



空间数据库技术

李国斌 汤永利 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

空间数据库技术

李国斌 汤永利 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

空间数据库的主要任务是研究空间物体的计算机数据表示方法、数据模型及计算机内的数据存储结构和建立空间索引方法, 如何以最小的代价高效地存储和处理空间数据, 正确维护空间数据的现实性、一致性和完整性, 为用户提供现实性好、准确度高、完备、开放和易用的空间数据。空间数据库是理论性和实践性很强的学科, 理解起来也非常抽象。帮助有兴趣的读者更好地了解空间数据库的基本概念和构建方法, 是作者编写本书的用心所在。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

空间数据库技术/李国斌, 汤永利编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.2

ISBN 978-7-121-10086-4

I. 空... II. ①李...②汤... III. 地理信息系统 IV. P208

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 230636 号

策划编辑: 董亚峰

责任编辑: 贾晓峰

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市桃园装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印 张: 17 字 数: 432 千字

印 次: 2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 2000 册 定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

空间数据库技术是地理信息系统数据组织的核心技术，也是地理科学、测绘科学、计算机科学和信息科学相结合的产物。空间数据库技术已经代替传统的文件管理方式，逐步成为空间数据管理的主流技术。由于空间数据的特殊性，空间数据管理在为计算机和信息科学做贡献的同时，也如饥似渴地吸取计算机主流技术的各项最新成果，成为计算机科技领域中应用研究技术内容最丰富的分支之一。

空间数据库技术的主要任务是研究空间物体的计算机数据表示方法、数据模型及计算机内的数据存储结构和建立空间索引的方法，研究如何以最小的代价高效地存储和处理空间数据，正确维护空间数据的现实性、一致性和完整性，为用户提供现实性好、准确性高、完备、开放和易用的空间数据。空间数据库技术是理论性和实践性很强的学科，理解起来也非常抽象。编写本书的目的正是帮助读者更好地理解空间数据库的基本概念和构建方法。

本书共7章，第1章介绍有关地理空间与空间数据及其模型结构、质量、元数据等内容；第2章介绍空间数据模型，包括实体模型、数据模型和面向对象数据模型等内容；第3、第4章分别介绍栅格数据和矢量数据分析的基本原理、方法和技术；第5章较为详细地介绍空间数据处理的有关内容；第6章阐述几种常用的数据检索技术、关系数据库检索的相关概念、空间数据库与空间检索的特点及空间索引技术的需求与分类、几种典型的空间索引结构、算法及性能分析等内容；第7章简要地阐述空间数据挖掘的基础知识。

本书是作者在多年从事科研工作的基础上编写而成的，内容丰富，取材新颖，语言简练，图文并茂，同时运用实例阐释概念、说明原理、展示技术。

本书既可作为大学本科空间数据库课程的教材和博士、硕士研究生的学习资料，也可用于空间数据库领域工作人员的培训或自学教材。

本书由河南理工大学李国斌博士和汤永利博士撰写，同时得到加拿大 Carleton 大学 Peter. X. Liu 教授和 Regina 大学 Gordon Huang 教授及中国地质大学（北京）武法东教授、河南理工大学贾宗璞教授的大力支持和硕士研究生王贵玲、汤金娥、李琳等大力帮助，在此向他们表示感谢。

由于水平有限，再加上空间数据库技术还处于不断发展和完善阶段，书中错误在所难免，希望读者给予批评指正。

编 著 者

2009年11月20日

目 录

第 1 章 空间数据基础	1
1.1 概述	1
1.2 空间数据质量	20
1.3 元数据	26
1.4 空间数据的拓扑关系	33
第 2 章 空间数据模型	40
2.1 实体模型	40
2.2 数据模型	43
2.3 面向对象的数据模型	60
第 3 章 栅格数据	67
3.1 逐点运算	68
3.2 邻域运算	74
3.3 区域运算	77
3.4 广域运算	80
3.5 地图模拟	86
第 4 章 矢量数据	91
4.1 地理查询	91
4.2 缓冲带分析	97
4.3 叠置分析	99
4.4 网络分析	103
4.5 地形分析	109
4.6 空间插值	111
第 5 章 空间数据处理	123
5.1 空间数据输入	123
5.2 空间数据压缩编码	136
5.3 空间数据库	140
5.4 可视化与空间查询	146
第 6 章 空间数据库的索引技术	154
6.1 数据检索及索引结构	154
6.2 数据库索引技术	172
6.3 空间数据库索引技术	192

