数字地图制图原理

吴　凡　宋　鹰
汪汇兵　乔庆华

武汉大学
资源与环境科学学院
地图科学与地理信息工程系

二〇〇二年八月

前言

计算机技术的出现，对地图的生产和应用方式乃至地图的含义都产生了深刻的和变革性的影响。数字地图的生产过程不再是模拟以往的手工操作流程，取而代之的是计算机和现代通讯技术支持下的新的作业方式和作业要求。数字技术渗入地图生产，给古老的地图制图学科带来了新的发展机遇，同时也提出了新的挑战，迫使地图学者重新思考地图学实践并且更加从数量化的角度对待地图学理论的发展。在此趋势下，以数字制图技术为支撑，出现了一些新的发展方向和研究领域，如地理信息系统、虚拟现实技术与虚拟地理环境、地图模式识别技术、地图数据库技术、全数字化地图生产系统、智能化数字地图制图系统、遥感图像的处理和应用、GPS技术与数字地图的结合等，使与地理信息相关的学科之间的界限日益模糊，这对数字制图技术今后的发展有着决定性的影响。数字地图学作为地理空间数据处理与表达的基础理论之一，对新兴的地球空间信息科学的发展具有十分重要的意义。我校测绘和地理信息类各本科专业大多开设了数字地图制图原理课程，为此我们编写了《数字地图制图原理》讲义以供教学参考。

本讲义共分九章，从数字地图制图的不同方面阐述了有关的基本概念和原理，以及数字地图在决策支持中的作用。每个章节都附有必要的插图或表格帮助解释关键问题。本讲义还提供了解决当前数字地图问题的一些算法，但没有列出程序代码或是讨论程序设计（有关的程序代码将陆续放到我系的网站上以供本校师生下载）。

本讲义第一至第四章由吴凡、汪汇兵编写，第五章由吴凡编写，第六至第七章由吴凡、乔庆华编写，第八、九章由宋鹰编写，最后由吴凡统、定稿。由于时间仓促和水平所限，不当和错误之处敬请指正。

吴 凡

二〇〇二年八月于珞珈山

目　　录

第 1 章 **绪论** 1
1.1 计算机辅助地图制图的发展 1
1.2 数字地图的数据模型观 2
1.3 地图数据处理系统 4
第 2 章 **几何分析基础** 6
2.1 地图与几何学的基本关系 6
2.2 地图目标 10
2.3 笛卡尔坐标系 13
2.4 矢量与矩阵 15
2.5 图形的几何变换 20
2.6 点线关系 25
2.7 线与面的测量 31
2.8 本章小结 33
第 3 章 **地图数据结构与数据组织** 34
3.1 拓扑概念基础 34
3.2 文件结构 39
3.3 数字地图的空间结构 44
3.4 拓扑数据模型及其结构 49
3.5 剖分数据结构 68
3.6 面向对象的数据模型及其结构 72
3.7 本章小结 80
第 4 章 **地图数据的获取与预处理** 81
4.1 编码方法 81
4.2 测量与比例尺 83
4.3 数据获取 86
4.4 预处理 89
4.5 本章小结 99
第 5 章 **数字地图的自动综合** 100
5.1 地图自动综合的目的与任务 100
5.2 地图自动综合的策略与概念框架 102
5.3 地图自动综合的基本方法 112
5.4 本章小结 145
第 6 章 **地图数据的可视化** 146
6.1 地图信息的传输过程 146
6.2 地图数据的二维制图表示 148
6.3 地图数据的三维表示 160
6.4 本章小结 160
第 7 章 **数字地图分析** 160
7.1 地图叠置分析 160
7.2 专题组合 160
7.3 地图分析框架 160
7.4 本章小结 160

第 8 章 **数字地图的标准化** 160
8.1 标准化的基本内容 160
8.2 标准化的基本方法 160
8.3 数字地图标准体系表 160
第 9 章 **数字地图工程** 160
9.1 数字地图工程的概念 160
9.2 工程策划 160
9.3 工程的组织与实施 160
参考文献 160

第1章 绪论

计算机技术的发展及其在地图学中的应用对地图制图产生了深刻影响。在应用早期，计算机被作为模仿传统手工生产地图产品的工具。很多术语都表明了这种发展，如“自动制图”、“计算机辅助制图”等，但它们并没有很好地揭示这种革新的重大意义。计算机引入到地图学中已彻底改变了人们对地图制图的理解以及实践的方式。同时，由于任何拥有制图软件包和合适硬件的人都能生产地图或类似地图的产品，因而计算机的应用也影响了专业地图工作者对制图原则和地图学理论的重新思考。

1.1 计算机辅助地图制图的发展

很难将计算机技术从数字地图实践中分离出来。很多解决实际问题的算法设计甚至理论发展都受到现有技术的深刻影响。计算机辅助制图的发展可划分为三个时期：1）20世纪60年代初，制图工作者的态度是“走一步看一步”；2）20世纪60年代末到70年代，制图工作者运用计算机辅助技术对以往通过手工或其它技术编制的地图产品进行再制作；3）20世纪80年代末以后有了一整套新的生产工艺可用于生产新的地图产品。

在计算机运用于地图学领域的早期，制图的专业外围设备还不存在或者不成熟。图1－1是一个包括中央处理器CPU的基本运算系统。外围存储设备包括硬盘、磁带机等，输入设备如卡片机等，输出设备如行式打印机等。卡片、硬盘和磁带构成了系统的基本存储单元。CPU用于执行所有的控制操作。

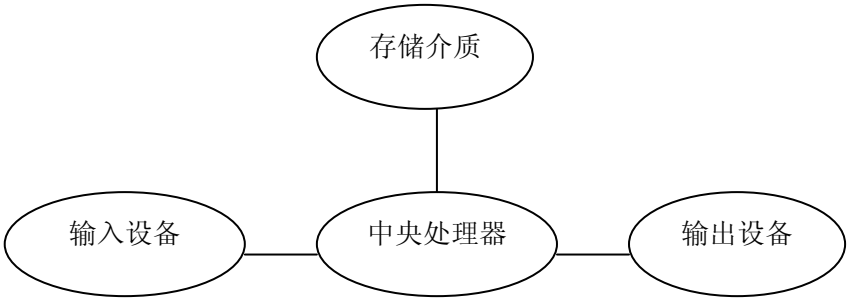


图 1－1 基本运算系统

早期的制图程序有如SYMAP和CMAP等，SYMAP系统软件是由哈佛大学计算机图象与空间分析实验室开发的，CMAP被设计用来使用行式打印机作为显示设备。但是，标准的打印单元是1/6（或1/8英寸）乘1/10英寸大小，很难达到较高的图形显示的精度要求。另外，如果原空间信息是多边形地区，系统必须将其转换为矩形单元进行打印。SYMAP拥有一些算法能有效地处理这类问题。在这个阶段，计算机辅助过程更多的是手工而不是自动的。而且，

将地图数据输入到系统中基本上是一个手工过程；只是CPU运算和显示转换是自动的。

电传打字机终端减少了将数据输入到处理系统中的步骤。键盘使得用户能直接将数据输入到系统中，以往的卡片穿孔的做法已经过时了。电传打字终端促进了交互式系统的发展，即同一单元既可作为输入单元也可作为输出单元。但是，电传打字终端只能进行硬拷贝输出。视频显示终端又带来了一个有意义的改变，因为图象能显示在屏幕上（软拷贝），并且屏幕可重复使用以显示新的图象而不必产生硬拷贝。

由于意识到计算机能处理空间信息，从而产生了对专业设备的需求。带有专用打印头的打印机得到了发展，其大小和符号均可改变。存储管和阴极射线管的发展使得人们能在屏幕上显示地图和其它图象，而图象的刷新技术还使得能在屏幕上显示动画。

然而这些显示技术的进步，并不能使计算机辅助制图过程自动化，只是改善了输出效果，但几乎仍不能与低效的手工匹敌。数字化仪和扫描仪的引进大大减少了数据输入的工作量，并且大大提高了工作效率。这两项技术都能使硬拷贝地图变为数字图形或图象。

相对于硬件的发展速度，软件的发展相对滞后。20世纪70年代产生了大量的制图程序，也展开了多项研究。但是这些软件产品中很少有将新的知识融入到系统之中，有些计算机辅助制图系统能将传统地图文档资料集成到系统之中，出现了地图数据库的雏形。80年代后，微电脑和激光照排技术的出现再一次改变了制图技术，掀起了又一轮地图软件产品开发的高潮，国内外出现了许多数字地图生产软件系统（CPS）和具备数字制图功能的GIS软件。

更为重要的是，电脑及其相关的数字硬件包括扫描仪和传感器使得人们能对感兴趣的空间分布进行显示和分析。数字地图学与数字图象处理、计算几何等一起在土木工程、计算机科学、应用数学和资源与环境科学领域的应用正在兴起。这些领域传统上的界限变得越来越模糊，制图工作者不再是空间显示与分析领域的唯一参与者，甚至不一定是主要参与者。地图学与数字地图学包孕在地理信息科学（GIScience）或地球空间信息科学（Geomatics）的理论框架之内，地图的形式与功用以及制图过程都需要进行重新认识。

1.2 数字地图的数据模型观

地图是自然环境和社会经济与文化的图形表达，它是真实有形的。计算机迫使我们重新思考传统地图所具有的可视性与真实可触性特征。

根据传统地图的特性（可视性和真实可触性）可将地图分为实地图（Real Map）与虚地图（Virtual Map），其中虚地图又分三类，见表1－1。实地图是能直接可视和永久存在的任何制图产品，它包括大多数传统地图产品。第一类虚地图，能直接可视，但只具有短暂的真实性，显示在CRT终端上的地图即归为此类；第二类虚地图，具有永久真实性，但是不能直接作为地图可视，存储在介质中的空间数据可归为此类；第三类虚地图，是既没有可视性也没有真实可触性，磁盘或磁带等存储媒介上的数字图象即归为此类。

表 1－1　地图产品的分类

永久存在	非永久存在
实地图： 常规纸质地图	第一类虚地图： CRT 地图图象

	地球仪	a）刷新
直接	正射影象地图	b）存储管
可视	机器绘制的地图	c）液晶屏
	塑料浮凸地图	认知地图（二维图象）
	块状图	
	第二类虚地图：	第三类虚地图：
	地名录	数字内存（数据）
不直接	互补色立体影像	磁盘或磁带（数据）
可视	传统野外数据	视频动画
	存储的全息图	数字地形模型
	存储的傅立叶变换	认知地图（关系型地理数据）
	光盘数据	

资料来源：Moellering(1980)

除了地图形式外，地图的另外一个重要特征是功用。地图要实用，就必须能将信息有效地传递给读者。读者能从地图的信息提示中区分新的或不同的信息。在地图生产时，制图者必须从大量冗余信息中提炼和组织信息。

基于这一点，可以认为地图是对现实环境的制图抽象。这个抽象过程包括对地图信息的选取、分类、化简和符号化。信息的选取取决于地图的用途，分类是按照地图目标属性的一致性或相似性进行归类，化简用来剔除不必要的细节，符号化是用地图符号呈现真实的地理事物。

从最一般意义上说，地图是一个数据模型。数据模型可定义为“实体及实体之间关系的一般性描述”(Peuquet,1984),其功能是通过多种介质实现的。**图标模型**(Iconic models)仅通过比例缩放来再现现实世界，如海岸线侵蚀模型。它试图通过缩小尺寸来保持真实世界的所有内容，以至于在实验室里就能模拟表达。**模拟模型**（Analog models）主要是根据相似性原理来再现现实世界的，它也包括比例放缩。**符号模型**（Symbolic models）用符号来表达地理特征，它是对现实世界的高度理想化的再现。实地图是模拟模型与符号模型的综合。举例来说，传统的专题地图由两个重要的部分组成，基于地理特征的地理底图（表达空间属性）和专题覆盖层（表达非空间属性），见图1－2，前者就是模拟模型，因为它将真实世界按比例缩放以绘制到地图上的，后者就是符号模型，因为它以一种抽象的地图语言（如分级圆、面状填充等）来表达属性信息。

计算机技术给地图数据模型带来的一个重大影响就是将地理底图进一步抽象成作为符号模型的数字图象。计算机领域没有用于表达社会文化和自然环境的视觉相似特征，它是通过程序控制的二进制代码来表达的。

地图作为表达客观世界的一种数据模型，在数据库中表现为有序的空间数据，这就是数字地图（高俊，1999）。数字地图是在一定坐标系统内具有确定坐标和属性标志的制图要素和离散数据在计算机可识别的存储介质上概括而有序的集合。具有计算机可识别性、可量算性、可分析性、可传输性及数字与模拟地图的互转性（王家耀，2001）。除此以外，数字地图还具有存储与显示的分离性特征，这使得数字地图具有更快的和灵活的生产、制作、表达和更新能力，是生产电子地图和纸基地图的基础。而电子地图是建立在数字地图的基础上，在电子计算机屏幕上显示的地图，是数字地图制图表示的一种现代形式，它具有很

强的动态表现能力和多媒体的表现手段，同时它的信息的传输具有极强的可选择性。

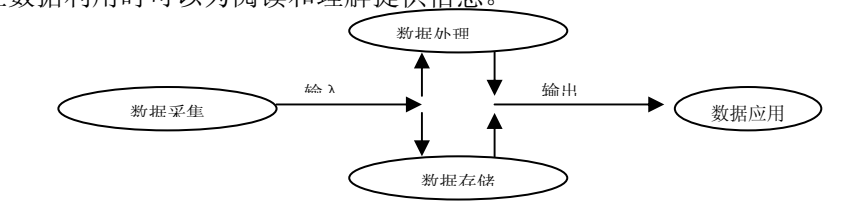


（a）地理底图（模拟模型）　（b）专题覆盖层（符号模型）　（c）专题地图

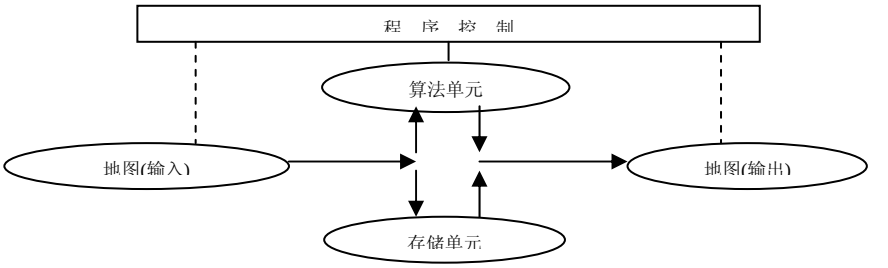
图 1－2　专题地图模型

1.3 地图数据处理系统

地图数据处理是信息处理的一种特殊形式。一个数据处理系统包括数据采集、数据处理、数据存储和数据应用（图1－3a）。数据处理过程又可进一步划分成数据输入、存储单元、算法与控制（图1－3b）。在这个框架中，传统地图是一个数据存储介质，因为它大多数以书的形式为人们所使用。地图在数据处理中既可以作为输入，也可以作为输出。数据处理的结果在数据利用时可以为阅读和理解提供信息。



(a) 数据处理系统的一般框架



(b) 数据处理阶段

图 1－3 一个形式化的数据处理系统

地图信息处理系统是将地图信息从一种形式转换为另一种形式的一系列变换过程。先是进行数据采集变换，这时的核心问题是对原始数据进行筛选；然后，采集的数据又要在制图变换中被转换为地图；最后，地图被读者阅读、理解，并将之转换为心象图象。

数字地图信息处理系统的简单形式是要能将传统地图转换为数字地图、软拷贝地图和硬拷贝地图，见图1－4。原始数据通过数据获取从现实世界提取出来，进而通过数据组织转换为数字地图。软件产品能产生软拷贝地图并能在终端上显示虚地图，或直接在绘图机上产生硬拷贝地图。一旦有了软拷贝地图，又有了相应的外围设备，就能产生硬拷贝地图。

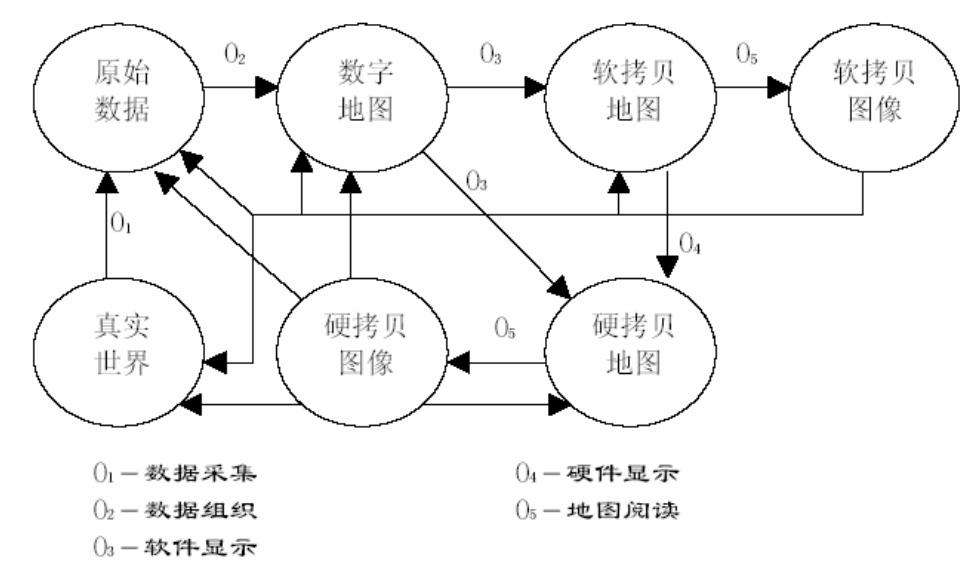


图 1－4　地图信息处理系统

计算机技术给地图学带来的另一个重大冲击是数据处理系统功能的分离。存储（数字地图）与显示（虚地图）的分离促进了地图数据的存储与更新。它也允许空间与非空间信息的单独存储。制图工作者可以更好地进行分类、化简和符号化而不必为此产生硬拷贝地图。

上述的系统框架允许人机交互，从而可将专家知识融入系统以指导用户构建自己的地图产品。地图不只是地理信息的数据表达模型，也是空间分析的标准模型。这个标准模型是地图信息处理系统在高效、准确地显示与解译信息时的理想模式。

第2章 几何分析基础

我们怎样使计算机能数字化地“看见”人们以视觉方式看到的东西呢？这是数字地图学所要面临的一个基本问题。多少世纪以来，人们一直以直尺和圆规等绘图工具来手工绘制几何形状，现在必须要将其转换为能激活和指挥图形输出设备（如绘图机、CRT等）的机械笔或电子束进行自动化绘图的一系列指令。这是比较复杂的，因为欧几里德几何学是通过逻辑参数推演以及经过证明的定理和公理来解决问题的，现在要将其替换为以代数方法来解决几何问题的解析几何学，通过代数运算来取代手工操作。

这个转换的意义已经超出了仅仅是对地图产品的复制。在数字地图学中，已经没有视觉上经验的限制。气压、气温或土地收益等的三维表面，它们不具有自然可视性，但可以以几何形式表达。同样，像数学函数等也可以转换为几何形式。

由于地图目标是模块化的，因此复杂目标都是由简单的原子目标组成。制图操作也是模块化的，后面章节所讲述的复杂操作也都是由许多简单操作组成的。数字地图学与解析几何、计算几何关系甚密。限于篇幅和课时，本章将介绍解析几何的基础知识，以为数字地图学中的许多算法提供理论基础。而Shamos计算几何原理及其在数字地图学中的应用则在我系硕士研究生的相应课程和教材中讲述。

2.1 地图与几何学的基本关系

数字地图学的发展需要建立一个能处理空间事物的概念框架。描述空间事物的分布特征有四个基本空间概念：①方向：相对于某点射线的定位。方向关系是非常重要的，因为它们给定了目标之间相互参照的位置关系；②距离：空间中点之间的物理间隔。在地理分析中，目标之间空间相互作用的程度是随距离的增加而降低的；③邻接性或相关位置：地图目标之间存在的邻近或邻接关系。任何目标周围都存在一个邻域，在该邻域中包含有以某种方式与之相联的其他元素。空间物体的邻接关系在空间分析中很重要，因为空间事物总是相关的；④绝对位置：指点通过测量获得的物理位置，与其他点的位置无关。

地图是表达这些空间概念的媒介，它与几何学一样，也作为一种空间语言。尽管几何学起源于公元1700年前的古埃及时代，但是第一次用几何学系统地解决现实世界问题还要归功于欧几里得(约公元前3世纪的古希腊数学家)。他不仅建立了用于证明的几何学公理方法，而且还确立了算法基础。算法就是将一个问题的解决分解为一系列有限的步骤，这对于数字地图学意义重大，因为其任务之一就是寻找有效的算法。

欧几里得几何学差不多维持了2个世纪的完整性，对地图学和地理学甚至数学本身产生了重大影响。20世纪，匈牙利人Bolyai和俄国人Lobachevski分别否定了欧几里得的平行假说，提出了一个新的几何学说，称为双曲线几何学（Hyperbolic Geometry），提出经过某给定点与某条直线（不经过该给定点）平行的直线不止一条。随后其它的几何学也应运而生，形成了几何学体系，图2－1。

要理解这些几何学分支的关系，需要基于集合理论进行形式化定义。具有n个元素的**集合**X可记为X = {x_1, x_2, x_3, … ,x_n}，元素x要么是集合中的一个元素，标记为 $x \in X$ ，要么不是，记为 $x \notin X$ 。举例来说，我们将集合X定义为华东地区所有六省一市名称的集合，X＝｛上海市，山东省，江苏省，浙江省，安徽省，江西省，福建省｝，则上海市是X中的一个元素，而陕西省则不是。一个特殊的集合是**空集**，标记为ø，它不具有任何元素。集合中的每个元素都是它本身的集合，如上海市本身就是具有一个元素（即上海市）的集合，上海市也可以是其它元素的集合，如可以是构成上海市面域的点集。

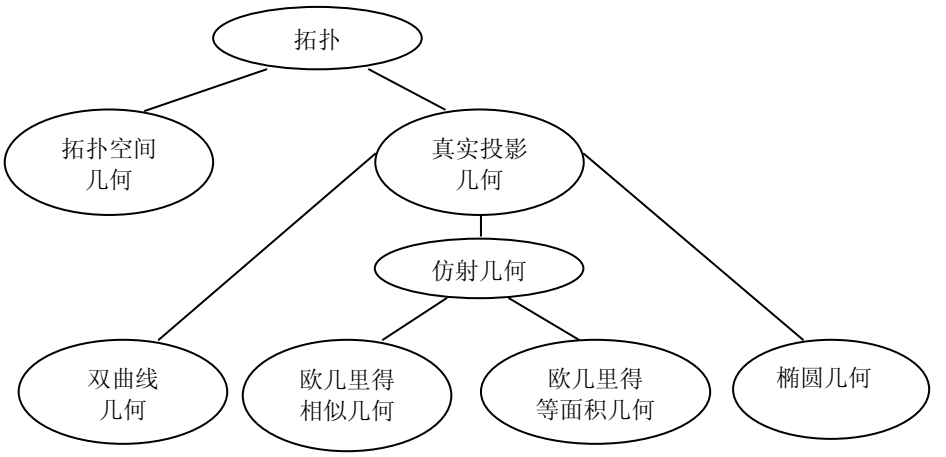


图 2－1　几何学体系

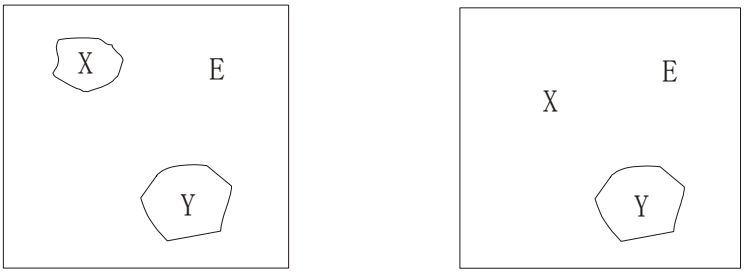
在地图学中，某个比例尺上只具有一个元素的地理特征通常在其它比例尺下由多个元素构成。如果X中的每个元素也是Y中的元素，那么X就是Y的子集，记为 $X \subset Y$ 。例如，如果Y是中国所有省名（包括华东六省一市）的集合，那么X就是Y的子集。

交集是指两个集合的共同元素，记为X∩Y＝{x｜x∈X and x∈Y}，即既属于X又属于Y的元素。举例来说，假定X是构成湖北省轮廓线的点集，Y是在同一地图上构成河南省轮廓线的点集，那么，它们的交集可记为，Z＝{X∩Y}，表达了构成这两省共同边界轮廓线的点集。

并集是指包括两个集合所有元素的集合，记为(X∪Y)＝{ x｜x∈X or x∈Y}，两个集合中的共有元素在并集中只算作一个，即(X∪Y)＝{X＋Y－(X∩Y)}。

差集，记为(X－Y)＝{x｜x∈X and x$\notin$Y}，是所有属于第一个集合而不属于第二个集合的元素，即第一个集合去掉两个集合交集元素的部分。

假定集合E是一个全集，代表平面上所有的点。平面上的任何点、线或面都是E的子集。集合X和Y是E的两个相离子集（它们的交集为空集，即（X∩Y）＝ø，见图2－2a)。如果(X∪Y)＝E并且（X∩Y）＝ø，则X与Y互补，X称为Y的补集，Y也是X的补集，见图2－2b。X的补集记为X′ 。



(a) 相离子集　　(b) 补集

图 2－2 相离子集和补集

笛卡尔积，给定两个集合X和Y，一个新的集合称为X和Y的笛卡尔积，记为X^{x}Y＝{(x,y) | x∈X and y∈Y},包含所有的（x,y）有序对，这些有序对中，x是X的一个元素，y是Y的一个元素。例如，假设X是华东地区，Y是中南地区（即湖北省，河南省，湖南省，广西壮族自治区，广东省），则Z＝X^{x}Y＝{（上海市，湖北省），（上海市，河南省），……，（福建省，广东省）}，每个省对中，第一个元素是华东地区的省名，第二个元素是中南地区的省名。

函数，定义域上的每个元素，在值域上存在唯一一个元素与之对应，这种对应关系就称为函数，因此函数关系可以记为$y=f(x)$。假设X是中国各省的集合，关系$R_1=\{(x,y)|省x与省y共享一条边界\}$，x的定义域和y的值域是所有与其他省共边的省。海南省既不属于定义域也不属于值域，因为尽管它有边界，但它并不与我国其他某个省共边。这个关系是对称的，但不可以传递或可逆。如果定义域中的某个省有多条边界与其他省共享，则这个关系便不是一个函数。然而，如果X是我国所有居民地的集合，关系$F=\{(x,y)|y是包括居民地x的省府\}$，则F是一个函数，因为每个省尽管可以有多个居民地，但都只有一个省府。函数还可以是表达定义域与值域之间的多对一关系，所以值域中的某个元素可能对应定义域中的多个元素，但定义域中的每个元素只能有一个值域中的元素与之对应。每个函数都是一个关系，而每个关系不一定都是函数。

二元函数，定义域中的每个元素只对应一个值域上的元素，值域上的每个元素也只对应定义域上的一个元素。二元函数也称为变换。设X是所有居民地的集合，则关系T＝{(x,y)|x为每个省具有最多人口数的居民地，y是包含x的省府所在地}是一种变换。因为每个省只有一个人口数最多的居民地和一个省府所在地。对集合X的任意变换，x和y都是一一对应的。

地图的空间属性会根据对其不同的空间变换而发生改变。

等面积变换：图2－3，在等面积变换中，线的长度（以至于区域的面积）保持不变，等面积变换只允许平移和旋转。因此，方向、距离和连接性均不变。

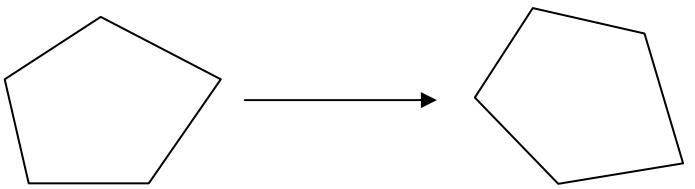


图 2－3　等面积变换

相似性变换：图2－4，包括了缩放，因此，距离不再固定不变。但角度保持不变，所以方向不变。该变换目标形状保持不变，因此很容易识别熟悉的地图目标。

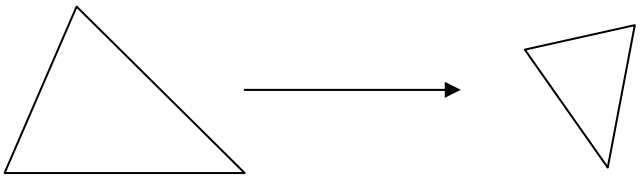


图 2－4 相似性变换

仿射变换：图2－5中，距离与角度都不再保持不变，但是平行关系与线性状态保持不变，方向虽然改变，但仍保持一致。仿射变换常用于校正卫片和地图数字化（见第四章）。

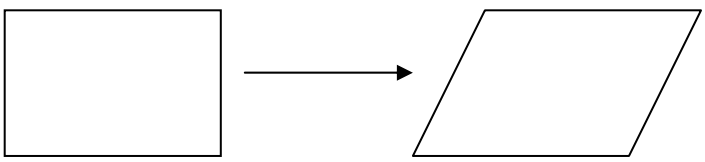


图 2－5 仿射变换

投影变换：图2－6，距离、角度甚至平行关系都不再保持不变，因此，目标的面积与形状都可能改变。投影变换用于地图投影和测量当中。等面积投影对于维持形状的真实性效果很差，等角投影能保持形状特征但使面积产生最大变形，但二者都能保持目标之间的连接性。

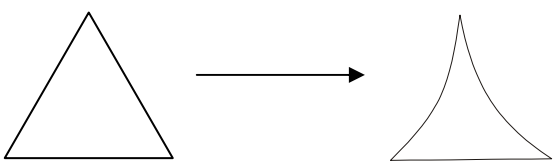


图 2－6 投影变换

拓扑变换：图2－7，几乎在所有的地图中，不管距离与方向如何变化，都能保持地图目标间的连接性。在拓扑几何中，只有连通性与邻接关系能得到保持。早期数字地图发展的一个缺陷就是忽视了涉及多边形区域的地图拓扑关系（见第三章）。这严重制约了数字地图产品的灵活性，降低了数字制图处理系统的效率。

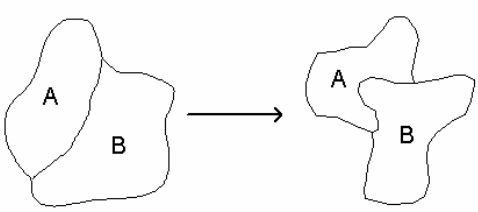
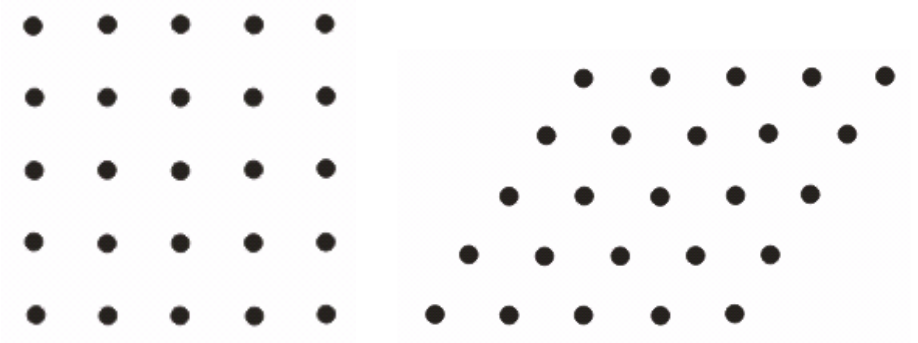


图 2－7 拓扑变换

基于以上概念，可以给地图作一个新的定义，**地图实体**是存在于真实世界的一个元素，以符号化或模拟形式表达出来后，即成为**地图目标**（NCDCFD，1988）。数字地图目标即是实体在数字存储设备中以符号化形式的表达，一般用地图特征来指代地图实体或其相对应的目标。地图就是一系列地图目标的集合，这些地图目标反映了地表，地表附近甚至天体表面的自然或人文社会特征。

2.2 地图目标

数字地图目标的本质是由数字图象编制的模式即数据模型决定的。矢量数据模型和栅格数据模型是两种基本的数字制图模式。在矢量模型中，平面空间是一个连续点集，而在栅格模型中，平面空间是用被称为二维格网点的离散点集来填充的，图2－8。栅格空间也指格网模型或剖分模型，格网模型通常分为方格网和三角网。



(a)方格网点　　(b) 三角网点

图 2－8　不同的格网模型

在矢量模型中，观察的基本单元是地图上的线，而栅格模型中的基本单元则是一个格网所示的空间单元。这两种数据模型的另一不同之处在于：矢量目标以线状特征分隔面域，而栅格目标则以线状面元来标识面状特征。因此，对于前者，面积是由线包围起来的，对于后者，线是通过面域之间的分隔（断开）来识别的。但这并不意味着矢量模型不能处理点和面，点恰恰是退化的线，而面恰恰是封闭的线。

美国数字地图数据标准国家委员会[NCDCDS，1988]已经为数字地图目标建立了多种定义。首先，地图目标应能够组合空间属性的绝对位置和相对位置概念。NCDCDS采用了“几何”与“拓扑”术语，而不采用绝对位置和相对位置概念；第二，地图目标必须是模块化的，使得低维目标可以用来定义高维目标；第三，地图目标能够明显标识所代表的地理实体，可以通过几何学中的平面、双曲线及椭圆等来研究。这意味着可能要用到平面或球面坐标系统。最后，如果有新的理论或技术产生，地图目标则必须能在日后得到扩展和更新。

以下是从NCDCDS的报告中改编的关于地图目标的定义，目前只包括那些有空间定位概念并拥有绝对位置的目标。这些目标都可模块化和具有维数等级，即所有的二维目标都可由0维目标和一维目标组成，一维目标可由0维目标组成。

- 0 维目标：

点：二维空间中有绝对位置的0维目标；

端点：表示一维目标终止处的点；

网格点：表示二维剖分空间中有绝对位置的0维目标；

- 1维目标：

线段（弧段）：二维空间中，两个端点之间的非自相交曲线的点的轨迹，图2－9a；
轮廓线：两个端点绝对位置相同的线，图2－9b；
直线段：二维空间中，两个端点之间不改变方向的点的轨迹，图2－9c；
串：首尾连接的线段序列，但串的首尾线段的起止端点不相接，图2－9d；
环：首尾连接的线段序列，这些线段形成一个环，图2－9e。

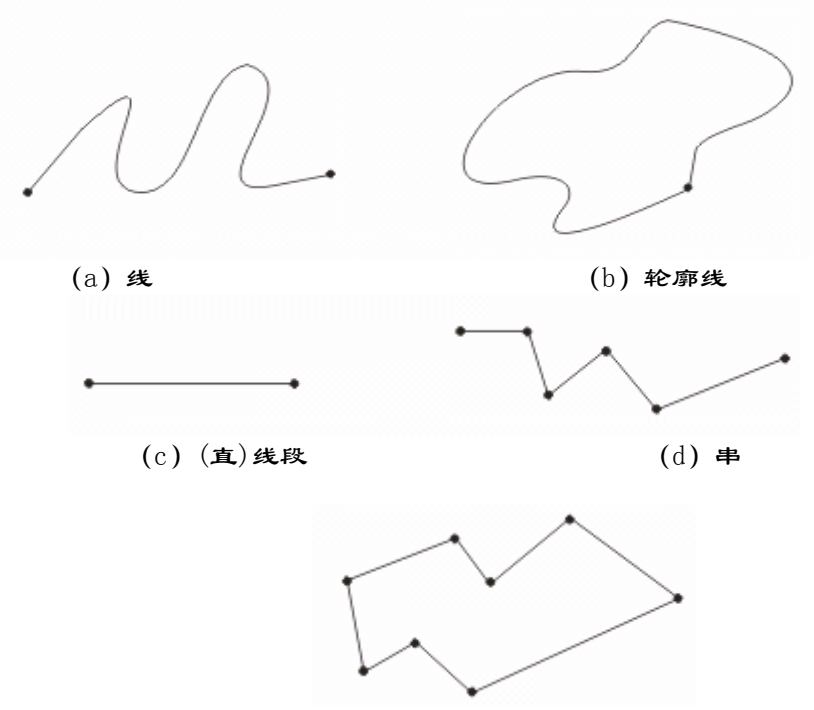


图 2－9 一维目标

所有的一维目标既可以是有向的，也可以是无向的。有向的一维目标意味着点的轨迹是从目标的一端移动到另一端。前者称为始点或起点，后者称为末点或止点（对于环来说，始点与末点是同一点）。移动的方向用箭头表示，图2－10，基于移动方向就产生了目标的左侧和右侧。

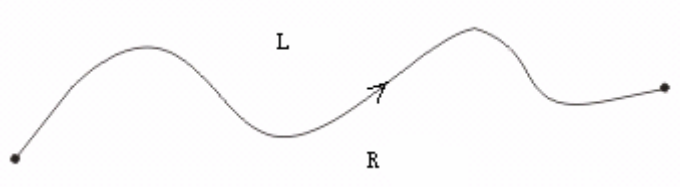


图 2－10 一维目标的移动方向

- 2维目标：

面：由连续二维目标包围的内部（可能包含内部环），图2－11a；
区域：由一个或多个外轮廓线和0个或多个不相交的内轮廓线构成的面，图2－11b；

背景区域：是区域的补集，图2－11c；
多边形：一个外环和0个或多个不相交的内环构成的面，图2－11d；
背景多边形：多边形的补集，图2－11e；
像素：组成图象的最小不可分单元；

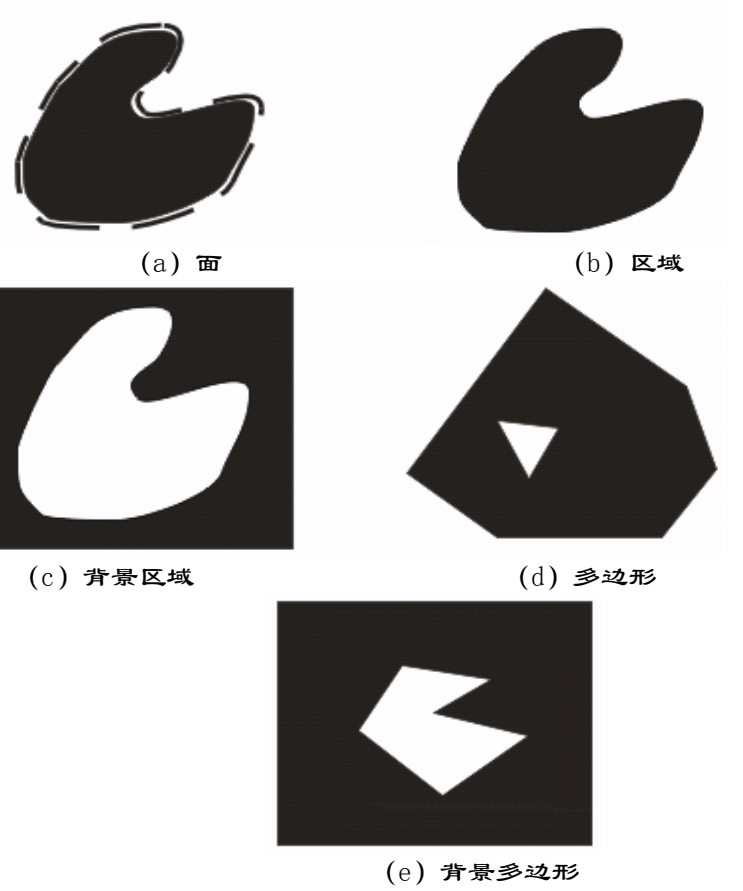


图 2－11　二维目标

网格单元：剖分空间的规则单元，常见的网格单元有长方形、方形、三角形和六边形，图2－12。

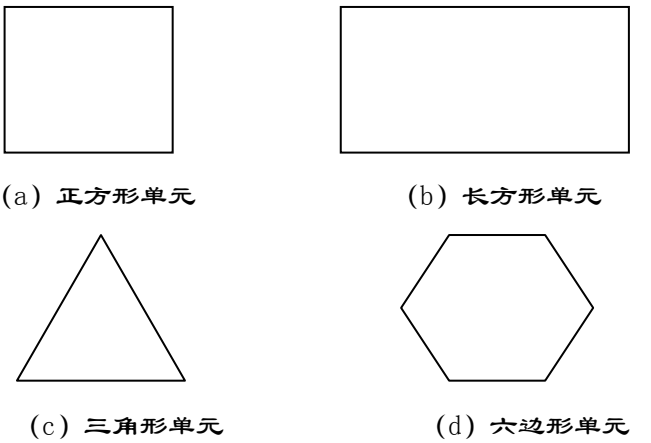


图 2－12　不同形状的网格单元

背景区域（或背景多边形）的概念是用来充满二维空间的。地图主体通常是指制图实体部分，在二维表面上，地图主体在边界处终止，地图主体的终止处恰恰是背景的开始处。换句话说，背景是地图主体的补集，二者的并集充满了整个二维平面。

2.3 笛卡尔坐标系

最简单的几何目标是点，最简单的代数目标是实数或标量。所有的实数都可以通过几何形式来表达。即通过带有刻度值的直线来表示，图2－13。每个实数都可在刻度线上找到一个对应点。刻度线建立了几何点和代数数值之间的对应关系。刻度线上的点p就是实数r的图形表达。反过来，对于每个实数r，刻度线上只存在唯一点p与之对应，它们是一一对应的，见图2－14。

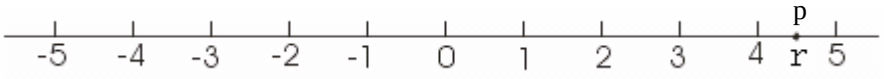


图 2－13 刻度线

任何实数都可以十进制来表示，有无穷的实数数字，实数的一个重要子集是整数。

刻度线上，对应于数值0的点称为原点。尽管其位置可以任意指定，但它是所有其它点（实数）的参考点。对应于数值1的点称为单位点。原点与单位点之间的距离是刻度线上用于量测距离的单位长度。如果x是刻度线上一个点所表示的实数，则其与原点之间的距离称为x的绝对值，记为|x|。一个数值的绝对值表示其与原点的距离，而不管其位于原点的左侧或是右侧。刻度线上任两点的距离等于它们之差的绝对值，如，－3与＋5之间的距离为｜－3－（＋5）｜，即为8。绝对值始终为非负值，距离值也是非负数。

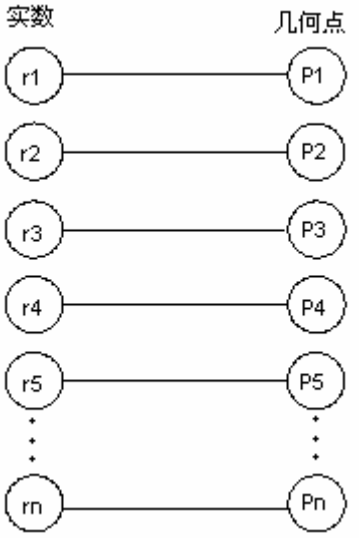


图 2-14 数与点的对应

刻度线能有效地代表任何一维目标，然而，绝大多数地图目标都是二维的。因此，刻

度线和实数的概念需要扩展到二维空间。如果R是一个实数集，则R×R（通常记为R^2）称为R本身的笛卡尔积。如果两个刻度线相互垂直，则两个刻度线都称为坐标轴。通常，水平方向的坐标轴称为X轴，垂直方向的坐标轴称为Y轴，图2－15。二维欧氏空间（平面）上的任一点都可用一对实数表示，这对实数由X和Y轴上值组成。每个轴上的值都是由这点发出的与坐标轴正交的直线与坐标轴的交点确定的，如图2－15。通常，先给出X值，（x ， y）就是点p的坐标值，也记作p（x ， y)。在笛卡尔坐标系中，X值称为横坐标，Y值称为纵坐标。两个坐标轴将坐标平面分成四个象限（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ），图2－16。第一象限，X和Y值均为正；第二象限，X值为负，Y值为正；第三象限，X和Y值均为负；第四象限，X值为正， Y值均为负。

因为原点的位置可以任意设定，在很多情况下，只需要利用第一象限（正象限）来对地理特征编码和显示，许多显示设备（硬件空间）也只用这个象限。在2.5节，我们将看到如何将其它象限的地理特征移到第一象限。这种将二维空间划分成四部分的方法也是栅格型四叉树结构的基础（第三章）。有些显示系统中，纵坐标轴上的正值在原点以下。

理论上，坐标轴上的数值间距可以划分成更小的间距以表示精度更高的实数（小数点后的位数更多），但任何计算机都受到机器字长的限制，它所表示的数据只能有一定的有限位数。

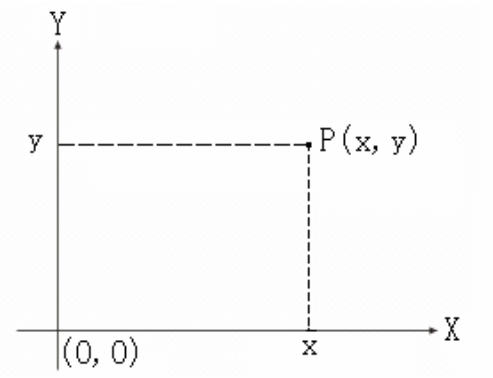


图 2－15　笛卡尔坐标平面

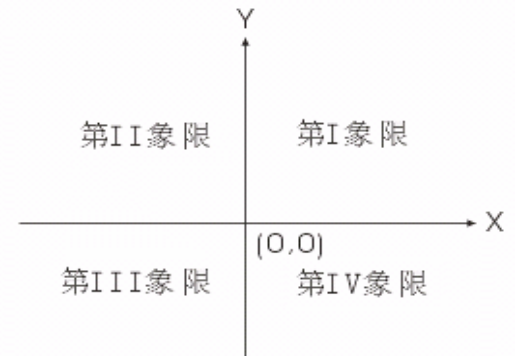


图 2－16　坐标平面的四个象限

同理，所有的图形输出设备也都有几何显示精度的限制，不可能无限细分。超出设备精度的两个点将不能区分，因此在定义用户空间时，应考虑设备的精度要求。事实上任何显示设备都不能显示无限细分的连续点序列，在某个固定间隔内，只能显示有限个点，这点不难理解。在硬件空间内，由于固定间隔内不能无限细分，因此只存在离散点阵，从而整数就作为引用图形设备的基本显示单元。所有的图形显示设备都有一定的分辨率，超过这个分辨率的两个点将被视作一个点而不能区分。定义用户空间时一定要考虑输出设备的参照单位。原始的用户空间可能抽象为连续分布的实数集，然而硬件空间是一个离散点集。由于分辨率的问题，数（代数）与点（几何）在实际当中不能一一对应，尽管理论上如此，实际当中，通常数与点存在多对一或函数关系（图2－17)。一般而言，点的分辨率是函数关系变换的精度。数学上，精度就是存储的有效数字的位数。从几何上看，精度就是一个计量单位内的单元数目。这有助于我们理解为什么要按某一比例尺对地理目标进行编码和显示。更高的坐标精度能提高所绘目标的美感，但不一定能提高其准确度。准确度是与真

实性接近程度的测度。

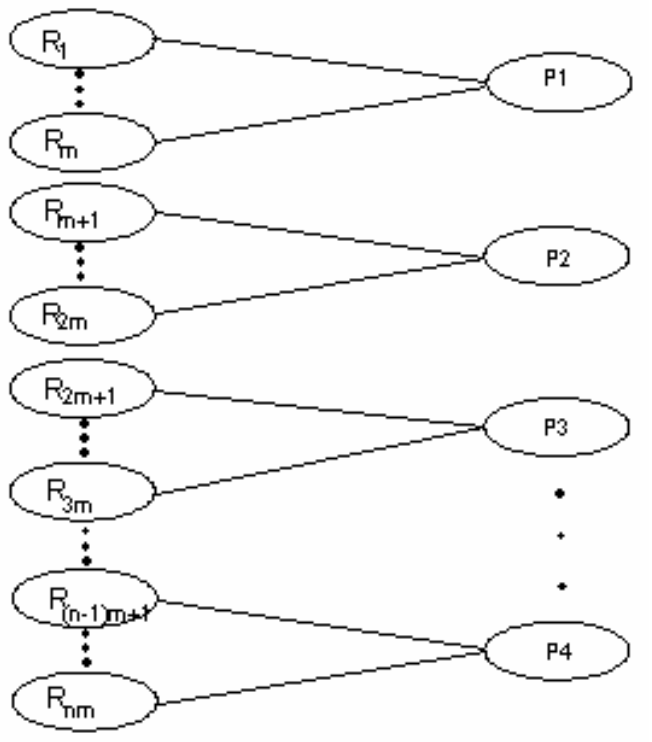


图 2－17　硬件空间中数与点的函数关系

2.4 矢量与矩阵

在研究力学、物理学以及其他应用科学时，通常会遇到这样一类量，它们既有大小，又有方向，例如力、力矩、位移、速度、加速度等，这一类量叫做**矢量**（或向量）。这里只讨论二维矢量。在数学上，往往用一条有方向的线段，即有向线段来表示矢量，有向线段

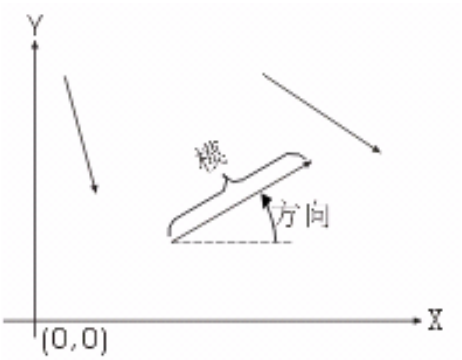


图 2－18　矢量示例

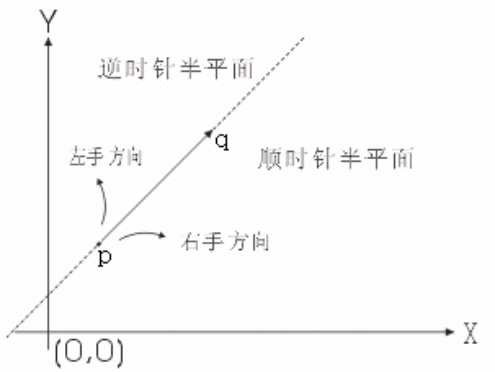


图 2－19　矢量分割后的两个“半平面”

的长度表示矢量的大小，有向线段的方向表示矢量的方向（图2－18）。如果一个矢量无限长（图2－19），则它将平面划分成两个“半平面”，位于矢量右侧的半平面称为顺时针半平面，位于矢量左侧的半平面称为逆时针半平面。

矢量也以行或列的分量来表示，其分量的值为矢量在X轴和Y轴上的投影，图2－20。其值为始末点的坐标值之差：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{pmatrix} \qquad (2.1)$$

图2－20中的矢量a，起点是（1，2），末点是（2，4），则其X值是（2－1），Y值是（4－2）。

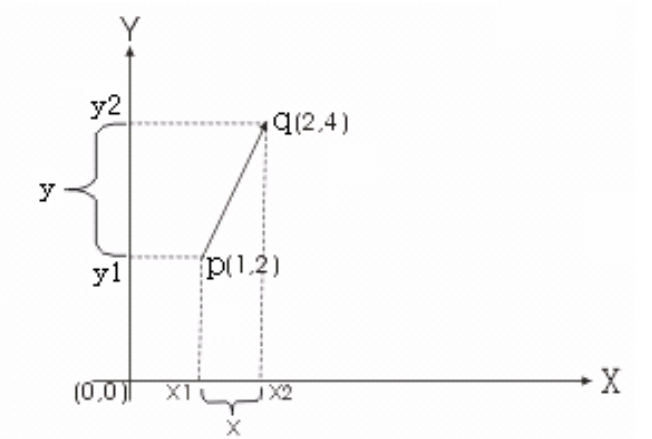


图 2－20　分矢量

平面上任何一点p都可用一个始于原点，终于点p的矢量来表示，图2－21。原点可被认为是一个特殊的矢量，即零矢量，其x，y均为0。所以零矢量是一个没有长度和没有特定方向的矢量。一维矢量可标量化，标量拥有实数的全部特性。

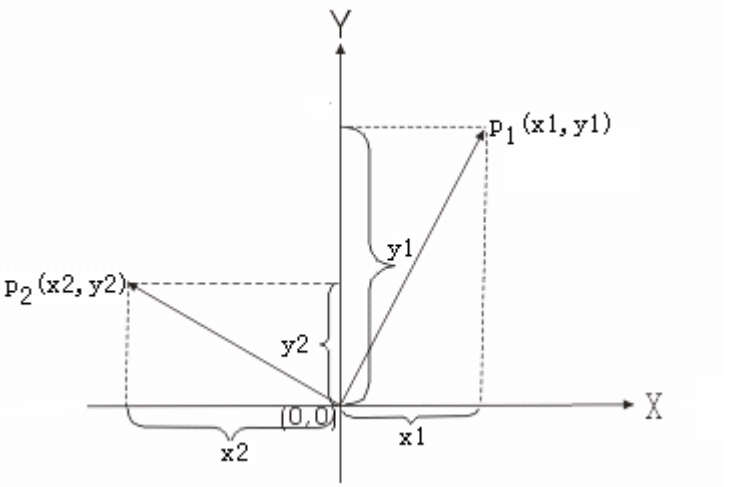


图 2－21　矢量坐标

矢量的大小称为矢量的模，记为｜a｜，其值为x，y的平方和的平方根；模为1的矢量称为单位矢量。

$$|a|=(x^2+y^2)^{1/2} \qquad (2.2)$$

例如，如果a＝(1 ， 2)，则其模为｜a｜＝$(1+4)^{1/2}$。平面上任意两点之间的距离等于连接该两点的矢量的模。该距离可计算为：

$$|p-q|=[(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2]^{1/2} \qquad (2.3)$$

具有相同分量个数的两个矢量可以相加和相减。矢量相加是各分量相加。举例来说，如果a＝(2 ， 3)，b＝(1 ， 4)，则a 与b相加为新矢量a＋b＝(2＋1 ， 3＋4)，即为（3 ， 7)。从几何图形上看，如图2－22，新矢量是由以a，b为两条邻边形成的平行四边形的对角线。矢量相加的结果总是与被加矢量具有相同维数的矢量。

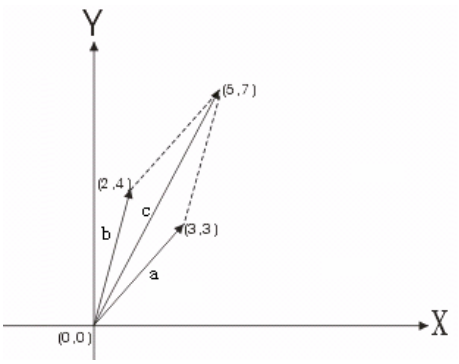


图 2－22 矢量相加

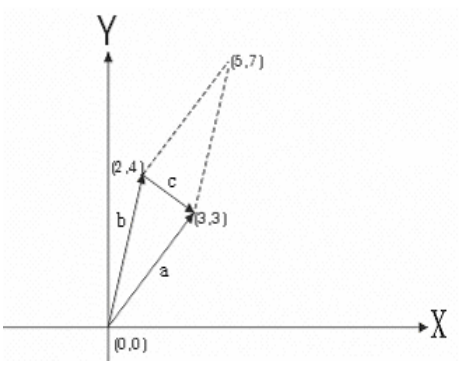


图 2－23 矢量相减

同理，矢量相减也是各分量相减，矢量a-b是(2－1 ， 3－4)即（1 ， －1)。几何上，两个矢量相减后所得的矢量是以a，b为邻边的平行四边形的交叉对角线，图2－23。然而，尽管a＋b等于b＋a，但是a－b不等于矢量b－a。上例中，b-a为（1－2 ， 4－3）即（－1 ，1)。矢量a－b的方向与b－a的方向相反，模相等。

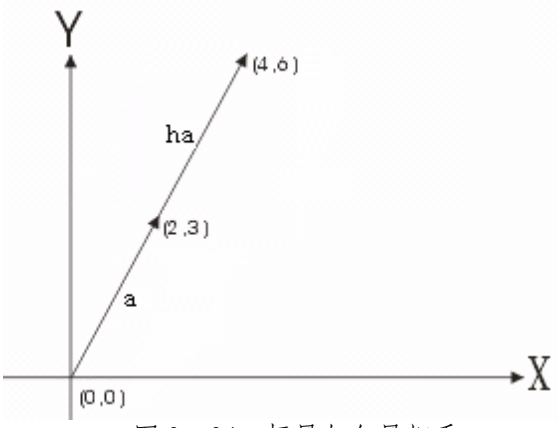


图 2－24 标量与矢量相乘

具有任何分量个数的矢量都可以与标量h相乘，具体来说是各分量与标量相乘。例如，如果h＝2，矢量a＝(2 ， 3)，则标量与其相乘后的结果为（2×2 ， 2×3）即（4 ， 6)。如果标量是正数，则标量相乘后的矢量，其方向与原始矢量的方向相同，其模为原始矢量的

标量倍，图2－24。上例中，矢量(4 ， 6)的模为$2\sqrt{13}$，它是原矢量a的模$\sqrt{13}$的2倍。如果以一个负标量与矢量相乘，则所得矢量的方向要改变180°。

标准矢量的模为1，任何矢量a＝(x ， y)都可标准化，a′ ＝（x′ ，y′)，即用模除各分量：

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x/|a| \\ y/|a| \end{pmatrix} \qquad (2.4)$$

具有相同分量个数的两个矢量也可以相乘，结果是个标量，称为这两个矢量的内积或点积。矢量乘积是各分量相乘的积。如果矢量a＝(x 1， y1)和b＝(x2 ， y2)，则其内积为：

$$a \cdot b = x_1 x_2 + y_1 y_2 \qquad (2.5)$$

例如，如果a＝(2 ， 3)和b＝(1 ， 4)，那么a • b＝(2)(1)＋(3)(4)，即14。其实，矢量的模就是该矢量本身内积的平方根，即$|a| = (x \cdot x + y \cdot y)^{1/2}$。

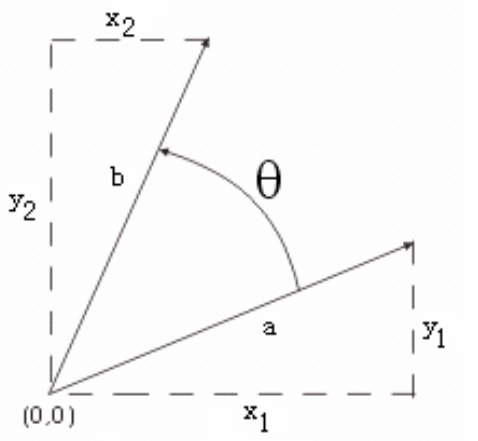


图 2－25 两矢量的夹角

两个矢量的内积还直接与两矢量的夹角有关，夹角记为θ，见图2－25，内积也可以由下式得出：

$$a \cdot b = |a||b|\cos\theta \qquad (2.6)$$

所以 $$\cos\theta = a \cdot b / |a||b| \qquad (2.7)$$

如果两矢量的内积为0，则两矢量正交（相互垂直），夹角为90°。

矩阵是一个按行列组织的规则数组，一般将矩阵A写作：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \qquad (2.8)$$

每个矩阵有m行和n列，称为m×n矩阵。每行即为一个n维矢量。每列即为一个m维矢量，每个矢量本身即为一个单行或单列矩阵。每个元素的下标由两个数字组成，表示元素在矩阵中的位置，如a_{mn}，m表示位于第m行，n表示位于第n列。

矩阵的另一种表示方法是用矢量来表示：

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{bmatrix} \qquad (2.9)$$

下标是用来标识矢量的，字母表示矢量的分量。在等式2.9中，x_1表示第一个列矢量的x

分量。

与矢量类似，矩阵也可以相加和相乘，矩阵加法要求相加的矩阵具有相同的行数和列数，矩阵的和即为两个矩阵对应元素相加后所得的矩阵，例如，如果 $A=\begin{bmatrix}4 & 5\\ 2 & 3\\ 1 & 2\end{bmatrix}$，$B=\begin{bmatrix}3 & 5\\ 0 & 3\\ 2 & 2\end{bmatrix}$，则 $A+B=\begin{bmatrix}7 & 11\\ 2 & 6\\ 3 & 4\end{bmatrix}$

矩阵加法，顺序不重要，它遵循加法的交换律和结合律：

A＋B＝B＋A，（A＋B）＋C＝A＋（B＋C）。

两个矩阵A和B的积要求A的列数等于B的行数，只有这样才能相乘。如果A是一个m×p矩阵，B是一个p×n矩阵，令C为A和B相乘的积，则C是一个m×n矩阵。C＝AB的每个元素是A的第i行和B的第j列的内积，表示如下：

$$C_{ij}=a_{i1}b_{1j}+a_{i2}b_{2j}+\cdots+a_{ip}b_{pj} \qquad (2.10)$$

例如：$A=\begin{bmatrix}4 & 5\\ 2 & 3\\ 1 & 2\end{bmatrix}$ 和 $B=\begin{bmatrix}3 & 0 & 2\\ 6 & 3 & 2\end{bmatrix}$，则

$$AB=\begin{bmatrix}(4)(3)+(5)(5) & (4)(0)+(5)(3) & (4)(2)+(3)(2)\\ (2)(3)+(3)(6) & (2)(0)+(3)(3) & (2)(2)+(3)(2)\\ (1)(3)+(2)(6) & (1)(0)+(2)(3) & (2)(2)+(2)(2)\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}42 & 15 & 18\\ 24 & 9 & 10\\ 15 & 6 & 6\end{bmatrix}$$

对于矩阵A与B相乘，若AB存在，不能保证BA存在，上例中BA就不存在。即使AB与BA都存在，矩阵乘法也不遵循交换律，即AB不一定等于BA。但是矩阵乘法满足结合律和分配律：(AB)C＝A(BC)，A(B＋C)＝AB＋AC。

现在介绍一些特殊矩阵。零矩阵是指所有元素均为0的矩阵。方阵是指行列数相等的矩阵。如果AB与BA同时存在，则A和B都是方阵。一种非常有用的方阵是单位阵，记为I，其对角线上的元素均为1，而其它元素均为0。I的每行和每列均是一个单位矢量，它具有以下属性：IA＝AI＝A。矩阵A的转置矩阵记为A^T。它是交换A的行和列得到的，即A的第i行变为A^T的第i列，A的第j列变为A^T的第j行。对称矩阵S，是一个方阵，其元素$S_{ij}=S_{ji}$，对称矩阵的转置矩阵就是它本身，即$S=S^T$。

与方阵有关的一个重要标量是行列式，一个 2×2 的矩阵的行列式等于其两对角线上元素交叉乘积的差。假设矢量 a＝（x_1，y_1），b＝（x_2，y_2），矩阵 C 为 $C=\begin{bmatrix}x_1 & x_2\\ y_1 & y_2\end{bmatrix}$，C 的行列式记为｜C｜：

$$|C|=(x_1y_2-x_2y_1) \qquad (2.11)$$

2×2的矩阵的行列式的绝对值等于由其两列矢量形成的平行四边形的面积（图2－26）。在图2－26中，矢量(2 ， 3)和(5 ， 1)组成的平行四边形的面积是｜2・1－3・5｜＝｜2－15｜＝13。行列式的值还与矢量的内积有关：由两非零矢量组成的矩阵当且仅当内积为1或－1时，其行列式的值为0，这种情况下，两个矢量要么方向相同要么相反，它们之间没有面积。

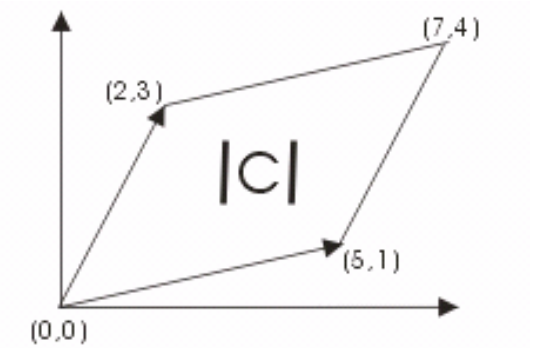


图 2－26 两矢量构成的平行四边形的面积

行列式还可用于确定一个矢量位于另一个矢量的左边还是右边。用第一个矢量将平面划分成两个“半平面”，如果行列式的值为负，则第二个矢量在右半平面，如果行列式的值为正，则第二个矢量在左半平面。在图2－26中，行列式的值为负，因此矢量（5 ， 1）在矢量(2 ， 3)的右半平面。这个结论很重要，因为它能使机算机通过计算来确定矢量间的关系。计算机通过计算两个矢量所组成矩阵的行列式的值，就可以确定一个矢量位于另一个矢量的哪一侧。

2.5 图形的几何变换

2.5.1 点的变换

数字地图学中，地图目标的几何图形常常要进行诸如缩放（比例）、对称、旋转、平移、投影等各种变换。如前所述，几何图形的面由线组成，线是点的轨迹，因此构成图形的最基本要素是点。在解析几何中，点可以用矢量表示。在二维空间中可用（x ， y）表示平面上的一点，因此，可以用点的集合（点集）来表示一个平面图形。当然在三维空间中也可以用来表示三维立体。

既然图形可以用点集来表示，因此点集定了，其图形也就确定了。如果点的位置改变了，其图形也就随之改变。因此，要对图形进行变换，只要变换点就可以了。

由于点集可用矩阵的方式来表达，因此对点的变换可以通过相应的矩阵运算来实现，即：

$$\text{旧点集} \times \text{变换矩阵} \xrightarrow{\text{矩阵运算}} \text{新点集}$$

矩阵表示法将变换操作与坐标分隔开来，给图形几何变换带来了极大的方便。

2.5.2 二维基本变换

若（x，y）为变换前坐标，$T=\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$为变换矩阵，则有：

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} ax+cy & bx+dy \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix}$$

其中，（x′，y′）为变换后坐标。变换矩阵中a, b, c, d可取不同的值，从而实现不同的变换，以达到对图形进行变换的目的。

2.5.2.1 平移变换与齐次坐标

平移变换用于移动坐标系的原点。因为原点可任意设置，所以在需要的时候可以重新设定原点位置。若实现平移变换，变换前后的坐标必须满足：

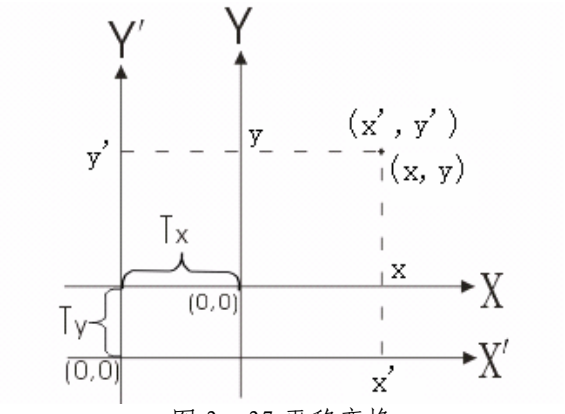


图 2－27 平移变换

$$\begin{aligned} x' &= x+T_x \\ y' &= y+T_y \end{aligned} \tag{2.12}$$

这里T_x、T_y是平移量。当因子T_x为正，原点往左移，T_x为负，则往右移。当因子T_y为正，原点往下移（图2－27），T_y为负，则往上移。这样，平移可以借助重新定义用户空间来模拟目标从一个位置移动到另一个位置。

由于T_x、T_y是平移量，应为常数，但应用上述变换矩阵对点进行变换时，cy，bx均非常量，因此用原来的变换矩阵是无法实现平移变换的。我们把2×2矩阵扩充为3×2矩阵，即令：

$$T=\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \\ k & m \end{bmatrix}$$

但由于二维图形的点集矩阵是n×2阶的，而变换矩阵是3×2阶的，根据矩阵乘法规则，它们是无法相乘的。为此把点矢量也作扩充，将$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}$扩充为$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}$，即把点集矩阵扩充为n×3阶矩阵。这样，点集矩阵与变换矩阵即可进行乘法运算。

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \\ k & m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax+cy+k & bx+dy+m \end{bmatrix}$$

令变换矩阵中的b, c=0，a, d=1，就得到平移变换矩阵：$T_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ k & m \end{bmatrix}$，则有：

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ k & m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x+k & y+m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix}$$

这里k，m即为T_x、T_y，分别为X，Y方向的平移量。

为使二维变换矩阵具有更多的功能，可将3×2变换矩阵进一步扩充为3×3阶矩阵，即：

$T = \begin{bmatrix} a & b & p \\ c & d & q \\ k & m & 1 \end{bmatrix}$，则平移变换矩阵为：$T_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix}$

对点进行平移变换：

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} x+T_x & y+T_y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & 1 \end{bmatrix} \qquad (2.13)$$

例如，令T_x=10，T_y=10，则对A(10,26)，B(10,10)和C(20,10)构成的平面三角形ABC作平移变换，得：

$$\begin{array}{c} \\ A \\ B \\ C \end{array} \begin{array}{c} \begin{matrix} x & y \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 10 & 26 & 1 \\ 10 & 10 & 1 \\ 20 & 10 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 10 & 10 & 1 \end{bmatrix} = \begin{array}{c} \begin{matrix} x' & y' \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 20 & 36 & 1 \\ 20 & 20 & 1 \\ 30 & 20 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ A' \\ B' \\ C' \end{array}$$

在上述讨论中，将（x，y）扩充为（x ， y ， 1），实际上就是用三维矢量表示二维矢量，将（x ， y ， 1）看作Z=1平面上的点。也就是说。经此扩充后，图形落在Z=1的平面上。它对图形的形状没有影响。这种方法叫做齐次坐标法。齐次坐标是笛卡尔坐标的扩展，它将n维坐标变为n+1维坐标。二维点（x ， y）的齐次坐标是（hx ， hy ， h），h是任意非零标量。通过增加一个第三维分量（h＝1），任一二维矢量（x ， y）可被转换成一个齐次矢量（x ， y ， 1）。任一三维点（a ， b ， c）可转换成二维点(a/c ， b/c)。（x ， y）的齐次转换是一个经过原点和点（x ， y ， 1）的射线轨迹，见图2－28。用一个非零标量与一个三维齐次矢量相乘，不会改变该矢量的二维形式。如果m是个非零标量，则齐次矢量(a ，b ， c)和(ma ， mb ， mc)都等价于(a/c ， b/c)。

2.5.2.2 旋转变换

指图形的放置围绕原点旋转 θ 角，且逆时针为正，顺时针为负。图2－29。旋转变换定义如下：

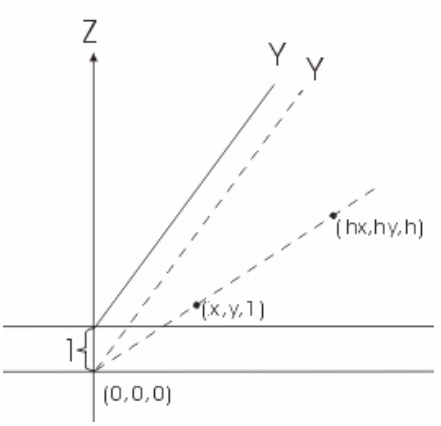


图 2－28 平面的齐次表达

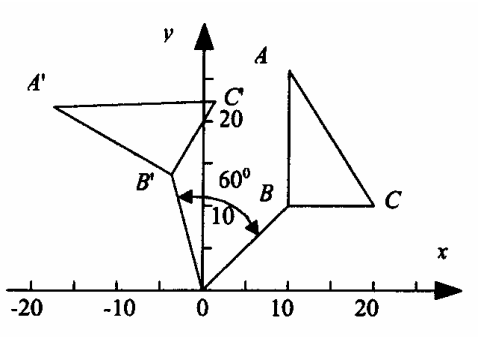


图 2－29 旋转变换

$$x' = x\cos\theta - y\sin\theta$$
$$y' = x\sin\theta + y\cos\theta \qquad (2.14)$$

旋转变换矩阵为：

$$T_r = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则对点进行旋转变换：

$$[x' \quad y' \quad 1] = [x \quad y \quad 1]\ T_r \qquad (2.15)$$

图2－29是三角形ABC旋转60度的结果。旋转变换允许我们转动目标以改变方向，这对于三维表面的观察尤为重要。

2.5.2.3 缩放变换

缩放操作也称为比例变换。可对原始坐标（x ， y）下的矢量产生拉长或缩短的效果。平移和旋转变换都保持二维空间上目标变换时的距离及大小不变，但缩放变换会改变坐标系的单位长度（距离），表示如下：

$$x' = S_x \cdot x$$
$$y' = S_y \cdot y \qquad (2.16)$$

变换矩阵为：$T_s = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

则缩放变换表示如下：

$$[x' \quad y' \quad 1] = [x \quad y \quad 1]\ T_s \qquad (2.17)$$

在图2－30中，通过设定比例因子S_x＝0.5，S_y＝0.5，原始坐标（6 ， 8）沿着经过原点

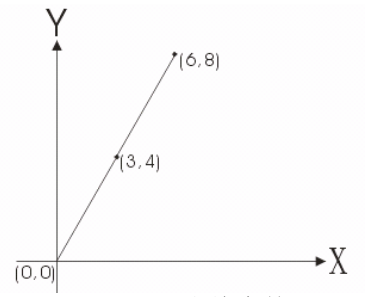


图 2－30 缩放变换

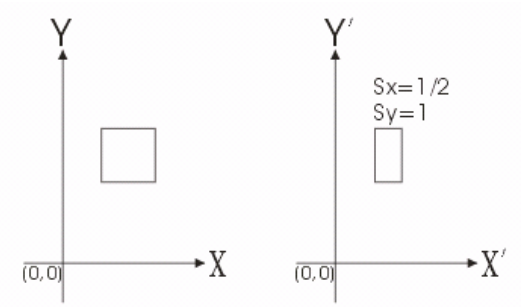


图 2－31 缩放变形

和（6 ，8）的射线缩小成新的点（3 ，4）。当S_x 和S_y小于1时，几何目标即被缩小；当它们大于1时，几何目标被放大；当S_x＝S_y时，缩放后将保持原有的方向和大小。如果$S_x \neq S_y$，几何目标将在某一方向上变形或拉伸，见图2－31。

2.5.2.4 错切变换

令 $T_{sh}=\begin{bmatrix} 1 & shy & 0 \\ shx & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$，且 shx，shy 之一为 0，则 T_{sh} 为错切变换矩阵。

沿 X 向错切：令 shy＝0，则沿 X 向的错切变换为：

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} T_{shx}=\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ shx & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (shx \neq 0) \qquad (2.18)$$

如图 2－32 所示，经此变换后，Y 坐标不变，X 坐标有以增量 shxY，这就相当于原来平行于 Y 轴的线向 X 方向错切成α 角的直线，且有$tg\alpha = y/shxy = 1/shx$。当 shx>0 时沿+X 向错切；shx<0 时，沿-X 向错切。

沿 Y 向错切：令 shx＝0，则沿 Y 向的错切变换为：

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} T_{shy}=\begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & shy & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (shy \neq 0) \qquad (2.19)$$

变换的结果是 X 坐标不变，而 Y 坐标产生一增量 shyX，使原来平行于 X 轴的线倾斜θ 角且$tg\theta = x/shyx = 1/shy$。当 shy>0 时沿+Y 向错切；shy<0 时，沿-Y 向错切。如图 2－32 所示。

上述错切方向均是对第I象限点而言，其余象限的点的错切方向应作相应改变。

2.5.3 二维组合变换

上述基本变换可用统一的变换矩阵形式来实现，这样易于组织和存储整个变换。但有些变换仅用一种基本变换是不能实现的，必须由两种或多种基本变换的组合才能实现。这种由多种基本变换组合而成的变换称之为组合变换，相应的变换矩阵称为组合变换矩阵。

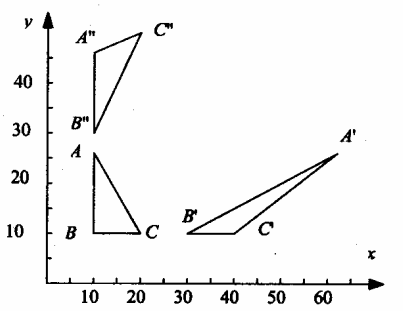


图 2－32 错切变换

在一系列变换过程中，组合变换的顺序很重要。假定有一个平移变换矩阵T，缩放变换矩阵S，p′是由p·T·S后得到，p″是由p·S·T后得到，则p′不一定等于p″，因其不遵循交换律。前者，点p先平移后缩放，而后者是先缩放后平移，因此组合变换矩阵C＝T·S可以定义为：

$$\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\Tx&Ty&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}Sx&0&0\\0&Sy&0\\0&0&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Sx&0&0\\0&Sy&0\\TxSx&TySy&1\end{bmatrix} \qquad (2.20)$$

相反地，C＝S·T 可以定义为：

$$\begin{bmatrix}Sx&0&0\\0&Sy&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\Tx&Ty&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Sx&0&0\\0&Sy&0\\Tx&Ty&1\end{bmatrix} \qquad (2.21)$$

实际当中，绝大多数地图显示涉及到一系列的点变换，从而将用户空间变为合适的硬件空间。如果平移因子等于0，缩放因子等于1，旋转角度为0，则变换矩阵为单位阵。

齐次坐标对于二维点的几何变换是非常有用的（如平移、旋转和缩放）。点的转换可用于操作地图目标。一个目标从一个位置移到另一位置，以及位置的移动、放大或缩小组合等都是一系列点转换的结果。每个转换从原始点(x ， y)产生新的点(x′， y′)。

2.6 点线关系

许多制图功能需要利用点线关系。直线L，是一个具有相同方位的所有点的轨迹，图2－33。然而，表达直线的方式有很多种。比如，直线可以定义为R^2空间上满足关系式Ax＋By＋C＝0的所有坐标点的集合，记为：

$$L=((x,y)\mid x\in R,y\in R,\text{且}Ax+By+C=0) \qquad (2.22)$$

直线的矢量表示法采用内积的形式：

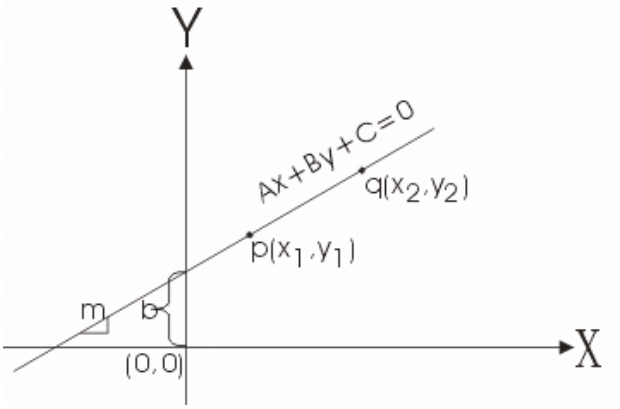


图 2－33　直线

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x & y & 1 \end{pmatrix} = 0 \qquad (2.23)$$

等式中的参数A，B，C都是标量，它们确定了直线的位置，直线的斜率m定义为（－A/B），它表示x值的变化所引起的y值的变化。如果两条直线的斜率相同，则这两条直线相互平行。Y轴上的截距h定义为（－C/B），它表示x＝0时，y的值。X轴上的截距定义为（－C/A），它表示y＝0时，x的值（直线与X轴交点的x值）。

所以直线的关系式也可用斜率截距式来表示：

$$y = mx + b \qquad (2.24)$$

在数字地图学中，等式2.22中表示的关系优先于等式2.24，因为如果B＝0，则直线的斜率不存在（由于除数为0），所以等式2.24便不能在计算机中表示。

连接点 $p(x_1, y_2)$到点 $q(x_2, y_2)$的直线参数用矢量法表示为：

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 - y_2 \\ x_2 - x_1 \\ y_2 x_1 - y_1 x_2 \end{bmatrix} \qquad (2.25)$$

