壤	轻壤	重砂壤	粘土砂质	砾质砂质	
水源保证	高保证	较高保证	一般保证	无保证	无保证	
土壤侵蚀	微弱	较弱	中度	强度	高强度	
灾害频率	低	较低	一般	较高	高	
耕层厚度(厘米)	>80	>60	>40	>30	<20	

总之，本例与前二例的不同之处，主要是将模型分析系统化，作为整个 GIS 的一个子系统处理，不只是针对某一地区或某一专题，带有较普遍意义。另外，本系统使用空间数据时，可以接收矢量结构的数据，便于用数字化仪手扶跟踪输入数据，也接收网格数据，最后可用网格形式作专题图和地形数据的叠置运算；本系统还实现了模型运算结果的成图和绘图输出，有利于评价分析结果和扩大系统的应用面，更便于系统的推广。

以上三例各有其特点，从不同侧面介绍了模型分析的作用和方法。总的来源，三个例子是层层递进，一例比一例更有利于 GIS 优越性的发挥，研究更加深入。随着今后 GIS 模型分析的发展，它们的应用也将越来越广泛，手段越来越灵活和全面，并不断成熟。

第七章　地理信息系统数据源的几个问题

每个 GIS 应用系统由于其应用目的和范围不同，所用数据内容、形式都不相同。如果选择得当，将有利于系统的存贮、管理、分析并提高系统效益，因此数据问题十分重要，有必要作进一步的讨论。

本章仅就基础数据与派生数据问题讨论 GIS 常用的数字地形模型的生成；就数据的综合运用谈谈遥感信息源问题；最后简单介绍 GIS 数据的标准化和规范化任务。至于个别系统建立中涉及到的各种各样的数据源问题，将在地学具体领域内解决。

§7.1　数字地形模型

7.1.1　意义

一、定义

数字地形模型（Digital Terrain Model）简称 DTM，是在空间数据库中存贮并管理的空间地形数据集合的通称*。是带有空间位置特征和地形属性特征的数字描述。可以认为，数字地形模型是建立不同层次的资源与环境信息系统不可缺少的组成部分。（资源与环境信息系统是我国对地理信息系统的常用称呼，其含义是一致的。）在信息系统分析和评价空间信息并以此为依据进行规划和决策时，十分注重地表属性的三维特征，诸如高程、坡度、坡向等重要的地貌要素，并使这些要素成为地学分析和生产应用

* DTM 也有翻译为数字地面模型或数字区域模型。一些人认为模型除了地形因子外，还应考虑在模型中包含土壤属性等非地形因子，但目前多认为仅包括地形因子，为避免混淆，本书采用名称"数字地形模型"。

中的基础数据或遥感数据分析中的辅助信息，可以广泛地应用在多种领域，如农、林、牧、水利、交通、军事领域，象公路铁路输电线的选线、水利工程的选址、军事制高点的地形选择，土壤侵蚀、土地类型的分析等，也可以应用于测绘、制图、遥感领域。由于 DTM 如此重要，因而 DTM 的生成已成为 GIS 数据源研究的课题之一。

在数字地形模型中可包含的要素很多，常用到的有：高程、等高线、平均高程、极值高程、最大高差、相对高程、高程变异、坡度、坡向、坡度变化率、地面形态、地表粗糙度、地形剖面、脊谷线、流域、沟谷密度、沟谷深度、以及太阳辐射强度、观察可视面、三维立体观察等，可以根据需要选择。

二、基础数据和派生数据

DTM 中属性为高程的要素叫数字高程模型（Digital Elevation Model）简称 DEM。一般情况下是指以网格组织的某一区域地面高程数据，网格点对应的地面距离为地面分辨率，或用采样点密度表示，它取决于实际地貌破碎程度和对数据的精度要求。显然，地貌破碎程度越高及精度要求越高，采样点密度越大。DEM 是建立 DTM 的"基础数据"或称为单要素图，在 GIS 中可以表示成一个层面或基本图件，其它要素均可以从 DEM 数据直接或间接导出，因此称为"派生数据"。一些派生数据如：平均高程、极值高程等是指计算出的数值；三维立体观察、地形剖面等是利用显示效果观察地貌，而大部分派生数据如相对高程、坡度、坡向等仍是系统数据库中存贮的一个层面或基本图件。这些层面都是位置配准的，将它们与其它属性的层面叠置可以完成多种资源与环境分析。

如果将 DTM 的多层面贮存于空间及属性数据库中，所占存贮空间相当可观，以黄土高原重点产沙区为例，有关专家认为，为表述该地区地貌细部，若用网格点采样读取高程，每平方公里至少400 点，也就是说网格点的地面距离不应大于 50m。以这样一个标准，计算山西省柳林县（约 1283km² 面积）DEM 的存贮量，选取

网格大小为 50 × 50m，存贮网格文件为矩形，矩形的长和宽分别等于柳林县南北最长距离和东西最长距离，县界以外的高程点取零，县界以内高程点保留，得到网格文件大小为 1080 × 836，即 902,880 个网格点，如果一个点需 2 字节，总共约需 1.8 兆字节的存贮量，这只是 DEM 一个层面。将高层数据派生出其它地形要素，假设生成另外四个层面，同原 DEM 一起，就需要约 9 兆字节。若存贮十个县的数据将需 90 兆字节。可见，需要的磁盘空间太多，这是一种资源浪费。因此，地理信息系统进入数据库的数据需要筛选。原则上，只存贮基础数据，不存贮派生数据。在需要的时候，通过计算生成派生数据。对于 DTM，只输入和存贮数字高程模型 DEM，保证其精度符合要求，其它派生要素的精度就可以得到保证了。

7.1.2 数字地形模型的生成

一、高程数据的获取

为了建立 DEM，必须获取高程数据并送入计算机贮存。获取方法主要分人工和半自动化二类。

1. 人工量取　这是早期的方法，在人力充足而硬设备不够的

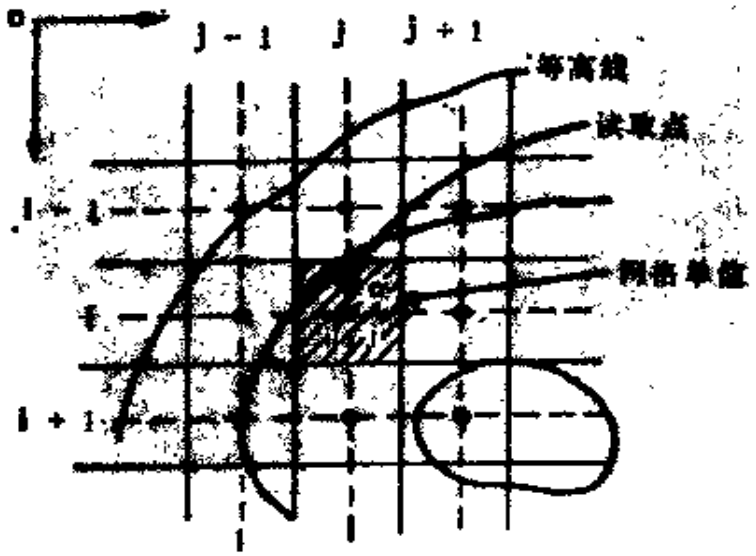


图7.1　读取网格高程点

前提下可以采用。方法是用方格网板或薄膜覆盖在地形图上逐点量读数字高程，采样点密度事先确定，所得数据再由操作员键入计算机。这种作法受作业员的技术熟练程度和疲劳程度影响较大，但对设备要求低。图 7.1 为读取网格高程示意图，图中虚线表示覆盖的方格，交点之处为读取数值的点，实线表示 DEM 的网格单位，每格所对应的区域其大小表示分辨率，也就是网格区域内的高程值用区域中心点的高程表示，如 $h(i,j) = h_{ij}$。网格单位有时简称网格点，在显示时又可称为象元点(图 7.2)。

2. 手扶跟踪　手扶数字化仪逐条跟踪地形图首曲线，再用内



图 7.2　DEM 实例显示图

(高程值域大，图象亮度值越高，反之越低。显示时将高程值按比例压缩到0～255，成为8-bit 灰度值)

插方法计算网格高程。这种方法人工的工作量也相当大。

3. 数字测图　利用航空像片对的立体特性，使用专门设备直接从航空像对上自动记录高程点，形成 DEM 数据磁带文件。这种方法要求专门的设备，如：数字解析测图仪，是在人工导引下由仪器自动记录，属于半自动方法。

4. 扫描输入　重新转绘地形图，去掉注记，并对新转绘的地形图扫描，输入等高线，然后经过：(1)细化等高线；(2)给等高线赋予高程值；(3)插值计算网格高程值形成 DEM。这是半自动方法[48]。

经验证明，高程精度与样点密度线性相关，而与样点分布和计算所用数字模型几乎无关 。

以下介绍由数字高程模型计算其它地形要素的主要方法，有些方法不是唯一方法。

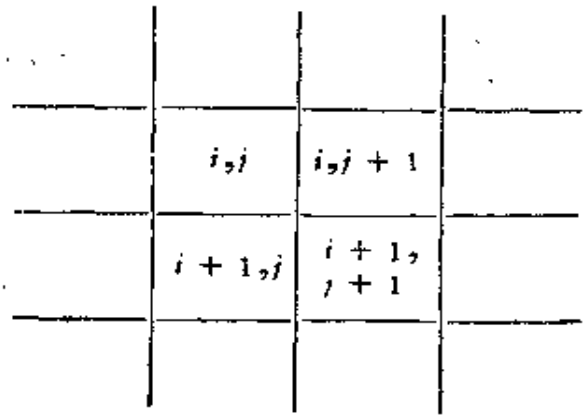


图 7.3　窗口

二、平均高程

这里所指为局部平均高程，与图象处理时计算平均灰度值的原理相同。取一窗口 ($2 \times 2, 3 \times 3, 5 \times 5 \cdots$)自上而下，自左至右扫描全图，则中心点 (i, j) 的高程值 $h(i, j)$ 用平均高程值 $\bar{h}(i,j)$ 代换，以 2×2 的窗口为例(图 7.3)：

$$\bar{h}(i,j) = \frac{1}{4}\sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1} h(k,l) \qquad (7.1)$$

窗口为 3×3 时 $k = i-1, i+1$，$l = j-1, j+1$，系数由 1/4 改成 1/9。窗口为 5×5 时，$k = i-2, i+2$，$l = j-2, j+2$ 系数由 1/4 改成 1/25，…依此类推。这里的网格（相当图象中的象元点）高程值 $h(k,l)$ 是第 (k,l) 网格中心点处的高程。

三、相对高程

取同样窗口，窗口内各点与中心点对应的参考点高程之差的平均值定义为中心点 (i,j) 的相对高程 $h_R(i,j)$，以 2 × 2 的窗口为例：

$$h_R(i,j)=\frac{1}{4}\sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1}[h(k,l)-h_r(k,l)] \tag{7.2}$$

其中，$h_r(k,l)$ 为 (k,l) 的参考点高程，根据该区地形特点可以指定某一特别的高程点作为全区统一的参考点，也可选择某点所在的行方向或列方向的最低点高程作为该点的参考点高程。改变窗口大小时算法不变。以后介绍的算法都以 2 × 2 为例，其它类推，不再说明。

四、高程变异

设网格点 (i,j) 的标准差为

$$s(i,j)=\left[\frac{1}{4}\sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1}(h(k,l)-\bar{h}(i,j)^2\right]^{1/2} \tag{7.3}$$

$\bar{h}(i,j)$ 为平均高程，则高程变异定义为该点的标准差与平均高程的比值，即

$$v(i,j)=\frac{s(i,j)}{\bar{h}(j,i)} \tag{7.4}$$

从式中可以看出，高程变异反映了在邻域范围内高程在其平均值上下偏离的幅度。

五、高差

邻域范围内，最高值和最低值之差叫做高差。即(i,j)点高差为

$$\Delta h(i,j)=\max_{\substack{k=i,i+1\\l=j,j+1}}(h(k,l))-\min_{\substack{k=i,i+1\\l=j,j+1}}(h(k,l)) \tag{7.5}$$

高差反映了在邻域内最大的高程变化值。

六、坡度

求坡度的算法较多，这里介绍三种：

1. 最大坡度与平均坡度

在 3 × 3 的邻域窗口内，中心点 (i,j) 有八个邻域点，高程设为 h_m，$(m=1,2,\cdots 8)$ 如图 7.4(a) 所示奇数 1,3,5,7 为行、列方向邻点，偶数 2,4,6,8 为对角线方向邻点。在每一邻域方向上，坡度角 $\alpha^m_{i,j}$ 为

$$\alpha^m_{i,j}=\operatorname{arctg}\frac{|h(i,j)-h_m|}{L_m}\qquad m=1,2,\cdots 8 \tag{7.6}$$

这里，L_m 为中心网格与相邻网格中心点间距离、在对角线方向上这个距离是行列方向上该距离的$\sqrt{2}$倍。(i,j) 点最大坡度为

$$\alpha^{max}_{i,j}=\max_m(\alpha^m_{i,j}) \tag{7.7}$$

平均坡度为

$$\alpha^{ave}_{i,j}=\frac{1}{8}\sum_{m=1}^{8}\alpha^m_{i,j} \tag{7.8}$$

公式(7.7)和(7.8)计算方法简单，但较粗略。

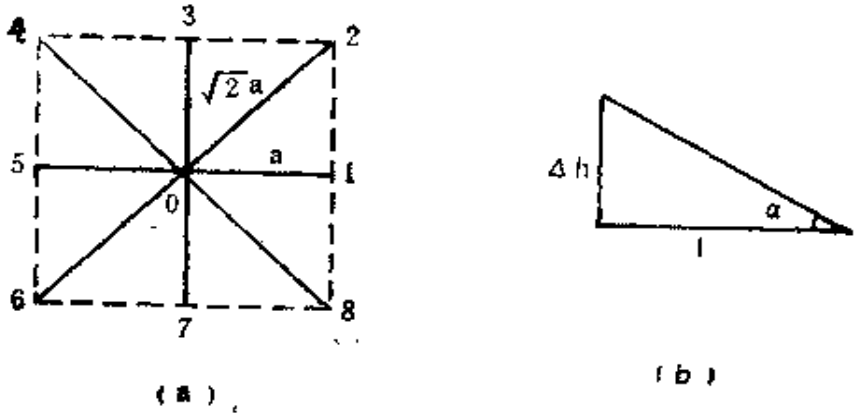


图 7.4　邻域与坡度角

2. 拟合面求坡度

在邻域范围内，以 x 为行增加方向，y 为列增加方向，z 为高程，按最小二乘法拟合平面式

$$z=ax+by+c \tag{7.9}$$

可以通过邻域内各点的行列值 x、y，求出拟合平面表达式系数

a,b,c。这个平面与水平面（$z=0$）的夹角，也就是坡度角，可以用公式

$$\alpha = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{a^2+b^2+1}}\right) \tag{7.10}$$

计算。由于按平面拟合，窗口取 2×2 为好，否则将增大拟合误差。拟合时，窗口从上至下，从左至右扫描一遍。

3. 坡度比平均方法求坡度

这种方法不直接求出坡度角，而只是求出坡度比，在相邻的八个方向上坡度比为

$$S_{i,j}^{m} = \frac{h(i,j)-h_m}{L_m} \qquad m=1,2,\cdots 8 \tag{7.11}$$

h_m, L_m 的意义与前面相同。这样，坡度 s 定义如下：

$$s = C_1\left(\frac{s_0}{4}\right)^{1/2} + C_2\left(\frac{s_e}{4}\right)^{1/2} \tag{7.12}$$