6.4	基于二叉树的空间索引	208
6.5	基于四叉树的空间索引	222
6.6	八叉树	226
6.7	基于 B-树的空间索引	228
第 7 章	数据挖掘技术	242
7.1	数据挖掘技术	242
7.2	数据挖掘的基础知识	244
7.3	空间在线数据挖掘	257
7.4	空间数据挖掘与相关学科的关系	258
参考文献	263

第 1 章 空间数据基础

1.1 概 述

在计算机中是以各种符号来表达和记录现实世界的。计算机在对数字和字符这些符号进行操作时，又将它们表示为二进制形式。因此，基于计算机的地理信息系统不能直接作用于现实世界，必须经过对现实世界的描述这一步骤。

模型是对现实世界的简化表达。一幅地图是一个符号模型，因为它是通过地学专家处理后得到现实世界的简化描述；存储数字地图的计算机文件也是一种符号模型，它以数字代码来表现图形符号。一幅数字地图的产生不仅需要选择所要表现的物体，还要进一步考虑如何对表达它们的数据进行组织。如果数据的组织规则没有很好地建立起来，那么，一幅数字地图除了对生产这些数据的个人或组织有用以外，对于他人是没有什么用处的。

数据建模是指把现实世界的的数据组织为有用且能反映真实信息的数据集的过程。根据一定的方案建立的数据逻辑组织方式称为数据模型。数据建模过程分为 3 步：首先，选择一种数据模型来对现实世界的的数据进行组织；然后，选择一种数据结构来表达该数据模型；最后，选择一种适合于记录该数据结构的文件格式。例如，表示地表高程的空间数据可以选用栅格模型进行组织，栅格模型选用游程编码这一数据结构进行表达，处理后的数据则以诸如后缀名为 COT 的文件进行存储。同样，地表也可用矢量模型来组织，即以等高线来表示地表，数据以 POLYVRT 的拓扑结构进行安排并且以 DLG (Digital Line Graph) 文件格式存储。不规则三角网 (TIN) 模型，是另一种能很好地表达高程数据的数据模型。因此，一种空间数据建模可能有几种可选的数据结构，而每一种数据结构又可能有多种文件格式进行存储。由此可见，只知道文件格式是不够的，只有同时理解了存储数据的数据模型和数据结构，用户才能够更好地使用数据。

数据是对现实世界状况的数字符号记录，信息是经过重新组织的，能揭示现实世界内在机理的并有利于研究工作的数据。如果数据不以空间属性表来组织，则很难从空间数据中抽取出空间信息。由于计算机的数字特性，数据项必须是离散的以便于进行数字处理和操作，因此，地理空间也必须离散化地表达。所有的空间数据模型都是针对离散空间数据对象（如点、线、面、体和表面等）建立的。

空间数据可依据它们的收集方式、存储方法、说明内容、使用目标等，用不同的数据模型进行组织。地理信息系统中最常用的数据组织方式为矢量模型和栅格模型。在矢量模型中，用点、线、面表达世界，在栅格模型中用空间单元 (Cell) 或像元 (Pixel) 来表达。

1.1.1 空间数据模型

1. 空间数据概念

在地理信息系统中，有关空间目标实体的描述数据可分为 3 种类型：空间特征数据、时间属性数据和专题属性数据。对于绝大部分地理信息系统的应用来说，时间和专题属性数据结合在一起共同作为属性特征数据，而空间特征数据和属性特征数据统称为空间数据（或地理数据）。空间数据通过观察或量测获得，或是通过进一步的计算获取。

空间目标实体的属性特征数据常常以列表或表格的方式进行组织。无论这些表在计算机内部如何组织，都可将其当做二维表格（属性表），行代表空间实体，列代表属性。

1) 空间特征数据

空间特征数据记录的是空间实体的位置、拓扑关系和几何特征，这是将地理信息系统同其他行业的各种数据库管理系统区分开的标志。

物体的空间位置以经纬度或带有局部原点的线性坐标来表示。通常，人们理解空间实体的位置并不是通过实体的坐标，而是通过这些实体与其他熟知实体的空间关系（通常是拓扑关系）来考虑。在图 1.1 中，一个矿体的位置可以是在“湖的西北角”（以湖泊为参照物），也可以是在河流 A 流入湖泊 B 处的东北侧（以河流、湖泊为参照物）。为了能在地理信息系统中，从类似以上的描述中自动提取空间坐标，就需要有能存取、操作和学习空间知识的专家系统。要从文字描述中提取空间实体的坐标和空间实体的参照物，拓扑特征的推理尤为重要。