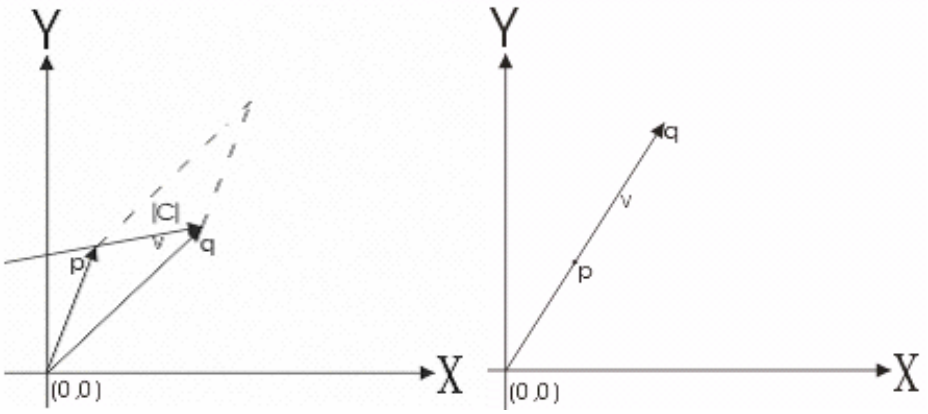
相反，连接点 q 到点 p 的参数为：

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ x_1 - x_2 \\ y_1 x_2 - y_2 x_1 \end{bmatrix} \qquad (2.26)$$

参数A和B与p和q之间的矢量的参数有关。等式2.25的y与x的比率等于直线斜率（－A/B），$(A^2+B^2)^{1/2}$是连接p和q的矢量的模。参数C表示的是由p和q形成的平行四边形的面积，图2－34a。如果p与q方向相同或相反，则C为0，图2－34b。

连接p、q的线段的两个端点也可以“点－矢量”的形式来表达直线：

$$L = \{(x_1, y_1) + h(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \mid h \in R\} \qquad (2.27)$$



(a) 直线不经过原点　　(b) 直线经过原点

图 2-34　C 参量定义的面积

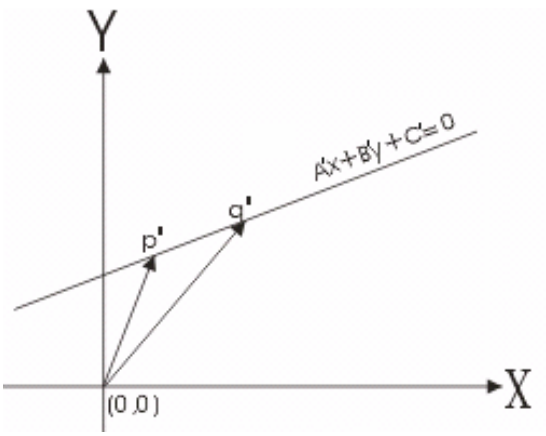


图 2－35　标准化直线

连接p到q的矢量（x_2-x_1，y_2-y_1）也可以用直线表达式中的参数（A，－B）表示。“点－矢量”式保持了直线的方向。h 的值在闭区间[0 ， 1]内时，暗示了操作的是线段而非直线，因此线段也可用下式表示：

$$l=\{\alpha q+(1-\alpha)p \mid 0\le\alpha\le 1\} \qquad (2.28)$$

直线 L 的标准化，是参量除以矢量的模：

$$\begin{bmatrix}A'\\B'\\C'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A/(A^2+B^2)^{1/2}\\B/(A^2+B^2)^{1/2}\\C/(A^2+B^2)^{1/2}\end{bmatrix} \qquad (2.29)$$

一个标准化后的直线与原直线的方向和位置均相同，但是矢量的模为单位长度，图2－35。

对于平面上任一点t(x_t， y_t)相对于直线L的位置关系，可以借助连接p到q的直线L计算标量S来判断：

$$S = Ax_t + By_t + C \qquad (2.30)$$

如果S＜0，t在L的顺时针半平面；如果S＞0，t在L的逆时针半平面；如果S＝0，t就在L上。举例来说，连接点（2，2）和（4，5）的直线的等式是：－3x＋2y＋2＝0，图2－36。点（6，3）在这条直线的顺时针半平面，因为（－3）（6）＋（2）（3）＋2＝－10＜0。相反，点（0，5）在这条直线的逆时针半平面，因为（－3）（0）＋（2）（5）＋2＝12＞0。这个结论很有意义，因为它使计算机能够通过计算判断点与直线的关系。

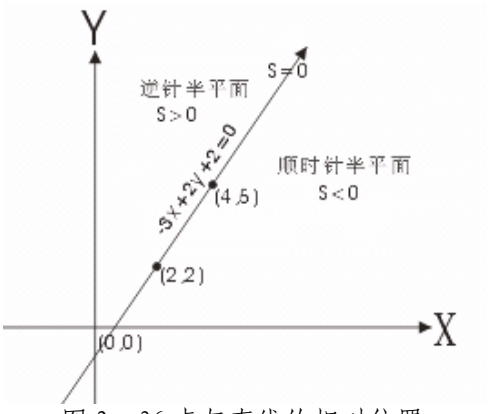


图 2－36 点与直线的相对位置

与直线L平行的直线L′上的所有点，相对于L来说其S值都是相等的。在图2－37中，点（4，0）在与直线：－3x＋2y＋2＝0平行的直线L′上，L′经过点（6，3），点（4，0）的S值为（－3）（4）＋（2）（0）＋2，也等于－10。一般而言，直线L的关系式为Ax＋By＋C＝0，直线L′的关系式为Ax＋By＋C′＝0，那么L′上所有的点对于L的S值都是(C－C′)。在上例中，L′的C′＝12，因此L′上所有点的S值都是（2－12）。

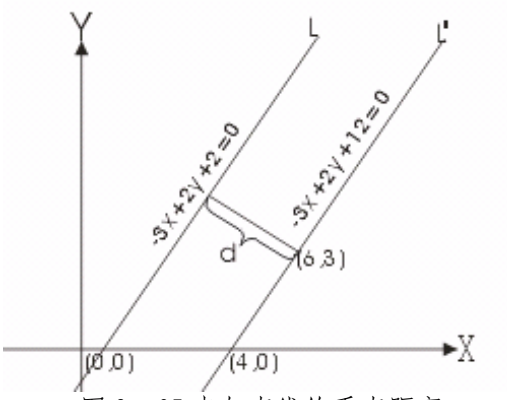


图 2－37 点与直线的垂直距离

图 2－37 中，点 t 与直线 L 的垂直距离 d 是：

$$d = \left| \frac{S}{(A^2 + B^2)^{1/2}} \right| \qquad (2.31)$$

上例中，点（6，3）与直线　－3x＋2y＋2＝0 的垂直距离是 $\left| \frac{-10}{(9+4)^{1/2}} \right|$ 即 $10/\sqrt{13}$。

如果两条平行直线都已标准化，则其垂直距离为｜C－C′｜。

p（x_1，y_1）与 q（x_2，y_2）连线的中点 r（x_r，y_r）是：

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 + x_2)/2 \\ (y_1 + y_2)/2 \end{bmatrix} \qquad (2.32)$$

图 2－38 中，点（2，2）与点（6，9）之间的中点是（8/2，11/2）。

垂直平分线P是一条与直线pq垂直并经过其中点的直线，图2－39。垂直平分线将平面划分为两半。基中一侧的点与点p近，而另一侧的点与q近。如果q在P的顺时针半平面上，则P的参数为：

P

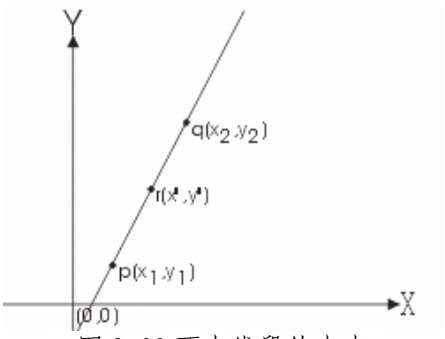


图 2-38 两点线段的中点

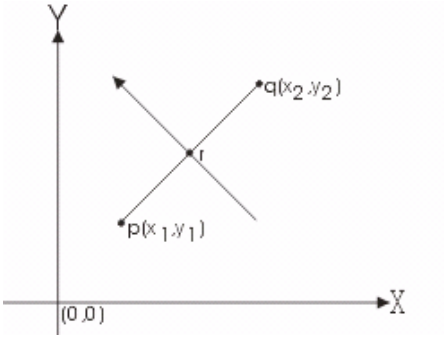


图 2-39 垂直平分线

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2)]^{1/2} \end{bmatrix} \qquad (2.33)$$

图2－39中，点（2 ， 2）与（4 ， 5）之间的垂直平分线的参数是：

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2-3 \\ 2-4 \\ [(4^2 + 5^2) - (2^2 + 2^2)]^{1/2} \end{bmatrix}$$

两条直线Ax＋By＋C＝0与Ex＋Fy＋G＝0的交点i(xi ， yi)是：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (GB - FC)/(FA - EB) \\ (CE - AG)/(FA - EB) \end{bmatrix} \qquad (2.34)$$

在图2－40中直线 －3x＋2y＋2＝0与2x＋4y－28＝0的交点是：

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(-28)(2) - (4)(2)]/[(4)(-3) - (2)(2)] \\ [(2)(2) - (-3)(-28)]/[(4)(-3) - (2)(2)] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (-64)/(-16) \\ (-80)/(-16) \end{bmatrix}$$

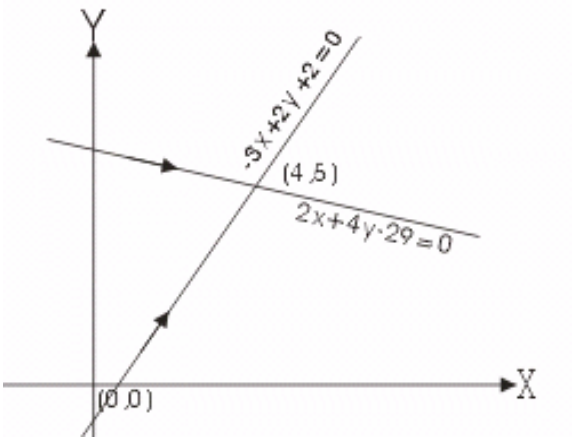


图 2－40 两直线的交点

如果两条直线平行，则（FA－EB）＝0，即交点不存在。

然而，当要找出两条线段的交点是否存在，而不是计算两条直线的交点时，将产生很多问题。通常我们需要两个步骤：首先按直线等式求出交点，再确定交点是否位于某条线段上。

如果两条线相交，则存在一条直线Q，它经过交点并平分夹角θ，图2－41。这条线称为角平分线。设其表达式为Rx＋Sy＋T＝0，则其参数是两条相交直线标准化后的对应参数之和：

$$\begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'+E' \\ B'+F' \\ C'+G' \end{bmatrix} \qquad (2.35)$$

其中，A′，B′，C′，E′，F′和G′分别是原两条相交直线的各标准化参数。

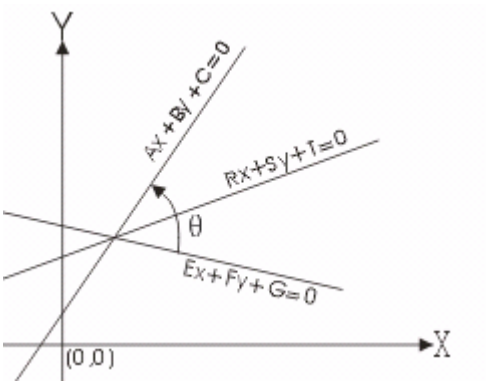


图 2－41 相交直线的角平分线

举例来说，直线：－3x＋4y＋2＝0与12x＋5y＋9＝0的角平分线的参数是：

$$\begin{bmatrix} R \\ S \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-3)/5+12/13 \\ 4/5+5/13 \\ 2/5+9/13 \end{bmatrix}$$

如果两条相交直线中的某条直线改变方向，则新的角平分线与原来的角平分线垂直（比较图2－42a与图2－42b），如果两条都改变方向，则新的角平分线的方向与原来的角平分线的方向相反（比较图2－42a与图2－42c）。

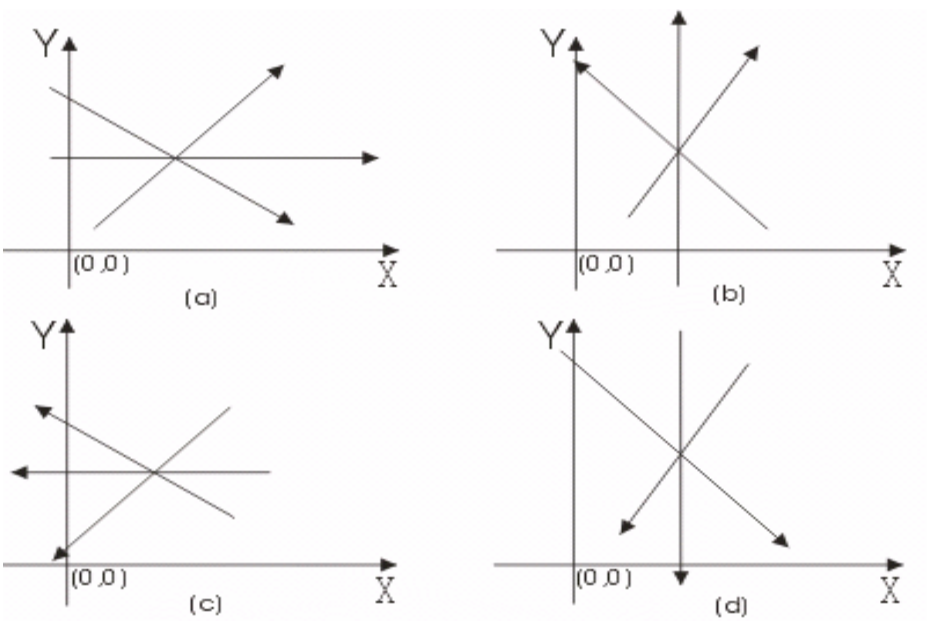


图 2－42 相交直线的方向与角平分线

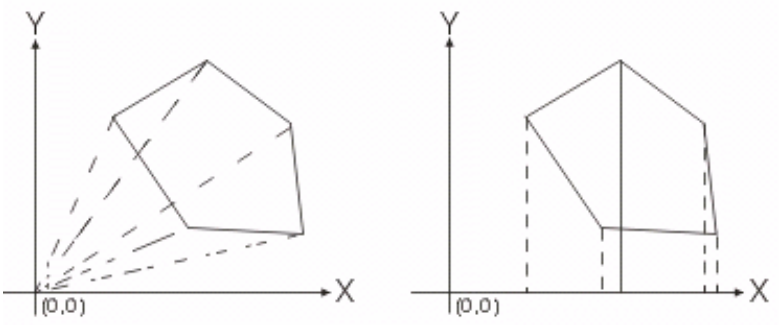
2.7 线与面的测量

对任何线的基本测量是长度，如果线是闭合的并形成一个区域的边界，则包含了面积，线的长度便是区域周长。因为在计算机中，线都是由直线段依序近似表达的。所以线的长度就是所组成矢量（直线段）的模的和，可以用公式表示如下：

$$length = \sum_{i=1}^{n}\left[(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2\right]^{1/2} \qquad (2.36)$$

其中，（x_i，y_i）是各线段的端点。

第二个基本测量便是封闭多边形的面积，正如2.5节中讲的，一个多边形可以由内外轮廓线或环组成。本处假设任何多边形外轮廓线的坐标都沿着多边形顺时针方向给出，内轮廓线的坐标按逆时针方向给出。这样的话，多边形始终位于任一线段（边）的右侧。这种约定适用于后面所有的讨论。



a）三角分解　　(b）梯形分解

图 2－43 多边形面积的分解

多边形的面积可以用三角形或梯形面积之和来计算，如图2－43。前者，三角形的面积由两个相继坐标矢量构成（图2－43a），其面积是由这两个矢量组成的平行四边形的面积的一半，并且也恰好是由这对坐标矢量构成的矩阵的行列式值的一半（参见等式2.11和图2－26）。因此由n条边构成的多边形面积便是：

$$Area = -(1/2)\sum_{i=1}^{n}(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \qquad (2.37)$$

其中，（x_i，y_i）是各线段的端点。

利用外轮廓线的顺时针约定，第i+1个矢量位在第i个矢量的顺时针半平面的三角形的面积为正，相反，若第i+1个矢量在逆时针半平面，则三角形的面积为负。这样，位于轮廓线之外的那些三角形的面积被删除，外轮廓线确定的面积为正。反过来，对于内轮廓线也适用，它们的面积为负。任何复杂多边形的面积都可通过各边确定的面积相加得到。

如图2－44中的复杂多边形的外轮廓线，由点集{（4，1），（2，3），（4，7），（6，6），（6，2），（4，1）}组成，内轮廓线由点集{（3，3），（5，4），（4，5），（3，3）}组成。由外轮廓线所包围的面积是：

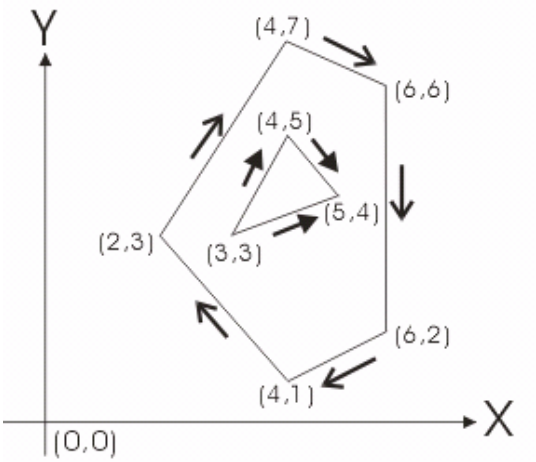


图 2－44 复杂多边形的一个例子

$$-(1/2)[(4\cdot 3-1\cdot 2)+(2\cdot 7-3\cdot 4)+(4\cdot 6-7\cdot 6)+(6\cdot 2-6\cdot 6)+$$
$$(6\cdot 1-2\cdot 4)]=-(1/2)[(10)+(2)+(-18)+(-24)+(-2)=16$$

由内轮廓线包围的面积是：

$$(-1/2)[(3\cdot 4-3\cdot 5)=(3\cdot 5-4\cdot 4)+(4\cdot 3-5\cdot 3)]$$
$$=(-1/2)[(-3)+(9)+(-3)]=-(3/2)$$

则该多边形总的面积是[(16)＋(－3/2)]即14.5。

后面这种方法是通过计算和合并由轮廓线上的线段与X轴形成的梯形面积得到的（图2－43b）。由n条边包围的多边形面积可按下列公式计算：

$$Area=1/2\sum_{i=1}^{n}(x_{i+1}-x_i)(y_{i+1}+y_i) \qquad (2.38)$$

其中（xi ， yi）是各边的端点。

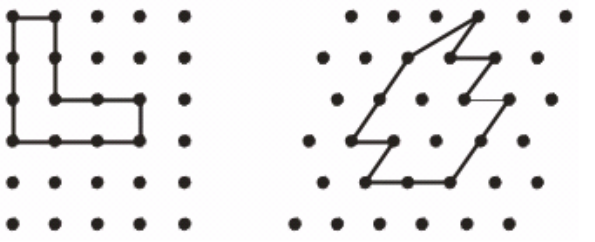
外轮廓线上的梯形，若xi+1＜xi，则其面积为负，其面积从总面积中扣除；相反，内轮廓线上则为正，可从公式2.37和2.38的展开与化简中看出二者是一致的。

此外，还有一种用于计算简单多边形面积的方法，它利用基本面积单元（其顶点是二维平面上均匀分布的网格点），见图2－45。多边形面积可按Pick定理（Coxeter，1961）求出：

面积单元的个数＝（1/2）b＋c－1 （2.39）

其中，b是多边形边界上网格点的数目，c是多边形内部网格点的数目。

在图2－45a中，多边形边界上有12个网格点，而内部没有点，这个多边形的面积是（6－1）即5个面积单位。在图2－45b中，多边形边界上有13个网格点，而内部有2个点，其面积是（13/2＋2－1）即7.5个面积单位。



（a） （b）

图 2－45 利用栅格剖分格网计算多边形面积

2.8 本章小结

本章着重讲述了几何分析的基础知识，这些知识同时也是数字地图学中复杂算法的基础。然而，这里我们主要是用地图的绝对位置坐标属性来讲述的，而没有用其数字影像的相对位置属性来讨论。下一章，我们将学习和讨论数字地图的拓扑性质。

第3章 地图数据结构与数据组织

数字制图处理系统中的核心问题是数字表达，它是原始数据与任何地图显示形式的中介。在第二章中我们知道了几何目标怎样通过坐标系转换为数字形式，并且学到了一些用于形成高级算法的一系列基本操作。然而在设计算法的时候，我们不可能将这些操作算子与数据结构分开。

从地图抽象到设计最后的地图数据库，是通过一系列的步骤将非常抽象的地图目标变为非常具体的表达。真实世界（至少是其影像）通过高度的抽象和多种综合（如选取、化简）形成一个数据模型，并逐步转换为更具针对性的数据结构，并最终形成文件或数据库结构。在数据库设计中，数据结构以图表、链表和数组来表达数据模型，并被集成进算法的设计之中。数据结构是软件设计的基础，文件结构则是地理目标在硬件存储层次上再现。

几乎没有什么主题能比数据组织对数字地图学的理论与实践产生更大的影响，因此本章讨论地图数据组织的基本概念与形式。不管是数据采集还是数据显示，它们都与数字图形的结构有着千丝万缕的联系，因此首先讨论数据结构及其组织是很重要的。

3.1 拓扑概念基础

与解析几何学中的代数关系形成对照，这里所要讲的数据结构是建立在拓扑关系之上的。拓扑学（topology）一词起源于希腊，主要研究目标的形态。拓扑学是几何学的分支之一，作为近代数学的一门基础理论学科，拓扑学已经渗透到数学的许多分支以及物理、化学和生物学之中，在工程技术中也取得了广泛应用。

数字地图图形在一定区域内采用某种地图投影，是将地面投影于平面的拓扑映射。在拓扑映射中，点映射为点，线映射为线，面映射为面，面内的点映射后仍在面内，与点关联的线映射后仍然与线相关联。因此，数字地图的点、线、面具有拓扑性质，点、线、面是基本的拓扑元素。由于拓扑学是研究图形在同胚变化下不变的性质，拓扑学已成为数字地图学、地理信息系统以及空间关系的理论基础，为空间点、线、面之间的包含、覆盖、相离和相接等空间关系的描述提供直接的理论依据。

设A为非空集合，X为A的子集族，如果满足下列条件：

(1)空集ø属于X，A也属于X；

(2)若X1，X2属于X，则X1与X2的交集属于X；

(3)X中任意两个元素的并仍为X中的元素。

则称X为A的拓扑。如果X为集合A的拓扑，则称偶对(A，X)为拓扑空间，记为{t}。

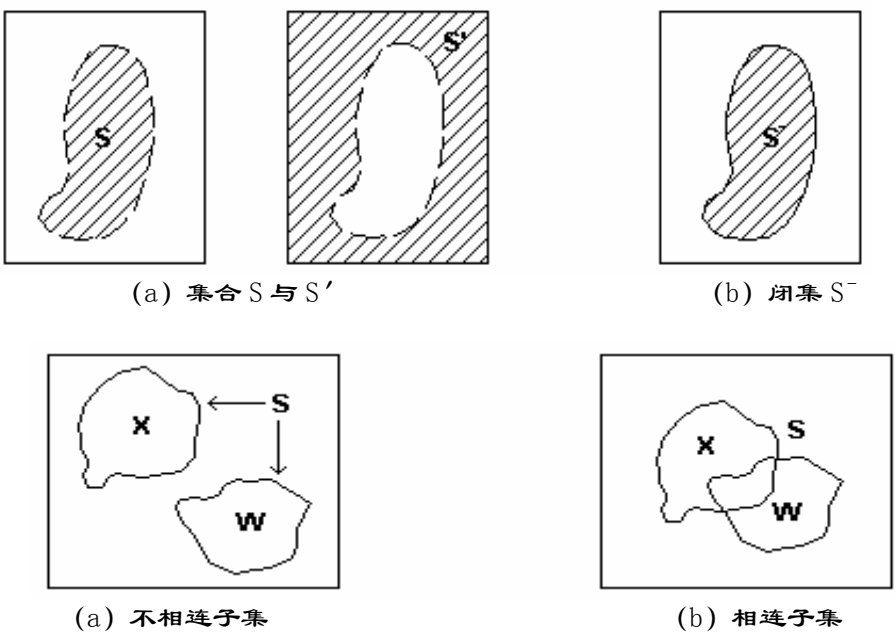
开集是指度量空间D中一个邻域G（$G \subset D$），其每个点都是G的内点。空集ø和A本身也是开集（{A，ø}），并在A上形成平庸拓扑。举例来说，假定A是我国各县，那么这个集合的一个拓扑便可以是这样一些独立的子集，它们包含某个省的各县。这些子集都是开集，因为它们任意两个的交集要么是空集(因为没有哪一个县同时属于两个省)，要么是它本身的

开集(这时两个子集是同一个子集，如湖北省与湖北省相交)。上述任意多个子集的并集也是开集，包括全集。

子集S是集合T的一个元素s的邻域，如果R是一个属于{t}的元素，那么，s是R的一个元素，R是S的一个子集。举例来说，湖北省是我国各县的一个拓扑子集，它也是武汉市(属于湖北省)的邻域，因为武汉市是湖北省的一个元素，而湖北省是它本身的子集。

在Rn欧氏空间中，如果Rn中所有的点与点p的距离都在 ε 距离之内(一个非常小的距离)，那么包含这些点的子集S就是点p称为 ε 球的特定邻域。如湖北省内任意点的 ε 球仅包括属于湖北省部分的点。 ε 球的概念可用于综合线并量测其长度。

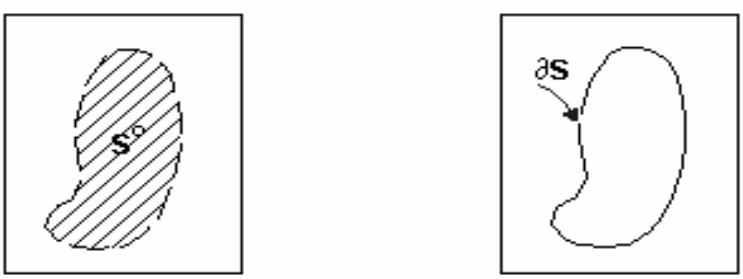
任何开子集S的补集S′都是闭集，闭集S^-是所有包含S的闭集的交集，见图3－1b。子集S的内部记为S°，是与S相邻的所有元素的集合，图3－1c。S的边界记为∂S，它是S的闭集与S′的闭集的交集，见图3－1d。



(a) 集合S与S′　(b) 闭集S^-

(a) 不相连子集　(b) 相连子集

图 3－2　相离与相交子集



(c) 集合S的内部　(d) 集合S的边界

图 3－1　闭集、集合的内部与边界

当且仅当集合S不能表示为两个相离的开子集之并时，称S为相连的。在图3－2a中，S是相离子集X和W的并，因此S是不相连的集合。在图3－2b中，X和W重叠，它们的交集是非空的，因此S不是X和W的并集。

许多不同的制图目标可以归为相连或不相连的集合。图3－3a中美国夏威夷群岛,阿拉斯加和邻接的48个省是相互分离的的子集（二维地理区域表面），因此美国的地理区域是不相连集合。相反，不包括岛屿的新英格兰地区各省是一个相连的子集。

相连子集也称为单元，在二维表面中，主要的相连单元有0维(点)、1维(线)和2维(面)。如果每对不同维的目标的交非空，那么它们是彼此相关联的。高维目标是由低维目标组成的，低维目标构造了高维目标。一幅地图是一个0维、1维和2维目标的组合，每个2维目标是由1维目标组成，1维目标是由0维目标组成。而0维目标可以构造某些1维目标，1维目标可以构造某些2维目标。两个共享边界且维数相同的目标称它们是彼此邻接的。在图3－3b中，Connecticut（CT）与Massachusetts（MA）是邻接的，因为它们共享一个边界。



（a）美国（非相连集合）



（b）新英格兰地区（相连集合）

图 3－3　相连与非相连制图目标

一对相关联的单元在结构上具有对称性称为对偶。在对偶关系中，原始目标或关系可以被相对应的对偶目标或关系取代。原始目标可以认为是初始目标，对偶目标可认为是初始目标的配对物。如目标的组成和构造是关联关系的两个对偶方面。0维单元是2维单元的对偶，1维单元是1维单元的对偶。这些关系可以在图3－4的图解中看到，原始目标由实线组成，其相对应的对偶目标由虚线组成。图解中的二维单元A在对偶中是一个0维单元。(a, A)是一对原始关联关系，1维单元a构造二维单元A，A由a组成，在(a, A)的对偶关系中，1维单元a 由0维单元A组成，而A反过来构造a。对偶关系阐明了2维对应物的可定向性。当从0维单元1指向0维单元4时，2维单元A则在右边，2维单元B则在左边。在对偶关系中这种方向是互换了的，即当从0维单元A指向0维单元B，2维单元1则在左边，2维单元4则在右边。这种地理对称关系在本章后面将用作DIME系统的基础。

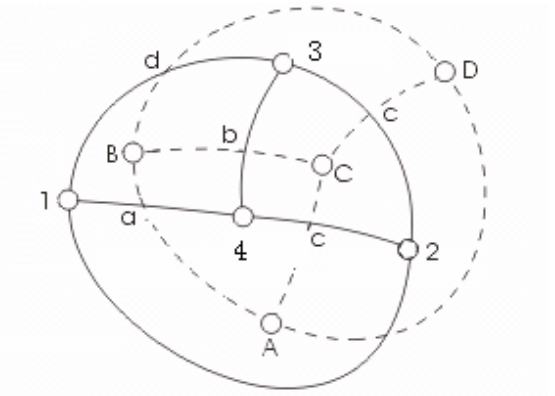
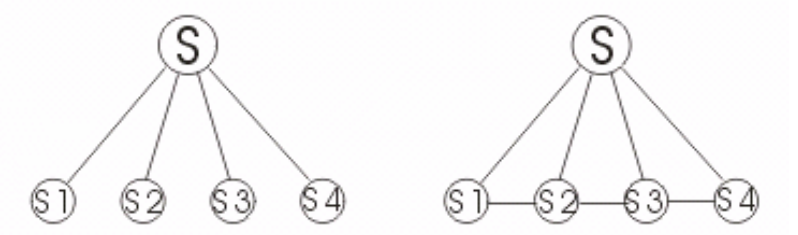


图 3－4 初始目标及其对偶

利用图表，每个子集(或目标)S_i和包含它们的集合S都可表示为圆圈，每个成员S_i 和集合S用连接直线表示，见图3－5a。子集之间的任何关系都可用直线表示，见图3－5b。



(a) (b)

图 3－5 集合构成关系图解

对于可连接集合S，如果子集Si 最多只和两个其它的子集邻接，那么{Si}便在S上形成一个路径拓扑，见图3－6。如果有一个子集只和一个其它子集邻接，那么它是开路径拓扑，见图3－6a，如果每个子集都和两个其它的子集邻接，那么它是一个闭路径拓扑，见图3－6b。在1.5节中定义的线和线串都属于前者。轮廓线和环则属于后者。

对于一个可连接集合S，如果某个子集与3个或以上的其它子集邻接，那么这个集合在S上形成一个网状拓扑，见图3－7。图3－2中的新英格兰地区就是一个网状拓扑的例子。



(a) 开路径拓扑　　(b) 闭路径拓扑

图 3－6　路径拓扑

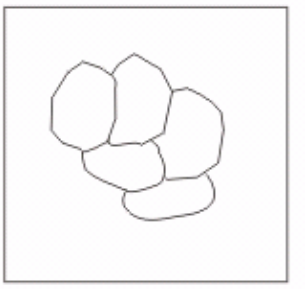
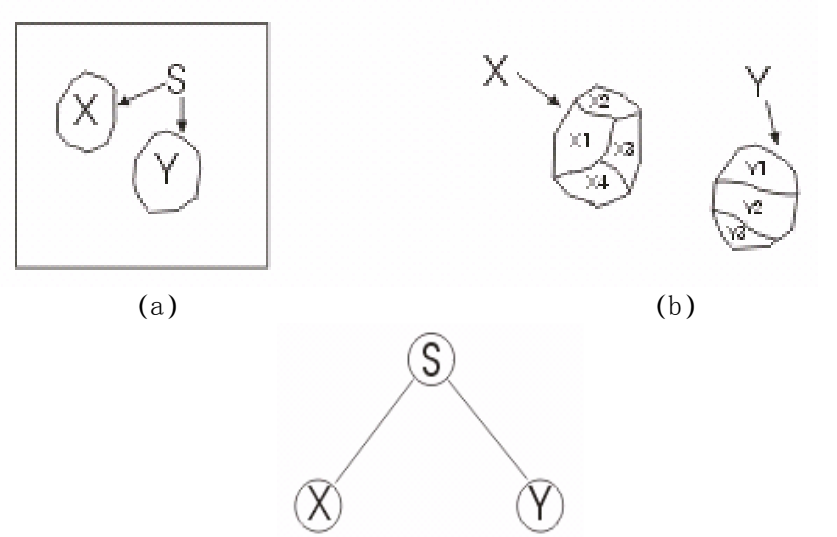


图 3－7　网络拓扑

任何一个不可连接的集合都可分解为一系列可连接的子集。这些可连接的子集本身也可形成路径拓扑或网状拓扑，并通过邻接关系联结。在图3－8a中，集合S由两个不相连的子集X和Y组成，它是不可连接的，然而每个子集本身又是可连接的。可连接子集X形成一个网状拓扑，可连接子集Y形成一个路径拓扑，见图3－8b。这些拓扑又被邻接关系链接。



(a)　　(b)

(c)

图 3－8　非连接集合的分解

目标在数据结构中的排列基础是组成（Bound）和构造关系（Cobound），以及集合中目标对之间的邻接关系。

3.2 文件结构

3.2.1 表结构

文件结构决定目标在硬件存储中的具体组织形式。在数据组织中，为了表达包含拓扑和度量属性的数据元素间的相互关系，提出了不同的文件结构。每个目标都称为节点，每个节点包括了一系列的属性或域，它们定义了目标的某些特性。举例来说，将我国城市作为节点，则每个节点代表一个城市，它的属性可能包括人口、下岗率、纬度、经度等。正如第二章讲述，拓扑变换保持了目标间的邻接关系。如果一个目标邻域中不包括任何其他目标，那么，这些目标就是不相连集合S的独立成员，这样的集合称为无序表。虽然在更抽象的数据模型和数据结构中可能会有这些集合，但在具体的文件结构中不会存在。在文件结构中，所有的节点都存储在介质中的一定位置。在计算机中，节点是按地址存取的。集合中的所有元素对存储在机器中，且与地址属性隐含相连，但与目标间的地理连接无关。集合中包含其它节点的节点称为根节点。

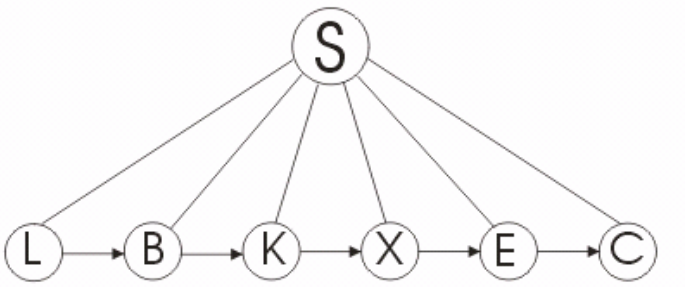


图 3－9　线性表

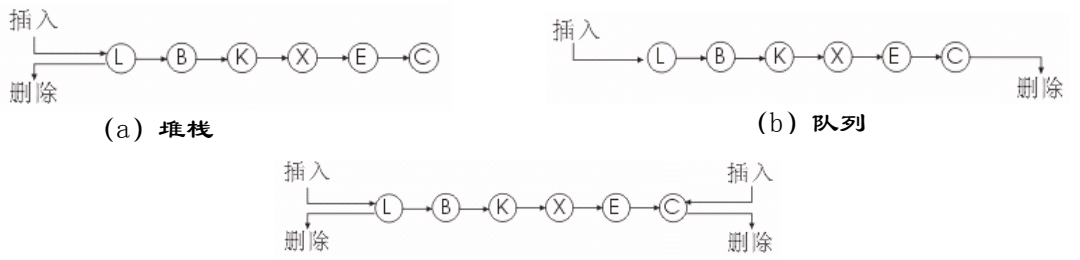
线性表是一个节点集合，它是以表中相对位置表示的开路径拓扑。表中的第一个节点称为头节点，最后一个节点称为尾结点或末节点。节点j是节点(j－1)和节点(j＋1)的邻域，节点(j－1)是节点j的前趋节点，节点(j＋1)是节点j的后继节点。头节点没有前趋节点，尾节点没有后继节点。集合本身是这个表的根节点。在图3－9中，集合S中的所有节点根据其在表中的相对位置连接。节点L是头，依次由B、K、X、E和C相继。

在表中可以有以下操作：

a) 根据表中第 j 个节点来获取或修改它的属性；
b) 根据某些属性的特定值来查找表中的节点；
c) 确定表中节点的数目；
d) 复制表；
e) 在第 j 个节点之前插入一个新节点；
f) 删除第 j 个节点；
g) 合并两个或两个以上的表，形成一个新的表；
h) 将一个表分割为两个或多个表；
i) 根据某个属性值将各节点按序排列。

以上操作中，a－d都不会改变表中节点的原来顺序，即保持拓扑不变，但e－i通常会改变节点顺序。

总是在头或尾节点进行插入、删除和访问修改操作的特殊表称为堆栈、队列或双向队列。堆栈是只在一端进行插入和删除操作的表(图3－10a)。队列是指在一端进行插入，在另一端进行删除操作的表(图3－10b)。双向队列中，插入和删除可在两端进行(图3－10c)。有输出限制的双向队列只允许一端删除，然而有输入限制的双向队列只允许在末端插入。



(a) 堆栈　　(b) 队列

(c) 双向队列

图 3-10　堆栈、队列和双向队列

表的存储分为顺序存储、随机存储和链式存储。在顺序存储中，节点连续存放，节点地址单元也是连续的。举例来说，集合S包含节点L、B、K、X、E和C。根节点地址是基地址s，第一个节点的地址是s+n，其中n是每个节点所占的存储空间大小。第二个节点的地址便是s+2n，依次类推，属性内容直接作为一组属性值处理，见图3－11，这里的属性值表示的是每个节点的人口数。

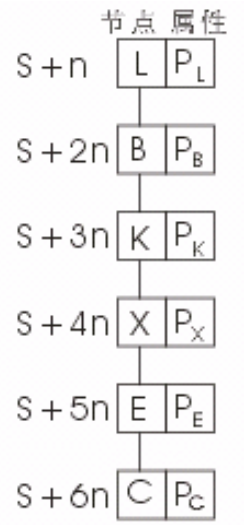


图 3-11　表的顺序存储

在随机存储中，节点被随机地存放在存储介质中，用一个顺序存储的索引数组指向各个节点的存储位置。上例中，各节点地址分别是l、b、k、x、e和c。在图3－12中，这些值分别存放在s+n、s+2n、s+3n、…、s+6n地址中，获取属性内容要通过两个步骤，首先通过索引找出节点，再通过节点获取属性值。

在链式存储中，表中第一个节点的地址存放在根节点的地址栏中(图3－13)，以后每一个节点的地址栏存有下一个节点的地址，直到最后一个节点为止。最后一个节点存入空地址。空地址表示没有后继节点。可见，下一个节点的地址显式地作为上一个节点的一个属性值。这种结构信息应该区别于该节点的其它专题属性。

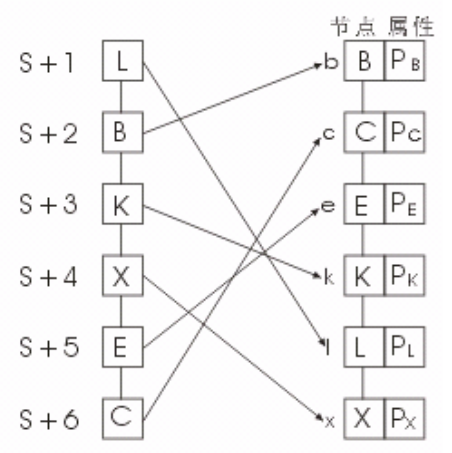


图 3-12　表的随机存储

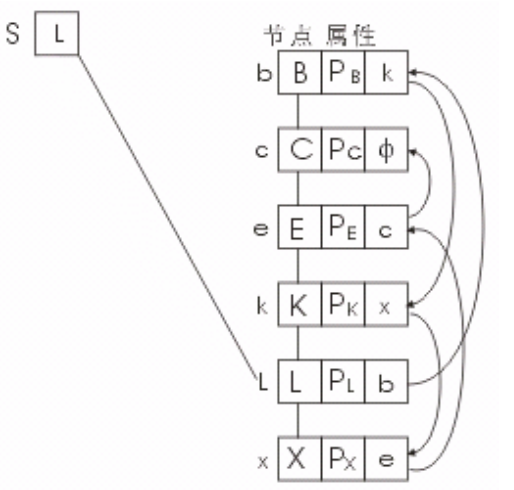
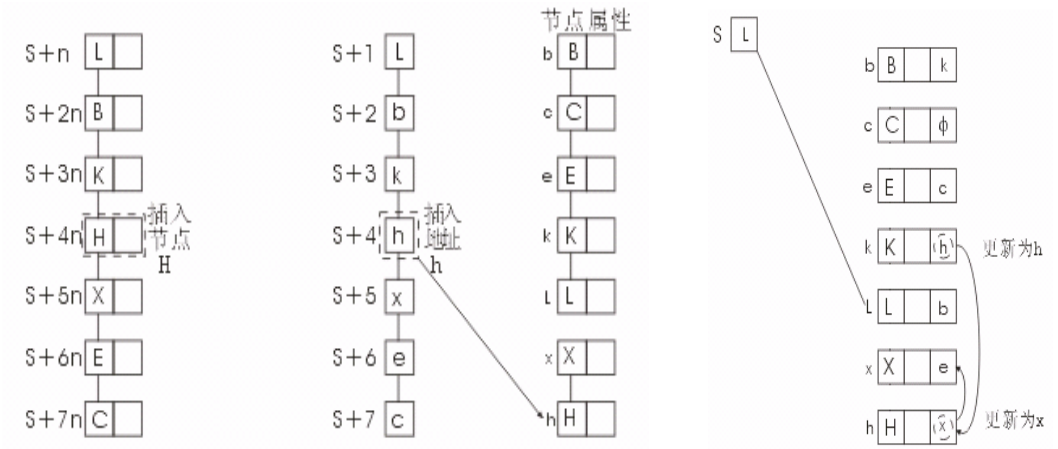


图 3－13　表的链式存储

链式存储在某些特定操作上具有比顺序存储和随机存储更多的优点。它能很容易地处理因节点的绝对位置改变带来的变化。尽管一个节点在表中的绝对位置改变了，但它的物理存储位置可以保持不变，只是节点的属性值即地址要改变。随机存储也允许节点的存储位置保持不变，但要改变其指向存储位置的指针。举例来说，如果要在节点X前插入节点H，在顺序存储中，则X、E和C的位置必须后移(图3－14a)。在随机存储中，X、E和C的位置(索引中)必须后移(图3－14b)。而在链式存储中，只需将节点K指向节点h，H指向x即可(图3－14c)。

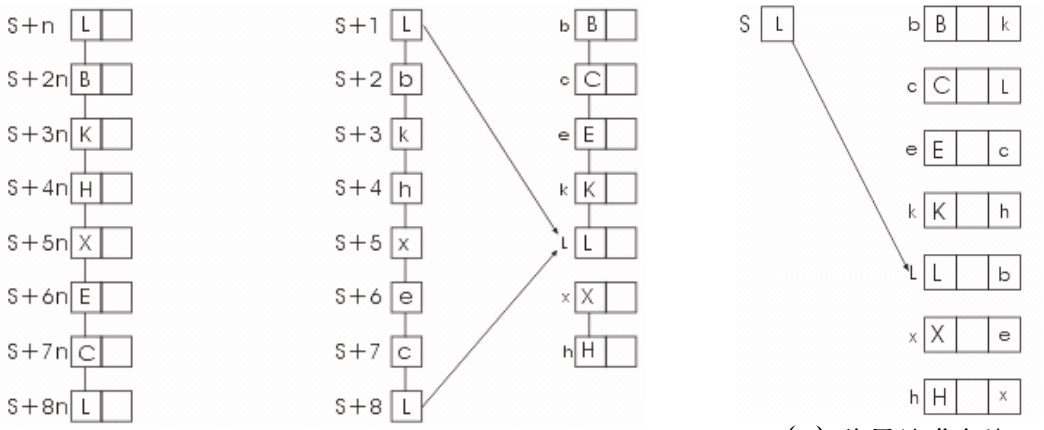


(a) 使用顺序存储　　(b) 使用随机存储　　(c) 使用链式存储

图 3－14　插入操作

反过来说，在不改变表中任何节点的绝对位置时，顺序存储和随机存储要优于链式存储。在顺序或随机存储中，可以很容易地访问第j个节点，在第四章中将较详细地讲解其查找过程。

线性表中还有两个特例：循环表和双重表，循环表包含一个闭合的路径拓扑。循环表按顺序存储时，第一个节点和最后一个节点相同(图3－15a)。按随机存储时，在顺序索引中重复第一个地址指针作为最后一个地址指针。循环表可以容易地通过链式存储实现，仅仅只需将最后一个节点的空指针指向第一个节点(图3－15c)。循环表中的第一个节点通常可以任意。双重表可以是线性的，也可以是循环的。在双重表中的节点序列中，既可以前移，也可以后移。在顺序或随机存储中，不需要为存取作任何修改，在链式存储中，需要一个指针指向前趋节点，而且根节点必须包含最后节点的地址(图3－16a)。

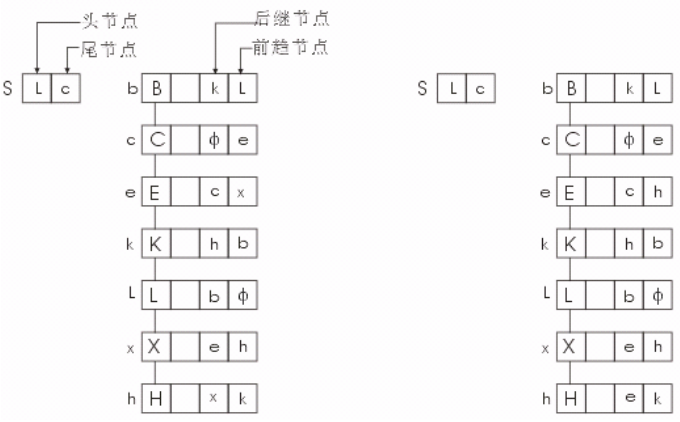


(a) 使用顺序存储　　(b) 使用随机存储　　(c) 使用链式存储

图 3－15　使用循环表

链式存储的双重表容易执行删除操作，如果明确哪个节点要删除，那么没有必要查找它的位置，只需将其前趋节点指向其后继节点即可。举例来说，图3－16a中要删除节点X，将H的后继节点值变为e，E的前趋节点值变为h即可（图3－16b)。尽管节点X仍在其存储位

置上，但它已不是链表中的一个元素。



(a) 删除前　　(b) 删除后

图 3－16　双重链表及其删除操作

3.2.2 图和树

在数据结构中，节点可能包含不止一个前趋或后继节点。图是一系列节点组成的网络拓扑。例如，任何地理底图都可以用图来表达，底图上的区域用节点来表示，而每对共享边界的区域则通过链相连，图3－17。在一个图中，节点间的邻接关系是对称的，链则利用线段图形来表达。

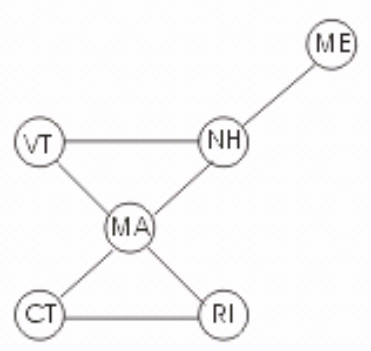


图 3－17　用图来表达地理底图

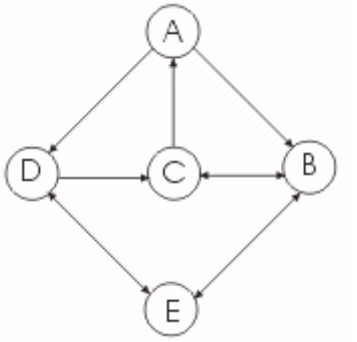
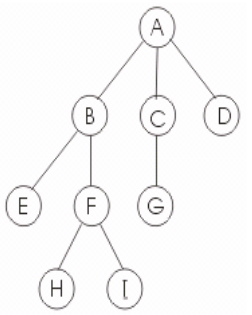


图 3－18　有向图

在有向图中，邻接关系是非对称的，箭头用来表示关系的方向。如果节点A与节点B相邻，但是节点B不与节点A相邻，那么，箭头由A指向B(图3－18)。如果两个节点互相邻接，则是一个双向箭头，分别指向两个节点。

节点V1和V2之间的路径是指连接第一个节点V_1到最后一个V_2之间的一条节点序列，序列中每个节点都只出现一次。在图3－18中，节点A和D之间的一条路径是（A，B，C，E，D。两个节点间的最短路径，是指节点序列中节点数最少的一条路径。A和D的最短路径是（A，D)。



(a) 树

节点	前趋节点	最老后继节点	后一兄弟节点
A	ϕ	B	ϕ
B	A	E	C
C	A	G	D
D	A	ϕ	ϕ
E	B	ϕ	F
F	B	H	ϕ
G	C	ϕ	ϕ
H	F	ϕ	I
I	F	ϕ	ϕ

(b) 链式分配

图 3-19　树的结构

全连通图是指存在一个连接每对节点的路径的图，回路是指头尾节点相同，中间节点不重复的路径。不包含回路的全连通图称为树，树中的两个节点只存在一条路径。在有根树中，存在一个根节点，包含树中所有节点。树中的节点通常按等级组织，其中一个节点位于最高级，所有其它的节点都在它之下(图3－19a)。在这种组织中，树中每个节点与它上一级的节点间只有一个连接通道。上一级节点通常称为父节点，一个节点可以与多个下一级节点相连，下一级节点通常称为子节点。任何一级节点中，具有相同父节点的节点称为兄弟。在树的图解中，位于最左边的兄弟标记为最老的兄弟，下一个靠左边的兄弟称为第二老，依此类推。这样，树的存储就可以按父节点、最老子节点、次老子节点、……的顺序组织。从总体结构上看，树是图的一个特例，链表是树的一个特例。

3.3 数字地图的空间结构

数字地图图形是空间点集在二维平面上的投影。无论图形多复杂，都可以将其分解为点（如控制点）、线（如河流）、面（如湖泊）三种基本图形要素，其中点是基本的图形要素。点、线、面的抽象不仅表达了客观世界的图形，而且，也表达了相互之间的关联信息。在地图数据库中，存储和处理的正是能以图形表示的各种地理数据及其属性数据（即空间数据和属性数据）。空间数据用来表示物体的位置、形态、大小和分布特征等诸方面的信息，而属性数据则表示物体是什么或怎么样，描述的是数据的语义信息。空间数据和属性数据之间通过标识码进行联接。

针对所研究的地理现象，为了进行空间操作和分析，必须定义空间实体及其相互之间的关系。数字地图的拓扑结构就是用来描述空间实体的空间联系。点、线、面三类实体的关系可以有六种组合，即点与点，如消防站与火灾地点的距离；点与线，如一条公路与两旁城镇，村庄之间的联系；点与面，如排污的烟筒与周围的环境；线与线，如表示公路、铁路或河流组成的运输网络；线与面，如一条输油管道流经哪些地区；面与面，如表示洪水影响区域与土地利用的叠合等。这些组合表现了实体间拓扑关系的相邻性、连接性、闭合性、包含性和一致性等，是空间数据处理和分析的依据。

确定数据实体或目标及其间关系，设计其在计算机中的物理组织、存储路径和数据库

结构等是空间数据建模的基本任务。空间建模就是以一定的数据模型为基础，具有其理论数学基础，许多学者在图形的数学表示方面进行了很多深入的研究。图形的空间结构的描述，在某种程度上也是一个空间建模过程。采用数学的方法，描述其规律与行为，将有助于把握空间结构和空间关系的实质与内涵。

数字地图的表达对象是客观地理现象，根据研究目的的不同，不可能对整个客观世界都进行研究，而是根据一定的规则将客观世界的图形进行分幅，将其本质特征与联系表达出来，选取研究对象所在的图幅进行研究。设单幅图形的集合为Map，客观地理世界图形集合为G，则G＝{Mapi ｜ Mapi∈G，i＝1，2，……，n}，记为：Mapi⊆G。进一步地，客观地理世界由点(point)集P（元素为顶点，记为pj），链（或弧段，line）集L（元素为链或弧段，记为 lj）和多边形（或面，area）集A（元素为多边形，记为ai）构成，则，

Mapi={{P}，{L}，{A} ｜ P，L，A∈Mapi}。

没有任何点、弧段、面的图为空图（empty graph），记作ϕ。如果P(Mapi)，L(Mapi)都是有限集合，则称Mapi为有限图，否则称为无限图。数字地图学中研究的一般都是有限图。

在本章中，0维、1维和2维地图目标是按照其拓扑属性来讨论的。本节讨论的是其相应的分类以及这些目标的数字制图表达及其邻域关系。面域（开二维目标）是一个基于网络拓扑表达的开点集。区域（闭二维目标）是这些点闭集。区域中某个给定点的邻域就是二维平面上的ε域。区域内部的点是指它的邻域完全包含在区域之内（图3－20）。区域外部的点或边界点是指其邻域部分位于区域之外。区域的外轮廓线是区域的外边界点集，是一个循环表；内轮廓线是指区域的内边界点集，也是一个循环表。



3－20　区域内部点和边界点

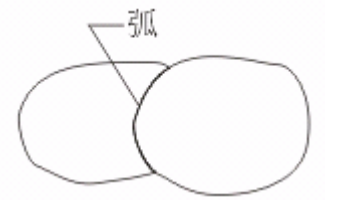


图 3－21　弧

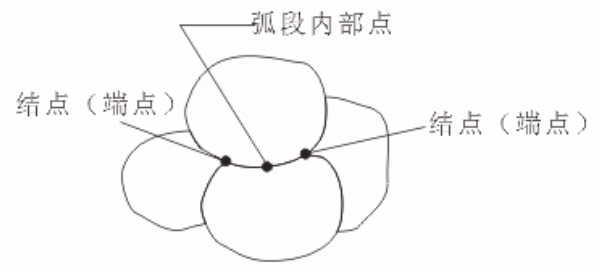
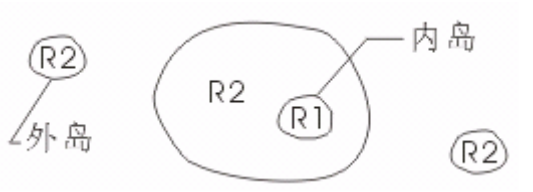


图 3－22　弧段内部点和结点



3－23　岛

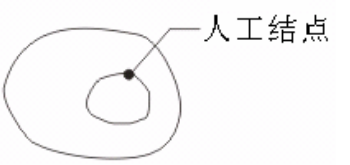


图 3－24　人为指定的结点

弧段（一维目标）是两个区域的非空交集上的外部点列（图3－21）。弧段构成区域的边界。弧段上给定点的邻域是一个开区间，这个开区间是由位于线上任意一边的点集组成。弧段内部点是指其邻域完全包含在弧段内的点，而弧段外部点则是指其邻域部分位于弧段外的点。弧段外部点通常称为结点，弧段由结点围成。如果一个区域完全包围另一个或多个区域，则被包围的区域称为岛（图3－23）。如果岛只有一个区域，那么由邻接区域交集形成的弧段是一个循环表，其头节点是任意的。尽管其所有点都是弧段内部点，但必须人为指定一个头节点从而使弧段有始端和末端（图3－24）。

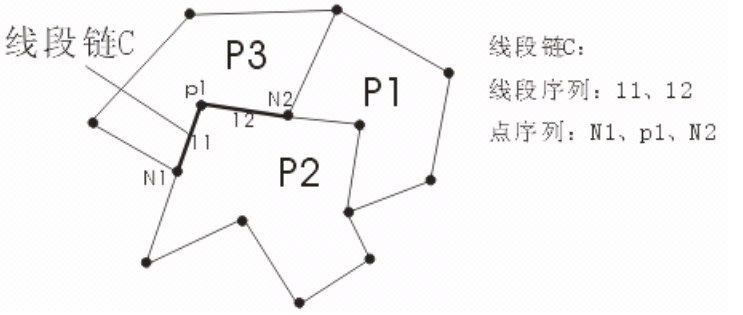


图 3－25　线段链（弧段）

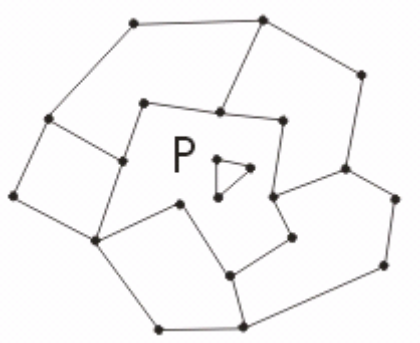


图 3－26　多边形

由于弧段上有无数多个点，但在数字环境下只能用有限个线段序列来表达，称为链或弧段（图3－25），记作：L＝{ei ｜ i=1，2,……，n}。链的端点称为结点N（node）。弧段常常由线段间的交点序列确定（图3－25）。弧段的结点即是该点列的头、尾点，其它的点都是弧段上简单的点。

区域在数字环境中的近似表达称为多边形，多边形上的边界点包含至少一个外环和0个或多个内环，并与其它多边形邻接(图3－26)。设弧段、多边形关系图记作Map(L,A)，则Map(L,A)={Li ｜ i=1，2，……，n}。如果两个多边形至少有一条公共边，则称这两个多边形邻接。

图3－27总结了模拟制图目标到数字形式的转换。

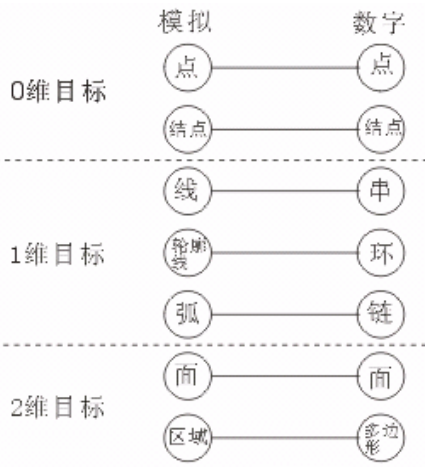


图 3－27　制图目标的模拟/数字转换

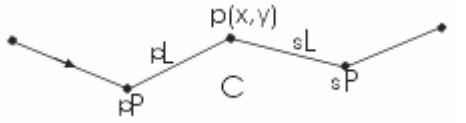


图 3－28　点的构成关系

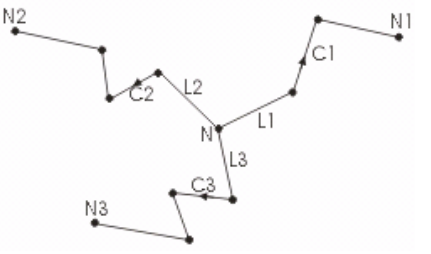


图 3－29　结点的邻接关系

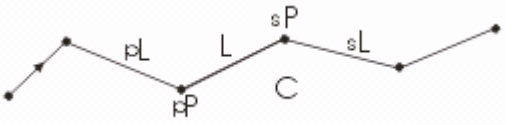


图 3－30　线段的邻接关系

简单点p等价于坐标(x ， y)，并包含在弧段C中，也是前继线段pL与后继线段sL(图3－28)相交形成的点。图3－29结点N是由按逆时针方向围绕它的弧段序列相交而形成。对于每个弧段Ci，结点N是由线段Li相交形成的，N邻接Ni。

图3－30中，线段L属于弧段C，它与前继线段pL相交形成点PP，它与后继线段sL相交形成点SP。弧段C也等价于线段序列或点序列，界定于结点pN和sN之间。图3－31，假设C的方向从pN到sN，则与其相邻的多边形RP位于右边，LP位于左边。弧段C是由围绕点sN处的下一个逆时针弧段RC和围绕点pN的下一个逆时针弧段LC界定的边界之内。即所谓下一弧段表示了在终结点sN关联的弧段中，该弧段逆时针方向的第一条弧段RC，而所谓上一弧段则表示了在始结点pN关联的弧段中，该弧段逆时针方向的第一条弧段LC。如果沿着多边形RP反时针移动，那么弧段RC紧位于C后，同样，如果沿着多边形LP反时针移动，那么LC紧位于C后(图3－31)。这就是DCEL（Doubly-Connected-Edge-List）表示模型对连通平面图提供的拓扑关系表达（Muller和Preparata，1978)。图3－31可以表达为表3－1。

表 3－1　DCEL 表达模型

弧段	始结点	终结点	左多边形	右多边形	上一弧段	下一弧段
C	pN	sN	LP	RP	LC	RC
……	……	……	……	……	……	……

环R构成多边形P，不管沿着顺时针或逆时针移动，多边形P总是位于其右边，图3－32。环R是由弧段构成的的循环表，即由一系列弧段或点组成(图3－32)。一个复杂多边形是由包含边界点的无序环序列组成。

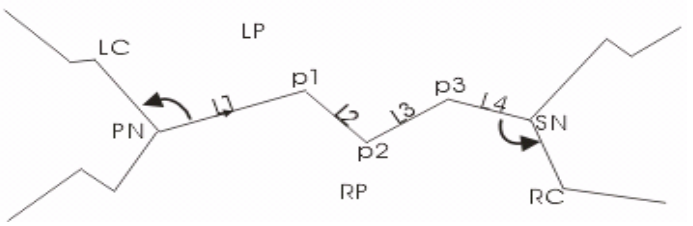


图 3－31　弧段的邻接关系

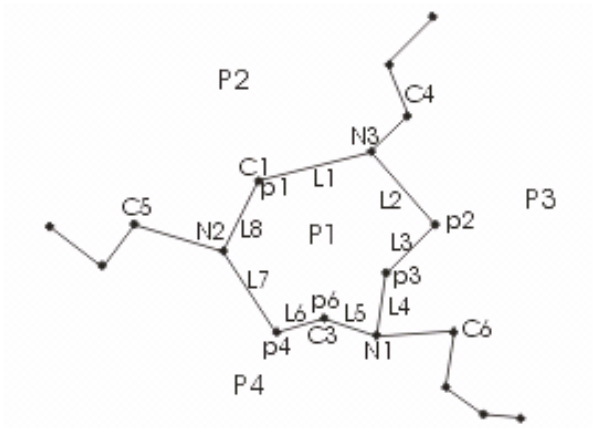


图 3－32　多边形的邻接关系

以上这些地图目标及其拓扑关系构成了在不同矢量数据模型中实现空间表达的基础。这些数据模型将转换成计算机环境下进行地理底图数据组织的数据结构。

3.4 拓扑数据模型及其结构

不同矢量数据模型间的主要区别在于有的是利用路径拓扑（Path Topology）方法，有的则是网络拓扑（Graph Topology）方法。在计算机辅助制图中，前者通常认为是非拓扑模型或几何模型，而后者则称为拓扑模型。这两种模型间的主要区别在于前者将二维要素的边界作为独立的一维要素来单独处理，而不考虑要素之间的相互关系；而后者则着重于在一个关于边界的关系网络模型中来考察区域拓扑或连通网络下的二维要素。如今，许多矢量模型将二者综合起来，路径拓扑已经作为网络拓扑的一个子集。

3.4.1 路径拓扑模型

最早的路径拓扑模型之一是面条模型（Spaghetti Model）。在这个模型中，面状单元间的边界作为坐标记录下来，没有关于坐标串与单个多边形间关系的相应信息。如表3－2中坐标串S1记录了图3－33中多边形P6、P4、P3、P2和P1部分边界点坐标。尽管该地理底图的轮廓线可以从这种数据模型中轻易获取，但是很难基于这种结构执行任何多边形操作。

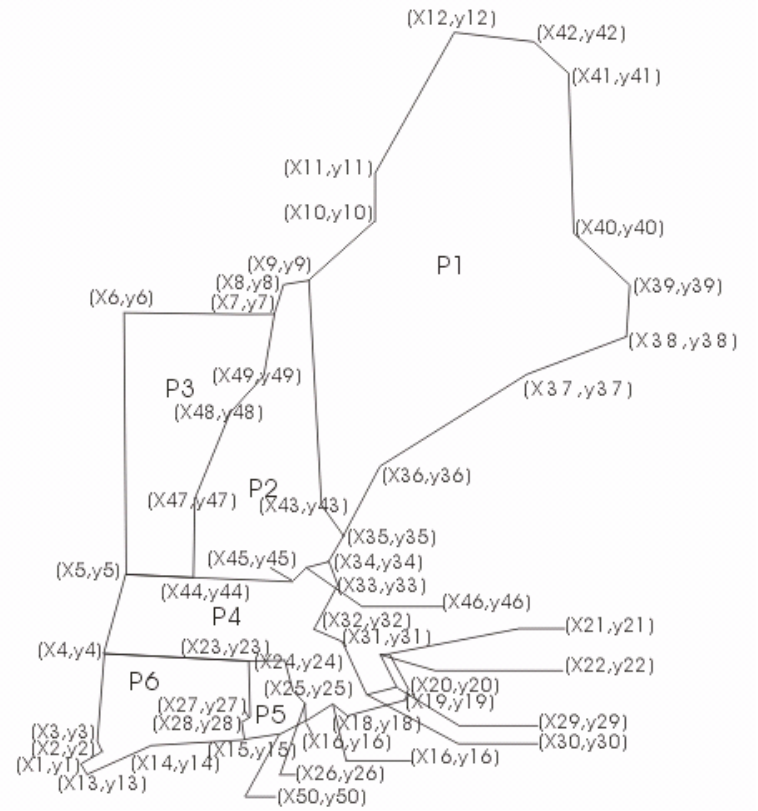


图 3－33　新英格兰地区的矢量示意图

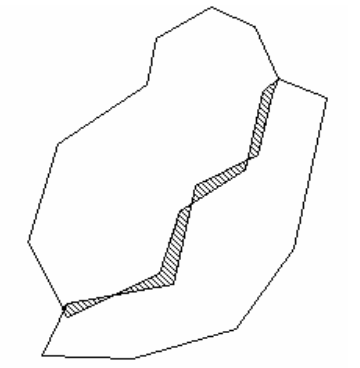


图 3－34　裂隙问题

为使多边形操作变得容易，多边形模型（Polygon Model）记录和存储了每个多边形的外轮廓线（即为组成外轮廓坐标的一个或多个循环表，表3—3）。然而，尽管这种结构很容易标识每个多边形实体，但其存储空间却迅速扩大。因为多边形间的公共边被存储两次。对数字图形的编辑也极易造成多边形公共边坐标的不匹配，通常会产生叠置空隙或裂片（图3—34）。另外，所有描绘在实地图上的多边形，其邻接关系是由地图上每个多边形的相对存储位置隐含定义的。然而，在数字图形中，只提供了实地图的存储功能，而没有任何明显的隐含暗示，因此很难重建多边形间的邻接关系。每一邻接关系可以通过搜索多边形的轮廓表，从中寻找两个多边形间相匹配的坐标串来识别。一般来说，有效的编辑过程（第四章）和高效的显示算法（见第六章）都会受到这些数据结构的限制。除了缺少多边形间邻接信息外，前两个模型还忽略了0维和1维地图目标的构成关系。

表 3－2　新英格兰地区的面条模型

串码	坐标表
S1	(x1,y1), (x2,y2), (x3,y3), (x4,y4), (x5,y5), (x6,y6), (x7,y7), (x8,y8), (x9,y9), (x10,y10), (x11,y11), (x12,y12)
S2	(x1,y1), (x13,y13), (x14,y14), (x15,y15), (x50,y50), (x16,y16), (x17,y17), (x18,y18), (x19,y19), (x20,y20), (x21,y21), (x22,y22)
S3	(x4,y4), (x23,y23), (x24,y24), (x25,y25), (x26,y26), (x16,y16),
S4	(x23,y23), (x27,y27), (x28,y28), (x25,y25)
S5	(x22,y22), (x29,y29), (x30,y30), (x31,y31), (x32,y32), (x33,y33), (x34,y34), (x35,y35), (x36, y36), (x37,y37), (x38,y38), (x39,y39), (x40,y40), (x41,y41), (x42,y42), (x12,y12)
S6	(x9,y9), (x43,y43), (x35,y35)
S7	(x5,y5), (x44,y44), (x45,y45), (x46,y46), (x34,y34)
S8	(x44,y44), (x47,y47), (x48,y48), (x49,y49), (x7,y7)

表 3－3　新英格兰地区的多边形模型

多边形码	坐标表
P1	(x9,y9), (x10,y10), (x11,y11), (x12,y12), (x42,y42), (x41,y41), (x40,y40), (x39,y39), (x38,y38), (x37,y37), (x36,y36), (x35,y35), (x43,y43), (x9,y9)
P2	(x7,y7), (x8,y8), (x9,y9), (x43,y43), (x35,y35), (x34,y34), (x46,y46), (x45,y45), (x44,y44), (x47,y47), (x48,y48), (x49,y49), (x7,y7)
P3	(x5,y5), (x6,y6), (x7,y7), (x49,y49), (x48,y48), (x47,y47), (x44,y44), (x5,y5)
P4	(x5,y5), (x44,y44), (x45,y45), (x46,y46), (x34,y34), (x33,y33), (x32,y32),

	(x31,y31), (x30,y30), (x29,y29), (x22,y22), (x21,y21), (x20,y20), (x19,y19), (x18,y18), (x17,y17), (x16,y16), (x26,y26), (x25,y25), (x24,y24), (x23,y23), (x4,y4), (x5,y5)
P5	(x15,y15), (x28,y28), (x27,y27), (x23,y23), (x24,y24), (x25,y25), (x26,y26), (x16,y16), (x50,y50), (x15,y15)
P6	(x23,y23), (x27,y27), (x28,y28), (x15,y15), (x14,y14), (x13,y13), (x1,y1), (x2,y2), (x3,y3), (x4,y4), (x23,y23)

早期路径拓扑模型的一个微小进步是点位字典模型。该模型是对多边形模型的一个改进，它记录的是各多边形边界上各点的编码ID并构成循环表，同时以数据字典方式记录下各点的坐标值（图3－35），利用字典就可通过点的编码找到其相应的坐标，表3－4。

表 3－4 新英格兰地区点位字典表达

多边形码	点表
P1	p3,p10,p11,p12,p42,p41,p40,p39,p38,p37,p36,p35,p42,p9
P2	p7,p8,p9,p43,p35,p34,p46,p45,p44,p47,p48,p49,p7
P3	p5,p6,p7,p49,p48,p47,p44,p5
P4	p4,p5,p44,p45,p46,p34,p33,p32,p31,p30,p29,p22,p21,p19,p18,p17,p16,p26,p25,p24,p23,p4
P5	p15,p28,p27,p23,p24,p25,p26,p15,p15,p50,p15
P6	p1,p2,p3,p4,p23,p27,p28,p15,p14,p13,p1
点码	点坐标表
p1	(x1,y1)
p2	(x2,y2)
p3	(x50,y50)
……	……

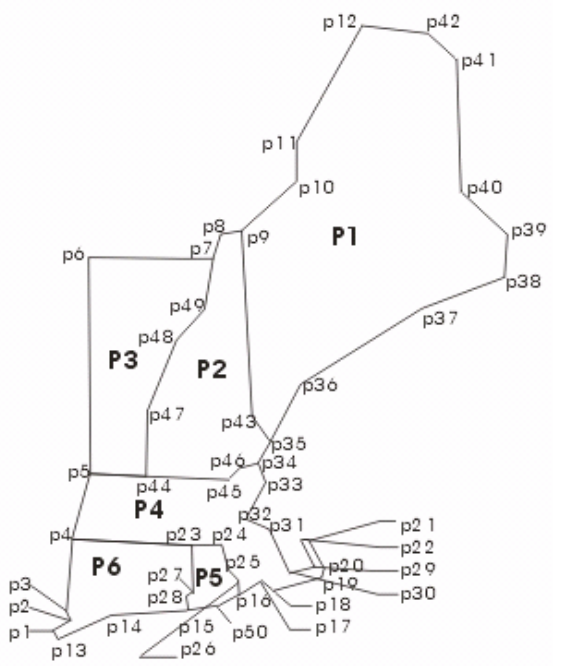


图 3－35 表达新英格兰地区的点编码

由此，任何多边形的显示都包含一个复杂的检索过程。首先从多边形表中得到点ID，再根据点ID获得坐标值。由于相同点的坐标只在点位字典中存储一次，因此这种方式大大降低了存储空间，而且不会再产生裂片。但公共边界上点的编码ID仍需存储两次，因此这个模型仍然存在多边形模型的线重复跟踪和邻接问题。

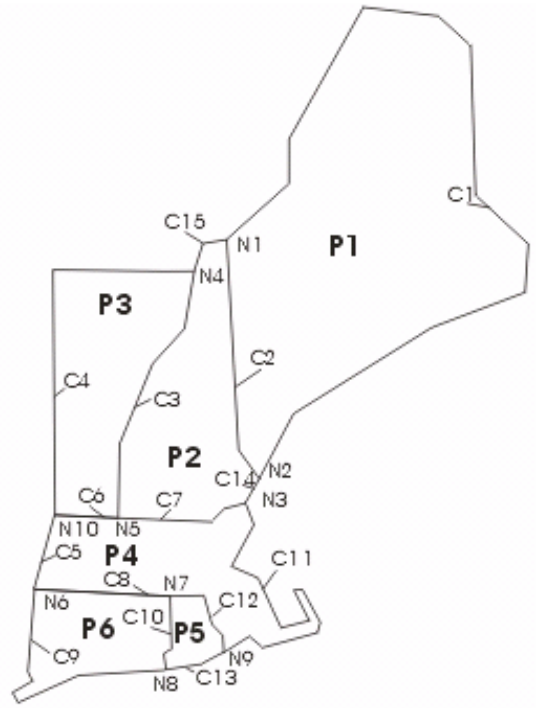


图 3－36　构成新英格兰地区的链

由多边形环的重复跟踪而产生的问题可归因于地图基本目标的不适当标识。两个相邻多边形只有一条公共边，这条公共边是组成该两个多边形的弧段。扩展的路径拓扑模型——弧段/点位字典模型合并了多边形与弧段，以及弧段与点的构成和组成关系，见图3－36。在弧段/点位字典模型中，每个多边形由弧段的循环表组成，而每条弧段又由一列点组成，见表3－5。

表 3－5　新英格兰地区的弧段/点位字典表达

多边形码	弧段编码表
P1	C1,C2
P2	C3,C15,C2,C14,C17
P3	C4,C3,C6
P4	C5,C6,C7,C11,C12,C8
P5	C10,C12,C13
P6	C9,C8,C10
弧段码	点编码表
C1	p9,p10,p11,p12,p42,p41,p40,p39,p38,p37,p36,p35
C2	p9,p43,p35
C3	p44,p47,p48,p49,p7
C4	p5,p6,p7
C5	p4,p3

C6	p5,p44
C7	p44,p45,p46,p34
C8	p4,p23
C9	p4,p3,p2,p1,p13,p14,p15
C10	p26,p27,p28,p15
C11	p16,p17,p18,p19,p20,p21,p22,p29,p30,p31,p32,p33,p34
C12	p23,p24,p25,p26,p16
C13	p15,p50,p16
C14	p34,p35
C15	p7,p8,p9

由此，多边形轮廓线的提取分三个步骤。首先从多边形表中得到弧段 ID 值，然后根据弧段的 ID 值获取点 ID 值，最后由点 ID 值得到相应的坐标。这样可以很好解决裂隙问题，因为公共边上所有弧段的相同点的 ID 值相同。

由此可以看出，路径拓扑模型的主要缺点是不能解决数据点、结点和0维目标的识别问题。更重要的是由于弧段的构成细节被忽略，各多边形被作为单个独立的实体来考察，不能识别出多边形间的相邻关系，因此在模拟地图上能够看见的面状联系不能从这类数字模型中计算出来，也不利于空间数据的分析和可视化。

3.4.2 网络拓扑模型

早期的矢量模型中含有多边形间邻接关系的是DIME文件（Dual Independent Map Encoding)。DIME文件是由美国人口统计局为存储城市统计区的线状面块而设计出来的。DIME系统是ACG（Address Coding Guide）系统的产物。在ACG系统中，能够根据街道的地理位置将街道匹配到城市统计区中,从而方便统计局进行人口普查。

DIME文件的基本单元是DIME段，见图3－37。一个DIME段即是一部分街道、行政区界、水涯线或铁路线等的直线段。对于每个段，两个端点ID分别为有方向性的“起始”和“终止”。基于这个方向，多边形ID相应地记录为左或右多边形（针对该DIME段)。由于面状区域是按层次组织的，所以不止一个左或右多边形的ID附加到段上。最低一级的面状单元是街区，然后是街区群、人口统计区，直至到省。因此，如果段位于某个区域内部，则其左右多边形ID是一样的。举例来说，如果段是位于人口统计区内街道的一部分，那么其左右统计区的ID是一样的。

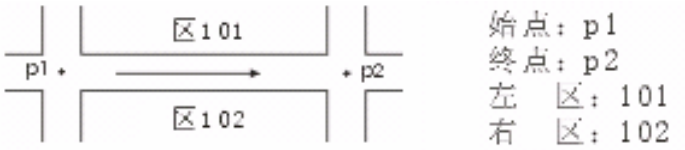


图 3－37　DIME 段

必须注意到，人口统计局将DIME段的端点作为结点（Node)，这种定义与本文定义的结点是不一致的。尽管端点限定了一个段的边界，它仍然是构成两个邻接多边形（除街区外）的弧段的内部点。图3－38展示了新英格兰地图的DIME段划分，表3－6提供了其DIME模型。DIME数据结构相对于路径拓扑模型具有一定的优点，其多边形之间的邻接性可以很容易访问，通过双向关系“起始”和“终止”以及左右多边形使得编辑、检索DIME基础文件变得

容易。

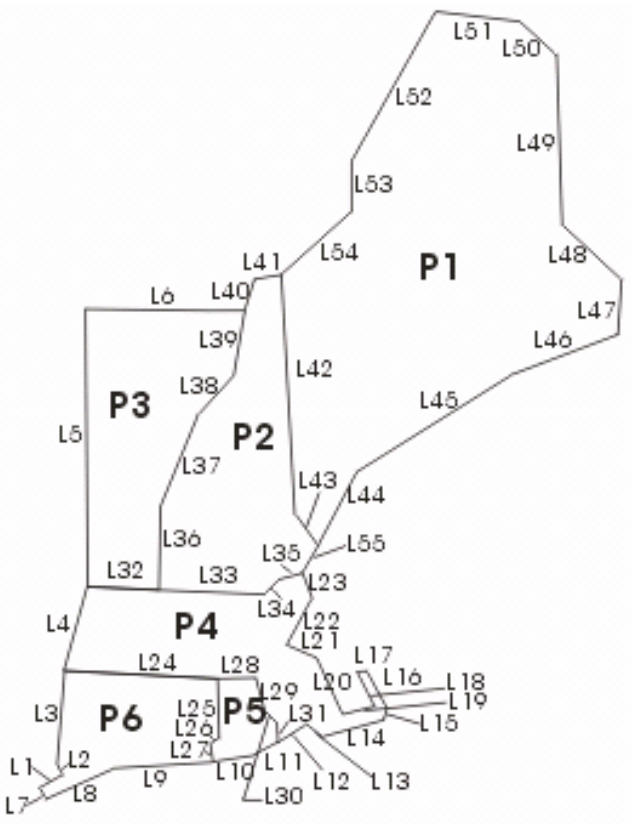


图 3－38　新英格兰地区的 DIME 段划分

表 3－6　新英格兰地区的 DIME 模型

DIME 段	起点	止点	左多边形	右多边形
L1	p1	p2	P7	P6
L2	p2	p3	P7	P6
L3	p3	p4	P7	P6
……	……	……	……	……
L25	p26	p27	P5	P6
……	……	……	……	……
L54	p9	p10	P7	P1

在DIME中，由于线状地理要素的路径拓扑没有显式定义，因此，获取多边形轮廓线是相当复杂的。第一阶段是要找出所有的DIME段及其左右多边形，表3－7列出了所有属于多边形P3的段。在第二阶段，这些段按以下顺序排列：第一段的止点是后一段的起点。最后一个段的止点是第一个段的起点，这样便形成了一个循环表，见表3－7。在这个过程中，起、止点是可以按需切换的，以使多边形始终位于每个段的右边。