式中，s_0 是对角线邻点坡度比的平方和，s_e 是行列方向邻点坡度比的平方和，C_1 与 C_2 为权重系数。一般认为，行列方向邻点距中心点比对角线方向邻点距中心点近，对坡度值贡献稍大，因此 C_1 取作 0.43，C_2 取作 0.57。也可以根据地形情况自行设定权重系数。由于除以 4 再开方，并设权重系数，实际是一种平均求法，只是考虑到了各个方向对坡度贡献的差异。用坡度比代替坡度角减少了反三角函数计算，坡度比变化关系与坡度角变化关系是一致的。

七、坡向

在以式(7.9)作拟合平面时，其法线在水平面上投影线的方位角，即与 x 方向的夹角，可定义为窗口中心网格点的坡向：

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{a}\right) \tag{7.13}$$

如果用其它方法，例如求最大坡度，则最大坡度方向的方位角

可以定义为坡向。

八、地表粗糙度

为了衡量某一面积内地势起伏变化的程度，设置地表粗糙度这一计算量，定义某一范围内实际表面面积与投影面积之比 $R = A_{实}/A_{投}$ 为粗糙度。

若以(7.9)式作平面拟合，那末，地表粗糙度 R 可以计算为

$$R = \sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1}(A_{k,l}\cdot \sec\alpha_{k,l}) \Big/ \sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1}A_{k,l} \qquad (7.14)$$

$\alpha_{k,l}$ 为 (k,l) 点的坡度角，$A_{k,l}$ 为象元 (k,l) 点对应的地面面积。一般地 $A_{k,l}$ 大小相同，那末：

$$R = \frac{1}{4}\sum_{l=j}^{j+1}\sum_{k=i}^{i+1}\sec\alpha_{k,l}$$

式(7.14)的计算是最简单的平面拟合，如果拟合面为高次多项式或其它曲面，表面则需利用积分运算求表面积，结果也会准确得多。

九、地形描绘——沟谷，山脊特征及坡面凸凹的计算

这里介绍一种较为复杂的地形描绘方法，目的在于从数字高程模型派生出其它如沟谷、山脊、坡面凸凹等特征，前面所用的平面拟合的方法由于过于粗糙而不再适用，这里采用曲面拟合*，然后用数学方法分析拟合后的图象，对图象中的每个网格单元进行地形分类，得到山峰、盆地、山脊、沟谷、鞍面、平面、坡面等地形类别。还可以进一步区分出坡面中的拐点、斜坡、凸坡、凹坡、鞍形坡面等子类别。这些方法是由公式求出，与前面相同，是使用理想的数学模型。而实际上地形复杂，常常与理想情况偏离，不可能全用数学公式概括，因此获得的结果只是近似的。为了接近实际，有时需要做一些试验和修正，如拟合参数的选择、断点的修补等，使方

* 关于拟合曲面存在性和收敛性等数学原理及证明可以参考有关数学书籍。

法不断完善。

1. 曲面拟合

数字高程模型用离散的网格点对高程采样，是把自然界连续的地形起伏离散化，造成数学分析上的困难。因此，在用高程数据作地形分类之前，必须对网格的离散高程值用某种函数拟合，使高程值近似符合连续函数的变化规律。所选用的拟合函数可视地形不同而不同，如：平面函数、斜面函数、二维三次多项式、广义样条、离散余弦变换等多种，其中以二维三次多项式较为多用。但是，让大面积的高程变化符合多项式的变化规律是不可能的，因此，采用分面的办法，开一小窗口，使窗口内的区域高程变化规律符合某个多项式，找到多项式系数，然后，用扫描方法移动窗口，在移动过程中，每移动一个网格点，计算一次相应的系数。这样，窗口中心点的特征便由该窗口的拟合多项式决定。

多项式的近似拟合利用最小二乘法在窗口小分面内进行，令 $f(x,y)$ 为行和列方向上的拟合三次多项式，f 代表高程值，x,y 分别代表行与列数，则：

$$f(x,y) = C_1 + C_2x + C_3y + C_4x^2 + C_5xy + C_6y^2 + C_7x^3 + C_8x^2y + C_9xy^2 + C_{10}y^3 \quad (7.15)$$

为了求出式中十个系数，至少需要十个点的数据，由此，窗口多取 5 × 5 大小，也可以继续增大至 7 × 7，9 × 9 等。但窗口过大，对于起伏大的地形不易拟合，反而影响了精度，也增加了计算量。4 × 4 的窗口因中心象元左右上下不对称，也很少使用。窗口到底取多大最为适宜，还要看具体地区的地形特征与多项式变化的接近程度，在试验中确定。

2. 地形描绘的基础[77]

要想用数学方法求出地形的峰、谷、脊、坡等特征，实际上就是寻找数学曲面上的极值点、极值线及拐点等特殊位置，这些点和线的位置判断又是和函数的一阶和二阶导数分不开。对于一个曲

面，其二维特征决定了一阶和二阶导数随方向不同而不同，例如求山脊线，在山脊线位置正是高度较大的位置，山脊线两侧邻点高度降低，所以求最大极值点一定是垂直于山脊线方向，而不能沿山脊线方向。对于山脊处，必须是垂直于山脊线方向梯度为零，所以地形描绘与方向密切相关。

设 α 为方向角，定义为从向下的列方向(南点)作为起点逆时针度量，这是为了保持坐标系原点在图的左上角且 x 方向向下。那么，在 α 方向上的一阶导数定义为：

$$f'_\alpha(x,y)=\frac{\partial f(x,y)}{\partial x}\cdot\cos\alpha+\frac{\partial f(x,y)}{\partial y}\cdot\sin\alpha \tag{7.16}$$

二阶方向导数定义为：

$$f''_\alpha(x,y)=\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\cdot\cos^2\alpha+2\cdot\frac{\partial^2 f}{\partial x\partial y}\times\sin\alpha\cdot\cos\alpha+\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\cdot\sin^2\alpha \tag{7.17}$$

这里 f 是 $f(x,y)$ 的简写。那末，在 (x,y) 点的梯度矢量是

$$\nabla f=\frac{\partial f}{\partial x}\vec{i}+\frac{\partial f}{\partial y}\vec{j} \tag{7.18}$$

$\vec{i},\vec{j}$ 分别为 x、y 方向上的单位矢量。梯度大小为

$$|\nabla f|=\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \tag{7.19}$$

方向为：

$$\beta=\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Big/\frac{\partial f}{\partial y}\right) \tag{7.20}$$

在梯度方向上可以得到高程的最大变化率。

为了下面的叙述较为简单明了，这里再定义几个符号，令

$\vec{\omega}_1$ 表示在二阶方向导数最大值的方向上的单位矢量；

$\vec{\omega}_2$ 表示与 ω_1 垂直方向上的单位矢量；

λ_1 是 $\vec{\omega}_1$ 方向上的二阶方向导数值；

λ_2 是 $\vec{\omega}_2$ 方向上的二阶方向导数值；

$\nabla f \cdot \omega_1$ 为 $\vec{\omega}_1$ 方向上的一阶方向导数值；

$\nabla f \cdot \omega_2$ 为 $\vec{\omega}_2$ 方向上的一阶方向导数值；

"•"代表矢量的点积。

3. 山峰、盆谷、山脊，沟谷的初步描绘

山峰——如果某一点是峰点，必须从这点向各个方向搜索，其邻点的高度都比这一点低（图 7.5）。也就是说，是峰点必须梯度为零，保证是极值点。然后各个方向的二阶方向导数是负值。或者说只要二阶方向导数在最大值方向及其垂直方向都是负值就可以。所以判断某一点是山峰，只要这一点满足条件：

$$|\nabla f| = 0,\ \lambda_1 < 0,\ \lambda_2 < 0 \tag{7.21}$$

盆谷——与山峰情况正相反，盆谷点必须是从这点开始向各个方向搜索，其邻点高度都比这一点高。因此除了梯度为零的条件，还必须各方向二阶方向导数都是正值。所以判断某一点是盆谷，只要这一点满足条件：

$$|\nabla f| = 0,\ \lambda_1 > 0,\ \lambda_2 > 0 \tag{7.22}$$

山脊——山脊是一条曲线，如前所述，山脊线两侧方向邻点的高度应该比山脊线点的高度低，也就是山脊是极大值点的连线，而沿着山脊方向看去就没有什么规律，或平或升或降。所以，在垂直跨过山脊线的方向上，应该满足一阶方向导数为零和二阶方向导数为负的条件。而在沿山脊线方向就没有更多条件，因为山脊线本身可以是向上或向下弯曲的各种形状。所以判断某一点是山脊，只要满足下列条件之一即可：

$$\left.\begin{array}{ll} & |\nabla f| \neq 0,\ \lambda_1 < 0,\ \nabla f \cdot \vec{\omega}_1 = 0 \\ \text{或} & |\nabla f| \neq 0,\ \lambda_2 < 0,\ \nabla f \cdot \vec{\omega}_2 = 0 \\ \text{或} & |\nabla f| = 0,\ \lambda_2 < 0,\ \lambda_1 = 0 \end{array}\right\} \tag{7.23}$$

前二种条件是指山脊线本身在这一点弯曲的情况，梯度不为零，而

且方向与 $\vec{\omega}_1$ 或 $\vec{\omega}_2$ 垂直；第三种条件指山脊线在这一点水平，于是梯度为零，并且沿山脊线方向二阶方向导数 λ_2 是零。

沟谷 ——沟谷的情况与山脊正好相反。沟谷线两侧的邻点都应比沟谷点高，是高度为极小值点的连线。而沟谷线本身可以上下弯曲不定。所以在垂直跨过沟各谷线的方向上二阶方向导数应为正，其它条件与山脊类似。也就是，判断某一点是沟谷，只要满足下列条件之一即可：

$$\left.\begin{array}{ll} & |\nabla f| \neq 0,\ \lambda_1 > 0,\ \nabla f \cdot \vec{\omega}_1 = 0 \\ \text{或} & |\nabla f| \neq 0,\ \lambda_2 > 0,\ \nabla f \cdot \vec{\omega}_2 = 0 \\ \text{或} & |\nabla f| = 0,\ \lambda_1 > 0,\ \lambda_2 = 0 \end{array}\right\} \tag{7.24}$$

具体分析与山脊类似。

还有一种极特殊的情况，就是某一点从一个方向看是沟谷点，而从垂直方向看又是山脊点，整个形状象个马鞍形(图 7.6)，这时二个极值方向的二阶方向导数符号相反，因此满足下列条件为鞍

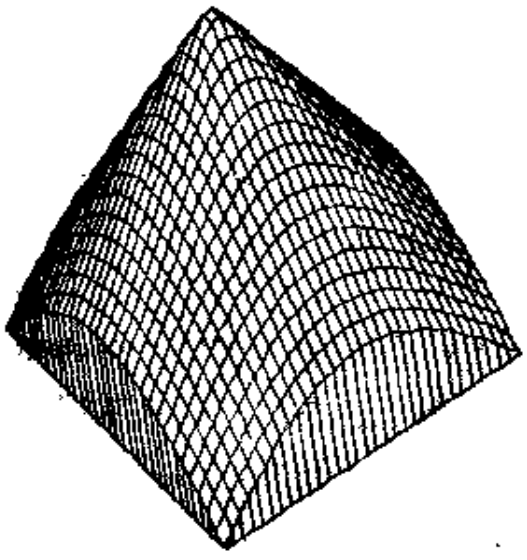


图 7.5 山峰——锥形山面示意图

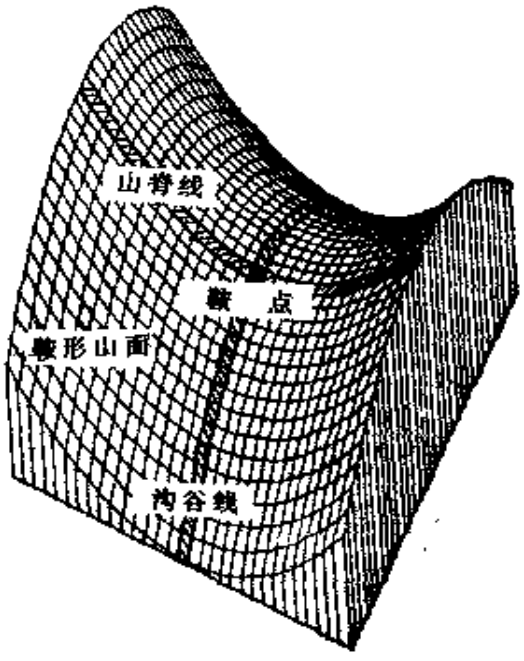


图 7.6 山脊、沟谷及鞍点——鞍形山面示意图

形点：

$$|\nabla f| = 0, \quad \lambda_1\lambda_2 < 0 \tag{7.25}$$

4. 坡面凸凹度的初步描绘

坡面凸凹度是表现坡面形态，坡面的弯曲情况分为凸面、凹面和平面三种(图 7.7)。如果在拟合曲面的中心网格点作一切平面，若切平面位于拟合曲面上方，表明该网格点为凸面点；若切平面位

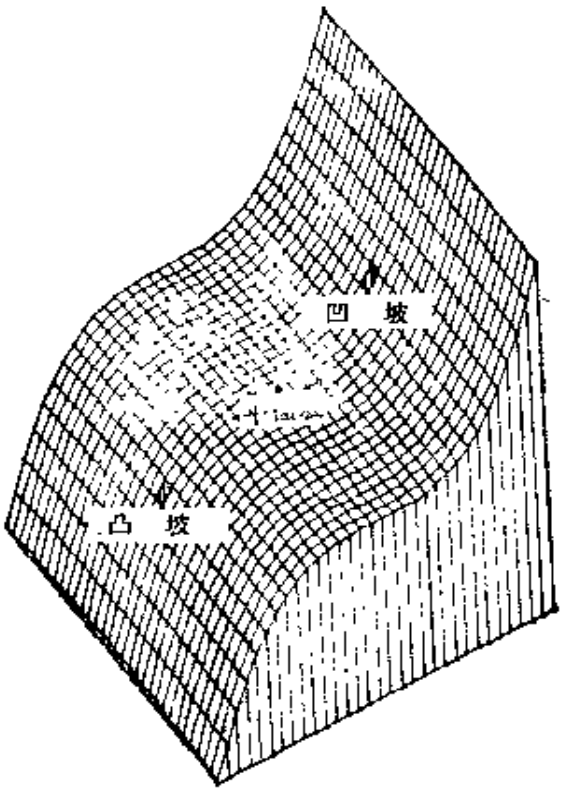


图7.7 坡面形态示意图

于拟合曲面下方，表明该网格点为凹面点；若切平面与拟合曲面重合，该点为平面点。具体判断时，仍沿用上述方法，如果不属于前面几种地形特征，就可能是平面或坡面，对于坡面，因为没有脊谷特征，所以梯度不为零，在二阶方向导数最大和最小值的方向上没有极值。总括起来，有以下四种情况，只要满足其中一个条件就应判为坡面：

$$\nabla f \cdot \vec{\omega}_1 \neq 0,\ \nabla f \cdot \vec{\omega}_2 \neq 0$$

或

$$\nabla f \cdot \vec{\omega}_1 \neq 0,\ \lambda_2 = 0$$

或

$$\nabla f \cdot \vec{\omega}_2 \neq 0,\ \lambda_1 = 0$$

或

$$|\nabla f| \neq 0, \lambda_1 = 0,\ \lambda_2 = 0 \tag{7.26}$$

对于坡面形态，可以按下列条件区分：

平面坡——$\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ (7.27)

凹坡——$\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant 0,\ \lambda_1 \neq 0$ (7.28)

凸坡——$\lambda_2 \leqslant \lambda_1 \leqslant 0,\ \lambda_2 \neq 0$ (7.29)

还有一种极特殊的坡面情况，即 $\lambda_1\lambda_2 < 0$，也就是在通过点的两个互相垂直的方向上，一个方向凸，一个方向凹，这种特殊点可称为鞍形坡面点(参考图 7.6)。