表 3－7　在 DIME 模型中提取多边形轮廓线

阶段一：检索所有属于 P3 的段				
L5	p5	p6	P7	P8
L6	p6	p7	P7	P3

L32	p5	p44	P3	P4
L36	p44	p47	P3	P2
L37	p48	p47	P2	P3
L38	p48	p49	P3	P2
L39	p49	p7	P3	P2
阶段二：记录段，建立轮廓线的路径拓扑				
L5	p5	p6	P7	P8
L6	p6	p7	P7	P3
L39	p7	p49	P2	P3
L38	p49	p48	P2	P3
L37	p48	p47	P2	P3
L36	p47	p44	P2	P3
L32	p44	p6	Pl4	P3

为了对其一些不足之处进行改进，美国计算机图形与空间分析实验室基于弧段结构构造了POLYVRT系统（POLYgon conVeRTer)。它将弧段的关系按DIME段给出，弧段的端点被称为结点而不是点，在这个系统中，结点与点严格区分。在表3－8中，给出了弧段与结点间的关系。图3－39给出了弧段与多边形的关系。另外，每个弧段的点按序存放在一个单独的文件中，一个指向这些点的开始处的指针存放在弧段文件。当记录下每个多边形的循环表时便产生了一个多边形文件。POLYVRT模型综合了弧段/点位字典模型和DIME模型，但它的点位字典划分为独立的点和结点。因此，POLYVRT模型与DIME模型的区别在于边的不同选择，而该边是用来描述多边形之间的关系并作为关系文件记录的基本单元。

表 3－8 新英格兰地区的 POLYVRT 拓扑模型

弧段	起结点	止结点	左多边形	右多边形
C1	N1	N2	P7	P1
C2	N2	N1	P2	P1
C3	N5	N4	P3	P2
C4	N10	N4	P7	P3
C5	N6	N10	P7	P4
C6	N5	N10	P4	P3
C7	N3	N3	P2	P4
C8	N6	N7	P4	P5
C9	N6	N8	P6	P7
C10	N8	N7	P6	P6
C11	N9	N3	P4	P7
C12	N7	N9	P4	P5
C13	N8	N9	P	P7
C14	N3	N2	P	P7
C15	N4	N1	P	P2

上述路径拓扑和网络拓扑模型都可运用顺序或随机访问文件结构。DIME和POLYVRT模型都是以线性要素(DIME段、弧段或链)作为存储结点之间、弧段之间以及多边形之间相互关系的基本单元，其缺点是缺乏对线性要素间邻接关系的显式描述。拓扑模型中另一类方法是用结点结构来组织这些关系，根据任何一个结点都具有且仅有三个相邻结点(如果存在四个以上的相邻结点，则补入一个具有相同位置的虚结点，原结点与虚结点间的长度为0，以保证每个结点具有三个相邻结点的特征)，每个结点都具有且仅有三条相关链和与这三条相关链相关的右多边形(按右手法则确定)，在拓扑文件中记

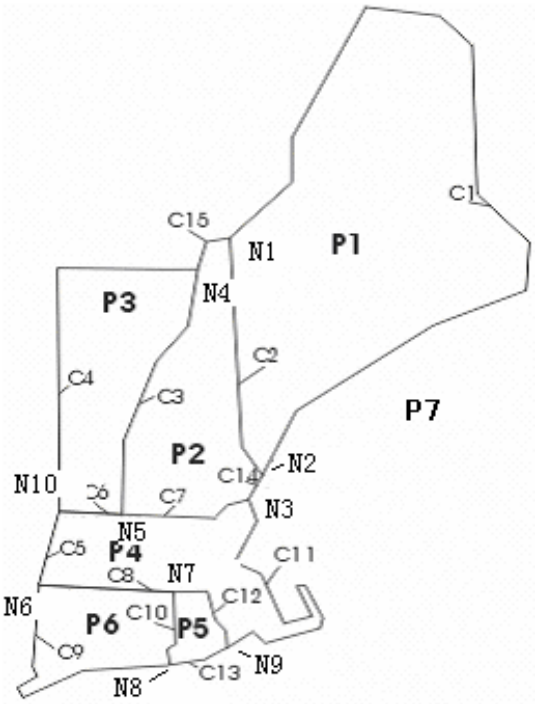


图 3－39　新英格兰地区的结点位置

录下各结点的三个相邻结点、三条相关链和三个右多边形，以此来实现数据处理时对多边形的操作与检索，这便是图形拓扑模型中的NODE模型即结点模型。对于每个结点，其邻接结点的ID值是按逆时针方向记录的。图3－39中的结点关系在表3－9中。

NODE模型是链式文件结构称结点的邻域关系文件。每个多边形边界的检索就是通过交叉引用该文件和包含每个多边形起结点ID值的多边形文件来实现的。若给定一个多边形P的起始结点的ID值，就可以通过扫描结点的ID记录来查找多边形P。多边形P边界的下一个结点是以P为右多边形的邻接结点，由此就找出了第一条弧段。通过扫描当前结点的内容可以找到下一条弧段和新的结点ID的指针，如此结点与弧段的穷举式依次搜寻P的边界，直到下一结点ID与初始结点ID值相同，从而最终确定P的位置。

举例来说，表3－9中，多边形P3边界的检索是通过存取多边形文件并找出其起始结点ID值N10实现的。首先P3是邻接结点N4和弧段C4的右多边形，其次P3又是邻接结点N5和弧段C3的右多边形，最后，它是邻接结点N10和弧段C6的右多边形。因此P3是从C4到C3再到C6并回到N10。

表 3－9　新英格兰地区的 NODE 模型

结点	弧段			右多边形			邻接结点		
N1	C15	C2	C1	P7	P2	P1	N4	N2	N2
N2	C14	C1	C2	P2	P7	P1	N3	N1	N1
N3	C7	C11	C14	P2	P4	P7	N5	N9	N2
N4	C15	C4	C3	P2	P7	P3	N1	N10	N5
N5	C3	C6	C7	P2	P3	P4	N4	N10	N3
N6	C5	C9	C8	P4	P7	P6	N10	N8	N7
N7	C8	C10	C12	P4	P6	P5	N6	N8	N9

N8	C9	C13	C10	P6	P7	P5	N6	N9	N7
N9	C11	C12	C13	P7	P4	P5	N3	N7	N8
N10	C4	C5	C6	P3	P7	P4	N4	N6	N5

多边形	结点	多边形	结点
P1	N1	P4	N5
P2	N3	P5	N8
P3	N10	P6	N8

另一种链式文件结构是扩展弧段模型，它是对DIME和POLYVRT结构的改进。DIME文件由于缺少DIME段之间的构成关系而存在不足。POLYVRT也由于缺少对弧段状况的显式描述而需改进。弧段之间的连接关系隐含在构成多边形轮廓线的弧段循环表中。弧段的邻域可加以扩展，从而包含围绕某一结点的下一逆时针弧段的ID，见图3－31。当沿着某一多边形轮廓顺时针方向前进时，这些弧段将依顺序成为下一条弧段。

这样，每一弧段的邻域关系包括了第一和最后一个结点，左、右多边形以及相应的左、右弧段(LC和RC)。右弧段依顺序是右多边形的下一条弧段，左弧段依顺序是左多边形的下一条弧段。另外，多边形文件还包含了边界弧段的ID，弧段文件则包含了点表。这样一个系统曾被用作建立扩展的DIME段，从而方便了街区群或市区内统计区轮廓的提取。图3－39的扩展弧段关系表达见表3－10。

表 3－10 扩展弧段模型

弧段	起结点	止结点	左多边形	右多边形	左弧段	右弧段
C1	N1	N2	P7	P1	C15	C2
C2	N2	N1	P2	P1	C14	C1
C3	N5	N4	P3	P2	C6	C15
C4	N10	N4	P7	P3	C5	C3
C5	N6	N10	P7	P4	C9	C6
C6	N5	N10	P4	P3	C7	C4
C7	N5	N3	P2	P4	C3	C11
C8	N6	N7	P4	P6	C5	C10
C9	N6	N8	P6	P7	C8	C13
C10	N8	N7	P6	P5	C9	C12
C11	N9	N3	P4	P7	C12	C14
C12	N7	N9	P4	P5	C8	C13
C13	N3	N9	P5	P7	C10	C11
C14	N3	N2	P2	P7	C7	C1
C15	N4	N1	P7	P2	C4	C2

为了提取多边形P3的边界，假设以ID为C3的弧段作为起始搜索的弧段。在扩展弧段表中扫描C3内容看P3是否为其左或右多边形；由于P3为C3的左多边形，则弧段C6作为下一条应该搜索的弧段。然后检查C6，由于P3为其右多边形，则C4为其下一弧段。最后检查C4内容，由于P3为其右多边形，且C4的右弧段与起始弧段相同，因此搜索完毕取得了P3的边界。

网络拓扑模型是对路径拓扑模型的各不足之处的改进与完善。在网络拓扑模型中强调了对多边形间关系的描述，即在拓扑结构中，将一个多边形图形中的结点、边和面分别显式地描述，并记录它们之间的关系，这样不但可以反映出面与面间的相邻关

系，还反映了边与边之间、点与点之间的连接关系。

无论是DIME模型、POLYVRT模型，还是NODE模型无一不是为了有效地描述空间物体间的关系，使得在空间数据处理和分析时，操作与检索更为方便与迅捷。不同的模型具有不同的特点，因而具有不同的应用。本节这里并没有讨论所有可能的地图上基础地理要素的数据组织方法。最合适的模型的选择要取决于制图处理系统对其功能上的需求。模型设计的关键就是针对具体应用设计具体模型。例如我们说POLYVRT模型比DIME模型效率更高，这是指对一般应用而言，但DIME在表示人口普查数据方面还是比POLYVRT更适合。PAN图（Polygon-Arcs-Nodes）有助于理解这种关系，它可以用来帮助开发满足特殊用途的数据结构。在PAN图中，每一类目标作为图中的一个顶点。图3－40，顶点P表示多边形目标，顶点A表示弧段，顶点N表示结点。图中连接两个顶点的箭头表示一个类的目标有指向另一个类的目标的指针，或者同一个类中其他目标的指针。例如，在结点结构中，结点有指向其他结点、多边形和弧段的指针，因此在结点与每一类之间有相连的箭头（图3－40a）。另外，多边形也有指向结点的指针，在顶点P和N之间也有相连的箭头。从图中容易看出，多边形边界的提取是以结点集合为中介的两步过程来实现的。而在扩展弧段结构中，弧段则成为连接其他弧段、多边形以及结点的中介图3－40b）。如果多边形与弧段之间有指针关系，那么在多边形和弧段之间也就有箭头相连。有了这种连接，多边形的边界可直接获取；如果没有这种连接，那么首先要搜索出与该多边形相关的弧段集，才能最终获取该多边形的边界。



(a) 结点结构　　(b) 扩展弧段结构

图 3－40　PAN 图的例子

3.4.3 其它拓扑模型

通常，表面地理数据不是按多边形单元来采集的，而是按位于不规则的空间间隔上的控制点来采集，这些控制点反映了地表的变化。本章前面曾提到相伴单元结构存在对偶性，参看图3－4，这里不再赘述。控制点代表了网络的对偶结点。连接各相邻控制点便形成一个三角网，见图3－41。每个三角形的方向随着地表方向的变化而变化。在图3－41中，在原有7个控制点的基础上添加了一个虚构控制点C8，代表背景区域，用虚线连接。TIN（Triangular Irregular Network－不规则三角网）的基本目标是这些作为三角形顶点的控制点本身，三角网是控制点之间的连接产生的连线本身就是三角形的边。

TIN的数据结构是基于网络的边界与构成关系进行组织的。一般情况下，其组织单元是三角形。图3－41中的三角形数据结构见表3－9。对每个三角形，记录与其共边的三个三角形ID值；然后顺序记录构成该三角形的控制点的ID值，这时以两个控制点为端点的边的ID也就已隐含记录了。这里TIN数据结构的表达是前述结点模型的对偶，三角网中三角形、控制点以及三角形的边分别是矢量地理底图中结点、多边形和弧段的对偶目标。

表 3－9　TIN 数据结构

三角形	边	控制点	邻域三角形
T1	S13 S18 S7	C2 C8 C5	T2 T6 T7
T2	S14 S13 S8	C1 C8 C2	T3 T1 T9
T3	S15 S14 S9	C3 C8 C1	T4 T2 T10
T4	S16 S15 S10	C7 C8 C3	T5 T3 T11
T5	S17 S16 S11	C5 C8 C7	T6 T4 T12
T6	S18 S17 S12	C5 C8 C6	T1 T5 T8
T7	S7 S6 S1	C2 C5 C4	T1 T8 T9
T8	S6 S12 S5	C4 C5 C6	T7 T6 T12
T9	S8 S1 S2	C1 C2 C4	T2 T7 T10
T10	S9 S2 S3	C3 C1 C4	T3 T9 T11
T11	S10 S3 S4	C7 C3 C4	T4 T10 T12
T12	S11 S4 S5	C6 C7 C4	T5 T11 T8

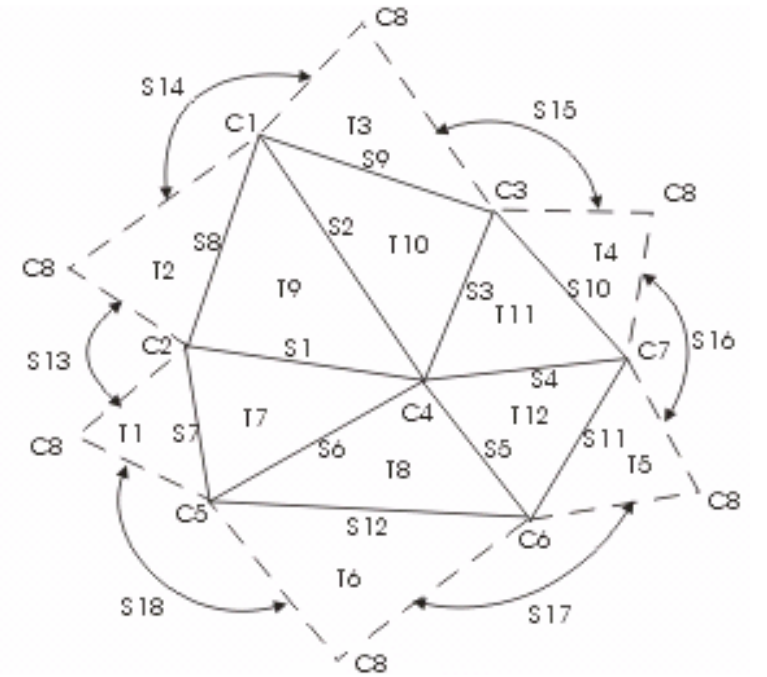


图 3－41 不规则控制点的三角网

从同一控制点集可以有许多不同的三角剖分方法，其中一种特殊的剖分方法是Delaunay三角剖分，其基础是将每一控制点与相应的Thiessen或Voronoi邻域相连。

Voronoi图（Voronoi Diagram，又称Thiessen多边形，Thiessen tesselaton）在计算几何中是一个被广泛研究的问题，它是不规则点集的最基本的和最重要的几何构造。它是基于邻近区域概念对空间的一种分割方式，一个Voronoi多边形内的任意一点到本Voronoi多边形中心点的距离都小于其到其它Voronoi多边形中心点的距离，见图3－42；它也可以理解为对空间的一种内插方式，空间中的任何一个已知点的值都可以由距离它最近的已知点（采样点）的值来替代。Thiessen多边形是一个连通集，凸多边形P是由m条边构成的，这些边将P所包围的点与其背景多边形P′分离开来（图3－42）。要生成这样的多边形就是

要寻找点集p，它们满足等距并最接近三个中心点的条件，而这些点称为Thiessen顶点或Voronoi顶点，每一Thiessen边都是相邻两个中心点连线的垂直平分线。Voronoi图的每个顶点，恰好是三条边的的公共交点，等价地说，Voronoi顶点是原离散点集合的三个点的圆心，图3－43。包含n个中心点的Voronoi图有3(n-2)条Voronoi边和2(n-2)个Voronoi顶点。如图3－42中Voronoi图有3(8－2)即18条边和2(8－2)即12个顶点。

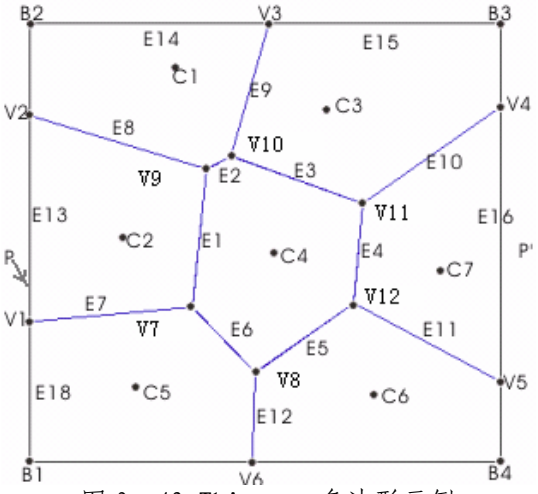


图 3－42 Thiessen 多边形示例

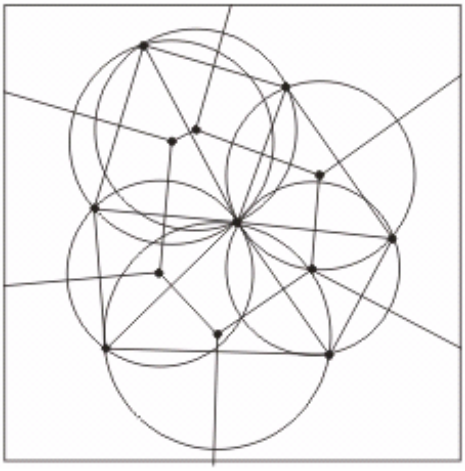


图 3－43 Thiessen 顶点为圆心的圆与 Delaunay 三角形

Voronoi图与Delaunay三角网互为对偶，将Voronoi图中各多边形单元的内点连接后得到一个布满整个区域而又互不重叠的三角网结构。Voronoi顶点也是Delaunay三角形的外接圆的圆心，图3－43。由于Voronoi中心点、顶点和边是三角网中的控制点、三角形和边的对偶目标，所以可以构造与TIN模型（和结点模型）一致的Voronoi多边形数据结构。如果Voronoi顶点位于边界上，则其下一元素指向该边界上低编号的边界顶点。图3－42中，Voronoi顶点V1位于连接B1和B2的边界上，则其指向B1，而V5则指向B3。见表3－10。该表是图3－42中Voronoi图完整的的数据结构。每一Voronoi多边形轮廓也可以按与结点模型中搜索多边形轮廓同样的方式检索出来。

表 3－10 Voronoi 图数据结构

顶点	边	控制点	邻接顶点	边界顶点
V1	E13 E18 E7	C2 C8 C5	V2 V6 V7	B1
V2	E14 E13 E8	C1 C8 C2	V3 V1 V9	B1
V3	E15 E14 E9	C3 C8 C1	V4 V2 V10	B2
V4	E16 E15 E10	C7 C8 C3	V5 V3 V11	B2
V5	E17 E16 E11	C5 C8 C7	V6 V3 V12	B3
V6	E18 E17 E12	C5 C8 C6	V1 V5 V8	B4
V7	E7 E6 E1	C2 C5 C6	V1 V8 V9	0
V8	E6 E12 E5	C4 C5 C6	V7 V6 V12	0
V9	E8 E1 E2	C1 C2 C4	V2 V7 V10	0
V10	E9 E2 E3	C3 C1 C4	V3 V9 V11	0
V11	E10 E3 E4	C7 C3 C4	V4 V10 V12	0
V12	E11 E4 E5	C6 C7 C4	V5 V11 V8	0

将封闭多边形内部进一步划分为子多边形，以使每个子多边形内的任意一点到该子多边形所占有的原多边形的一条边的距离小于该点到原多边形其它边的距离，这样的划分称为Bimedial骨架化（图3－44a)。按照这种区域分割原则，Bimedial骨架图中的原多边形不必是凸多边形，所划分的各个子多边形则都是凸多边形。

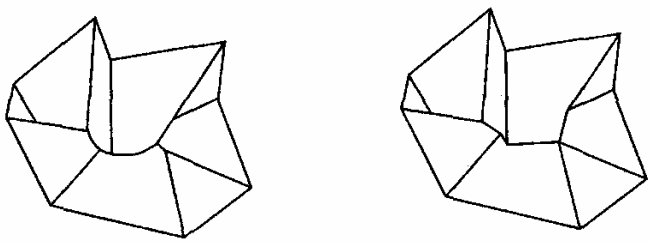


图 3－44 Bimedial 骨架图和 Bisector 骨架图

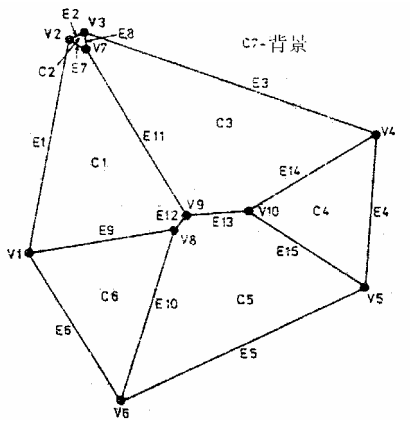


图 3－45 凸多边形的中轴和二等分骨架线

可以进一步地定义所划分的各子多边形中的任意一点到该子多边形所占有的原多边形的一条边或其内在的延长线的距离比到原多边形其它边及其内在延长线的距离都短，这称

为Bisector骨架化（图3－44b）。在Bisecter骨架图中，原多边形不一定必须是凸多边形，但如果是凸多边形的话，那么Bimedial骨架图和Bisector骨架图就将相互一致，所划分的子多边形也一定是凸的。Bisector骨架图是对Bimedial骨架图区域分割方法的一种调整与修正，图3－45，其相应的骨架线数据结构表达在表3－11中。

表 3－11　存储骨架图顶点的数据结构

顶点	构成边			构成子多边形			邻接顶点		
V1	E6	E9	E1	C7	C6	C1	V6	V8	V2
V2	E1	E7	E2	C7	C1	C2	V1	V7	V3
V3	E2	E8	E3	C7	C2	C3	V2	V7	V4
V4	E3	E14	E4	C7	C3	C4	V3	V10	V5
V5	E4	E15	E5	C7	C4	C5	V4	V10	V6
V6	E5	E10	E6	C7	C5	C6	V5	V8	V1
V7	E8	E7	E11	C3	C2	C1	V3	V2	V9
V8	E9	E10	E12	C1	C6	C5	V1	V6	V9
V9	E13	E11	E12	C5	C3	C1	V10	V7	V8
V10	E14	E13	E15	C4	C3	C5	V4	V9	V5

对于不含内环的多边形，其骨架拓扑图是一颗树（不包括原多边形边），如图3－46所示。

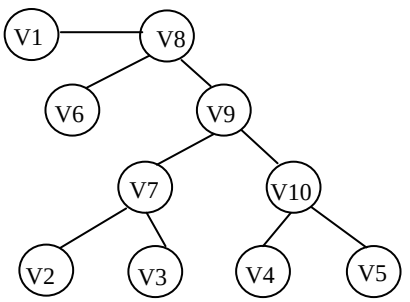


图 3－46 骨架树

Voronoi多边形是一种重要的混合结构，它融图论与几何问题求解为一体，是矢/栅空间模型的共同观察途径。如果将空间邻接定义为多边形邻接，并把围绕各个物体的Voronoi多边形的边界用等距离准则来确定，则地图上的所有物体（此处为点和线段）都具有明确的邻域，从而使之在数字地图学中有着广泛的应用前景。

3.4.4 ARC/INFO 的拓扑空间表达模型

3.4.4.1 ARC/INFO 拓扑空间关系的表示方法

ARC/INFO是美国ESRI公司开发的GIS软件，作为世界GIS的拓荒者及当今技术的领先者，ESRI在GIS领域已有几十年的历史。1997年，美国《SOFTWARE MAGAZINE》公布的全球前500名软件厂商排名中，ESRI名列第44位，也是唯一入前50名的GIS厂商。据《GIS WORLD》报道，ESRI公司占1996年世界软件市场份额的35.5%，保持全球第一的市场占有率（ESRI，

1998)。为此，研究ARC/INFO的数据结构与数据组织方法，吸取其优点，对国内数字地图基础软件的开发具有重要意义。

（一）ARC/INFO 的特征类型

ARC/INFO象传统地图一样，以点、线、面这三种基本空间特征类型来记录地理位置和表示地理现象。

1．点：单个位置或现象的地理特征表示为点特征，如水准点、井等。点由一对(X，Y)坐标定义，没有长度和面积。

2．弧段：线状地理特征用弧段表示，弧段特征用来定位和描述两点之间连线的地理信息，而不仅是一个点。弧段以结点为起止点，中间点以一串(X，Y)坐标对表示，确定了一条弧及其形状。

3．面：面由一组或多组弧段首尾连接而成。

4．结点：弧段的起点或终点。

（二）ARC/INFO 拓扑空间关系表示模型

1．弧段－结点拓扑结构

如图3-47，在数字化弧段时，ARC/INFO将每个弧段的起始结点和终止结点记录在Arc文件中。利用弧段－结点的拓扑结构，ARC/INFO很容易地确定：

(1)弧线与其端结点的相连性；

(2)弧线的方向，即从起始结点到终止结点的方向；

(3)弧线的长度，即从起始结点到终止结点量测的长度；

(4)连通性，如果弧与弧有公共结点，则称弧与弧连通。连通性是很多网络跟踪和路径查找操作的基础。

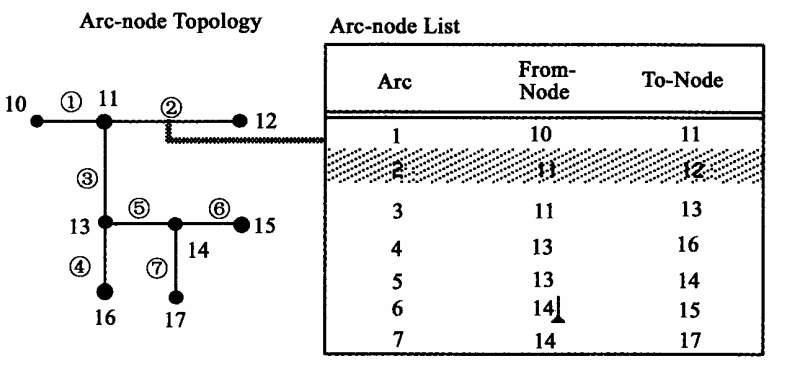


图 3－47 弧段—结点拓扑

2．多边形－弧段拓扑结构

如图3-48，多边形－弧段拓扑结构用来定义区域。一个多边形由边界的弧规定，包括那些在多边形里边的“洞”或“岛”。ARC/INFO使用多边形－弧段拓扑结构来定义多边形。多边形并不直接存储坐标信息，而是在PAL文件中由组成多边形的弧段来定义多边形。

图3-48中，弧的列表按顺时针方向由每个弧段的内部顺序号顺序组成，在多边形弧段表中，一条弧的顺序号为负，则说明该弧在完成多边形循环时，是按从终止结点到起始结点的方向通过的。岛则通过在该岛多边形列表前加0来标记。第一个多边形总是定义为Coverage的外部多边形。这种多边形区域定义方法使两个邻接多边形的公共边只存储一次，

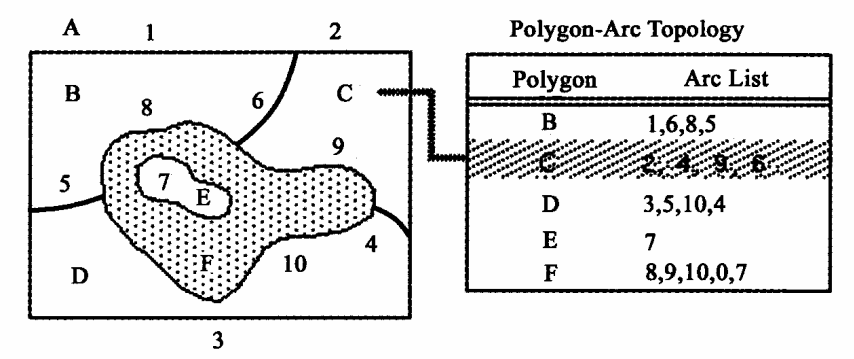


图 3－48 多边形－弧段拓扑

既节省了存储空间，同时又使空间分析更为方便。

3．左－右多边形拓扑结构

如图3-49，在建立多边形时，ARC/INFO将每条弧的左右多边形内部顺序号添加到Arc文件中。

左－右多边形拓扑结构定义了邻接性，如果两个多边形拥有公共边(弧段)，则认为两个多边形相互邻接。由于一个多边形边界的每条弧（都有方向）都有左右多边形值，就很容易知道哪些多边形是相邻的。在图3－49中，我们就很容易知道多边形B与D，多边形C与F等的相邻性。

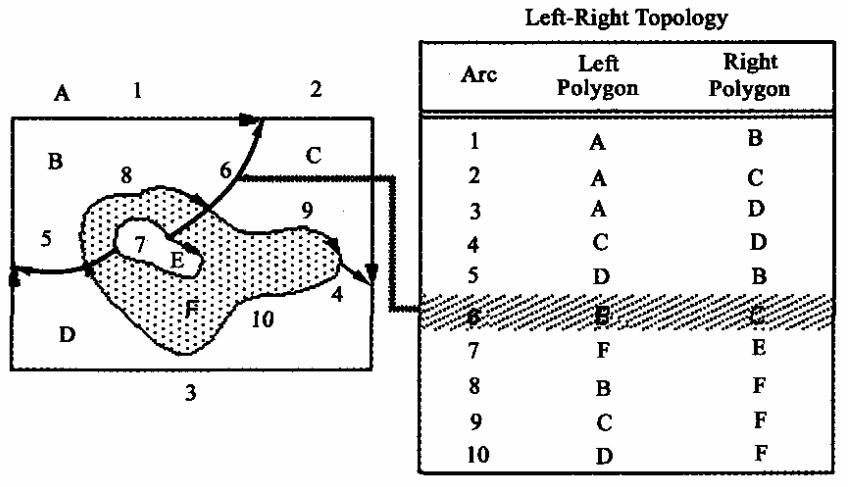


图 3－49 左－右多边形拓扑

4．地图数据的组织

在ARC/INFO中，地图数据作为X，Y坐标对序列来存储，分别代表点、线和多边形。这些特征之间的关系通过拓扑结构来表达。相关的表格数据存储在关系表格中，通过内部标识号连接到特征上。

地理特征（以及描述这些特征的属性）按照某种相关性在逻辑上组成一些相对独立的信息层或信息的主题，即Coverage。例如，一幅地形图常常需要分成多个层次来存储，如水系、道路、植被、居民地和注记等层次。

有许多因素影响着地图数据库中层的组织方法。地图数据应用的目的不同，需要建立

和划分的层次也不同。在组织地图数据即构造Coverage时，首先要考虑的因素有两个：第一是特征的类型；第二是特征的主题。

特征类型：构造Coverage的典型做法是分别将点、线和多边形分别存放在不同的层上。例如，井的位置用点要素表示，可将其放在一个层上；道路用线要素表示，可将其放在另一个层上。

特征主题：在构造Coverage时，要考虑的另一个重要因素是特征的主题。例如，将河流组织在一个层上，道路组织在另一个层上，尽管河流和道路两者都是线状特征，但分开存放更为合理，也更为有效，因为它们的属性各不相同。例如，河流的属性可能包括名称、等级和流速等，而道路的属性包括名称、路面材料和行车道数等，它们的属性明显相同，所以应将它们存放在以同一地理区域为地理参考的不同的层上。

除了对单独的Coverage进行操作外，ARC/INFO还采用了先进的空间索引方式，可管理大数据量的图形数据。在地图库里(Map Library)，把地图数据水平方向划分为Tile，纵向分为Layer，用户只要指定范围和内容，而不必关心数据的存储方式，系统会自动调入相关而不是所有的数据，图3－50是一幅典型地图的数据组织情况。

多个用户可同时读取同一地图库，当其中某一个用户修改其中的某一Tile时，这一Tile锁定，以防止数据产生不一致性，直到用户提交修改内容。另外，ARC/INFO有一个专门管理地图库的扩展模块ArcStorm。它是真正基于Client / Server结构的，可以大大减轻网络数据传输负担，数据的锁定可以基于单独的特征，而不是像单纯的Library基于一整个Tile，这样增加了数据的共享性能。

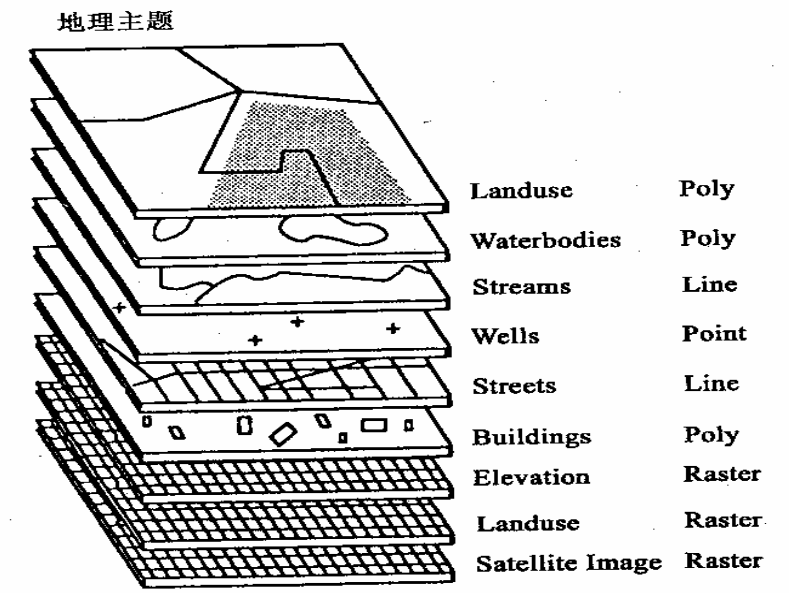


图 3－50 地图数据管理示意图

3.4.4.2 拓扑关系表示模型分析

无论是ARC/INFO的拓扑关系模型还是DCEL模型等，无一不是为了有效地描述物体之间的空间位置关系，使得在空间数据处理和分析时，操作与检索更为方便与迅捷。不同的模

型具有不同的特点，在前述多个模型中，DCEL模型对边拓扑关系的表示较完善，但对面、链的表示缺乏完整性，对空间分析功能要求较低的计算机辅助设计（CAD）等比较适用。ARC/INFO的拓扑关系表示模型，较好地表示了点、线、面相互之间的拓扑关系，特别适合于空间分析。GIS区别于CAD等系统的主要因素是空间分析。为此，在国内外开发的GIS，如GeoStar（武汉大学）、MapGIS（中国地质大学）、AutoDesk Map / World / MapGuide（美国AutoDesk公司）等GIS系统基本上采用了类似ARC/INFO系统的拓扑数据结构。

ARC/INFO利用拓扑结构在两个简单的坐标要素——弧和结点的基础上表达了附加的地理信息。拓扑结构通常利用内部顺序号来表示。如采用一组弧的列表定义多边形，利用弧的左 / 右多边形的内部顺序号定义区域的邻接性，起点和终点说明则定义了弧的连通性。

ARC/INFO用BUILD和CLEAN命令自动生成和修改要素的拓扑结构。拓扑结构数据模型可以更有效地存储数据，它提供了进行高级地理分析的框架。例如，拓扑结构模型由组成多边形边界的弧的列表来构建多边形。当两个多边形共享一条公共边时，系统只存储公共弧坐标值一次。与此相对，一个非拓扑结构数据模型把每个封闭的多边形作为一个独立的实体存储，邻接多边形公用的一条弧必须输入并存储两次，这通常通过数字化两次或弧的拷贝来完成。这种数据重复使地理分析更为困难，因为系统不能观察出这两个多边形的拓扑关系。非拓扑结构模型是许多CAD、绘图和制图系统支持的常见模型。

3.4.4.3 拓扑与非拓扑模型的比较分析

目前在建立几何对象的拓扑关系方面形成了两个阵营或两种方法：一是以ARC/INFO、MGE、GENAMAP、SDTS（Spatial Data Transfer Standard）等GIS系统和标准为代表的采用在数据结构中存储拓扑信息；二是以Mapinfo、Arcview、SDE、SDO等GIS系统以及Open GIS简单要素互操作规范为代表的在数据结构中不存储拓扑信息，其空间关系通过数学方法计算出来。

拓扑数据模型可以高效地存储数据，它提供了高级地理分析的框架。拓扑数据模型用围绕多边形的弧段来建立多边形。对于公共弧段，系统只存储一次弧段坐标，两个相邻的多边形共享公共弧段。由于拓扑数据模型的建立，具有以下优点：

1）描述点、线、面的空间关系不完全依赖于具体的坐标位置。不需要坐标值来查找、判断，给空间查询、分析带来了方便，又没有坐标计算精度上的麻烦。

2）便于作多边形和多边形的叠合。面目标之间的拓扑关系模型可以方便地进行叠置分析、土地资源的管理与评估等。

3）结点与弧段网络拓扑关系的建立，可用于道路交通、市政管线、通信线路、军事等的网络分析。

4）多边形的边界数据以线段或弧段的结构化网络有效存储，而不是象通常用于多边形数据库的那种封闭式的多边形环。这种弧段—结点的结构几乎把制图数据的存储量压缩了一半。

5）便于检查数据输入过程中的错误。由于拓扑结构是靠计算机来自动生成的，因而容易在生成拓扑结构的过程中查找出数据输入的错误。而且拓扑结构可以方便处理多边形中嵌套的“岛”及多边形的合并等。

鉴于以上原因，许多GIS系统都采用了拓扑数据模型，如国外的ARC/INFO、AutoCAD MAP等，国内的MapGIS、GeoStar等。

虽然拓扑数据结构效率很高，但计算机处理速度的加快和存储设备容量的扩大已逐渐降低了明确定义拓扑信息的必要性。由于拓扑数据结构复杂，几何对象之间相互关联，数据经过增加、删除、修改等编辑操作后，拓扑关系被破坏，必须通过拓扑算法重新构造拓扑关系来维护其一致性和完整性。另外图形显示速度慢，图形的表达也不自然，因为一个完整的几何对象往往会人为地分割为多个部分。

非拓扑模型具有数据结构简单，系统设计与实现比较容易的特点。其图形显示速度快，坐标数据与几何对象(点、线、面等)直接相对应，数据编辑方便，编辑后不需做任何其他处理，而且几何对象的空间关系(包括拓扑关系)可以由数学方法如基于维数扩展的9交模型(DE9-IM)求得。其缺点是多边形的公共边重复存储，产生冗余。在许多CAD（AutoCAD)、制图和图形系统（如Mapinfo、Arcview等）就是利用非拓扑数据模型。

图3－51是Open GIS提出的简单要素几何对象模型，它是采用非拓扑数据结构的一个例子。

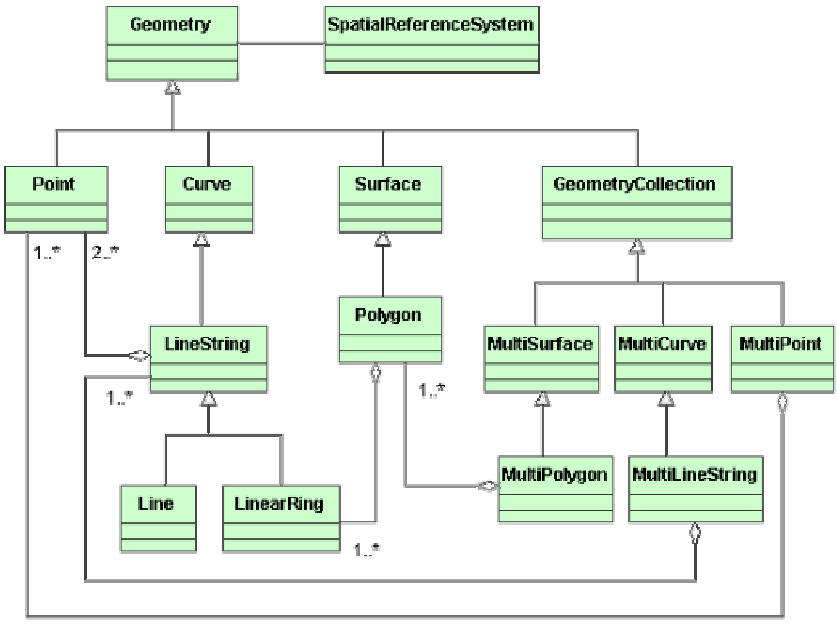


图 3－51 Open GIS 的简单要素几何对象模型

ESRI ARCVIEW的Shapefile是一种新的非拓扑数据结构，它在数据集中存储地理实体的几何信息和属性信息，每个实体的几何特征作为Shape存储，由一组矢量坐标组成，并与属性相连。Shapefile中有14种shape类型（ESRI Shapefile Technical Description，ERSI白皮书，1997），每种描述特殊实体或实体组合，见表3—12。

表3－12 shapefile中的shape类型

值	形状类型
0	Null Shape
1	Point
3	PolyLine
5	Polygon
8	MultiPoint

11	PointZ
13	PolyLineZ
15	PolygonZ
18	MultiPointZ
21	PointM
23	PolyLineM
25	PolygonM
28	MultiPointM
31	MultiPatch

Shapefile通常比与之对应的拓扑数据结构处理速度要慢，但在绘图和编辑方面速度较快，在处理交迭的和不连续的图形时，减少了存储空间，便于文件读写。

Shapefile有三种独立的不同类型的文件：主文件、索引文件和数据表。主文件（*.shp）可直接访问，文件中记录长度可变。索引文件（*.shx）包含用来赋值的特征长度和空间信息，数据表（*.dbf）包含描述形状的属性数据。

3.5 剖分数据结构

剖分模型是相对于矢量模型的另一途径。剖分模型的基本数据单元是面域单元，最基本的有三种，即方格、三角形和六边形，它们有各自的几何属性。其一是方向，方格和六边形形态具有相同的方向，而三角网中具有不同的方向，见图3-52。其二是其二维空间能否被递归分割而保持原有形态，方格和三角形均可以，而六边形则不行。然而，六边形具有辐射对称特性，图3-53，六边形还是适于空间抽样的最紧凑的形态。方格网最适于数组数据结构和笛卡尔坐标系。遥感数字影像、绘图仪及CRT显示终端都适于使用格网数据结构，

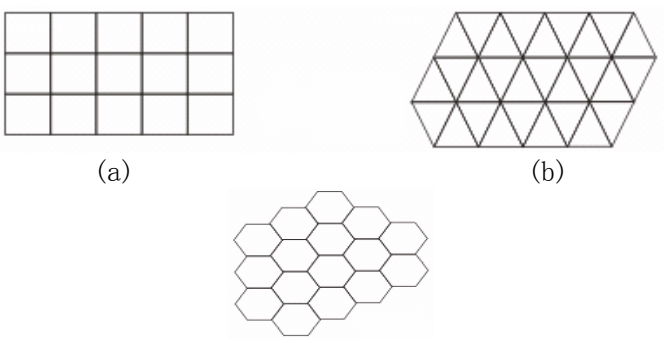


图 3－52 定向特征

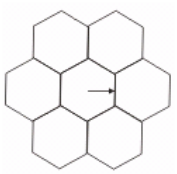


图 3－53 辐射对称

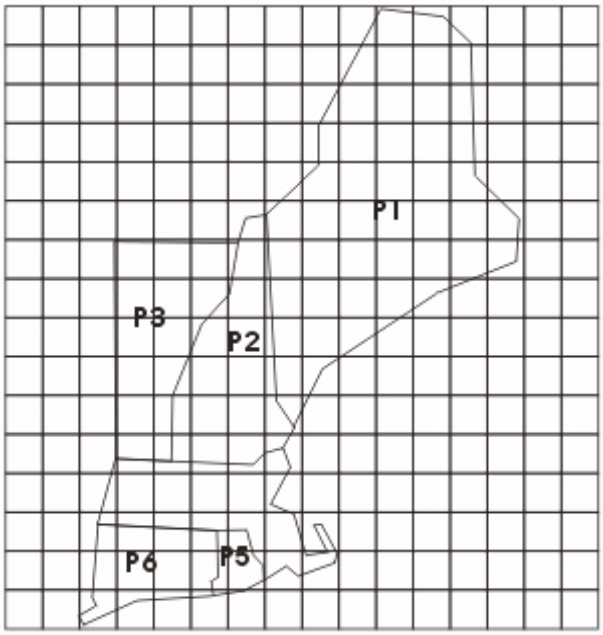


图 3－54a 栅格化过程（网格覆盖）

P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P1	P1	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P3	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P3	P3	P2	P1	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P3	P2	P2	P1	P1	P1	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P3	P2	P2	P1	P1	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P3	P2	P2	P2	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P3	P2	P2	P2	P2	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P4	P4	P4	P4	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P7	P4	P4	P4	P4	P4	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P6	P6	P6	P6	P5	P4	P4	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7
P7	P7	P6	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7

图 3－54b 栅格化过程(矩阵表达)

因此，方格网使用最频繁。

对地图进行方格剖分，最简单的数据结构是对地图栅格化。图3-54a，地图的面域为网格单元覆盖，每个单元(像元)的值按4.2.1节所讲的原则赋值，所有的值存储为一个矩阵数据(P7作为背景值)，见图3-54b。根据栅格单元的大小，图3-54c是一个粗的栅格表达。通过减小单元的大小可以提高表达精度，但将增大数据的存储量。

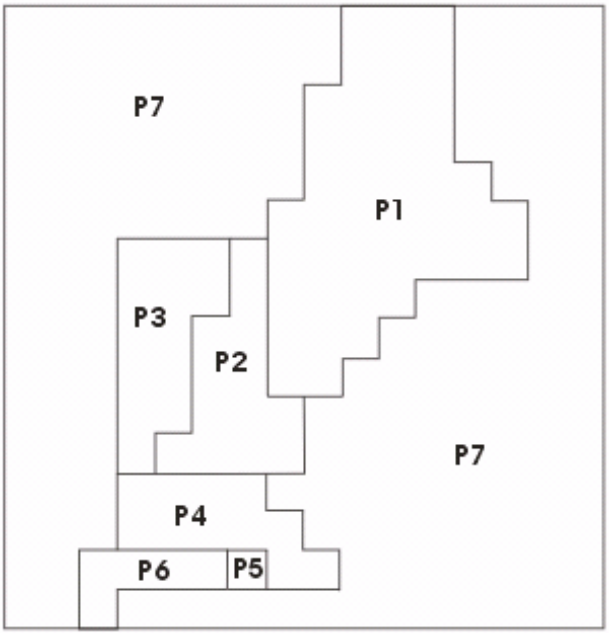


图 3－54c 栅格化过程(新英格兰地区栅格示意图)

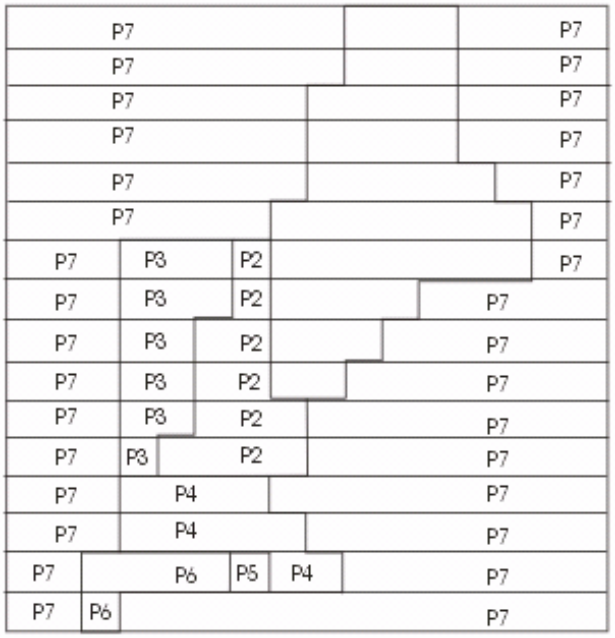


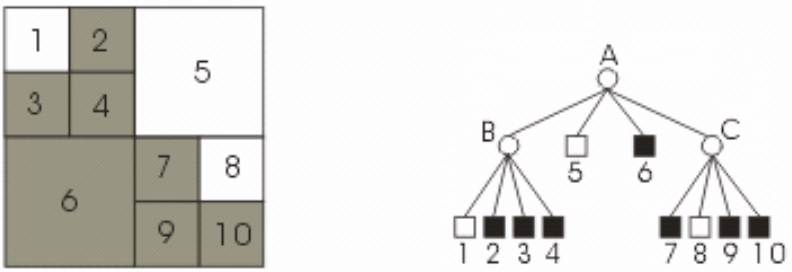
图 3－55 扫描行结构

这样可以轻易获取数据并完成地图的显示。但是，在栅格化过程中，区域的完整性及其网络拓扑将丢失，只有各像元的邻接性通过其行列索引可以得到保持。这种方式的另一个缺陷是矩阵数据所包含的有用的内容信息太少。表达一个区域的很多矩阵元素的值当然是相同的，这应该予以简化。

为了改正第二个缺陷以降低存储量，引进扫描行的概念。一个扫描行代表矩阵的一行，

每行当中相邻单元的值若是相同的话，将被合并为一个单元值，图3－55。这种存储结构比较适合区域类的数据存储，这就是所谓的行程编码方法。

正如上文所述，扫描行只在行的方向上提高了精简性，但面域仍可能包含大量冗余数据(在列的方向上)，为了整个提高目标存储的精简性，这里引进四叉树(Quad-tree)的空间数据结构。四叉树分割的基本思想是首先把一幅图像或一幅栅格地图($2^k \times 2^k$，k>1)等分成四部分，逐块检查其格网值。四个等分区称为四个子象限，按顺序为左上（NW)、右上（NE)、左下（SW)、右下（SE)，可以用树结构表示。如果某个子区的所有格网都含有相同的值，则这个子区就不再往下分割；否则，把这个区域再分割成四个子区，这样递归地分割，直到每个子块都只含有相同的灰度或属性值为止。这就是常规四叉树的建立过程。图3－56a是一个给定的要素区域（灰色部分)，显然它没有充满整个制图区域，应进行四叉树分解。图3－56b表明了常规四叉树分解过程及其关系。



(a)四叉树分解　　(b)结果四叉树

图 3－56 区域的四叉树表达

常规四叉树除了要记录叶结点外，还要记录中间结点。结点的命名可以不按严格的规则，结点之间的联系主要靠指针表达。常规四叉树需要占用很大的内存和外存空间。从图3－56b可以看出，每个结点需要6个量表达：父结点指针(前趋)，四个子结点指针(后继)和

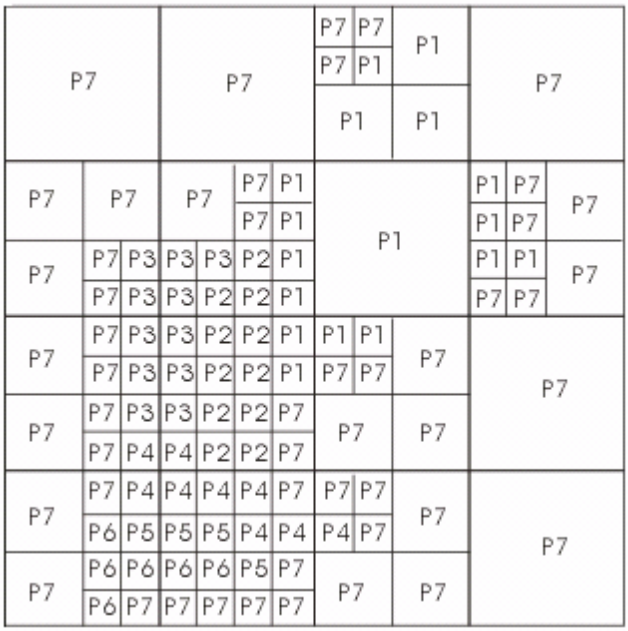


图 3－57 新英格兰地区的四叉树分解

本结点的灰度或属性值。常规四叉树还主要应用在数据索引和图幅索引等方面。由于常规四叉树中的指针不仅增加了存储量，而且增加了操作的复杂性，所以还可以采用四叉树结构的另一种编码方法即线性四叉树方法。线性四叉树只存储最后叶节点的信息。包括叶节点的位置、深度和本节点的属性或灰度值。所谓深度是指处于四叉树的第几层上，由深度可推知子区的大小。由于线性四叉树只存储叶节点的三个量，数据量比常规四叉树大为减少，因而应用更为广泛。一般采用十进制的Morton码（M_D码）为线性四叉树的地址码，并采用之下而上的合并方法建立四叉树。计算M_D码的方法详见有关文献。

如果不止一个区域要编码，黑色叶节点要赋于不同的颜色以对应不同的区域，白色叶节点则代表背景区域。图3－57提供了新英格兰地区的多色四叉树分解。

除了四叉树的空间紧凑性外，四叉树还有几个重要的特性。首先，空间细节可以通过四叉分割快速获取；其次，可以通过叶节点操作来实现并交运算；再次，可以轻易获取子块的邻域。

3.6 面向对象的数据模型及其结构

面向对象的数据模型是按照面向对象的思想，根据数字地图空间结构化的需要，在对现实世界地理空间认知和抽象的基础上，利用面向对象方法可以建立的一个通用的数字地图数据模型，它为研制相关的基础软件提供模型基础，并且该数据模型独立于物理实现，即具体的数据库管理系统可以是关系型，也可以是纯面向对象型的。这里介绍面向对象的地理数据模型（object-oriented geographic data model－OOGDM；王家耀，2001）。

3.6.1 基本框架结构

人类认知现实世界的事物和现象及相互之间的关系，总是在一定的范畴内进行，即先确定问题域(论域)；然后，再明确研究对象；最后构造对象之间的相互关系。数字地图是数字化地描述现实世界地理空间的模型，地理空间的范围可以是全球、一个国家或一个地区。具有一定范围的地理空间，我们称之为工作区。地理空间可以包括若干工作区，工作区之间可以相互重叠，人们可以通过工作区这个窗口来认知和操作数字地图所描述的地理空间实体及关系。工作区中的各种地理实体或现象，我们称为地理要素（或对象），在一

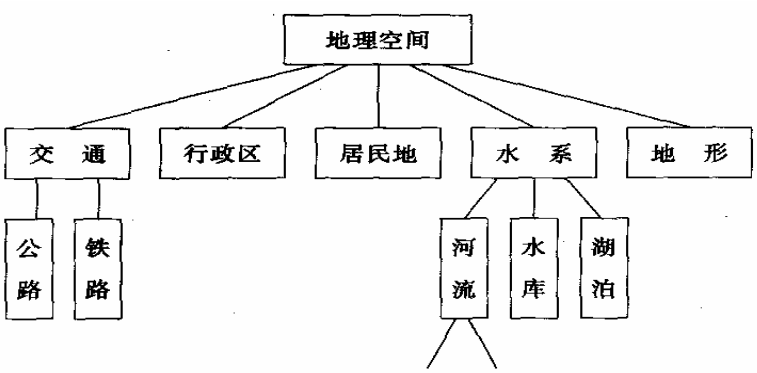


图 3－58 地理空间的层次结构

定地理意义上相关的地理要素的集合，称为一个地理要素层。地理要素(对象)包括空间、属性和时间特征的数据，空间特征数据包括定位数据和空间关系；在模型的数据结构中既要描述定位数据，还要描述对象之间的拓扑空间关系；属性和时间特征数据表示地理要素的质量、类型、状态、周期、持续时间等，它们用属性数据结构元素来表达。

对于具体的地理空间总是形成这样一个层次分类的体系结构，例如地理空间可以分为交通、水系、行政区、居民地、地形等，而交通可以分为公路、铁路等，水系可分为河流、水库、湖泊等，如图3－58所示。

根据地理空间的这种层次体系结构，可以抽象出其框架结构，如图3－59所示。

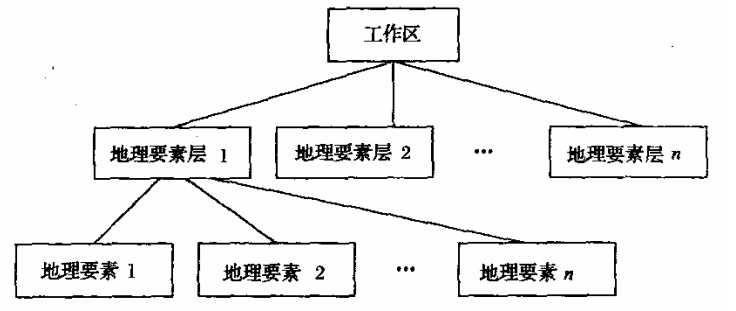


图 3－59 OOGDM 的框架结构

(一)工作区

工作区(workspace)定义了有一定区域范围的、连续的地理空间，工作区包括若干地理要素层。工作区的主要目的是为了充分、有效地管理数字地图，通过地理要素层对地理要素(对象)进行科学地组织，合理地存储和高效地查询检索，为更高层次的空间分析和决策支持提供服务。工作区的主要内容包括空间数据的描述、数据来源、生产年代、地图投影、数据质量、数据精度、分辨率、比例尺等，即数字地图中的数据字典或元数据(metadata)。

(二)地理要素层

地理要素层(layer)定义了一组在地理意义上相关的地理要素(对象)。通过分门别类地把意义上相关的地理要素组织在一起，从而便于理解和分析地理实体或现象。例如，把地理空间分为交通、水系、居民地、境界、地形等几大地理要素类，每个地理要素类对应一个地理要素层。每个地理要素层之间在数据组织和结构上相对独立，数据更新、查询、分

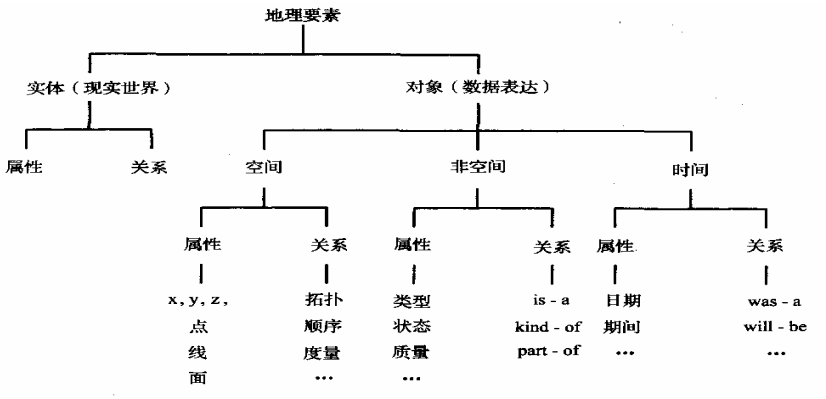


图 3－60 地理要素的构成

析和显示等操作以地理要素层为基本单位，地理要素层除了存储和管理某类地理要素以外，有的还要建立地理要素之间的拓扑关系，即在某种类型的地理要素层上维护拓扑一致性和完整性。

(三)地理要素

地理要素(feature)是地理实体和现象的基本表示。一个地理要素包括两方面的含义。在概念上表示现实世界地理实体，在数据世界中表示为地理对象。其内容包括空间特征、属性特征和时间特征。如图3－60所示。

地理要素的空间特征包括空间属性和空间关系，空间属性是一组表示地理要素空间位置的坐标序列，空间位置包括任何几何元素，如(x，y，z)坐标、点、线、面、表面、体、像素等；空间关系包括对象之间的拓扑关系和非拓扑关系(顺序、度量等)。地理要素的非空间特征包括非空间属性和非空间关系。非空间属性表示地理要素的类型、数量、质量、状态等属性信息；非空间关系表示要素之间的是……(is-a)、是……一种类型(a-kind-of)、是……一部分(a-part-of)、在……之上(above)等。地理要素的时间特征包括时间属性和时间关系，时间属性表示数据的日期、持续时间等；时间关系表示数据曾经是(was-a)、将是(wili-be)等。

一个地理要素可以作为一个惟一的主关键字访问多重数据集合，包括矢量数据和栅格数据。地理要素可以通过聚集和联合来构造复杂对象。地理要素作为一对象，包括完整的信息、关系和支持空间分析和查询的函数。归纳起来，大体上一个对象包括6个基本元素：

(1)惟一标识（ID)：标识ID是系统全局惟一的，以区别其他对象。

(2)位置信息：位置或几何信息，是地理要素的地面坐标和表面高程。

(3)非空间属性：非空间属性数据是地理要素的本质特性，如名称，属性值等。

(4)拓扑关系：拓扑关系是地理对象之间的关系，包括边界、邻接、包含等。

(5)非拓扑关系：非拓扑关系是地理要素之间的非几何链接。

(6)对数据进行查询和分析的方法(或函数)：嵌入在对象中的方法完成如新对象实例的产生、查询、几何关系运算以及图形显示等操作。

由于地理要素的主体是空间特征部分，而且有许多操作作用其上。因此，我们将地理要素的空间特征部分包括标识、位置、拓扑信息定义为可以进行单独处理的几何对象。所

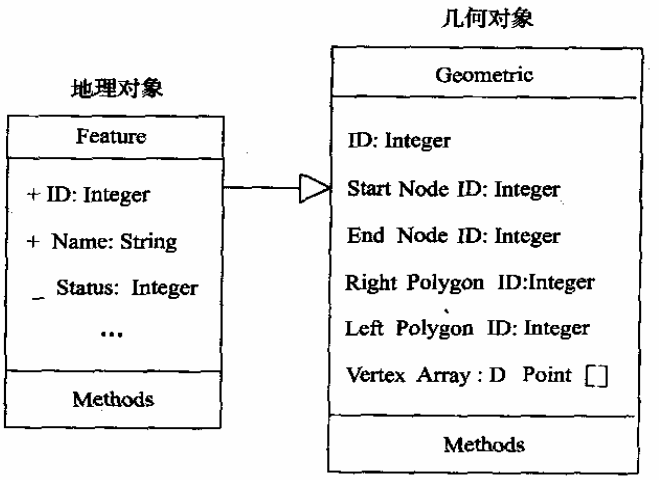


图 3－61 地理对象类与几何对象类的关系

以，一个地理要素应该包括一个几何对象和其他非空间特征的属性信息，如图3－61所示。

由以上分析可知，地理要素及相互关系勾画出地理实体的属性关系和构成关系，而几何对象及相互关系则描述了地理实体的空间定位、空间分布和空间关系，因此，该模型隐含着两个层次的对象模型，即几何对象模型和地理要素对象模型。

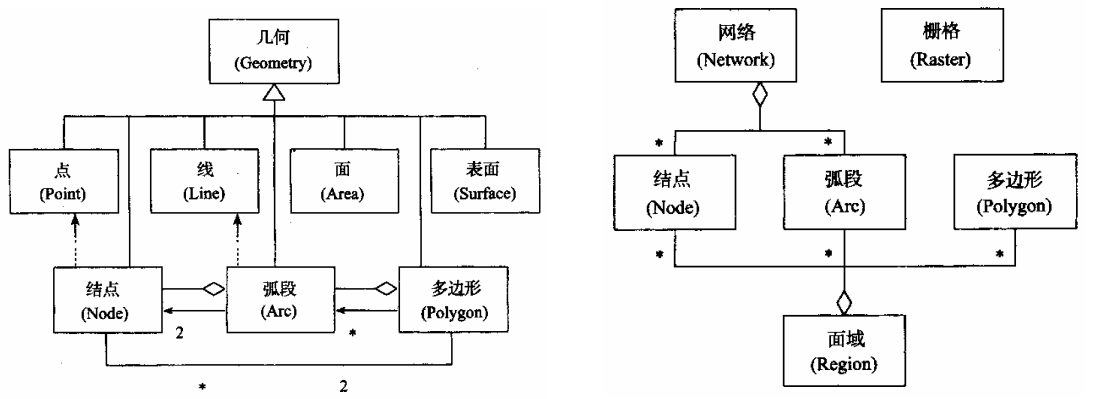
3.6.2 几何对象模型

几何对象模型以纯几何的观点看待地理空间，忽略其地理意义，将地理空间抽象成几何对象的集合。这些几何对象描述了地理要素的形状、空间位置、空间分布以及空间关系（拓扑和非拓扑关系）等信息，并封装了对这些信息进行操作的空间操作方法。我们将几何对象分为6种基本类型：即矢量数据结构中的点（point）、线（line）、面（area）、表面（surface）、体（volume）以及栅格数据结构中的像素（pixel）。

如果考虑几何对象在地理空间中相互之间的拓扑关系，矢量数据结构中的几何对象还可以分为4种拓扑类型：即结点（node）、弧段（arc）、多边形（polygon）和多面体（polyhedron）。

由于拓扑和非拓扑数据结构各有利弊，为了优势互补，应该在分析和研究多种几何对象模型的基础上提出一种拓扑和非拓扑数据结构一体化的几何对象模型。其基本思想是：以非拓扑几何对象(点、线、面)为基础，将点和线分别转化为结点和弧段，从而构成两个新的几何对象类型，即网络和面域。网络类型由结点和弧段以及它们之间的拓扑关系构成，面域类型由结点、弧段和多边形以及它们之间的拓扑关系构成。

实际上任何存储拓扑关系的系统都需要从非拓扑几何对象的数据获取到拓扑数据结构的转化过程，不管是人工拓扑处理还是自动拓扑生成。我们把两者统一起来，在数据获取、图形快速显示和数据编辑时，主要针对基本点、线、面几何对象类型，当需要进行某些空间分析时，如网络分析、路径选择、叠置分析等，再将点和线转换为结点和弧段，从而构成网络和面域类型，然后在网络和面域类型的基础上完成空间分析。OOGDM几何对象的模型如图3－62所示。



(a) 基本几何对象　　(b) 复合几何对象

图 3－62 OOGDM 几何对象模型

在该几何对象模型中，包括点、线、面、表面、结点、弧段、多边形等基本几何对象类和网络、面域、栅格等复合几何对象类，其中：网络是结点、弧段的聚集，面域是结点、弧段、多边形的聚集，栅格是像素的聚集。在该模型中点、线、面不包括拓扑关系，而结

点、弧段和多边形之间存在拓扑关系，它们显式地存储几何对象之间的邻接、包含、相连等信息，其拓扑关系如图3－63所示。

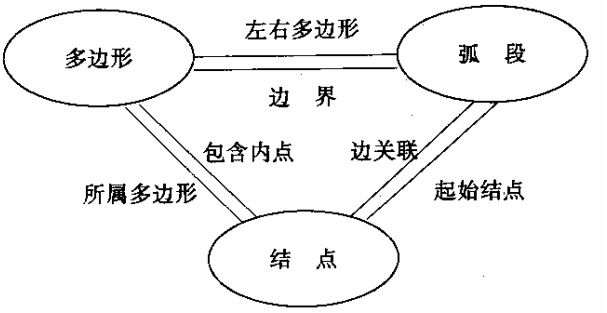


图 3－63 结点、弧段、多边形之间的拓扑关系

每个多边形由一组弧段和若干内部多边形(岛)组成，用左右多边形表示弧段和多边形之间的关系，多边形内部用一个结点来标识。每一条弧段包含一个起始结点和一个终止结点，用关联的弧段表示结点和弧段之间的关系。结点、弧段和多边形单独作为几何对象进行操作时，可以等同于点，线、面几何对象，当相互关联操作时，需要考虑拓扑关系的一致性和完整性。空间关系方法由存储在数据结构中的拓扑关系和DE9—IM数学方法来确定。

3.6.3 地理要素对象模型

在几伺对象模型中没有考虑地理要素内在的地理意义，主要目的是为了保持几何对象在操作和查询中的独立性，因为许多应用需要通过空间特征来查询地理要素的方位、地理要素之间的相互关系和地理要素的地理含义；在地理要素可视化中，通常以几何形态展示在用户面前；另外同一个几何对象可能对应不同的地理要素。这些因素都需要独立地建立几何对象模型以便于实现某些功能。但从高层应用来看，人们查询、检索和分析的主要是地理要素及相互关系(包括空间关系和属性构成关系、层次关系等)，因此，建立包括空间属性和非空间属性及以地理要素为操作对象和界面的地理要素对象模型成为地理数据模型的重要内容。地理要素对象模型包括基本地理要素对象模型和地理要素集合对象模型。

(一)基本地理要素对象模型

从几何对象模型来看，地理要素对象模型专门定义和解释几何对象，给几何对象赋属性，一个地理要素对象由一个几何对象和描述几何对象的属性或语义两部分构成。在地理要素类中，几何对象是地理要素对象的主要部分，而且地理要素依据几何对象来进行分类。根据抽象的几何对象模型，我们将地理要素分为七种基本的对象类型：即点状要素、线状要素、面状要素、表面要素、结点要素、弧段要素和多边形要素，它们与几何对象模型中的对象具有一对一的关系，并在几何对象的基础上增加属性信息。地理要素对象之间的属性层次关系、要素构成关系由属性数据来确定，其他空间关系由几何对象来确定，而且几何对象的各种空间操作完全作用于地理要素对象，因此，地理要素对象继承了几何对象，空间结构、空间关系和空间操作分别从作为超类的几何对象类中继承而来。基本地理要素对象模型如图3－64所示。

1．基本地理要素类(basic feature)

基本地理要素类是一个抽象类，它包含了所有基本的地理要素对象，包括点、线、面、

表面、结点、弧段和多边形要素对象，以及它们的共同属性和作用于它们之上的操作方法。地理要素的属性由一组字段型和字段值组成的元组构成。

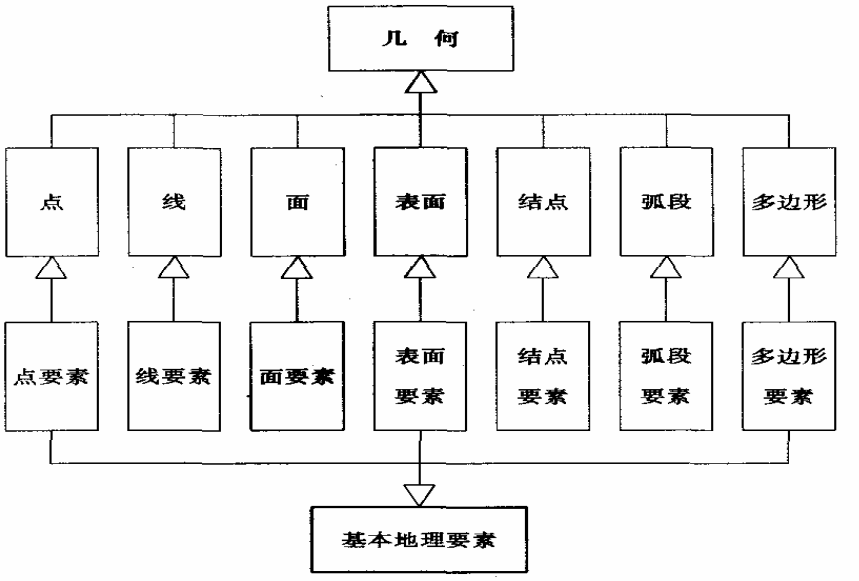


图 3－64 基本地理要素对象模型

2．点状要素类(point feature)

点状要素类用空间中的一个点来表示地理要素，无长度、无面积的概念，如井、独立树木等。它是基本地理要素类的子类，同时由点几何对象类继承而来。

3．线状要素类(line feature)

线状要素类表示空间中呈现一段连续曲线或直线的地理要素，有长度但无面积概念，如道路、输电线路等。它是基本地理要素类的子类，而且由线几何对象类派生而来。

4．面状要素类(area feature)

面状要素类表示用无穷点构成的连续区域的地理要素，具有面积概念。它是基本地理要素类的子类，而且由面几何对象类派生而来。

5．表面要素类(surface feature)

表面要素类表示用有穷点构成的连续区域的地理要素，区域中每个点的属性值不同，用来表示地理实体的表面，如地形高程、温度、雨量等。其超类为基本地理要素类和表面几何对象类。

6．结点要素类(node feature)

结点在几何上是弧段的始终点，大多数情况下，结点不仅是拓扑元素，而且是一个点状要素，具有地理意义，因此我们称为结点要素，它由结点几何对象类和基本地理要素类派生而来。

7．弧段要素类(arc feature)

弧段既是拓扑元素中的一段弧，又是一地理要素，具有线状要素的特征，它由弧段几何对象类和基本地理要素类派生而来。

8．多边形要素类(polygon feature)

多边形既是拓扑元素中的一多边形，又是一地理要素，具有面状要素的特征，其超类

为多边形几何对象类和基本地理要素类。

(二)地理要素集合对象模型

在许多应用中，需要对一批或一组地理要素对象进行处理和显示，更多的是对地理要素进行查询、选择以及空间分析所得出的结果都要以集合的形式出现。另外，空间叠置分析在地理要素集合之间进行。因此，有必要建立地理要素集合对象类，它们是基本地理要素对象的聚集或联合，如图3-65所示。

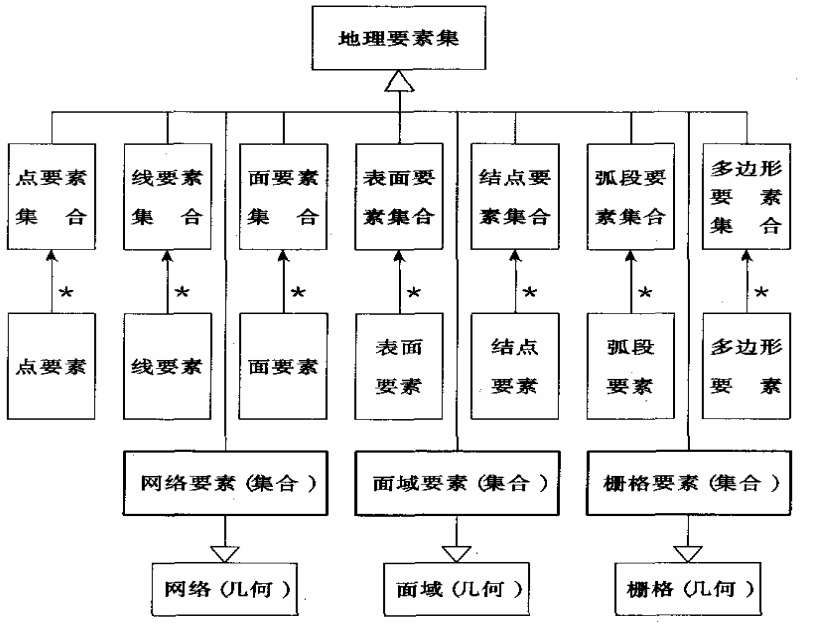


图 3－65 地理要素集合对象模型

其中，地理要素集合类(feature set)是一个抽象类，包括它们子类的共同属性和操作，其子类点(point feature set)、线(line feature set)、面(area feature set)、表面(surface feature set)、结点(node feature set)、弧段(arc feature set)和多边形要素集合类(polygon feature set)分别由它们相应的要素对象联合而成。由于网络(network feature)、面域(region feature)和栅格要素类(raster feature)所对应的几何对象类(从其几何对象类继承而来)分别是结点、弧段、多边形和像素等几何对象的聚集，因此，把它们作为集合类来看待。

3.6.4 图形表示对象模型

数字地图数据库不只是为了要有效地存储、管理、查询和操作空间数据，更重要的是要把地理信息以可视化的形式呈现在用户面前，以便人们从图形表示中认知地理空间实体和现象及相互关系。空间数据的可视化是数字地图学的主要任务之一。

地理空间数据可视化在数据建模中需要考虑以下因素，也是地理数据可视化最基本的问题：

1．点、线、面(包括结点、弧段、多边形)要素的图形表示形式

通常点、线、面分别用地图图式中点状符号、线状符号、面状符号来显示。显示时需要符号代码，以便从地图符号库中取出相应符号。地图符号的基本图形要素包括形状、颜

色、大小、角度等，可以根据视觉变量来构造。

2．地理要素注记

地理要素注记是在地理要素可视化中对其进行语义描述和属性说明的标注。在图形表示中起标识具体地理要素的作用，以提高图形的可读性。通常注记包括标志点、标题、文本说明、图例和比例尺等。标志点与地理要素相关联，分为点注记、线注记和面注记，它们对相应地理要素的某类属性进行标注，如名称，数量等。它们的位置根据点、线、面要素的空间分布状况而定。其他说明性注记在地图中具有特定的位置，但它们不与地理要素相关联。在地理数据建模中所涉及的注记数据包括注记内容、定位点坐标、字型，字体等。

3．统计专题图

统计专题图是地理要素属性数据的最有效可视化工具，它是在地理要素空间特征(几何对象)显示的基础上，进一步“渲染”地理要素属性数据的统计特征，即强调地理要素属性数据的可视化。专题图的图形表示通过选择专题符号类型、颜色、尺寸、视觉变量以及分类分级数学模型并进行综合分析和计算来实现。

地图符号、地理要素注记、统计专题图等可视化数据本身不是地理空间中地理要素的内容，但它们在地理要素显示中必不可少，成为数字地图中地理要素对象的重要内容，并且它们与地理要素对象相关联。因此，在建立数字地图数据模型时，应该充分考虑这些因素。在设计OOGDM时，将它们与基本地理要素对象类分开考虑，建立地理要素的图形表示模型，包括地图符号类、地理要素注记类、文本要素类、统计专题图类，如图3－66所示。

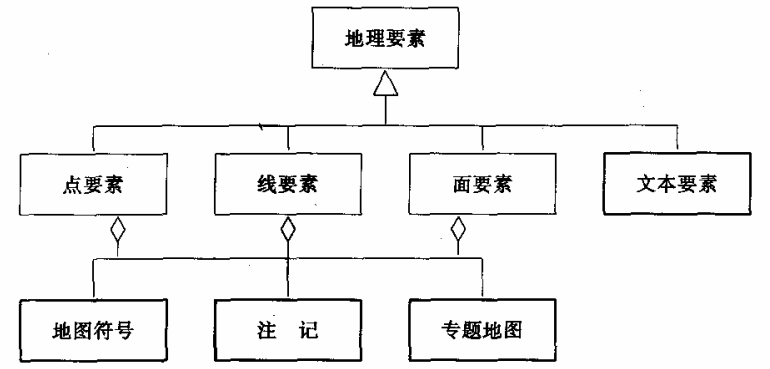


图 3－66 图形表示模型

(1)地图符号类(symbol)

地图符号类是地理要素显示时所需要的地图符号数据集合，它被聚集到点、线、面要素对象中。该类属性包括符号标识ID、符号代码code、符号类型type、符号尺寸size、符号颜色color等。

(2)地理要素注记类(Label)

地理要素注记类是对地理要素进行属性标注的数据集合，它被聚集到点、线、面要素对象中。该类属性包括注记对象标识D、注记类型type、注记坐标点列locations、注记尺寸size、字体font、注记颜色color等。

(3)文本要素类(text)

文本要素是把与地理要素无关的说明性注记分离出来单独处理，与点、线、面要素并列看作为一要素类型。文本显示时需要以下属性数据：文本标识ID、文本内容content、本

文定位点location、文本尺寸size、字体font、字颜色color等。

(4)统计专题图类(theme)

存储绘制统计专题图所需要的各种属性数据和方法，包括与基本地理要素相关联的信息、统计专题图类型、统计专题变量、符号信息以及分类分级模型等。

3.6.5 数据组织关系

OOGDM的几何对象模型、地理要素对象模型和图形表示模型综合描述了现实世界复杂的地理实体、现象及相互关系。由于地理对象繁多、关系复杂，不利于建立清晰的用户视图，也不容易系统实现，因此，需要对模型进行一定的完整性约束。利用工作区、地理要素层的概念对地理要素对象进行分层管理，既符合地理空间自然的层次结构划分，又进行了适当的范围限制，使用户可以方便、灵活地选择不同类型的地理要素层来组织和管理数据。

工作区作为总体视图，是用户看到的一部分地理空间，它可以被抽象为分布在二维R2中的地理要素对象集，地理要素之间存在着同类关系、空间关系和构成关系。同类型的地理要素具有相同的一组属性来定性或定量地描述它们的特征，例如河流类可能具有长度、流量、等级、平均流速等属性。空间关系强调地理要素之间的拓扑关系、顺序关系和度量关系，以及通过空间分析算法得出的空间关系。构成关系强调地理要素之间的聚集和联合关系。工作区中的地理要素按照一定的分类原则组织在一起，形成不同的地理要素层。通常情况下，一个地理要素层定义一组地理意义相同或相关的地理要素，用模型中抽象出的地理要素集合类来组织。在OOGDM模型中定义了八种类型的地理要素层，即点、线、面、文本、表面、网络、面域和栅格要素层，分别用它们相应的地理要素集合类来表示和组织。网络要素层包括节点和弧段要素，并维护点弧拓扑关系。面域要素层包括节点、弧段和多边形要素，并维护点、弧、多边形拓扑关系。整体OOGDM中的每个类封装了相应对象的属性和方法。整体OOGDM模型如图3－67所示。