最后，对于坡度为零的特殊情况，就是平面点，显然，在平面处，高程不变化，梯度，导数均为零，即：

$$|\nabla f| = 0,\ \lambda_1 = 0,\ \lambda_2 = 0。 \tag{7.30}$$

实际在地形分类的时候，按照上述条件，逐点扫描，逐点判别，看这一点属于上述类别中的哪一种，分别赋予每个网格点一个类别标号，每个类别标号设定一个具体的地形特征，如：标号 1 为山峰，标号 2 为盆谷，标号 3 为山脊，标号 4 为沟谷，标号 5 为平面，标号 6 为平面坡……。最后，所有不属于以上各类的点分到其它类，可赋予标号 0。这种做法与图象的分类指导思想是一致的，只是数学方法不同。分类的结果使数字高程模型转变成标号图象。标号可视为灰阶值，将此图象显示在监视屏上或绘出图来时，只取标号 3 可以得到本区域的流域网，只取标号 4 可以得到由河流、小溪及沟网组成的地表水系，等等。从而得到 DEM 的不同派生图象，成为数字地形模型的一部分。

这里还要说明的是，数学模型不可能反映出真实地形的各种

复杂情况，还有很多特征没有包括进来。另外，由于曲面是离散点拟合而来，分类时仍旧按点进行，一些地形的变化会由于间隔取样而被分割，以上情况往往造成如山脊线或沟谷线间断等现象。因此完成地形分类后还应做一些修补工作，如：填补缝隙，使其连续等。这些工作可以在屏幕上用人机交互的方式解决，也可以用图象处理的方式解决，总之，尽可能使处理结果与实际情况接近，提高实用性。

十、沟谷密度

定义单位面积上的沟谷总长度为沟谷密度。用 D 表示。

$$D = L/A \tag{7.31}$$

L 为区域内沟谷总长度，A 为区域内面积。当计算沟谷密度的相对值时，L 和 A 都可以用象元个数表示，用沟谷点象元数比区域内总象元数。计算长度时可用沟谷点象元中心间的对应地面距离相加。

十一、沟谷深度

以谷点为中心，搜索邻域，找到最近的山脊点，可能同样距离的山脊点不止一个，那么山脊点高程与中心沟谷点高程差的平均值定义为沟谷深度，用 D_h 表示：

$$D_h = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(h_{ri} - h_0) \tag{7.32}$$

n 为最近山脊点数目，h_0 为中心沟谷点高程，h_{ri} 为山脊点高程。搜索也可以相反方向同时进行，找到沟谷两侧对应的二个最近的山脊点，取高程差的平均值。

搜索时的距离可以用8-邻域距离来表示，定义两点 (i,j) 和 (h,k) 间的8-邻域距离为两点间最大坐标差，记作：

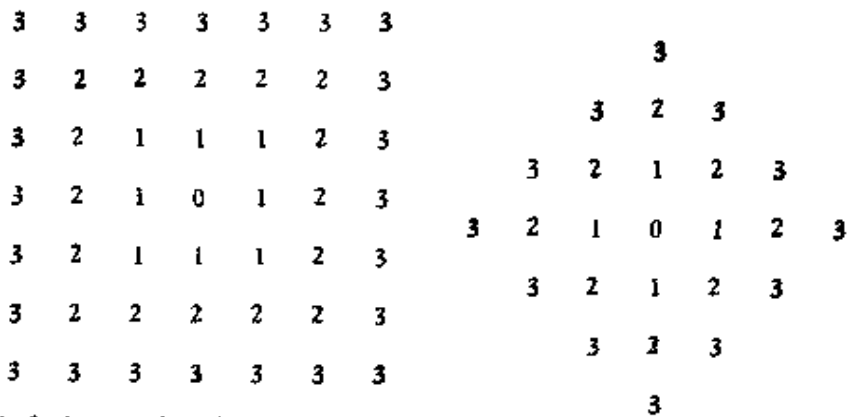
$$d_8[(i,j),(h,k)] = \max\{|i-h|,|j-k|\} \tag{7.33}$$

这个距离又可叫做“国际象棋盘”距离。也可以用4-邻域距离来

求，与前述"出租汽车"或"城市块"距离定义相同，也可以记作：

$$d_4[(i,j),(h,k)] = |i-h| + |j-k| \tag{7.34}$$

连同常用的欧几里德距离一起，见图 7.8。



(a) 8-邻域距离(国际象棋盘距离)　(b) 4-邻域距离(城市块距离)

(c) 欧几里德距离

图7.8　三种距离(0为中心点)

十二、太阳辐射

计算地面接收的太阳辐照度值可以确定太阳辐照度的分布情况，对于气候、植被等研究很有意义。这个量常常由测量而得，但为了快速找到其分布规律，可以通过计算求得接近于实际的理论值[xx]。

$$\begin{cases} E = E_{n\beta} + e_n & \text{(阳坡，有直射光)} \\ E = e_n & \text{(阴坡，无直射光)} \end{cases} \tag{7.35}$$

有直射光时的阳光辐照度为 $E_{n\beta}$，散射辐照度为 e_n 坡。在阳坡面两种辐射都有，而阴坡面则只有散射光。计算时以网格为最小计算单元，可以粗略认为在一个网格大小的地面范围内太阳辐射是

均匀的。设坡度为 α，坡向为 β（坡地方位），太阳照射时的高度角为 $h_\odot$，方位角为 $A_\odot$，垂直于太阳光线的平面上的太阳辐射为太阳常数 E_0 乘以大气透过率 T，水平面上散射光的辐照度为 e_0，则：

$$E_{\alpha\beta} = E_0 \cdot T \cdot [\sin h_\odot \cos\alpha + \cos h_\odot \cos(A_\odot - \beta) \cdot \sin\alpha] \tag{7.36}$$

$$e_\alpha = e_0 \cdot \cos^2\frac{\alpha}{2} \tag{7.37}$$

太阳常数是离太阳一个天文单位距离处和太阳光线垂直的一平方厘米面积每分钟接收的太阳总辐射能量，常用数值为

$$E_0 = 1.36 \times 10^6 \text{尔格/秒} \cdot (\text{厘米})^2。$$

太阳常数没有考虑大气对能量的吸收，而大气对不同波长的光线有不同程度的吸收。这里 T 是一个总透过率，没有考虑波长。整个公式也没有考虑高程，因为日地距离很远，相比之下高程差很小，可以忽略。阳坡和阴坡的取得可以从坡向计算中推出。在计算时，将式(7.36)和(7.37)单位取得一致再相加。辐照度的常用单位是瓦/米^2。

十三、其它

利用数字高程模型还可以做一些直观的显示和分析，例如(6.2.3)节介绍的一些分析功能：地形剖面的显示，某处可视面的确定；地形特征的三维立体观察等。同时，已知高程的网格数据，也可以反推出地形等高线图，计算最大最小高程值等。

前面所述所有派生数据全部是位置配准的，很容易多层叠合进行地形特征的综合分析，进行多种特征的分类；并且可以和其它专题要素或遥感影象放在一起，建立各种应用模型，作出分析、评价、预测等研究。因此，数字高程模型（DEM）及其派生数据组成的数字地形模型（DTM）在地理信息系统的应用研究中具有十分重要的意义。

§7.2 遥感数据是重要的信息源

随着应用要求的发展，为了实现定量，动态和预测预报等目的，已使 GIS 技术与遥感技术紧密结合起来，逐渐形成综合的技术领域。而遥感数据则成为 GIS 越来越重要的数据来源，或信息源。这样做的好处是既促进了 GIS 的发展，有了遥感这样一个空间数据获取和更新的好途径；又促进了遥感数据处理技术的发展，使遥感数据与非遥感数据结合作综合分析，提高自动分类的精度。因而，遥感数据进入地理信息系统已向更高级更成熟的方向发展，成为一种必然的趋势。

7.2.1 遥感系列解译图作为信息源

利用航空或航天影象，经过目视判读，编制出各种专题图，这些专题图经过数字化后再进入地理信息系统，这种航空或航天影象就是 GIS 的遥感信息源。而系列解译图是目视判读解译的一组地图，严格地说，是"根据制图目的、利用统一信息源，按照统一的设计原则，严格的作业顺序编制的一组专题地图"。[49]

例如：我国云南腾冲地区遥感试验编制的系列图，有地质、地貌、土壤、植被、土地利用等 19 幅有关自然地理要素的专题图；我国山西省太原幅遥感影象解译编制了 17 幅农业自然条件系列图；陕西省安塞地区遥感系列图试验包括 12 种专题图件。其中包括单要素图件有地貌类型图、土壤类型图、植被类型图、森林资源图、草场资源图、土地利用图；综合性图件有土地类型图、土壤侵蚀类型图和土地资源评价图。综合性图件是单要素图件的综合反映，或者说由几种单要素图件综合派生而来，反映了自然要素的高级类型。例如土地类型图是与地貌、坡度、土壤、侵蚀状况、植被、土地利用等密切相关的，而土地资源评价图可以由土地类型图直接派生出来。可见，最基本的图件还是单要素图件。图 7.9 表示了系列图中的部分关系。

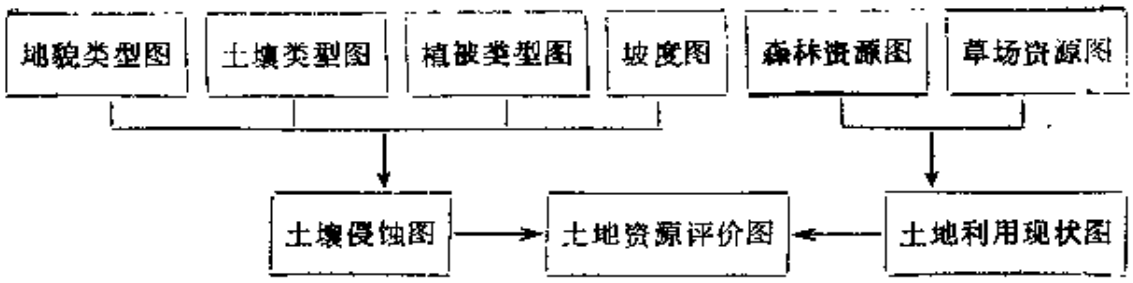


图 7.9　单要素图与综合性图

遥感专题系列图的特点主要是：首先，有相同的信息源，可以保证同一时相和图幅位置配准，避免了各专题图之间可能产生的位置矛盾和信息矛盾，保证了各专题要素的可对比性。其次，遥感图象与地图的投影性质不同，掌握专题要素的空间分布特点，转绘时，从遥感图象与地理底图间的对应关系，人工实现投影的统一，使得各专题图中各要素边界的位置配准成为可能。第三，专题系列图之间在成图时做过轮廓界线的协调，可保持地理综合体各要素空间分布的规律性。例如，协调各专题要素的界限，象地质界限、地形界线、植被界限、土壤界线、水文界线等，这样使得系列图中各图幅的相关要素界限得以配准，象沟缘线、坡脚线、水体等界限位置重合。这些特点对于 GIS 很有意义，在实现多层图幅叠合后，直接做到相应位置匹配，投影一致，不需作任何转换，就可以进行多重信息的综合分析，非常方便。

当使用遥感专题系列图作为 GIS 的信息源时，不需要所有图件全部数字化输入。若 GIS 用来作专题分析，只输入专题需要的要素；若 GIS 用来作多种要素的检索查询时，一般也不需要全部输入，只需输入单要素图件，综合性图件可以模拟系列图生成的办法，用计算机从单要素图件中衍生出来，从而达到减少输入工作量和减少存贮空间的目的。避免数据冗余和重复劳动的浪费。从另一个角度说，这既保持了系列图的精度和特点，又发挥了 GIS 功能，体现了 GIS 与遥感结合的优越性。

现以山西省柳林县杨家峪小沟流域水土保持信息系统的信息

表 7.1 小沟流域土地类型分类表

一 级	二 级	三 级	说 明
1.梁峁地	11.梁峁坡耕地	111 梁峁顶耕地	坡度<15°
		112 梁峁坡耕地	坡度15°~25°
		113 梁峁陡坡耕地	坡度>25°
	12.梁峁梯田	121 梁峁顶梯田	位于梁峁顶部梯田
		122 梁峁坡梯田	位于梁峁坡的梯田
	13.梁峁人工林地	131 梁峁乔木林地	
		132 梁峁灌木林地	
	14.梁峁园地		
2.沟坡地	21.沟坡旱地		
	22.沟坡人工林地		
	23.沟坡草地		
	24.沟坡裸土地		
3.塌地	31.塌地旱地		
	32.塌地林地		
	33.塌地草地		
	34.塌地裸土地		
4.坝地	41.坝地旱地		
	42.积水坝地		
5.沟底地	51.沟底旱地		
	52.沟底林地		
	53.沟底未利用地		

源为例，此沟主沟长 2.93km，流域面积 2.34km²，系统中使用了遥感解译部分专题图，面后派生出其它图件。由于小沟流域面积很小，不宜使用卫星影象解译。为了保证精度，采用 1:2 万彩红外航片中心部分放大成 1:6000 的影象，通过目视解译，转绘成1:1万专题地图的基本要素图件，如土地类型图，土地利用图等。数字化进入计算机后，再派生出如土地资源评价图等，作为下一步分析的数据资料。常规编绘黄土区土地质量评价图是以土地类型图为基础，参考土地利用和坡度图，将三者重合叠置，经过分析综合，将类型归并而生成。 在土地类型图编绘过程中也考虑了植被、土壤

等因素。土地资源评价图可以直接由土地类型图直接派生出来。在本例中由于小沟流域面积小，类型不复杂，便采用直接生成的方法。表 7.1 和 7.2 分别列出了土地类型和土地资源评价分类依据及其在计算机内编码，表 7.3 是派生土地资源评价图时类别归并原则，图 7.10 是生成的小沟流域土地资源评价图。本例主要说明遥感解译的专题图是 GIS 很好的信息源，并且可以派生其它信息。

表 7.2　小沟流域土地资源评价分级表

土地等级	说　明
一等地	在本区为沟底坝地和将成为坝地的积水坝地。
二等地	包括梁峁顶梯田和梁峁坡梯田，属乡牧场的梁峁人工林，灌木林地及梁峁园地。
三等地	包括梁峁顶坡耕地，缓坡(<15°)的坡耕地。
四等地	较陡坡耕地，坡度约<25°。
五等地	坡度较大的坡耕地(25°—35°)。
六等地	较陡坡裸地，坡度约<35°，包括沟坡和塌地的较陡坡草坡。
七等地	坡度35°～45°的裸地。
八等地	陡崖或碎石地，本流域指沟底裸岩和碎石滩地。

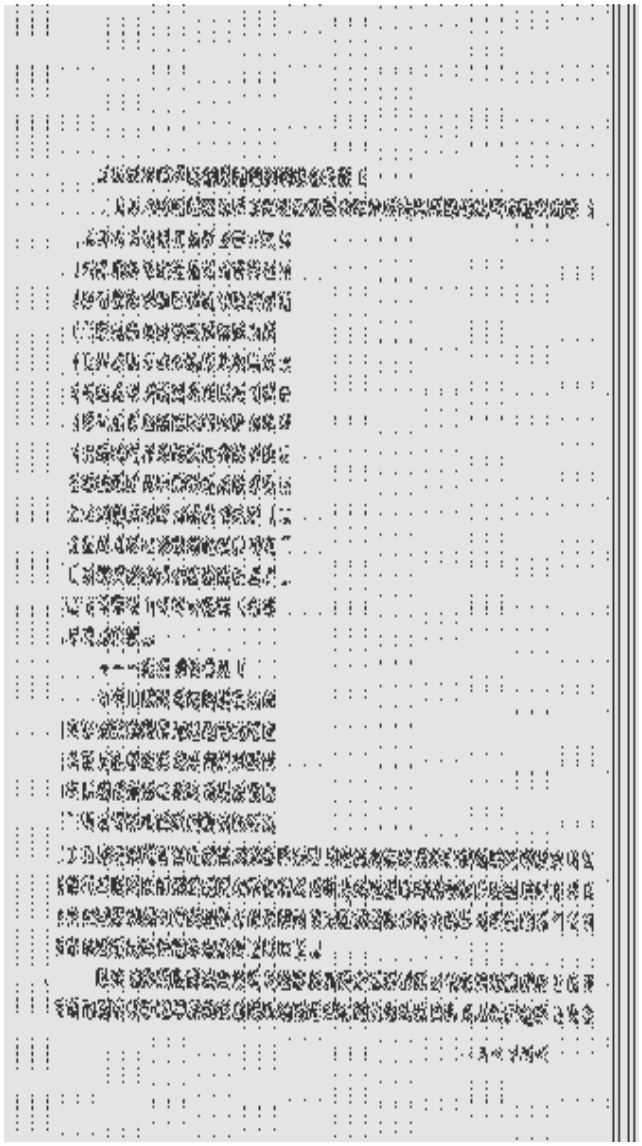
表 7.3　土地类型图派生土地资源评价图参数

土地资源评价等级	1		2					3					4	5			6	
土地类型图分类号	41	42	121	122	131	132	14	111	31	32	51	52	112	113	21	22	24	34

遥感解译图作为 GIS 信息源的重要性还在于，可以解决某些地区缺少最新数据源的问题。我国目前还有一些地区没有做过资源清查，既使在做过资源清查的地区，也不可能经常调查土地情况的变化和更新图件，使得现有的资料不能准确反映当前情况。这给许多分析研究带来了缺乏准确的信息源的困难。遥感影象不仅可以及时得到，而且解译出一系列图件，可以说是"价廉物美"的信息源。

7.2.2 GIS 数据库的快速更新

从遥感影象经过目视解译，转绘而成的专题图，经过数字化进入 GIS，不失是一种数据库更新的途径。所谓“更新”指用最新的数据代替已经变化了的过时数据。但是，这一过程周期也比较长，化费人力、财力较多。如果能通过某些计算机处理过程，直接将遥感数据自动识别分类，再经过编辑处理成为专题图，送入 GIS 数据库中，则可以实现快速更新数据。从而保证 GIS 的动态性与现势性。



一、主要步骤

利用多时相和多波段的航空或航天遥感数据作为信息源，因为航空数据每更新一次必须出动飞机飞行，较难实现多时相。而卫星与航天飞机等航天器，只要发射上去，便可以连续不断的接收数据。目前卫星遥感的分辨率已大大提高，其精确程度逐步与航空数据的精确程度接近。可见，用航天数据作为今后 GIS 更新的数据源是比较理想的(图 7.11)。

将遥感数据送入计算机后，首先进行预处理，主要目的是根据所需要得到的专题内容，设法提高遥感图象的可分性。预处理的

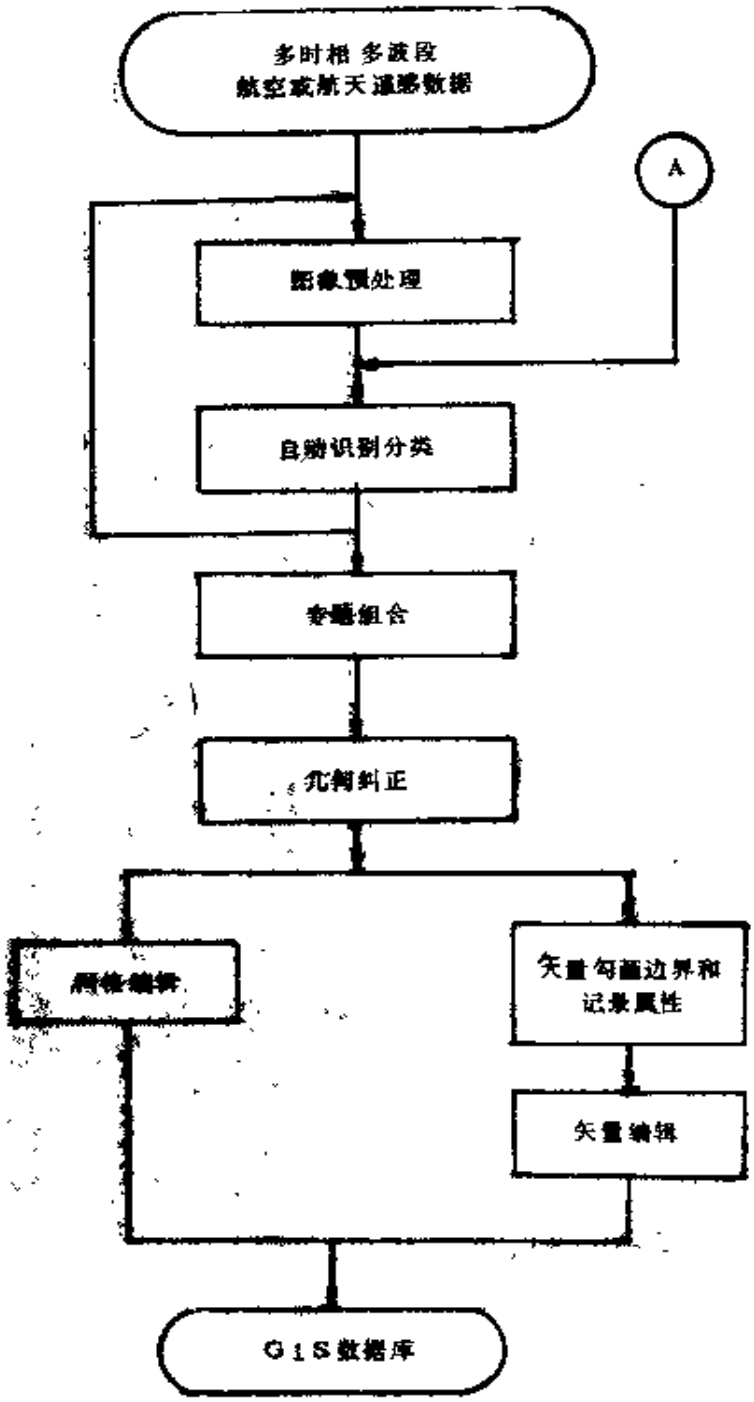


图 7.11　利用遥感数据实现 GIS 数据库的快速更新
Ⓐ 为GIS 中的非遥感信息

内容可以有辐射增强、比值、各种正交变换，如 K-L 变换、K-T 变换等。提取出其中一些可分性高的波段和时相段，并用可分性

检验。

自动识别分类预处理后的图象，方法很多，除了前面介绍的方法外，还有许多，如模糊分类法、邻域分类法、纹理分类法等，选择分类结果最好的一种。不同的图象和不同的分类对象所用方法效果不同，需要经过可分性或混淆矩阵计算和试验确定。

分类后的数据常常有许多散点和过小的图斑，因此需要做专题组合，有时也叫做专题滤波。根据不同的类别确定组合的标准，也就是说确定一个阈值，例如5个象元，凡图斑面积小于或等于5个象元，就被合并到邻近的较大一类中去，这一块的类别便被消灭了。有一些特殊的类别，例如：矿点、水库等，尽管图斑小，也必须保留，这可作特殊处理。阈值大小的确定要参考原数据库中的数据精确度以及比例尺大小。组合后的图象应该类似专题图，边界清晰。

为了与库中其它数据配准，取得投影方式一致，比例尺一致，以便入库存贮，再做几何纠正。几何纠正的方法与图象一致，因此可采用与源图象相同的控制点文件加以计算。

这时得到的是专题图象，即网格数据，一定还会有一些不满意之处，如连接处间断、不够平滑、个别类别位置不合理等。所以还需要用人机交互的方式做一些编辑加工，按照 GIS 数据库可接收的数据结构，编辑工作分为二种：一种是直接用网格数据编辑后入库；另一种将网格数据转换成矢量数据，这种转换主要是勾画专题边界。因此最好先做一次边缘提取，再转换数据结构。最后将得到的矢量数据编辑好：连接、平滑、封闭多边形、删改等，再送入数据库，各种方法已在第一部分介绍。

二、提高分类精度

实现数据快速自动更新的关键在于提高分类精度。只有分类精度高，把分类别小，混淆象元少，才有可能形成较可信的专题图数据。目前，在地形地物较为复杂的地区，根据光谱特性的分类精

度一般为 80%—90%，而且常常只是小面积试验，这是不够的。图 7.11 中分类后有一反馈线，如果分类结果不能令人满意，还要重新选择波段和选择分类方法，直到精度可以满足本系统用户提出的要求为止。或者只保留可以满意的类别，舍弃分类不理想的类别。

尽管如此，分类精度仍是目前影响自动数据更新实现的主要问题，即如何做好遥感数据与地理信息系统的接口。为了进一步解决这个问题，图 7.11 还有一条从 Ⓐ 过来的连接线，这就是 GIS 中的非遥感信息。

7.2.3 遥感信息与非遥感信息的综合分析

遥感信息主要是来自地物对太阳辐射的反射作用，在影象上形成不同灰度值，因而地物的识别主要依据其光谱特性，来间接反映出各种地物的差异。这样，常常发生"同物异谱"或"异物同谱"现象。"同物异谱"使同一类地物被误分为二类，这种情况较易处理，只要对照已知区域，将误分的二类合并成一类就可以了。而"异物同谱"则比较麻烦，常常把应该区分的两类混合划类而无法分开，例如：果园和灌木、荒草和牧草等，影响了分类的精度。由于这是光谱特性造成的，即使改进了遥感数据的分类方法，要想使精度有很大提高，也十分困难。

进一步的改进是利用 GIS 与遥感的结合，将 GIS 中存贮的空间信息作为遥感图象的辅助信息源，改善分类精度，提高遥感影象分类的可信度；同时，由于分类可信度的提高又推动了 GIS 中数据快速更新的实现，两者相辅相成，互相促进。

非遥感信息作为遥感信息的辅助信息进行综合分析时，必须注意到，过去常用的遥感信息统计分类方法是建立在假定类别分布是正态分布的前提下，认为象元灰度是随机变量，事实证明，这种假定基本上可行。而非遥感信息一般是 DTM 的要素或专题图数据，这些数据是属性数据，在某一多边形区域内是同一个数

值，虽然在把它们看作图象显示或输出时，属性值看作成灰度值，但相同属性的类别不遵从正态分布。这样，将非遥感信息与遥感信息综合分析时，如果以非遥感数据作为遥感多光谱或多时相数据的一个波段来处理，进行统计分类，是有困难的。目前情况看，实行两种信息的结合，有以下几种方式：

一、以非遥感数据为基础，把遥感数据分层后对每一层再分类

非遥感数据是指高程、坡度、坡向、土壤、植被、地质、土地利用等专题图和地形图数据，这些地理空间数据对于类别影响很大，这些数据的层次，一方面可以用来设定分类时不同的先验概率，另一方面不同的层次可以分别进行分类，克服“异物同谱”的影响。

例如：森林覆盖的分类，受高程和坡向影响大，同样是森林，高度不同，生长的树种不同，阳坡和阴坡也不同。这种关系，仅用遥感资料不能解决，必须把地形图中的高程和坡向在地理位置上和遥感图象中的象元一一对应起来综合分析，具体作法可以是：加入这二种数据，将遥感数据与它们配准，然后将高程和坡向分级，例如：小于 1000m、1000m ～ 1500m、大于 1500m 三层高程，东南坡、西北坡、南坡按方位角分成三层。根据实际情况再将二个条件组合，例如：小于 1000m 的东南坡区域，用组合后的每一层将遥感数据分开后再分类。显然，不同高程与不同坡向森林覆盖类别不同，分类时侧重不同，如：山上是针叶林为主，山下阔叶林为主。这样，可以弥补由于光谱类似而造成的类别混淆，改善了分类。也可以将步骤倒过来。第一步，用遥感图象分类方法将森林分出，其中一些树种由于光谱相近无法区别；第二步，输入地形图数据，按不同高程和坡向的树种分布规律，以高程坡向为分界，得到进一步的结果。

再如：在不同土壤中种植的农作物有所区别，可以根据土壤类型不同设置不同的类别先验概率。如某种类型的土壤区域，小

麦约占 50%，高粱约占 30%，小米约占 20%；而在另一种类型的土壤区域内，更适合小麦生长，则小麦约占 80%，高粱约占 10%，草地占 10%，没有小米。这样分类时先利用土壤类别分区，再利用最大似然法分类，在不同的土壤类别区内，象元判别时使用不同的先验概率，从而提高分类精度，因为这样做更符合实际情况[78]。

二、先将遥感数据分类，再用非遥感数据改善分类结果中的模糊之处

由于"异物同谱"现象的存在，分类后仍会有分不开的地物，这种模糊之处如能找到另外一个条件或几个条件的组合来影响，也可以达到改善分类精度的目的。

例如：在干旱区作分类时发现，干湖床的明亮表面与大沙丘陡峭的向阳坡面光谱混淆而无法分开，便可以利用坡度这一非遥感数据作集合计算，显然二者坡度差异很大，从而得以分开[79]。

三、遥感与非遥感数据的综合分类

这种方法是把非遥感数据完全看作多波段或多时相或多传感器遥感数据中的一个波段，各种数据源全部重叠，仍采用 Bayes 判别方法的思路，只是把判别函数的形式加以改变，使其在理论上可以成立。判别函数另起名称，叫做"综合从属关系函数"，它的作用是把最终要求分出的信息类别同光谱类别或数据类别相联系。光谱类别是对遥感数据先作分类得到的类别（§4.1）；数据类别是光谱类别和非遥感数据专题类别的通称，用 d_{si} 表示，这里 $s=1,2,\cdots n$ 代表 n 个波段，$i=1,2,\cdots m$，代表类别数目。象元用 x_s 表示，ω_j 代表信息类别 $j=1,2,\cdots m$。则判别函数（综合从属关系函数）表示成：

$$F_j = F_j\{f(\omega_j)/d_{si}(x_s),\alpha_s|i=1,2,\cdots m,,s=1,2\cdots n\} \tag{7.38}$$

其中 α_s 是第 s 波段的可靠性因子。那么，Bayes 判别要求判别函数 F_j 为最大，也就是：

如果 $F_j > F_k$

对 $j \neq k, k = 1, 2, \cdots m$

成立，则 $X \in \omega_i$ $X = [x_1, x_2, \cdots x_s, \cdots x_n]^T$

在一般讨论时，可以不考虑 a_{ij}。按照 Bayes 理论

$$F_i(X) = P(\omega_i/X) = P(\omega_i/x_1, \cdots, x_n) \tag{7.39}$$

假定各信息源的波段间相互独立，可改写为：

$$F_i(X) = P(\omega_i/x_1) \cdot P(\omega_i/x_2) \cdots P(\omega_i/x_n)/P(\omega_i)^{n-1} \tag{7.40}$$

其中

$$P(\omega_i/x_s) = \sum_{j=1}^{m_r} [P(\omega_i/d_{sj} \cdot x_s) \cdot P(d_{sj}/x_s)] \tag{7.41}$$

$$s = 1, 2 \cdots n$$

这样表达式便类似于最大似然分类方法，又把初步得到的类别与最终分类的类别联系起来实现分类。这里将数学推导从略[80]。

四、专家系统

带有人工智能特点的，以专家经验或知识为基础的 GIS，简称为知识 GIS 或专家系统，也可联系遥感数据并发挥 GIS 的特点，这是一个有待开发很有前景的领域，国内外均有实验性的工作，并已取得成果。