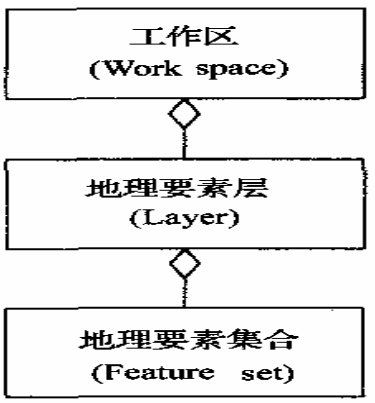


图 3－67 OOGDM 的数据组织

3.7 本章小结

数据组织是数字地图学中的重要课题。数字地图存储的不同方法各有优缺点。数据结构的选择取决于地理底图的存储类型和数字地图信息处理系统的目标。一旦选择了某种数据结构，它将对空间信息编码以及后续的处理过程产生影响。下一章将讲述数据获取的不同途径和预处理。

第4章 地图数据的获取与预处理

地图数据是产生地图信息的基础。虽然地图信息处理的结果通常是地图产品的某种形式，但数据仍是这些产品的核心部分。需要什么数据，数据需要具备哪些特征，都要在对用户需求作出分析之后才能确定。数字地图学的重点在于从一个地图数据库中生产多种地图和其它形式的图形产品，而不是根据采集到的某个数据集只生产某种地图。在自动化系统中，生产的主要费用和时间是与数据库的建立相关的，数字制图信息系统的生命力取决于处理和显示地图数据的能力并满足用户的需求。

数据采集是整个数字地图处理过程中花费最大的一个环节，因此必须关注从真实世界实体到相应的地图目标的转换。在构建地图模型时，地图实体的综合是从数据选取开始的，确定需要什么样的数据并非一个简单的过程。在理想的情况下，为了获得所需数据，应该在数据的获取阶段就考虑数据的特殊需求。数据采集需要按生产过程的反方向来分析信息流。其次，由于数据库的建立非常昂贵，数据采集经常受到现有数据集可用性的影响。一个非常实际的做法是对现有实地图进行编码，但要注意剔除不合适的数据以避免对数据产品的本质产生影响。本章介绍数据采集及其预处理的基本原理，这是获取和建立数字地图目标的基础。

4.1 编码方法

编码是将地图要素转换成数字目标。编码方式会影响结果的数字显示和量测操作，因此编码方式反映了制图处理的目的。编码方式还受到硬件系统的制约，一种编码方式可能比其它的编码方式更适合于某种硬件系统。

4.1.1 线性编码

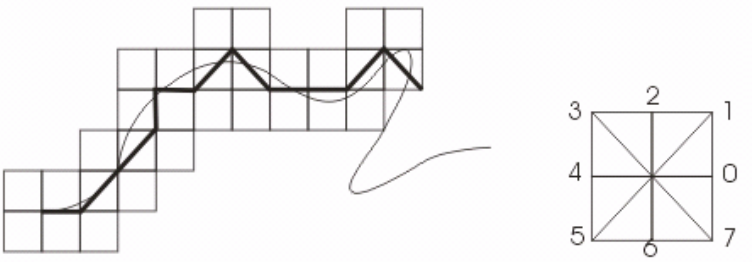
由于计算机都有一定的数字精度，因此线目标不能直接按其模拟形式来表示，而是通过数学函数近似表达，如样条曲线或坐标串。以串来表达一维要素的数字图形主要有两种方法：

第一种方法是以有固定方向和固定长度的线段串来表达。此种方法的一个例子便是线段链编码（Freeman码）。在线段链编码中，每个新的线段根据前一线段的末点占据八个位置中的一个来编码，见图4－1a。由于线段之间的位置是固定不变的，因此只需记录后继线段相对于前一线段的方向值。因为这种编码方式有固定的分辨率，所以适合栅格硬件设备。

第二种方法是由包含可变方向和（或）长度的线段组成的串来表达。这个串中的每个点的位置都是由笛卡尔坐标系中的绝对坐标给定，见图4－1b。

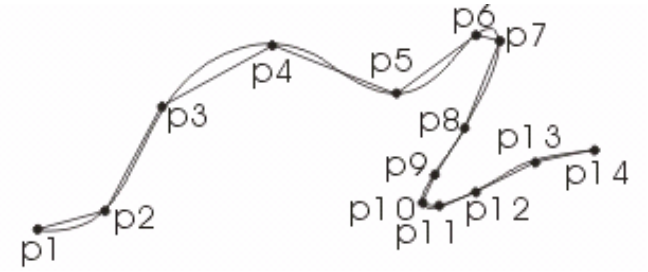
有多种方法可供选择以确定在串中应该保留哪些点。①图4－2a，是以固定长度采样间隔的线段来近似确定该串；②图4－2b，以一定宽度的矩形条串来逼近曲线；③图4－2c，在原线上选取最大特征点来近似表达。这些特征点可以认为是那些具有重大经济或政治意

义的点，如政区界址点和那些反映线的结构及其走向的点。还应包括数学上的极大值点、极小值点、不连续点和弯曲点。



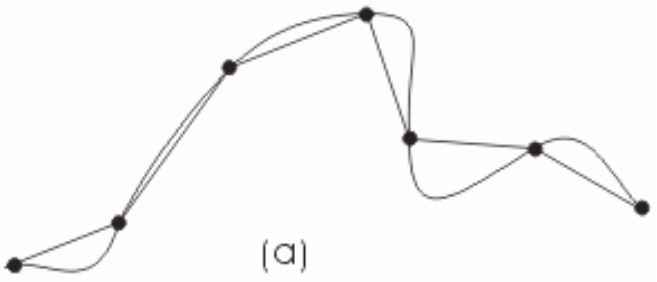
0,1,1,2,0,1,7,0,0,1,7

a) 固定方向和长度



b) 可变方向和长度

图 4－1 不同的线编码方式



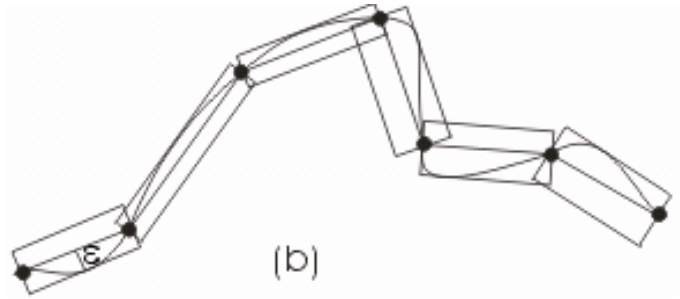


图 4－2 近似表达串的方法

以上方法中，原始地理特征和经过编码后的形式之间的错误量与采样间距有关。在4.2节中我们将看到采样间距又依赖于地图比例尺。

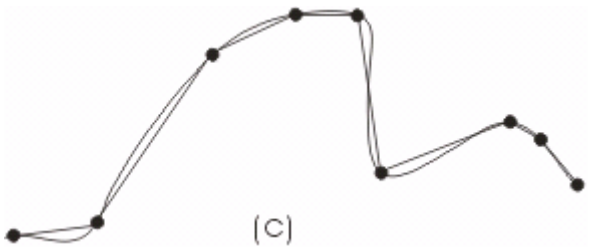


图 4－2 近似表达串的方法

4.1.2 面块编码

第三章中讲述的规则剖分数据结构都要求给分辨单元（格网单元、像元）赋值。像元赋值有四种基本技术，假定图4－3中的格网代表一个编码单元，方法一：①图4－3a，以格网中心点所在的面块类型作为格网的赋值；方法二：②图4－3b，以一条水平线平分单元格，水平线经过的面块类型最多的为所取值；方法三：③图4－3c，是以单元中占据面积最大的地理特征赋值。尽管这种方法能比前两种方法更好地表达原始地图各种地理特征的面积状况，但很难计算单元中各特征所占面积的大小；方法四：④如果对所研究区域的面积信息进行检索时有更高要求的精度，则图4－3d中提供了按比例给单元赋值的方法。

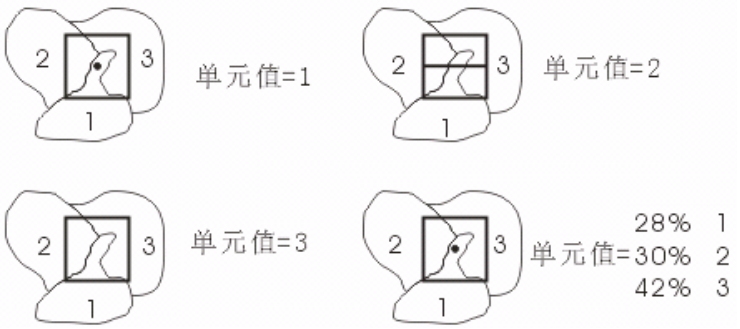


图 4－3 单元编码的方法

如果待编码的地图要素具有重要性等级，那么不管高级别的要素占据单元的哪一部分，整个单元应按高级别的要素特征赋值。举例来说，土地利用中，有一块湿地落在某个单元中，则该单元即为湿地类型。

不管是线编码还是面编码，采样间距是表达地图要素的关键。这个采样间距充当了剔除细节的空间滤波器。通过滤波应当只剔除那些不必要的数据和冗余信息。下一节，我们将看到采样间距与地图比例尺是密切相关的。

4.2 测量与比例尺

所有的地图数据都与地图比例尺有关。地图比例尺是指地图上一个单位距离与其所表达的真实世界的距离之比。地图是以缩小的图形显示制图区域的物体和现象，这势必导致

需要对其进行综合。大家都知道这样一个最简单的事实：实地25平方公里在1:10万，1:25万和1:50万比例尺地图上，分别为25平方厘米，4平方厘米，1平方厘米。地图比例尺标志着地图对地面的缩小程度，直接影响着地图内容表示的可能性，即选取、化简和概括地图内容的详细程度；它决定着地图的几何精度，影响着各要素相互关系处理的难度；同时，它还决定着地图表示的空间范围，影响着对制图物体（现象）重要性的评价。数据获取是真实世界与其数字表达的桥梁，而不是真实世界的转换。选择特定比例尺去采集数据，必须反映所需地图要求的地理特征，地图比例尺也要与数据采集仪器的精度匹配，因为所有的设备仪器都有识别地理特征的固定精度，不可能用较低精度的设备仪器去采集高精度的数据。

当比例尺降低时，数据细节程度也将降低。很难将某一比例尺下的地图进行缩小而得到另一比例尺的地图。这涉及到地图综合的问题。同理，当属性数据聚合以后，就很难完全地拆分（除非原始数据仍保留着）。例如，我们仅仅知道人口的平均年龄，那么我们就不能确定人口个体的年龄。因此，通用数据库一般要求按尽可能详细的尺度采集数据。英国处理地理信息的调查委员会建议数据提供者，要尽可能按未聚合的形式保留和发布地理数据。数字环境下，在虚拟环境中进行制图综合和分析时可以很容易地进行细节的去除（聚合）处理等尺度变换，从而保持原数据库的完备性。

一旦属性和空间数据按某一特定尺度编码，便也确定了数据库的分辨率，而更多的细节只能作为其近似来引入。矢量数据结构较之栅格数据结构的一个优点就是其比例尺可以连续改变。但是不管地图放大多少，它也不能提供比原始数据库中还详细的细节信息。

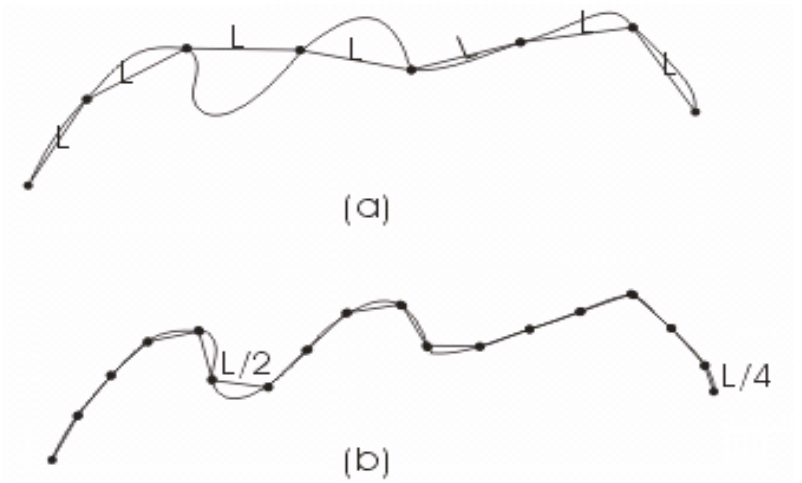


图 4－4 采样间距的改变引起的测量结果的变化

所有地理实体（线和面或多边形）的测量都是与比例尺相关的。假设图4－4a中给出的线条在计算机中是以等长(L)折线串表示的，那么它的长度是7L。如果将折线长度改为L/2，那么该线条的长度为16.5(L/2)即8.25L（图4－4b）。可见线状地图要素的量测长度是与采样间距（步长）相关的。

随着量测步长的不断细分，量测出来的总长度在继续增加。因此地图上线性要素的量测长度随着量测尺度的减小而增加；另一方面，大量的研究成果亦表明，地图上线性要素的量测长度也随比例尺增大而成对数增加。这是因为地图上的线性要素的形态随比例尺改

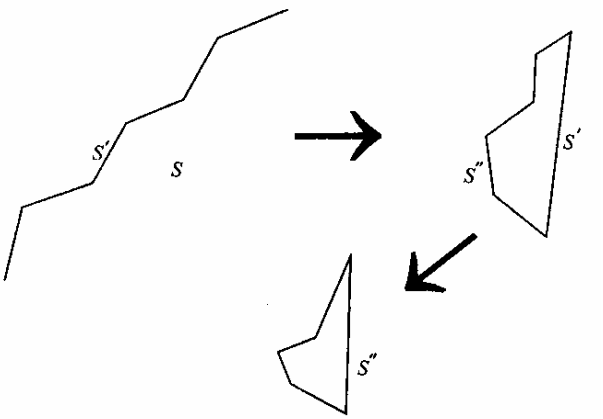


图 4－5 线状地物随比例尺改变而呈现的统计自相似性

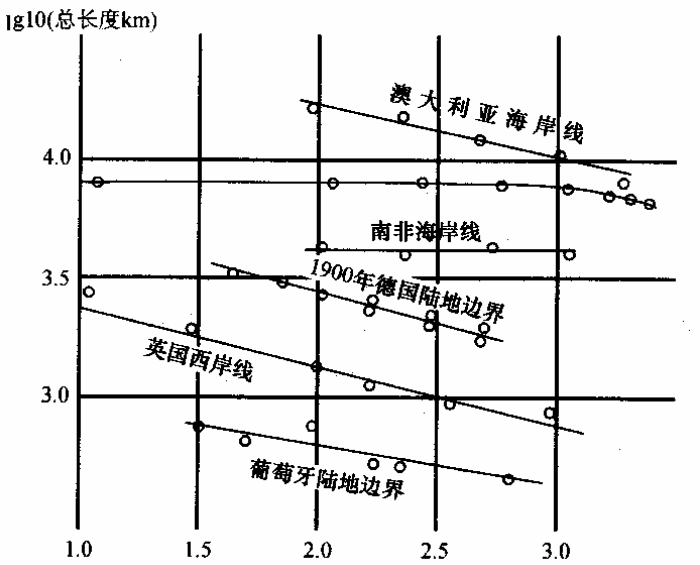


图 4－6 Richardson 关于海岸线与国境线的分析

变而变化，随着比例尺的减小，线性要素的细节也在减少，较小比例尺图上线性要素的每一片段都对应着较大比例尺图上的一组片段（图4－5），这里我们可以将这种对应理解为统计自相似。对现实世界中的实体，其所量测的长度会受测量长度仪器的精度限制。

Richardson（1961）根据其对各种海岸线与国境线量测的长期研究经验指出，以曲线总长度的对数lg(L)和量测尺度的对数lg(r)为坐标做出的图是一条直线，且这条直线的斜率为1-D，图4－6，并依此提出了线状制图要素的量测尺度与量测长度之间的关系：

$$L = L_0 r^{1-D} \qquad (4-1)$$

其中，L为要素的长度；L_0为比例系数；r为量测尺度（即量测线段的长度）；D是幂因子（即后来Mandelbrot所提出的分数维D_f）。随着步长的变化，曲线长度也发生变化，但变化率并不相等，Mandelbrot认为这一特性是受曲线的一个参数所控制的，这个参数就是用分数表示的曲线的维数——分数维（Fractal Dimension），又称H-B维

(Hausdorff-Besicovitch)，同时分数维的大小描述了物体的复杂程度。

Mandelbrot（1977，1982）将D_f解释为一个十进制值，代表地图目标的分数维。根据分数维理论，平面内的曲线的维数大于等于1，而小于等于2，例如，直线的维数等于1，Peano曲线的维数等于2，Koch曲线的分数维为ln4/ln3≈1.2618，一般的曲线的维数为$1<D_f<2$，需用分数表示，故称为“分数维”。类似地，对曲面，其拓扑维度为2，而其相应的分数维度则界于2与3之间。曲线的分数维反映了曲线的复杂程度，反映了其对空间的展布能力。对于一条曲线，当已知它的分数维D_f以后，可以容易地计算出其长度，但在实际应用中，曲线的分数维数是未知的，我们可以反来通过计算曲线的长度来推算出其分数维数。

Goodchild和Mark（1987）认为分数维D_f可能是描述不规则地理特征的最重要的参数。分数维的一个重要特征就是所谓的“自相似性”，也就是整体与局部的相似，这种相似可以是形态、空间、时间、功能等方面的相似，因此分形几何的应用研究得以在各个领域广泛兴起。在GIS领域，分形几何的研究及应用是着重于对地理现象形态的描述与分析上，因为我们生活的现实世界里，许多地理现象都呈现出非常复杂、非常不规则的变化和存在形态，如山地的起伏、河网的结构、海岸线的形态、居民地的分布等等，借助于分数维的自相似性特征，可以对这些复杂的自然景观进行定量的分析与描述。这就是说，在数字地图中，空间现象的分数维概念所体现的自相似性意味着如果像山脉、河流等地理实体可以用分数维描述的话，那么或许我们可以以在小范围内（如几十米、几百米）的地理现象的变化模式，通过简单的比例缩放而得到较大范围（如几千米）内的变化模式。

分数维可以是规则的与确定性的，也可以是随机的与统计性的。前者严格满足自相似原则，是纯数学的，相应的分数维图形可以通过一个初始生成器和一种尺度变化原则，重复变换生成器直至无穷而生成，如Peano曲线和Koch曲线。后者仅指在概率分布和统计规律上满足自相似原则，比较适合对地表的诸多不规则的地理现象与自然景观的描述，因此在地理信息系统与计算机制图领域中的分形研究与应用，多采用统计性分数维的概念。

4.3 数据获取

数字地图制图需要获取两种不同的数据集，即形成地理基础文件的空间数据和用于专题覆盖层的属性数据。这里只讨论如何获取整个数据库中的空间数据。空间数据可以通过设备仪器直接获取，也可以通过对现有地图文档的编码来获取。

4.3.1 数字遥感数据的获取

遥感数据是数字地图的重要数据源。遥感是指不直接接触物体本身，从远处通过对传感器探测和接收来自目标物体的信息（电磁波谱），经过信息的传输及其处理分析，从而识别物体的属性及其分布等特征的科学和技术。遥感技术是建立在物体电磁波辐射理论基础上的。地球上的每种物体都会发出一定的电磁波谱。通过探测不同波段的电磁辐射来识别物体。不同地物对入射电磁波的反射能力是不一样的，通常采用反射率来表示，它是地物对某一波段电磁波的反射能量与入射总能量之比，其数值用百分率表示。地物的反射率随波长的变化而变化，二者具有函数关系，绘制成图即为地物反射光谱曲线。

制图工作者已特别注重基于遥感影像来量测地表特征并制图。遥感图像判读是利用遥

感图像进行空间数据更新的基础。然而，人眼的目视判读受到人眼的生理特性的限制（人眼只能区分黑白图像上8到16个灰度等级）。对遥感数据的数字处理保留了传感器的辐射捕获精度，而目视判读会过滤掉一些信息（应当指出，任何传感器本身也有精度限制，跟人眼一样会丢掉一些信息，如高频信息）。

陆地卫星（LandSat）是美国发射的一系列卫星，原称地球资源技术卫星（ERTS），以探测地球资源为主要目的。1972年7月23日发射了第一颗地球资源技术卫星。这些卫星携带的传感器能分成几个不同的光谱波段来记录地物的电磁波辐射(反射和发射)。Landsets 1-5上都装载有多光谱扫描仪（MSS），MSS对应地面扫描宽度为185KM，探测器以4×6的阵列排列，即分四个波段（4、5、6、7），见表4－1。每个波段有6个探测器记录。MSS图像的地面分辨力为56×79米。

专题制图仪(Thematic Mapper，TM)，是新型光学机械扫描仪，与MSS相比，它具有更好的波谱选择性，更好的几何保真度，更高的辐射准确度和分辨率。它安装在Landsats 4和5上。TM可以同时感测7个不同波段。前6个波段的地面分辨力为30×30米，第7个波段的地面分辨力为120×120米，表4－1。法国的SPOT卫星的精度更高，SPOT卫星的传感器有两种波段，一为全色波段，一为多光谱波段。全色波段（可见光）的地面分辨力为10×10米，多光谱波段的地面分辨力为20×20米，表4－1。

表 4－1 陆地卫星与 SPOT 卫星的传感器波段

传感器	波段(μm)
Landsat MSS (56×79m 像元) 波段 4 波段 5 波段 6 波段 7	 0.5－0.6（绿） 0.6－0.7（红） 0.7－0.8（反射红外） 0.8－1.1（反射红外）
Landsat TM（30×30m 像元） 波段 1 波段 2 波段 3 波段 4 波段 5 波段 6 波段 7	 0.45－0.52（蓝） 0.52－0.60（绿） 0.63－0.69（红） 0.76－0.90（反射红外） 1.55－1.75（中红外） 2.08－2.35（中红外） 10.4－12.5（热红外）
SPOT 全波段（10×10m 像元） SPOT 多光谱波段（20×20m 像元）	0.51－0.73（可见光） 0.50－0.59（绿） 0.51－0.68（红） 0.79－0.89（反射红外）

遥感图像的形成过程中，影响图像的因素非常多。所以数据经传感器获取过后，还需要作一系列处理，包括图像恢复处理和增强处理。图像恢复处理主要是指改正或补偿在成像过程中造成的辐射失真、系统噪声（如条带现象）和随机噪声、几何畸变及高频信息的损失。遥感图像增强处理是指将原来不清晰的图像变得清晰或突出某些特征，同时抑制某些特征的图像处理方法，其目的是突出图像中的有用信息、扩大不同影像特征之间的差别，

以便于进行判读和分析。通常先进行图像的恢复处理，而后再进行图像的增强处理。

辐射校正，一个理想的成像系统产生的图像的亮度值应该与地物的辐射率成线性关系。但实际的传感器记录的灰度值、亮度值（DN）与地物的辐射率并不成直线关系，特别是反应曲线（或光转换函数）的两端部分更为明显。位于整个亮度范围两端部分的地物辐射信息实际上是被压缩了，为了把这种歪曲了的关系恢复成理想的线性关系，就需要用反应曲线的逆函数乘上原来的DN值，得出校正了的DN值。

几何校正，它分为两种。针对引起几何畸变的原因而进行的校正称为几何粗校正。例如，纠正陆地卫星MSS图像由于扫描同时受到地球自转影响而产生的偏斜，以及由于显著的地形起伏造成的随地而异的几何偏差；利用地面控制点进行的几何校正称为几何精校正，也称为图像坐标变换，或称空间变换。这是一种投影性的校正，即把遥感图像转换到某种地图投影和另一种图像坐标上去，使各种遥感图像与地形图、地质图等图件相套合（配准），以便于解译和综合分析。

4.3.2 数字化

地图数字化目前仍是数字制图信息系统中获取空间数据的主要手段之一。因为它简便，效率较高，但它的精度比野外测量差。尽管能通过遥感产生大量空间数据，但许多数字地图编绘仍需要借助数字化将模拟地图转换成数字图形。由于数字化比其它方法花费大（实际上，遥感的真实成本并不比数字化低），所以需要事先对数字化过程进行规划。

将模拟地图变为数字形式涉及到四个阶段：

① 可行性分析与需求分析；

② 地图准备；

③ 数字化；

④ 编辑。

在实际的数字化过程进行之前，应结合项目的规模及其与正在进行的其它项目的集成状况，提交一个可行性报告，确定是否有必要创建一个数据库，如果需要，那么这个数据库的目标和标准应当是什么。然后要搜集地图文档，如果需要的话，还要对其进行检查和质量控制。

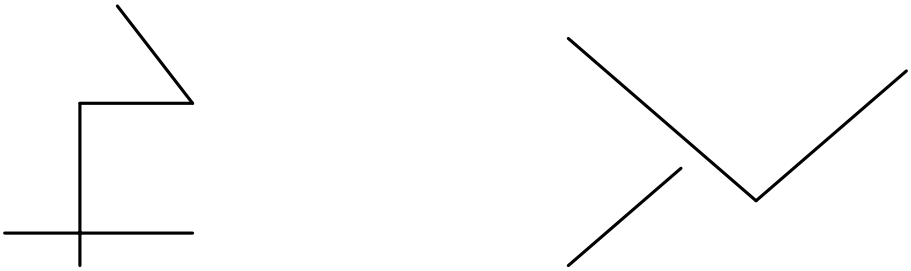
一旦地图文档准备完毕，就可以进行编码工作，方式可分为从用扫描仪完全自动化地进行到运用透明格网来进行。前者适合大规模作业，后者适合于小型或个人使用。然而大多数数字化，都是运用数字化仪在人机交互的环境下进行的，有几点要特别注意：

第一，获取数据时，尽量减少相似操作引入的误差。人工操作与机器处理必须协调一致，尽量让操作员完成较少的任务。当然，这将要求软件系统的功能更加复杂强大，因为数字化仪将线条捕捉为点串，拓扑关系只能后续建立。尽管拓扑数据结构要求更多的预处理操作，但现在已有一些数字化软件能在数字化的同时创建拓扑结构，如ROOTS，或其他基于Voronoi/Delaunay结构构建空间关系的软件。

网络拓扑的建立需要人机交互才能完成。一种作业方式是：操作员只需将地图的线状特征作为“面条”串输入，再单独输入多边形的ID点，则相应的多边形轮廓在编辑阶段通过“点在多边形内”的判断来匹配。从“面条”数据建立多边形轮廓需要仔细计算线与线之间的交点。通常，这些线将首先按其外接矩形的Y轴最小值（YMIN）进行排列。

第二，编辑时，会发现许多数据输入错误，如悬挂线（图4－7）、未标记多边形、左右多边形的ID值相同或多边形命名冲突等。操作员不可能每次都能将线条准确地匹配到某个

点位上，所以识别时就需给出一个容差，见图4－8。



(a) 线过头　　(b) 线未接上

图 4-7 悬挂线

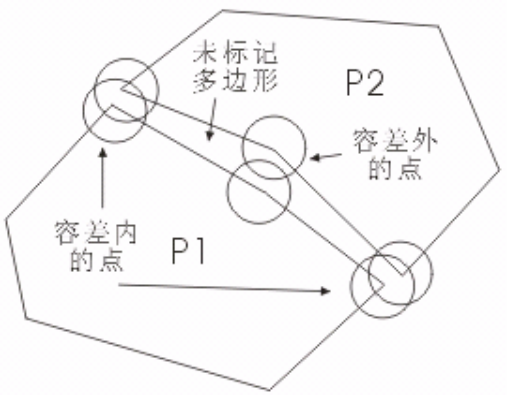


图 4－8 数字化过程中可能出现的问题

地图数字化有两种作业方式即数字化仪的手扶跟踪数字化和地图扫描数字化。使用数字化仪进行地图数字化有三个主要步骤：第一步是连接数字化仪；第二步是图板定向；第三步是图形数字化。由于扫描仪性价比和扫描数字化作业效率的提高，扫描数字化变得越来越普遍。扫描数字化的第一步是将地图进行扫描。根据数字化仪的不同、地图种类和用户的要求不同，可分别得到二值图像、灰度图像和彩色图像。扫描数字化又可分为两种方式：自动矢量化和交互式矢量化。对于单幅的等高线图、水系图、道路网等采用自动矢量化效率较高。对于城市的大比例尺图，可能只有采用交互式矢量化。

4.4 预处理

地图数据预处理是对所获取的数据进行处理，以建立地图目标与其空间和非空间属性之间的关联，或发现属性值的规律。一定的预处理能辅助数据的结构组织和简化后续操作。

4.4.1 查找

一个基本的预处理操作便是查找，实现查找有两个主要原因。其一是确定符合要求的目标。举例来说，根据坐标值或专题属性值查找具有最大或最小值的地图目标。当处理多边形或线段时，经常要知道其外接矩形（即包围它的最小矩形），见图4－9。这个矩形可用于后续的操作运算，如多边形和链的标识。这个最小外接矩形是通过比较X，Y轴值得出最

大值和最小值来确定的。

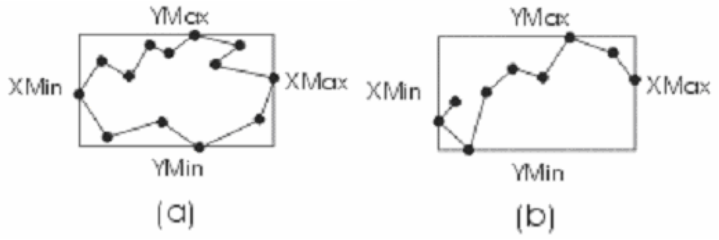


图 4－9 最小外接矩形

起二是在一维或二维空间分布当中，找出一个新目标的坐标位置或属性值相对于已有目标的相对位置。对于一维分布而言，这意味着找出某值位于新目标两侧的目标，如图4－10。点Pn的左右邻域分别是P1和P9。



图 4－10 一维最近邻域

对于二维分布而言，要找出所有方向上的最近邻域等同于找出新点的Thiessen邻域，见图4－11。Pn的Thiessen邻域是P7、P13、P1、P6和P15。因为在新目标的相对位置确定之前，现有目标的序关系已经建立，所以这个问题可在现有数据结构中解决。

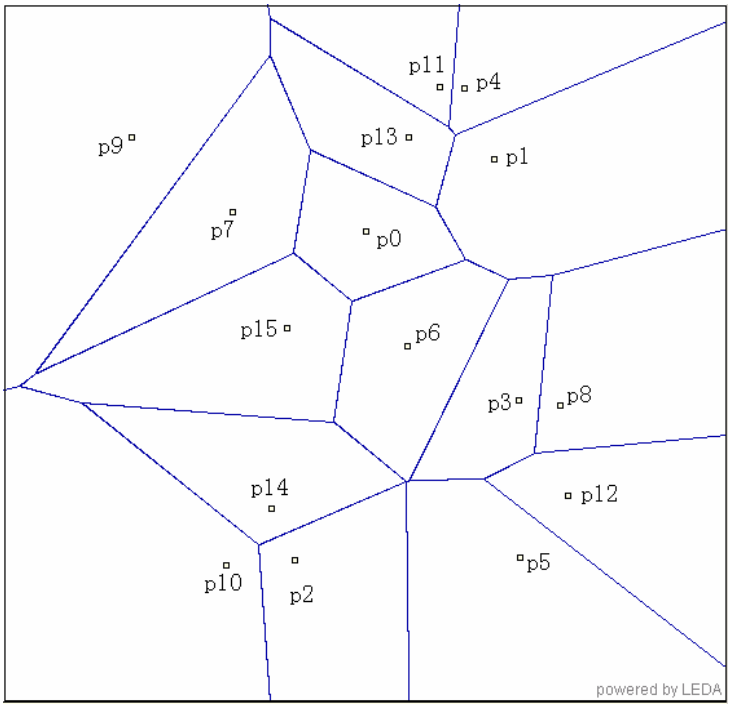


图 4－11 二维最近邻域

4.4.2 排序

另一个与查找有关的预处理操作是排序。在应用中，有时我们希望将空间物体按照某种线性次序进行排列，并同时保持空间物体间的某种关系，如在空间初始分布中互相邻近的物体，在新的空间序列中依然互相邻近。显然，对于一维空间分布来说，这种次序是唯一的。例如对空间距离来说，当我们将位于京广铁路线上的所有城市按距起点北京的远近进行排列的话，那么这种次序就是唯一的，而且在这种序列中的任意两点间的距离一定是它们间的最短距离，这条路径也就是一条最短路径。排序就是针对一维和二维分布的点集，找出点集存在的秩序。

对于一维分布的点集而言，从未排序的点集中产生一个结构，升序或降序排列。基本的排序方法有插入排序。每一个点根据前一点的位置合理插入到点序列中。举例来说，假设7个具有以下属性值的点：17、24、30、5、7、12、19。这些值以下列方式进行升序排列。

S1 | 17：24，30，5，7，12，19
S2 | 17，24：30，5，7，12，19
S3 | 17，24，30：5，7，12，19
S4 | 5，17，24，30：7，12，19
S5 | 5，7，17，24，30：12，19
S6 | 5，7，12，17，24，30：19
S7 | 5，7，12，17，19，24，30：

（其中“：”是已排序和未排序点的分隔）

S1步骤中，序列中的第一个值17在初始位置，S2中，下一个值为24，它与当前序列{17}比较，插入后成为{17，24}，按下来是30，它与{17，24}比较，插入到合适的位置。依次进行，直到S7，19要插入到{5，7，12，17，24，30}中，如果每步都要进行二元查找，那么共有m个元素的序列，剩下的插入操作需要比较log2m次，对于n个未排序的点，总共需要比较log2[(n-1)!]次。

另一种排序方法是找出点集的最小值并提取出来，再在剩下的点集中找出最小值又提取出来，依次进行直到剩下为空。对于上例中的点集，可以是以下步骤：

S1 | 5：17，24，30，7，12，19
S2 | 5，7：17，24，30，12，19
S3 | 5，7，12：17，24，30，19
S4 | 5，7，12，17：24，30，19
S5 | 5，7，12，17，19：24，30
S6 | 5，7，12，17，19，24：30

（其中“：”是已排序和未排序点的分隔）

在S1步骤中，值5是整个点集中最小值，它被放在新集合中的首位，S2中，7是子集{17，24，31，7，12，9}中的最小值，它被放到新集合的第二位置。每个步骤中，有m个未排序元素的点集中要比较（m-1）次，对于n个点的点集，总共需要[(n-1)(n-2)/2]次比较。

尽管上述两种方法较易实现，但它们的算法效率不高。两者都没有利用未排序集合中可能存在的排序状态。以下提供两种排序方法。

其一是将各元素作为一个子集，然后按等级依次合并小子集成为大子集，合并的同时进行排序。子集合并的例子：

S1 ｜ 17，24：5，30：7，12：19

S2 ｜ 5，17，24，30：7，12，19

S3 ｜ 5，7，12，17，19，24，30

在S1中，两两合并成为4个子集，{19} 没有被合并，因其初始集合含有奇数个元素。S2中每两个子集合并成一个子集，形成两个更大子集，S3再合并，形成一个已排序的集合。对于n个未排序的点，只需log2n个步骤即可完成排序，总共需要比较[nlog2n-(n-1)]次。

其二是将初始顺序的点集按其已有的自然存在的排序状态分块。本例中，分块如下：

S1 ｜ 17，24，30：5，7，12，19

S2 ｜ 5，7，12，17，19，24，30

只需两个步骤，因为其已有的自然排序状态级别较高。S1中，分成m个子集需要比较（n-1）次。总的步骤数取决于m。整个排序过程最多需要(n-1)(log2m+1)次比较操作。

对二维空间分布来说，这种排序就是一种由二维到一维的变换，也可以说是一种由图形拓扑到路径拓扑的变换，这种变换是不唯一的，因而次序也就不是唯一的。例如，对平面上规则分布的正方形格网点，就可以有多种变换（排列）次序，如图4－12所示的四种Peano曲线次序。这些次序有各自的特点：Morton次序和Pi次序将初始空间划分成可以用四叉树来表示的子空间；在Morton次序和Row次序中很容易由空间坐标求得任何一个空间物体的顺序号和地址；而在Pi次序和Row-Prime次序中，所给出的是所有可能路径中的最小路径（两者的路径值基本相等）。由此也给出了路径拓扑中的一个典型问题——最短路径问题：对于给定的一个平面初始集，给定一个起始点和终止点，寻找一条路径，该路径通过所有数据点且每个数据点只通过一次，同时位于这两个起始点和终止点间的路径的长度最短。这实际上就是著名的推销员问题（Traveling Salesman Problem）：推销员要不重复地经过所有的推销点，且又要使所走的路程最短。

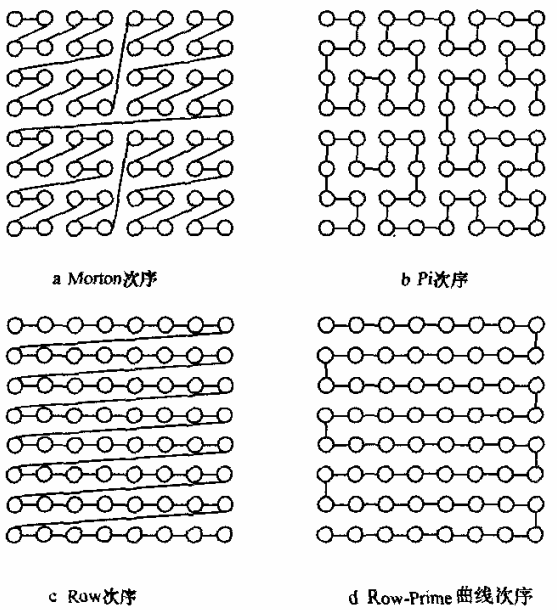


图 4－12 四种 Peano 曲线次序

这样一个看似简单的问题，解决起来并不容易，特别是对不规则的空间分布，至少是

到目前为止还没有一个切实有效的解法，而只有一些近似的最短路径的解法。如对给定的一个空间分布，先给定一个初始集，然后在每一次迭代中，将一个后继点依Peano次序插入到初始集中去，这样每次增加的路径长度是最小的。这种方法虽然不能保证最终得到的一定是最短路径，但却是接近最短路径的一种路径。

这里我们看这样一个例子。

假设有一组平面点集P＝{P1, P2, P3, ……, P15}，它们给出了一个不规则的空间分布(图4－13)。为了找出该点集的最短路径，我们可以先建立一个基于点集的y坐标的路径(序列)(图4－13a)，即：{P11, P4, P9, P13, P1, P7, P15, P3, P8, P6, P14, P12, P10, P2, P5}。

利用这个次序，建立起这个空间分布的初始集{P11, P4}，然后根据y序，将排列其后的P9点插入到初始集中去，插入的原则是使插入后路径增加的长度为最小，于是得到第二个集合：{P9, P11, P4, }，……，以此类推。在每一次迭代过程中，都是遵循同样的插入原则，将y序路径中的下一个相邻点插入到上一次迭代完成的集合中去，最终得到一个近似的最短路径(图4－13b)，整个迭代过程如下：

第一步：{P11, P4}

第二步：{P9, P11, P4, }

第三步：{P9, P11, P4, P13}

第四步：{P9, P11, P4, P1, P13}

第五步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7}

第六步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15}

第七步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3}

第八步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8}

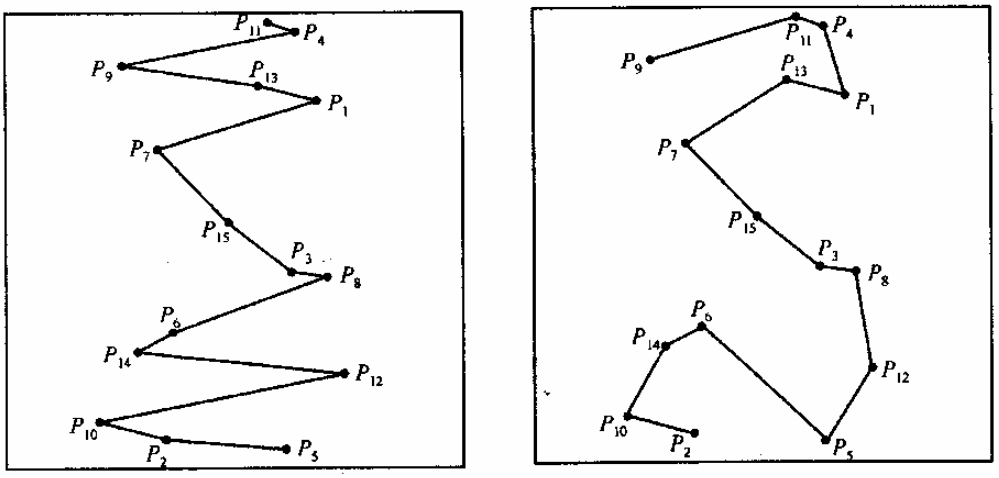
第九步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8, P6}

第十步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8, P6, P14}

第十一步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8, P6, P14, P10}

第十二步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8, P6, P14, P10, P2}

第十三步：{P_9, P_{11}, P_4, P_1, P_{13}, P_7, P_{15}, P_3, P_8, P_{12}, P_6, P_{14}, P_{10}, P_2}

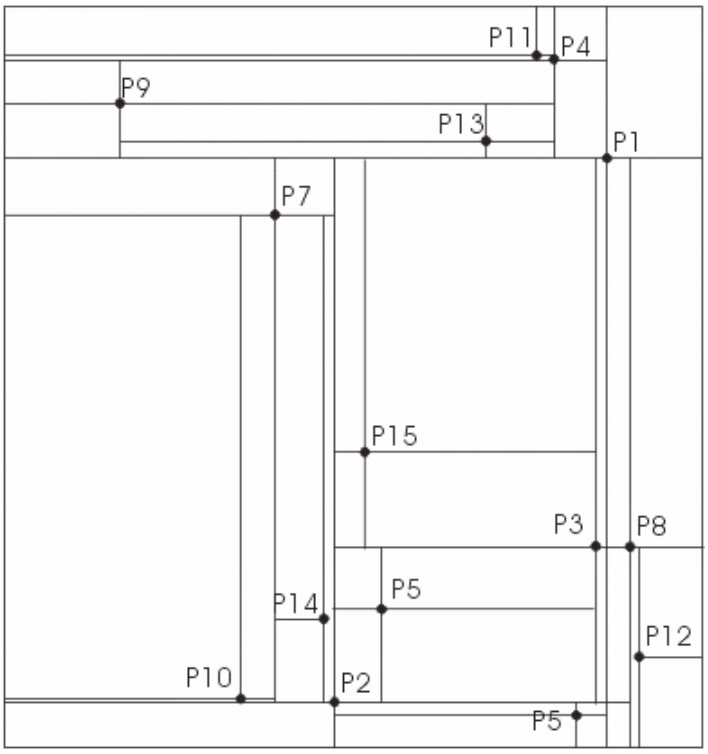


(a) 依 y 序坐标排列的路径　　(b) 最短路径

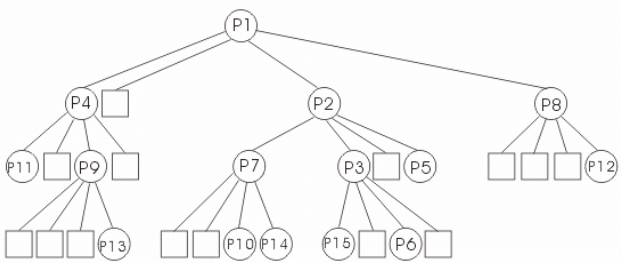
图 4－13 查找一个不规则的空间分布点集的最短路径

第十四步：{P9, P11, P4, P1, P13, P7, P15, P3, P8, P12, P5, P6, P14, P10, P2}

另一种针对二维分布点集的排序方法是将这些点放到树结构中。这里讨论两种树结构。其一是点四叉树，当依序插入新点到树中时，它将每个点的空间递归划分成四个象限，图4－14a。每个新点是前一点的后继。在4－14b中，P2是P1的西南（SW）后继点（因其X、Y值都小于P1）。当在查找过程中要排除许多分支时，四叉树是个有效的组织方式。在图4－11中，添加的新点可以是任意的，但这会导致一颗不平衡树，见图4－14b，造成查找计算过程的延长。



(a) 自然递归划分



(b) 生成的四叉树结构

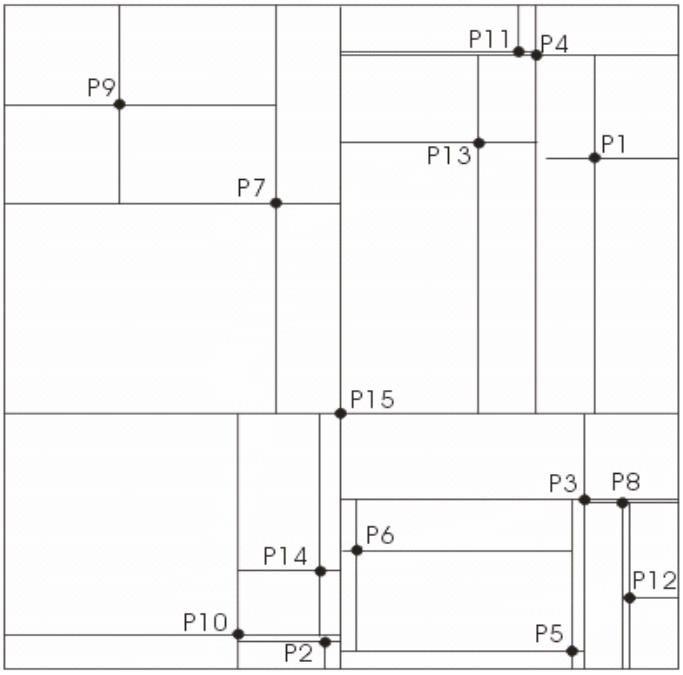
图 4－14 点的四叉树排序

另一种方法是首先按点的X和Y值分别排序，然后按以下公式计算各点偏离中间点的绝对值。

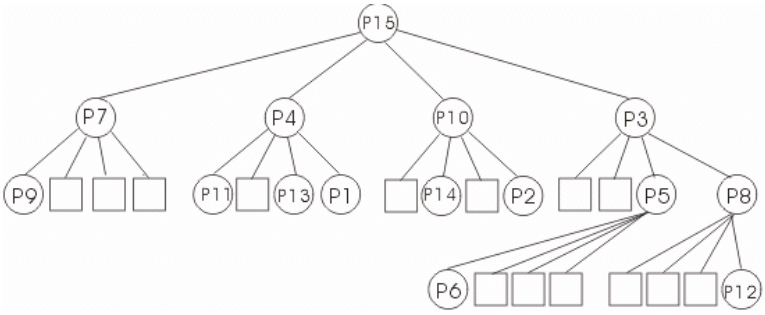
$$Dx = |(n+1)/2 - Rx| + 1;$$

$$Dy = |(n+1)/2 - Ry| + 1;$$

其中，Dx和Dy是偏离中间点的等级值，n是点的数目，Rx和Ry是点分别在X和Y轴上排序后的等级值（即排序位置）。积Dx·Dy是点的等级值的综合量度。在空间递归划分时所得结果又在点的每个子象限重复计算（图4－15a），结果是一个更为平衡的树结构（图4－15b）。



(a) 按等级递归划分



(b) 生成的结构

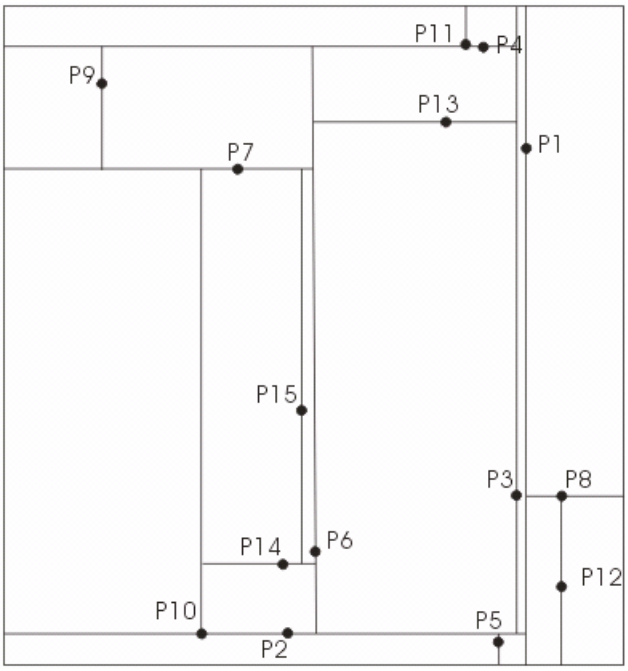
图 4－15 按 DxDy 排序的点的四叉树结构

另一种用于二维分布排序的树结构称为k-d树。k-d树的根的X和Y值将点空间划分为两个部分，图4－16a。各点进入树的顺序是可选的。图4－16a中，点按其自然顺序加入。初始分割利用X轴的值，这产生了图4－16b所示的不规则树结构，它会增加查找操作的次数。

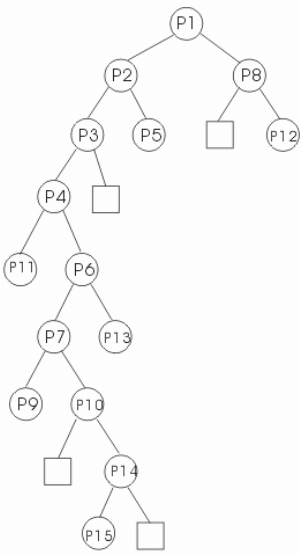
相反地，这些点也可以首先按它们的X和Y值分别排序，树的初始点为X轴的中间点，后继点为Y轴的中间点（经过前次X轴排序后的），以此重复进行直到每个子集只有一个点为止，

图4－17a，结果通常是一个比自然顺序更平衡的树结构，图4－17b。

借助于Thiessen图的最近邻域也可以将二维点集排序为图结构。

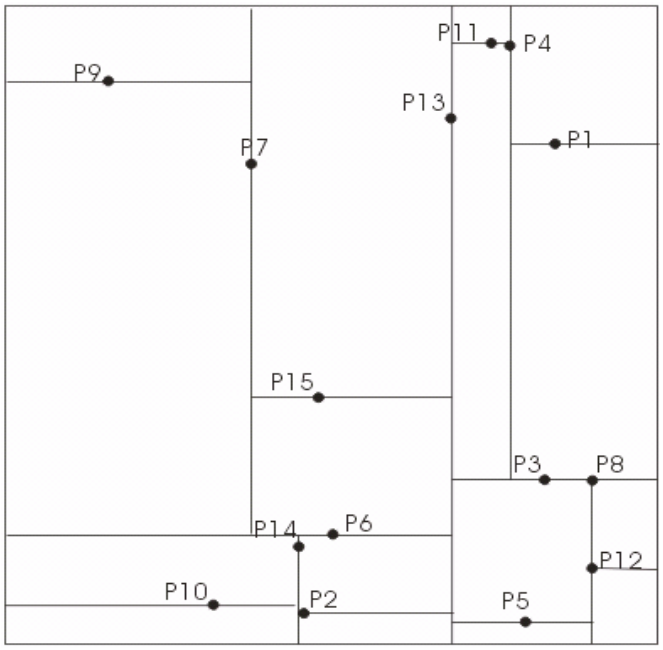


(a) 自然顺序的 k-d 划分

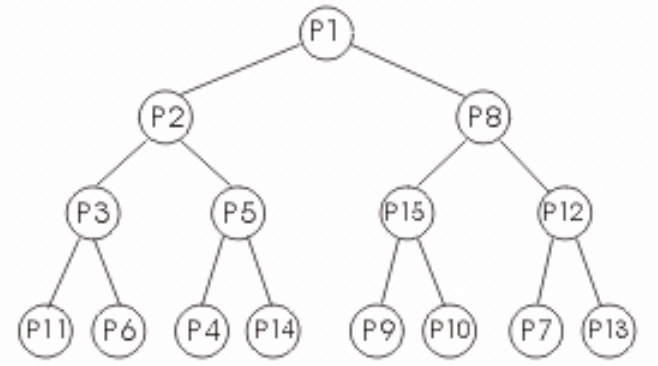


(b) 生成的树

图 4－16 k-d 树排序



(a) 已排序的 k-d 划分



(b) 平衡 k-d 树

图 4—17 改进的 k-d 树排序

4.4.3 “点在多边形内”判断

另一个预处理查找算子是“点在多边形内”判断。其目的是判断一给定点位于哪个多边形。在数字地图中，尤其是在交互操作环境下识别多边形ID是一个非常关键的操作。“点在多边形内”判断可用于数字化过程中标识多边形。“点在多边形内”判断依赖于多边形内部点与多边形ID。为了惟一识别多边形ID，所选择的点必须是多边形内部点而不能是边界点。

“点在多边形内”判断的判别方法如下：点在多边形内的判别最直接的方法是铅垂线法（平行线法、射线法），即从待识别的点开始划一任一方向的直线（该直线可以是铅垂线

或平行线），然后计算它所通过多边形的交点，当交点的个数是奇数时，该点在多边形内，若是偶数，表明它在多边形外，如图4－18所示。

这个基本方法可能需要大量计算，下面对其作一些改进。对于每个多边形，首先判断点是否位于该多边形最小外接矩形，如果不在，则可以肯定该点在这个多边形之外，这就减少了很多不必要的运算。若在最小外接矩形之内，则按基本方法进行判断。

但是使用射线法有时候可能失效，产生判断错误。如图 4－19 所示，当射线通过多边形的拐点或某一条边时，这时按统计通过多边形的奇偶数，会产生错误的判断结果。

点在多边形内判别的另一种方法是弧长法。这种方法要求多边形由有向边组成，即规定沿多边形各边的走向其左侧（或右侧）为多边形的内部，方法是以被测点为圆心作单位圆，将全部有向边向单位圆作径向投影，并计算其在单位圆上弧长的代数和。相当于计算该点到多边形上所有顶点的夹角和。代数和为0或小于360°，则被测点在多边形之外，如图4.－20a所示；若代数和为360°，则被测点在多边形内，如图4－20b所示。对于内部有

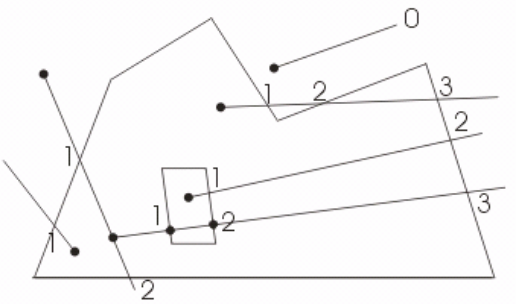


图 4－18 点在多边形内的判断

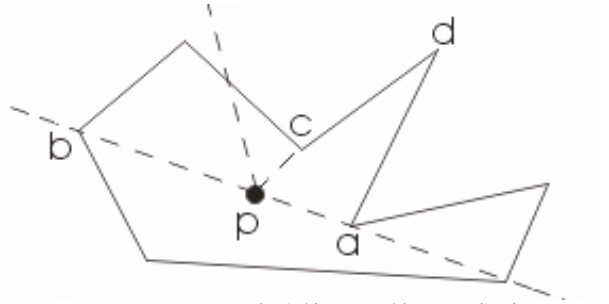


图 4－19 特殊情况下射线法失效

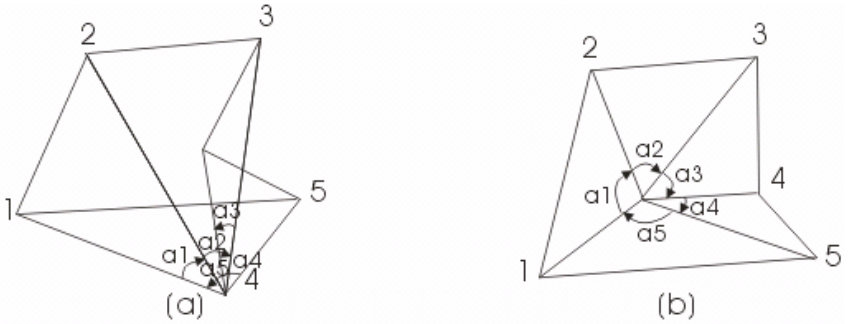


图 4－20 用弧长法判断“点在多边形内”

空洞的多边形，只要按照前文规定来定义多边形的有向边，亦可采用同样的方法测试。

“点在多边形内”判断也可直接基于链进行，而不是多边形轮廓线。这个方法中，关键是如何找出链C*，它与铅垂线相交于点（xp，y*），该点位于点P的上端并与点P最近（见图4－21）。当与铅垂线有新的交点时，递归更新C*与y*的值。

在对弧段表进行处理的时候，凡是其包围矩形在铅垂线的左边或右边或是在P之下或是在y*之上的链均排除在外，不作考虑。交点（x，y）总是在线段链C和铅垂线之间，只要yp＜y＜y*，那么C*与y*的当前值就被更新为C和y。一旦C*找到了，就要判断点P究竟位于与铅垂线相交的线段链C*的左半平面还是右半平面，见图4－22。如果P位于右半平面，则它在C*的右手边多边形内，而如果P位于左半平面，则它在C*的左手边多边形内。在图4－22中，给出了线段链C*的方向，点P位于C*的左半平面，所以点P在多边形P2内。

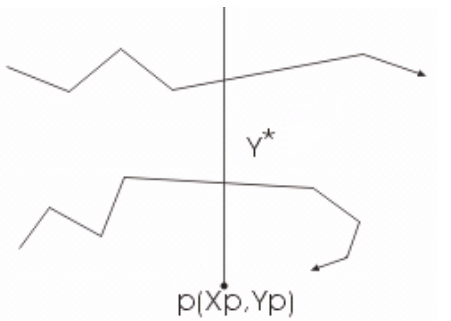


图 4－21 基于最近交点的“点在多边形内”测试

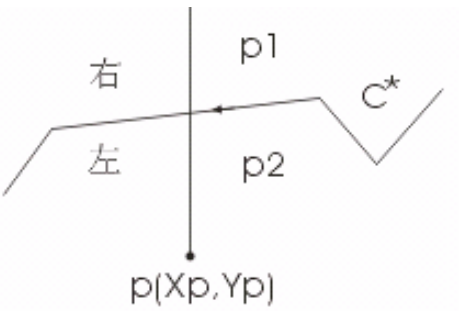


图 4－22 基于线段链的左右半平面测试

4.5 本章小结

地图数据的获取和预处理为以后在一个系统中生产各种形式的地图及其相关产品建立可靠有效的地图数据库。尽管数字制图系统中的地图数据库为生多种地图产品提供了便利，但显示在许多地图上的地图目标必须首先在数据库中进行编制。下一章将讲述与此相关的数字地图综合的有关内容。

第5章 数字地图的自动综合

地图自动综合是地图数据处理所面临的最富智慧与技术性挑战的问题之一，是一个世界公认的难题。目前国际上在建立国家或区域性地图数据库或GIS时仍然采用多比例尺地图建库方法就是一个有力的证明，如德国的ATKIS和我国国家测绘局建立的国家基础地理信息系统。数字环境下的制图综合不仅是数字地图制图生产的核心，而且也是GIS实现空间数据的多尺度表示和自适应可视化的核心问题，同时也是实施数字地球计划的关键技术之一。

一旦实现地图的数字描述，就能够对数字地图实施不同的综合操作。地图综合是一个复杂的过程，有不同类型的地图综合操作。这一章我们将重点讲述数字地图自动综合的基本原理和方法，目的在于满足一定的应用目的和约束条件下将已经存在于数据库中的数字对象综合为新的数字对象。

5.1 地图自动综合的目的与任务

5.1.1 地图自动综合的需求分析

地图是客观世界的模型，从认识论的角度看，“综合”是人们认识客观世界一种思维方式之一。地图综合就是根据地图的用途、比例尺和制图区域的特点，以概括、抽象的形式反映出制图对象的带有规律性的类型特征和典型特点，而将那些对该图来说是次要的、非本质的物体舍掉。地图综合是一个创造性的过程。在数字环境下，地图综合要面向数字模型。人们要从数字模型中获取空间知识就需要“综合”，没有“综合”，就没有办法获取地理知识。

目前，世界上许多发达国家及发展中国家已经相继完成了或即将完成基本比例尺地理数据库的建库工作。各国的基本比例尺视国家的领土大小、人口密度以及经济条件等多种因素的不同而有所不同。

由于基本比例尺地理数据库十分详细完整，精确地记录着地形和地物目标的位置信息、属性信息以及目标间的语义关系和空间拓扑关系，人们往往可以忽略比例尺的存在，从概念上把它看成是现实世界的无边无缝的仿真模型。这个仿真模型我们称之为地理信息空间。这个地理信息空间自然就成了一切制图活动及地理信息研究和应用的出发点，人们可以随心所欲地提取任意一部分数据制作专题地图，派生任何一种中小比例尺普通地图，也可以把它当作信息源进行各种空间数据的咨询活动。

然而，基本比例尺地理数据库的数据量非常庞大，其详细的地理数据往往隐含着高密度的空间信息。但是，人们并不是时时处处都需要详细的数据，过多的不相关的信息有时会干扰正常工作，妨碍人们对全局性问题本质的把握。因此，如何把详细的空间数据通过综合的方法改造成适合特定用途和专门用户的地理信息库便成了一项重要的任务。

从数据生产的角度看，管理、维护空间数据与空间数据的质量控制之间的需求是密切

相关的，灵活的多比例尺地图生产的需求和现代化的制图生产工具产生了精度、密度和完整性的问题。随着空间数据信息系统数量的增多，自动综合的作用也随之显得更加重要，并成为数字制图系统的核心，只有具备了灵活的自动综合功能，地图数据库才能真正成为数字地图环境下地图生产的一种手段，GIS才能够真正满足不同详细程度的显示和输出不同详细程度地图的需求，而且，随着Internet服务范围的扩大，实时的自动综合方法即在线综合也将会在网络上出现，数字地球才能在网络的任意节点上为用户提供所需任意详细程度的地球空间数据。

目前，数字地图自动综合的应用需求越来越大，其目的及其相关任务可归结于以下七个方面（武芳，2000）：

(1)数据绘制和显示的需要：在许多情况下，模拟地图仍是一种普遍而通用的产品形式，GIS中应具备绘制模拟地图的功能。当数据输出的比例尺小于数据采集的比例尺时，只有经过综合才能以清晰的形式传输复杂的分析结果，保证输出地图的质量。

另外，当数据需要在屏幕上显示时，有时开窗放大的效果并不令人满意，尤其当显示比例尺大于数据采集比例尺时，要想了解更加详细的信息是不可能的，因为在应用空间数据时，其比例尺是不能大于数据采集比例尺的。

(2)数据分析和计算效率的需要：地理数据的分析总是针对一定的空间尺度和一定的空间等级进行的，亦即空间现象和过程通常是依比例尺的——即尺度依赖的，像气候、水资源、农业、森林、交通、土地及城市规划等许多应用都需要不同详细程度内容的变换及综合，因为数据的分析与传输往往都是在局部的或较高的层次上进行的，需要不同综合程度的地理信息模型，空间数据的分析和观察必须在多尺度条件下进行。

(3)数据压缩的需要：复杂程度的降低(综合的主要功能)是人类最基本的功能，科学综合的部分过程与人的行为和判断能力是一致的，因此为减少数据量和处理时间而进行的数据压缩是很必要的。

(4)数据库派生的需要：在目前建立地图数据库仍费时费力的情况下，由大比例尺数据库派生较小比例尺地图数据库依然是地图数据库应用的一个重要方面，这样不仅节约了建库经费，而且可以大大节省建库时间。

(5)数据更新的需要：数据更新是数据库维护中需要经常进行的的一项工作。由于更新的资料或数据与数据库中数据的比例尺有可能不一致，因而必需经过一定的综合才能入库。

(6)数据一致性的需要：许多制图部门建立了多种不同比例尺的地图数据库，无论如何这都是费时费力的事，而且这些不同比例尺数据库之间没有同一物体的信息联系，因此要想在不同版本的数据库之间传播是不可能的。

(7)增加信息可视性的需要：合理综合的结果，不仅保留了空间数据库在给定比例尺或图像格式情况下原始信息的最佳数量，而且去除了图像中的噪音，放大了图形的最基本部分，使图形的最主要特征得以保持，这样才能满足可视化的需要，因此可以说综合是在给定比例尺条件下增加信息可读性的一种工具。

5.1.2 数字环境下地图自动综合的特点

数字地图的自动综合，是在数字环境下，根据地图用途、地图比例尺和制图区域地理特点的要求，由计算机通过编程的模型、算法和规则等，对数字化了的地图要素与现象进行选取、化简、概括和移位等操作的数据处理方法。地图自动综合的特点如下：

(1)地图自动综合在操作对象、主体、方式和结果等方面，有着与手工地图综合不同的特点。前者的操作对象是数字地图，操作主体(操作者)是制图员与计算机的交互作用，操作方式是在计算机可读的情况下通过编程来实现，操作结果是经过综合了的数字地图；而后者的操作对象是模拟地图，操作主体是制图员，操作方式是利用刻(绘)图工具在目视可读的情况下直接处理图形资料，其结果仍是模拟地图。

(2)由于模拟地图具有目视可读的特点，所以手工地图综合过程中选取、化简、概括和位移等操作是一次(同时)完成的，而在数字地图环境下，只能是计算机可读，选取、化简和位移等操作是分别独立进行的，其操作步骤具有很强的可分解性。从这个意义上说，地图综合过程中的操作步骤分解越细(当然要合理)，地图自动综合的实现就相对地越容易。

(3)模拟地图的自动综合其结果仍然是模拟地图，在目视可读的情况下，地图综合的质量是可以目视检查的，当然也是可以目视修改的。数字地图综合的结果仍然是数字地图，计算机可读，但目前计算机还无法判别综合结果是否符合要求，因此，还必须在图形交互编辑条件下，将综合结果显示在屏幕上，由制图员进行检查并利用修改功能予以修改，当然许多情况下也是可以使用智能启发式人机交互方式进行修改的。

(4)地图综合是一项复杂的创造性思维过程和繁重的劳动过程，在模拟地图综合的情况下，这种复杂的创造性思维过程和繁重的劳动过程都是由制图人员人工完成的，综合质量取决于制图人员对制图对象规律性的认识和对这些规律的表达能力；在数字地图综合条件下，复杂的创作性思维过程由制图员完成，而繁重的重复劳动过程却是由计算机编程实现的，即使引用专家系统等人工智能技术，计算机也只是模仿制图专家在综合过程中处理问题的思维方式，解决由制图专家才能处理好的问题，综合质量取决于模型、算法、规则的合理性、完备性及智能化程度。综合的决策由制图员做出，而决策的实现是由计算机完成的。

从地图自动综合的特点可以看出，地图综合的理论复杂性和自动综合过程的实际困难性是很明显的。

5.2 地图自动综合的策略与概念框架

5.2.1 实现地图自动综合的途径

在数字环境和新的技术条件下，地图综合的应用领域更加广泛，其动机不再仅仅是为适应比例尺缩小后的图形表达，而且还具有数据集成、数据表达、数据分析和数据库派生以及网络地图的自适应传输等其它功能。数字环境下的自动综合，根据其应用目的和限制条件的不同，可以将整个综合问题看作是两个变换过程所构成：一个过程是从现有的数据库中经过综合变换推导出新的具有不同详细程度的数据库；另一个过程是当用某一比例尺进行可视化输出时，数据库中数据容量过大不能进行清晰的图形表达时所进行的综合变换。在这两个方面中，前一过程是变换空间模型的复杂性水平，后一过程是数据库的图形表达，与传统的制图综合相同，但考虑了地图、数据库与可视化之间的差别。

由此，可将地图综合的过程分解成两个子过程：推导新数据库的子过程和数据库中数据可视化的子过程，这两个子过程叫做数据库综合(或称模型综合、数据综合)和*制图综合*

(或称可视化综合)，分别用来处理前述的两个变换过程。它们分别用于不同的目的：一是数字或GIS环境下空间数据的多尺度分析与显示；二是满足模拟地图输出的要求。

5.2.1.1 数据（库）综合

空间数据库是地理空间模型的数字形式，是地球上各种内容的拷贝。数据库不仅是数据的集合，而且还包含数据元素间的关系、描述数据元素的规则、以及改变数据元素的算子等等，这些都是由计算机中的DBMS(数据库管理系统)来组织和管理的。而数据库建库过程中的综合，主要表现在确定建库目的(决定数据领域)、地理信息内容分类分级(服从于目的)和数据结构(组织方式)。

1．数据库综合的特点

数据库综合实际上是形成新的概念数据模型的过程，也就是通过数据库综合变换原始数据库，降低原始数据库的复杂性，形成新的概念数据模型。数据库综合是数据库到数据库的变换，这个变换过程包含一系列相关的算子。

相对于制图综合，数据库综合的特点在于仅考虑对数据本身的变换能力而不考虑其图形的表示。数据库综合的主要目的是压缩数据量，数据量的减少能够提高GIS中分析功能的分析效率。GIS中的空间物体需要多尺度的数字表达，这与数据的可视化是有区别的。可以说，正是由于数据库综合的开发与应用，推动了GIS的发展。

数据库综合的过程实质上是语义综合的过程，即对客观现实世界进行概念层次上的综合性模拟，从而产生并突出地理目标的结构和相互间关系，方法是利用数据库作为数据源，采用选取、合并、化简等综合手法，产生派生的数据库。

数据库综合是基于分析的需要而进行的，而制图综合则基于信息传输的需要，但两者并非互不关联。应该说，数据库综合可以作为一个预操作先于制图综合进行，制图综合包含了数据库综合。

数据库综合的投入相对于制图综合而言要少得多。数据库综合一般来说要满足下列要求：

①能产生可预见的或可重复的结果；

②误差达到最小；

③数据的压缩量达到最大；

④原始数据集中对象模型化的完整性和一致性不被破坏；

⑤从用户的观点看，综合过程中的参数设置要尽可能少，输入参数和综合结果之间的联系要明显；

⑥计算速度要快。

2．数据库综合的基本问题

模型综合过程中内容的变换和操作与比例尺无关。这些变换包括属性变换、空间变换以及实时变换。这里将在综合框架下详细地讨论这些问题。为便于描述，这里使用邻近来描述不相连物体间的相邻关系，使用邻接描述相连接的几何物体间的相邻关系。

(1)内容的取舍

内容的取舍包括三个方面，这三个方面分别是要素的选取、物体的选取和新类(或新等级)物体的选取。

要素的选取：该选取算子从不同类型的物体中选择具有特定空间和属性特征的物体的

子集，由用户根据其用途需要来总体控制。

物体的选取；与要素的选取不同，该选取算于是从具有相同空间和属性特征的物体中选取的子集。例如，从道路网中选取城市内部道路：从河网中选取流经首都的河流等等。

新物体的选取：由于重新分类分级产生新的物体类型，其属性是新类型的属性。

(2)属性的改变

属性的改变主要是分类标志的调整和分级界限的调整，这是语义数据模型的综合，可以用于属性的分类分级。

(3)空间位置的改变

删除小物体：删除算子将小于一定尺寸的面和线段滤掉，这里要考虑物体的最小尺寸。

删除细小碎部：化简算子可以滤掉太过详细的内容。

合并相邻物体：合并算子将相邻的小的同类物体合为一个大的物体。

图形等级变换：图形等级变换算子将空间物体由面状改为线状甚至点状，或由线状变为点状。

3．数据库综合算子分析

前面我们列出了综合中要解决的问题，这些问题是根据前面给出的空间与属性变换的含义，在数据库综合的框架内考虑的。数据库综合算子解决诸如选取、分类分级、化简、合并、删除、图形等级变换等问题。这里属性的化简、分类分级仅用于属性综合方面，删除、几何图形的化简、图形等级变换等则用于图形综合的范围。而概念转换、合并等需要进行属性和图形两个方面的变换与综合。

合理安排综合算子的顺序，是正确派生新数据库的前提。模型综合算子的优先级大体可如下安排：选取→合并→分类分级→概念转换→图形等级变换→化简。

与手工综合相似，选取总是综合过程的第一步，因为如果物体或物体类型未被选取，那么其它的综合算子就不需要了。

5.2.1.2 制图综合

1．制图综合的特点

制图综合是数据库的图形表达，主要任务是为了视觉表达而对模型综合后派生的数据库进行可视化，这与输出比例尺有很大关系。

为制图可视化而进行的空间数据综合，其目的与传统的手工制图综合相类似。但是，制图技术的发展变化产生了新的任务和新的需要，交互技术、数据分析探索的可视化技术等引进制图领域后，制图综合的内容有了新的扩展。应该看到的是，信息系统中的地图不再是典型的、复杂的、多用途的地图，而是含有少量要素的用途单一的地图。换句话说，地图和其它形式的可视化产品经常以“小复合”的形式出现(在多窗口和数据分析中出现)，与交互式操作、控制一起，形成了新形式下的制图表达方式，这种表达方式或多或少地减轻了制图综合的难度。

尽管数据库综合与制图综合在用途方面存有差异，它们各自的目的不同，但方法上却没有大的差别：这两种方法在综合过程上的区别，主要体现在地图产品输出时首先要保证的是地图质量，而数据库综合首先考虑的是综合速度。

数据库结构化后，数据的组织必须满足用户的需求。制图综合可以看作是数据库可视化的过程，这就是说数据库中的数据需要由制图综合来可视化，数据的局部和全局结构、

空间冲突的状况、综合过程中物体的行为等，是制图综合中需重点考虑的问题。

2．制图综合的前提与限定条件

(1)制图综合的顺序

制图综合在很大程度上是一定规则下的“竞争”问题，特别是同类型或同等级(如居民地、高程点等)之中物体之间的竞争。在竞争中，重要的物体继续保留，不重要的物体则可能被删除。竞争中物体的重要性程度起很大作用，为了能得出正确结论，需要确定竞争中的顺序关系。

以下几个方面用来确定竞争中的顺序关系：

第一，确定综合中物体的类型，重要类型的物体可不必考虑其它性质(如物体的尺寸)；

第二，同类物体中，物体的“加权尺寸”决定其排序；

第三，同类物体中，尺寸相同的复杂综合单元比单纯综合单元重要(除非还有其它条件)；

第四，物体的位置特征亦决定其排序。

(2)制图综合的限定条件

制图综合是面向图形的，但它受语义和几何方面的限制。由于综合中需保持物体原始的结构特征，因此几何方面的限制分为度量限制和拓扑限制两类。

制图综合的主要限制条件有：

首先，综合后不能产生新的局部冲突；

其次，如果冲突必须传播，那么首先不能引起重要物体的新的冲突，其次传播不能反馈，不能引起物体的二次移位；

第三，物体图形的夸大和符号化不能产生新的冲突；

第四，复杂综合单元可以综合为单纯综合单元，但是不能分离为“碎片”；

第五，类型不同的物体在制图综合中不能合并；

第六，综合时要保持载负量的平衡；

当然有些规则可能会妨碍冲突的解决。例如，如果两个保留物体发生冲突并且两个都不能移位，否则就会产生新的冲突；或者由于性质不同，它们也不能合并；或者它们也不能缩小，否则就“不可视”。在这种情况下，位移是一种解决方法，这种解决方法是产生新的冲突并引起相邻物体的移位。同样在夸大和符号化的过程中也会出现这种情况。在移动单一物体时也会引起成组的物体结构的改变．因此根据上述规则，这几种情况系统不能控制，此时系统只能告诉用户采用交互的方法来解决。

3．制图综合的基本问题

制图综合要解决的问题有三个方面，即：在目标比例尺图上舍掉不能表示的次要的小物体(选取)；简化空间物体表达的详细程度(图形化简)；输出的图形不能有图形冲突(要素间或物体间相互关系的处理)。

(1)选取

处理这些问题时，要针对不同情况采用不同的方法。解决这类问题的算子有夸大、符号化、合并和删除等。

(2)图形化简

化简能去掉物体太过详细的部分。进行化简时要避免产生新的空间冲突或破坏其拓扑关系。

如果有足够的空间，那么夸大或符号化物体重要的细部，否则，报告给用户。

化简的重点是要反映物体的几何特征及其在具体应用中的作用。例如道路中的S形弯曲等。

(3)线状物体的综合

线状物体或线性综合单元，具有特殊的几何特性，通常会构成网络，使得移动它们很困难。由于网络的限制，因而处理时与非线性单元有很大的不同。

(4)空间冲突的控制

空间冲突的解决是制图综合的困难所在，具有很大的挑战性。空间冲突是由于比例尺的减小或屏幕分辨率所引起的，一些综合算子如化简、夸大、符号化、位移等，都可以引起空间上的“占位”性冲突。解决空间冲突是一项巨大而复杂的工作，必然会引起某些物体位置的移动。位移的传播是空间冲突的另一个方面，目前尚没有合适的办法和规则来指导这个过程。

解决空间冲突问题的算子有若干种，如位移、收缩、合并、删除等。

典型化算子需要分析相关物体组的结构或图案，然后用新的物体集继承原始物体组的主要特征，最后去掉原始物体组。尽管这项操作在综合过程中并不起眼，但它的自动化却非常困难，该操作的自动化要通过结构(图案)匹配，算法非常复杂。

在解决空间冲突的算子中，位移算子是最复杂的，在具体的执行过程中，要重点考虑位移的类型定义和限定条件。

①位移的行为类型描述

在手工位移中，制图员是分别独立地对待每一个制图物体的。在自动位移中，需要对成组的物体分别定义位移规则，这些规则主要依据物体的几何类型(如点、线或面)、物体移动的可能性、物体的内部结构是否允许改变等特性来确定。

用这三条特性定义物体位移的类型，每种类型对应于相应的位移行为：

Point_Objects：可以移动的点物体。

Immovable_Objects：不能移动的点物体。

Line_Area_Objects：可以变形的线(或面)物体，但这种变形要尽可能的小。

Stiff_Line_Area_Objects：不易移动的线(或面)物体，即在内部结构不改变的情况下，可以移动的线(或面)物体。

Immovable_Line_Area_Objects：不能够移动的线(或面)物体。

上面五种情况考虑的是每个物体的个体特征，物体间的关系尚未考虑，而位移时这两者都必须考虑。理想的位移算法是根据上述规则分别处理每个物体，同时考虑物体间的关系，在解决空间冲突的同时，保持物体的空间分布特征。

②位移限制条件描述

上述五种位移行为类型定义了受一定条件限制的位移方法。位移的限制条件有五种，即：

移动限制——物体的位移尽可能的小。

内部结构限制——内部结构不能改变。

曲率程度限制——线划的曲率不能改变。

穿越限制——两条线划的交角不能改变。

空间冲突限制——物体移动后不产生空间冲突。

当然这些限制不是针对所有位移问题的，但这些限制能够较好地保持物体的空间分布特征。

4．制图综合算子分析

化简、夸大、符号化、合并、位移、收缩、典型化以及删除是可视化过程中的8种算子，这些算子中，删除、合并和化简与数据库中的模型综合相类似。但是应该看到，尽管它们在执行过程中是类似的，但其动机和准则在模型综合和制图综合中却是不一样的。制图综合中不包括图形等级变换，因为在制图综合中的符号化和它是一个相同的过程。例如，道路在大比例尺数据库中可以描述为一个几何上的面状物体，在地图上或可视化图上通常被表达为一个线状物体，那么事实上，使用一定宽度的线状符号可以描述道路，而并不象模型综合中那样在几何上也把它看作是线。

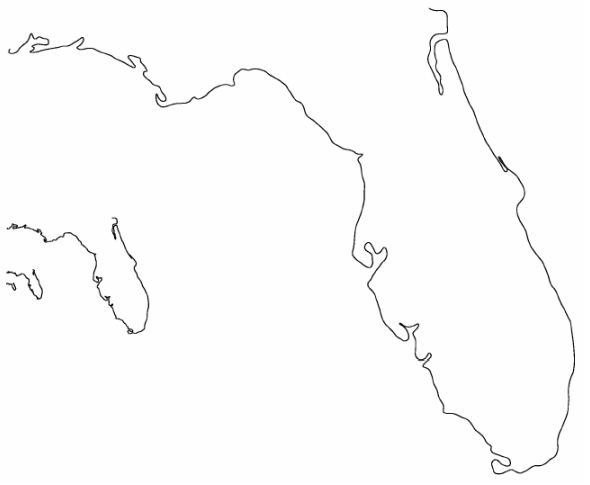
这些算子所产生的结果是不同的，夸大、符号化、位移、化简和合并会影响周围的物体，而删除、典型化和收缩则不会影响周围物体但却会影响拓扑关系。这些算子形成的最终结果也是不一样的：删除去掉了物体：典型化与合并改变了原始物体，但却产生了尺寸变大，数量变少的新物体；符号化、夸大、化简与收缩部分地改变了物体；位移改变了物体的位置但保留了形状与方向。

从实用的角度看，夸大、符号化和位移如果没有足够的空间的话，是不会被执行的，这是由于这些算子会引起物体的重叠，而且难以描述和操纵它们之间的空间关系。线状要素综合时要重点考虑这一问题。

数据库综合与制图综合的例子见图5－1。



(a) 数据库综合



(a) 制图综合

图 5－1 数据库综合与制图综合示例

5.2.2 地图自动综合的策略

在手工制图阶段或纸质地图的综合中，地图工作者已积累了大量的经验，并形成了一套完整的规则体系，它们面向的是“可视化”的图形，在数字环境下，如何解决地图综合问题是必须探讨的。

纸质地图是以一种可视的图形模型(物理模型)来表达客观世界，以数字形式表达客观世界的数字地图在形式上同它完全不同。纸质地图的综合强调“概括”和“抽象”，它是用图形的转换来实现的，但数字地图的综合则不同，它是对数据进行转换。

1．基于纸质地图的地图综合规律的简单分析

从大比例尺地图综合到小比例尺地图的方法有很多，并且非常成熟。地图综合过程中人为因素的比重较大，需要地图综合者掌握大量的地理知识，即使是同一幅地图不同人去综合会得到不同的结果，这说明原始的地图综合理论在具体操作过程中有较强的多义性与模糊性。

地图综合过程中应用很多技术方法。在综合顺序上强调：从整体到局部，从高等级到低等级，从主要到次要，从大到小等。在要素选取方面：有定额法和资格法等。在图形概括方面，除了进行简单的化简之外，为了强调地理特征的有效表达，常用到夸大、分割等，随着比例尺的缩小，地图的精度在下降，地图上强调的主要是：要素间的关系及用图形的有效组合来概括地表达地理知识。此时的地图，不仅仅是单个地图符号代表一个地理实体，而且可以认为很多地图符号在一个有限区域内通过其图形特征和图形关系特征来表达地理概念，从某种角度上看，该种图案完全是一个符号(广义的)，地图综合者用它反映他对地理空间的认识。地图综合的艺术性在这里就表现得非常明显，如地貌塑型。

2．地图综合自动化所需的基本条件

从上面的简单分析中可以看出，要实现地图综合的自动化就必须解决“计算机能象地图工作者一样理解地理信息、地理知识”，在此基础上实施“地图自动综合”。地图自动综合很明显是基于数字地图的，通常情况下在GIS环境下运行。

在这种条件下要进行地图自动综合应具备的基本条件是：

(1)计算机能从数字地图中找到所表达的地理含义，以便实施不同的综合手段。要达到这个要求，就必须研究地理空间如何用数据结构和数据模型来描述，在此基础上计算机自动获取图形的关系信息和特征信息，如目标间的距离、中心线的产生、结构信息的获取等；

(2)地图自动综合算子库的建立等；

(3)地图综合工程性的考虑，如无缝地图数据库的建立等，具体的地图综合的目标和具有完整地理含义的目标的解释条例等。

(4)地图综合的质量评价。这里的质量评价是地图综合效果的分析，它可以包含在地图综合模型之中，也可以是对最后的总体综合效果的评价。还有综合方法的计算效率的评价等。

3．地图自动综合的方法论问题

很明显，地图自动综合不同于手工地图综合，目前有两种观点，一种是纯粹模拟手工综合过程(从图形角度)；另一种是数字环境下地图综合应强调模型综合，强调数据的压缩。

从地图自动综合的基本要求中也可以看出，在数字环境下，地图综合应当有新的要求，如同一幅地图在不同时间，只要条件一样，应当得到同一结果，就是说应当可预知综合结果，该结果可重复出现，这往往是一技术方法的科学性体现之一。

由于地图综合的特殊要求，人们探讨了很多有利于空间信息表达的数据模型。不管采用什么样的模型，它必须具备几个条件：(a)有利于复杂型地理实体的描述；(b)有利于空间知识的获取；(c)能同地图综合模型所需的数据格式要求一致。随着GIS软件的发展，我们应当考虑通用的且能同现有空间数据模型相容的地图综合数据模型。

地图自动综合必须具备的三个必要模块：模型综合模块、知识获取与应用模块和综合方法选择的评价模块。综合模型和算法有很多，并建立了不同分类系统的算子集合。不管怎样区分算子，最重要的是这些算子是基于地理特征而进行操作的。对于地图综合而言，所需地理特征主要表现在：单目标的图形特征和地理含义；目标间的关联特征和总体特征；目标群的全局性地理特征。

如何进行数字地图的自动综合是一个复杂的问题，因而出现了很多不同的策略，以满足不同的要求或解决不同的问题。主要有以下两种观点：

(1)面向过程的观点

从详细的大比例尺数据库中综合派生出来。面向过程的观点把综合理解为从不同比例尺和不同用途的数据库中降低复杂性的一个变换过程。如前所述，综合是一个复杂的过程，要想实现全自动综合还有很长一段路要走。

(2)面向表达的观点——多尺度数据库

比较实用的方法是开发多尺度数据库，这与系列比例尺地形图相类似，这里把它称作面向表达的观点，因为它试图对不同比例尺单一的表达方式合成为一个连续的多尺度的表达。与设计从大比例尺图到下一个小比例尺图的综合变换过程不同的是，不同等级之间的比例尺变换是一种编码，正如人们所期望的那样，空间数据多尺度表达的技术要朝这个方向发展。多尺度表达的方法中要加强综合的应用，这是很关键的问题。

由于两种方法都具有各自的优缺点，较稳妥的做法是在未来的几年中两种方法结合起来使用，将来自动综合将向面向过程的综合方向发展，因为该方法的适应性更强一点。

4．自动综合的综合策略

（1）人在自动综合中的作用

自动制图综合无疑是一个计算机人工智能问题，它试图把地图——人——地图的关系转化为地图——计算机——地图的关系，可这个转变决非易事。

在自动综合中，手工综合到底占多大的比重，一直是个有争议的问题。在过去的很长一段时间里，研究者们一直致力于全自动综合(批处理综合)的研究，但就目前看来，这个过程缺少人工的干预(交互综合)还是不行的。

在自动综合过程中，确定自动综合与人工控制的界限在于人起的作用，主要体现在以下三个方面：一是当计算机解决不了时(实质上是不能模型化、算法化、规则化时)，干脆由人来代替机器做；二是当计算机解决不了时，由人提供启发式知识，启发计算机继续做；三是计算机解决不了时，由人做出综合决策，但执行还是靠计算机。

（2）人机协同式自动综合

由于现阶段实现全自动化的地图综合是不可能的，而GIS技术的飞速发展对此要求又是那样的急迫，那么数字地图制图综合的人机协同系统将是当前惟一可选之路。所谓人机协同系统是指将与抽象思维有关的数值计算和逻辑推理问题由计算机来完成，将迄今为止一切成熟的综合处理技术计算机化，而对于综合过程中的形象思维如哪个物体需要综合、特殊参数的设置等问题，交由人来决策或完成，以人机交互的形式共同完成整个地图综合的

工作。在这样的系统中，计算机将能最大限度地完成所能完成的工作，而人则是在关键部分控制整个工作，最终能保证以较高的效率来完成这项工作。

因此自动综合的解决方案中要提供批处理综合和人机交互综合两种方式，这两种方式如何合理利用是现阶段自动综合成败的关键。

批处理综合：批处理综合是在最低层次上进行的，可以用各种独立的算法分别进行，或者将各个独立的批处理方法捆绑成一个“总体”的批处理算法集，用来对地图上各种制图对象及其组合进行综合。

交互式综合：用户的交互总是需要的。用户可以在不同的比例尺和不同的结果之间进行选择；交互综合可以在综合前或综合后使用。交互综合在综合前使用时，主要用来分析地图数据，确定综合算子的应用情况，建立或存贮批处理综合中的综合算子或参数，明确不需综合的要素或区域，在需综合的区域内使用综合算子。交互综合在综合后使用时，主要用来检验综合效果，解决综合效果较差的区域内的综合问题，建立附加的批处理综合过程。

地图自动综合的基本过程是：

(a)无缝地图数据库的建立。在GIS中，表现为无缝地理数据库的建立。有些时候，此步骤无须进行，因为地图综合所需的区域性地图数据库本身是一个整体，已建立。

(b)地图投影变换。

(c)地图更新。

(d)区域地理特征分析。

(e)依据地图综合目的建立地图要素分类码的转换表。

(f)根据(d)、(e)建立地图综合的要素顺序表和地图综合所需的不同要素的综合标准表。

(g)根据地图综合的要素顺序表对地理区域进行分区，分区是以重要的线状要素为边界，分区也有不同层次。大分区要依据区域的整体地理特征，如地貌分区、一个流域的构造。小的分区有街道所构成的区域、一个谷地、一个村落等。

(h)建立分区之间的空间关系、分区内要素间的关系、不同要素及其相互间的空间关系等地图要素的空间关联特征，并建立空间关联表，随之从空间关系中获取空间知识。

(i)依据(e)选取地图要素，并进行相应的地理信息或地图要素的分类概念抽象和空间目标的聚合操作，该过程通常称为“地理信息抽象”。

(j)在(i)所生成的新的地图数据库的基础上重新建立空间关系。

(k)在保证空间关系和特征一致的条件下根据综合标准建立新的原始的综合后的地图数据库，该过程，目前常称为“地图的模型综合”，涉及到很多地图综合算子。

(l)以地图符号配置表为标准建立数字制图模型（DCM模型），生成可视化地图产品。

在有些情况下，(b)地图投影变换和(c)地图更新可以跳过。其它步骤也是如此。但最基本的几个任务是：地理特征分析、空间关系建立、综合规范的系列表、地理区域分区、地理信息抽象和地图图形综合算法等。在地图自动综合中还有一个没有明显涉及到的问题是地图注记。注记是为了可视化的需要，实际上在地理信息抽象过程中，名称作为地理目标的一种属性也应当进行综合，但常规地图综合中有一项就是“注记的选取”。该项任务可在(i)和(l)两个步骤中完成。该过程如图5－2所示。

5.2.3 地图自动综合的概念框架

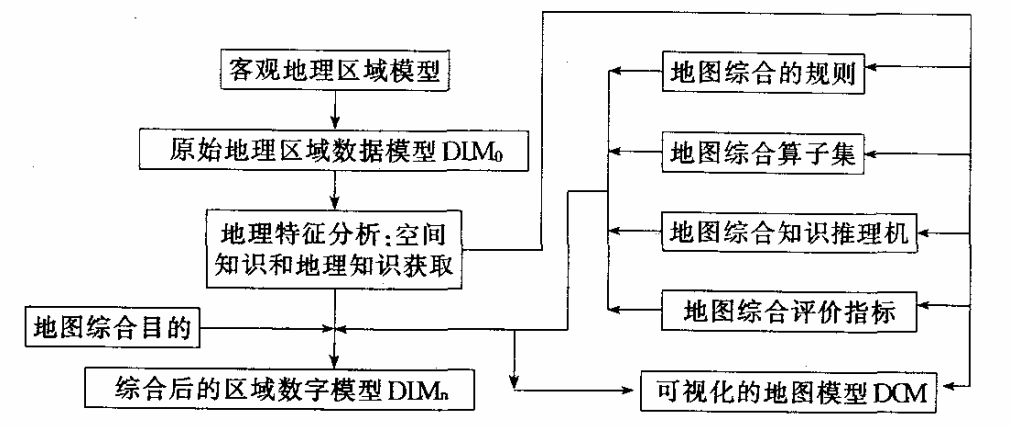


图 5－2 地图自动综合的途径（据郭庆胜，1998）

地图自动综合是一项工程性任务，必须从工程设计角度看待地图自动综合问题，也就是说，设计的地图自动综合系统应当能完成地图综合任务，生产出满足用户要求的产品。

在这个工程框架中，有三个基本问题必需回答：为什么要综合?什么时候、什么地方需要综合?如何进行综合?

“为什么要综合?”提出了地图自动综合的目的问题，也决定了地图综合成果的评价标准，其主要原因是：精度和空间冲突。

“什么地方需要综合?”主要考虑地图自动综合的限制条件、地理抽象时应保持什么样的地理特征，以及这些特征将如何控制地图的综合过程。

“如何综合?”表现为地图综合算子的选择及参数的选择。

McMaster和Shea(1992)扩展了Brassel与Weibel模型。该框架将综合过程分解为三个操作区：①为什么综合；②什么时候综合；⑧如何综合(见表5-1)。

表5—1给出了此概念模型的框架。McMaster和Shea首先给出了为什么综合的详细对策。第二个区即什么时候综合是结构认知和过程认知，通过获取物体的密度、分布以及物体的形状、长度、弯曲程度等来探知源数据的特征以便得到“空间与等级状况”，这些特征状况与“几何条件”的评估一起用来满足综合的需要。几何条件指的是地图物体的几何特征、物体的邻接状况、冲突情况、不可视的物体(尺寸太小)等等。过程认知被变换控制所代替，这样可以选择合适的操作、算法以及判断几何条件的参数。第三个区“空间与属性变换”(如何综合)中，共列出12种综合算子，有10种是空间变换算子——化简，光滑、聚合、混合、合并、图形等级变换、精炼、夸大、扩张和移位，剩余的2种是属性变换算子——分类分级和符号化。这个区的重点是综合概念模型中综合算子的定义。

协同式自动综合概念框架如图5－3。这个框架包含了自动综合的完整流程，说明了人在自动综合中所处的地位和所起的决策作用。该框架中既有人的参与，又最大限度地实现了综合的自动化。在此框架中，人与机器的协同是分工明确的，人只起决策指导作用，综合的具体实施则由机器来完成，这样充分发挥了人机各自的特点与优势，形成了优势互补。而子系统本身(如各综合算子)和子系统之间(如算子的应用顺序)的协同，也通过人机协同来实现，图5－3所示。

表5－1数字地图综合的McMaster和Shea模型

<table>
<tr><th>为什么综合</th><th>什么时候综合</th><th>如何综合</th></tr>
<tr><td>理论部分
◆降低复杂性
◆保持空间精度
◆保持属性精度
◆保证艺术质量
◆保持逻辑一致性
◆规则使用的连贯性</td><td>几何条件
◆密集程度
◆联合
◆冲突状况
◆复杂度
◆不连贯
◆不可视</td><td rowspan="2">空间变换
◆化简
◆光滑
◆聚合
◆混合
◆合并
◆等级变换
◆精炼
◆夸大
◆扩张
◆位移</td></tr>
<tr><td rowspan="2">计算因素
◆有效的算法
◆最大的数据压缩量
◆最小的存贮空间</td><td>空间与等级量测
◆密度量测
◆分布量测
◆长度与弯曲度量测
◆形状量测
◆距离量测
◆抽象量测</td></tr>
<tr><td>属性变换
◆分类分级
◆符号化</td></tr>
<tr><td></td><td>变换条件
◆综合算子选择
◆算法选择
◆参数选择</td><td></td></tr>
</table>

5.3 地图自动综合的基本方法

人类最早尝试用计算机来解决制图综合问题可追溯到20世纪60年代中期。最早的理论工作是由Tobler(1966)开始的，他提出了一些计算机制图综合处理的基本原则。在此之后，Douglas与Peucker(1973)、Lang(1969)等提出了一些卓有成效的算法，使计算机制图综合的问题得以正式展开。Douglas-Peucker算法已被公认为是线状要素化简的一种经典算法，至今仍被沿用。80年代中开始，一些学者，如McMaster(1987)、Meyer(1986)、Niekerson和Freeman(1986)等，都在制图综合领域提出了很多理论和方法，促进了制图综合研究的进一步开展。

地图自动综合在其几十年的发展历程中，主要的综合方法有：面向信息的综合方法、面向滤波的综合方法、启发式综合方法、专家系统综合方法、神经元网络综合方法、分形综合方法、数学形态学综合方法、小波分析综合方法等。

5.3.1 地图自动综合的基本算子集合

自动综合中需要将综合过程转化为一系列可执行的步骤，这些步骤叫做“综合算子”，用来定义综合的各种变换。对于每个这样的算子来说，可以有多种综合算法，这些算法就是进行综合变换的工具，因而必须是精确的、清晰的、可以被计算机执行的。算法的重点在于能够模仿制图员的工作，达到综合的目的。

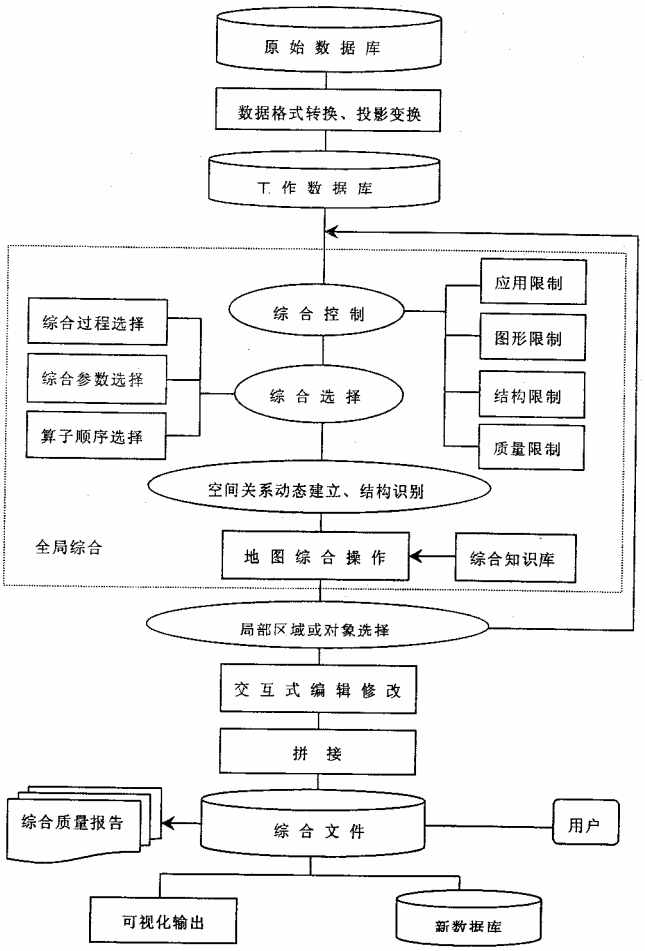


图 5－3 协同式自动综合概念框架（据武芳，2000）

地图综合算子有很多分类方法，Shea和McMaster（1983）提出12个地图综合算子：化简(simplification)、光滑(smoothing)、聚合(aggregation)、混合(amalgamation)、合并(merging)、降维(collapse，退化或收缩、图形等级变换)、精选(refinement)、典型化(typification)、夸大(exaggeration)、增强(enhancement)、移位(displacement)和分类(classification)。其中，光滑是指趋势线的建立，用曲线函数拟合；聚合就是将一组不同要素合并为一个更高阶的要素的操作，如指区域性分布的点状要素群用单个符号来表达；混合强调面状要素的合并，而合并就是将同一类别的要素合并成该类要素更大的成分，但类层次不变的操作；退化(降维)就是将一个要素降维表示的操作，如表现一个区域为一个点或一条线；精选和典型化都是为了表达图形群落的图案特征，但是精选强调目标位置不变，特征表达只强调特征，不考虑准确定位。化简和光滑可能会改变一条线的总体形状，从而可能会引起这条线与地图其他内容关系上的改变。

OEEPE的制图综合工作组对国际上的研究结果进行调整后形成了目前普遍公认的综合算子(表5－2)。表5－2中将综合划分为矢量模式的综合和栅格模式的综合，它们的综合有着根本的区别。对空间数据而言，矢量模式的综合可根据不同的数据类型进行划分，Unwin(1981)描述了四种矢量形式的地理要素类型：点、线、面、体。对这四种类型，Joao(1990)

等作了更细致的描述，增加了流数据，以描述两地间的运动。这五种地理数据类型需要不同的综合算子，但其划分却不必太严格，因为面本身可以综合成为一个点或一条线，而一组的点也可以概括成一个面。除了考虑矢量模式的综合外，还应考虑属性数据(专题数据或实时数据)的综合。属性数据的综合，例如要素的分类分级，可用直接的方式自动进行。

表 5－2 矢量于栅格模式综合算子的划分

栅格模式的综合	矢量模式的综合	
	属性数据	空间数据
*结构化综合	●专题数据	●点状数据
简单的结构化选取	分类分级	选取／删除
重复抽样	符号化	合并
矢—栅变换	●实时数据	位移
*数字综合		●线状数据
低通滤波		夸大、化简
高通滤波		光滑、位移
限差带		选取、合并
索引		●面状数据
*数字分类		光滑、位移
分类分级最小间距		夸大、合并
平行分级		●表面数据
最大的分类分级		光滑
*分类分组综合		夸大
合并(类别)		化简
合并(栅格)		●流数据
属性变换		选取、合并

按地图自动综合中应执行的任务划分（据郭庆胜，1998；表5－3）：

表 5－3 地图综合算子的主要分类

地图综合中的任务	地图综合的主要算子
地理空间的准备	无缝地图数据库的建立、目标更新、投影变换
地理空间数据的综合	目标选取、目标简化、多目标的合并、移位、夸大、典型化
地理属性数据的综合	数据分类、分类抽象
地理时间属性综合	时序特征的保持
地图符号化和美学塑型	符号化、移位、夸大、注记选取与配置、典型化

(1)无缝地图数据库的建立：如图幅接边、合幅、完整性的地理目标建立，此方面有成熟的研究成果。

(2)目标更新：该模块是为了保证地图内容的现势性。

(3)投影变换：满足新条件下的地图投影要求，在理论、方法上，地图投影及其变换是比较完善的。

(4)目标选取：此算子强调目标整体性的删除与选择，但对于不同要素类别和不同的空间数据维数在选取规则和方法上是不同的。选取的定量化已有大量研究成果，且用于指导常规地图综合，选取的“定位化”同要素的类别有紧密关系，在地图自动综合过程中，此

问题一直都在探讨之中，它涉及到空间目标的分布特征和地理意义的重要性，而“重要性”是一个主观因素。计算机在进行“自动选取”时，具体选择哪一个目标有时是结合在其它算子中。因此选取算子有如下几种情况：

a．按要素分类标志选取。

b．按目标的某些显示属性(如长度)选取。

c．为了保证空间结构特征进行选取。

(5)目标简化：通常指目标细节的逐渐删除，它通常有两种情况：

a．目标细部的删除；

b．目标图形的趋势线的建立(如滤波方法)。

(6)多目标的合并：常表现为地理实体描述方式的维数变化和格式塔原则的应用。它主要表现为：

a．因分类的抽象，相同类别图斑的合并，如土壤图图斑综合，街区的形成等。

b．因空间范围有限和精度限制，同类目标群合并成另一类目标，如双线河变成单线河、点状要素群用其“凸壳”表示等。

(7)移位：该算子在地理信息综合和地理信息可视化过程中都存在，有的学者主张移位同其它算子同时考虑，另一种观点是移位在其它算子运行后再进行，不管怎样，移位是因为空间冲突的需要，应当根据冲突的类型和发生原因来决定移位算子同其它算子的关系。

(8)夸大：同移位一样，在地图综合的两个阶段都存在，它主要针对小而重要的细小部分。

(9)典型化：不强调定位精度，在许可的精度范围内，强调地理特征空间分布特征的表示。

(10)数据分类：主要表现在社会经济型统计数据的分类，如社会经济地图的编制。在自然地图编制中表现为分类图的编制和综合制图。

(11)分类抽象：表现为对原有分类层次的更高程度的抽象，如第n级分类转换为第n-i级分类。分类抽象在GIS的地图综合中还表现为要素分类代码的转换和地理含义的变化(或地理含义的抽象化、一般化)。

(12)时序特征的保持：在具有时间特征的GIS中，地理信息有时序特征，地理信息综合时必须仍然保持这种特征。

(13)符号化：强调地图符号的合理配置，以便抽象后的地理信息的有效传输。它不只是简单的符号配置，更应强调符号关系同地理信息的空间关系、空间分布特征一致。

(14)注记选取与配置：注记在地图中的作用是显而易见的，但是随着比例尺的缩小，地图注记必须进行有效选取，同时抽象后的地理信息，其含义发生改变，注记内容也因此发生变化，这些注记在自动制图过程中必须自动配置。

因此，完备的自动综合算子集合如图5－4所示。

由于制图员是在交互环境下使用各种综合算子、算法和参数进行综合的，因此重要的是要确定不同情况下如何进行综合。比例尺的变化、地图产品的类型、数据的特征等都会影响综合算子、算法及参数的应用，所以要建立综合的算子库，以适应不同的综合限制。

5.3.2 地图自动综合的基本算法

5.3.2.1 点集的化简

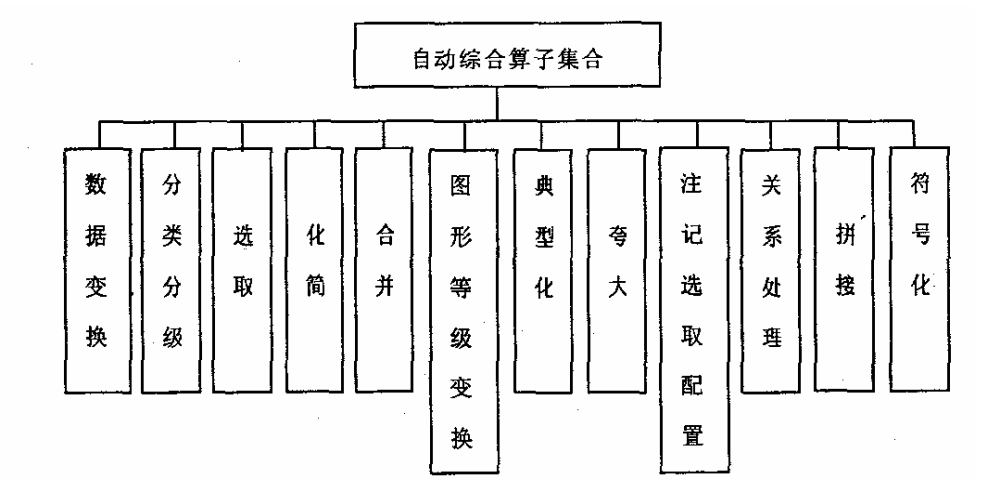


图 5－4 自动综合算子集合

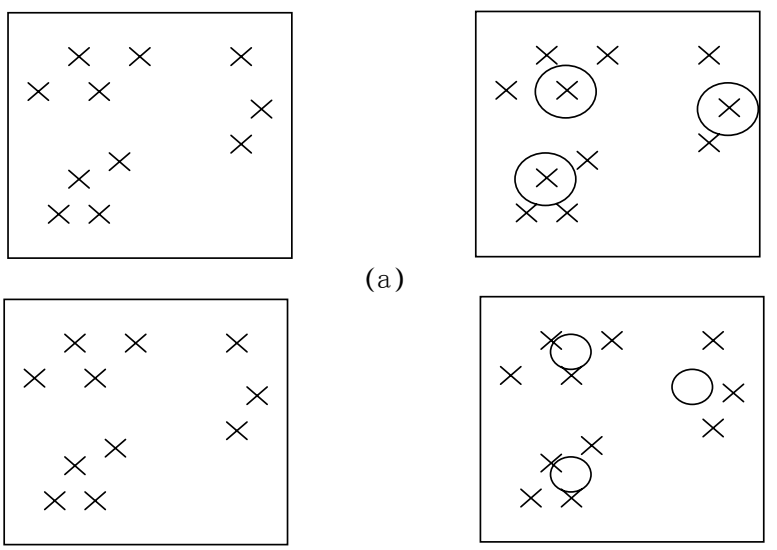


图 5－5 对一个点分布的综合



图 5－6 点集的化简

化简的目的在于对非重要细节的剔除，使要显示的信息量和地图容量（或显示设备的

分辨率）相匹配。因此某一尺度下的点集在以另一个尺度显示之前，必须减少点对象的数目,如在图5－5a中，化简了原始的三簇点集，每簇点集仅仅保留了中间点。而在图5－5b中，同样的点集分布首先被划分为三个点集簇，由定位于每个点簇标准位置的新点来表示。

点集簇的划分可以利用聚类的方法。这个处理需要集合原始点集到Nc个组里，每个组都有大致相同数目的点，并选择一个近似中心点在新的尺度下再现每个组（见图5－6）。

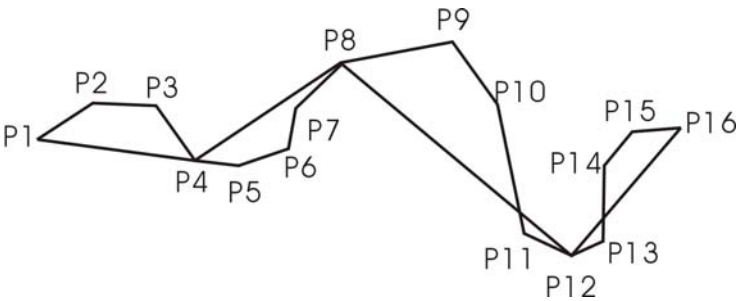
启发式优化分类能够通过一些修改来解决这个问题。首先，根据每个对象的(x,y)坐标来决定分组而不是按其专题属性值。其次，每个分组的模型中心应该用作综合后的点位置。这个中心点定位在每个分组的高密度点区域里，并不特别受原点位的影响。

5.3.2.2 线化简

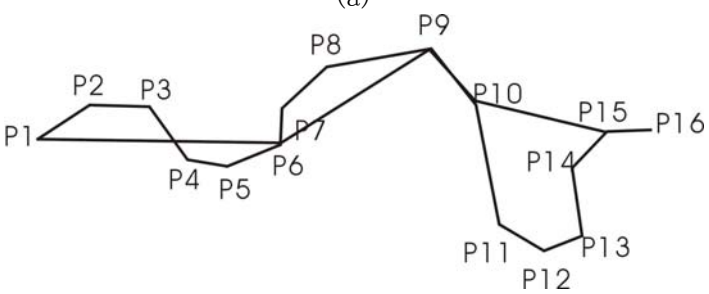
1．线化简的基础算法

地图中线状要素所占比重往往最高，因此地图综合通常与线化简有关。线化简指的是压缩一条线上的原始点数，以在较小比例尺上化简数据。缩减点的基本标准是：最少的移位和失真(变形)、最少的新顶点以及最小的计算开销。线化简算法可分为五类：

(一)无约束点算法（独立点算法），它不考虑相邻点对之间的精确关系。每隔n个点保留一个点（图5－7a，间隔取点法）或随机的从原始点集中选取1/n个点就是这类方法的例子（图5－7b，随机取点法）。虽然这是一个权宜之计，但是线化简的结果常常会歪曲原始线。



(a)



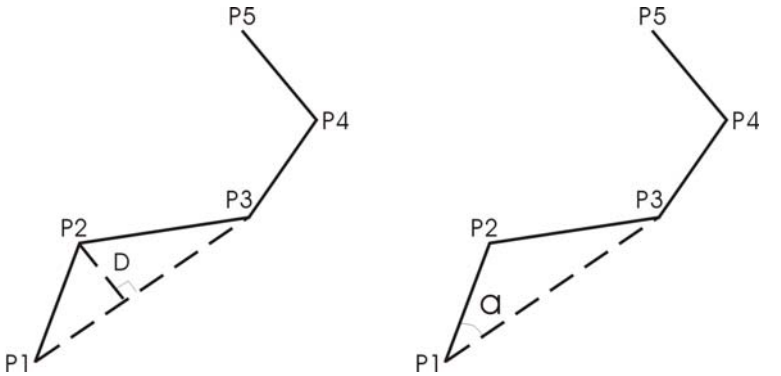
(b)

图 5－7 独立点算法

无约束点算法显然不能满足地图学要求。在化简过程中，保留点的标准应该与在原始数据编码中那样。一条线的特征点应包括它的端点，拐点和极值点。一般所保留的点应该保持线的尺度依赖的结构特征。

(二)局部处理算法，它利用直接相邻点的特征来确定取舍。局部处理算法的主要思想是利用相邻点的特征来判断任一点的重要程度，它使用三个临近点去决定是否保留中间点。

其中一种算法就是垂直三元组法（*垂距法*），即计算第二个点到连接三元组中第一和第三点的直线段的垂直距离。如果这个距离超过了预定的宽度，那么就保留中间点（图5－8a）。另一种算法就是对每个三元点组做角度限差测试（偏角法），即计算连接第一点和第二点，与连接第一点和第三点的矢量间的夹角。如果这个角度超过了预定的角度限差，就保留中间点（图5－8b）。



(a)垂距限差　　(b)角度限差

图 5－8 局部处理算法

(三)约束的扩展局部处理算法，它在线的某段周围定义一个搜索域，并利用距离、角度或点数来搜寻更多的相邻点。

(1)Lang算法（1969）：Lang提出一种利用平行区域（条带）对点进行回朔搜索的方法。Lang算法是首先确定点压缩的偏差和回朔点的数目N，并将第一点初始化为“锚”，而将N个远离锚点的其中一点为“浮标”，并检测介于锚和浮标之间的点，确定是不是所有这些点都在条带范围内；如果它们不全在，那么这点将优先于当前的“浮标”而成为新的“浮标”，这个处理过程被重复直到所有的点都在以连接“锚”和“浮标”的线段为中心线的条带内。这时锚就更新为当前的浮标，而浮标被重置为N个远离当前锚的点。如图5－9，回朔的点数为5个，连接点1和点6，构造搜索区域（图5－9A），判断中间点2、3、4、5是否在搜索区域内，若有点不在搜索区域内，将末点前移，连接点1和点5，再进行判断（图5－9B、C），

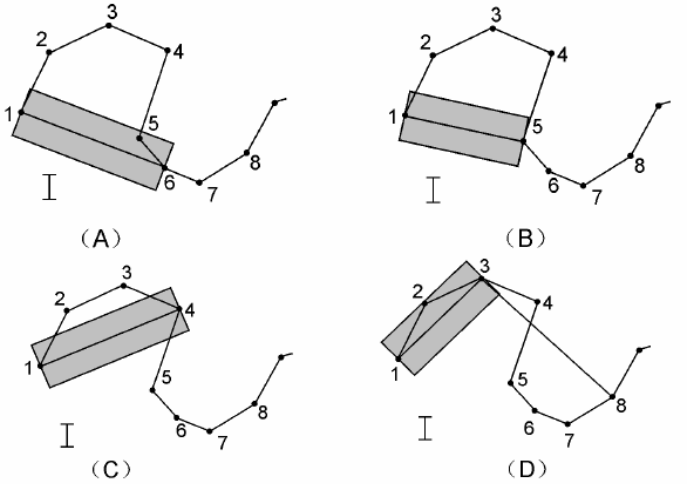


图 5－9 Lang 算法

若发现中间点都在搜索区域内，则可舍去中间点。如图5－9D，舍去点2，连接点1和点3，然后从点3开始，连接点3和点8，依次类推。Lang算法的复杂度为O(n2)。

(2)Opheim（1982）算法：Opheim基于Lang算法提出了一种算法，这种算法引入一个最小和最大距离作为检测区域（图5－10）。所有在最小距离内的点都将被去除，而一旦超出最大距离，不管线是否和条带边界相交，条带都将自动重新定位（图5－11）。

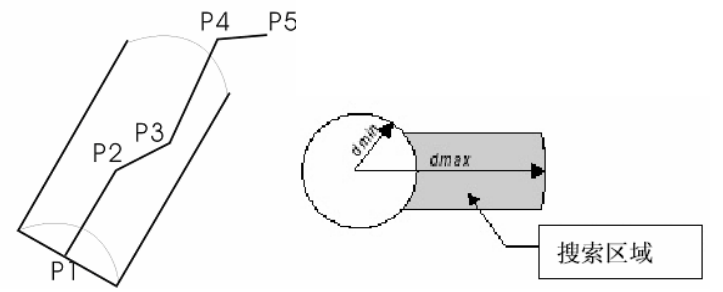


图 5－10 Opheim 算法

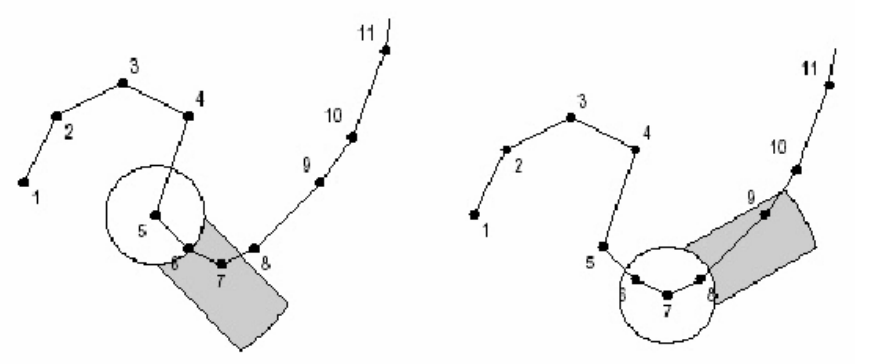


图 5－11 Opheim 算法应用

(3)光栏法（圆盘法）：该方法首先由点和限差圆盘来定义一个扇形，根据曲线上点是否在扇形区域内来确定点的取舍。如图5－12：①将圆盘置于点P2上，由P1向圆盘引切线，得到一扇形区域，判断P2后点位于扇形区域的情况；②若P3不在扇形内，保留P_2，从P_2开始；若P_3在扇形内，舍去点P_2，连接P_1和P_3；③将圆盘置于P_3上，由P_1向圆盘引切线，得到一扇形区域，同时取两扇形区域的交为新的判断区域；④判断下一个点，重复②、③，直到发现

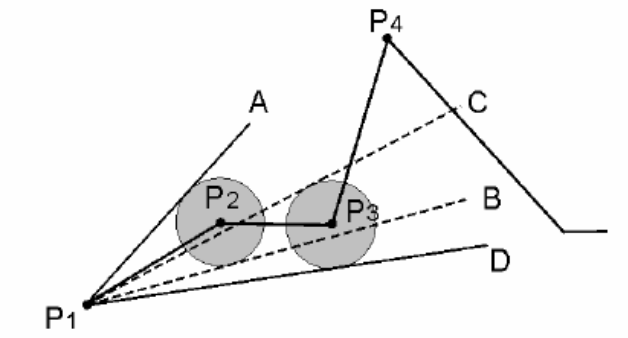
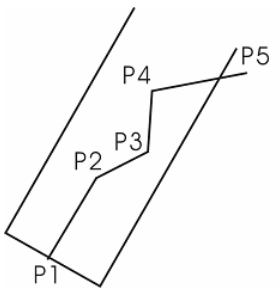


图 5－12 光栏算法

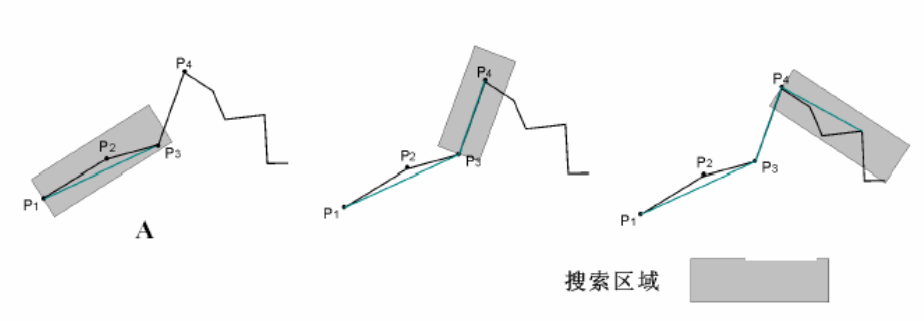
有点不位于最新定义的扇形区域为止；⑤当发现在扇形区域外的点时，如图5－12点P_4，保留点P_3，从点P_3开始重复①到④。该算法的复杂度最坏为$O(n^2)$。

(四)无约束的扩展局部处理算法，利用线的复杂度、坐标点的密度、开始点的定位等来搜索相邻的点。一种算法是Reumann-Witkam法（1974），它以线的第一段为中心线放置一定宽度的长方形条带作为搜索区域，在搜索区域内的所有点都将被舍弃，直到线的某段和长方形条带的外边界相交，相交前的最后一点将被保留。即保留第一个点和最后一个点，删除中间点（图5－13a）。这个条带继续以和它外边界相交的那条线段为中心线放置，重复进行前面的处理过程。如图5－13b，条带区域平行于线段P_1P_2，相交于线段P_3P_4，点P_2和P_3都落在区域内，我们可以连接区域内的开始点P_1和结束点P_3，从而舍去点P_2。

该算法类似Lang法，不同的是它的搜索区域是按顺序对点依次搜索的，且搜索区域总是平行开始的第一个线段，结束于第一个相交的线段。



(a) 算法原理



(b)算法应用

图 5－13 Reumann-Witkam 算法

(五)全局处理算法，它考虑整条线或特定线段的特征。著名的Douglas-Peucker算法就是该类算法的代表。Dauglas-Peucker(1973)算法是从曲线整体出发的一种全局的处理方法，它通过递归的方法来选择曲线上点。该算法具有平移、旋转的不变性，给定曲线和限差后，化简结果一定（郭仁忠，2001）。

Dauglas-Peucker算法理论基础是认为曲线图形的信息主要集中在曲线的特征点上，而特征点多发生在弯曲强(转角大)的地方，也就是极值点。它也用到了从Lang算法中扩展而来的条带。该算法的基本思想是：连接首末端点，计算其余各点到该连线的距离，比较最大距离与限差的大小。若最大距离小于限差，用该连线代替曲线，否则保留最大距离的点，重复上述步骤。如图5－14a，除A、B两点外，依次取点C、D，而点E、F、G 到AD的距离小于限差而被舍弃。

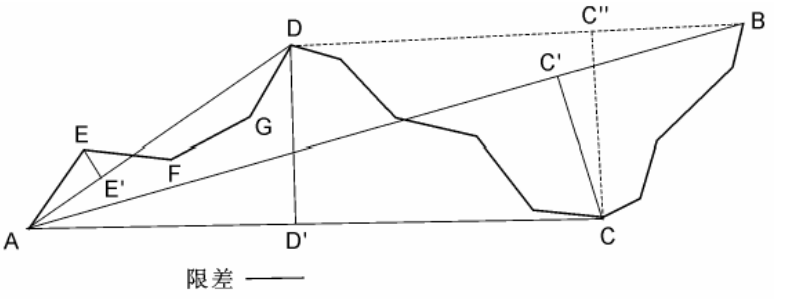


图 5－14a Dauglas-Peucker 算法



图 5－14b Dauglas-Peucker 算法的应用

该方法已被广泛的应用，如图5－14b。它有五个优点：①选择的点是原始-曲线上的点，从而保证了精度；②综合后的曲线与原曲线相比，整体位移最小；③选择的点与手工综合中选择的关键点基本一致；④保持分维值；⑤继承性，就是某一化简层次下选取的点在更

低的层次下仍被选取，这在BLG树中有重要应用。总的说来，Dauglas-Peucker算法是按照由整体到局部的思维方式，是最具代表性的空间图形的综合方法，它不仅可实现图形特征的分解与组合，同时又可给出图形的方向、尺度、形状等形态和拓扑特征。实验表明Dauglas-Peucker算法是从全局角度选择了曲线上的关键点，它能有效地保持图形的分维数，综合后的总体位移矢量最小（Muller，1987）。

2．线化简算法分析

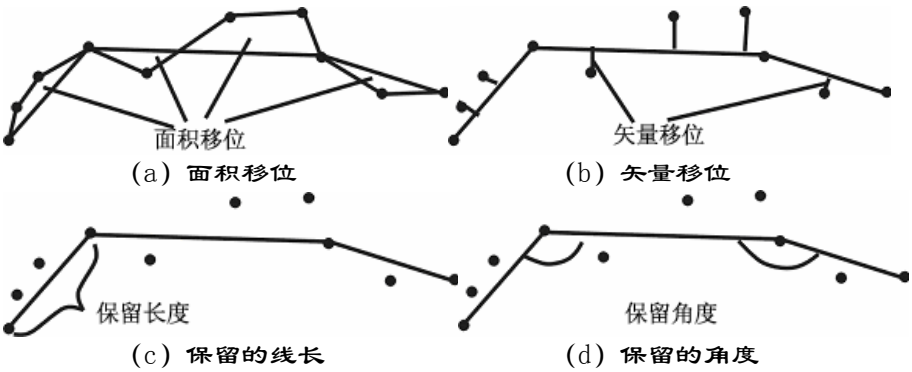
严格的曲线综合应包括化简、光滑、位移、增强以及综合后的评估等，其中化简是线性综合最主要的方面，狭义上的线性综合就是指曲线的化简。线化简有多种类型不同的化简算法，这些算法的一个共同点就是保留几何特征点或删除不合条件的点，判断特征点常常是这些算法的核心，特征点包括曲线的端点、极值点、拐点等。这些算法都是从曲线的几何特征出发，进行曲线的综合，基本上只适用于单条线而没有考虑地图表示中线的上下文关系，因而不能避免线的自交。基于图形的弯曲分析进行曲线的化简的方法能较好保持曲线的图形特征，从而照顾曲线的空间分布特征。ESRI就基于弯曲分析开发了一个叫BENDSIMPLIFY的程序，试图解决这个问题，它通过特征化每一个弯曲来进行线化简，图5－15。



(a) Dauglas-Peucker算法　　(b) BENDSIMPLIFY算法

图 5－15 ESRI 的 BENDSIMPLIFY 算法

这些化简算法大多可以利用多种误差测量方法对实验派生的特征点进行比较评估，图5－16。作为全局处理的Dauglas-Peucker算法在这些评估测试中都有出色的表现。通常程序的搜索域越大，模拟就越精确。



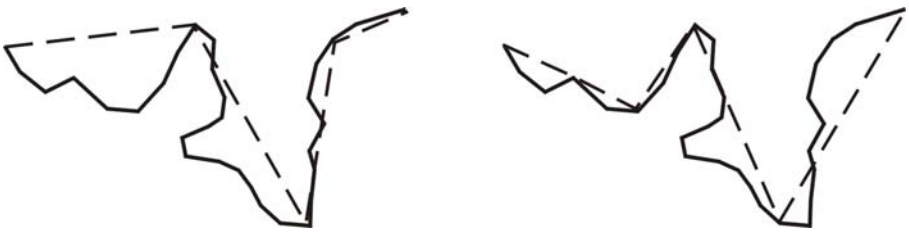
(a) 面积移位　(b) 矢量移位

(c) 保留的线长　(d) 保留的角度

图 5－16 线化简误差的测量方法

开发全局算法的一个方向就是研究算子。DeVeau(1985)曾列举了一个好的化简算法所应该达到的目标，包括最小的保留点数并尽可能地保证原线上所有的点都在化简线的一定限差之内。这样一个算法的结构和点集的覆盖问题相似。对一个给定的N个点的分布来说，点集的覆盖问题就是选取所必需的最少的点，以保证该分布中所有的点都在至少一个所选取点的某个预定范围之内。线的化简可以模拟为一个线性集合的覆盖问题：保留的线段数最少，以保证原始线的所有线段与保留线段的垂直距离都在指定的范围之内。但它不像普通的点集覆盖问题，线的每段都是有顺序的，而且每个原始线段只能被化简线中的一段所覆盖。

一个启发式顶点替换方法常用来解决相关问题：当从原始的N个点中保留n个时，误差测量值最小或最大(Cromley，1988)。给定在化简线中要保留的点数（这可以通过方根规律或应用其他化简算法来确定），那么顶点替换方法可用来改进保留线的综合以达到某些目的。例如，图5－17中的Douglas-Peucker算法就在原始的23个点中保留了5个，顶点替换算法保留了稍微不同的10个点来使总的矢量位移最小。



(a) Douglas-Peucker算法　　(b) 顶点替换算法

图 5－17 两种线化简方法的比较

虽然Dauglas-Peucker算法可产生一些好的结果,但由于缺乏拓扑控制，它可能会因删除了一些原始点而产生自相交线。另外，该方法对初始条件（开始点）较为敏感，限差的选择要进行适当的实验，并且选取的点并不完全都是关键点。一些新的方法试图通过改进Dauglas-Peucker算法以避免自交并保持其总体的数据结构(Muller，1990；Li and Openshaw，1992；de Berg et al，1995；Saalfeld，1999)，但关注其限差值的确定问题则不多，尤其是限差与尺度的相关关系方面。Ruas(1995)提出应用多种方法的集成如拓扑、几何、层次分解以及局部三角剖分,来检测并解决自动综合的冲突。Harrie(1999)将因空间冲突而需要移位的所有地图目标划分为五类，研究了每一类的移位行为并提出了基于约束的处理方法。Peter Højholt(2000)则基于有限元分析提出了一种解决地图综合空间冲突的新方法。

大部分线化简算法仅分析了作为线特征的点而没有考虑线可能是多边形（如建筑物的轮廓）的一部分，也没有考虑线特征是道路还是河流或是海岸线等语义关系。这是目前商业GIS一般方法。为了保持数据的总体结构，Weibel(1996)认为扩展线综合的算法要满足地图学原理的约束。他针对单条线、同一类要素以及不同的要素类，总结出了包括几何、拓扑、语义以及格式塔规则等四种不同类型的约束。另一种线化简观点则认为不必拘泥于简单的、除杂草式的去除点串的化简方法，应允许目标几何的整体改变，只要能够丰富地表达原目标就行。Li和Openshaw(1992)就描述了这样一种称为自然原理的综合算法，其原理类似于从越来越远处察看的效果。

5.3.2.3 面状要素的综合算法

面状要素通常应用线要素综合算法，但并未考虑线要素是否是该面状要素的组成部分。为满足不同比例尺显示数据的目的，Müller(1992)等提出了一种面状要素的自动综合方法。这种方法定义了面状要素综合的基本规则和综合方法如面积膨胀和收缩、删除、重选、聚合、移位、光滑、压缩以及拓扑完备性检查等。Bundy(1994)也提出并实现了一种约束多边形化简模型，它是多边形化简的一种扩展，已用于面状要素的化简。Peng等人(1996)为实施城市街区的自动综合，基于约束Delaunay三角剖分网建立了GIS环境下城市地图数据的综合模型。

5.3.2.4 自动综合的分形方法

1．概述

分形理论是现代数学的一个新的分支。自从分形几何的概念由美籍法国数学家MandelBrot于1975年首次提出以来，分形几何就不断的演化，发展至今已成为科学的方法论——分形理论。分形理论的基础是它认为事物的局部在某些方面具有与整体的伸缩对称性(自相似性)，并且，空间维数的变化既可是离散的，也可是连续的。

数字环境下地理对象的处理，不可避免要碰到许多非线性的图形目标如水系、等高线、海岸线等，对这些非线性目标的综合往往是不能单纯地靠数学方法来解决的。而分形理论的提出，为自动综合展示了广阔的发展前景。需要说明的是，分形理论所指的“自相似性”并不是十分严格的，它必须是存在于“无标度区”内的。在无标度区内，分形理论是成立的，一旦逾越这个区间，分形特征就消失了。自相似性给出了制图对象的局部和整体间在结构特征和形态规律方面的规律性，而分维值则量化出了制图对象的复杂程度。

2．线状要素的分维估值方法

无论以怎样形式定义的分维都存在着如何计算的问题，而分维的计算又是非常困难的，在应用研究中普遍的做法是对分维作近似的估值。

式（4－1）为我们估计曲线的分维D提供了一个基本模型。但目前对L、L0与r的理解不尽相同，这里将式（4－1）中的L视为分形曲线欧氏长度，L0E为分形曲线的初始操作欧氏长度，r为分形曲线的标度，从而式（4－1）可写为：

$$L_E = L_{0E} r^{1-D} \tag{5－1}$$

由量纲分析可知，r是无量纲量，即是标度，不是码尺，这给具体操作带来不便。码尺S和标度r的关系如下：

$$S = rL_{OE}$$

利用上式可将(5－1)式改写成：

$$L = L_{0E}\left(\frac{S}{L_{0E}}\right)^{1-D} = L_{0E}^{D} S^{1-D}$$

而 L_{0E}^{D} 可视为常数，记为K，则上式最后可写成：

$$L = KS^{1-D} \tag{5－2}$$

两边取对数得：

$$\log L = (1-D)\log S + \log K \tag{5－3}$$

为实验性地由上式求出分维D的估计值，可视该式是以logS，logL(S)为变量，以1－D为斜率的直线方程。因此，只要对码尺的一个单调增加序列 $\{S_i\}_{i=1}^{M}$，求出相应的曲线长度

$\{L(S_i)\}_{i=1}^{M}$，再用线性回归模型拟合点对(logSᵢ, logL(Sᵢ))(i=1, 2, …, M)，则根据(5-3)式即可求出D值，此时：

$$D=1-\frac{\sum_{i=1}^{M}(\log S_i \log L(S_i))-\frac{1}{M}\left(\sum_{i=1}^{M}\log S_i\right)\left(\sum_{i=1}^{M}\log L(S_i)\right)}{\sum_{i=1}^{M}(\log S_i)^2-\frac{1}{M}\left(\sum_{i=1}^{M}\log S_i\right)^2} \tag{5—4}$$

应用上式需要对$\{S_i\}_{i=1}^{M}$，求出相应的$\{L(S_i)\}_{i=1}^{M}$。方法一般有步行构造法、间隔取点法、步行取点法、网格记数法等。从本质上看，这四种方法都是粗视化方法，它们的区别在于使用了不同的粗视化手段。这里采用步行构造法(图5-18)，此种方法的思想源于用圆规所画的圆弧半径一步一步地测量曲线的人工方法：

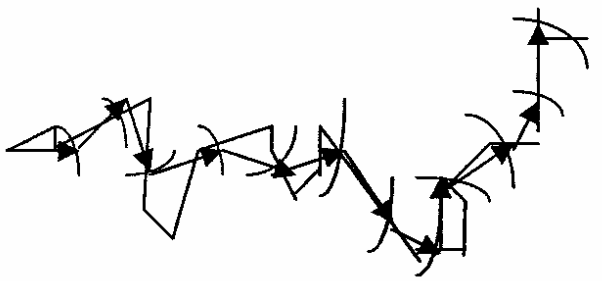


图 5－18 步行构造法

(1)对线目标$L(P_i)$，计算出初始步长

$$S_1=\min(P_iP_{i+1}) \tag{5-5}$$

或者取

$$S_1=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m-1}P_iP_{i+1} \tag{5-6}$$

(2)考虑P_1点到P_2点之间的距离$\overline{P_1P_2}$，如果$\overline{P_1P_2}$ >S_1，则在P_1点与P_2点之间插入一点P，使得直线段$\overline{P_1P}$=S_1；否则考虑$\overline{P_1P_3}$，如果$\overline{P_1P_3}$ >S_1，则在P_1点和P_3点之间插入点P，使得$\overline{P_1P}$=S_1；否则，考虑$\overline{P_1P_4}$ ……，直到进行到最后一点P_m。然后把P作为新的出发点，重复步骤(2)，则可得出用S_1测量$L(P_i)$所用的步数n_1。从而可得出$L(S_1)=\overline{n_1S_1}$（曲线保留点的连线长度）。

(3)S_i按几何级数增长(i=1，2，3，…，M)，重复步骤(2)，可得出S_i所对应的$L(S_2)$、$L(S_3)$、…、$L(S_i)$。(M的取值大于5即可)。

依据上面算出的S_i和$L(S_i)$，我们就可以推算出线状要素的分维数D。

需要说明的是：对最后一个插值点与曲线终点P_{end}间的剩余距离m_Long，如果m_Long>S_i/2，则记为一步；否则不记。

3．无标度区的确定

无标度区反映了自然分形满足自相似性的范围，并且反映了我们能够进行分形分析的研究范围。分维估值的结果在很多情况下都依赖于无标度区进行的。如何客观、准确地确定无标度区是采用分形方法进行综合中至关重要的问题。然而，至今仍然没有一种公认的

较为客观的标定方法。

从对数(logSi,logL(Si))图上看，在无标度区内拟合的直线是良好的，当超出无标度区后，线性关系不再成立。(图5－19)。无标度区域的确定，可以在对数(log－log)图上通过线性关系最好的一段来计算。人们通常用到的方法有：

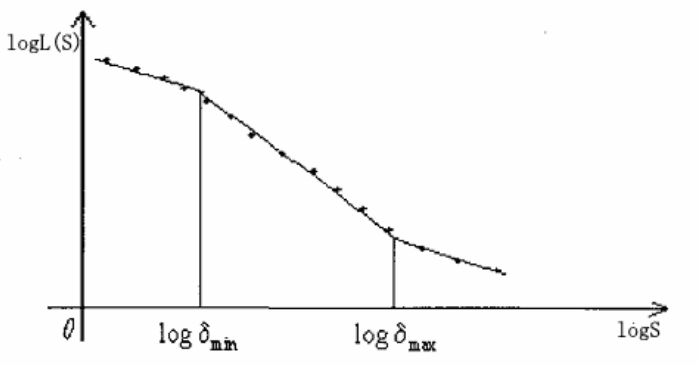


图 5－19 无标度区

(1)人工交互判定法

在(log－log)图中用肉眼确定一段线性关系最好的区间。

(2)相关系数检验法

在(log－log)图中，对所有可能的点的组合都进行相关系数检验，取置信度最高或在一定置信度下线性关系范围较宽的一段为无标度区。

(3)拟合误差法

设回归拟合后的剩余标准差为s，对(log－log)图上所有可能点的组合都计算出s，取既能通过相关系数检验而s又最小的一段为无标度区。

(4)总体拟合法

对(log－log)图上所有点作m段直线的拟合，找出总逼近误差最小的方案。一般在处理地理问题时，m常取为3，即对(10g-log)图上所有点作3段直线的拟合，中间一段对应无标度区。

(5)自然裂点法

该方法的思想来源于数据分级的自然裂点法，是适用于地图数据处理的简便方法。设图(log－log)上有n个点P_i，i=1,2，…，n，计算线段$\overline{P_iP_{i+1}}$的斜率，记为k_i(i=1，2，…，n-1)。对这n一1个数，计算相邻两数之差，找出最小的为$k_{j+1}-k_j$，在数据点序列P_1，P_2,…，Pn中去掉P_j，并取$P_{j-1}P_{j+1}$，的斜率为P_{j-1}，P_j，P_j三点拟合直线的斜率。对P_1，P_2,…，P_{j-1}，P_{j+1}，…，Pn这n-1个点重复上述作法，直到剩下四个点为止。四个点把曲线分成三段，中间一段即对应无标度区(图5－20)。

经过大量实验比较表明，自然裂点法算法简便，容易操作，比较适合用于制图数据的处理。它的不足之处在于剔除“瑕点”的能力较差，当个别数据点误差较大时，使用该方法求得的无标度区域范围较小。另外，实验还表明三段总体拟合法虽然计算量较大，但效果较好，方法稳定。

包括自然裂点法在内的诸多算法都是在(log,log)图上找线性关系最“好”的一段为无标度区，这类算法的共同缺陷是都无法避免系统误差。事实上，无标度区的确定最好能和

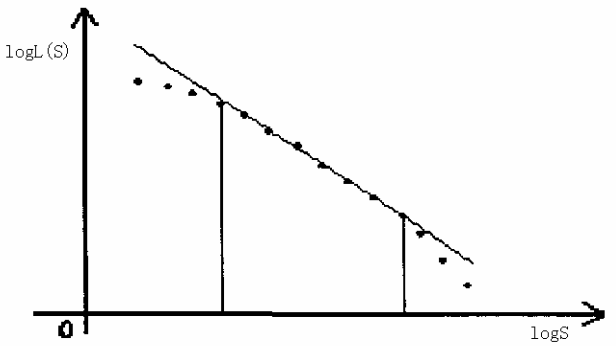


图 5－20 自然裂点法求无标度区示例

实际问题的背景联系起来，目前这方面的研究还很薄弱，这也是分形研究的难题之一。

4．线状要素的分形化简

分形分析方法能够有效地描述图形形状及其复杂程度的变化，并建立图形形状变化与尺度变化之间的数量关系。借此可以实现保持图形形状结构特征的自适应自动综合，为有效地控制自动综合过程提供实用模型。

设所考虑地自动综合对象为数字化曲线L={Pi},i=1,2,…,n。综合前、后图形比例尺分母分别为M1、M2，曲线长度分别为LM1、LM2，其一般形式的logS-logL(S)对数图中di=logSi(i=0,1,2,3)为无标度区的端点。

因为分形的典型区域在[d1-d2]，因此，可有LM1=L(S1)。当比例尺分母从M1变化至M2，由LM1可求出综合后的曲线长度LM2，它实际上对应了综合后曲线形状变化的一种确定的状态（或复杂程度），对此，可唯一地确定一尺度S2。S2就是描述比例尺分母为M2，且与比例尺分母为M1的图形的形状结构特征保持一致的图形所需要的尺度。最后，以S2为阈值，采用适当的自动综合算法，即可得出一种基于分形分析的新型的自动综合结果。这种结果（或简化、概括的程度）完全是由比例尺的变化及图形自身的形状结构特征自适应地决定，且可从数学上满足综合前与综合后图形形状结构特征的一致性。

基于上述原理，下面介绍用步行构造法进行线状要素自动综合的算法。其步骤为：

(1)读入综合前线要素的点列坐标 $L=\{P_i\}$，(i=1，2，3，…，n)，和综合前、后的比例尺分母M_1，M_2；

(2)按步行构造法，确定点对序列($\log S_i$,$\log L(S_i)$)，i=1-M；

(3)求出无标度区[d_1，d_2]和分维值D，其中$d_1=\log S_1$，$d_2=\log S_2$；

(4)令 $L_{M_1}=L(S_1)$；利用$L_{M1}/L_{M2}=(M_2/M_1)^{D-1}$求出$L_{M2}$；

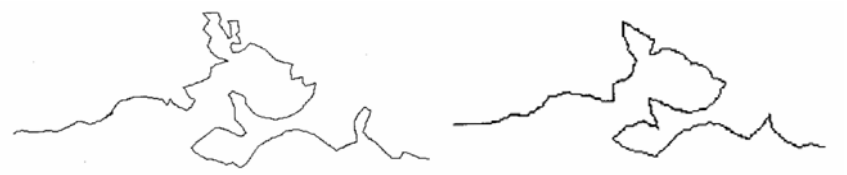
(5)把L_{M2}代入式 $\log L=(1-D)\log S+\log K$ 中，得 $S_2^{'}=\exp\left(\dfrac{\log L_{M2}-\log K}{1-D}\right)$。

(6)以 $S_2^{'}$ 为步长，用步行构造法，略去小于尺度 $S_2^{'}$ 的细节，并输出保留点构成综合后的图形。如图5－21。等高线综合应用见图5－22

基于步行构造法的自动综合几何意义明确，直观地体现了基于分形分析的自动综合的原理，且处理过程比较简捷，综合效果比较客观。但由于沿用步行算法进行综合时，所得到的保留点一般并非曲线的特征点，因此在精度要求较高（如需强调地貌特征点等）的情况下，此方法尚不够理想。因此Douslas算法进行分形分析的自动综合将提供更为合理的综

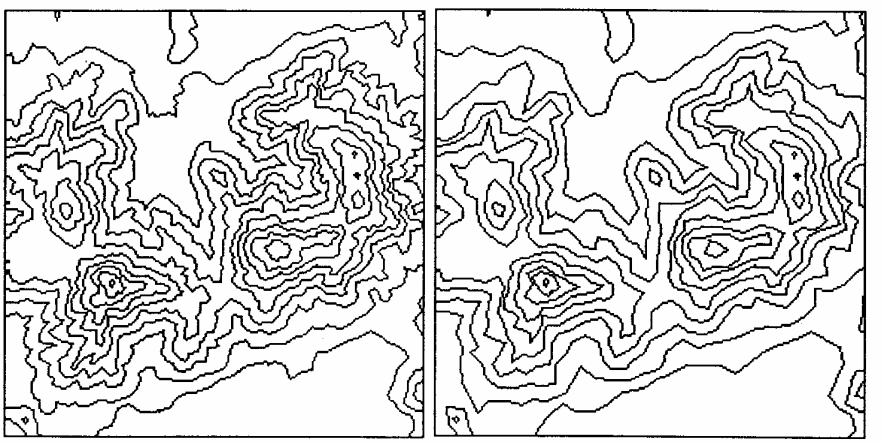
合结果。在上面基于步行构造法的自动综合算法中，将$S_2^{'}$作为阈值，沿用Douglas算法，即可进行分形Douglas化简。

需要说明的是，线状要素的分形化简，也同样适合于面状要素轮廓的化简。



(a)综合前（1:M）　　(b)综合后(1:2M)

图 5－21 基于步行构造法的自动综合



(a) 原图　　(b) 步行构造法综合图

图 5－22 等高线图综合示例

5.3.2.5 自动综合的小波分析方法

小波分析是80年代后期发展起来的新的数学分支，是Fourier分析的突破性发展，它具有理论深刻与应用十分广泛的双重意义。其应用范围涉及数学领域本身的许多学科和信号分析、图像处理、模式识别、地震勘探、语音识别与人工合成以及非线性学科等许多方面。小波分析是一种新的时/空域－频域分析方法，它同时具有时域和频域的良好局部化性质，而且随着信号不同频率成分在时/空域取样的疏密自动调节，可在任意尺度观察函数（信号、图象等）的任意细节并加以分析，被誉为数学显微镜。基于认识论的多尺度分析思想，借助于小波变换良好的时频局部化特性和多分辨率分析，可使地理现象中有一定层次和大小的结构更易于识别、提取和利用，从而可以用较少的小波系数来刻划多源、多尺度、大数据量的空间数据集的基本特征，并获得该数据集的优化表示。

1．小波分析基础

(1)小波与小波变换

定义 5.1 凡满足如下允许条件

$$C_{\psi}=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega}d\omega<+\infty \qquad (5-7)$$

或相应的等价条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)dt=0 \tag{5-8}$$

的函数$\psi(t)$称为一个基本小波函数或母小波函数。满足允许条件的母小波函数$\psi(t)$经伸缩和位移得

$$\psi_{a,b}(t)=|a|^{-\frac{1}{2}}\psi(\frac{t-b}{a}) \tag{5-9}$$

式中$b\in R$，$a\in R-\{0\}$，$\psi_{a,b}(t)$称为小波函数，简称小波。

变量a反映函数的尺度，变量b检测沿t轴的平移位置。小波函数有以下性质：

①$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(t)dt=0\Leftrightarrow\hat{\psi}(0)=0$，说明函数$\psi(t)$具有一定的振荡性（波动性），而且意味着母小波具有零直流分量或者说小波函数具有零均值；

②母小波函数及其形成的小波函数均为带通信号；

③母小波函数及其形成的小波函数随着t的延伸而快速衰减。

定义 5.2 设信号$f(t)\in L^2(R)$，则$f(t)$的连续小波变换为

$$CWT(a,b)=Wf(a,b)=<f(t),\psi_{a,b}(t)>=\int f(t)|a|^{-\frac{1}{2}}\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}dt \tag{5-10}$$

若$\psi(t)$为实值函数，则

$$CWT(a,b)=Wf(a,b)=<f(t),\psi_{a,b}(t)>=|a|^{-\frac{1}{2}}\int f(t)\psi(\frac{t-b}{a})dt \tag{5-11}$$

连续小波变换形成了对时间t和频率ω能同时局部化的时间－频率窗（图5－23）。随着$|a|$的减小，$\psi_{a,b}$的频谱就集中于高频成分，可以压缩的$\psi_{a,b}$波形去衡量$f(t)$的局部和细节；而当$|a|$增加时，表示以伸展了的$\psi_{a,b}$波形去观察整个$f(t)$，从而提取全局信息。

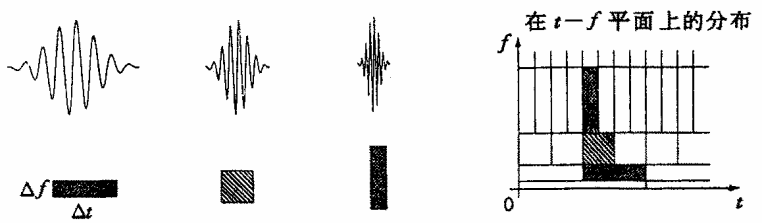


图 5－23 小波变换函数在时频平面的覆盖

对应于（5－11）有如下的重构公式，即$f(t)$的逆连续小波变换

$$f(t)=\frac{1}{C_\psi}\int_0^{+\infty}\left[\left\{\int_{-\infty}^{+\infty}Wf(a,b)[|a|^{-\frac{1}{2}}\psi(\frac{t-b}{a})]\right\}db\right]\frac{da}{a^2} \tag{5-12}$$

事实上，内积$<f(t),\psi_{a,b}(t)>$表示了$f(t)$与$\psi_{a,b}(t)$的相似程度，使得不同于小波的信号投影几乎为零：$|Wf(a,b)|\approx 0$；而类似于小波的信号投影则有较大的振幅：$|Wf(a,b)|>0$。这样变换的结果使得小波仅能检测到类似于自己的信号成分，这一思想成为解决包括空间数据处理在内的许多问题的基础。其原理如图5-24所示。因此，可以认为

一列小波系数$\{Wf(a,b)\}$反映了在尺度a下数据特征相应部分与小波的相似程度，大则说明特征重要。

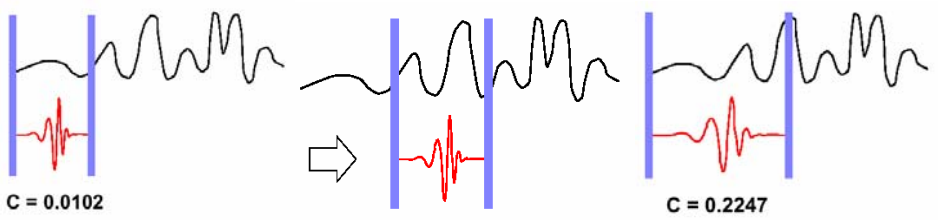


图 5-24 小波变换过程

(2)多分辨率分析与Mallat算法

多分辨分析(MRA)概念是小波理论最基本的概念之一。其原理与人类的视觉和听觉方式十分接近，例如我们站在月球上看地球，只能看到地球上大概轮廓和地球上突出的建筑物(如中国的万里长城等)，这就是高频边缘的提取；当我们站在地球上看地球时，一草一木清晰可辨，这就是低频分析。Mallat受金字塔算法的启发，以多分辨分析为基础提出了著名的小波快速算法—Mallat算法FWA（1989)，FWA通过调节尺度因子实施对信号由细至粗的分解和由粗至细的重构。

定义 5.3空间$L^2(R)$中的一列闭子空间$\{V_j\}_{j\in Z}$，称为$L^2(R)$的一个多分辨率分析或逼近，若满足下列条件：

①单调性：$\cdots\subset V_{j-1}\subset V_j\subset V_{j+1}\subset\cdots$，$\forall j\in Z$；

②逼近性：$\bigcap_{j\in Z}V_j=\{0\}$，$\overline{\bigcup_{j\in Z}V_j}=L^2(R)$；

③伸缩性：$f(x)\in V_j\Leftrightarrow f(2x)\in V_{j+1},\forall j\in Z$；

④平移不变性：$f(x)\in V_0\Rightarrow f(x-k)\in V_0,\forall k\in Z$；

⑤Riesz基存在性：存在$g\in V_0$，使$\{g(x-k)\mid k\in Z\}$构成V_0的Riesz基。

MRA的单调性说明了子空间的逐级包含（嵌套）性，j越大分辨率越高，信号高分辨率(2^{j+1})包含了低的分辨率(2^j)的全部信息。逼近性表明当f投影到V_j空间（分辨率2^j）时，会损失一部分信息。当j增大时，如$j\to+\infty$，则应收敛于原信号。伸缩性说明嵌套的子空间与尺度规律相关，V_{j+1}空间可由V_j导出，V_{j+1}空间中的向量为V_j的向量f的伸缩，其伸缩比就是两空间的分辨率之比。平移不变性说明函数的平移不会改变其所属空间。Riesz基存在性是多尺度逼近的基本条件。

设$\{V_j\}$是一给定的多分辨率分析，φ和ψ分别为相应的尺度函数和小波函数，$h(n)$与$g(n)$分别表示规范化的尺度系数和规范化的小波系数，它们分别是有低通特性和高通特性的脉冲响应（滤波器)。则尺度函数φ和对应的小波函数ψ应满足尺度方程：

$$\begin{cases}\varphi(x)=\sum_n h(n)\varphi(2x-n)\\ \psi(x)=\sum_n g(n)\varphi(2x-n)\end{cases}\tag{5-13}$$

其中$g(n)=(-1)^{1-n}h(1-n)$ (5-14)

引入闭子空间W_j为V_j在V_{j+1}中的正交补，即：$W_j \perp V_j$，且

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_j \tag{5－15}$$

这样有：　$V_j = \bigoplus_{l=-\infty}^{j-1} W_j$ (5－16)

和　$L^2(R) = \bigoplus_{l=-\infty}^{+\infty} W_j$ (5－17)

对于二进小波，V_j由｛$\varphi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\varphi(2^j x - k)$｝张成，$W_j$由$\{\psi_{j,k}(x) = 2^{j/2}\psi(2^j x - k)\}$张成。

对任意信号$f(x) \in L^2(R)$，存在$f_{J-1} \in V_{J-1}$和$g_{J-1} \in W_{J-1}$，可将其分解为空间V_{J-1}和W_{J-1}上的投影之和：

$$f = f_J(t) = f_{J-1}(t) + g_{J-1}(t) \tag{5－18}$$

其在尺度j（或2^j）下的近似（平滑）信号$A_j^d f$为：

$$A_j^d f = < f(x), \varphi_{j,k}(x) > = 2^{j/2}\int f(x)\varphi(2^j x - k)dx = \sum_k h(k-2n)A_{j+1}^d f \tag{5－19}$$

在尺度j（或2^j）下的细节信号$D_j f$为：

$$D_j f = < f(x), \psi_{j,k}(x) > = 2^{j/2}\int f(x)\psi(2^j x - k)dx = \sum_k g(k-2n)A_{j+1}^d f \tag{5－20}$$

信号$f(x)$分解的过程是应用式（5—20）和（5—21）进行递推，从$j+1$尺度到j尺度的逐步分解过程，是信号$f(x)$是从分辨率高分解到分辨率低的过程，具体就是将$A_{j+1}^d f$分解为$A_j^d f$和$D_j f$。

若设$f(x) \in V_0$，即$f(x) = A_0^d f$，则由式（5—20）和（5—21）知迭代次数为$-J \le j \le -1$，结合式（5—19），即可将$A_0^d f$分解为：

$$\{A_{-J}^d f, (D_j f)_{-J \le j \le -1}\} \tag{5－21}$$

即

$$f(x) = A_0^d f = A_{-J}^d f + \sum_{j=-1}^{-J} D_j f \tag{5－22}$$

由$A_j^d f$和$D_j f$可重构$A_{j+1}^d f$：

$$A_{j+1}^d f = \sum_k h(n-2k)A_j^d f + \sum_k g(n-2k)D_j f \tag{5－23}$$

该分解过程如图5—25所示：

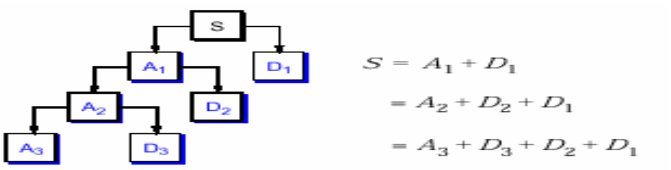


图 5－25　一维 Mallat 分解过程

二维情况下，通过张量积可由上述一维正交小波构造一组二维规范正交基，从而类似地得到二维信号的多尺度分解和重构,即二维Mallat算法。即由$V_j^2 = V_j \otimes V_j$，有

$$V_{j+1}^2 = V_j^2 \oplus W_j^2 \tag{5-24}$$

其中：
$$W_j^2 = (V_j \otimes W_j) \oplus (W_j \otimes V_j) \oplus (W_j \otimes W_j) \tag{5-25}$$

式（5—25）说明

$$\begin{cases} \psi^1(x,y) = \varphi(x)\psi(y) \\ \psi^2(x,y) = \psi(x)\varphi(y) \\ \psi^3(x,y) = \psi(x)\psi(y) \end{cases} \tag{5-26}$$

记为：
$$\Psi(x,y) = \{\psi^e(x,y) \mid e = 1,2,3\} \tag{5-27}$$

$\{\psi_{j,k,m}^e \mid e = 1,2,3; (k,m) \in Z^2\}$ 是 W_j^2 的一组规范正交基，$\{\psi_{j,k,m}^e \mid e = 1,2,3; (j,k,m) \in Z^3\}$ 是 $L^2(R^2)$ 的一组规范正交基。至此完成了二维MRA的构造。

记 A_j, D_j^1, D_j^2, D_j^3 是从 $L^2(R^2)$ 分别到子空间 $(V_j \otimes V_j), (V_j \otimes W_j), (W_j \otimes V_j), (W_j \otimes W_j)$ 的投影算子，则有：

$$A_{j+1} f = A_j f + D_j^1 f + D_j^2 f + D_j^3 f \tag{5-28}$$

$$A_j f = \sum_{m_1,m_2} c_{j,m_1,m_2} \varphi_{j,m_1}(x) \varphi_{j,m_2}(y) \tag{5-29}$$

$$\begin{cases} D_j^1 f = \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^1 \varphi_{j,m_1}(x) \psi(y)_{j,m_2} \\ D_j^2 f = \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^2 \psi_{j,m_1}(x) \varphi(y)_{j,m_2} \\ D_j^3 f = \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^3 \psi_{j,m_1}(x) \psi(y)_{j,m_2} \end{cases} \tag{5-30}$$

将式（5—29）和（5—30）代入（5—28）得：

$$\begin{aligned} A_{j+1} f = & \sum_{m_1,m_2} c_{j,m_1,m_2} \varphi_{j,m_1}(x) \varphi_{j,m_2}(y) \\ & + \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^1 \varphi_{j,m_1}(x) \psi_{j,m_2}(y) \\ & + \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^2 \psi_{j,m_1}(x) \varphi_{j,m_2}(y) \\ & + \sum_{m_1,m_2} d_{j,m_1,m_2}^3 \psi_{j,m_1}(x) \psi_{j,m_2}(y) \end{aligned} \tag{5-31}$$

其系数由下面迭代公式确定：

$$c_{j,m_1,m_2} = \sum_{k_1,k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} c_{j+1,k_1,k_2} \tag{5-32}$$

$$d_{j,m_1,m_2}^1 = \sum_{k_1,k_2 \in Z} h_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} c_{j+1,k_1,k_2} \tag{5-33}$$

$$d^2_{j,m_1,m_2} = \sum_{k_1,k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} c_{j+1,k_1,k_2} \tag{5－34}$$

$$d^3_{j,m_1,m_2} = \sum_{k_1,k_2 \in Z} g_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} c_{j+1,k_1,k_2} \tag{5－35}$$

式中，c_{j,m_1,m_2} 为表示近似的小波系数，d^e_{j,m_1,m_2} 为表示细节的小波系数，其中 $e=1,2,3$。

设 $f(x,y) \in V_0^2$，则上式经由 J 步（$J>0$ 为正整数）分解后有：

$$f(x,y) = A_0 f = A_{-J} f + \sum_{j=-1}^{-J} \sum_{e=1}^{3} D_j^e f \tag{5－36}$$

引入无穷矩阵 $H_r=(H_{k_1,m_1}), H_c=(H_{k_2,m_2}), G_r=(G_{k_1,m_1}), H_c=(G_{k_2,m_2})$，其中 $H_{k,m}=h_{k-2m}$，$G_{k,m}=g_{k-2m}$，下标“r”和“c”分别表示对矩阵地行操作和列操作。则式（5—32）至（5—35）简化为：

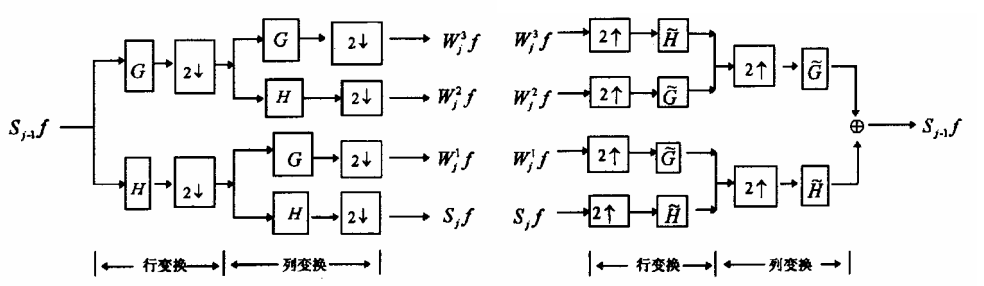
$$\begin{cases} C_j = H_r H_c C_{j+1} \\ D_j^1 = H_r G_c C_{j+1} \\ D_j^2 = G_r H_c C_{j+1} \\ D_j^3 = G_r G_c C_{j+1} \end{cases} \tag{5－37}$$