7.2.4 GIS 与遥感图象处理的结合方式

从硬件上讲，只要图形与图象可以输入与输出的系统，如前面介绍的硬件组成，就可以完成两者结合，主机可以是一个，也可以由多个工作站(微机或小型机及部分外围设备的独立小系统)联接在主机上构成。

在软件接口上，主要是两种方式：

(1) 地理信息系统软件与图象处理系统软件仍各自独立，两者之间通过软件接口，可将图象处理系统中的网格数据传送到GIS库中，通过矢量与网格两种结构之间的相互转换，为 GIS 所使

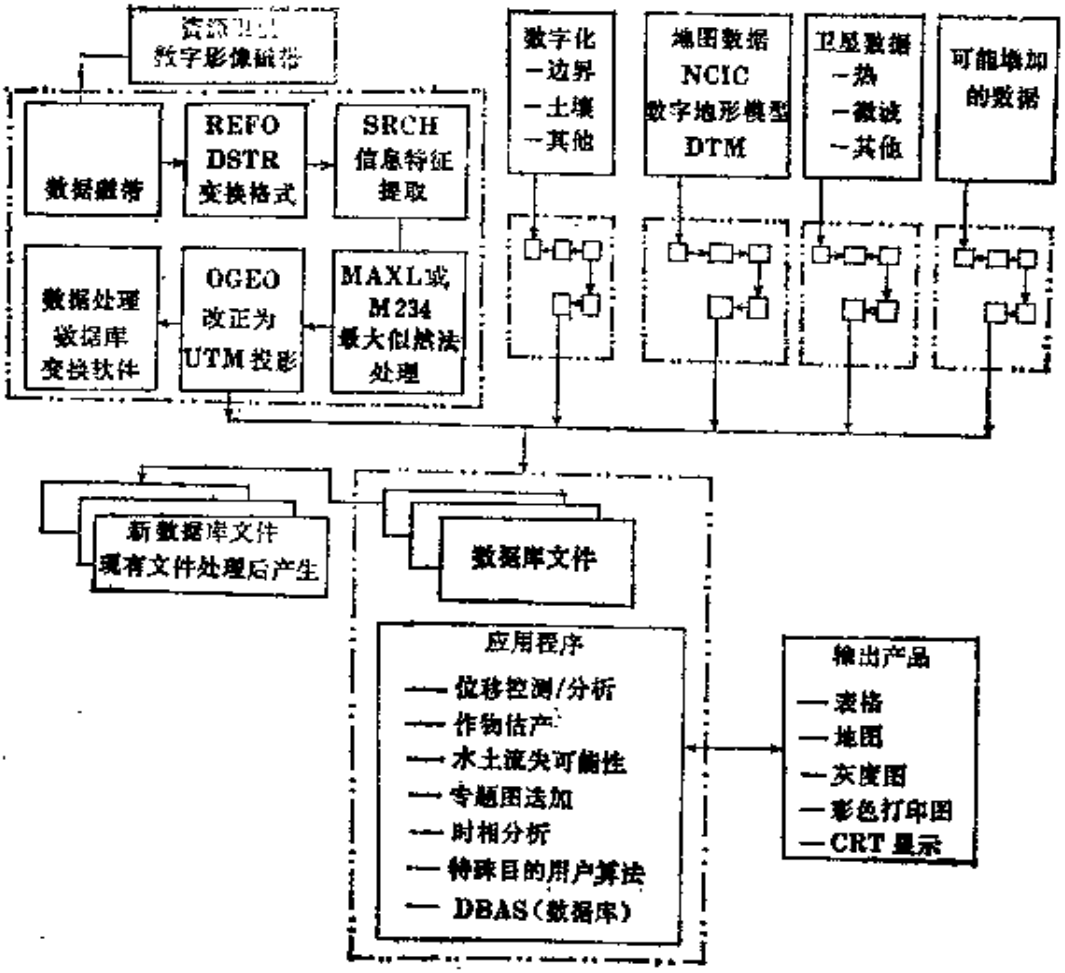


图7.12 美国 NASA 的 ELAS 信息系统(1979)

用,或 GIS 中的数据转变成网格数据送到图象处理系统中继续处理。例如: 地理信息系统 ARC/INFO 就可以和其它图象处理系统接口实现二者结合。这个方式实现起来比较容易，目前比较多用。

(2) 由地理信息系统和图象处理系统直接组成一个完整的系统。这在国外已有一些系统这样做，如美国 NASA 的地球资源实验室发展的 ELAS 系统,可以将数字化后的文件、卫星影象及其它数据放入统一的数据库中,经过分析输出产品,系统内包括通用程序、数据处理程序、分类程序、统计程序、多边形处理程序、滤

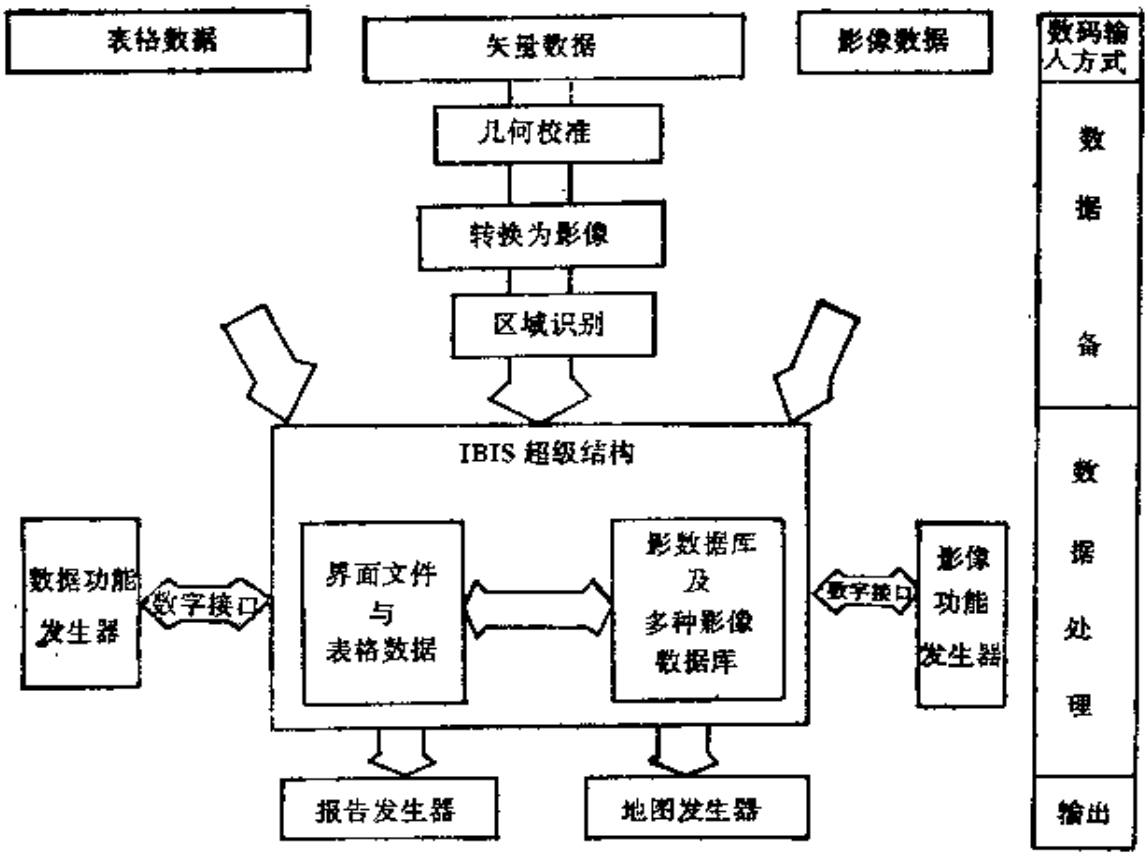


图 7.13　美国 JPL 实验室的 IBIS 信息系统

波程序、位移探测/分析、数字地形处理程序、数据库存贮、检索和处理程序、输出准备程序等(图 7.12)。再如,美国喷气推进实验室(JPL)设计的 VICAR/IBIS 系统,兼有遥感图象处理和地理信息系统的双重功能。IBIS 作为 VICAR 的一个分系统,以影象为基础,注意到与其它数据的匹配,适用于编制土地利用专题图,将卫星影象处理与统计、多边形文件匹配,取得人均耕地等数据(图 7.13)。

§7.3　GIS数据的规范化和标准化

7.3.1　规范化和标准化的任务

随着 GIS(或称为资源与环境信息系统)的发展,许多部门和

单位纷纷建立自己的系统，发展自己的数据库，有些数据，例如数字高程模型常常为许多系统所需要。如果各自管各自的系统，会发现各个系统之间做了许多重复性工作，造成人力物力的浪费。如果制定统一的技术规范，协调各个系统，可以实现各部门和地区的数据共享和信息资源的综合利用。所以，各单位建立自己的系统时，要注意和其它系统数据上的协调，国家一旦颁布了规范和标准，就应执行。

一、规范与标准

标准是指一致公认或法令规定的单位、数量和过程。在资源与环境信息系统国家规范中，确定的标准包括各种物理量、技术名词和过程。

制定统一的规范和标准是信息资源共享的基础，它不仅考虑到国内交流的需要，也要考虑到国际交流的需要。例如：在海洋和气象领域已经存在世界范围的数据交流。

二、建立规范与标准的出发点

考虑到国际与国内工作中的经验教训，认识到规范化与标准化的必要性。

在国际上，各种类型的资源与环境信息系统有上千种，涉及自然资源清查、环境动态监测、自然灾害预报、自然变迁过程分析、资源开发与环境保护的科学管理等许多方面，取得很大收益。但是由于缺乏规范与标准，也带来问题，如美国就是如此，美国林务局从60年代开始建立不同的系统，建立了九个系统，但由于标准不同难以互换信息，造成浪费，每年要花40万美元维持，才感到必须统一标准。

国内也存在类似问题，我国投入了大量人力物力搞资源与环境的调查研究，例如全国人口普查、土地利用概查和详查、土壤普查、全国航空摄影测量与制图、地质区测与制图、森林资源清查、海岸滩涂调查、草场与山地调查……等等，还有许多观测站网数据，

这些丰富的资料在国民经济建设中发挥了巨大作用，但由于各部门之间缺乏必要的联系和协调，对于科学的分类和统计缺乏严格的定义和统一的标准，造成数据悬殊很大，图件参差不齐。所以三番五次组织调查，造成浪费。

因而，筹建有统一标准的数据库和信息系统，为各级政府及部门提供信息服务，并实现数据共享，是非常必要的，紧迫的任务。而首先面临的是数据的规范化和标准化。

三、规范化和标准化的几个方面

资源与环境信息系统应有公共的地理基础，即按特定地区的经纬度，地形图格网或根据各级行政区划或流域来建立地理坐标，系统中所有数据的地理位置应该明确。同时，进入计算机的所有数据应该标准化，包括各种影象、地图，以便进行社会经济、自然资源以及环境要素之间的对比和相关分析；数据在系统中多层次放置，可提供实时显示、查询检索和分析等。

根据我国国家科委基础研究和新技术局资源与环境信息系统国家规范研究组 1984 年提交的"资源与环境信息系统国家规范研究报告"中，就资源与环境信息系统提出了若干基本技术规定和要求，主要包括以下几个方面：

（1）资源与环境信息的数据表示，包括地图投影系统、地理格网和地理数据结构；

（2）资源与环境信息的专业分类和区域组合，包括专业数据的分类系统、区域分类和区域组合；

（3）分类编码规定，如编码的原则和格式等；

（4）数据格式记录标准和转换标准；

（5）对汉字数据处理的要求。

在建立 GIS 过程中不可忽视对国家规范的研究，并应按照国家各项最新规定调整本系统的数据和数据库。

7.3.2 数据的选取(附录)

本节可作为上一节的附录，说明数据选取的范围，作为学习中有益的参考，选取时根据建立系统的具体目的任务决定取舍。

表7.4是资源与环境信息系统国家规范研究报告中提出的专业数据分类和数据项目建议总表，可从其中选项(此建议尚在研究中未形成正式标准，读者可以当时最新发表内容为准)。

表7.5是为美国某个城市或县的 GIS 数据库设计的层面内容实例，从中可以看到数据选取的范围及形式。

表 7.4 专业数据分类和数据项目建议总表

项　目	内　容	基本数据来源
(1) 社会环境		
(1) 城市与人口	1.城镇人口、分县人口总数	人口普查办公室
	2.自然村密度(大小、数目，按第 III 级格网)	1:1万—1:10万地形图
	3.人口分布(按第 III 级格网)	人口普查办公室
(2) 交通网	1.铁路(双轨、单轨、车站、专用线、长度、运输能力、与省界、公路等的交叉点)	铁道部
	2.公路(省级、县级、公社简易公路、桥梁载重限制、与省界、铁路和主要河流的交叉点	交通部
	3.航运(港口、泊位、船舶吨位、通航路线、水深、季节变化)	交通部
	4.航空(航线、航班、航空港、运输能力)	民航总局
(3) 行政区划	1.国界、省、市、县级界线与面积(多边形)	外交部、民政部、国家测绘局等
	2.省、市、县级管辖区（按第V级格网点)	
	3.城市规划区(按V级格网点)	城乡建设与环保部等
	4.自然保护区管辖范围	林业部等
	5.工矿区(油田、禁区、饲养场、旅游点、名胜文物保护区)	城乡建设与环保部、林业部等

* IV 级格网为第 III 级的1/4，V级格网为第 IV 格网的1/4。

续表 7.4

项　目	内　容	基本数据来源
(4) 地名	1.城市名称及其中心坐标	地名委员会
	2.各县名称及县城中心坐标	地名委员会
	3.主要河流、湖泊、山峰、港湾名称及坐标。	地名委员会
	4.自然地理单元及其区域坐标（山脉、流域、盆地、高原）	地名委员会
(5) 文化和通信设施	1.学校、医院等	文化部、教育部、卫生部等
	2.科学试验站网点（气象、水文、地震……台站）	
	3.邮电通信网点	邮电部
(II) 自然环境		
(6) 地形	1.海拔高程(按V级格网点)	国家测绘局
	2.山峰高程、水库、湖面高程	
	3.湖泊、水库水深、大陆架以及海深	(同上)
	4.地形图与遥感资料检索	(同上)
(7) 海岸及海域	1.分县海岸线长度、线段坐标	海洋局
	2.分县岛屿岸线、面积、长度、坐标	海洋局
	3.基本海况：滩涂面积、潮汐、台风、常年风向、底质、温、盐、海浪等	海洋局
(8) 水系及流域	1.流域划分界线及面积(100平方公里以上与省界交点、控制站点、水库坝址及坐标、分段节点)	水电部
	2.流域辖区(按第四级格网)	水电部
	3.水系交汇点(坐标、面积)及干、支流等级、长度(交叉点坐标)	水电部
(9) 基础地质	1.地表岩类或沉积层及其时代	地矿部
	2.断层性质(特别是活动性质)	地矿部、地震局
	3.地球物理观测点(重力、地磁、地震等)	地矿部、石油部、地震局、中科院
	4.人工地震(浅层、中层和深部，包括海上)	石油部、地矿部、地震局、煤炭部、中科院等
	5.地球化学观测点及其特性	地矿部、中科院