对应上式的重构过程：

$$C_{j+1} = H_r^* H_c^* C_j + H_r^* G_c^* D_j^1 + G_r^* H_c^* D_j^2 + G_r^* G_c^* D_j^3 \tag{5－38}$$

式中：$j=-J,-J+1,\cdots,-1$。H^* 和 G^* 分别是 H 和 G 的对偶算子（在 l^2 中），可分别理解为 H 和 G 的共轭转置矩阵。

二维小波变换的Mallat算法如图5—26所示：



(a) 正变换　　(b) 逆变换

图 5－26　二维小波变换 Mallat 算法

2．基于小波分析的自动综合

(1) 线状特征(Polyline)数据的自动综合

这里所指的线状特征可以是线状要素或作为离散面状要素的线状轮廓。

线状特征由多段曲线构成，对于平面曲线，其直角坐标的表示形式为

$$y = f(x) \quad 或 \quad F(x,y) = 0 \tag{5-39}$$

其参数方程则为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \end{cases} \tag{5-40}$$

对于同一曲线，若选择的参数不同，则其表达式亦不同，故用坐标系讨论曲线时，具有人为的性质。而曲线自身的弧长则是曲线的不变量，它与坐标系的选取无关。因此取曲线自身的弧长作参数即为弧长参数化：

$$\begin{cases} x = x(s) \\ y = y(s) \end{cases} \tag{5-41}$$

线状特征要素可以利用三次参数样条曲线拟合表达。设有离散点 $P_0(x_0, y_0), P_1(x_1, y_1), \ldots, P_n(x_n, y_n)$，若有一条曲线 $P(t)$ 满足：

①顺次经过点 $P_i(i = 0,1,\ldots,n)$；

②在每两个点 $P_iP_{i+1}(i = 0,1,\ldots,n-1)$ 之间是三次参数曲线；

③整段曲线是二阶连续的。

则称曲线 $P(t)$ 为三次参数样条曲线。

以t为参数表示的单参数三次曲线可由下式给定：

$$P(t) = B_1 + B_2 t + B_3 t^2 + B_4 t^3 \tag{5-42}$$

其中：$P(t) = (x(t), y(t)), B_i = (b_{1i}, b_{2i})$。

这里我们以累加弦长作为构造样条曲线的参数 t_i，因此是累加弦长参数样条曲线。

实施综合的过程是：

①对线状特征数据进行三次参数样条拟合，建立其参数表达式；

②对该参数曲线 $P(t)$ 的 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分量分别进行小波分解，也即对式（5－42）分别进行小波分解；

③重建即可获得线状特征数据的多尺度近似表达 $\gamma_{j-1}(t)$ 和细节表达 $\beta_{j-1}(t)$。

④根据表示需要，按下式设定阈值：

$$C_{j,m_1,m_2} = \begin{cases} c_{j,m_1,m_2}, \text{若} \mid c_{j,m_1,m_2} \mid \geq cT \\ 0, \text{其它} \end{cases} \tag{5-43}$$

和

$$D^e_{j,m_1,m_2} = \begin{cases} d^e_{j,m_1,m_2}, \text{若} \mid d^e_{j,m_1,m_2} \mid \geq dT^e, e = 1,2,3 \\ 0, \text{其它} \end{cases} \tag{5-44}$$

式中 cT 为近似小波系数的阈值，dT^e 为细节小波系数的阈值。

利用阈值来对多尺度上的小波近似系数和细节系数进行处理。一般情况下，只需要简单地保留全部的近似系数，而将细节系数全部置零，再重建到相应尺度，即可获得综合数据及其图形表示。图5－27为实验数据经过五级尺度的分解（利用Daubechies三阶小波），保留全部的近似系数，而舍去全部的细节系数后，分别重建到相应尺度的综合表示结果。可以看出，随着尺度的增加，与原数据集的相似程度随之降低，数据的局部细节特征逐渐消失，但整体特征得到反映。这正是我们实施综合的目的。图5－28为该算法应用到面状轮廓的化简。

(2)地貌数据的自动综合

在DEM中，地貌由全部DEM高程点构成的曲面给定。但这个曲面与计算机图形学研究的

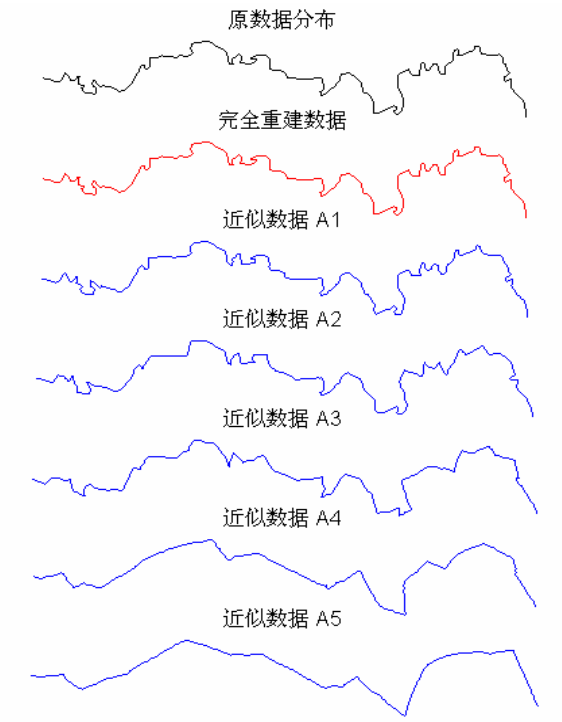


图 5－27 基于小波分析的线化简算法示例



图 5－28 基于小波分析的面化简算法示例

曲面不同，它不是一个数学曲面，即其高程与其空间位置没有函数关系。显然，这个曲面

所含信息量要由DEM的构成点确定。由于地貌的复杂性，我们将地貌形成看成是一个层次性过程，它既包括地貌的控制性过程即构成骨架地貌，也包括地貌的局部细节过程即构成细节地貌。因此利用小波MRA生成和表达多尺度DEM的基本思想，就是把基于格网的DEM看成是一个二维的有关高程的信号场，将基本骨架地貌看作低频信息（近似或逼近信息），而相应的细节地貌看作高频信息（细节或结构信息），二者的合成就构成整个地形。这是通过利用小波系数的完备重建来完成的。

按照上述思路，设 $f(x,y)$ 是由全部基于格网高程点构成的DEM表达，记为 $A_0 f$ 。应用二维Mallat分解算法，对 $A_0 f$ 进行多尺度分解 J 次，可得到该尺度上的表示近似的小波系数 c_{j,m_1,m_2} 和表示细节的小波系数 $d^1_{j,m_1,m_2}, d^2_{j,m_1,m_2}, d^3_{j,m_1,m_2}$ 。其在相应子空间上的投影值分别为反映 x,y 两个方向上低频信息的 $A_j f(x,y)$ ，反映水平方向低频信息和垂直方向高频信息的 $D^1_j f(x,y)$，反映水平方向高频信息和垂直方向低频信息的 $D^2_j f(x,y)$，以及反映 x,y 两个方向高频信息的 $D^3_j f(x,y)$ 。由此我们构建起了DEM多尺度表达的序列空间，它由集合

$$\{A_{-J} f(x,y), (D^e_j f(x,y))^{e\in[1,3]}_{j\in[-J,-1]}\} \tag{5-45}$$

表示，它们是 (V_j) 和 (W_j) 的具体表达。构建过程如图5-29所示。

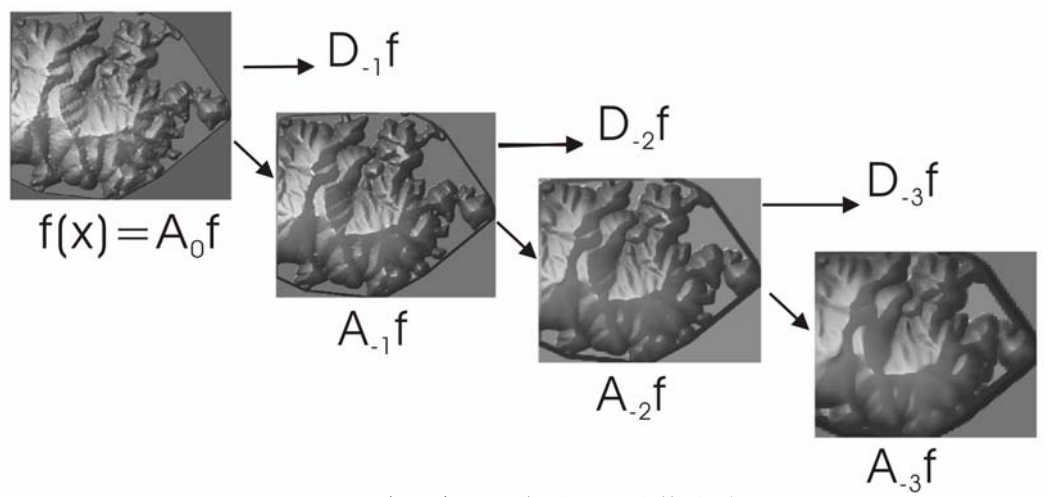


图 5-29 多尺度 DEM 序列空间的构建过程

根据应用需要，按照式(5-43)、(5-44)对式(5-45)设定阈值即可实现地貌的化简。如图5－30所示。a、b、c、d是基于该方法产生的多尺度DEM的等高线表示。a为1:5万原始DEM数据的等高线图，b、c、d分别为相应的一、二、三级化简后派生DEM的等高线表示(比例尺对应1:10万、1:20万、1:40万)。为便于对比，等高距均设为40米，并将图形缩放为一样大小。对比这四幅等高线图，可以看出随着比例尺的缩小，地貌得到一致性的综合，保持了地貌的整体结构特征，成组等高线协调一致，不同尺度上的地貌表示从较详细到较概略的过渡非常自然。因此基于多尺度DEM模拟实施地貌的自动综合过程稳定，可以得到满足制图表示需要和符合视觉规律的地貌表示。

5.3.2.6 Delaunay 三角形结构在自动综合中的应用

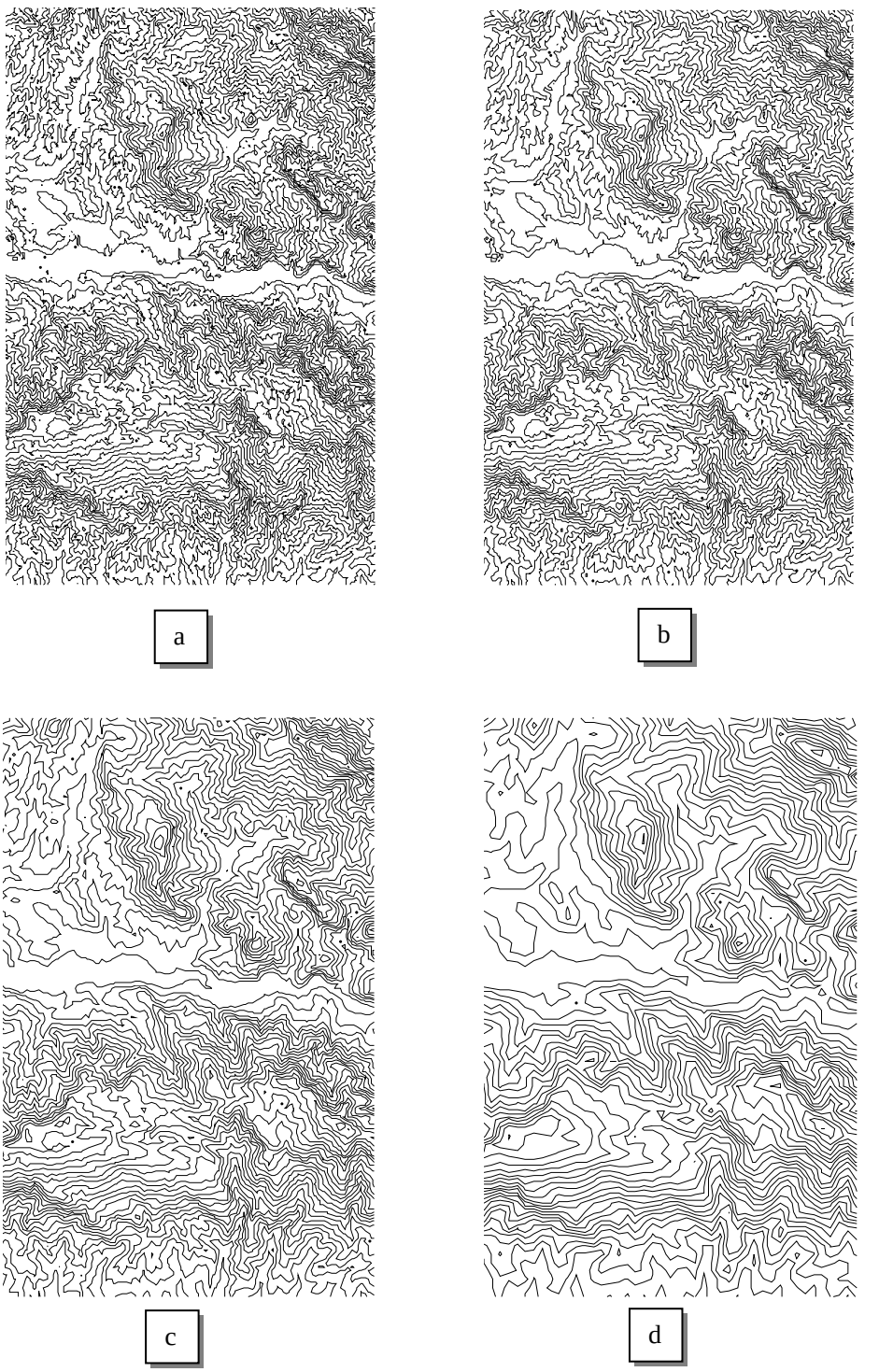


图 5－30 基于小波分析的地貌自动综合示例

由于Delauney三角结构能够方便地计算空间物体间大量存在的邻近关系，因而它在自

动综合中可用于多个方面，如选取、化简、图形等级变换、合并、夸大、位移等。Delaunay三角结构在数据库中并不存在，在诸如合并、位移、图形等级变换等综合算子中需要使用时才动态建立，不使用时则不需建立，而且往往建立的都是局部的Delaunay三角结构LDT，即Localised Delaunay Triangulation。

1.Delaunay三角结构在图形等级变换中的应用

图形等级变换是综合方法中的一种，其应用范围很广，如面状要素变成线状要素(如双线河变成单线河、依比例的双线道路变成半依比例的道路符号)、面状要素变成点状要素(如依比例的居民地变成不依比例的符号居民地)等等。前者的重点是如何提取面状要素的骨架线，后者的重点是如何确定面要素的中心点。相比较而言，后者的实现要容易些。

确定面要素骨架线的方法很多，且各有优缺点，这里主要介绍利用Delaunay三角剖分将面状要素变为线状要素的方法，因为Delaunay三角剖分能够有效地计算出其中轴线(骨架线)，这种提取出的骨架线取的是两个共边三角形的公共边的中点的连线，该中点到多边形的相对两边的距离相等(图5-31)。当多边形轮廓上点的密度相对较高时，得出的骨架线形状保持较好，如果综合后的线划带有角状弯曲，可通过光滑算法来解决。

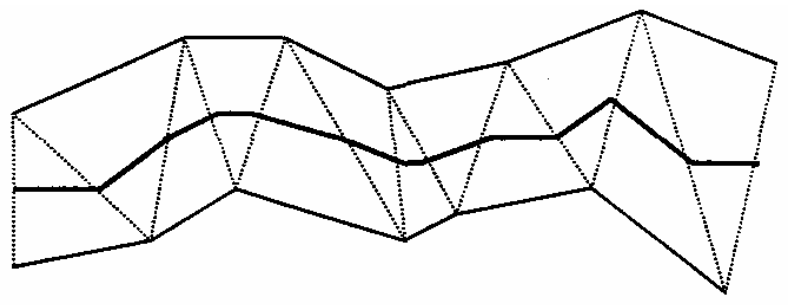


图 5-31 面状要素骨架线的提取

多数情况下骨架线提取的是其中轴线，但也可以根据需要偏向图形的一侧，这只需在确定骨架线时往一侧的偏移量超过 50%即可。这种处理同样可以用于合并和位移，处理时能够同时移动多个物体(根据物体的属性、重要性或尺寸情况而定)。

图5－32是利用Delaunay三角剖分将面状要素变为线状要素的一个实例，该例中说明了交叉处骨架线走向的确定。该方法可用于双线河合并为单线河、双线路合并为单线路以及具有一定宽度的带状物体的不对称骨架线的提取等。

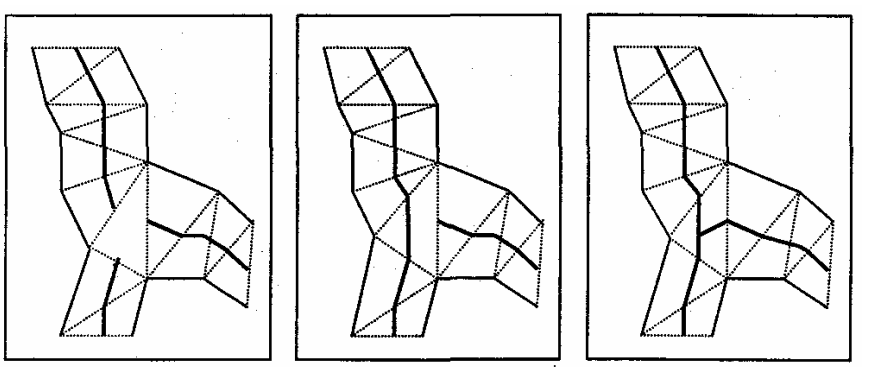
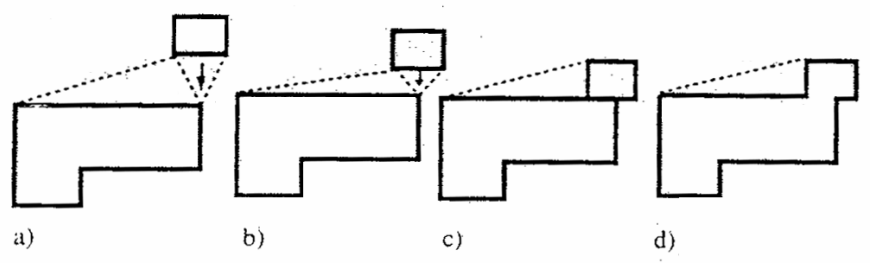


图 5-32 交叉处骨架线的走向确定

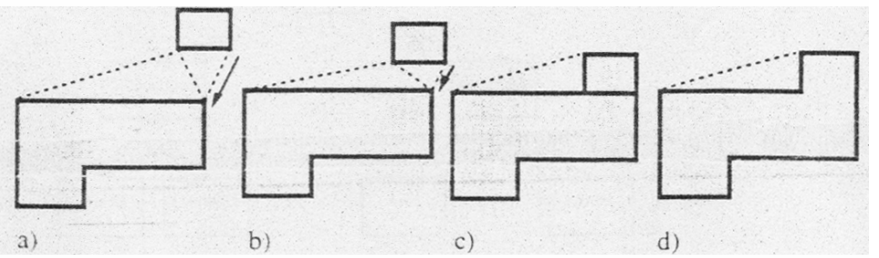
2. Delaunay三角结构在图形合并中的应用

地图物体的图形合并是综合的一个基本问题。综合中的合并有许多种类型，每种类型所使用的待合并物体间的单纯形中的信息都采用不同的方法。每个物体位移的比率也是变化的，小物体向大物体上靠近，不重要的物体向重要的物体靠近。物体可能会在中途相遇，或者在位移不充分的情况下相遇。

图形合并的重点是居民地街区的合并。在街区的合并中要区分两种类型的算子：一种合并算子是直接将分离的物体合并，叫直接合并，图5－33a；另一种算子是通过移动物体来实现的(通常是移动一个物体)，叫移动合并，图5－33b。这两种算子都是利用物体间的



(a)直接合并



(a)移动合并

图 5-33 图形的合并

小三角形来进行合并的。这两种算子都须进行迭代运算，每次只能处理两个待合并的物体。

图5—34是建筑物的移动合并示例，(a)图中右边的小物体移动后并入大物体，(b)为合并后的建筑物图形，合并后两个物体间的地图空间消失了，亦即两物体间的两个三角形消失了。在有些情况下，建筑物的合并也可采用直接合并。

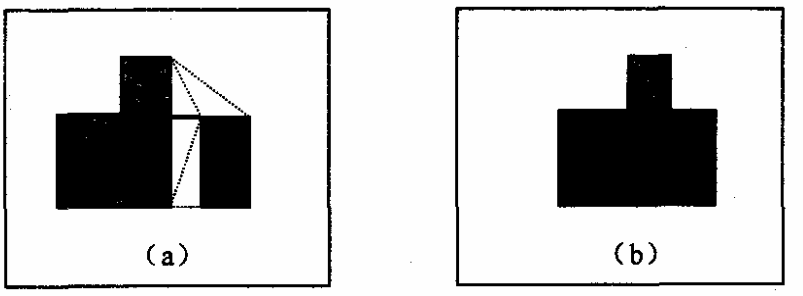


图 5-34 建筑物的合并

当合并自然物体时，无需考虑物体的对齐，可以使用更自由的方法如直接合并。图5—35和图5-35是自然物体的直接合并，图5-35是未考虑限差的直接合并，图5-36是考虑了限

差的直接合并。图5-37是考虑了限差的自然物体的合并实例，由于算法的迭代性，物体的合并是两两进行的。考虑了限差的自然物体合并，能够较好地保持原有图形的形状特征。

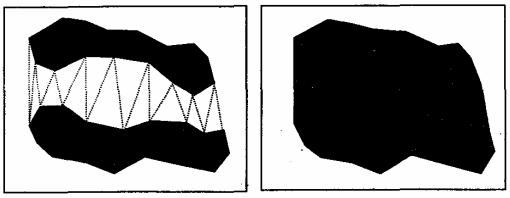


图 5-35 不考虑限差的自然物体的合并

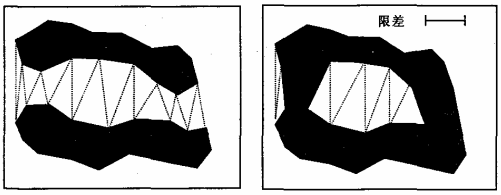


图 5-36 考虑限差的自然物体的合并

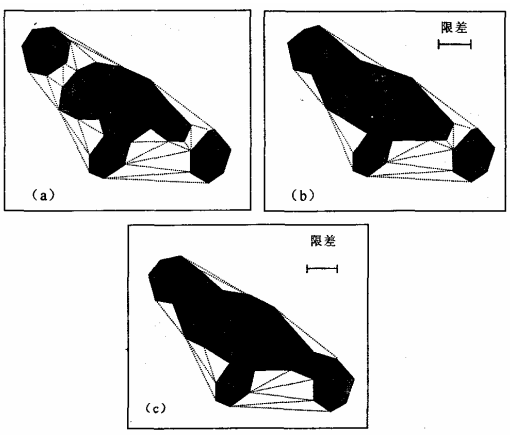
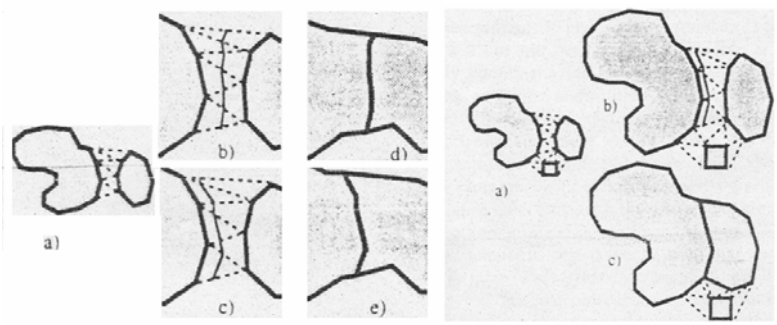


图 5-37 合并示例

自然物体合并时，限差的确定要考虑物体的最小尺寸、物体间的最小间隔等参数，合



(A)没有移位的弹性合并(b、d 为50%合并线；c、e 为 75%合并线)　　(B)带移位的弹性合并(80%合并线)

图 5-38 弹性合并

并后的物体轮廓还需要化简。合并后形成的新物体，其面积往往超出被合并的原始物体面积的总和。

自然物体的合并可以利用所谓的弹性合并，使目标合并后有光滑的边界，它是通过合并三角形相连的两个目标轮廓线上的点和边生成新的边（骨架边）来实现的。图5－38所示。带移位的弹性合并能使待合并目标的中心更接近，从而减少由于合并而带来的面积扩大。

3.Delaunay三角结构在图形夸大中的应用

综合时物体是有比例尺的。如果物体很小但又很重要，则此物体不能舍弃而必须夸大，因此要把此物体表示到图上就要放大局部比例尺。利用位移矢量可以放大图形，即对每个外轮廓点采用位移矢量使其图形放大。图5－39是建筑物夸大的例子，图5－40是自然弯曲夸大的示例。

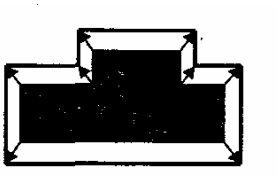


图 5-39 建筑物的夸大

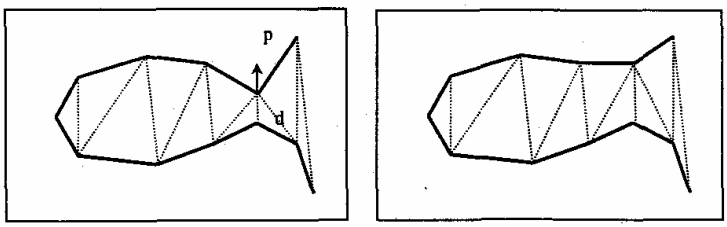


图 5-40 自然弯曲的夸大

4.Delaunay三角结构在图形化简中的应用

(1)居民地形状化简

用三角剖分方法化简居民地形状的过程比较简便，凹形拐角可通过搜索辨别直角三角形来实现。如果这样的三角形其真实边小于有关的限差，可以通过移动右方的拐角顶点到对角线上的相对位置(对角线上的另一个顶点)来实现。

图5—41是化简不规则建筑物的例子，此例中完整地显示了直角结构。

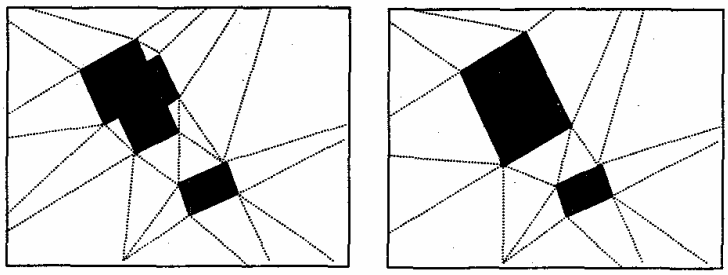


图 5-41 利用 Delaunay 三角结构进行居民地的图形化简

(2)曲线的形状化简

用Delaunay三角结构进行曲线的化简，其基本过程如下(图5-42)：

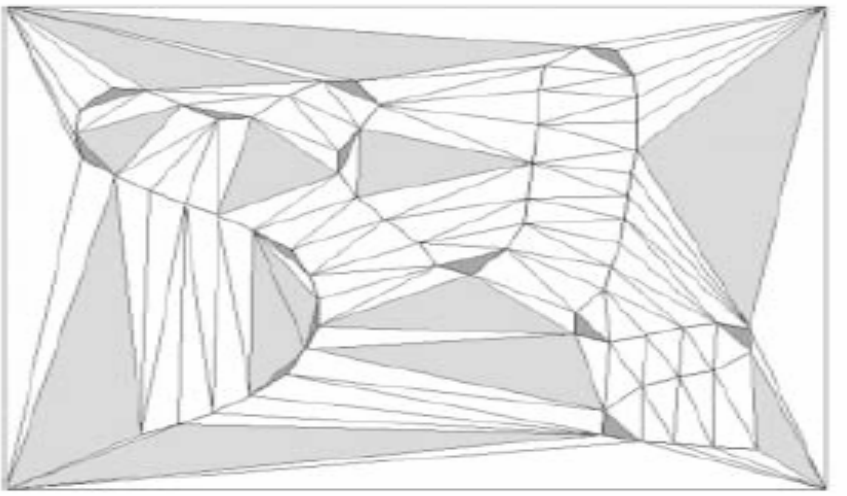


图 5-42 曲线的 Delaunay 化简

构网采用约束的Delaunay三角结构，将整个待综合的线划框定在矩形的范围内，矩形的边作为三角形的边。

构网完成后，检验并分析每个三角形的情况，计算每个三角形“内部”邻居的数量，此处的内部邻居指的是与其具有公共边且公共边不是原始线划的那些相邻三角形。这里定义，只有一个这样内部邻居的三角形称为叶三角形，从图5-42中我们可以看出叶三角形位于曲线弯曲的顶端(图5-42中用黑色普染的三角形)；具有两个或三个内部邻居的三角形称为枝干三角形(图5-42中的白色三角形和用浅灰色普染的三角形)，具有三个内部邻居的三角形表明两个枝干相连(图5-42中的浅灰色三角形)。

这样定义了三角形后，可以得到要素的等级结构特征。统计计算枝干的数量，然后作为与枝干节点相关联的记录存贮。统计计算的内容有：①枝干的面积；②枝干的边界长度；③枝干长度；④枝干的平均宽度；⑤枝干的基角。

前两项的含义比较明确，枝干的长度计算，是根据构成枝干的每个三角形计算其三角形两个内边中点之间的距离，然后将所有的这些值相加所得；叶三角形的相关距离，指的是它的内边中点到其相对顶点之间的距离。

枝干的平均宽度是指构成枝干的三角形的平均宽度。三角形的宽度定义为从三角形外边中点到其边相对的三角形顶点间的距离。

“基角”计算的是导致枝干被删除的线划的角度增长情况。这虽不是最好的计算方法，但却是解决某些困难的唯一方法。

上述不同的统计计算确定了线划不同类型的综合方式，简单地提供了不同类型的线划化简准则。根据不同的计算参数，可以有不同的化简方法，例如，利用枝干的长度参数，或利用枝干的宽度参数，都可以对线划进行化简。

由于线划的弯曲具有两面性，那么删除哪条枝干对线划的化简影响很大。因此，为了正确识别线划的弯曲特征，在化简时最好将长度参数和宽度参数结合使用。

综合前，首先确定宽度和长度的阈值，并将前者作为主要的参数，那么综合过程为：检查所有长度小于阈值的枝干三角形，并在其中查找小于宽度阈值的那部分，然后删掉宽度最窄的枝干三角形，亦即定义这个枝干的那一部分线划被删掉；然后重新三角化并重新

计算枝干的大小。重复这个过程直到所有保留的枝干其长度和宽度都大于阈值为止。

采用Delaunay三角剖分的方法对曲线的化简类似于手工综合中曲线的化简，其最大的好处是获得了线划的结构特征，而且保留了拓扑的一致性。

5.Delaunay三角网结构在位移中的应用

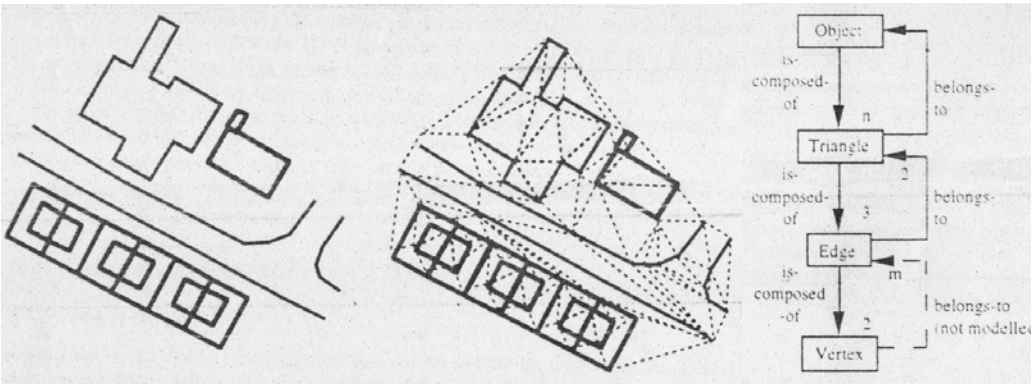
空间冲突在比例尺的变换过程中是不可避免的，因而位移在地图综合过程中必不可少，它可以由于比例尺的变化而引起，也可以由许多综合算子而引起，如符号化、化简、光滑等。其它的综合算子如合并等，则需要将加以控制的位移作为一种工具才能获得满意的效果。

空间冲突的处理(地图要素的关系处理)一直是一个比较麻烦、比较困难但又必须解决的问题，因为当一个对象空间相交(或重叠)必须移动时，通常没有合适的方式和足够的信息来引导对象的移动，以避免它碰到和跨越其它对象。而Delaunay三角空间特性给我们开辟了关系处理的一个新的途径。

位移中最大的困难是控制要素密集区域位移的传播。位移的传播指的是当一个物体位移后可能会引起与它相邻的本不需要位移的物体而产生位移，亦即旧的冲突解决后又产生了新的冲突。有限的位移传播，可以尽可能地利用连续位移要素间的自由空间，但在要素非常密集的区域则需要采取一些其它的综合算子如选取等，才能使位移有足够的空间。

位移的前提是必须探测重叠的位置、方向和程度，为了避免复杂的算法和繁重的计算，必须设计合适的数据结构。

单纯形数据结构SDS（图5－43）可以指导与控制位移，检验环绕物体的单纯形集，可以显示任何方向自由空间的数量，看能否在这些方向上移动物体。这种方法在位移之前可以了解该区域是否会产生位移的传播、是否需要舍弃一些物体。



(a)地图的一部分及其 SDS 表达　　(b)SDS 的实体－关系图

图 5-43 单纯形数据结构 SDS

(1)空间冲突的定义

空间冲突或图形冲突可以定义为一个以上的物体压盖相邻的物体，例如三角形的一部分进入其它三角形的内部等。由于冲突的方向和程度可以通过表现冲突的三角形推导出来，因此这样的冲突可以通过利用SDS提供的有效信息来解决。

(2)冲突的探测

空间冲突的探测可以通过比较地图上物体的实际几何形状与SDS中存贮的拓扑结构来实现(图5-44)。该项技术基于这么一个事实，即如果操作后顶点发生了改变，那么至少一

个点与边相交叉，这说明一个自由三角形发生重叠，这时我们可以重构受影响区域的三角形。另一方面，若制图物体的三角形发生重叠，那么必须找出合适的解决办法。

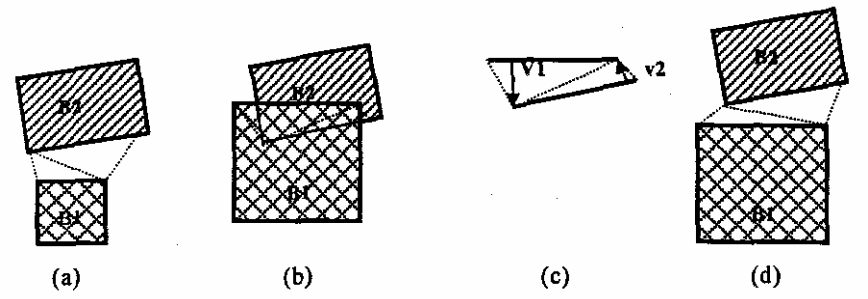


图 5-44 冲突的探测与移位

(3)冲突的解决

冲突探测完后，解决冲突的方法有若干种，处理时依据特殊的情况选择不同的方法。即根据冲突的表现和认知系统的分类分级的确认，空间冲突的解决方法为：①移开重叠的物体：②删除一个或一些物体：③合并邻近的物体；④通过光滑改变物体的形状，冲突引起的反转三角形集可说明冲突的程度、冲突的特性与重叠的方向。

如前所述，夸大与位移算子可以产生冲突，在图5-45中，建筑物B被夸大了，这样就产生了冲突，即建筑物B与建筑物A发生了重叠。要想自动探测这种情况，可通过判别转换三角形t得以解决，用位移矢量移开重叠的物体。需注意的是在这种情况下，利用位移矢量虽消除了重叠，但是仍有两个物体相接。为避免出现这种情况，在位移矢量上增加一个限差值，就会留出两物体间所需的间隔。

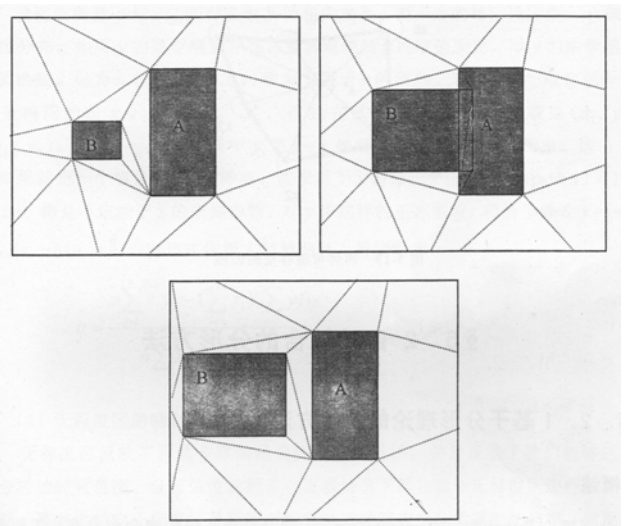


图 5-45 位移示例

当然，在有些情况下冲突的解决并非如此简单，常常需要选择合适的位移矢量。

因此位移的过程是一个反复的过程。实际上，若不考虑删除算子，要想完全解决地图上各要素之间所产生的冲突是不可能的，因此，必须对综合的过程进行有效的控制。SDS通过检验产生冲突的周围物体“自由空间”的大小，能够评估位移操作的可能性(图5-46)。

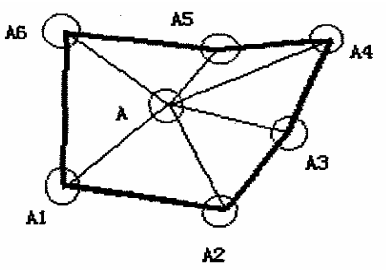


图 5-46 物体可能移位的范围

在图5-46中，设有一组地图要素(A，A_1，A_2，…A_n)，通过Delaunay构网可以看出，每个要素的周围都围绕着一组三角形。这些三角形不包括给定对象以外的任何其它对象，我们称由这组三角形的外边组成的闭合多边形叫做该封闭要素的*安全区域*。例如，对要素A，其周边三角形组所围成的安全区域为$A_1A_2A_3A_4A_5A_6A_1$(粗线围成的区域)。该安全区域有个非常重要的特性，就是它只包含对象A，也就是说，在该安全区域内，对象A的任意移动都是安全的。但必须说明的是，这样的安全区域并不是最大的安全区域。

应注意的是，位移的结果是减少物体间的相互压盖，使要素的分布更合乎制图规则。如果位移后没能起到应有的效果，则应该考虑对位移方向增加一个偏移量，以达到好的移位效果。

一个面向地图自动综合的Delaunay三角形结构综合性的应用示例如图5－47。

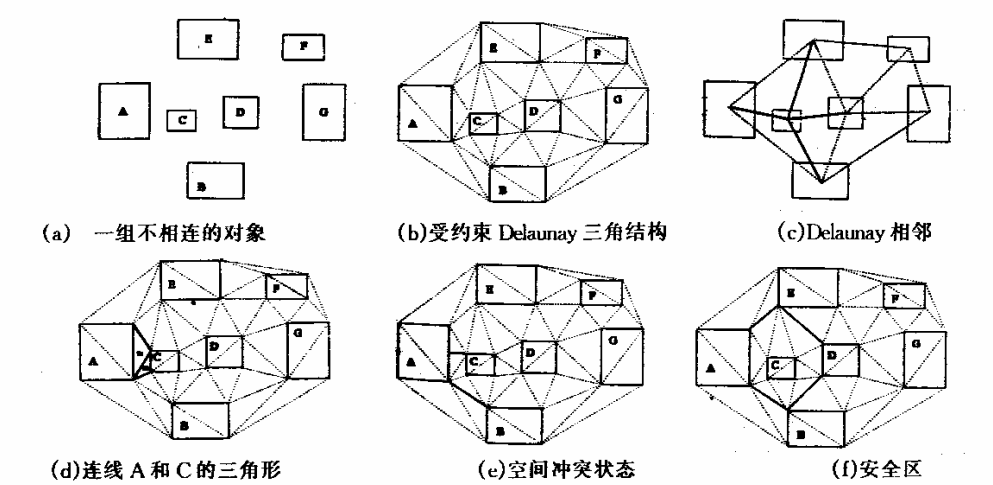


图 5-47 基于 Delaunay 三角剖分结构的空间相交检测

5.4 本章小结

本章讲述了数字地图自动综合的基本概念和基本原理，介绍了一些常用的方法和新的研究进展。要说明的是在自动综合领域还有很多问题没有解决，限于篇幅也还有许多方法未予以介绍和分析比较。

第6章 地图数据的可视化

可视化对地图学而言，并不是什么新概念。一方面，因为地图本身就是一种可视化产品，即现实世界以高度抽象化的图形形式再现在二维平面或三维模型上。地图设计过程被认为是运用地图符号对现实世界抽象、综合和表示的过程，而地图的使用则是读者运用视觉思维对地图进行感受和分析的过程，所以说可视化并不是什么新概念。但是另一方面，可视化对地图学又有它全新的一面，因为伴随现代计算机技术，尤其是计算机图形图像技术和科学计算可视化的发展，地图不再是单纯的纸质地图，也不是简单的从纸质地图到屏幕显示的转化，而是数字支持环境下具有高度交互动态显示能力，集成了数据分析等技术的虚拟实验平台。用户可以通过这一试验平台对数据库中的数据进行多方面的显示、分析和动态模拟，以达到对自然、社会、经济现象的透彻理解。

可视化是地图学的核心内容之一。对数字地图来说，可视化的作用体现在计算、认知、图形设计三个部件的界面上。因此地图数据的可视化可以认为是“为识别、传输和解译模式或结构目的而概要地表示信息的过程。它的研究领域包括创建、组织、操作和理解视觉表示的计算、认知和图形设计方面。视觉表示区别于那些抽象文字和公式，可以被符号化、图形化和形象化的表达”（江斌等，2002）。

6.1 地图信息的传输过程

传统的地图，主要是对已知知识的综合和表示，为视觉传输服务，面向公众范畴。而基于高度动态和交互计算机环境的地图可视化兼有上述两个方面的功用：视觉思维和视觉传输。Taylor(1991，1994)将地图学理论原则放在三角形的底边(图6－1)，认知和传输为等边三角形的另外两边，连接处在三角形中心的可视化。他认为以认知和传输为目的的地图可视化构成了现代地图学的主要研究内容。计算机技术，尤其是计算机图形图像显示技术，提供了可视化的技术支撑。动态和交互是可视化的主要特征。

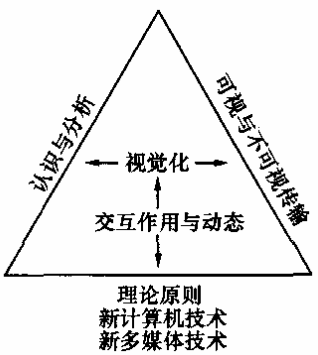


图 6－1 Taylor 的地图可视化概念模型

地图可视化信息传输的真正意义在于设计者所要传递的信息能毫无失真或尽量少失真地为用图者所拥有，例如，对用颜色梯度表示人口密度分布的面状地图，用图者不仅能清楚地读出什么地方是高密度，什么地方是低密度，而且对整个人口分布状况能一目了然；再如等高线或等值线地图，用图者不至于将等高线与其他线状地物如道路相混淆。

地图信息的传递过程可以表示成图6－2的形式，地图制图者所掌握的信息I，经过

地图设计、生产和使用是逐级递减的，最后地图使用者所掌握的信息Ⅱ只是与I有部分的重合，这说明用图者所拥有的一部分信息不一定是制图者所想传递的。最理想的信息传递过程应该是I和II尽量的重合。要提高信息传递的效率，可以从两方面入手，从设计和生产者的角度，好的设计当然是高效率信息传递的前提；从用图者的角度，好的用图读图经验可以减少信息的失真，但这涉及到用图者知识水平、语言和文化背景、生理和心理等其他因素对地图可视化的感受。

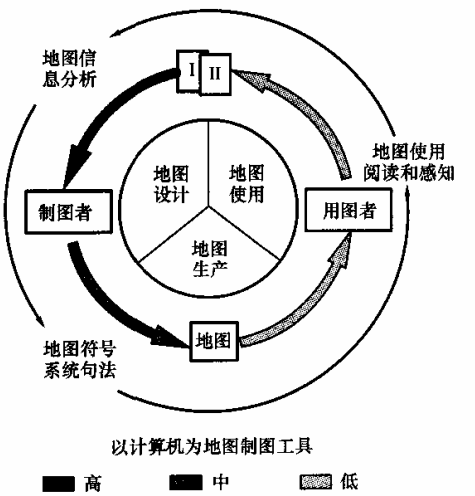


图 6－2 地图信息的传输过程(Ormeling 和 Kraak，1987)

传统地图信息论将地图信息分成两种：直接信息和间接信息。直接信息是用图者由读图直接获得，而间接信息由用图者通过对地图的量算分析而获得。例如阅读等高线地图时可以获得地形高程和地势变化的信息，但是经过地图分析量算还可以获得地形坡度和地面切割程度的信息，甚至可以得到地貌成因的一些知识。在数字环境下，由于有数据库的支持，可将直接信息纳入可视化信息传输的范畴，而将间接信息归入认知范畴。所以可视化的信息传输是针对已知信息的传递，即通过有效的设计，尽量减少信息在传递过程中的失真，而可视化的认知过程则是关于未知信息的发现与提炼。地图的认知过程主要是针对地图信息的分析与整理，因此可以认为可视化的认知过程实际是对数字地图数据的认知过程，当然目前已有许多相关的技术，包括空间分析、数据挖掘和知识发现等，而可视化是其中的一员。

不论是传统地图还是数字地图都强调传输和分析两个基本功能，但传统地图只有很低的交互性或不具有交互性，主要是向大众表示已知的现象，而计算机环境下的地图数据可视化则具有很高的交互性，主要是为科学试验服务，以探索未知现象。

据估计，至少半数以上的大脑神经元与视感觉相联系，视觉思维是科学发现的重要途径之一，随着数字化技术的发展，数据源变得越来越多，数据库中的数据正以指数级增长，然而数据搜集和数据管理并不是最终目的，科学发现的任务在于分析数据异常、辨别模式和提取结构等一系列思维活动，从这个意义上来说，可视化又是一种高级的空间数据分析行为。

6.2 地图数据的二维制图表示

制图表示操作是将数字再现并转化为软拷贝或硬拷贝的过程。将模拟地图对象转换为数字地图对象是数据的编码操作过程，而在制图表示中，要将数字对象再现为模拟对象。制图操作覆盖了从符号化、数据增强到地图综合技术的所有方面。某些制图操作主要作用于地理基础文件或专题覆盖图，也有人将它们集成起来。但是，制图表示的核心是符号化。为了视觉表达和理解，所有的要素都必须符号化。因此，首先有必要讨论制图符号化的性质。

6.2.1 符号化

符号化是将专题数字信息转化为模拟的制图符号。这种形式的符号化依赖于专题数据属性。制图对象的专题属性按照名称尺度(NOMINAL)，顺序尺度(ORDINAL)，间隔尺度(INTERVAL)和比率尺度(RATIO)来测量。符号化的范围对应着从名称尺度到比率尺度的测量范围（见图6－3)。对一个用名称尺度来量测的属性，对象都被划分在相互排斥的组里。对一个用顺序尺度来量测的属性，对象按降序或升序的方式排列，但对象间的间距是未知的。在间隔尺度里，对象的间距是已知的，但其尺度的原始定位是任意的。比率尺度数据有绝对零值，所以其所有的量测都是正值。按比率尺度的量测可以全部符号化，而名称尺度的符号化最受限制。在低尺度水平上的制图符号化隐含了数据综合，因此会损失一些信息。

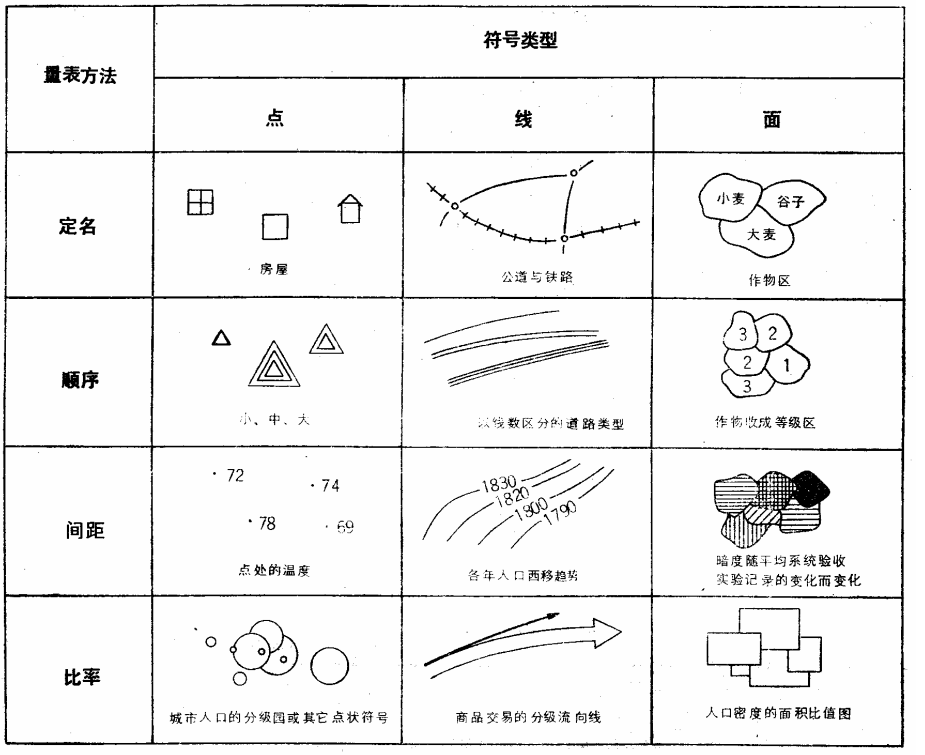


图 6－3 地图符号化及其量测尺度

符号化另一个考虑就是通过定义不同的符号来再现不同的专题属性值。对象被分类和化简后，应该通过符号化操作将结果数字对象转换为其模拟表示，以保证对符号的解释不存在歧义。符号的大小，形状，方向，颜色，灰阶和纹理都用来传递信息。灰阶是人眼接收到的反射等级，它是由阴影模式下元素的空白区域产生的；纹理是表示在一定模式下，元素的精细和粗糙程度的变化。这些符号属性应该足够大的区别，以避免读者接受错误的信息。符号及其所表达对象间的连接关系是通过图例来表示的。

符号的形式也依赖于和专题属性值相关的地理对象类型。点对象的符号可以在大小、形状、方向、颜色、灰阶和纹理方面变化，而不是表现在它的位置上。符号的视觉中心应该定位到点对象所在的位置。因为线有长度而没有面积，所以它们的符号可以在大小、形状、方向、颜色、灰阶和纹理方面变化。但是，由于面对象有可量测的大小和外形，它们的符号不能在大小、形状和方向上变化——它只能在灰阶、纹理和颜色上发生改变。不同对象的符号是与对象维度相适应的属性的组合。

分级符号是通过改变符号大小，从而在比率尺度下指示专题属性值。符号的形状表达了所显示的属性。例如用一个人的外轮廓线代表人口，或者也可以用象正方形这样普通的几何图形来表示。用的最多的分级符号是园。分级园的大小并不是按数学递增方式来表示专题属性值的增加，而是以相对于根园面积的增加来表示专题属性值的增加（见图6－4）。对分级园来说，如果标准园以半径r_s来代表数量z_s，半径r_i表示数量z_i：

$$r_i = \frac{r_s \cdot z_i^{1/2}}{z_s^{1/2}} \qquad (6-1)$$

由于人们在观察它们时，在感觉上会低估大园的真实面积，所以常常用一个大于1/2的指数来扩大它们，这样就可以纠正视觉上的变形。

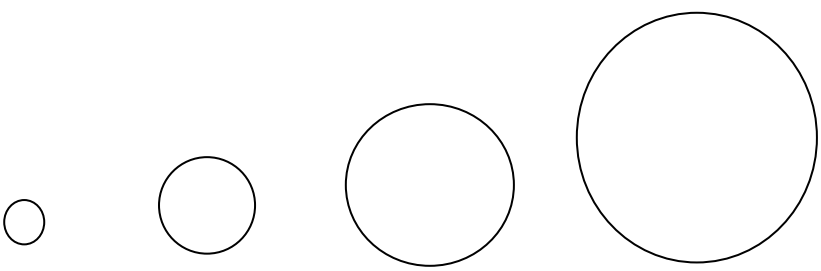


图 6－4　一组典型的分级园

为了构造相互压盖的分级园符号，首先，当两符号中心间的距离小于它们的半径之和时，两符号就会发生压盖。为了改进压盖的效果，就要被去除符号被遮盖的那部分（见图6－5）。解决多边形压盖的问题将在后面讨论。其次，如果保留它们在两压盖符号之间的小间隙，将会增强符号的易读性（见图6－6）。

如果与地图解释相关的符号部分被遮盖了，就有必要修改一些符号的位置。对于点对象来说，点的定位一般定义为符号的中心位置。对二维对象来说，用一个多边形的中心点来定位符号，如最大内接园中心。为了减少一些符号被其他符号完全遮盖的可能性，符号的绘制应按照符号大小，从小到大绘制（见图6－6）。用这种方法，最小的符号就不会被任何符号所遮盖，而且大符号被小符号完全遮盖的可能性也很小。



图 6－5 去除符号的遮盖部分后的绘制效果

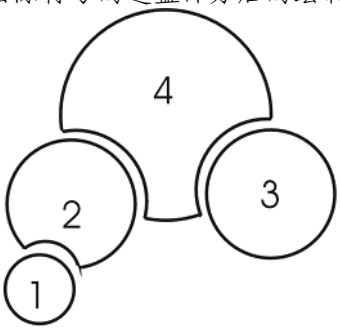


图 6－6 从小到大、从前往后依次绘制符号

6.2.2 数据增强

数据增强可以近似地看作为数据选取和其它综合操作的逆过程。当然，实际上难以对任何综合操作实行真正的逆操作。但是，在地图学中往往需要给线、面状要素增加细节以改进显示效果或者为没有数据采样的地方进行估值。

6.2.2.1 线性插值

在制图显示中，线通常是通过曲线拟合来改进显示效果、增强美感的（见图6－7a）。拟合曲线的构造可以是通过线的给定顶点（*插值*）或靠近顶点（*逼近*）来实现。线性插值通过利用多项式函数来拟合线。但是严格的多项式插值可能会和线的各段相交，并将噪声

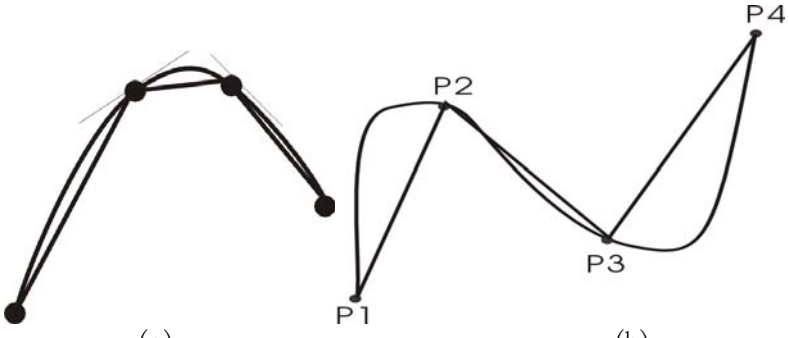


图 6－7 一条曲线的分段构造

引入到拟合曲线中。更合适的方法是用一段一段的曲线来代替每条线段，而且只在每条线段的端点处才相交。鉴于这个原因，分段多项式函数能产生更理想的结果，即分段拟合。为了保证分段产生的曲线连接起来能形成一条光滑的曲线，用一个三次多项式函数来计算通过四个相继的顶点，但只保留连接第二、三个顶点的曲线段（见图6－7b）。重复这个过程来处理剩余的顶点集。

一个生成这种函数的方法是基于下面的三次多项式并利用最小二乘回归来估计参数。

$$Y = a + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 \qquad (6-2)$$

因为只有四个观察点用来估计四个参数，所以没有和模型相关的自由度，而三次函数必须穿过四个观察点。这个方法的缺点是拟合曲线时会导致一个多值函数，因此必须旋转坐标轴。更一般的方法是将这个函数表示为参数形式：

$$\begin{aligned} X &= f_x(t) \\ Y &= f_y(t) \end{aligned} \qquad (6-3)$$

这种方法比显式地的使用Y=f(x)要好。对四个点来说，t的值的取值范围为-1到2或(i-2)。这种形式的内插函数是：

$$\begin{aligned} f_x(t) &= \sum_{i=1}^{N} X_i B_i(t) \\ f_y(t) &= \sum_{i=1}^{N} Y_i B_i(t) \end{aligned} \qquad (6-4)$$

其中 $B_i(t)$ 是定义在不同间隔t上的分段混合函数。为了保证拟合曲线通过第i个顶点，它的混合函数应该等于1，且其他三个顶点的混合函数应该等于0。四个点的混合函数集如下：

$$B_1(t) = \frac{t(t-1)(t-2)}{(-1)(-2)(-3)};\quad B_2(t) = \frac{(t+1)(t-1)(t-2)}{(1)(-1)(-2)};$$

$$B_3(t) = \frac{(t+1)t(t-2)}{(2)(1)(-1)};\quad B_4(t) = \frac{(t+1)t(t-1)}{(3)(2)(1)} \qquad (6-5)$$

虽然这些混合函数都易于计算，但它们的缺点是段与段之间不能光滑过渡（见图6－8b）。可以通过对 $B_i(t)$ 加以边界限制条件，以其保证光滑过渡（参见有关计算机图形学文献）。三次B样条函数通过强制逼近曲线通过原线的每个顶点来解决这个问题（见图6－8c）。对起、止段施以特殊函数，且t仅仅在0和1之间变化。用三次样条函数表示曲线的第一段如下：

$B_1(t)=(1-t)^3$；　$B_2(t)=21t^3/12–9t^2/2+3t$；

$B_3(t)=-11t^3/12+3t^2/2$；　$B_4(t)=t^3/6$　　（6－6）

第二段为：

$B_1(t)=(1-t)^3/4$；$B_2(t)=7t^3/12–5t^2/4+t/4+7/12$；

$B_3(t)=-t^3/2+t^2/2+t/2+1/6$；$B_4(t)=t^3/6$　　（6－7）

对于最后一段和倒数第二段，函数 B’(t)是相应 B(t)的逆：

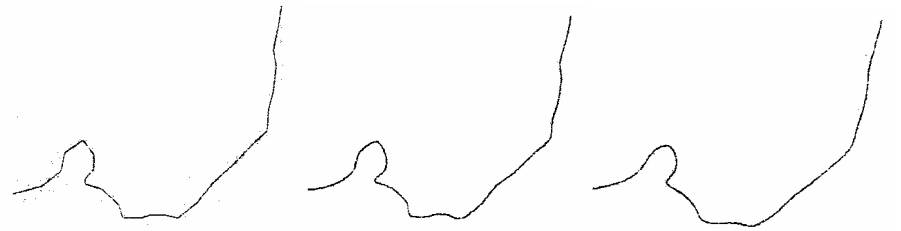
$B'_1(t)=B_4(1-t)$；　$B'_2(t)=B_3(1–t)$；

$B'_3(t)=B_2(1–t)$；$B'_4(t)=B_1(1–t)$　　（6－8）

对于所有中间线段，有：

$B_1(t)=(1-t)^3/6$；　$B_2(t)=t^3/2–t^2+2/3$；

$B_3(t)=-t^3/2+t^2/2+t/2+1/6$；　$B_4(t)=t^3/6$　　（6－9）

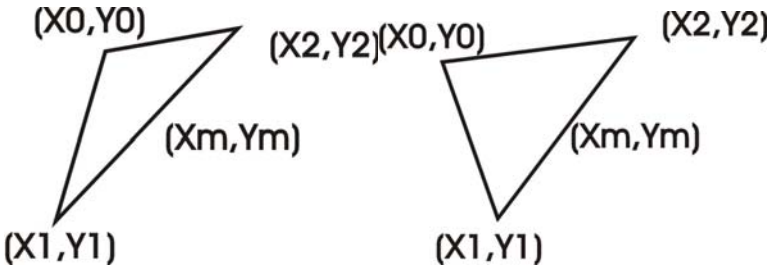


(a)　　(b)　　(c)

图 6－8 基于混合函数的插值和逼近

另一个曲线增强方法就是分形增强。分形增强后的曲线将产生较粗视的外观，但却比样条函数曲线模拟的结果更像真实世界中的对象。分形增强的基础是曲线的自相似属性（见第四章）。分形增强允许将更小的特征引入到基于递归形式的曲线中。如果线的分维是1.0，那么它每段的细分将产生一条新的曲线，这条新的曲线段是原线的一个精确拷贝。但是当分维接近2.0时，曲线的细分段将产生一条新的曲线，这条曲线将比原曲线拥有更多的弯曲，这是因为每对新曲线段的长度都远大于被它们取代的曲线段长度。

已经提出了很多不同的实现曲线分形增强的方法。一种方法就是当基于线的分维进行细分时，计算每段线中间点的偏移因子。分维越接近于1.0，偏移因子就越小（见图6－9）。



(a)分维接近与 1.0　　(b)分维接近于 2.0

图 6－9 两个偏移因子

这个概念可由下面一对式子表示：

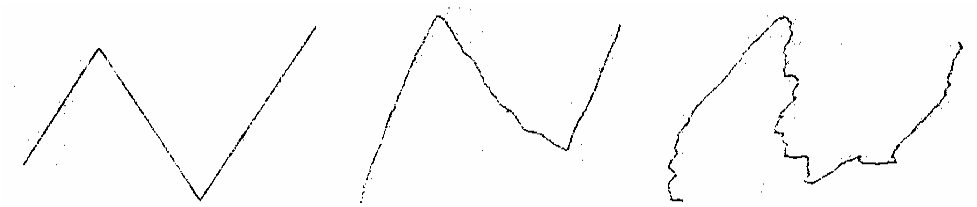
$$X_o=X_m+L*F*R$$
$$Y_o=Y_m+L*F*R \qquad (6-10)$$

这里（Xo，Yo）就是偏移位置；（Xm，Ym）就是线段的中点；

L是基于线段长度的尺度因子，通常是欧氏距离或曼哈顿距离；

F是分维减1；

R通常是零均值的随机分布数。



(a)原线　　(b)F=0.25　　(c)F=0.75

图 6－10 分形增强

图6－10a显示了一条线基于两个不同的自相似维的分形增强。分维越低，线就越光滑（对比6－8b和c）。地理线的自相似属性可能会随线的不同部分而发生改变，从而保持特定的和理想的局部形状，如直线。

6.2.2.2 空间插值

空间插值也是数据选取操作的一个逼近逆过程。通常在数据选取中，是按间隔对表面采样，因此采集的只是一个专题属性值的样本。要准确地知道表面上未被采样部分的那些点上的数据值是不可能的。空间插值问题就是要求取未知值位置上近似的专题值。若是在一个已知控制点分布构成的凸壳内的点进行插值（即内插），则有较高的可信度。对于位于凸壳外一定距离的点进行估值，则称其为外推。图6－11。

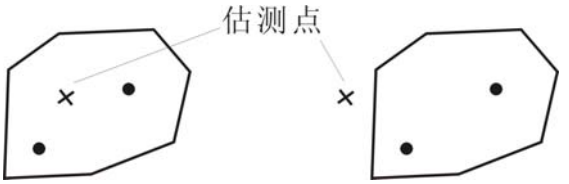


图 6－11 点的内插和外推

最常用的空间插值是针对规则的空间分布点来估计其专题值，如对不规则空间分布控制点按正方形格网插值。空间插值也用来估计面单元中丢失的信息值。除了利用插值所得到的数值来直接显示外，也将这些估计值加入到数据库中，以用于以后的其它形式的空间分析。

一种方法是假设在一个插值点上要确定一个未知值，那么它与邻近的控制点相似或有正自相关关系。则一个最大化最小相似性的方法是：

$$\text{Min}\left(\sum_{i=1}^{N} w_{ij}(z_i - z_j)^2\right) \qquad (6-11)$$

其中N是邻近的已知点数；

z_i是第i个已知点的专题值

z_j是第j个未知点待估的专题属性值

w_{ij}是第i，j个点间的连接关系（权）。

式6－11的常态方程是：

$$\sum_{i=1}^{N} w_{ij}(z_i - z_j) = 0 \qquad (6-12)$$

重新整理后的式子如下：

$$z_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_{ij} z_i}{\sum_{i=1}^{N} w_{ij}} \qquad (6-13)$$

式（6－13）定义了一种最常用的空间插值方法，它也称为移动加权平均，这是因为已知值是通过一些连接关系来赋权重的，而这个关系在移动到一个新的未知点时，每次都要进行更新。当计算空间自相关指数时，已知点和未知点间的连接关系可有多种形式存在。

如果已知点是未知点的邻域（可能共享点集的Thiessen边或多边形的弧段），最简单的关系就是设$w_{ij}=1$；如果对象不相邻则设$w_{ij}=0$（图6－12）。这时，未知对象的插值就是它邻近对象的平均值。这种方法的缺陷是对所有的临近点都给予了相同的重视程度。一个改进的方法是让w_{ij}等于已知对象和未知对象间共享边的长度。这样，邻域共享边越长就越重要，反之，共享边界越短其对邻域的影响就越小。

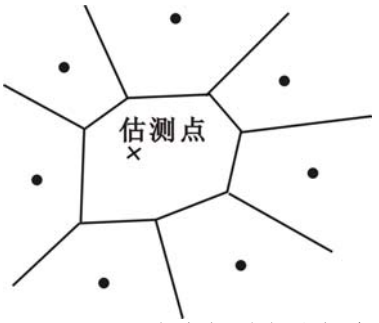


图 6－12 一个未知对象的邻域

另一个确定点分布权集的常用方法是基于距离的倒数。在这种情况下，每个已知对象的相对重要程度是其一个距离的函数，$w_{ij}=d_{ij}^{-\alpha}$，其中i在j的邻域中。阻抗系数α是距离指数，且α>0。对象越近权越大。距离倒数加权的一个方法是使α为一个很大的正数。权重的这个作用是使除了未知对象的最近邻域外，将其他所有已知对象的重要性减到最小。因此，这个求权过程类似于在包含未知点的控制点集的Thiessen铺盖中查找相应的Thiessen多边形，图6－13。由于在同一个Thiessen多边形中的所有未知点都有相同的插值，这样插值曲面就会成为阶梯状曲面，梯状曲面的边界就是Thiessen边，图6－14。

另一个常用的求权方法是距离权平方的倒数，$w_{ij}=d_{ij}^{-2}$。在这种插值方法中，越靠近的对象赋予的权就越大，其插值曲面也就越光滑，图6－14。但这种距离倒数函数的缺陷是其空间阻抗因子由外在因数确定，而与所研究的表面无关。

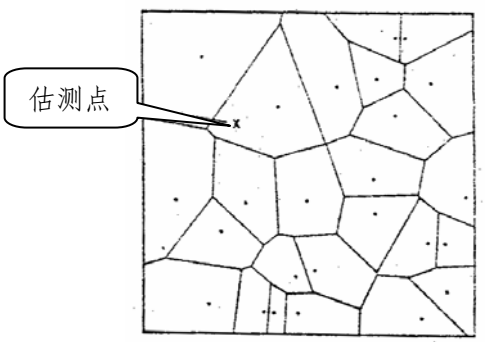


图 6－13 估测点的最近邻域

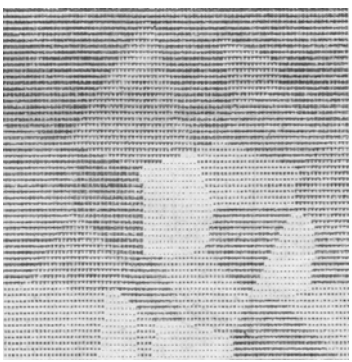


图 6－14 最近邻域的加权

估计权值的另一个方法是将一个空间阻抗函数$w_{ij}=f(d_{ij})$作为每个未知对象的局部邻域。构建一个方差图，在这个图中，已知点对间的变化按照它们的距离绘出，见图6－15。用来回归分析来逼近两坐标轴间的关系（图6－16）。如果它们的关系是非线性的，那么就可能要对其中一轴或两个轴做对数变换。对线性关系，强制估计线通过原点，则$w_{ij}=1/(\beta d_{ij})$。对于对数/线性(log/linear)关系，$w_{ij}=e^{-\beta d_{ij}}$；而对于对数/对数(log/log)关系来说，

$w_{ij}=d_{ij}^{-\beta}$。在每种情况下，距离值的阻碍系数β，就是估计回归线的斜率。

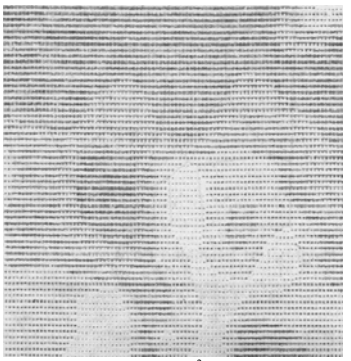


图 6－15 用 d_{ij}^{-2} 来插值曲线

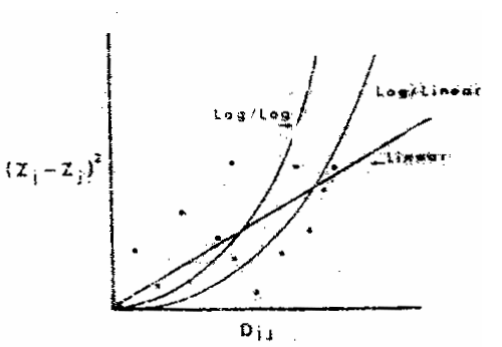


图 6－16 从方差图中估计距离衰减函数

距离倒数加权的另一个缺点就是插值结果对已知点簇敏感。为了减少点簇的影响，Shepard建议通过合并邻近控制点和未知点间方位角的余弦值来修改距离倒数权，图6－17。第i个控制点的方向间隔T_i通过下式计算：

$$T_i=\sum_{k=1}^{N} d_{kj}^{-1}(1-\cos\theta_{ik}) \qquad (6-14)$$

这里$\cos\theta_{ik}$是第i个控制点与第j个控制点间夹角的余弦值。如果第i个控制点和其他控制点间的夹角接近于0，那么T_i的值也接近于0；相反，如果第i个控制点和其他控制点间夹角都接近于180°，那么T_i的值近似于是距离倒数的两倍。对第i个控制点的权纠正如下：

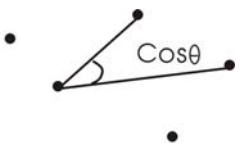


图 6－17 控制点间的方向夹角

$$w_{ij}=d_{ij}^{-2}[T_i / (\sum_{k=1}^{N} d_{kj}^{-1})] \qquad (6-15)$$

使用局部邻近对象的另一个不同的插值技术是Kriging。Kriging是作为一种优化插值程序发展起来的，利用它不仅可以对曲面进行插值，同时也可以估计给定曲面上的插值精度的误差，详见有关文献。

第二类插值操作称为全局插值，它同时估计整个曲面的值。这样一个插值技术是趋势面拟合。在趋势面拟合中，假定x，y坐标为独立变量，而专题属性值z则以x，y的多项式给出。多项式函数的最高次方就是我们所知道的趋势面的阶次。一次趋势面用一个平面去拟合已知控制点集，图6－18；二次趋势面拟合一个二次曲面，图6－19。多项式系数通过最小二乘回归分析求出，它能使控制点的估计值与已知值之间差的平方和最小。趋势面拟合的一个特征就是控制点的值只能通过拟合函数来近似得到。更好的逼近可以通过升高曲面的阶数来获得，但是这种趋势拟合会引入高频噪声到趋势面中，而这种噪声在原始曲面中原本是没有的。

通过插值格网派生的数值，可以通过分类并通过指定一个相应的灰阶符号而直接显示，或者将格网数值用作其他显示操作的数据源，如构造等值线和三维景观的显示。

6.2.3 等值区域图制图

将要显示的数据聚合或赋值为离散区域的一种重要的专题地图是等值区域图

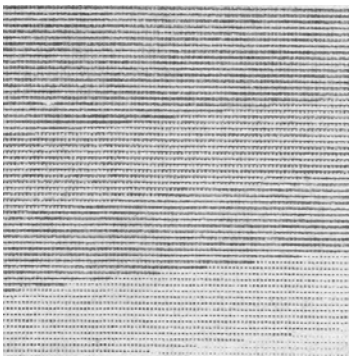


图 6－18 一次趋势面

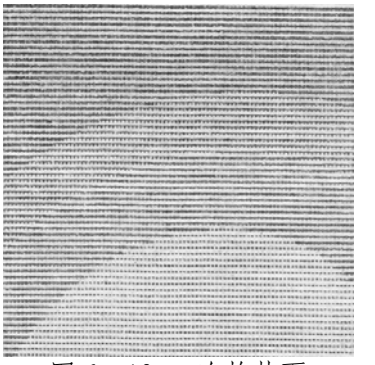


图 6－19 二次趋势面

(choropleth mapping)。它可用于显示定名、顺序、间距或度量属性。对于间距或度量属性，等值区域图是离散表面的平面显示。在概念模型中，将一组平行平面按等级之间的间距按高度相继穿过表面，从而获得结果表面的平面显示。图6－20。表面在这组平行平面之间的部分则以一单独的高度值表示(通常是两平面间表面的平均高度值)。表面的二维表达则可通过表面同平行平面的交点的轨迹描绘而成，也可将两相继平面之间的区域的正射投影加上不同的明暗度渲染来表示。

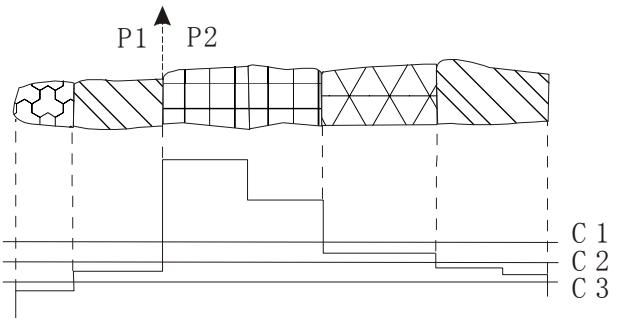


图 6－20 离散表面的平面表示

对于一个离散表面来说，面域渲染比描绘交点的轨迹更合适，因为在投影面上两个或两个以上的分级界线会占据相同的地理位置。在图6－20中，弧A是多边形P1和P2的边界，同时也是分级界线C1和C2之间边界的一部分。边界线的相交是因为该处正是表面的突然间断处。这种情况下，读者的注意力应该放在分界线之间构成的面域而不是边界本身的位置。

在等值区域图中，区域间的边界按要显示的属性独立确定。一组边界如省界可以表示许多属性信息。作为其相关的地图类型——类型图(area class map)，其类型面域间的边界是通过属性分布本身来确定的，如土壤图或植被分类图。类型图中的边界比等值区域图中的边界要更模糊一些，而且只对应一种属性。除开这些不同，两种地图的显示算子还是相似的。

等值区域图的制图步骤是：1)将数据值按分级界限值分组(对于无级地图这一步不需要)；2)选取表示每一等级(或单个数据值)的合适的符号,3)在矢量设备绘制晕线或点填充面域，或使用栅格设备渲染。如果绘制属性是类别变量，则第一步可舍去。如图6－18是等值区域图的例子。

6.2.3.1 多边形晕线填充

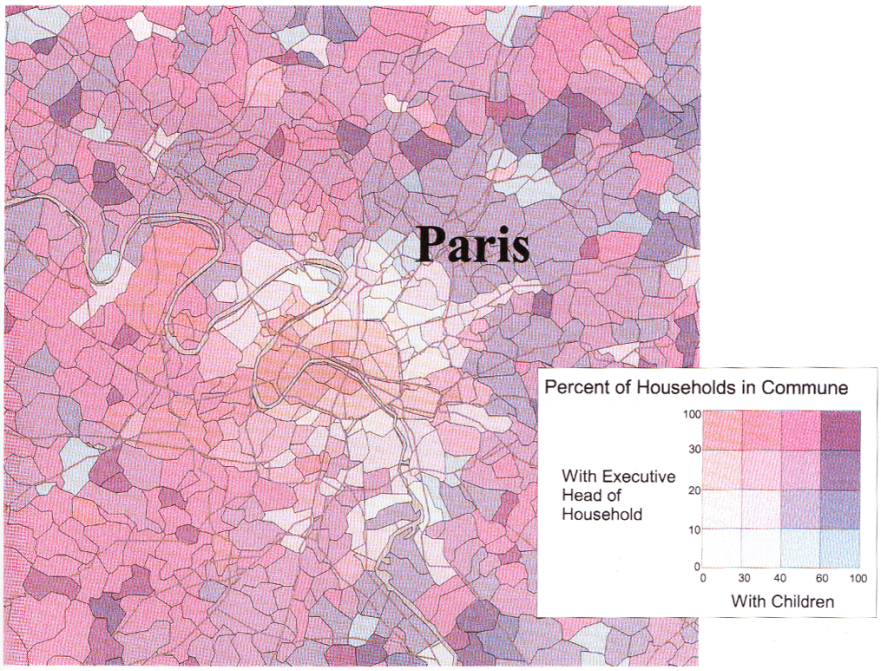


图 6－21 等值区域图的制图

一种常见的绘制等值区域图的策略，是按一定的次序对每个数据区对应的多边形进行填充。这种次序通常不是基于地理上的排序，如为了使象绘图机这样的输出设备的总的移动量最少，而是按照数据区名称的字母排序。不管哪种情况，多边形的晕线填充算法要求代表某值的晕线与起点对齐。相邻区域如果属性值相同，这两个区域的晕线则完全对齐(如图6－22a)。从视觉上看，如果晕线不这样对齐，那么数据类别与值之间的一一对应关系则很难保持(图6－22b)。



(a) (b)

图 6－22 晕线的对齐

通过固定晕线位置，使之同X轴平行就可以保持这种特性。首先将坐标轴按晕线的方向角旋转(图6－23)。然后在旋转后的坐标空间中找到多边形的最大Y坐标(YMAX)。穿过多边形的晕线中最顶端的那条Y坐标可以根据下式计算：

$$Y^{*}=\mathrm{INT}\,[\mathrm{YMAX}\,/\,\mathrm{DELTA}\,]\ \times\ \mathrm{DELTA} \qquad (6-16)$$

其中INT是最大取整函数；DELTA是晕线间的垂直距离。

取得多边形晕线中的最高一条的Y坐标后，其他各晕线的Y坐标可以通过将Y^{*}依次递减DELTA值来得到，这个过程直到该多边形中再没有晕线经过时停止。

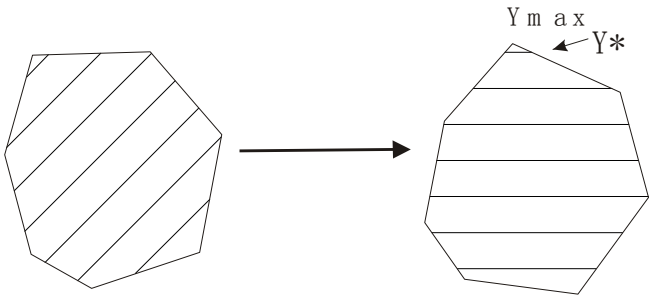


图 6－23 按晕线的方向角旋转坐标轴

绘制多边形晕线有三种基本方法。在“单线法”中，首先将多边形先旋转一个方向角，然后依序每次一条晕线地分别处理各线。下一步检查多边形轮廓的每一段，判断其是否与所处理的晕线相交，保存交点并按X坐标排序。这种排序是为了通过一系列（移动，绘制）对操作来保证恰当地绘出晕线。如在图6－24中，第一个交点(X_1,Y_1)是V_4V_5边与晕线的交点，第二个交点(X_2,Y_2)则是V_5V_6边与晕线的交点。我们不能移动到(X_1,Y_1)，然后画线到(X_2,Y_2)，因为这段线位于多边形之外。第一次移动必须从(X3,Y3)开始，这样依次进行（移动，绘制）对操作才不会出错。

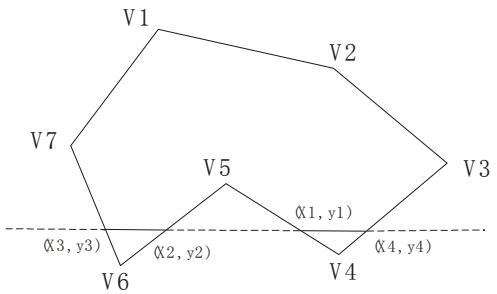


图 6－24 一条晕线的绘制

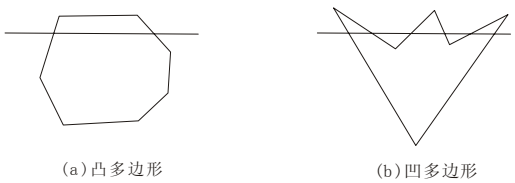


图 6－25 晕线段

最后所有的交点旋转回原始多边形空间显示。“单线法”主要的优点是简单，存储量小。一次只要存储一条晕线的交点。对于凸多边形，每一条晕线只需要一条线段表示(图6－25a)。而N个顶点的凹多边形则至多只要N/2个线段就可以表示一条多边形内的晕线(图6－25b)。但这种方法的计算量可能由于晕线的密度发生变化而产生较大波动。

另一种方法是“绕行(walk-around)”方法。其原理是环绕多边形一周以计算所有晕线与多边形的交点(图6－26)。由于多边形边界只需要测试一次，而不是对于每条晕线都要计算，因此其计算效率提高了很多。其次，多边形每条边的交点序列是利用与上一交点的X,Y坐标的偏移来计算，而不是通过线段相交方程来计算每个交点。其主要的缺点是在绘制晕线之前必须把所有的交点存储起来。这种方法由于存储量的原因，对晕线的密度也很敏感，

对于顶点太多的多边形计算量则相当大。

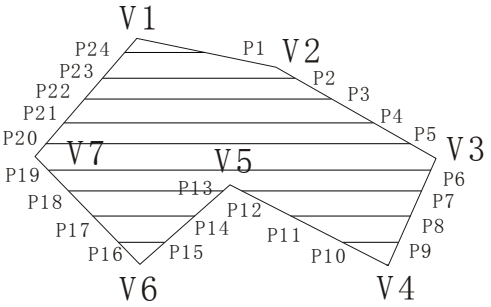


图 6－26 绕行法填绘晕线

第三种方法是将多边形分成若干个凸梯形(图6－27)。每个梯形分别处理，在每个梯形内对每条晕线计算出一对交点坐标并绘出。交点计算使用位移方法而不需要进行排序，因为在一个梯形内只有一条晕线段。

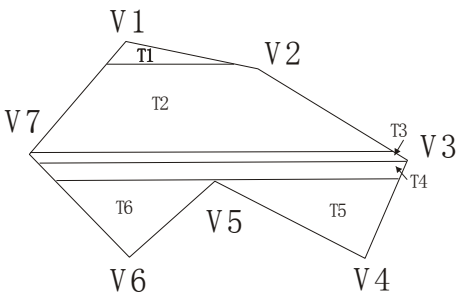


图 6－27 多边形的梯形划分

由于这些梯形都是各自独立地进行晕线填充，所以交点的计算可以在原始空间中进行而不需要旋转，只需简单地计算X,Y的偏移量：

$$DX_i = DIST \times XD/XD' \qquad (6-17)$$

$$DY_i = DIST \times YD/YD'$$

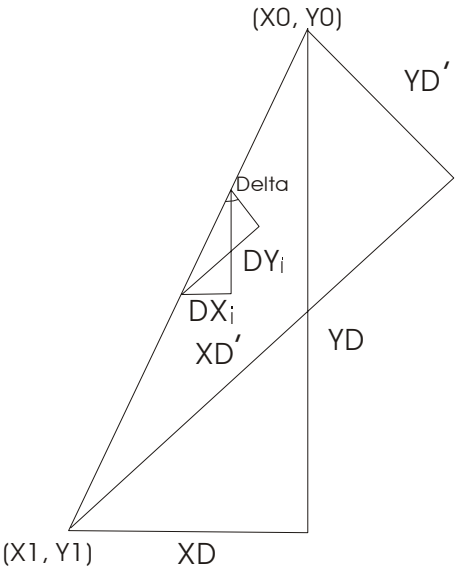


图 6－28 计算偏移量

其中DXi是对于第i条边的X偏移量；

DYi是对于第i条边的Y偏移量；

DIST是晕线间的垂直间距；

XD和YD分别是原始空间中边的两端点的X,Y距离(如图6－28)；

XD’和YD’分别是旋转空间中边的两端点的X,Y距离(如图6－28)；

多边形的顶点只需要处理一次。唯一主要的额外计算是在梯形以某种顺序提取出来之前，多边形顶点要按Y坐标排序。可以按多边形顶点的Y坐标从大到小的顺序处理每个顶点，由此来识别各个梯形。

交叉晕线的填充是先在多边形内填充一组平行线，再以另一组平行线垂直于前一组平行线填充的方法可以得到交叉平行线填充的效果。这个过程在计算后一组垂直平行线的时候要交换X，Y坐标轴。每种方法的主要计算量和存贮要求列在表6－1中。

表 6－1 晕线填绘方法的比较

方法	晕线坐标存储	轮廓线处理次数	晕线排序次数	晕线交点求法	按 Y 坐标排序
单线法	N/2 max	M	M	独立求交	是
绕行法	M*(N/2 max)	1	M	DX, DY 偏移	否
梯形法	N/2 max	1+(NlogN)	1	DX, DY 偏移	是

N＝ **多边形顶点数量**　　M= **晕线数量**

6.2.3.2 区域填充

栅格设备输出符号的过程由于区域编码模式的不同而有所不同。如果各区域都在某一栅格数据结构中进行了编码，那么该区域的每个象素就可以赋予区域对应的符号值。例如，在扫描线数据结构中，一根扫描线中的每段的各象素都赋予各自的区域值。如果组成等值区域图的所有区域要同时显示，每根扫描线的赋值和显示都是独立于紧邻的其他扫描线。这在按线输出的打印机来说是很常见的策略，因为一旦打印机打印到下一根线的时候，就不可能在回到上根线来重新绘制。如果某区域要在按序排列的其他区域前输出，扫描线按序处理并只输出该区域中经过的扫描线段。这个过程对于每个输出区域都是同样的重复过程。

如果区域是用矢量数据结构编码的，那么首先必须先进行矢量－栅格转化以便确定同每条多边形边对应的栅格单元。这个转换过程只需要对线填充的过程进行少许变化。在这种情况下，水平扫描线以相当于输出设备的精度的间隔填充多边形。整个过程分三步：1)计算扫描线同多边形所有边的交点；2)将这些交点按X坐标的从小到大排序；3)在交点对间填充象素(如图6-29)。头两步与上一小节讨论的“单线法”相同。最后一步则指出它们的

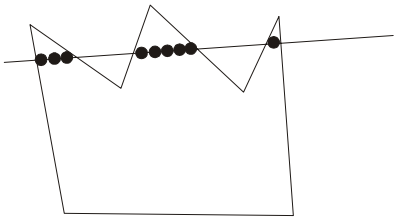


图 6－29 多边形－扫描线的转换

不同，即不是从一个交点到另一交点的线段绘制，而是确定扫描线段的起始象素并赋以相应的值。其他的线填充方法也可以同样方式改造成象素填充。

6.2.3.3 层次多边形合并

目前多边形晕线的填绘依然是互相独立的。这种方式的一个主要缺点在于如果一条晕线经过多个数据区，该线就被分成多条线段并分别处理。例如图6－30中的晕线S经过多边形A和B。如果A和B是分别填充的，那么在填充A的时候S就要按三条线段绘制，而填充B时则又按另三条绘制。如果A和B合并成一个多边形，S就只要绘制一次。

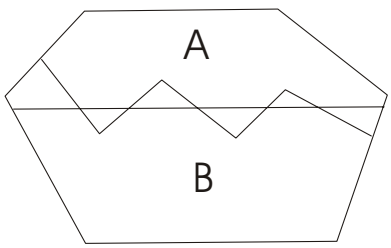


图 6－30 被多边形边界分割的晕线

在线填充计算的时候，作为两个不同多边形轮廓一部分的边界要处理两次，这样要计算的点的数量就大大增加了。改进的方法是对于属于同一分级间隔内的区域，在进行填充之前，将其中的内部边界删除(如图6－31)。这样，按照与所要显示的属性相对应的专题等级，每个多边形都要做相应的合并或综合从而形成较大的地理区域。

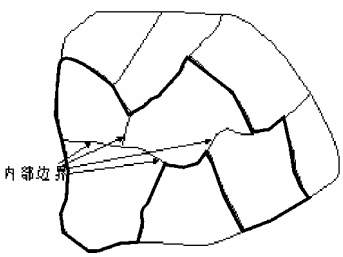


图 6－31 同一等级区域的内部边界

这种合并方法得到的好处与内部可删除的边界的数量成正比，而这些边界取决于归类结果的一阶空间自相关系数的大小。例如，图6－32a表示的是4个高度聚集的空间类别，而



(a)　　(b)

图 6－32 空间群集和非群集分类

图6－32b显示的是4个几乎不成群的空间类别。在图b中就无法在类别中进行内部边界的删除，这样多边形的填充就应该独立进行。因为这种情况下额外增加的合并操作并不能带来边界的删除，进行多边形合并只会增加计算量。

合并过程所采用的方法取决于地理底图的结构特征。例如，在SAS/GRAPH系统中使用多边形面条模型来将单个多边形合并成较大的制图目标。然而，合并操作必须首先确定相邻多边形的公共弧段和点，计算量就会比较大。更为有效的合并操作可与图形拓扑结构结合，这样合并操作就可基于链而不是基于链中的点为单位进行了。

在第三章中，单个多边形边界的提取采用的是链文件与包含多边形起始链段的点文件互相参照的方法。在这种方法中隐含的事实是每条链段的另一侧多边形属于不同的类别。对基于数据分类分级来将多边形聚合成更大的区域这种问题来说，我们需要的是提取每个大区域的轮廓。而对于底图中的链段，它要么位于某个大区域的内部，要么在区域的轮廓上(如图6－33)。后者容易判别，因为链段左右的多边形属于不同的类别，而前者的左右多边形可能都属于或都不属于给定的类别区域。

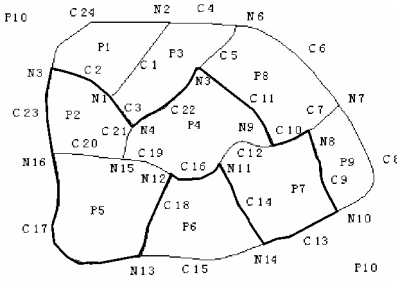


图 6－33 拓扑目标

如果找到了合并多边形轮廓的第一条链段，就可以沿着这条链段往下寻找，依据是下一条链段的右侧是这个大多边形。对于当前大多边形轮廓的链段，下一条链段应该是当前链段的左侧链或右侧链，这取决于当前链段的左侧还是右侧多边形属于合并多边形。如图6－31中，组成分级类别区域的多边形需要提取出其外部轮廓以进行合并。图6－33给出了该图形的拓扑关系。外部轮廓的第一条链段如果是C2的话，下一条就是C3，因为C2的右侧多边形是属于合并多边形(所以选择C2的右侧链段C3作为下一条链段)。组成整个轮廓的所有链段顺序参见表6－2。

表 6－2 组成轮廓的链段顺序

当前弧链	右多边形	右弧链
C2	P2	C3
C3	P2	C22
C22	P4	C11
C11	P4	C10
C10	P7	C9
C9	P7	C13
C13	P7	C14
C14	P7	C16
C16	P4	C18
C18	P5	C17
C17	P5	C23

C23	P2	C2

在下面的算法中，K是文件中链段总数；C是一条环起始链的编号；M是环的当前链编号；N是下一条待处理的链段编号；P是环当前右侧多边形编号；rpoly，lpoly，rchain和lchain分别是提取给定链段的右侧多边形，左侧多边形，右侧链段和左侧链段的函数：

步骤 1)选取某一分级类别；如果所有分类区域的轮廓都已经标明，则停止，否则继续下一步。

步骤 2)把所有的链段设置标记为“off”，并设置每个链段ID的值C为0，继续下一步。

步骤 3)令C=C+1；如果C大于K，跳到第8步，否则继续下一步。

步骤 4)如果链段C的标记为“on”,回到第3步，否则把标记改为“on”，令M＝C并继续下一步。

步骤 5)如果与M关联的所有多边形都属于或都不属于当前的合并多边形，回到第3步，否则继续下一步。

步骤 6)如果M右侧的多边形属于合并多边形，令N＝rchain(M),P=rpoly(M)；否则令N＝lchain(M),P=lpoly(M)。将N的标记改为“on”，继续下一步。

步骤 7)如果与N相关的两个多边形都属于合并多边形且P=rpoly(N)，令M=lchain(N)并改M的标记为“on”；如果与N相关的两个多边形都属于合并多边形且P＝lpoly(N)，令M=rchain(N)并改M的标记为“on”。当且仅当P属于合并多边形，令M＝N。

步骤 8)如果M≠C,将M加入到轮廓链段集合中，并回到第6步；否则，一条合并多边形的轮廓已经完成，回到第3步去枚举其他的弧段环。

步骤 9)到此一个合并多边形的所有内部和外部的弧段环全部枚举完毕，填充这个区域并回到步骤1。

这种多边形的合并操作与下一节将要讨论的等值线地图制图中的线跟踪操作有一定的相同之处。

6.2.4 等值线制图

等值线地图是指使用表示相同数值的线集合来描绘一连续表面的表达方法。同等值区域图一样，一组水平平面以一定的等级间距按高度相继穿过表面(图6－34)。二者的一个显著不同在于等值区域图的位置变量是固定的，其描述的是专题变量，而等值线地图则相反。一般而言，为便于理解以及在表面之间进行比较，等值线制图通常按等间距分级。对于连续表面，一组水平平面同表面相交而得到的等值线可以一起绘出并注记相应的值。这是因

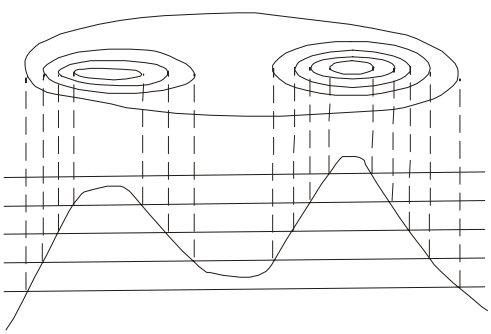


图 6－34 连续表面的平面表示

为在投影面上，即使要表示许多数据间距，它们也不会占据相同的地理位置。

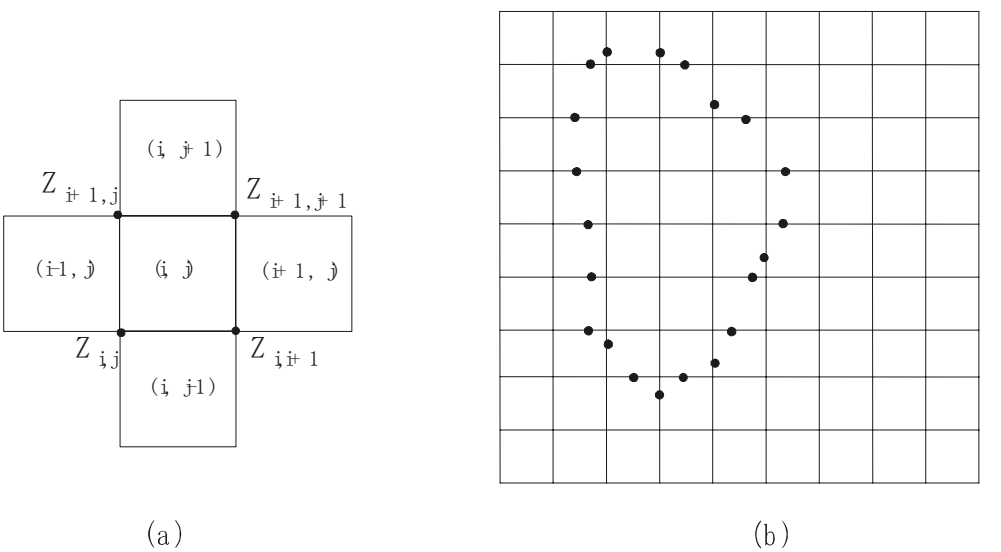
虽然等值线图表示的是一个连续表面，但它们可能是通过立体测图仪从一对正射影像上跟踪每条等高线来获取高程的，也可能是从一些选取的控制点来测量其他的连续属性。了解原始控制点的选取方法很重要。如果这些控制点的选取是有意识地选取反映局部的极大、极小值以及拐点，那么点的分布就很可能反映了较大的一阶负自相关，因为这时会加大同附近区域的不相似性。另一方面，如果点的选取同所研究的表面并无多大关系，对于一阶自相关程度的估计就更加困难。在第二种情况下，插值表面比第一种情况反映原始表面的近似程度要差。不幸的是对于许多表面来说，很难事先得到特征点的位置。诸如温度和气压这样的连续变化的表面在取样之前是不能直接观测的。

选取控制点的一个好处在于点的位置（如气象站）可能反映的是许多变量。在这种情况下，基于同一地理底图可以制作出一系列的等值线图。

6.2.4.1 网格法

一种建立等值线地图的方法，是在一组z值的规则网格中追踪等值线。追踪等值线的一个惯例是沿顺时针方向，这样，比当前等值线的zi值大的z值总在追踪方向的右边。如果原始数据不是以规则网格采样，那就首先需要从不规则的数据分布中内插出规则网格的z值。

通过网格追踪等值线方法的优点，在于网格可以按照行列编号隐式地建立起邻域间的位置关系。一旦一条等高线从网格单元(i,j)的四个邻接单元(i-1,j),(i+1,j),(i,j-1),(i,j+1)之一进入它，就应当退出该单元并继续往其余三个网格单元追踪(图6－32a)。在确定当前单元的哪条边作为退出边时，要看该边两端点的z值范围是否包含了zi值。等值线在退出边上的准确位置通常使用内插方法确定，因为这里的z值都已知，因而其位置坐标可以计算得到。由于网格单元四个端点的z值都已知（给定或前面的空间内插步骤计算得到），所以该内插是在网格单元的边上进行的。在得到等值线与网格的交点以后(图6－35b)，可以按顺序直接绘出，也可以使用线性增强程序绘制出光滑的曲线等值线。



(a)　　(b)

图 6－35 在规则网格中追踪等值线

网格方法的一个缺点在于如果出现“鞍点”，决定追踪方向就会变得困难。在这种情况下，一个网格单元内可能会出现多于一条的有相同z值的等值线段。例如，在图6－36中，值为50的等值线可以连接S1和S2，S3和S4，也可以连接S2和S4，S1和S3(图6－36b)。而连接S1和S4，S2和S3(图6－36c)在数学上是可能的，但是从制图角度上说不行，因为等值线是不能交叉的。

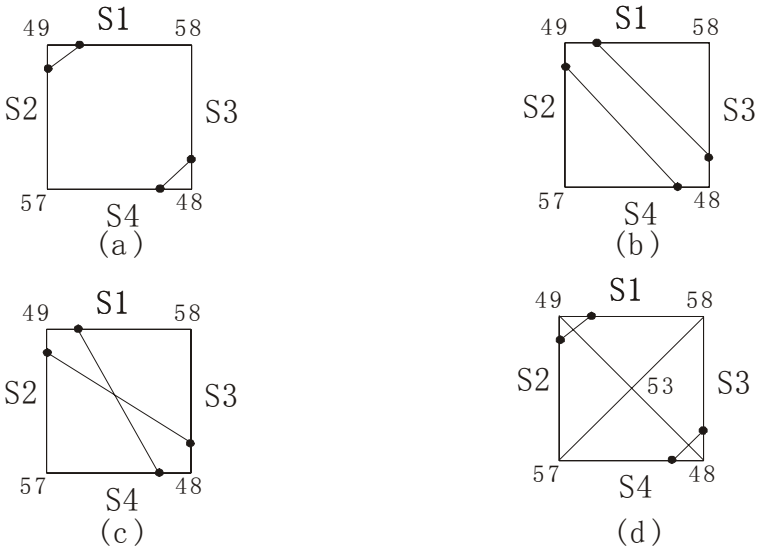


图 6－36 鞍点问题

解决这种不确定性问题的一种方法，是基于四个端点的z值内插出网格单元的中心点的z值，然后把单元分成四个三角形(图6－36d)。对于每个三角形来说，由于其只有三边，就不存在难以确定追踪方向的问题；如果一条等值线从三角形的一边进入的话，只可能从另外两边的一边中出去。网格中心点的z值为53，所以应该把S1与S2，S3与S4相连。

另一个问题是如果原始数据不按照规则网格进行采样的话，任何的空间内插方法都可能会给表面带来更多的误差。绘制等值线算法应当尽量使用原始的数据分布。

6.2.4.2 三角剖分法

基于三角剖分的方法，是直接从不规则的空间点分布中追踪得到等值线的。这样就不需要通过内插方法构建规则网格了，取而代之的是使用三角网来连接控制点并将这个三角网存储在一个拓扑数据结构中。尽管对于同样的控制点可以有不同的剖分方式，一般常用的是Delaunay三角剖分（参见第三章）。计算出来的三角网存储在一定的数据结构中，这个结构就可以作为地理底图文件，为一系列使用不同的分级间距或属性的地图所使用（假定控制点的位置对于每个属性都是一定的）。

根据存储结构是树还是三角形索引文件，可以有不同的追踪等值线方法。使用三角索引文件可以采用类似多边形合并的步骤来追踪等值线。例如，对于图6－37a给出的控制点三角剖分，可以建立起一个三角索引文件（表6－3）。图6－37b表示的是等值线从一个三角形到另一个三角形的跟踪顺序，这类似于前面所述从链段到链段的移动判断顺序，从而追踪一个分级区域的多边形内、外环的过程。一个分级区域的多边形环就是等值线本身。

如果组成等值线的交点是按照顺时针方向计算的，那么比等值线z值高的控制点总是位于等值线的右侧。对于图6－37b给出的等值线走向，它穿越的第一个三角形为T1。因为控制点C2必须在等值线的右侧(C2的数值大于等值线上的值)，所以下一个三角形是T4，则S3边就同等值线产生了交点。在表6－4中给出了等值线经过的三角形顺序，以及与等值线相交的每条三角形边的交点。当一组交点全部得到后，就可以使用线性光滑程序进行拟合等值曲线的绘制。

表 6-4 等值线交点顺序

三角形	后续三角形	退出边	右控制点
T1	T4	S3	C2
T4	T5	S22	C4
T5	T9	S11	C4
T9	T8	S10	C7
T8	T10	S9	C7
T10	T14	S13	C7
T14	T11	S14	C7
T11	T12	S15	C4
T12	T13	S18	C5
T13	T16	S17	C5
T16	T3	S23	C2
T3	T1	S2	C2

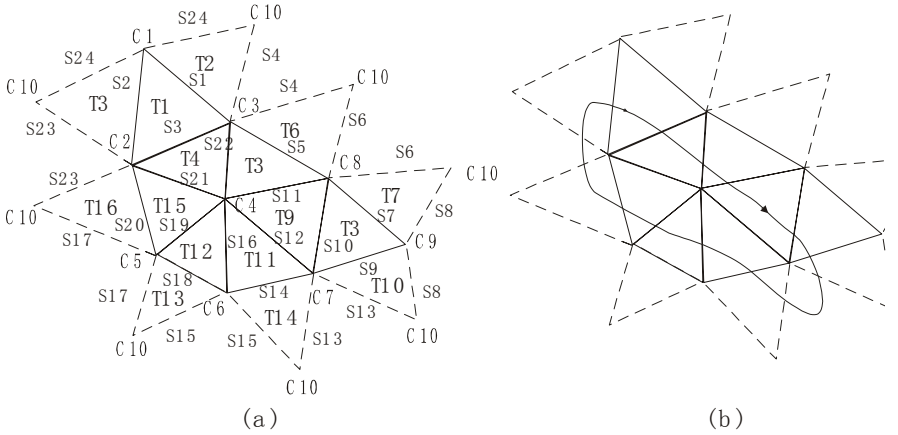


图 6－37 三角剖分和等值线追踪例子

6.2.5 开窗和剪裁

大部分地图显示的位置，范围和大小都是通过窗口和视口来决定的。这个过程包括了用户空间同硬件空间的协调（参见第二章）。假定坐标(UMAXX,UMAXY)和(UMINX,UMINY)为用户空间的上下限(图6－38a)，(HMAXX,HMAXY)和(HMINX,HMINY)为相对应的硬件空间的上下限(图6－35b)。“窗口”决定了用户空间的显示部分，而“视口”用于显示用户窗口的硬设备的显示部分。例如在图6－38中，(ULX,ULY)和(UHX,UHY)是用户窗口的最小最大坐标，而(HLX,HLY)和(HHX,HHY)为硬件视口的最小最大坐标。

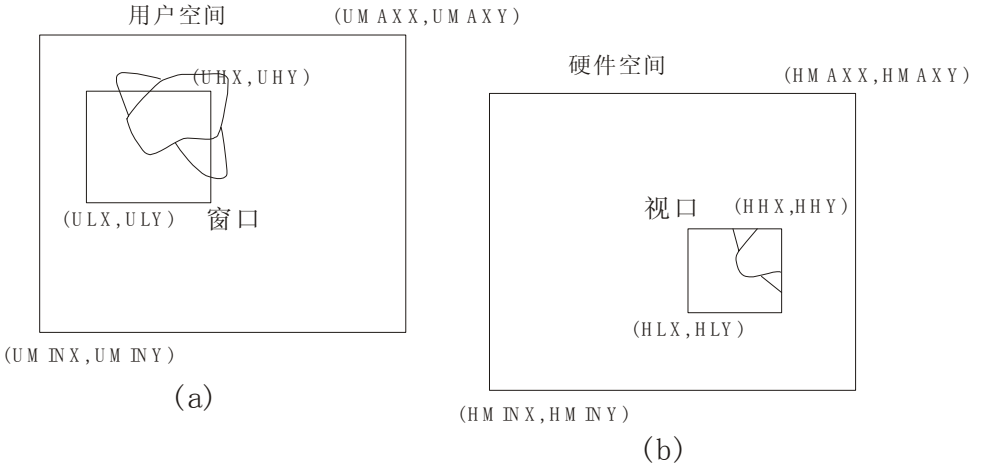


图 6－38 窗口和视口

在最后的显示中，坐标(ULX,ULY)的位置与(HLX,HLY)相匹配，而(UHX,UHY)也与(HHX,HHY)的硬件位置相匹配。整个转换过程如下：首先将用户空间的原点位置移动到(ULX,ULY)，然后将新坐标按硬件空间的单位进行放缩，最后将所得值按新的以(HLX,HLY)为原点的坐标系进行换算。

变换的缩放因子SX和SY通过下列式子计算：

$$S_X = (HHX-HLX)/(UHX-ULX)$$

$$S_Y = (HHY-HLY)/(UHY-ULY) \qquad (6-18)$$

如果最后的显示没有变形的话，窗口的纵横比(也就是高度同宽度的比率)必须等于视口的纵横比，这种情况下，各自的缩放比例是相等的。从用户空间坐标(X,Y)到硬件坐标(X’,Y’)的窗口变换可以通过下式得到：

$$X' = HLX + S_X \times (X - ULX);$$

$$Y' = HLY + S_Y \times (Y - ULY); \qquad (6-19)$$

由于只有位于用户窗口中的地图部分才需要显示出来，因此位于窗口外的地图部分就要剪裁掉。对于栅格模式来说，剪裁操作相对容易：只需要显示位于硬件窗口内栅格位置上的内容。而对于矢量模式来说，剪裁就要复杂一些。根据同用户窗口的关系，位于用户空间中的线段可能有以下三种情况：1)两端点都位于窗口内；2)一个端点位于窗口内，另一个在窗口外；3)两端点都位于窗口外。

如果两端点都位于窗口内部(如图6－39中的线段A)，整个线段都要被显示。如果只有

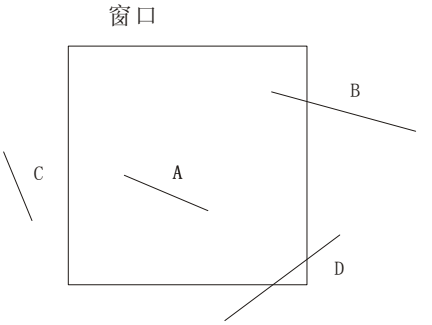


图 6－39 各种剪裁情况

一个端点位于窗口内(如图6－39中的线段B)，则需要显示线段的一部分。如果两端点都位于窗口外，则有两种情况，要么整个线段都位于窗口外(如图6－39中的线段C)，或者是一部分线段位于窗口外(如图6－39中的线段D)。

剪裁时，为了将用户窗口中的图像显示在硬件视口中，必需限制设备的“移动”和“绘制”顺序。如果允许在视口外部移动设备，就有可能使“移动”出现在设备本身的物理界限之外。这个问题可以通过记录当前硬件位置(CHX,CHY)和用户空间位置(CUX,CUY)之间的相对差距来解决。在用户空间中，尽管有可能在用户窗口的外部求取某一位置的值，但当前的硬件位置绝对不能离开硬件的视口范围。

由于位于窗口之外的空间目标同时也一定是位于视口之外，线段的剪裁就可能有两种方法：1)在端点坐标转换成硬件空间坐标之前就把位于用户窗口之外的线段剪裁掉；2)先把各线段转换成为硬件空间坐标，再根据视口进行剪裁。显然前者的转换计算更少因而计算效率更高。给定一个多条线段组成的线串可以一次性进行处理，先找到其外接矩形，如果外接矩形同窗口无交点，那么就把这个线串剪裁掉(图6－40)。如果这个矩形同窗口有交点，则每条线段必须按次序分别处理。

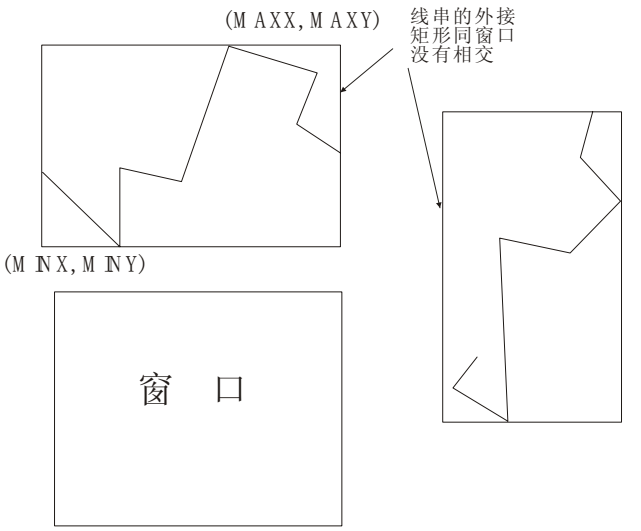
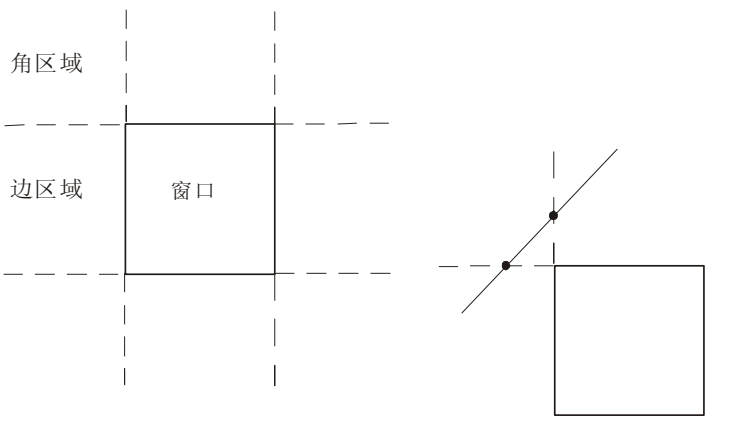


图 6－40 将位于用户窗口外的线段串全部剪裁



(a)窗口对平面的划分　　(b)不必要的交点计算

图 6－41 窗口检查

大部分线段的剪裁算法都是基于Cohen-Sutherland的位－平面方法。在这种方法中，窗口把这个平面分成九个区域(图6－41a)。点的x,y坐标如果都位于四个角区域中的任一个，那么该点位于窗口外。如果点的x或y坐标位于四个边区域的任一个，那么这个点也在窗口外。除了角区域和边区域，就是剪裁窗口了。根据上面的讨论，如果一条线段的端点都位于窗口的内部，那么这条线段就全部显示出来。而两端点都位于窗口的同一条边界外，这条线段就要全部剪裁掉。只有当端点一个位于窗口外，一个在窗口内，或者两端点都在窗口外但是线段穿过不同的窗口边界时才需要进一步处理。

在后面两种情况中，线段需要通过计算与窗口边界的交点来打断以实现剪裁。大部分剪裁算法的主要不足在于不必要地计算了一些最终并没有显示的交点坐标。在图6－41b中，计算了两个交点，由于整条线段都是位于窗口外部的，所以它们在最后的显示中都并没有用到。所以应该在进行求交操作之前确定正确的边界。例如，当线段的两端点分别位于窗口的内、外侧，就会出现两种情形。如果第二个端点位于边区域中，这时线段同窗口边界的交点就位于窗口与边区域的之间。

在图6－42a中，点A位于窗口上方的边区域中，PA线段同窗口的上边界相交。端点A也可以位于一个角区域，此时，需要一个半平面检查来确定正确的相交边界。例如，B和C点都位于窗口的右上方的角区域中。首先计算连接P和C2(窗口的右上角)的直线。如果线段的另一个端点(点C)位于P到C2的直线的顺时针半平面内，线段同窗口的交点就位于右边界上；如果另一个端点位于半平面的逆时针方向(点B)，交点就会在上边界上。

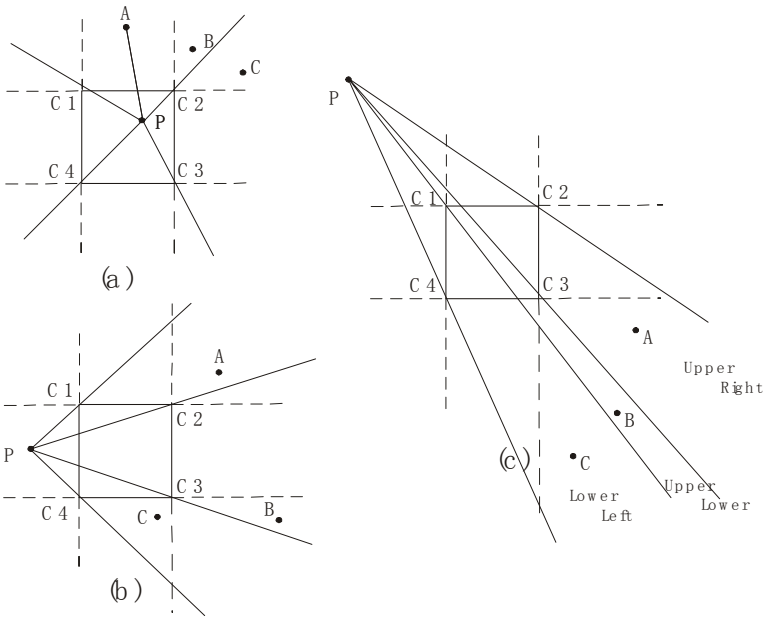


图 6－42 不同的线段同窗口相交的可能性

如果两个端点都位于窗口外，也会出现两种情况。第一种情况，一个端点可以位于边区域中，另一个端点就必须落在其他相邻五个边区域或角区域的一个中，同样可使用半平面方法来检查线段同窗口的相交边界。在图6－42b中，P点位于窗口左侧的边区域中，任何另一端点位于PC1连线的逆时针侧或PC4连线的顺时针侧的线段都会被剪裁掉。如果另一端点位于PC1的顺时针侧和PC2的逆时针侧平面中(如点A)，那么线段就会同窗口的左和上边界

相交。如果另一个端点位于PC2的顺时针侧和PC3的逆时针侧平面中(如点B)，线段就会同窗口的左，右边界相交。最后，如果另一端点位于PC3的顺时针半平面和PC4的逆时针半平面间(如点C)，线段同窗口的交点就会位于左和下边界。

最后，两个端点都可能位于相对的角区域中(如图6－42C)。仍然使用半平面方法确定相交的边界。在图6－42C中，如果P为线段的一个端点，线段如果位于PC2和PC3之间(如点A)，交点就会在上和右窗口边界上。线段位于PC3和PC1之间的(如点B)会同窗口在上边界和下边界上有交点。而线段位于PC1和PC4之间时相交于窗口的左和下边界。

下面的例子可以更加清楚地阐明这些概念。在图6－43中由(L1,L2,L3,L4,L5)组成的线段串穿过用户空间窗口。由于其外接矩形并不完全位于窗口外部，就要分别处理单条线段。L1的第一个端点位于左－边区域中，L1的另一个端点在窗口中，所以要计算L1同边界的交点。交点(xa,ya)位于窗口中，这样硬件游标就移动到硬件空间的相应位置，当前的硬件位置也设置为这个位置。继续绘制窗口内的各线段直到处理L3。

因为（x4,y4）位于上－边区域中，L3同上边界的交点(xb,yb)计算出来后，线段的绘制就到硬件空间中(xb,yb)的相应位置为止。在L5的处理之前，硬件空间中不再采取新的动作。L4线段由于(x5,y5)位于（x4,y4）同窗口右上角连线的逆时针半平面，所以整个被剪裁。而L5位于(x5,y5)同窗口右下角连线和(x5,y5)同窗口左下角的连线之间，所以计算出L5同窗口右边界和下边界的交点，硬件游标现在移动到交点(x_c, y_c)并绘制到另一个交点(x_d, y_d)为止。

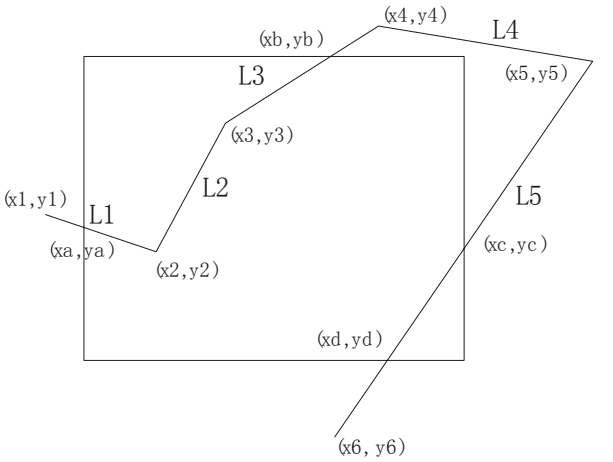


图 6－43 一个剪裁例子

6.2.6 小结

本节主要讨论了二维空间上数字制图目标的各种显示方法。这些制图模型是各种地理现象的表达，它们可以是象地形那样的具体目标，也可以是统计数据如收入。本节的各种显示问题都把表面的第三维当成一种专题覆盖而不是表面的一部分。下面将讨论直接以三维表面的形式来表示制图目标的方法。

6.3 地图数据的三维表示

迄今为止，表现专题属性的方式只是把它们作为一种符号叠置在二维地理底图上。另一种模拟表示属性的方法是作为表面而不是以符号形式来表达。属性的处理是作为地理表面的第三维。第三维中表面的高度是所要显示属性大小的某个函数值。一般来说表面的三维表示很难用手工来完成，而诸如温度和收入这样的属性，其三维表面并不出现在我们的真实视觉范围内，因此绘制它们并不容易。

三维制图并不是没有缺点的。观察角度十分重要，因为表面的一部分可能为其前端的表面所遮掩。因此必须设法保证最大程度地使表面可视化，同时又要保证可以容易地找到局部的显示位置。地图要素的三维表示可分为三个步骤（如图6－44）。首先，制图目标转入适当的观察空间；然后将三维影像投影到一个视觉平面上；最后将表面被遮掩的部分移去。下面先介绍三维解析几何学的基本知识。

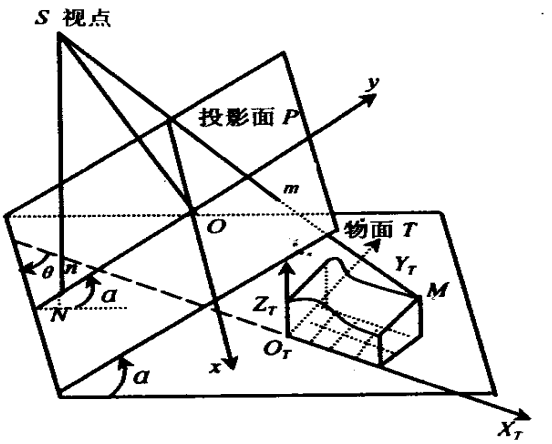


图 6－44 地图要素的三维表示转换

6.3.1 三维解析几何学

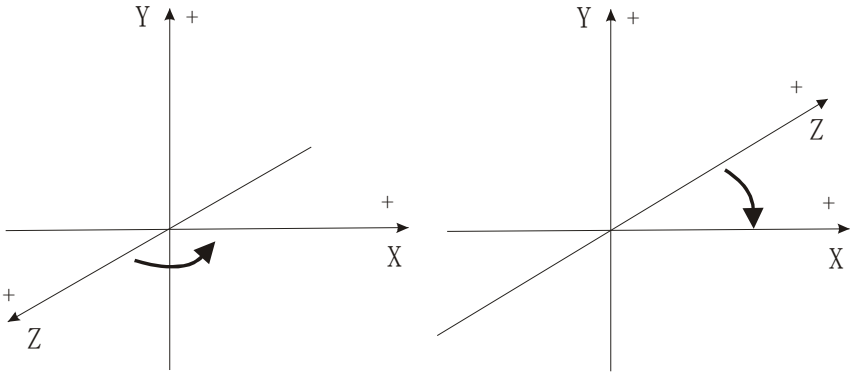
三维制图的坐标系统是按照X，Y，Z轴来定义的。有两种坐标系统可供选择：右手坐标系统和左手坐标系统。右手坐标系统(图6－45a)从Z轴正方向到X轴正方向的转动方向是逆时针方向的，同样的转动在左手坐标系统中却是顺时针方向(图6－45b)。右手坐标系统更为常用，本节讨论就使用这个系统。

这样点p就可以表示为一个(x,y,z)坐标，其各项值就是p在各自坐标轴上的投影。所有的矢量和矩阵变换都可以从二维空间中扩展过来。但对一条直线的定义变得更复杂了。给定两个点$p(x_1, y_1, z_1)$和$q(x_2, y_2, z_2)$，很容易把经过两点的直线以参数的形式表现出来，直线上的任何点(x,y,z)都可以参数t的形式得到:

$$\begin{aligned} x &= (x_2-x_1)\,t + x_1; \\ y &= (y_2-y_1)\,t + y_1; \\ z &= (z_2-z_1)\,t + z_1\,. \end{aligned} \qquad (6-1)$$

三维表面可以用多边形面片来表示。三维空间中的每个多边形都在一个平面内。平面的一般方程为：

$$Ax + By + Cz + D = 0 \qquad (6-2)$$



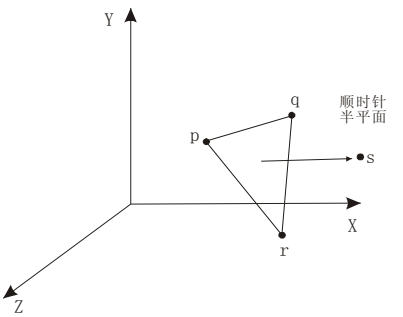
(a)右手系坐标系　　(b)左手系坐标系

图 6－45 三维坐标系统

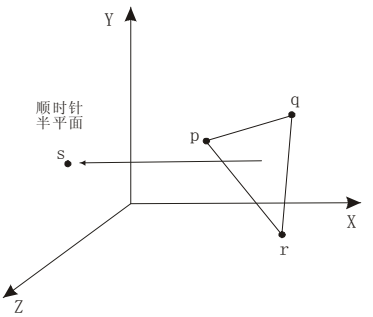
已知三点p(x1, y1, z1), q(x2, y2, z2)和r(x3, y3, z3)，包含这三点的平面参数可通过下面的方程计算：

A = y1(z2-z3) + y2(z3-z1) +y3(z1-z2);
B = x1(z3-z2) + x2(z1-z3) +x3(z2-z1);
C= x1(y2-y3) + x2(y3-y1) +x3(y1-y2);　　(6－3)
D= x1y3z2 + x2y1z3 + x3y2z1 – x1y2z3 –x2y3z1- x3y1z2.

D是相应坐标组成矩阵的行列式值。点的顺序对于确定平面的方向很重要。一个平面就



(a)顺时针顺序



(b)逆时针顺序

图 6－46 定义平面的不同方向

像一条直线把一个平面分为两个半平面那样把一个三维空间分成两部分。如果点p,q,r是按照顺时针方向给定的(图6－46a)，如果

$$Ax + By + Cz + D < 0 \qquad (6-4)$$

点s(x, y, z)就位于平面的顺时针半空间中，否则就会位于其逆时针半空间中。如果点的顺序是逆时针的，这些关系就相反(图6－46b)。这个原理后面将会用来确定表面上的哪个多边形面片位于朝向光线的那一面。式(6－3)中表示平面的参数是按照p,q,r的顺时针顺序给定。

一个平面的法向量N，定义为与平面上任意一条直线相垂直的矢量(图6－47)。如果按式(6－2)给定一个平面，则这个平面的法向量:

$$N = (A \quad B \quad C) \qquad (6-5)$$

点s(x, y, z)与平面的垂直距离d可以用点坐标同平面参数的内积的绝对值除以法向量的大小来计算：

$$d = |Ax + By + Cz + D| / (A^2 + B^2 + C^2)^{1/2} \qquad (6-6)$$

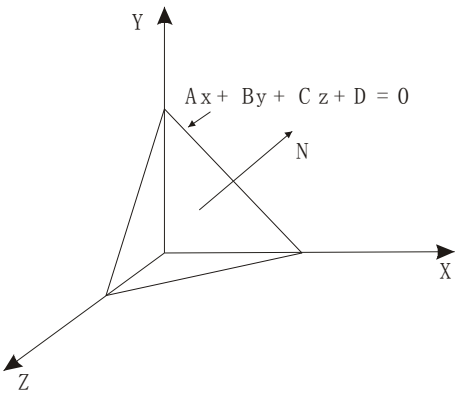


图 6－47 一个平面的法向量

一个三维点(x,y,z)的齐次表示为(hx,hy,hz,h)，这里h可以是任何非零标量。这种表示可以用于空间中三维制图目标的平移、旋转和缩放处理中三维点的变换。三维平移和缩放可以直接扩展二维的情况而得。只是变换矩阵不再是3×3而是4×4了。

平移变换的矩阵如下：

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = (x \quad y \quad z \quad 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ Tx & Ty & Tz & 1 \end{bmatrix} \qquad (6-7)$$

缩放变换的矩阵如下：

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = (x \quad y \quad z \quad 1) \begin{bmatrix} Sx & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Sy & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Sz & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6-8)$$

第二章中的围绕坐标原点从X轴逆时针方向旋转α角的变换现在可以推广到Z轴的逆时针旋转（图6－48a)。这个旋转变换的矩阵为：

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = (x \quad y \quad z \quad 1)\begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6－9}$$

关于X轴的旋转变换(图6－48b)为：

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = (x \quad y \quad z \quad 1)\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6－10}$$

最后，关于Y轴的旋转变换(图6-48c)为：

$$(x' \quad y' \quad z' \quad 1) = (x \quad y \quad z \quad 1)\begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6－11}$$

这些旋转确定了坐标系统中各坐标轴的移动。为了模拟某一目标关于任一坐标轴的移动，必须把一系列的平移和坐标轴旋转变换串接起来。这样可以将目标移动到合适的观察位置。

6.3.2 视觉投影

一旦目标的位置确定之后，其图像就会被投影到一个视觉平面上。视平面的坐标轴为X’和Y’。除了视觉平面之外，还需要确定的参数有一个观察基准点，视平面的法向量，观察点到视平面的距离以及视线(图6－49)。观察基准点位于拟投影的表面上，视觉平面距离为目标到视平面的距离。

平行投影和透视投影是主要的两种投影方式。在这些投影中，离视平面越远的目标看起来会显得更高。平行投影中从平面上不同的点散发出的视线彼此互相平行。正射平行投影中，视线还同视平面的法向量平行(图6－50)。平行投影中，无论目标距离视平面远近，如果大小近似的话，它们在视平面上的投影也大小相近。已知以向量(xo, yo, zo)表示的视线方向和基准点坐标(x1, y1, z1)，那么这个点在视平面(x’, y’)上的坐标可以通过以矢量(x_o, y_o, z_o)方向经过点(x_1, y_1, z_1)的直线参数方程来求解。

这条直线方程：

$$x = x_o u + x_1;$$
$$y = y_o u + y_1; \tag{6－12}$$
$$z = z_o u + z_1;$$

当直线同视平面相交时，z为0， u的值为：

$$u = -(z_1/z_o); \qquad (6-13)$$

将(6－13)代入(6－12)，　(x’, y’)的值为：

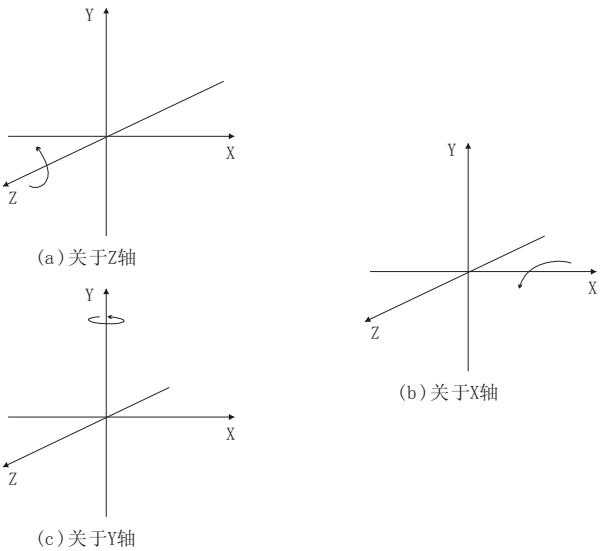


图 6－48 不同的坐标轴旋转

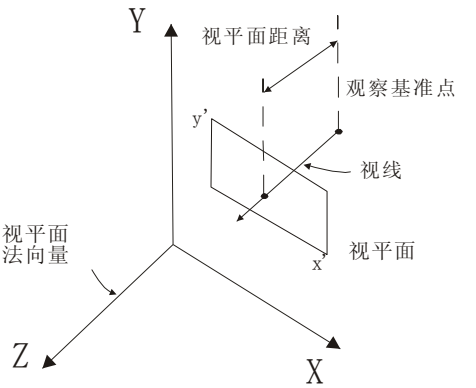


图 6－49 视觉参数

$$x' = x_1 - z_1 (x_o/z_o);$$
$$y' = y_1 - z_1 (y_o/z_o). \qquad (6-14)$$

这种投影以矩阵的形式可以表示为：

$$(x' \quad y' \quad 0 \quad 1) = (x_1 \quad y_1 \quad z_1 \quad 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -x_o/z_o & -y_o/z_o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6-15)$$

在透视投影中，视线聚集于一点，这点叫做投影中心(图6－51)。透视投影中，离视平面较远的目标与大小差不多但离视平面较近的目标相比，看起来要小些。

已知投影中心位于点(x_c, y_c, z_c)，连接基准点和这个中心点的方程为：

$$x = (x_1 - x_c)\, t + x_c;$$

$$y = (y_1 - y_c)\,t + y_c; \qquad (6-16)$$

$$z = (z_1 - z_c)\,t + z_c.$$

这条线同样会与视平面产生交点，此时z等于0

$$t = -z_c / (z_1 - z_c) \qquad (6-17)$$

把(6－17)式代入(6－16)，在投影平面上的对应点坐标为(图6－52)：

$$x' = x_c - z_c\,[(x_1 - x_c)/(z_1 - z_c)] \qquad (6-18)$$

$$y' = y_c - z_c\,[(y_1 - y_c)/(z_1 - z_c)].$$

经过代数化简后，透视投影可以用矩阵形式表示为：

$$(hx'\quad hy'\quad 0\quad h) = (x_1\ y_1\ z_1\ 1)\begin{bmatrix} -z_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -z_c & 0 & 0 \\ x_c & y_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -z_c \end{bmatrix} \qquad (6-19)$$

在将表面投影到一个二维空间上之后，就可以把它看作一个虚拟的显示终端或通过绘

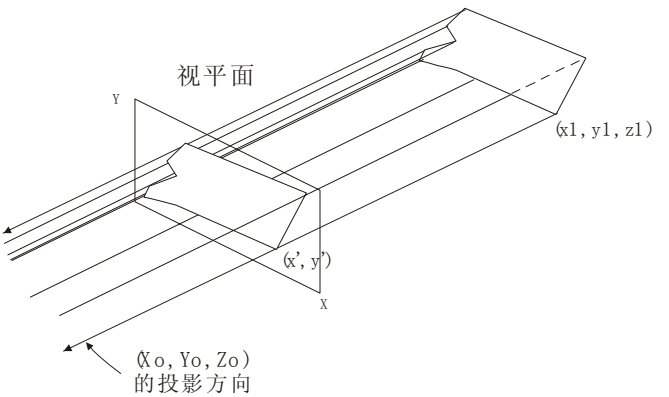


图 6－50 平行投影

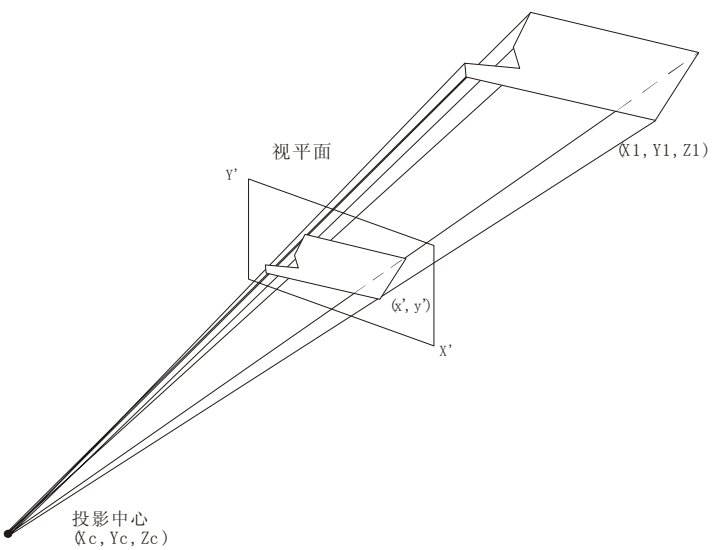
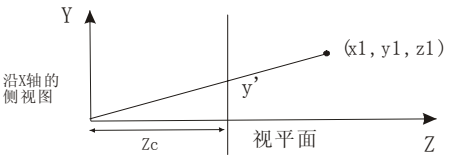
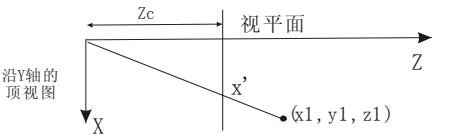


图 6－51 透视投影

图仪绘制出来。然而必须将看不见的平面部分移除，否则结果图像会造成视觉上的混乱。



(a) Y 轴透视



(b) X 轴透视

图 6－52 X 和 Y 透视

6.3.3 隐藏线和隐藏面问题

离散表面最后的表示形式，通常按多边形面片组成的块状图来表示，如图6－53，或者一组平行线组成的网格图来表示，如图6－54。平行线可以是一组简单的剖面线，也可以是一个正交格网。块状图的形式是基于地理底图的多边形或矢量编码，而网格图却是与同底图的栅格编码相对应。通常为了显示网格图需要将矢量编码的底图文件转换成栅格格式。

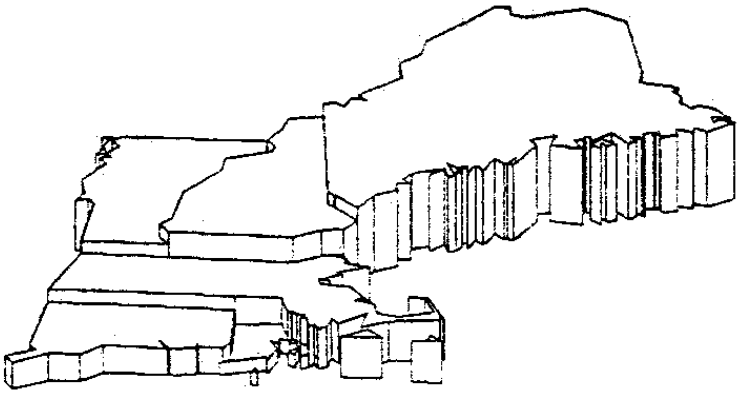


图 6－53 块状图表示

如果数据值已经按网格进行了编码或者内插到网格中，连续表面也可以用网格图来表示，图6－55。使用剖面线还是正交网格方法取决于网格的密度。如果网格较密，使用剖面线则效果更好，而稀疏的网格则适合使用正交网格法。此外，如果表面按照不规则三角剖分或TIN来编码的话，则可以用一组剖面线或者由许多不规则多边形组成的表面来表示，图6－56。

显示方式的不同会影响如何选取隐藏线或隐藏面的消隐方法。对于块状图或者三角剖分方法，需要处理一系列的多边形或三角形，而在网格方法中，则需要处理一系列的直线。用一连串的多边形面片构造块状图时，首先需要确定多边形面对视平面的是前面还是背面。如果多边形的背面对着视平面，则这个多边形需要消隐。假定多边形轮廓的点的顺序为顺

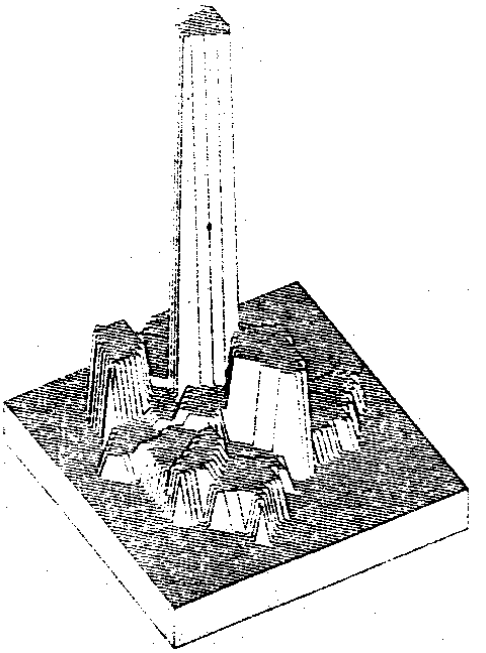


图 6－54 离散表面的网格表示

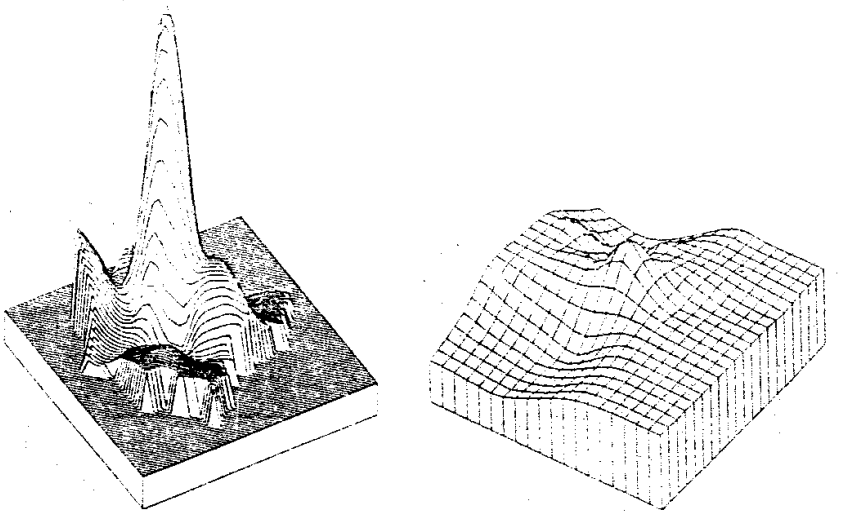


图 6－55 不同的网格表示方法

时针(图6－57)，通过计算每个多边形的法向量，可以得到视线的方向。如果多边形的法向量指向远离视平面的方向，则视线无法达到这个多边形，该多边形就不需要绘制了。这个测试是通过计算多边形(A, B, C)的法向量和视线向量(x_o, y_o, z_o)的夹角来进行:

$$\cos\theta = (A x_o + B y_o + C z_o) / [(A^2 + B^2 + C^2)^{1/2} (x_o^2 + y_o^2 + z_o^2)^{1/2}] \quad (6-20)$$

如果该角的余弦值小于零，那么两个向量的夹角则大于90度，意味着这两个向量是互相背离的(图6－58)，此时对着视线的是多边形的背面。

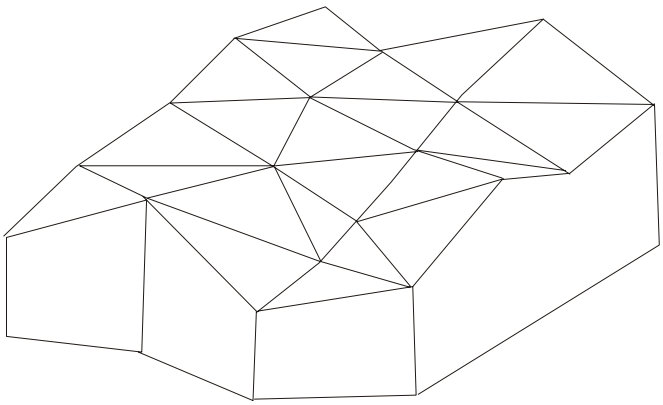


图 6－56 用三角形面块表示 TIN 表面

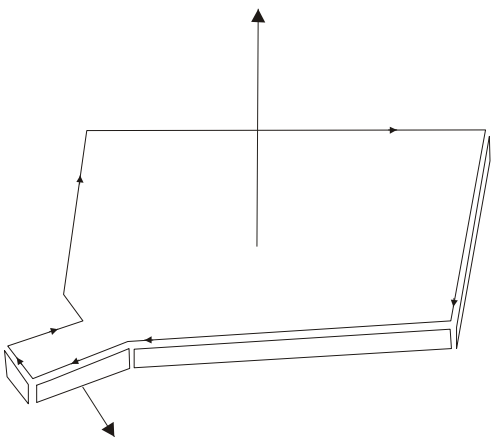


图 6－57 多边形的法向量

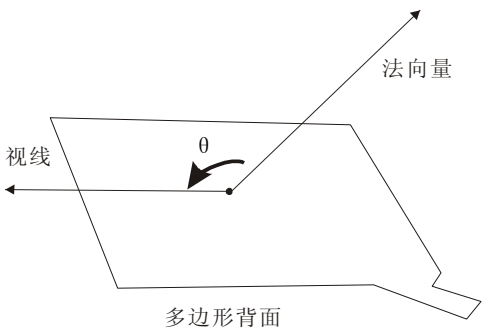


图 6－58 两个向量的夹角

由于距离视平面越远的目标在视平面上越高，许多面和线的消隐方法的总体思想是以从前到后或从后到前的顺序来处理面向视线的目标。例如在一个栅格彩色显示终端上，在一个原来已经绘制好的多边形上面再次绘制另一个多边形会造成第一个多边形上与另一个多边形重叠部分被遮住(图6-59)。在这种情况下，如果能够得到组成平面的多边形面片的先后次序，就可以将它们按顺序依次绘制在屏幕上，得到一个没有隐藏线的表面。面向视

线的多边形的前后关系可以通过计算多边形上同视平面最短正射距离的点来得到。

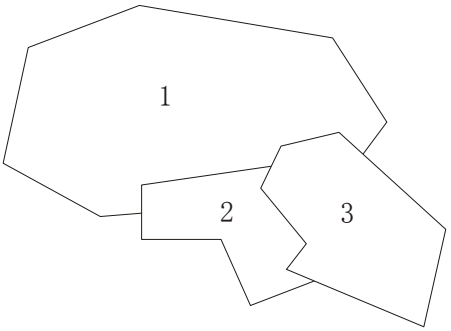


图 6－59 从后向前多边形的相交

对于矢量显示设备来说，在视平面上的两重叠多边形的实际重叠部位是必须要计算的。首先计算每个多边形的最小外接矩形并按这些矩形的最大Y坐标排序。先对矩形进行比较，看是否可能有相交，这样可以提高处理过程的速度。

网格图的从前到后的排序更为直接，这是因为平行线的绘制是沿着网格的行、列或对角线绘制。由每条线的编码就可以给出它们的前后相对位置。对于剖面线来说，总的策略是从前往后绘制。第一条剖面线当然应该全部绘出，因为没有任何目标位于它的前面。接下来，每条剖面线都通过计算，判断位于当前最高的剖面线的下方或上方的部分(图6－60)。每次处理一条新的剖面线后，当前最高的剖面线都要进行更新以便后续判断的准确。

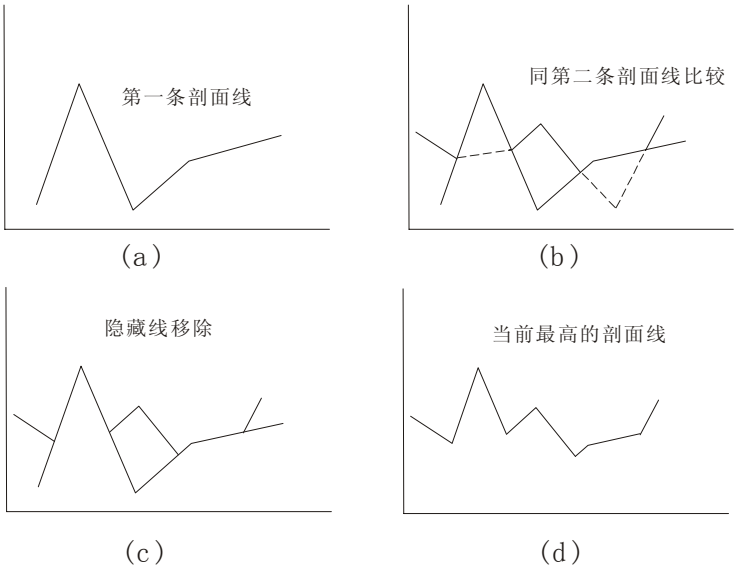
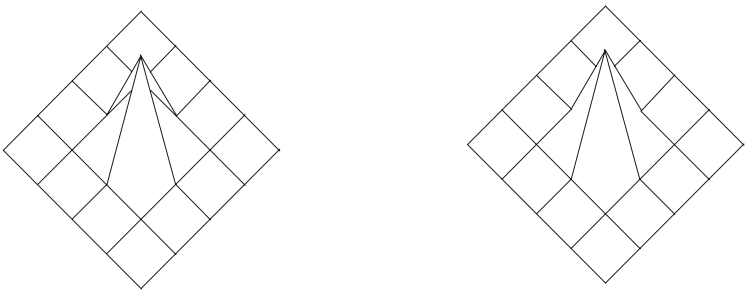


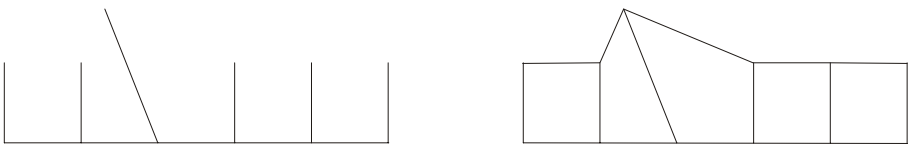
图 6－60 剖面线的排序

对于正交网格来说，线是按照行和列绘制的，两条线的简单重叠会造成错误(图6－61)。应该选取某个方向先绘制。假定先绘制第一行，接着，每个列剖面位于当前剖面以上的部分应在第一和第二行间绘出(图6－62)。然后更新当前最高的剖面并处理第二行。每一次只处理位于第n和第n+1行之间的第n列的剖面部分。



(a)线重叠　　(b) 重叠线隐藏

图 6－61 正交剖面线的重叠



(a)　　(b)

图 6－62 行列剖面线的排序

6.3.4 数字地形的建模与可视化

数字地形模拟是针对地形地貌的一种数字建模过程，这种建模的结果通常就是一个DEM（数字高程模型）。自20世纪50年代以来DEM（数字高程模型）在诸多领域都得到了广泛的应用，随着科学技术，尤其是计算机软硬件的迅速发展，DEM的数据获取方法，数据存储和处理速度等方面都取得了突破性的发展。DEM数据的大量获取成为可能，推动了DEM的应用，目前，DEM已经应用到测绘，土木工程，地质等诸多领域。测绘方面基于DEM的应用有：地形分析，生成等高线、剖面图，晕渲图，分层设色图，立体景观图等。

6.3.4.1 数字高程模型数据的获取

DEM数据包括平面位置和高程数据两种，获取DEM数据的方法很多，比如：来自机载激光扫描仪，InSAR技术，野外测量，摄影测量以及基于数字化等高线和高程点信息创建DEM等等。

6.3.4.2 数字高程模型建模

DEM是地形表面的一个数学模型。根据数据集的不同方式，DEM可以使用一个或多个数学函数来对地表进行表示。

DEM表面可以用以下的数学表达式进行描述：

Z = f（X，Y）

这里f（X，Y）为一多项式。

表 6-5 用于 DEM 表面重建的通用多项式

子项	项次	表面性质	项数
$Z = a_0$	0 次项	平面	1

$+a_1X+a_2Y$	1 次项	线性	2
$+a_3XY+a_4X^2+a_5Y^2$	2 次项	二次抛物面	3
$+a_6X^3+a_7Y^3+a_8XY^2+a_9X^2Y$	3 次项	三次曲面	4

地形表面建模有四种主要的方法：基于点的建模，基于三角形的建模，基于格网的建模和混合建模。

一、基于点的建模

对于一单独平面的子面域，其数学表达式可简单表示为：

Zi = Hi

这里，Zi表示i点周围一定范围内水平面的高程，Zi为i点的高程值。这种方法虽然非常简单，但是它没办法确定相邻点间的边界，所以往往以其它的形式来被使用，如将点扩展为正方形格网，等边三角形，六边形等。即便如此，由它建立的表面还是不连续，因而在实际生产过程中，很少使用这种方法。

二、基于三角形的建模

在多项式f(X,Y)中，如果我们只取一次项和常数项，便可得到简化后的DEM数学表达式。求解简化后的DEM表达式，需要至少三个点，这三个点可以生成一个平面三角形。如果每个三角形只代表它所覆盖的区域，那么整个DEM区域便可以由一系列相互连续的相邻三角形组成，这就是我们所提到的基于三角形的DEM建模。由于三角形的大小和形状有很大的灵活性，它可以很容易的融合断裂线，生成线等，所以在测绘领域，它成为了主要建模的主要方法之一。

和其它方法相比较而言，在有相同数据点的情况下，基于三角形的DEM建模更准确。而从另一方面来说，它又需要更多的计算时间，因为基于三角形的建模，其数据往往没有什么规律可循。由此基于三角形的建模又划分为两种：常规TIN（包括Delauny三角形），基于规整网格的三角网。图6－63。



(a)基于规整网格的三角网　　(b)常规TIN

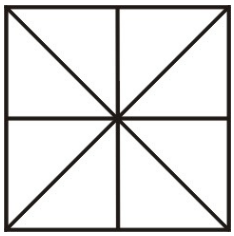
6-63 两种基于三角形的建模方法

基于规整网格的方法虽然生成网格中的顶点数目和三角形数目都较多，但是在实际使用中（如三维漫游），易于裁剪和简化。

三、基于格网的建模

如果将通用多项式的前三项和a3XY组合成另一个多项式，则至少需要四个点才能确定一个表面。理论上任意形状的四边形都可用作DEM建模的基础，但是考虑到实际使用，正方形格网为最佳选择。

基于格网的建模往往用来处理覆盖平缓的区域，如果地势破碎，就不是很理想了。在显示DEM的过程中，考虑到其效果，我们往往是将格网再细分成若干个三角形来显示的，如图6－64所示。



6-64 格网的细分

四、混合建模

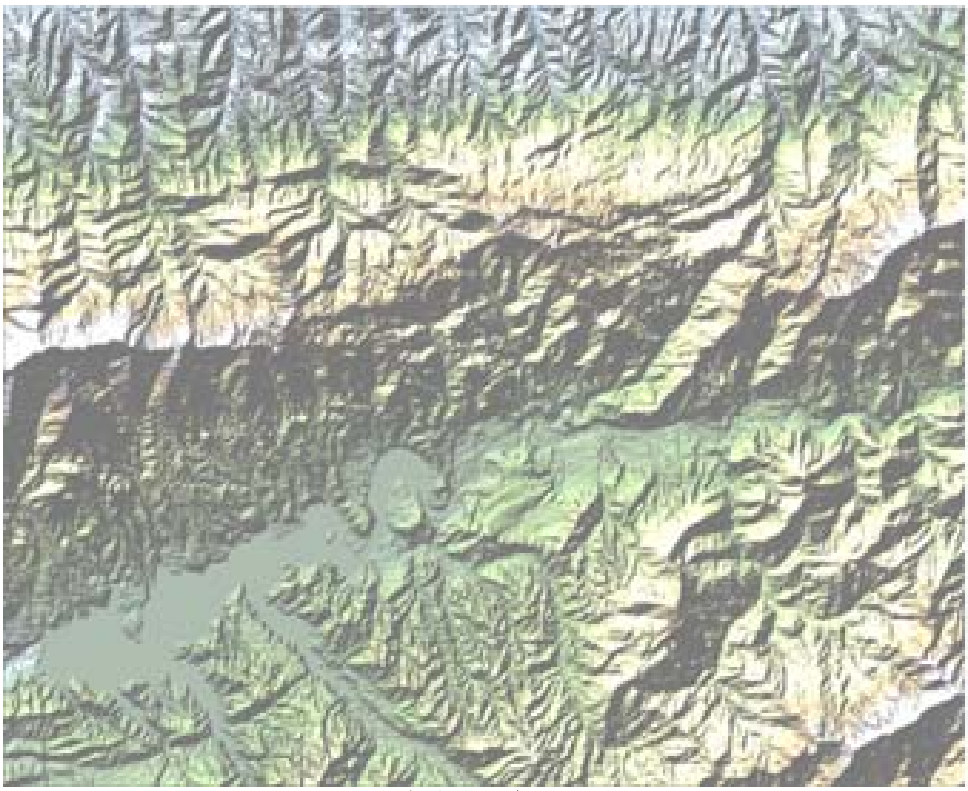
我们在实际使用过程中，有时需要简洁的表示地形，同时又要求尽量准确的表示地形，混合建模便应运而生了。例如我们需要在格网数据中，反应地性线，就可以用到混合建模。

6.3.4.3 DEM 的应用

利用DEM，我们可以进行地形分析，生成等高线、剖面图，晕渲图，分层设色图，立体景观图、电子沙盘等。

这里我们只讨论晕渲图（基于格网数据）的生成。制图工作者用一种“阴影立体法”表示地表形状即地貌晕渲法，而最后的产品便是晕渲图。以前，由于计算机软硬件的限制，晕渲图的生产多为手工绘制。现在，计算机软硬件得到了迅猛发展，借助DEM，地貌晕渲图便能自动而精确地实现。

晕渲图的自动生成，需要借助于高性能图形库，如OpenGL或DirectX。根据格网点的高



6-65 地貌的彩色晕渲示例

程来设置该点所在区域材质或光照，以前需要手工完成的工作便可全部自动化；可以产生高精度、大幅面的晕渲图与其它矢量要素进行叠加或直接用于制版输出（图6－65），避免了手工方式的绘制、扫描、制作、叠加、输出的复杂工序，大幅度提高了工作效率和准确性。

彩色晕渲图的生成一般须经过下面几个必需的步骤：

1．数据准备。

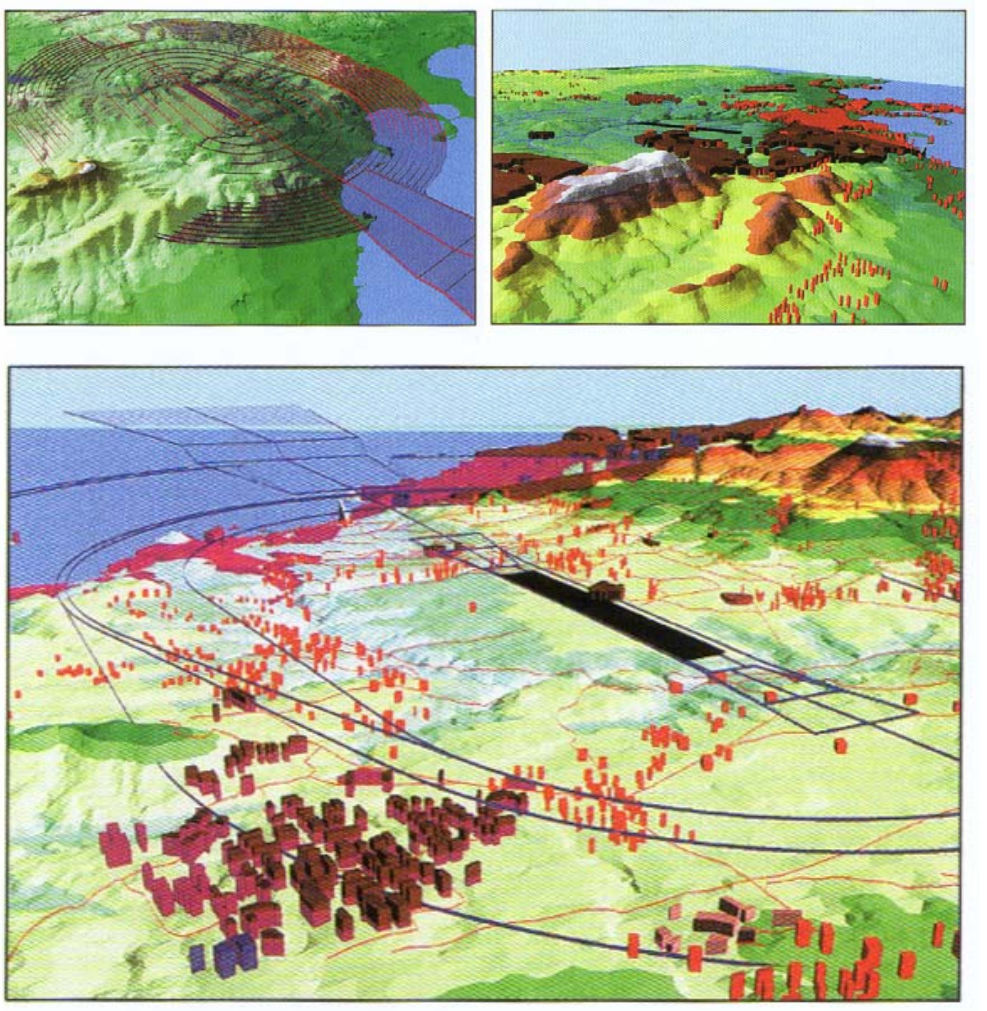
2．依据DTM或DEM建立地形模型。

3．建立视模型与光照模型。

4．彩色晕渲图的形成。

其中最关键的部分是前述的如何建立地形几何模型。彩色晕渲图的形成这一步可以按以下步骤实现：

1．读取DEM数据



6-66 基于 DEM 的地形要素可视化示例

2．设置OpenGL环境参数
3．建立具体的几何模型
4．实现具体的几何变换
5．显示彩色晕渲

生成的彩色晕渲图见图6－65。

基于DEM的其他可视化技术可参照此步骤进行，部分实例见图6－66。

6.4 本章小结

本章讨论了数字地图可视化的多种表示方法。得到的虚地图或实地图不仅可以表达地理空间信息，而且可以用于空间探索和空间分布的分析。下一章，我们将讨论数字地图分析和数字数据库的基本原理，并以它们为分析工具用于有效地分配社会资源。