续表 7.4

项　目	内　容	基本数据来源
	6.环境地质（地盘沉降、土壤承压力、滑坡、泥石流、崩塌等）	地矿部、中科院
	7.地震烈度区划	地震局
（Ⅲ）资源与能源		
（10）土地资源	1.地貌类型(包括海岸和浅海)	中科院
	2.土壤类型(包括土壤肥力等)	农牧渔业部、中科院等
	3.土地利用类型	国家测绘局、农牧渔业部、林业部等
	4.灾害（风沙、盐碱、台风、雪害、水土流失、旱涝、霜冻、寒潮）	气象局、水电部、农牧渔业部、中科院等
（11）气候和水热资源	1.辐射量、日照量和云量(按第Ⅲ级格网)	国家气象局
	2.热量资源(年最高温、最低温、年均温、月均温、积温等)	国家气象局
	3.降水（年最高、年最低、年、月平均、积雪量等）	国家气象局
	4.风能	国家气象局
	5.陆地水文(最高、最低流量、年、月平均流量、含沙量、洪峰、污染等)	水电部
	6.冰川、雪被、冻土	中科院
	7.湖泊、水库、港湾	交通部、水电部、中科院地磁部、水电部等
	8.地下水	
（12）生物资源	1.主要农作物分年的耕作面积、亩产、灌溉面积等	农牧渔业部
	2.森林类型、面积、树种、蓄积量、采伐、更新面积	林业部
	3.草场类型、面积、产草量、载畜量	农牧渔业部
	4.淡水养殖与渔业(种类、面积、产量等)	农牧渔业部
	5.病虫害、减产频率和程度	农牧渔业部
	6.野生植物、野生动物资源	农牧渔业部、林业部
（13）矿产资源	1.煤炭、泥炭（类型、储量、矿区矿点、生产能力）	

续表 7.4

项　目	内　容	基本数据来源
	2.石油、天然气、油页岩（类型、储量、油田、生产能力） 3.黑色金属(分类、储量、矿山、生产能力) 4.有色金属(分类、储量、矿山、生产能力) 5.稀土元素(分类、储量、矿山、生产能力) 6.非金属(分类、储量、矿山、生产能力)	地矿部、煤炭部、石油部、冶金部、有色金属总公司等
(14)海洋资源	1.海洋能源 2.海洋养殖与产水 3.海底矿产资源 4.海滨资源	国家海洋局等

表 7.5　一个数据库实例层面表

层面名	层　面　内　容
水网设施	水分配设施、废水收集设施、排水管道
暴雨排水系统	暴雨排水设施、暴雨设施注记、暴雨设施边界、暴雨设施边界注记
排水系统	排水系统设施、排水设施、排水系统注记、横向排水沟
供水系统	供水系统设施、供水系统注记、主断点位置、供水设施、横向排水服务和仪表位置、水分区、加压带
水文	海岸线、水体、泉水和池塘、湿地
街道网络	街道网络、街道注记、交叉点、治安事件点
供电设施	电网、电网注记、市政防护警报器
统计区域	人口统计区块、特别统计区、交通分析带、邮政编码区

续表 7.5

层面名	层面内容
其它运输	公共汽车站、交通信号、人行桥、计划的降雨排水系统
基础图数据	大地测量控制点、界标、界标注记
土地记录	地块、地块注记、建筑物/地址中心、右路边界、街道注记、例外地块、有通行权的土地、街道展宽界
环境约束	狂风危害区、噪声等值线、海滩变化、洪水带、洪水/飓风高度、海啸洪水区
相关规划	州土地利用、土地利用发展规划、分带、特别行政区/管辖区、发展规划区、特别管理区

第八章　地理信息系统的建立和应用

§8.1　地理信息系统的建立

由于 GIS 技术涉及到多种学科领域，在建立一个系统时必须照顾到多方面，但归纳起来主要是二点：技术方面和应用方面。技术方面的工作主要由软件工程的人员参加，应用方面则需要系统用户参与，如果没有用户的参与（这些用户应该了解 GIS 的能力），系统应用价值低，常常导致系统的失败。当然，两方面结合的人才是最宝贵的。

一、GIS 的设计模型

GIS 的最初设计主要有四步：（图 8.1）

第一步，通过了解目标用户，分析用户的需要和已有的数据来源，确定系统的需要和规范。在考虑用户需要时要注意到空间数据所需要的地理参考系统，全面考虑系统的数据；

第二步，现有资源和操作条件的评价。这里所指资源，包括建立系统所需要的硬件资源和软件资源，操作条件包括数据的处理能力及用户的人为因素，放在一起作总的估价，并送回第一步；

第三步，选择一个可以满足初始要求的系统，作出各种必要的规定和估价，按照需要和可能设计硬件、软件以及数据的处理过程，估计可能性及经济开支，并考虑好如何完成这个任务以及系统建成后如何帮助用户使用这个系统等等；

第四步，对选择的系统作最后的评价，比较设计的系统与最初根据用户提出的要求所估计的系统，看看是否满足要求，花费和获得的利益是否合适。如有不适当之处再反馈回去，重新选择系统设计或修正用户需要，至调整到适当为止。

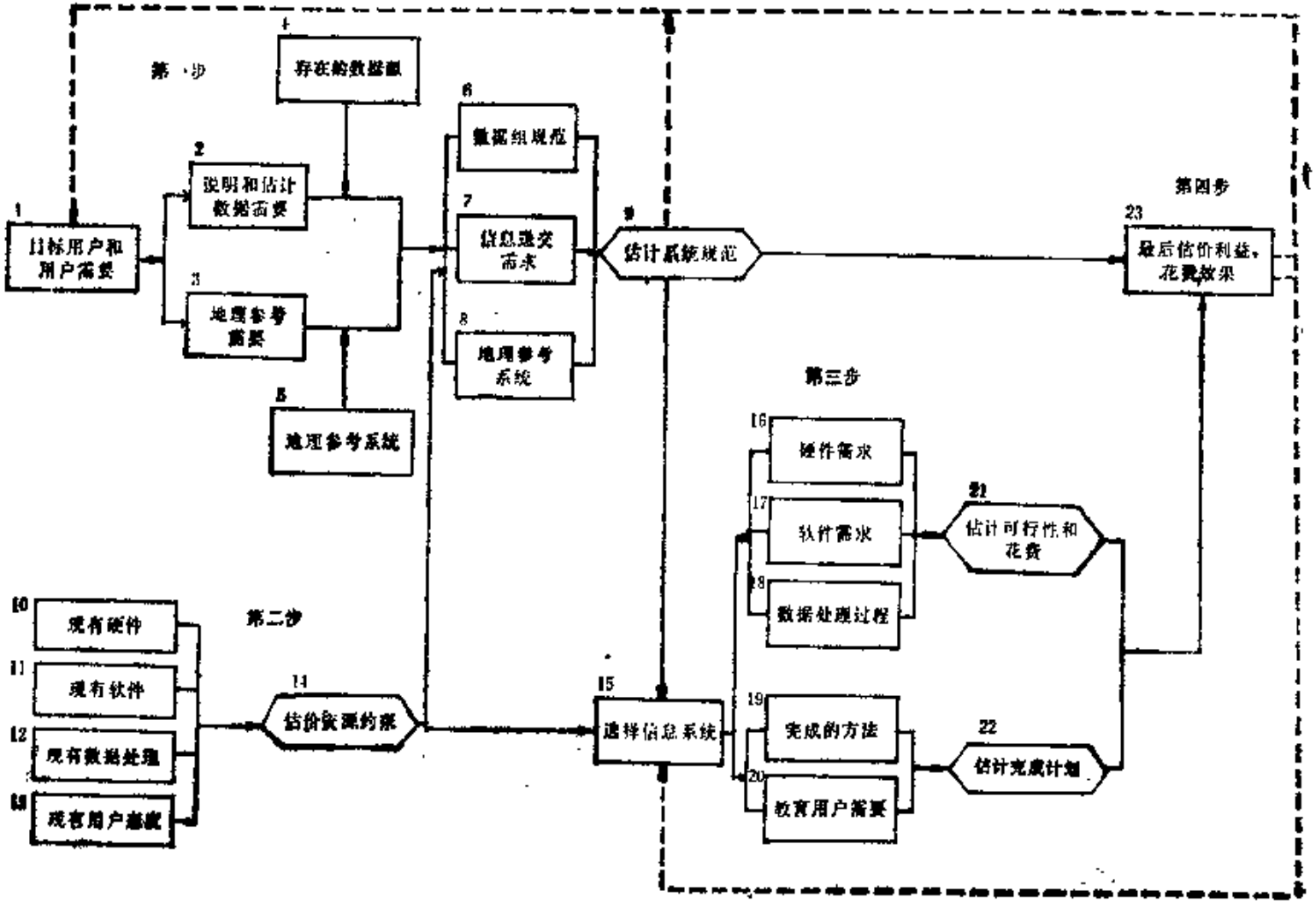

第一步
第二步
第三步
第四步
1
目标用户和用户需要
2
说明和估计数据需要
3
地理参考需要
4
存在的数据源
5
地理参考系统
6
数据组规范
7
信息通交需求
8
地理参考系统
9
估计系统规范
10
现有硬件
11
现有软件
12
现有数据处理
13
现有用户意见
14
估价资源约束
15
选择信息系统
16
硬件需求
17
软件需求
18
数据处理过程
19
完成的方法
20
教育用户需要
21
估计可行性和花费
22
估计完成计划
23
最后估价利益，花费效果

图8.1　系统设计模型

二、系统的建立

建立一个系统并且使用系统，这是一个连续的和不断补充调整的过程，由不可缺少的核心部分开始逐步扩大。但仔细分析，整个系统的发展过程还是可以分成几个阶段，这就是概念阶段、设计阶段、建造阶段、操作阶段。

概念阶段——这是决定建立一个地理信息系统的过程，或者说，是一个构思，申请课题，批准的过程。这一过程要决定建立一个一般的系统还是特别的系统；决定系统的范围以及主要的参加者：负责人、设计者、建造者和用户；确定一般的原则以保证课题的进行，例如：管理、经费等。

设计阶段——将概念阶段的轮廓变成详细的精确的 GIS 描述。设计中必须考虑到现有的资源以及时间、经费、技术水平和目标等约束条件，如上一个问题所讨论的那样。

建造阶段——根据设计的规定建立一个系统的过程。主要是数据采集；数据再格式化；发展一个操作过程：编写计算机程序直到完成；最后检验整个系统，测试各项功能。最大量的计算机工作都在这一阶段。

操作阶段——用户决定是否使用这个系统的过程。用户可以是某个部门的专家、咨询部门的工作者，也可以是地区的领导者、决策者等等。用户是要使用系统的，因此操作阶段应看成系统发展的一部分，而不是另外的工作，在使用时系统还会不断改变，因此这一阶段包括日常管理，与用户的事物联系、监测、数据库更新和扩大，系统维护和服务等等，直到用户满意。

三、数据库的发展

建立 GIS 大量的工作在于发展一个空间数据库，数据采集直到入库的步骤如下：

(1) 确定需要什么类型的数据作为数据源

数据的确定要和今后的目标联系。例如：要通过 GIS 分析

潜在的土壤损失，可以通过通用的土壤流失方程，或具体到某一地区使用修正了的方程，那么方程中所用到的几种空间数据应该是必要的数据源。这里包括降雨、土壤可蚀性、坡长、坡度、植被覆盖及其它附加因子等，分析在这些数据中哪些需要实地收集，哪些可从遥感数据解译得到或从其它途径得到。

（2）确定数据的特征

在需要的数据中确定哪些是地理数据，坐标精度如何；哪些数据是连续数据，如：地形；哪些是不连续的，如土地利用；数据变化率如何如，如地形起伏还是平坦；哪些数据是基础数据，哪些数据是派生数据；基础数据的分辨率如何；区域是否分级，如果是多级数据如何组织？如果用这些数据建立模型进行分析，其结果的错误率如何？等等。

（3）对于结果的初步研究

确定数据及其特征后最好初步检验一下，用这些数据能不能得到系统计划得到的决策信息。例如先取研究区域的一个子区作计算，看一看结果如何，或采用一些其它非计算机途径象专家咨询等。

（4）开始获取数据

这是一个搜集数据的过程，包括野外测量、考察、向一些部门调查、收集、购买；以及直接使用遥感数据或从遥感数据中解译得到等等。在这一过程中需要注意：数据是否可以直接使用，还是需要预处理？地图上有没有足够的系统需要的内容？分辨率是否足够？比例尺是否合适？记录地理坐标没有？处理数据时会不会失去原有的精度？数据一致性如何，有没有畸变？是否原始数据？数据什么时间得到？需要多少时间再格式化或编码？能不能得到更新的数据？所有数据需要多少经费？遥感数据是否可以代替一些数据？等等。

（5）以适当的形式将获得的数据输入空间数据库

这一过程是一个编码入库的过程。将收集来的数据从它们的基本形式，如地图、表格等，变成 GIS 需要的符号、图形及其记录格式。

(6) 检查输入前后数据的精度变化

这种检查是有必要的，因为输入过程有大量人工的劳动，由于人的技术水平，熟练程度，精力充沛程度等因素的影响，错误是不可避免的。检查错误率有助于确定数据的可用性，如果错误太多，有必要想办法更正，直到精度达到要求。

(7) 重复(4)(5)(6)步(可参阅 6.1.1)

所有的数据均按照(4)(5)(6)的步骤进行，直到完成。

(8) 监测和更新数据库

由于事物的变化，有时数据库一边建设，数据已开始改变，所以随时监测数据的情况，并不断收集新的数据以保持数据库的活力，使 GIS 在相当的时期保持其生命力，是十分重要的。这也是判断一个 GIS 质量好坏的一个重要标准。

§8.2 地理信息系统的应用

地理信息系统在 20 多年的发展中，已在许多方面得到应用，并且应用范围愈来愈广泛。归纳起来主要是二个大的方面：自然资源管理和城市建设。本节根据国内外许多工作的成果，列举一些可以应用的方面，从中可见 GIS 的广阔发展前景。

8.2.1 在自然资源管理中的应用

自然资源管理中的 GIS，最早的加拿大地理信息系统(CGIS)作出了范例，以后随着遥感信息结合到 GIS 中，各种各样的 GIS 出现，应用 GIS 对自然资源作出分析、预测、动态监测及决策、规划等，起着很好的作用。

1. 土地及其利用

为了正确地作出规划和管理，必须有足够的现有环境状态与

特征的信息，否则是不可能得到正确结果的。在 GIS 中最重要的变量主要是：

——土地存在状态：土地覆盖和土地资源；

——土地怎样使用：土地利用和人的活动；

——允许做什么：分级分带和控制使用等。

在环境状态和特征的基础上，经过一定形式的处理，可以对某些问题作出决定：

——环境影响分析：确定对某一方面的影响或在特别地区的土地利用要求等；

——位置分析：由已知特征的特别事情或活动，例如：某一种土地利用，确定它可能发生的范围；

——地点分析：由已知特定的地点，确定可能的土地利用情况。

2. 自然环境

对自然环境的了解是确定未来的重要方面，而人类的活动又给以自然环境很大的影响，例如：能量、资源、土地等，通过人类活动可以得到如废物、热能等等，因而在 GIS 中，关于自然环境的空间数据应该包括：

——气候

——表层地质状况

——自然地理方面

——水文方面

——土壤

——植被覆盖

——野生动物栖息地

……

通过分析，系统可以帮助我们得到诸如有关区域发展、海岸带管理、洪水保险、农村发展等方面的规划。例如：

——识别、描述和管理一些有关键的环境问题的区域
——分析土地承载力
——环境影响分析
……

3. 能源

为人类服务的能源种类很多：石油、天然气、煤、水热、风、海潮、阳光、原子裂变与聚变，最后都要放出热量。而在能量转变过程中常常有很多浪费和不良影响。例如：一些工业废水或原子辐射中的热能释放到河流里，危害了渔业发展，而家用热量却还不够使用。GIS 利用其特有功能帮助人们分析，提出能源合理使用的方案，保护能源，开发能源。其需要的空间数据有：