第7章 数字地图分析

地图目标是与地球表面的实际地物相关联的，因此人们很自然地使用地图来进行土地适应性评价和土地规划。地图产品的一个重要应用就是土地利用分析。地理空间数据的收集和分析对于理解自然和人文环境是至关重要的。规划人员、工程师、科学家、政府官员和工商业者在影响日常生活的决策中需要与自然和社会经济系统有关的空间信息，在人们所掌握的信息中有80%以上与空间信息相关。

土地利用评价始于将同一区域代表不同专题属性的地图图层进行叠置分析。将叠置后的地图放置于透图台上，对合成图像进行更好的视觉解译。这种手工操作当然存在很多局限，而数字地图表示方法的出现可以帮助解决一些问题。这些方法的发展逐步形成了现代地图分析方法，其基础是是基于地图目标操作的地图代数。地图分析也是地理信息系统中进行研究分析的重要方式。

7.1 地图叠置分析

在土地利用分析中使用地图数据的基本前提，是在同一的地理区域中将不同的专题图层相互叠置在一起。叠置操作本身包括一组算子，其中包含了地图目标的交运算从而生成一组新的地图目标。例如在图7－1中，一个目标集合包含两个元素：“A”和“not A”。第二个目标集合位于同一区域，包含另外两个元素：“B”和“not B”。这两个集合的叠置相交可以得到四个区域元素：“not A or B”，“A and not B”，“B and not A”和“A and B”。

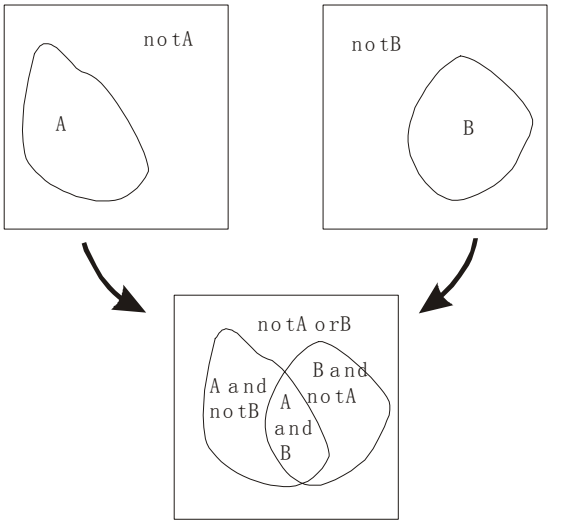


图 7－1 叠置操作

然而，地图的叠置操作也可能造成错误。这些错误可分成与地图的空间信息相关的*位置错误*和与地图的非空间信息有关的*属性错误*两种。首先，叠置操作往往出现于各区域之间有明显的边界而且区域内部是统一的专题属性这样的图层之间。对于某些社会经济图层诸如宗地地块或行政区域来说，这些边界可以很容易辨别。但对于许多自然环境要素如植被和土壤来说，其划分的分类区域往往比较模糊，其分界线的精确程度也令人怀疑。其他的连续环境属性，如高程或降雨量通常内插到一个网格图层中，每个网格单元都有通过内插得到的属性值。

其次，叠置分析要求各图层之间进行地理配准，以使各层的同一位置相互对齐。每层的数据要在同样的比例尺下采集以保证对齐的精度。总体而言，叠置要求在地图目标定位过程中有更高的位置精度。

如果各专题图层的地理底图都是以栅格形式编码的，那么从理论上说叠置操作是比较容易的，可以直接进行。这是因为目标求交和合并操作结果都是一样的，仍然是网格目标。只要两个网格单元叠置在一起，它们总是互相对齐的。这样不会产生新的地图目标。但实际上这些网格可能并不对齐，因而栅格可能要进行重新采样。基于矢量格式的地理底图的叠置操作是很困难的。此时，两个多边形叠置求交通常会生成一组不同的目标集合，这是因为不规则多边形的求交和合并结果大不一样。

矢量目标的叠置有多种方法。一种常用的方法是把所有多边形结构的图层转换为栅格形式。这样做有两个主要的缺点：一是由于转换编码时每个象素赋给一个唯一值，会造成细节信息的丢失；二是由于将区域按网格单元来取整，使区域被错误分类的数量增加了。在这个转换中，对网格单元的大小必须仔细确定，不能比要转换的要素细节大太多。丢失的信息量是与网格的大小和边界的复杂程度成正比的。

另一种方法是把所研究的地理区域分成同质的多个区域。在格式塔（gestalt）方法中，专家通过实地观测并利用各种辅助文件如航空相片等来划定这些同质区域。这种方法的主要缺陷是分区费时费力，故只适于小块区域分析。

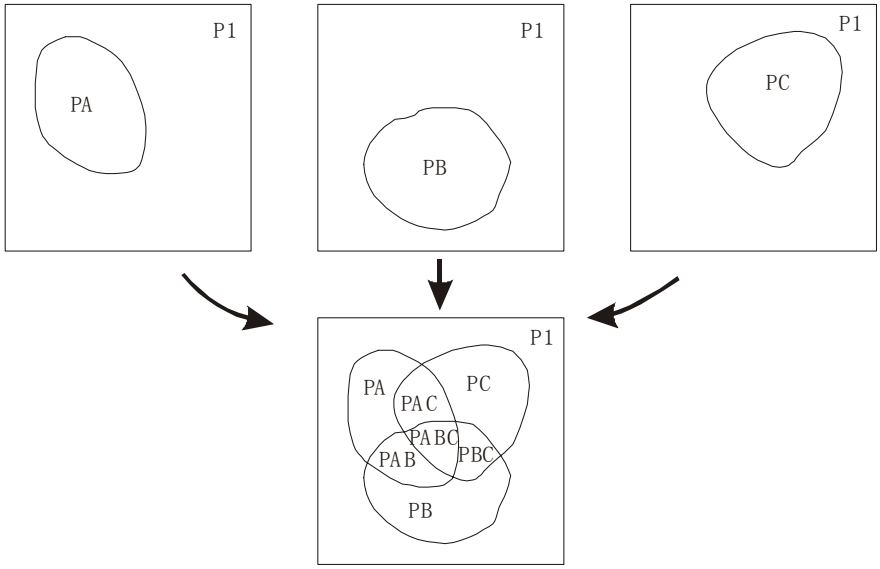


图 7－2 最大公共地理单元的建立

第三种方法是构造最大公共地理单元(GCGU)(也称为最小公共地理单元)。在这种方法中，先将各图层进行叠加，然后将得到的结果地图进行编码。所生成的各多边形在进行新的叠置之前可看作最小的、不能再分的原子目标。在图7－2中，将三个图层叠加并编码。单个的GCGU可以按照各种合并方法合并成为新的目标，但它们不能被分割。按这种方法编码的每条链，其相应的在原各图层上的左、右多边形的标识ID也要附加过来。

除非各图层都是基于同样的地理区域（各图层的构成多边形都一样），否则加入任何新的属性图层都会破坏当前目标的完整性。正是因为这个原因，这种方法最适合于社会经济方面的应用。在社会经济应用中，同一地理聚合单元往往同许多专题属性相关联，这些单元则是从底层往上逐步聚合而成的。

当加入新的属性并造成当前目标完整性的破坏，就需要进行多边形集合的实际叠置操作，这样就建立了一组新的GCGU集合。多边形叠置操作可分为三个步骤：1)确定相交的链并计算出交点，在交点处打断链；2)基于链生成多边形；3)将得到的多边形作为两个叠置多边形的交集进行标识。

第一步的目的在于寻找一组新的结点，并将其加入到与每次叠置相关的结点集合中。结点的寻找方法实际上是局部区域处理方法的变种。假定每个图层都按照链数据结构进行了编码，每条链的最小外接矩形也都已知，将每个图层中的链按照基于外接矩形的最大Y坐标进行降序排列。按顺序分别处理第一个图层中的每条链，将它们的外接矩形按顺序同另一个图层上链的外接矩形比较，以寻找可能的相交，这个过程直到矩形的Y轴最小坐标大于第二个图层的下一条链的Y轴最大坐标为止。如果两个矩形相交，就进行进一步处理，以找到确切交点[图7－3b和7－3c]。两条链的求交实际上就是在链内部的线段之间进行求交。

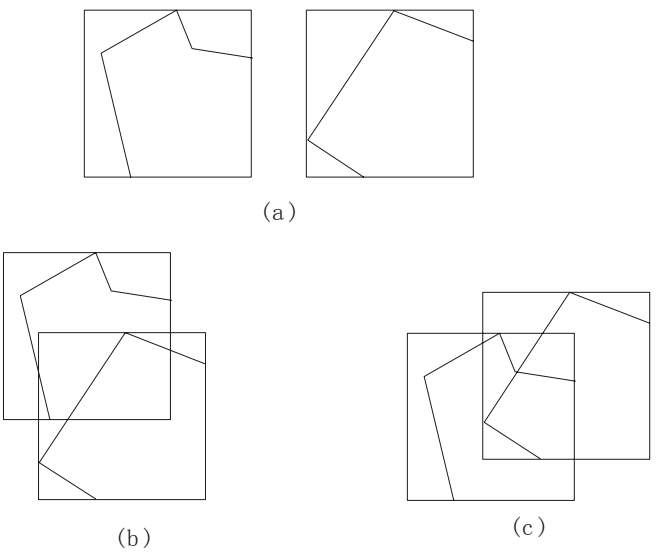


图 7－3 相交可能性检测

如果交点存在，则将相交的两链打断，并在交点处产生一个新的结点。在图7－4中，链C1与C2在结点I处相交，I是链C1上连接p2和p3的线段与C2上连接p7和p8线段的交点。新链C1’和C2’分别是沿原链方向位于交点之前的部分，而新链C1”和C2”分别是沿原链方向位于交点之后的部分。新链的邻接关系可从原链中派生。I结点成为C1’和C2’的新终点和C1”

和C2”的新起点。C1’的右多边形为C1的右多边形和C2的左多边形。其他三条链的左右多边形可以同样得到(见表7－1)。

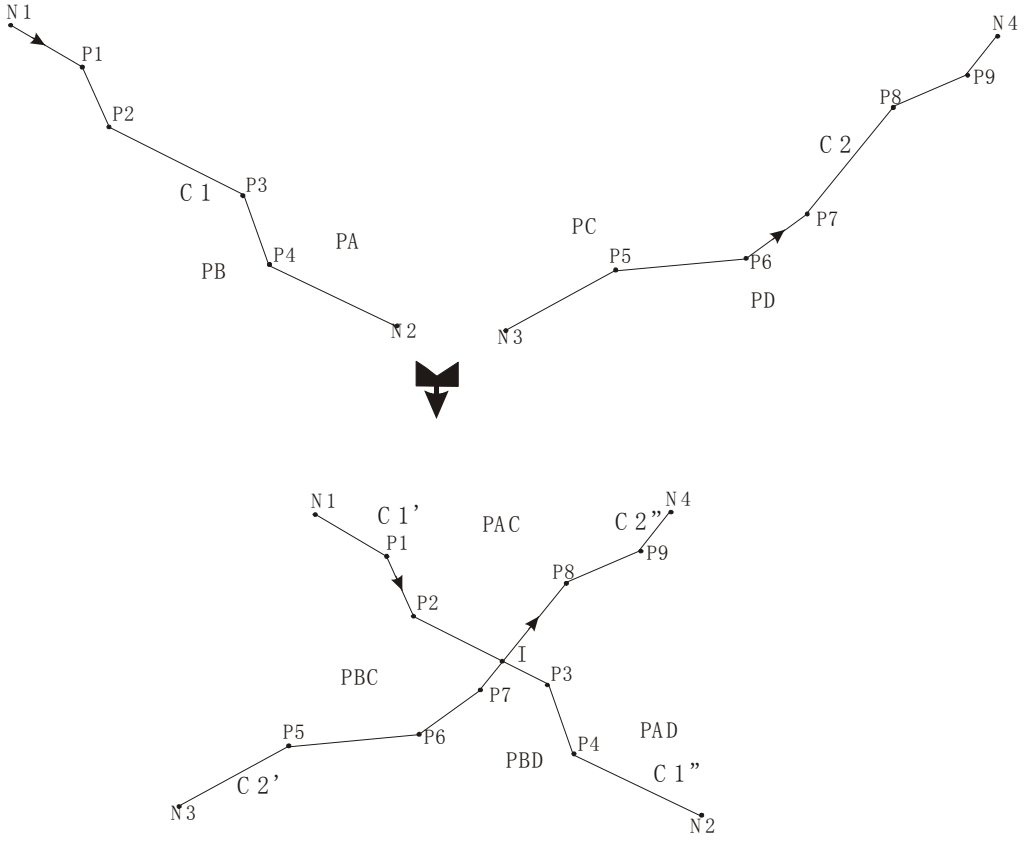


图 7－4 两条链的相交

接下来判定每条新链的右链和左链。C1’的右链是C2’，左链是C1的左链。其他新链的左、右链可以同样推得(表7－1)。接着，判断C1”和C2”是否还有另外的交点。每次打断一条链的时候，新链及其邻接关系，它们各自的最大外接矩形都要取代原来链的对应部分。

表 7－1 相交前后的链邻接关系

链	起始结点	终结点	左多边形	右多边形	包含的点串
			相交前		
C1	N1	N2	PA	PB	p1, p2, p3, p4
C2	N3	N4	PC	PD	p5, p6, p7, p8, p9
			相交后		
C1’	N1	I	PAC	PBC	p1, p2

C1''	I	N2	PAD	PBD	p3, p4
C2'	N3	I	PAC	PAD	p5, p6, p7
C2''	I	N4	PBC	PBD	p8, p9

这种多边形的叠置方法是假定各图层中的多边形在空间位置上都是准确的。实际上，多边形叠置总是存在着数据错误。多边形边界的位置由于测量误差、源地图误差和数字化过程中的误差等原因而不大准确。在叠置过程中生成的新多边形很有可能是由于原始图层上不正确的编码而造成的错误多边形(图7－5)。这些假多边形只是同一个地图目标的不同编码造成的裂隙，而不是一个真正的多边形，因而应该删除它。为了纠正这个问题，有人将线段求交的概念推广为*模糊求交*。如果一条线上的一点距离另一条线上的一点在某指定的限差之内则可以视为模糊相交。这样的话，就在该点处形成交点并将线段在该处打断。限差也可用于合并边界端点。这些问题同前面数字化过程中讲到的问题类似。模糊求交禁止在求交点的时候对多边形进行标识，这个过程要等到编辑的时候才为多边形增加标识。

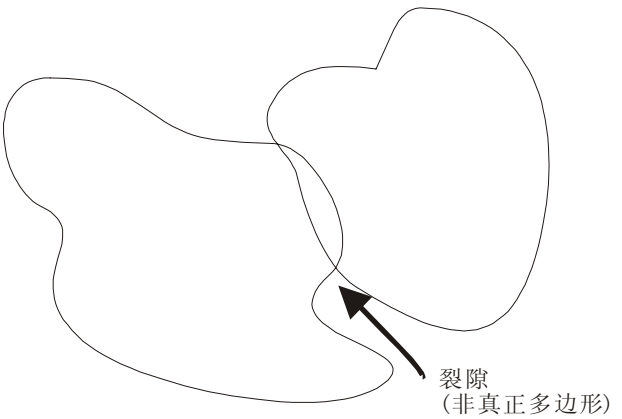


图 7－5 裂隙多边形

7.2 专题组合

在决策分析中，多边形专题属性值的组合同它们的几何叠置一样是个复杂的过程。决策者如何了解属性仰赖于取值系统和其他一些无定型的考虑。属性值可能会由于遥感影像的解译不当或分类错误而造成赋值错误，从而使这个问题变得更为复杂。另一个基本的问题是属性可能是按名称、顺序、间隔或比率尺度来测量的，这样便很难将这些以多种单位和尺度表达的属性值进行组合。例如，对于不同的测量尺度有些算术操作便无法进行——不能对名称进行加减，也不能对间隔分类的属性进行乘除运算。

在规划过程中，人们希望将环境条件加以结构化以产生期望的结果。决策者必须确定一套可选的动作方案，每个动作及其结果的关系，以及每个结果的某些优先权力。在评估

包含地理目标的动作与结果关系的时候，对于不同的结果要将属性转换为适当的层次。例如，地块可用于两种动作，居住和种植，它们分别产生不同的结果：房屋和食品。每个地块的属性就应该根据不同的动作和结果分别评估。除了根据不同结果来评估属性的问题之外，地方政策的制定同样会造成不同用户群对如何进行评估产生不同的想法。

因此，专题属性的组合问题就有多种不同的处理方法。在土地利用适应性评价中，一种方法是确定满足一组约束条件的适用区域。这种方法不需要公共单元甚至公共的测量尺度，只需要一套组合属性的规则。对于某种应用，每个相关图层都转化为互补的代表可行与不可行的区域子集，将多个图层叠置并寻找每个可行区域的交集。如图7－6，为了确定某种应用的可行性区域，将三个属性进行叠置分析。这些图层的可行性区域的交集表明了多边形A，B，C上的各属性值都在允许的范围之内。

有时可行区域的交集可能不存在，此时按对于这种应用的重要程度将各图层进行排序。按照这个次序对图层依次叠置，直到加入一个图层导致无解为止(不过，有时无解也可能就是答案)。可行区域的计算在选址问题中使用最多。

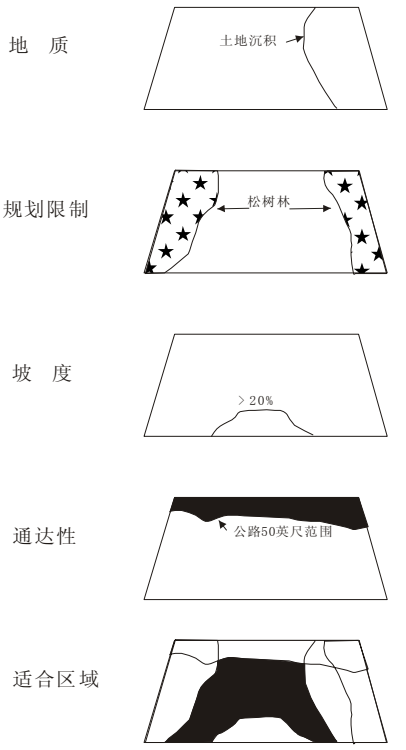


图 7－6 决定可行区域

如果使用二进制数据，每个图层都可以使用0来代表无相关属性值，而用$2^{(n-1)}$来表示第n层属性数据的存在。例如，如果有三个图层需要组合，就将1，2，4分别赋给图层A，B，C。当组合这三个图层时，结果总和就是对应着一个惟一的组合图层(图7－7)。此时，数字的值仅说明了不同组合中的一种情况，对于某种特定应用来说，并不表明比任何其他组合有优先权或更重要。

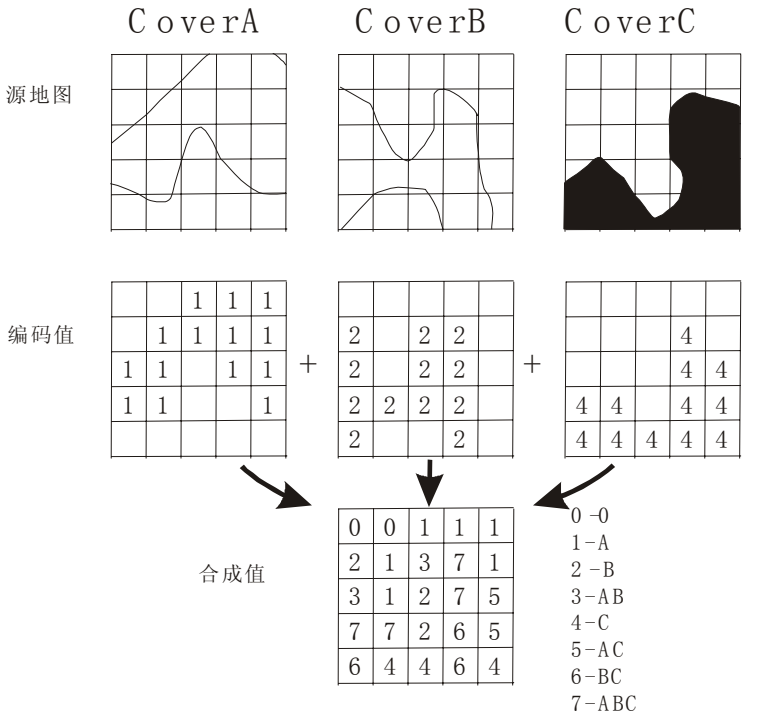


图 7－7 确定定名尺度的分值

确定不同位置适应性的另一种方法是利用数学组合。对顺序尺度的组合，是通过对给定图层的变量赋给表明其适应程度的数值并排序来实现。每处地点的总体适应性的评分，可以通过把每个图层的适应值相加来确定。这种方法的缺点是表明顺序等级的数字没有可可加性。加法计算假定了每个属性对于其他的属性都是独立的，而实际上按顺序尺度排列的数据并不如此。

这个问题的常用处理办法是:将第i层的变量值转化成适应指数C_i,并同时赋以一个权重W_i。较低的适应指数表示该区域对于某种活动不大适合。权重通常用来将所有的适应指数转换为相同的间隔尺度并由此反映属性间的依赖关系。把适应指数同权重进行线性组合就可以得到每个地图目标的适应程度得分。将变量值转成适应指数的过程，可以通过具体的专家小组或一些预定的值函数来进行。

值函数可以减少专家赋值而带来的主观性。值函数是通过利用优化的专业知识将属性量度转换为适应性指数的变换(图7－8)。初值函数必须通过一组专家从主观上来定义，之后即可置入运行系统中进行更客观的计算。对每个活动与每个属性之间的关系都定义为一个值函数。

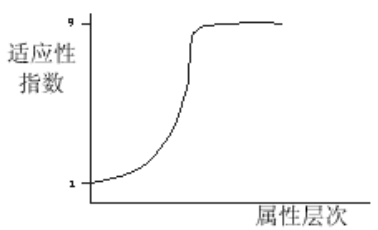


图 7－8 值函数例子

由于适应性指数的加法运算并不遵从加法的交换率，所以最后得出的适应程度分值的有效性要受到一定的影响。例如，A图层的一个值为8的目标和B图层的一个值为1的目标之和得到的分值，与A上值为1的目标和B上值为8的目标之和的得分相同，即它们适应程度一致。这就掩盖了研究现象内在结构中的重大

差异。

组合规则通过将适应度赋予属性集合而不是单个属性的办法来回避了这个问题。例如，对于某种特定的活动，A图层上值大于7的地方和B图层上值小于2的地方能够认为是高度适合，而A上小于2和B上大于7的地方则列为很不适合。另外组合规则以文字逻辑的形式而不是数学形式来表达。在将A和B两层进行几何叠置并生成GCGU后，可以用组合规则来决定这些GCGU的新的合成属性。

7.3 地图分析框架

地图叠置和专题组合是地图分析的重要内容。在地图分析中，对地图目标分析的地图代数方法与传统的分析数字的代数方法的思想其实是一致的。组成地图的目标集可视为只有一种专题属性的图层，地图上的每个目标只对应着一个属性值或专题覆盖，这样的地图称为*叠置地图*(Berry,1987)。在地图数据库中包含了许多这样已知专题属性值的叠置地图。

代数计算的一个基本任务就是基于给定的一个关系(通常以包含变量、常量和运算符的方程或方程组的形式给出)，来对未知的变量或变量集合进行求解。对待研究的地理现象也可以建立地图模型，并建立相应的未知量、常量和运算符的方程组。在模型中，常量和运算符已经定义好，而未知量则在方程组中求解。常量一般是按上节中的方法计算的转换结果和权重等。数据库中已经存在的叠置也可作为常量来对未知的叠置进行计算。未知量的计算可以像方程中的普通代数运算那样，通过一系列的地图分析操作来求解。在未知叠置的计算中，每个目标其值的计算都是独立于其他目标的（虽然所利用的已知叠置中的许多目标的值都参与了该目标的计算）。

地图运算符包括算术运算符(如加、减、乘、除等),标准数学函数(如开平方、指数和对数运算等)以及地图分析所特有的运算。基本运算操作可以分为以下几类：1)地图的重分类；2)叠置操作；3)测量距离和连通性；4)邻接关系的特征描述等。重分类运算符在单一图层上对已知值进行重新定义。叠置运算则使用两个以上的地图来定义新的地图目标和目标值。距离和连通性要测量点及点周围的邻近区域同其他点和区域之间的最短路径。最后，邻域运算是在新生成的地图上对目标赋予按邻域目标值计算而得的新值。

地图分析问题的形式化和解决可以用下面的例子来说明。假定在表7－2中有五种可以对地图图层进行运算的运算符。将六个初始地图图层——MAP_a，MAP_b，MAP_c，MAP_d，MAP_e和MAP_f与这些运算符结合，按下式的形式可以得到一个新图层MAP_g：

$$((MAP_f)SUB(MAP_e))COVER((RECODE(MAP_d))MULT(MIN((MAP_a,MAP_b,MAP_c)))=MAP_g$$

这些运算符的运算顺序必须按预先定义好的代数运算符的次序来决定。不应认为地图运算符只是按照严格的从左到右的顺序来进行，就如同不能仅仅因为方程中加法运算位于乘法的左边而先进行加法一样。

表7－2 地图运算符例集

地图运算符	目　的
减（SUB）	从第一图层的属性值中减去第二层的值
乘（MULT）	将第二层的属性值乘以第一层的值
取最小值（MIN）	在一组图层中计算每一点的最小值

重新编码（RECODE）	在给定图层对属性重新赋值
覆盖（COVER）	将第一层的属性值用第二层中的非零值覆盖

由于一定类型的运算总是在其他的类型之前进行，所以没有必要形式化地规定地图运算的次序，而是根据应用需要利用流程图的形式来确定，图7－9中就表明了哪些图层同哪些运算符结合。每次运算可能会需要产生一个中间图层，例如MAP_a就重新编码进入MAP2。这些中间图层紧接着又按下面的运算操作而再产生新的中间图层，直到所有的运算结束，并得到最终的结果图层。

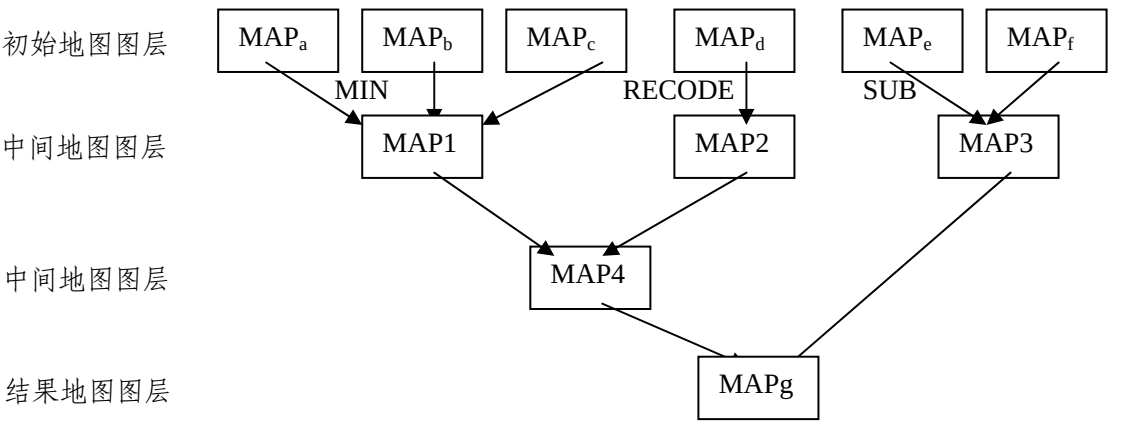


图 7－9 地图运算符次序流程图

用自然语言的语法形式也可以对运算符的次序进行描述：使用动词和名词来代表运算符和地图图斑，未知图斑的计算问题则以动词命令形式表示。在图7－10中给出了这种命令次序的一个例子。地图分析随着GIS的不断发展已扩展为满足更多方面需求的空间分析，并已经成为GIS数据分析并区别CAD和机助制图系统的主要形式。

7.4 本章小结

在各种形式的地理分析中，地图目标的建模占有很重要的地位。不同图层的空间综合方法可为广大空间信息的用户们提供决策工具。用于空间分析和决策的数字地图产品已经模糊了制图功能和其他空间功能的区别。数字地图学和其他空间数据处理领域的发展正以地理信息科学的形式加以综合。

第8章 数字地图的标准化

8.1 标准化的基本内容

8.1.1 地理信息的标准化及其意义

8.1.1.1 标准化

国际标准化组织（ISO）第2号标准化指南——《标准化基本术语》中对标准化的定义是：标准化主要是对科学、技术与经济领域内重复应用的问题给出解决办法的活动，其目的在于获得最佳秩序。一般说来，包括制定、发布与实施标准的过程。

标准化是组织技术世界的一种工具，已经成为经济社会和法律制度的不可缺少的组成部分。国际标准是一种易于获取的现代化信息源，是全球技术转换的一种重要工具，在解决许多技术与经济问题方面发挥了重要作用。现行的标准化工作是向整个社会提供有关科技领域的规范性工作，国家经济也可从标准化成果中获利。标准化是一个制度化过程，通过所有采标部门的努力，有形或无形主体均可简化成一个期望的理想尺度，符合整个社会的利益。

8.1.1.2 地理信息标准化的意义

规范化、标准化研究是现代信息科学技术发展的基础性工作。在地理信息系统建设过程中，地理信息的标准化是一项十分重要的工作，它关系到地理信息资源的开发、利用和共享。

数据采集和更新是建立GIS系统的一项最大的投资。在数据采集上，各国都花费大量的人力、物力和财力，而在另一方面，大量的数据仍停留于满足某些单一的应用，没有被其他用户所共享，即现有的数据资源没有得到充分利用。当然，引起这一矛盾有多方面的原因，有技术或管理上的原因，或由于狭隘的地方主义所限制。然而，一个最为重要的原因是由于缺乏空间数据标准的一致性，缺少相互运行的机制。

标准化是GIS集成的前提。在内部，它可以增强GIS的内在综合能力，从而通过协调数据、软件和硬件之间的关系，使应用效率更高、更经济。在外部，可以通过数据管理、数据库管理、图形、硬件和软件的兼容性促进与其它GIS系统或信息系统的综合。所以，标准化可以增强GIS系统的功能、灵活性和效率，也使它易于推广应用。

采用GIS标准的好处是多方面的，在经济上，可以节省费用，提高效率和方便应用。有了标准，系统可以推广到多个部门和满足不同的用户，实现数据共享，从而减少数据采集费用。另一方面，有了标准可以使用户易于学习类似的系统，从而降低学习和培训费用。有了标准，可以大大缩短系统的测试周期，从而缩短了系统开发的总周期。也可以使系统开发者及早发现系统设计中的错误和减少设计中的同类错误。

GIS标准化的作用是多方面的，归结起来主要包括：

可移植性：为了获得在硬件、软件和系统上的综合投资效益，系统必须是可移植的，使所开发的应用模块和数据库能够在各种计算机平面上移植；

互操作性：一个大型信息系统，往往是一个由多种计算机平台组成的复杂网络系统，有了标准，可以促进用户从网络的不同节点上获取数据和实现各种应用。

可伸缩性：为了适应不同的项目和应用阶段，有了标准，可以使软件以相同的用户界面在不同级别的计算机上运行。

通用环境：标准提供了一个通用的系统应用环境，如提供通用的用户界面和查询方法等。利用这个通用环境，用户可以减少在学习新系统上所花费的时间和提高生产效率。

另一方面，一个GIS标准的制定实际上是一项重大的技术进步。它为建立各种系统软件和硬件组成提供了标准界面，也为检测各部分功能的正确性提供了机会。所以标准被认为是系统开发和集成的一个最好的指南。

8.1.2 国内外地理信息标准化现状

自二十世纪60年代以来，随着地理信息系统技术在国际上的迅速发展，地理信息的标准化问题也日益受到国际社会的高度重视。

美国早在二十世纪60年代就制定了联邦信息处理标准（FIPS）计划，并由国家标准和技术研究院（NIST）直接负责。1993年，美国国家标准协会（ANSI）成立了“地理信息系统技术委员会”。同年美国副总统戈尔发表了题为“全球信息系统将促进发展”的报告，并提出了“国家空间数据基础设施（NSDI）”建议。1994年，美国总统克林顿签署了“地理数据采集和使用的协调——国家空间数据基础设施”的行政命令。“国家空间数据基础设施”的标准化工作目前主要侧重于数据标准化问题。美国一些著名的地理信息系统专家已提出了地理信息系统的标准范围应该包括数据、数据管理、硬件、软件、媒体、通信和数据表达等方面。美国联邦地理数据委员会（FGDC）的使命之一是致力于美国国家地理空间数据标准的研究制定。根据FGDC标准工作组于2002年2月20日提供的最近一次更新资料显示，FGDC已签署批准的地理空间数据标准有19项；已完成公开复审的标准有8项。

FGDC已签署批准的标准：

1．数字地理空间元数据内容标准（Ver.2.0）——FGDC-STD-001-1998

2．数字地理空间元数据内容标准，第一部分：生物数据专题标准——FGDC-STD-001.1-1999

3．海岸线数据元数据专题标准——FGDC-STD-001.2-2001

4．空间数据转换标准（SDTS）——FGDC-STD-002 （采用的修订版本ANSI NCITS 320：1998）

5.空间数据转换标准(SDTS),第五部分:栅格专题标准与扩充内容——FGDC-STD-002.5

6．空间数据转换标准（SDTS），第六部分：点类专题标准——FGDC-STD-002.6

7．空间数据转换标准，第七部分：计算机辅助设计与草绘专题标准（CADD）——FGDC-STD-002.7-2000

8．地籍数据内容标准——FGDC-STD-003

9．湿地与深海生长环境分类法——FGDC-STD-004

10．植被分类标准——FGDC-STD-005

11．土壤地理数据标准——FGDC-STD-006

12．地理空间定位精度标准，第一部分：记录方法——FGDC-STD-007.1-1998

13．地理空间定位精度标准，第二部分：大地控制网——FGDC-STD-007.2-1998

14．地理空间定位精度标准，第三部分：国家空间数据精度标准——FGDC-STD-007.3-1998

15．地理空间定位精度标准，第四部分：建筑、工程结构设计和施工管理——FGDC-STD-007.4-2002

16．数字正射影像内容标准——FGDC-STD-008-1999

17．遥感条带数据内容标准——FGDC-STD-009-1999

18．公用事业数据内容标准——FGDC-STD-010-2000

19．美国国家格网——FGDC-STD-011-2001

FGDC已完成公开复审的标准：

1．内容标准说明

2．框架土地高程数据标准

3．数字地理空间元数据内容标准：遥感元数据的扩充内容

4．地质图符号化的数字制图标准

5．设施识别标准

6．地理空间定位精度标准，第五部分：水文测量与航海图标准

7．海岸与内陆航道系统水文数据内容标准

8．NSDI框架运输识别标准

加拿大是国际上信息规范化和标准化研究卓有成效的国家之一。早在1978年，加拿大测绘学会(CCSM)就授权加拿大能源矿产资源部测绘局（SMB—DEMR）成立适当机构，研究制定数字制图数据交换标准。瑞典的地理信息标准化工作，在早期主要是由于实际需要的推动，由地方政府联合会发起，开展地图数据交换格式的研究工作，其中包括了大比例尺应用中所有的制图数据编码。1989年，瑞典土地信息技术研究与发展委员会（ULI）提出了由其牵头的国家STANLI项目计划。1990年，瑞典标准化机构（SIS）直接负责STANLI的地理信息系统标准化计划。到目前为止，已确定的工作范围包括：概念模型、信息模型、概念数据模型、数据字典、数据质量及转换格式等。法国标准化协会（AFNOR）在上世纪90年代初向欧洲标准化委员会（CEN）提出了“地理信息范围内标准化”的建议，并获批准，为此在CEN内成立了地理信息技术委员会（CEN/TC287）负责相关技术的研究。一些国际组织，如北大西洋公约国组织（NATO）也建立了数字地理信息工作组(DGIWG)，并完成了主要用于军事目的的DIGEST空间数据交换标准；国际海洋组织(IMO)和国际水文组织(IHO)也制定了DX—90空间数据交换标准；国际制图协会（ICA）也建立了数字制图交换标准委员会。值得重视的是，国际标准化组织(ISO)于1994年3月正式成立了地理信息/地球信息业(Geographic Information/Geomatics)技术委员会，编号为ISO/TC211，并与许多其它国际组织建立了联系。该技术委员会下设5个工作组，即：WG1——框架和参考模型，WG2——地理空间数据模型与算子，WG3——地理空间数据管理，WG4——地理空间数据服务，WG5——专用标准。目前确定的工作内容包括：（1）参考模型，（2）综述，（3）概念模式语言，（4）术语，（5）一致性与测试，（6）专用标准，（7）空间模式，（8）时间模式，（9）应用模式规则，（10）分类方法，（11）基于坐标的参考系统，（12）基于地理实体的参考系统，（13）质量原理，（14）质量评价方法，（15）描述数据，（16）空间定位服务，（17）地理信息表述，（18）

编码，（19）服务，（20）空间算子，（21）实用标准，（22）影像和栅格数据。可以认为，这些内容是国际地理信息系统标准体系的重要组成部分。

我国二十世纪80年代开始着手地理信息系统的研究和应用。二十多年来，由国家测绘局、中国科学院、建设部、林业部、交通部、中国标准化与信息分类编码研究所等部门研究制定并由国家质量技术监督局批准发布实施了若干地理信息标准（见表8-1至8-3），同时，多项地理信息系统标准研究工作正在进行之中，其中由国家海洋局主持的海洋资源和环境空间要素的分类与代码、海洋资源与环境图数字制图图式、1：50万 1：100万海洋资源与环境图数字制图规范、海洋基础地理数据质量控制标准等一系列标准已进入复审阶段。

为了借鉴国际地理信息系统的研究成果以及与国际研究成果的接轨，我国已作为正式成员加入ISO/TC211技术委员会。建立了ISO/TC211国内活动网络，组成了国内专家组，并积极参加活动。1997年12月19日成立的全国地理信息标准化技术委员会，标志着我国地理信息标准化工作进入了一个新的阶段。

表 8－1 测绘基础标准

序号	标准名称	标准编号	发布机构	出版单位
1	地图资料著录规则	GB3792．6—86	国家标准局	中国标准出版社
2	地理格网	GB12409—90	国家技术监督局	中国标准出版社
3	1：25000、1：50000、1：100000 地形图图式	GB12342—90	国家技术监督局	中国标准出版社
4	国家基本比例尺地形图分幅与编号	GB／T13989—92	国家技术监督局	中国标准出版社
5	国家基本比例尺地形图修测规范	GB／T14268—93	国家技术监督局	中国标准出版社
6	1：5000、1：10000 地形图图式	GB／T5791—93	国家技术监督局	中国标准出版社
7	测绘基本术语	GB／T14911—94	国家技术监督局	中国标准出版社
8	摄影测量与遥感术语	GB／T14950—94	国家技术监督局	中国标准出版社
9	1：500、l：1000、1：2000 地形图图式	GB／T7929—1995	国家技术监督局	中国标准出版社
10	工程测量基本术语标准	GB／T50228—96	国家技术监督局、中华人民共和国建设部	中国计划出版社
11	地图学术语	GB／T16820—1997	国家技术监督局	中国标准出版社
12	地理点位置的纬度、经度和高度的标准表示法	GB／T16831—1997	国家技术监督局	中国标准出版社
13	大地测量术语	GB／T17159—1997	国家技术监督局	中国标准出版社
14	测绘技术总结编写规定	CH1001—91	国家测绘局	测绘出版社
15	省、地、县地图图式	CH／T4004—93	国家测绘局	测绘出版社
16	测绘产品检查验收规定	CH1002——95	国家测绘局	测绘出版社
17	测绘产品质量评定标准	CH1003——95	国家测绘局	测绘出版社
18	航空摄影术语	MH／T0009—1996	中国民用航空总局	中国民航出版社
19	测绘技术设计规定	CH／T1004—1999(原ZBA75001—80)	国家测绘局	测绘出版社

表 8－2 数字化测绘相关标准

序	标准名称	标准编号	发布机构	出版单位

号				
1	国土基础信息数据分类与代码	GB／T 13923—92	国家技术监督局	中国标准出版社
2	1：500,1：1000,1：2000 地形图要素分类与代码	GB／T 14804—93	国家技术监督局	中国标准出版社
3	大比例尺地形图机助制图规范	GB 14912——94	国家技术监督局	中国标准出版社
4	1：5000,1：10000,1：2500,1：50000,1：100000 地形图要素分类与代码	GB／T 15660-1995	国家技术监督局	中国标准出版社
5	1：500,1：1000,1：2000 地形图数字化规范	GB／T 17160-1997	国家技术监督局	中国标准出版社
6	数字地形图产品模式	GB／T 17278-1998	国家技术监督局	中国标准出版社
7	地球空间数据交换格式	GB／T 17798-1999	国家质量技术监督局	中国标准出版社
8	数字测绘产品质量要求——第 l 部分：数字地形图、数字高程模型、数字地籍图质量要求	GB／T 17941.1-2000	国家质量技术监督局	中国标准出版社
9	地形数据库与地名数据库接口技术规程	GB／T 17797-1999	国家质量技术监督局	中国标准出版社

表 8－3 地图制图与地图印刷相关标准

序号	标准名称	标准编号	发布机构	出版单位
l	1：25000,1：50000 地形图编绘规范	GB 12343——90	国家技术监督局	中国标准出版社
2	1：100000 地形图编绘规范	GB 12344——90	国家技术监督局	中国标准出版社
3	地图印刷光学密度量测规范	GB 12343——90	国家技术监督局	中国标准出版社
4	地形图用色	GB 14051——93	国家技术监督局	中国标准出版社
5	海图印刷规范	GB／T 14477—93	国家技术监督局	中国标准出版社
6	影像地图制印规范	GB／T 14510—93	国家技术监督局	中国标准出版社
7	地图印刷规范	GB 14511—93	国家技术监督局	中国标准出版社
8	1：1000000 地形图编绘规范及图式	GB／T 14512—93	国家技术监督局	中国标准出版社
9	1：250000 地形图编绘规范及图式	GB 15944—1995	国家技术监督局	中国标准出版社
10	1：500000 地形图编绘规范及图式	CH／T4011—1999 (原 BA79001—87)	国家测绘局	测绘出版社
11	地图分色样图制作通则	CH／T 4005—94	国家测绘局	测绘出版社

12	1：500000,1：1000000 省(市、区)地质图地理底图编绘规范	DZ／T 0159—95		

8.2 标准化的基本方法

8.2.1 标准分级

在地理信息标准化过程中，需要制定并且贯彻执行国家标准、行业标准和地方标准。在标准制定、修订工作中，应当充分吸取国外先进经验，并加速与国际标准接轨。

1. 国家标准

对需要在全国范围内统一的、通用的、综合性的、基础性的技术要求，应当制定国家标准。

2. 行业标准

对没有国家标准而又需要在地理信息行业内有统一的技术要求，可以制定行业标准。行业标准不得与有关国家标准相抵触。有关行业标准之间应保持协调统一，不得重复。行业标准在相应内容的国家标准颁布实施后，即行废止。

3. 地方标准

对没有国家标准和行业标准而又需要在省、自治区、直辖市范围内地理信息标准化过程中有统一的技术要求，可以制定地方标准。地方标准在相应内容的国家标准或者行业标准颁布实施后，即行废止。

4. 强制性标准和推荐性标准

国家标准和行业标准分为强制性标准和推荐性标准两种。地方标准在本行政区域内也分为强制性标准和推荐性标准两种。

8.2.2 地理信息标准化的基本原则

根据我国标准化法的规定和有关标准化的文件要求，地理信息标准化应遵循下列基本原则：

（1）必须贯彻国家标准。凡是已有相应国家标准的，一律贯彻国家标准；凡已列入国家有关标准制定规划的，不另行制定，在急需情况下可先提出适用的有关约定或指南。

（2）积极采用国际标准。凡是需要制定但一时未能纳入标准制定规划的标准（含规范、指南、约定等），若有相应的国际标准，则应按国家规定，酌情选用等同、等效、参照三种级别中的一种方式进行制定；若无相应的国际标准，则在可能的情况下，参照类似的国外先进标准制定。

（3）同其他领域标准化相协调一致。地理信息的标准化过程常常会涉及其他与之相关的领域。这就要求各方面要协调一致。

（4）制定标准必须遵守GB/T1.x系列《标准化工作导则》的具体规定。

8.2.3 制定标准的程序

制定标准是一项涉及面广，技术性、政策性都很强的工作，必须以科学的态度、按一定的组织形式、依规定的程序来进行。标准具体编制工作程序如图8－1所示。

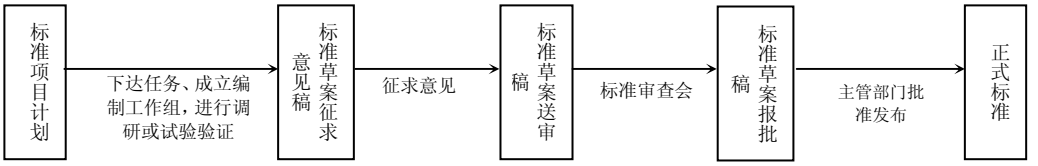


图 8－1 标准编制工作程序

1．制定标准的组织形式

全国地理信息标准化技术委员会是在国务院标准化行政主管部门领导下，在地理信息领域内从事全国性标准化工作的技术组织。该委员会由各有关方面的专家组成，其主要任务是：

(1)负责地理信息领域的标准化技术归口工作。

(2)提出地理信息制定、修订国家标准和／或行业标准的规划和年度计划建议。

(3)协助组织地理信息国家标准的制定、修订工作。

(4)组织地理信息国家标准送审稿的审查及国家标准的复审工作等。

地理信息行业专业范围较宽，根据工作需要，全国地理信息标准化技术委员会可建立分技术委员会和工作组负责标准制定、修订工作。

2．标准计划的编制

在地理信息行业中，编制国家标准和行业标准计划应以地理信息标准体系为依据。

全国地理信息标准化技术委员会或标准化归口单位(归口组织)在充分论证必要性和可行性的基础上，提出制定标准计划项目的建议报主管部门。主管部门审查、协调后，将国家标准计划项目草案连同项目任务书报国务院标准化行政主管部门，经其审查、协调、汇总后下达。行业标准计划草案由有关行业主管部门审查协调后下达，并抄报国务院标准化行政主管部门备案。

3．组织标准编制工作组

承担制定标准的部门或单位，按上级下达的标准计划项目的要求，组织落实制定标准的人员，成立标准编制工作组，具体开展标准的制定工作。

4．编制标准草案征求意见稿及编写编制说明

1)标准草案征求意见稿应符合GB／T1．x系列《标准化工作导则》的规定要求，并对标准的质量及技术内容负责。

2)编制说明的内容一般包括：

(1)工作简况，包括任务来源、协作单位、主要工作过程等。

(2)标准的编制原则和确定标准的主要内容的论据(与有关现行法律、法规和强制性国家标准的关系，重大分歧意见的处理经过和依据)。

(3)采用国际标准和国外先进标准的程度以及与国际、国外同类标准水平的对比。

(4)标准作为强制性或推荐性标准的建议。

(5)贯彻标准的要求和措施建议及废止现行有关标准的建议。

(6)重要内容的解释和其他应予说明的事项。

5．征求对标准草案征求意见稿的意见，提出标准草案送审稿

标准草案征求意见稿及其编制说明和附件经起草单位的技术领导审核后，印发各有关

部门的管理、使用、科研、检验等单位及大专院校征求意见。征求意见的期限一般为两个月。

被征求意见的单位在规定的期限内回复意见，逾期不复函按无异议处理。

起草单位应对征集的意见进行归纳整理，分析研究和处理，提出标准草案送审稿及其编制说明和有关附件，连同《意见汇总处理表》送技术委员会秘书处或标准化管理机构审阅，并确定是否提交审查，必要时可重新征求意见。

6．标准草案送审稿的审查和提出标准报批稿

标准草案送审稿由负责该项目的主管部门或标准所属专业标准化技术委员会组织审查。审查方式可采用会审或函审。对于技术经济意义重大、涉及面广、意见有较大分歧的标准草案送审稿一般应采用会审方式；其他的可采用函审方式。

采用会审方式时，组织者至少应在会前一个月将标准送审稿、编制说明及有关附件、《意见汇总处理表》等文件提交给参加会议审查的单位和人员。采用函审方式时，组织者应在函审表决前两个月将上述文件及函审单提交给参加函审的单位和人员。参加审查的人员，应包括有关部门的主要管理、使用、科研、检验等单位及大专院校的代表。

会审原则上应协商一致。如需表决，必须有不少于出席会议代表人数的四分之三同意为通过。函审必须有四分之三回函同意为通过。审查中如有分歧意见较大、不能统一时，可报请标准主管部门协调解决，会议代表出席率及函审回函率不足三分之二时，应重新组织审查。

会审应写出会议纪要，并附参加会议的单位和人员名单。函审应写出函审结论并附函审单。

负责标准起草单位根据审查意见经修改后提出标准报批稿。

7．标准的批准和发布

国家标准报批稿由该项目的主管部门或全国地理信息标准化技术委员会审核后报送国务院标准化行政主管部门批准、编号和发布。行业标准报批稿由技术归口单位报国务院有关行政主管部门批准、编号和发布，并报国务院标准化行政主管部门备案。

标准的法律效力

强制性标准具有法律效力，任何生产、建设、科研、设计部门和企业、事业单位，都必须严格贯彻执行，不得擅自更改或降低标准。

推荐性标准一旦被政府文件所引用，在贯彻执行中也同样具有法律效力。

8.3 数字地图标准体系表

数字地图标准体系表由总表和标准明细表两部分组成，图8－2。总表分为两个层次：

（1）第一层次是门类

整个标准体系共分为两个门类：第一门类为基础通用标准，这类标准是制定各种标准时必须遵循的、全国统一的标准，是全国所有标准的技术基础和方法指南，具有较长时期的稳定性和指导性；第二门类为专用标准，专用标准是针对数字地图工程制定的，是全国所有与数字地图工程有关的行业必须遵循的综合性基础标准和规定，是数字地图工程标准

化的技术基础和方法指南，具有普遍的指导意义。

（2）第二层次是类别

类别是由门类划分而成。整个体系共划分出若干个类别。

（3）第三层次是项目

项目是由类别扩展而成。每个项目是组成标准体系表的最小单元。每一项目均列入标准明细表中。表8－4至8－13列出了数字地图工程标准体系框架建议，供参考。

标准体系是一个动态发展的过程。标准体系表仅列入一些目前考虑到的标准项目，受各种因素的制约。为保证标准体系的科学性、完整性和兼容性，标准体系表应每隔几年调整一次，以作为调整标准编制计划和制定标准的依据。

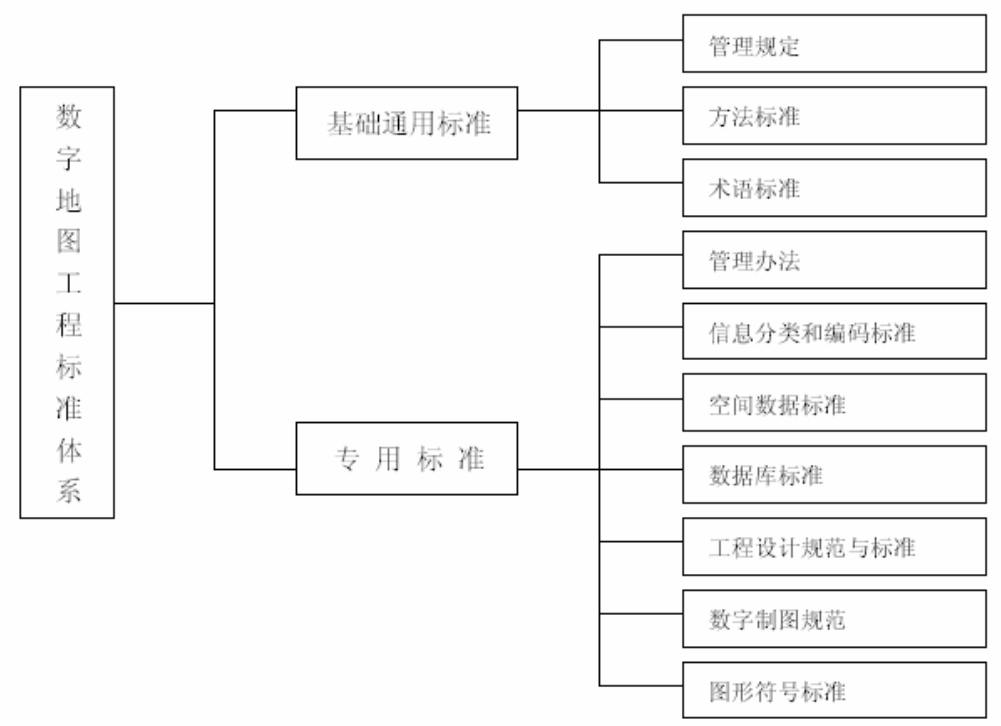


图 8－2 数字地图工程标准体系总表

表8－4 管理规定标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	标准化工作导则　标准编写的基本规定	GB/T 1.1-1993
2	标准化工作导则　标准出版印刷的规定	GB/T 1.2-1996
3	标准化工作导则　符号、代号标准编写规定	GB 1.5-88
4	标准化工作导则　术语标准编写规定	GB 1.6-1997
5	标准化工作导则　信息分类编码标准的编写规定	GB 7026-86
6	标准化工作导则　引用标准的规定	GB/T 1.22-1993
7	标准体系表编写原则和要求	GB/T 13016-91
8	综合标准化工作导则　原则与方法	GB/T 12366.1-90

表 8－5 方法标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准

1	确立术语的一般原则和方法	GB 10112-88
2	标准化工作导则　信息分类和编码的原则和方法	GB 7027-86
3	图形符号表示规则　总则	GB 7093.1-86
4	建立术语数据库的一般原则与方法	GB/T 13725-92
5	文件格式分类与代码编制方法	GB/T 13959-92

表 8－6 术语标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	标准化基本术语　第一部分	GB/T 3935.1-1996
2	分类编码通用术语	GB 10113-88
3	测绘基本术语	GB／T14911—94
4	汉字信息处理词汇　01 部分　基本术语	GB 12200.1-90
5	软件工程术语	GB/T 11457-89
6	地图学术语	GB／T16820—1997

表 8－7 管理办法明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	全国数字地图标准化技术委员会章程	
2	全国数字地图标准化技术委员会秘书处工作细则	
3	全国数字地图标准化技术委员会标准工作组工作细则	
4	数字地图制图领域标准管理办法	
5	数字地图标准审查管理办法	

表 8－8 地理信息分类和编码明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	中华人民共和国行政区划代码	GB 2260－1995
2	世界各国和地区名称代码	GB 2659－86
3	国土基础信息数据分类与代码	GB 13923－92
4	1：500、1：1000、1：2000 地形图要素分类与代码	GB 14804－93
5	1：5000、1：10000、1：25000、1：50000、1：100000 地形图要素分类与代码	GB/T 15660－1995
6	全国河流名称代码	

表 8－9 空间数据标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	数据模型	
2	地理点位置的纬度、经度和高度的标准表示法	GB/T 168311－1997
3	数据采集规范	
4	描述数据	
5	数据字典	
6	空间数据交换	
7	空间数据质量	
8	数据存储介质	
9	数据记录格式和文件格式	

表 8－10 数据库标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	地图数据库命名规范	
2	地图数据库设计规范	
3	地图数据库查询规范	
4	地图数据库连接规范	

表 8－11 工程设计规范与标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	数字地图工程项目建议书	
2	数字地图工程可行性研究报告	
3	数字地图工程设计任务书	

4	数字地图工程总体设计规范	
5	数字地图工程子项目设计规范	
6	工程进度控制报告	
7	产品质量控制报告	
8	成本控制报告	
9	测绘产品质量评定标准	CH 1003—95
10	测绘产品检查验收规定	CH 1002—95
11	工程总结报告	

表 8－12 数字制图规范与标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	1：500、1：1000、1：2000 地形图数字制图规范	
2	1：5000、1：10000 地形图数字制图规范	
3	1：25000、1：50000、1：100000 地形图数字制图规范	
4	1：500000 地形图数字制图规范	
5	1：1000000 地形图数字制图规范	
6	1：50000、1：100000、1：250000、资源与环境图数字制图规范	
7	1：500000、1：1000000 资源与环境图数字制图规范	
8	海洋资源与环境图数字制图规范	
9	中国海图数字制图规范	

表 8－13 图形符号标准明细表

序 号	标　　准　　名　　称	现　行　标　准
1	1：500、1：1000、1：2000 地形图数字制图图式	
2	1：5000、1：10000 地形图数字制图图式	
3	1：25000、1：50000、1：100000 地形图数字制图图式	
4	1：500000 地形图数字制图图式	
5	1：1000000 地形图数字制图图式	
6	1：50000、1：100000、1：250000、资源与环境图数字制图图式	
7	1：500000、1：1000000 资源与环境图数字制图图式	
8	海洋资源与环境图数字制图图式	
9	中国海图数字制图图式	

第9章 数字地图工程

9.1 数字地图工程的概念

所谓工程，一般是指具有一定规模，涉及因素较多，有一定影响的工程项目。它涉及技术以及人力、物力、财力、信息诸因素，是专业技术处理过程与计划、组织、领导与控制该过程的管理过程的集成。有了工程的概念，我们就不难理解数字地图工程的含义。数字地图工程是指在数字环境下地图制作的全过程，包括从工程的策划、详细方案设计到地图编绘、印前准备、印刷、出版，每一阶段都涉及到人员、设备、资金、信息和技术诸因素，是技术过程与管理过程相互融合的产物。

9.1.1 数字地图工程与管理

数字地图工程离不开管理。要了解数字地图工程管理的过程，最好的方法是剖析一个制图组织，看看管理是如何起着实际作用的。例如，地图出版部门某一编辑有一好选题，部门领导研究后认为该选题有市场、可行，准予立项，并指定该编辑负责此项目。编辑首先要制定总体设计，其次组建一支队伍来执行自己的计划决策，选拔项目所需的地图设计人员、地图编绘人员、计算机美术设计人员、发行人员以及对外事物联络人员等等，并把这些人有机地组织起来，从而建立起一条能充分调动和利用各种资源的控制系统。这些活动充分体现了管理的四个职能（计划、组织、领导、控制）的作用。当然，管理的四个职能并不是按其顺序一个一个地进行的。换句话说，项目负责人并不是星期一作计划，星期二作决策，星期三进行组织，星期四领导指挥，星期五搞控制这么一个简单的过程。在任何一段时间里，项目负责人都可能同时进行着几个不同的工作。下面让我们看看数字地图工程中管理各过程的主要内容。

1．计划。简单地说，计划就是决定一个组织在未来某一特定时间内应达到的目标以及如何才能最有效地去实现这个目标。计划能促进和保证管理人员在今后的工作中进行有效的管理。这里所谈到的“计划”，除了指数字地图制图技术上的设计外，还应包括工程中管理方面的工作计划，如工程进度计划、产品质量控制计划、成本控制计划、印刷出版计划以及市场销售计划等。

2．组织。管理者制定了切实可行的战略计划以后，管理程序中的下一步就是组织必要的人力和其他资源去执行既定的计划。如何用最好的方法来组织你的活动，调配你的资源的过程就叫做组织过程。

3．领导指挥。有人认为组织规划、岗位设置搞好了，人员也各就各位了，管理者的管理工作也就完成了。这种看法显然不对。因为恰恰在这个节骨眼上，管理者才开始他被人们称为管理中最困难的一步——进行领导指挥。领导指挥就是要带领和指挥组织的所有人同心协力去执行组织的计划，实现组织目标。

4. 控制。控制是管理程序中的最后一步，随着组织内各项工作的展开，向着既定目标迈进的时候，管理者就要检查工作进展的情况，运用追踪检查和修正手段，实时调整工作状况。控制是管理过程中最重要的内容之一，是成功管理中不可缺少的部分。

9.1.2 数字地图工程与系统

数字地球时代的地图制作是一个由人力、物力、财力、数字信息等资源以及技术因素、数字地图制作过程组成的复杂工程，我们称之为数字地图系统工程。它包括工程的策划和工程的实施与控制两大步骤，涉及地图制作、印刷、出版技术，地图美学以及政治、人文、社会、地理、心理、数学、计算机、市场经济和管理等诸多学科。如何科学地、有效地完成一项数字地图系统工程？换句话说，如何才能够使工程的组织者充分利用现有的技术以及人力、物力、财力、信息等资源达到既定目标？我们结合当代地图学理论以及管理理论、系统论的最新发展，提出了一个数字地图系统工程模式（见图9－1）。该模式有如下特点：

1. 该模式是现代地图学理论与管理理论、系统论有机结合的产物。纵观数字地图制作的全过程，我们不难发现，从工程的组织建立、需求分析、总体方案设计、详细方案设计到地图的制作、印刷、出版、销售，事实上每一阶段都充分体现出管理职能的存在，不管我们是否意识到了这个问题。对模式的研究正是基于这一点将地图工程中有关管理方面的共性问题与现代地图学理论相溶合而展开的。

2. 决策行为贯穿整个工程模式。数字地图工程的每一个阶段都存在着计划与决策问题。采用科学的决策手段与方法，我们就可以较好地预测工作成效。尤其是大型的数字地图工程项目，由于工作的复杂性，参与者的众多，致使人员技术、设备、资金的组织、运用、协调与控制成了工作中的难点。如果在工程的计划阶段采用网络计划模型制定进度安排，不但能够有效地控制关键线路的进度，还可以根据非关键线路上允许一定时间或进度上的滑移知识，合理地协调整个工程的人力、物力、财力、信息等资源，确保工程总目标的实现。最大限度地利用科学的方法论而尽可能少的使用判断，这是系统工程的原则之一。这一原则较好地体现了工程的科学性，也使工程的运作减少诸多盲目性。

3. 模式使复杂的问题条理化、逻辑化和形象化，提高了工程各阶段工作的可操作性。工程模式图以及网络计划图等图解模型的运用，可以使各级管理人员和技术人员对工程的各阶段一目了然，也使工程实施的计划与控制过程中的进度安排与控制，人力、物力、财力、信息等资源的协调与控制等诸多复杂问题形象化、简单化，有利于管理人员对整个工程进行宏观调控和微观指导。

4. 工程范围的扩大，可以减少“次优化”现象的存在。数字地图工程的每一阶段都可以看成是一个子系统，而整个地图工程正是由若干个这样的子系统构成的。当我们看问题只局限于某个子系统时，就常常会发生“次优化”现象。在子系统范围内被认为是最优的决策，当放在整个地图工程中去考虑时却成为次优的决策。在大型数字地图工程中常常会出现这类情况。尤其是在进度安排、设备和人员的调配方面，如果不用系统的观点看待问题，不采用科学的方法进行计划与控制，就会出现局部安排看似合理，但从全局来看并非合理的情况。如前所述，在色彩的设计方面，从美学的角度来看是最优的设计方案，而从整个工程成本预算的角度去衡量很可能就不是最优方案，而是次优的方案。这说明，只有以系统的观点全面考虑整个工程的计划、组织、领导与控制，才能最大限度地减少“次优化”现象的存在。

5. 数字地图工程是一个涉及地图制作各阶段的较为完整的系统，它是人力、物力、财力、信息资源以及技术因素、数字地图过程的有机集成。分析当今的数字地图制作技术与途径，他们都有一个共性问题，即他们都包括工程的策划和工程的实施与控制（包括系统的组织、详细方案设计、地图的制作、印刷、出版、销售，工程的进度、质量、成本、人事、物资设备及市场的协调与控制）两大过程。数字地图系统工程模式正是基于这一点设计的，因而它具有广泛的代表性。

9.1.3 数字地图系统工程模式

数字地图系统工程模式框图见图9－1。

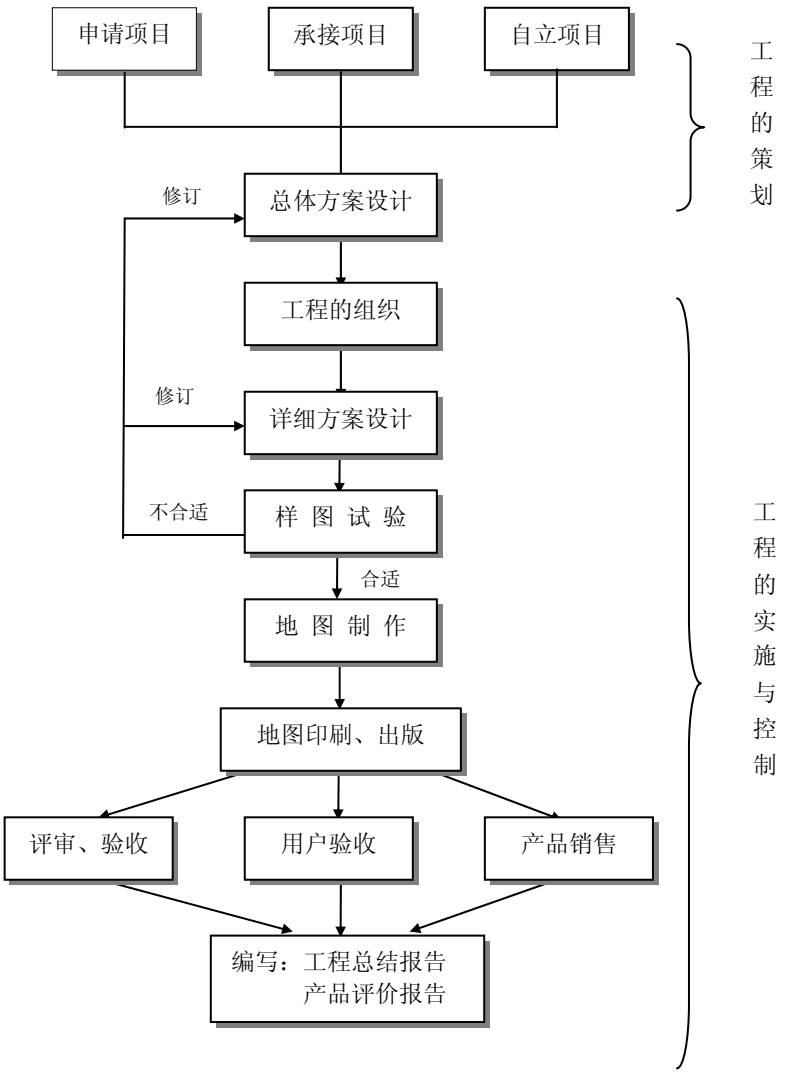


图 9－1　数字地图系统工程模式

9.2 工程策划

9.2.1 策划的涵义

“策划”一词人们并不陌生，在影视作品和广告作品的创作方面，“策划”作为这些领域的工作术语已逐渐为人们所熟悉。近年来，“策划”一词出现在越来越多的领域当中。由于策划活动的多元化，也导致了对策划含义多元化的理解。有人认为策划是对未来采取的行动作决定的准备过程；还有人认为策划是一种构想或理性思维程序。上述认识都是对策划某个角度的剖析，都有其合理的部分。

我们认为，策划就是筹划或谋划。策划是一项立足现实，面向未来的活动。它根据现实的各种情况与信息，判断事物变化的趋势，围绕某一活动的特定目标这个中心，来全面构思、设计、选择合理可行的行动方式，从而形成正确的决策和高效的工作。美国哈佛企业管理丛书编纂委员会对策划含义作了如下总结：“策划是一种程序。在本质上是一种运用脑力的理性行为。基本上所有的策划都是关于未来的事物，也就是说，策划是针对未来要发生的事情作当前的决策。换言之，策划是找出事物因果关系，衡量未来可采取之途径，作为目前决策之依据。亦即策划是预先决定做什么，何时做，如何做，谁来做。策划如同一座桥，它连接着我们目前之地与未来我们要经过之处。”

从策划的涵义中，我们可以发现策划与计划是两个不同的范畴，这两个概念容易被人混为一谈，其实两者有较大的差异。策划近似英文strategy加plan，而计划则是英文的plan。策划更多地表现为战略决策，包括分析情况、发现问题、确定目标、设计和优化方案，最后形成具体工作计划等一整套环节。计划很大程度上只是策划的最终结果，比较多地表现为在目标、条件、战略和任务等都已明确化的情况下，为即将进行的活动提供一种可具体操作的指导性方案。

9.2.2 数字地图工程的策划内容

数字地图工程的策划应包括以下内容：

（1）明确工程目标。通过市场调查、用户需求分析以及可行性研究，明确要做什么？怎么做？需要达到什么要求？即确定地图产品的选题，产品形象和内涵的设计以及产品标准的制定。

（2）确定完成期限。任何地图产品的制作，一般都会有时间上的限制，或是因为用户要求，或是为尽快满足市场需求，或是为按时完成既定的研究任务。总之，把握时间就是创造效益。

（3）确定制作方式、制作主体以及牵头人选。即根据工程规模和技术要求，通过对自身的人力、物力、财力、信息等资源以及技术水平的分析，确定地图产品的制作是采取独立制作还是以合作、协作的方式完成，由谁牵头负责等。

（4）经费预算。数字地图工程涉及到技术、人力、物力、财力、信息等资源的合理利用。尤其对规模较大的工程，由于涉及面广，开销较大，因而事先对工程的全过程进行经费预算是十分必要的。且预算工作应尽可能地详细、全面，这关系到经费预算额的准确与否，应慎重对待。

9.2.3 数字地图工程的策划分类

数字地图工程的策划视项目的来源可分为自立项目的策划、承接项目的策划和申报项目的策划三种情况。

（一）自立项目的策划

自立项目的策划是相对申报项目和承接项目而言的，其主要特征是项目的人力、物力、财力、信息等资源皆由组织自身解决。项目建设的结果——地图产品是为满足市场需求而制作的，因而，项目的策划工作就显得尤为重要。自立项目的策划包括成立项目设计小组、项目构思、市场需求分析、可行性分析、拟定初步方案、方案评审、制定项目的总体设计方案等阶段。

（二）承接项目的策划

承接项目是指项目的持有者（也即用户）与承接者经过双方的共同协商、签定合同后，由承接者承担制作的项目。这类项目在测绘行业各部门的任务中占有一定比重。承接项目的策划工作包括承接分析、拟定初步方案、签定技术合同、制定项目的总体设计方案等四部分内容。

（三）申报项目的策划

申报项目是指通过一定的途径向有关职能部门申请的研究或制作项目。如高等院校、科研院所申报的各类基金项目、科研项目，这类项目一般具有较强的科研攻关性质；此外，还有一部分是测绘生产部门向其职能部门申请的规模较大的或填补行业空白的数字地图工程项目，如申报编制国家或省、市一级的地图集、自然地图集、经济地图集等项目。申报项目的策划过程包括国内外调研与项目构思、可行性分析、编写立项报告、制定项目的总体设计方案等阶段。

9.3 工程的组织与实施

9.3.1 数字地图工程的组织结构

数字地图工程的组织结构有多种类型，但最常见的组织结构有职能型组织结构和矩阵型组织结构两种。

1．职能型组织结构

如图9－2所示。职能型组织是在同一个组织单位里，把具有相同职业特点的专业人员组织在一起，形成多种职能部门，这种组织结构常见于政府机构及大型企、事业单位。当一个任务下达后，从策划、实施到最终产品的完成往往需要许多职能部门的参与，我们称之为流水线生产方式。如常规的地图产品制作工序是：编辑部→制图室→质检部→印刷厂→发行部。

这种组织结构的优点是可以减少重复工作，且具有专业化的好处，即成员有一个在他们具体职业知识和技能上互相交流、共同进步的工作环境。但是，由于职能型组织的每个职能部门只关心自己的业绩，这使整个组织具有一种狭隘性。它并不注重与其他职能部门的团队协作，职能部门之间很少进行有益的交流。职能型组织不对项目的整体负责，制定的决策可能会很狭隘，不是出于对整个项目最佳利益的考虑。一旦地图产品出现质量问题，

各职能部门往往相互推诿责任。

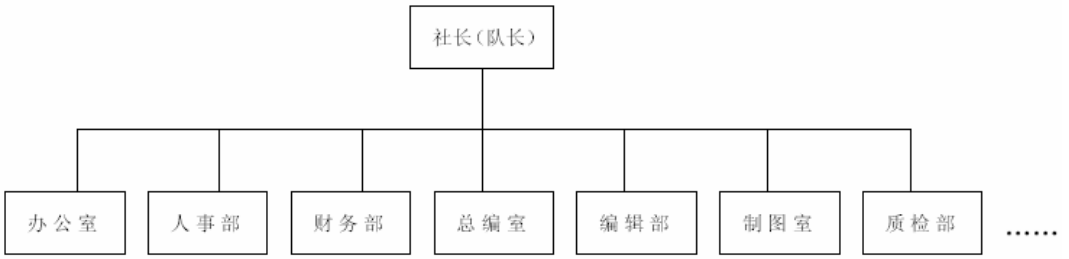


图9－2 职能型组织结构图

2.矩阵型组织结构

如图9－3所示。在矩阵型组织结构里，人员属于各职能部门，项目负责人可根据任务的需要从各职能部门中抽调人员组织项目团队。项目结束后，团队自行解散，等待分配新的项目任务。一般情况下，各职能部门的人员可同时在两个或更多的项目中工作。由于人员属于职能部门，他们能够为适应项目的变化需要而在各项目之间流动。例如，如果某个项目因种种原因而暂时停工，职能部门的负责人可将一些成员调配到其它项目中去。

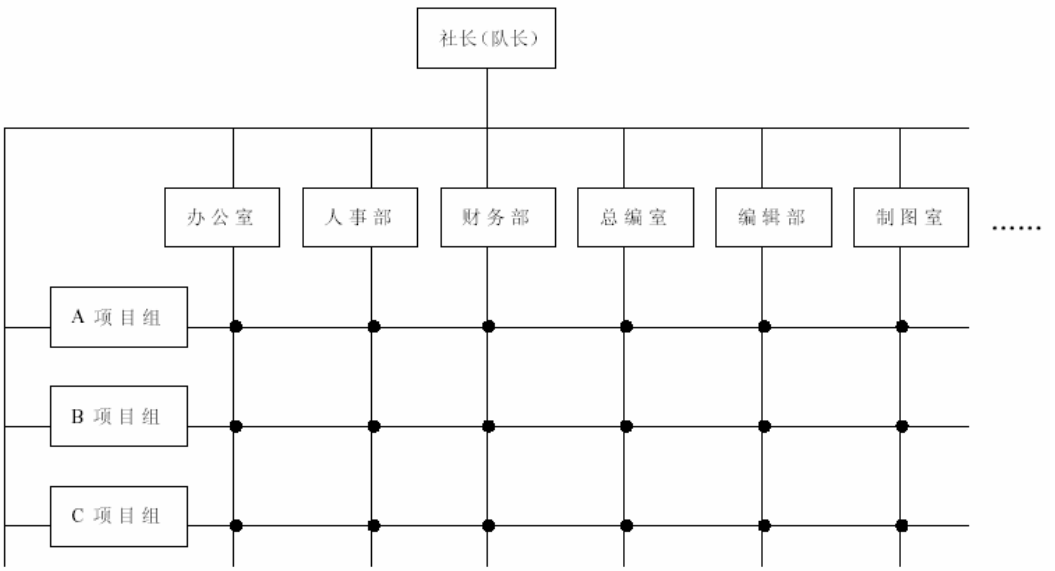


图 9－3 矩阵型组织结构图

显然，矩阵型组织结构能够有效地利用资源，职能部门的专业技术可以为所有项目利用，同时又可促进成员之间的相互交流和学习。缺点是，在矩阵型组织结构中存在两种汇报关系：对项目中的技术问题，成员需向项目负责人汇报；但与此同时，对行政管理方面的问题，成员又要向他们的职能部门负责人汇报。如果某个成员同时在数个项目中工作，那么，这个成员就要同时面对数个负责人，由于项目工作的优先次序常常会产生矛盾和冲突。

由于矩阵型组织结构具有多种优点，目前许多数字地图工程部门包括大专院校、科研院所都采用这一组织结构进行工作。应用矩阵型组织结构，关键是单位要制定相应的工作条例，以保证在项目负责人和职能部门负责人之间恰当的权力平衡。

9.3.2 数字地图工程的实施

工程策划工作结束后，即进入工程的具体实施阶段。

1．系统的组织阶段。系统的组织是指对组成系统的人力、物力、财力、信息等资源及技术的组织与安排。

2．详细方案设计阶段。详细方案设计是总体方案的具体化，也即地图设计（图组和图幅设计）及系统运行的控制设计（包括：工程进度计划、产品质量控制计划、成本控制计划、印刷出版计划以及市场销售计划等）。

3．样图试验阶段。地图设计是否可行，能否达到预期效果，还要进行一定范围内的样图试验。如果样图效果符合产品最终要求，则可进入地图制作阶段；样图达不到产品最终要求时，则必须对地图设计的有关内容进行修订，直到样图效果满意为止。

4．地图制作阶段。该阶段是工程的主要阶段，工作内容包括：● 地图编绘和印前准备工作；● 工程进度的协调与控制；● 产品质量控制；● 人力、物力、财力、信息等资源的协调与控制。

大型地图工程项目有较大的复杂性，它要求系统内部各环节相互协作。以网络计划的形式协调和控制地图制作过程即成为系统运行中管理的中心内容。关键是要使关键线路的进度能符合预期的交货日期，并根据非关键线路上的环节可以允许有富裕时间或进度上可以滑移的知识，灵活地协调整个工程项目的人力、物力、财力和信息资源的利用。如把有限的人员、设备优先安排在关键线路的各环节上，这样既不致于延长项目的完成时间，也不会使各环节之间发生冲突。

5．地图印刷、出版阶段。根据产品的印刷出版计划，联系、协调有关部门和事项，确保印刷、出版周期，继续履行质量控制职责，把好产品的质量验收关。

6．项目评审、验收或产品销售阶段。对于非销售产品可直接进行项目的评审、验收工作。面向市场的产品可根据市场销售计划有组织、有目的地进行销售宣传，安排市场销售。在本阶段应有意识地收集反馈信息，以便于发现问题，总结经验，更好地开拓市场。

7．编写工程总结报告及产品评价报告阶段。根据工程策划时确定的有关目标、用户意见书或市场销售记录及反馈记录，逐项衡量、评价系统各环节及产品的达标情况，编写工程总结报告及产品评价报告，为产品的进一步更新以及新的地图工程项目的进行打下良好的基础。

参考文献

1. 高俊，数字地图——21 世纪测绘业的支柱，测绘通报，1999（10）
2. 毋河海，地图数据库系统，北京：测绘出版社，1991
3. 毋河海、龚健雅，地理信息系统空间数据结构与处理技术，北京：测绘出版社，1997
4. 徐庆荣、杜道生、黄伟等，计算机地图制图原理，武汉：武汉测绘科技大学，1993
5. 王家耀，空间信息系统原理，北京：科学出版社，2001
6. 郭仁忠，空间分析（第二版），北京：高等教育出版社，2001
7. 陈元琰、张晓竞，计算机图形学实用技术，北京：科学出版社，2000
8. 毋河海，地图信息自动综合基本问题研究，武汉测绘科技大学学报，2000，25（5）：377－384
9. 武芳，协同式地图自动综合研究与实践，博士论文，郑州：解放军测绘学院，2000
10. 郭庆胜，地图自动综合新理论与新方法的研究,博士论文，武汉：武汉测绘科技大学，1998
11. 王桥、毋河海，1998，地图信息的分形描述与自动综合研究，武汉：武汉测绘科技大学出版社
12. 吴凡，地理空间数据的多尺度处理与表示研究，博士论文，武汉：武汉大学，2002
13. 蔡少华，GIS 图形空间关系的研究与实践，博士论文，郑州：解放军测绘学院，1999
14. 应申，曲线的一致性化简及曲线相交的研究，硕士论文，武汉：武汉大学， 2002
15. 王家耀主编，数字制图技术与数字地图生产，西安：西安地图出版社，1998
16. 江斌、黄波、陆锋，GIS 环境下的空间分析和地学视觉化，北京：高等教育出版社，2002
17. 徐青，地形三维可视化技术，北京：测绘出版社，2000
18. 乔庆华，基于 OpenGL 开发电子沙盘软件的探索，本科毕业论文，武汉：武汉测绘科技大学，2000
19. 周培德，计算几何——算法分析与设计，北京：清华大学出版社，2000
20. Robert G. Cromley, Digital Cartography. New Jersey: Prentice Hall, 1991
21. Ripley B D., Spatial Statitics, New York: John Wiley & Sons, 1981
22. Laszlo M.J., Computational Geometry & Computer Graphics In C++, New Jersey: Prentice Hall, 1996
23. Worboys M.F., GIS: A Computing Perspective, London: Talyor & Francis, 1995