——潜在的能源
位置
大小
开发经费
周围环境
进出口
处理能力
——能源分布体系
位置
通道
能力
中间贮存设施
能量输送类型
危害等级
——能量利用模式
工业
居民

高峰利用

用户之间分配特征

……

通过 GIS，根据这些数据，可以分析出需要的信息：

——传输能量的经费

——保持可得的能量贮备

——不同分配计划的有效性

——浪费情况

——热污染

——说明对人类危险的区域

——说明环境影响

——新的分布线路的发展

——资源分配方案的发展

……

4. 重要环境区域

这是指对人的需要很重要的地理区域，既与健康、安全、福利等一般保健问题相关，也与经济或教育相关，或者自然资源缺乏对人类产生威胁等等。这一类的环境问题所需要的数据有：

——农田

——自然与风景资源

——土壤

——蓄水层

——地质和危害(如地震等)

——野生动物栖息地

——植被

——泛滥平原

——湿地

——科研区

——河流和风景河流
——文化活动
——运输网
……

GIS 可以研究诸如净化空气、海岸带管理等问题，可以得到的信息：

——独特的资源的识别
——指定区域的管理
——确定重要资源的种类
……

5. 水

水对自然环境和人类活动的作用是最重要的，无论是地表水还是地下水，都有大量的管理问题。例如水污染问题，洪水安全保障问题，河流治理问题等。应该进入 GIS 数据库的数据有：

——自然水体
——供水
——利用方式
——娱乐需求
——气候
——流域
——高程
——工业位置
——居民点位置
……

可以通过 GIS 作下列方面的研究：

——泛滥平原
——净水获得可能性
——灌溉

——污染(潜在的和已存在的)

……

6. 自然资源

自然资源对于人类生存和保持好的生活所必需。但是自然资源是有限的,有一些通过适当的管理可以再生使用,而有一些则不能。因而如何合理地利用资源成为重要的研究课题,例如:农村发展、合理采矿、渔业和野生动物、土地管理、海岸带管理、商业等问题。所需的数据如下:

——森林

——矿产资源

——能源

——河流,湖泊

——野生动物和鱼类

——农业

——港口

——地质

……

通过 GIS 设法导出如下方面:

——木材管理

——保护农田

——保护能源

——野生动物管理

——市场分析

——资源分配

——资源开发

——资源政策

——资源再循环

——资源利用

……

7. 农业

农业问题始终是重要的问题，我国是农业大国，随着人口的增长和农田面积不同程度的缩小，农业问题更需要加强研究，以促进生产的发展。例如：输入 GIS 的数据可以是：

——土地变化
——土壤
——地质
——粮食生产
——气候
——水文和水供应
——灌溉
——侵蚀
——农作物病虫害，原因
——昆虫控制
——农药
——化肥
……

GIS 可以通过这些数据，帮助分析：

——农作物管理
——农田保护
——保护实验
——农田管理
……

自然资源管理方面可列举的应用还有很多，可针对不同系统的不同功能，设计本系统实现的过程和具体步骤。

8.2.2 在城市管理中的应用

城市管理是一项十分复杂的工作。美国人口调查局的双重独

立地图编码系统（DIME）最早实现了将城市街道地名输入 GIS 进行管理，以后城市管理方面的信息系统越来越多，功能亦逐渐增强。城市管理的方面很多，现仅列举其中的几类：

1. 人力资源

人生活在地球上，要利用土地、能源和其它资源，人的因素也是资源中不可缺少的一部分。利用 GIS 研究人力资源，也有很大的优越性，例如与人口和人类有关的许多问题。这里，所需要的基本数据常常有：

——居住地
——消费水平
——收入
——年龄
——废物种类
——消费地点
——犯罪种类
——灾祸种类
——工作、商业、学习设施
……

通过处理，可以做很多方面的工作，象分析人力资源、初等教育、人民健康计划、资源发展、民政援助、房屋、通讯事业、税收等各个方面。利用 GIS 可以做计划、分析和管理如：

——物资运输计划
——娱乐场地计划
——警点分布计划
——学生安排计划
——移民方式分析
——人口增长分析
——犯罪方式分析

——福利事业需求分析

——公共服务设施管理

……

2. 犯罪问题

这里可以包括犯罪的预防、法律实施及罪犯审判。通过犯罪点的位置信息，来预见犯罪活动，确定警察巡逻地点，制定控制的措施等。GIS 数据库贮存的空间数据有：

——某种犯罪发生的地点

——财产偷窃事件发生的地点

——逮捕地点

——高度危险的企事业地点

——犯罪分子居住地

……

根据这些空间数据，可以经过分析，作出计划：

——选择固定的注意目标

——为特别的地区建立危险级别

——巡逻的分布

——选择一些特殊地区作详细的防止犯罪分析

——犯罪模式识别

——选择区域或学校作为防止少年犯罪的注意地

……

3. 市政防护

这主要指自然灾害、人为灾害或战争所产生的防护需要。它包括短期和长期二种。需要的数据有：

——人口分布

——食品来源

——地质活动(地震等)

——运输

——军事设施
——公共事业
——医药设施
——营救设备
……

从而得到以下方面：
——各种可选择的减轻灾难计划
——食品应急贮存和医药供应的要求
——疏散计划
——灾难波及区域的专门标示
……

4. 通讯

人们和外界接触，传递信息，发展生产，所有的活动都离不开通讯，尤其在现代信息社会，通讯更加成为社会生活不可缺少的一部分。通讯方面的 GIS 包括的数据有：

——通讯站
——人口
——地理
——动力电源
——事件中心
——技术信息
……

通过 GIS，可能导出：
——传输线的地点
——设备位置
——教育中心
……

5. 运输

运输事业对于经济、社会、生活各方面都有不可估量的作用，从小范围地区到全国乃至全球，从小比例尺到大比例尺地图描述都十分必要。在这方面，空间数据库贮存的数据有：

——公路、道路、立体枢纽等
——快速转运地
——飞机场
——海港
——铁路
——旅行起点和终点
——人口流动
——企事业中心
——商业交通
……

通过 GIS，可能做的工作有：

——各种可选择的运输计划
——位置分析
——物资转运
——能量保护
……

另外也可以做一些研究课题，诸如公路交通安全、公路美化、城市运输、紧急医药服务、地下铁道与高建公路建设等等。

这里所列举的只是大的方面，即便是 GIS 数据也只是个框框，每一项中还可以包括很多内容，如河流数据，又可以包括主干河、支流、沟渠、运河、季节河等。还要注意不同的比例尺，如流域地形可用 1:5 万地形图输入，县级用 1:1 万输入，乡级为 1:2 千输入，以保证精度的需要。这一些具体内容都要在实际设计系统时考虑到，从而得到充实。

§8.3 遥感数据与地理信息联合系统

纵观遥感图象与地理信息系统，其不可分割性是明显的，随着计算机技术和遥感技术的发展，将会展示更广阔的发展前景和紧密结合。今后的发展方向将是二者的联合系统。

遥感数据与地理信息联合系统，要解决的关键问题主要是：

1. 各种资源卫星、气象卫星与航空、地面观测、物化探数据的复合和分析；

2. 解决遥感数据与地理信息系统的接口，增强遥感信息处理分析能力，并反馈回去用于对地理信息系统的更新；

3. 向智能化方向努力：改进整个应用系统的数据管理，提高识别能力和解译水平。

遥感数据与地理信息联合系统应该在提供数据和地图、在宏观决策等广泛的应用中发挥作用。

图象处理部分主要处理各种卫星遥感数据包括资源卫星、气象卫星、海洋卫星的各种传感器数据，也可处理航空数据，通过一系列处理过程，完成信息提取，产生需要的专题图象。图象处理的功能应该包括图象管理、图象统计、图象校正、图象增强、图象变换、图象分类等基本能力。同时图象处理的结果，可经过数据结构的转换与地理信息系统的数据一致起来，从而进入地理信息系统。

地理信息系统除了接收图象处理系统的图象外，还有一系列的输入手段，可以输入自然环境、社会经济、地面观测等各种数据，经过模型分析和计算，提供各个方面应用成果。地理信息系统中包括有

图形数据库：

（1）地图数据库：河流、交通网、城镇、经纬坐标格网等；

（2）数字地形模型：通过对地形图海拔高程的数字化，作各

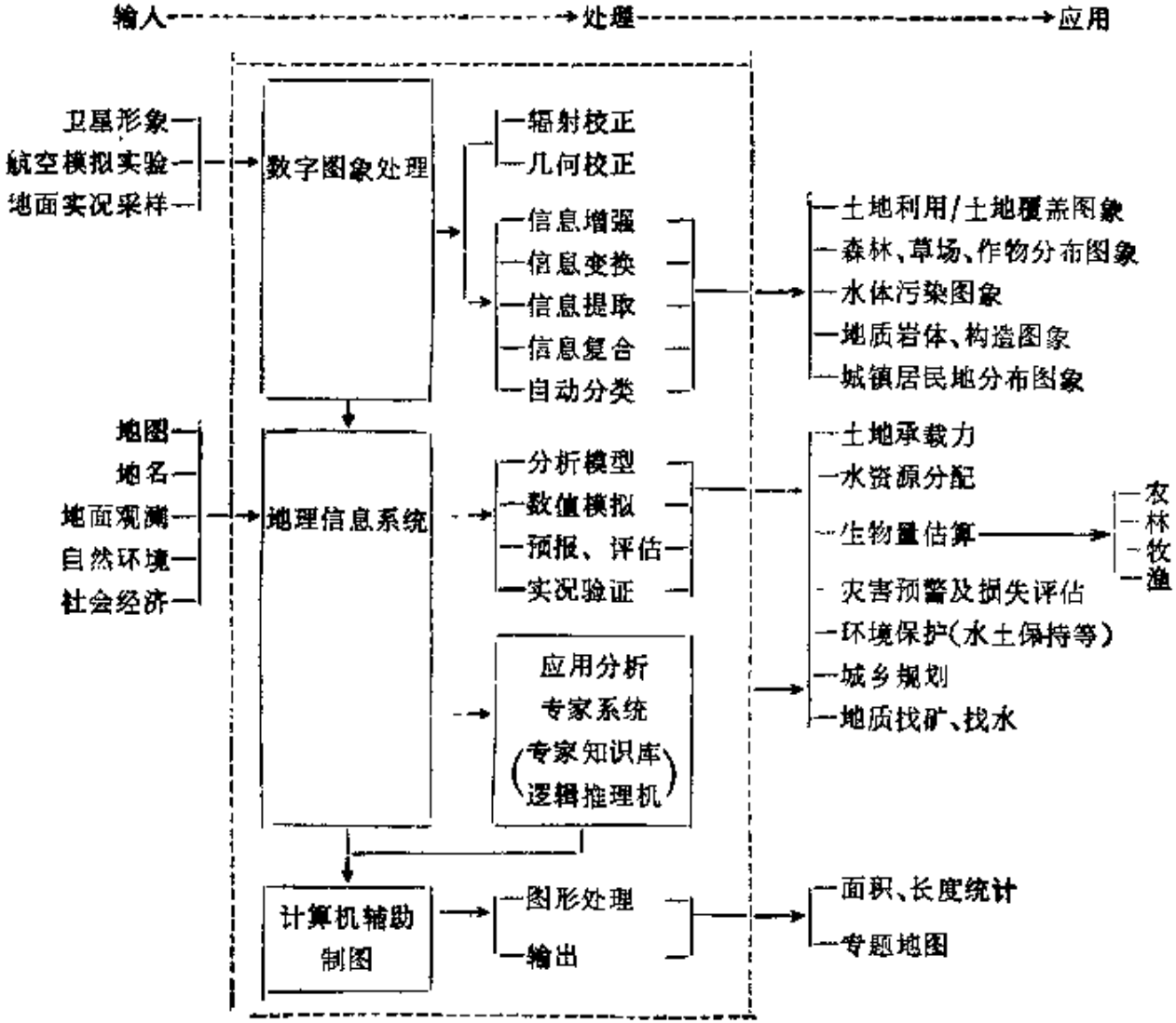


图 8.2　遥感数据与地理信息联合系统流程图

种地形分析，生成数字地图；

（3）地名库与汉字库：地名位置坐标、空间属性、行政编码、字型选择等软件。

统计数据库：具有空间坐标和时序的数据项。包括：

（1）地球物理场：重力、地磁、地震波、地应力与地球形状等观测数据；

（2）地面观测场：综合性模拟试验场、专业试验场、自动观测台站网、生态、农林试验场、海洋浮标、水文、气象台站网等观测数据；

（3）自然环境库：水系、海岸、滩涂、冰川、湖泊沉积、沙漠化、沼泽化量测与观测数据；

（4）社会经济库：人口、土地利用、工农业、能源、矿产等统计数据。

地理信息系统还应该具备空间与属性数据的管理功能以及根据不同的应用目的而具备的模型分析功能。

计算机辅助制图可以看成整个系统的输出部分或子系统。地理信息系统的数据或由图象处理系统过来的数据，经过进一步的编辑及处理可以形成专题图件，得到硬拷贝产品。系统内具有一系列图形处理功能，可以在输出以前帮助分析，这部分功能也是地理信息系统功能的一部分，如通道搜索、曲线拟合、等值线生成、透视图生成、最短路径计算、多因素叠合等。最后的输出除了专题图件外，还有各种统计图表、等值线图、立体图等。

在更大的范围内讨论，为了更好地发挥资源卫星在国民经济中的作用，今后我国将把与资源卫星有关的领域内各部分工作统一考虑，成为一个完整的应用系统。这一应用系统将包括卫星的信息接收、图象处理，专家系统、地理信息系统和计算机辅助制图五大部分，被称作资源卫星应用系统[82]。本书讨论过的遥感数据的处理方法及地理信息系统技术将是整个应用系统中的重要部

分。因此，遥感数据与地理信息的联合系统是资源卫星应用系统的部分子系统。其流程图如图 8.2 所示。

流程图内加入一个专家系统连接地理信息系统，这一部分内容本书未涉及，它是一个重要领域，随着人工智能应用研究水平的提高，将专家研究的经验进入计算机，构成专家知识库。应用专家的知识，通过逻辑推理机模仿人的思维过程进行推理，可以得到分析的结果。专家系统与地理信息系统的联合可以使地理信息系统进入到更高一级的层次，突破统计分析、结构分析等模式，会使分析结果实用性更强，更易为专家所接收。

流程图所列的应用范围很广泛，属于国家级系统，（部门或小规模的应用可以从中抽取部分应用功能，但系统的基本能力还应保证。）整个系统将涉及信息、地球、生命科学等许多前沿领域。除了遥感图象处理、地理信息系统、计算机辅助制图等技术外，还要涉及某些人工智能、专家系统的问题，横跨计算机、遥感、信息系统、自动控制等许多高技术领域，难度很大，研究的前景也十分广阔。

附录：常用卫星、传感器和光谱通道表

附表1　陆地卫星传感器及发射情况

陆地卫星星号	传感器				发射时间	停止工作时间	备　注
1	RBV	MSS			1972.7.23	1978.1.6	RBV 为多光谱摄影
2	RBV	MSS			1975.1.22	1983.7.27	RBV 为多光谱摄影
3	RBV	MSS			1978.3.5	1983.9.7	RBV 为全色摄影 MSS 带有热红外波段
4		MSS	TM		1982.7.16		
5		MSS	TM		1984.3.1		
6			ETM	Sea WiFs			计划发射

附表2　陆地卫星4/5轨道参数

轨　道　参　数	陆地卫星—4/5
轨道类型	近极地太阳同步
轨道倾角	98°2
卫星高度	705km
从北到南通过赤道时刻	9:45(当地太阳时)
覆盖重复周期	16天
全部覆盖地球的圈数	233
轨道周期	98.9分
赤道上连续两圈距离	2752km
赤道上相邻两圈距离	172km
每日轨道圈数	14.5

附表 3　MSS 光谱段特性

陆地卫星 4/5 Mss 波段号	波段宽度（μm）	相应光谱区段	地面分辨率（m）
1	0.495～0.605	蓝绿	82×82
2	0.603～0.698	黄红	82×82
3	0.701～0.813	红与红外	82×82
4	0.808～1.023	近红外	82×82

* 陆地卫星 1/2/3 地面分辨率为 79×79m，陆地卫星 4/5 为 82.7×82.7m，这里取常用值[1]。地面分辨率有时也叫做瞬时视场或空间分辨率。

附表 4　TM 各光谱段特性

TM 波段号	光谱段宽度标称值（μm）	地面分辨率（m）	选择原理和主要应用
1	0.45～0.52(蓝)	30×30	对叶绿素和叶色素浓度敏感，用于区分土壤与植被，落叶林与针叶林，近海水域制图
2	0.52～0.60(绿)	30×30	对无病害植物绿反射敏感
3	0.63～0.69(红)	30×30	对叶绿素吸收敏感，用于区分植物种类
4	0.76～0.90（近红外）	30×30	对无病害植物近红外反射敏感，用于生物量测定及水域判别
5	1.55～1.75（中红外）	30×30	对植物含水量和雪与云的不同反射敏感，可判断含水量并区别雪和云
6	10.4～12.5（热红外）	120×120	作温度图、植物热强度测量
7	2.08～2.35（中红外）	30×30	对植物含水量和矿物氢氧根敏感，可用于地质制图，探测岩石的水热蚀变

附表 5 SPOT 卫星及传感器参数

	SPOT 卫星
轨道类型	圆形近极地太阳同步
轨道倾角	98.7°
卫星高度	832km
从北到南通过赤道时刻	上午 10:30 当地太阳时
覆盖重复周期	26天
轨道周期	101.46分
离天底观察范围(相对垂直方向)	±27°
双传感器扫描总宽	117km（重叠 3km）
赤道上相邻两圈距离	108km
传感器在轨道上可能观察宽度	950km
传感器扫描宽度	60km(天底) 80km(远离天底)
在一个覆盖周期内同一地连续重复观察次数	7次(赤道) 11次(45°纬度)

附表 6 HRV 传感器特点

HRV	多光谱方式	全色波段方式
光谱波段（μm）	0.50～0.59(绿) 0.61～0.68(红) 0.79～0.89(近红外)	0.51～0.73
视野(度)	4.13	4.13
地面分辨率（天底观察瞬时视场）(m)	20×20	10×10
每行象元数	3000	6000
地面扫描宽度(天底)(km)	60	60

附表7 NOAA 气象卫星系列发射时间一览表

ITOS/NOAA系列	发射时间	TIROS-N/NOAA 系列*	发射时间	备注
ITOR	70.1.23	TIROS-N	78.10.13	
NOAA-1	70.12.11	NOAA-6(A)	79.6.27	
NOAA-2	72.10.15	NOAA-7(c)	81.6.23	NOAA-B 发射失败
NOAA-3	73.11.6	NOAA-8(E)	83.3.28	NOAA-D 未发射
NOAA-4	74.11.15	NOAA-9(F)	84.12.12	
NOAA-5	76.7.29	NOAA-10(G)	86.9.18	
		NOAA-11(H)	88.9.24	

* 未发射时排列为 A,B,C,…… 发射后排列为6,7,8……

附表 8 TIROS-N/NOAA 系列过升、降交点时刻表

	过升交点(从南向北)时间	过降交点(从北向南)时间
TIROS-N	15:00	3:00
NOAA-6	19:30	7:30
NOAA-7	14:30	2:30
NOAA-8	19:30	7:30
NOAA-9	14:20	2:20
NOAA-10	19:30	7:30
NOAA-11	13:00	1:00

附表 9 NOAA 卫星传感器 AVHRR 特性

通道号	光谱波段 (μm)		地面分辨(天底) km	扫描范围 km	主要用途
	NOAA-10 等	NOAA-11 等			
1	0.58—0.68	0.58—0.68	1.1	2700	白天云图、地表特征
2	0.725—1.10	0.725—1.10			地表、水况
3	3.55—3.93	3.55—3.93			海面温度、昼夜云图
4	10.50—11.50	10.3—11.3			海面温度、昼夜云图
5	重复[4]	11.5—12.5			海面温度

附表 10　日本 GMS 卫星发射简表

名称	发射时间	轨道	主要任务	备注
GMS-1	1977.7.14	静止轨道140 °E	推进全球大气研究计划，进行太平洋亚洲地区云图摄象、收集、转播气象资料	美国火箭发射
GMS-2	1981.8.11	静止轨道140° E	开发气象卫星技术，改善气象业务等	
GMS-3	1984.8.3	静止轨道140° E	开发气象卫星技术，改善气象业务等	

附表 11　GMS 卫星传感器 VISSR 主要特性

VISSR	可见光	红　外
光谱波段（μm）	0.50～0.75	10.5～12.5
地面分辨率（Km）	1.25	5

附表 12　“风云一号”甚高分辨率扫描辐射计特性及用途

AVHRR 通道号	波长范围（μm）	地面分辨率(天底)(km)	主要用途
1	0.58～0.68	1.1	白天云图，地表图象
2	0.725～1.1		白天云图，水、冰、雪和植被
3	0.48～0.53		海洋水色图象
4	0.53～0.58		海洋水色图象
5	10.5～12.5		昼夜云图，地表、海面温度和图象

附表 13　“风云一号”气象卫星轨道参数

轨道类型	近极地太阳同步	偏心率	<0.005°
轨道倾角	99°	轨道周期	102 分
卫星高度	900km	过境时间(FY-1B)	8:00 和 20:00(地方时)
每日轨道圈数	14圈		

参 考 资 料

1.陆地卫星4/5数据用户手册　科学出版社　1987

2.卫星气象中心业务产品手册　国家气象局卫星气象中心(油印)

3.国土普查卫星资料应用研究　第一集　科学出版社　1988

4.王新民　中国科学院遥感卫星地面站　国家遥感中心遥感卫星地面部中国科学院空间中心遥感卫星地面站　1986

5.王守慧　风云一号气象卫星——我国第一颗试验试用型气象卫星　气象　第14卷　第10期　1988。

6.荆其诚等编著　色度学　科学出版社　1979

7.吕斯骅编著　遥感的物理基础　商务印书馆　1981

8.(美) P.H. 斯韦恩，S.M. 戴维主编　朱振福等译　遥感定量方法　科学出版社　1984

9.(美) P.C. 冈萨雷斯，P. 温茨著　李叔梁等译　数字图象处理　科学出版社　1982

10.(日)田村秀行等著　赫荣威等编译　计算机图象处理技术　北京师大出版社　1988

11.李铁芳　冯均泌　苏民生编著　遥感图象数字处理原理与应用　云南科技出版社　1987

12.(美) J.G. 莫伊克著　徐建平等译　遥感图象的数字处理　气象出版社　1987

13.郭德芳　遥感图象的计算机处理和模式识别　电子工业出版社　1987

14.福永圭之介著　陶笃纯译　统计图形识别导论　科学出版社　1978

15.方有清等著　遥感图象分析方法及其在林业中应用的研究　南京林业大学　1986

16.TM 图象及其应用译文集　北京大学遥感技术应用研究所　1987

17.SPOT 卫星译文集　北京大学遥感技术应用研究所　1987

18.杨凯等　遥感图象处理原理和方法　测绘出版社　1988

19.孙家广　许隆文编著　计算机图形学　清华大学出版社　1986

20.胡友元　黄杏元主编　计算机地图制图　测绘出版社　1987

21.贺仲雄编　模糊数学及其应用　天津科学技术出版社　1982

22.冯玉才编著　数据库系统基础　华中工学院出版社　1986

23.李克春主编　微机关系数据库管理系统 dBASE-III IV 及其应用　大连工学院出版社　1987

24.孙九林　熊利亚主编　国土资源信息科学管理概论　中国科学院国家计委自然资源综合考察委员会　1986

25.孙九林主编　国土资源信息系统的研究与建立　能源出版社　1986

26.何建邦等主编　黄土高原(重点产沙区)信息系统研究　测绘出版社　1988

27.黄土高原遥感调查试验研究　科学出版社　1988

28.资源与环境信息系统实验室年报　中国科学院国家计委地理研究所资源与环境信息系统实验室　1985　1986　1987

29.资源与环境信息系统国家规范研究报告　国家科委基础研究和新技术局资源与环境信息系统国家规范研究组　1984

30.美国环境系统研究所著　中国科学院国家计划委员会地理研究所资源与环境信息系统实验室译　ARC/INFO 地理信息系统　1988

31.涂序彦编著　人工智能及其应用　电子工业出版社　1988

32.郑春瑞编著　系统工程学概述（第二版）　科学技术文献出版社　1984

33.阎守邕等　地理信息系统发展趋势的分析　遥感技术动态　第1期　1988

34.天津市资源与环境信息系统空间数据标准化与各要素分类体系（讨论稿）　天津海岸带开发咨询公司　中科院遥感应用所　1988

35.梁启章　美国人口调查局地理支撑系统的发展和 TIGER 系统的基本特征(油印)　中科院国家计委地理研究所　1989

36.黄杏元等　土地资源信息系统及其应用的试验研究　环境遥感　第3期　1986

37.王玉如　县级微型计算机地理信息系统的建立和应用　环境遥感　第3期　1986

38.马蔼乃　地理信息系统浅释　遥感信息　第4期　1987

39.承继成　张绪定等　微机地理信息系统软件 PURSIS 技术报告　北京大学遥感技术应用研究所　1988

40.傅乐元　数字地形模型及其地形分析　遥感信息 第 2 期　1986

41.李铁芳等　TM 图象数字处理的体会　遥感信息 第 1 期　1988

42.俞纯绅等　利用 TM 影象进行大宗作物面积监测 遥感信息　第 4 期　1987

43.刘高焕　洪水灾情监测预报中遥感信息复合试验　遥感信息　第 7 期　1984

44.杨明辉　任维春　法国地理院 SPOT 图象应用研究的进展　遥感信息　第 2 期　1988

45.容洞谷　齐文虎　冷允法　水土资源合理利用规划模型　国土资源信息系统的研究与建立　能源出版社　1986

46.崔伟宏　黄秀华　王蓓等　在信息系统支持下黄土地区 PSL 模型的试验研究　黄土高原遥感调查试验研究　1988

47.张克权　张爱宁　郭仁忠　微机地理信息系统　MCGIS 子系统之一——统计分析、叠置分析与模型系统研究　黄土高原(重点产沙区)信息系统研究　1988

48.胡毓臣　费立凡　基于等高线扫描数据的数字高程模型 (DEM) 的建立 黄土高原(重点产沙区)信息系统研究　1988

49.褚广荣　关于遥感系列成图中几个问题的探讨　黄土高原遥感调查试验研究　1988

50.RSGS CCT FORMATS (英文油印)　中国科学院遥感卫星地面站　1987

51. Robert A.Schowengerdt Techniques for image processing and classification in remote sensing 1983

52. R.Michael Hord Digital image processing of remotely sensed data 1982

53.John A.Rechards Remote sensing digital image analysis An introduction Springer-verlag 1986

54.SPOTLIGHT The quarterly newsletter from SPOT image corporation 1986

55.SPOT Satellite-based remote sensing system Centre national d'etudes spatiales. 1986

56.EOSAT Landsat data users notes 1982-1989

57. Katherine B. Kidwell NOAA polar orbiter data users guide 1985

58.MICROPIPS reference manual 1986

59. W.B. Mitchell, K.A. Fitzpatrik, C.A. Ha'lam Geographic information syetsm development in the Carets project 1977

60.D.F. Marble.H.W.Calkins. D.J. Peuquet Basic reading in geographic information sgstems SPAD Systems. Ltd 1984

61.Mark S.Monmonier Compater-assisted cartography principles and prospects 1982

62.Michael Kennedy, Charles R. Meyers Spatial information systems: An introduction 1985

63.Proceedings of international workshop on geographic information system Beijing'87 1987

64.Technical papers 1986 ACSM-ASPRS annual convention volume 3 "Geographic information systems" 1986

65. GeoBased Systems Strings (TM) software description 1985

66.The American farmland trust A survey of geographic informa tion systems for natural resources decision making 1985

67.Cartography and Geographic Information System Division Soil Conservation Service U.S.Department Agricuhture Technical specifica tions for line-segment digitizing of detailed soil survey maps" 1983

68.David F.Rogers Procedural elements for computer graphics 1986

69.Michael B.Dillencourt, Hanan Samet: Extracting region boundaries from maps stored as Linear quadtrees proceedings third international symposium on spatial data handling 1988.8

70.R.J.Kauth and G.S. Thomas The tasselled cap-a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen

by landsat IEEE Symposium Proceedings of Machine Processing of Remotely Sensed Data 1976

71.Eric P.Crist and Richard C.Cicone A physically-based transformation of thematic mapper data-the TM TasseledCap IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Vol. GE-22 No.3 1984

72. Carlo Arcelli and Gabriella Sanniti Di Bata: A thinning algorithm based on Prominence detection Pattern Recognition Vol.13. No.3. 1981

73.J.L.Star, M.J. Cosentino, T.W. Foresman Gegraphic information ystems: Questions to ask before it's too late Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium 1984

74.B.C.Forster; Derivation of atmospheric correction procedures or Landsat MSS with particular reference to urban data Int.J.Remote Sensing, 5 1984

75.R.E. Turner, M.M. Speneer Atmospheric model for correction of spacecraft data. Proc.8th Int. Symp. on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor Michigan 1972

76.P.Switzer, W.S. Kowalik, R.J.P.Lyon Estimation of atmospheric path-rediance by the covariance matrix method Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Vol 47 No 10 1981

77.Robert M.Haralick, Layne T.Watson, Thomas J.Laffeg The topographic primal sketch The International Journal of Robotics Research Vol.2 No.1 Spring 1983

78.A.H.Strahler, T.L.Logan Improving forest cover classification accuracy from landsat by incorporating Topographie informafion in Proc. 12th Int. Symp. Remote Sensing Environment 1978

79.C.F Hutchinson Techniques for combining landsat and ancillary data for digital classification improvement Photogrammetr. Eng. Remote Sensing Vol. 48 1982

80.T.Lee, J.A.Richards, P.H.Swain: Probabilistic and evidential approaches for multisource data analysis IEEE Transactions on Geoscie-

nce and Remote Sensing Vol.GE-25 No.3, 1987

81.罗汉民　吴诗敦　谭克光合编　气候学　气象出版社

82.陈述彭　李志荣　王渊　地球资源卫星应用系统及其智能化“国土资源遥感”　1989年第1期

83.刘慧平　建立小流域地理信息系统方法初探——以山西省柳林县小沟流域为例(硕士毕业论文)

84.余又生　用 TM 资料解译 1:5 万土壤图的实验研究——以双阳县为例(硕士毕业论文)

85.承继成　张绪定编　资源与环境信息系统概论上册(讲义)

86.高校联合遥感应用研究中心与山西省农业遥感应用研究所　黄土高原三川河流域区域治理与开发信息系统总结系列材料　1990.12

87.彭望琭　地形描绘方法在黄土丘陵沟壑地区的应用　环境遥感　第4卷第1期

88.彭望琭　TM 数据的 Kauth-Thomas 变换在盐渍土分析中的作用　环境遥感　第4卷 第3期

89.W. L. Peng, H. P. Liu, W. Wang A GIS Approach for Water and Soil Conservation and Planning Proceedings of the 2nd Infernational Workshop on GIS 1990

90.W L. Peng, T. J. Li Digital Analysis of Salinity of Soil Using Multisource Data Proceeding of the 11th ACRS 1990