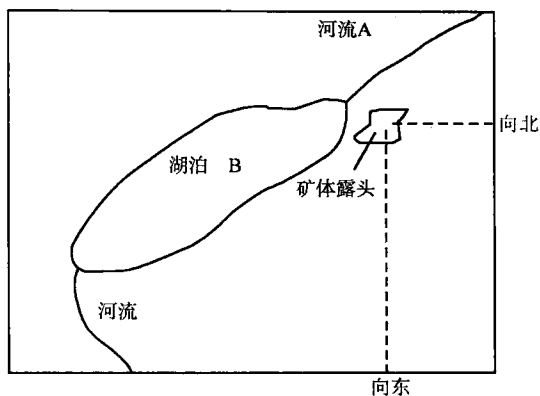


图 1.1 矿体的绝对地理坐标和相对地理坐标所表达的空间参照的差别

在当前的地理信息系统中，拓扑关系是通过 Spaghetti 模型自动创建的。空间实体的几何特征（如长度、面积、形状和方向等）即可应用到矢量模型所表达的实体上，也可应用到栅格模型所表达的复合实体上。

2) 属性特征数据

地理信息系统中对时间属性和专题属性的处理常常非常相似。时间属性是指地理实体的时间变化或数据采集的时间等；专题属性指的是实体所具有的各种性质，如年降雨量、植被类型或土壤类型等。专题属性通常以数字、符号、文本和图像等形式来表示。属性特征的量测是按属性等级的差异及量度单位的不同进行的。无论是矢量模型还是栅格模型，属性特征常常需要按照属性值的级别来分类以进行属性的概括和显示。例如，假设植被类型的确定来源于采样中的植被样本，为了将植被类型的空间分异可视化地表现出来，需要用到不同颜色和形状的符号，而空间分异的属性值分级常常需要多个离散级别。

一旦分级，原始属性的级别值就被一个表明此类的整数代替。这样做能节省存储空间，但降低了属性值的表达精度。理想情况下，把原始的没有经过转换的属性值保存在属性表中，以便能根据精度要求随时进行分类。

2. 空间对象

现实世界既有像温度一样的空间连续状态，也有像物质三态（固体、液体、气体）一样的非连续状态。在数据模型中，对于现实世界中不连续的空间实体，可以把它们作为具有不规则形状的自然空间对象来处理；对于空间连续体，可把它们划分为规则的和不规则的不连续空间对象。

根据空间维数的不同，空间对象可分为点、线、面、表面和体几种。点、线、面分别是零维、一维和二维；体是三维的，包围体的边界表面也是三维的。目前，计算机对于体表面的模拟大多用 2.5 维，因为对于体表面上的每一个水平点只有一个唯一的数值。实际上，现实世界中的许多空间对象具有分形空间维，许多自然表面的分形维一般在二维与三维之间。放大之后，许多自然对象具有相似的属性，即比例尺变化之下的自相似。分形几何为描述自然界复杂的对象提供了一种很好的方法，这些复杂自然对象（如河流、珊瑚礁、地震、洪水、农田、矿体等）用常规的欧式几何很难表达。

除维数特性外，空间对象还可根据其是自然的（Natural）或人为的（Imposed）来划分。自然空间对象指在现实世界中可识别的不连续空间实体，如河流或矿体等；人为空间对象指人为的或人造的实体，如属性边界或像元等。

1) 受采样限制的空间对象

受采样限制的空间对象是指对象的形状和范围取决于采样点的多少，而不受定义的影响，如城镇的边界、河流的形状等。

2) 受定义限制的空间对象

植被覆盖是一个受定义所限制的对象，因为植被覆盖的大小和范围取决于所定义的植被覆盖划分的等级。如果划分某一等级的阈值降低或增高，则植被覆盖的定义就会发生变化，那么植被覆盖区域就会相应地变大或变小。

3) 不规则的人为空间对象

行政区是人为的不规则面对象，它们与自然存在的空间实体毫无关系。把表面分成三

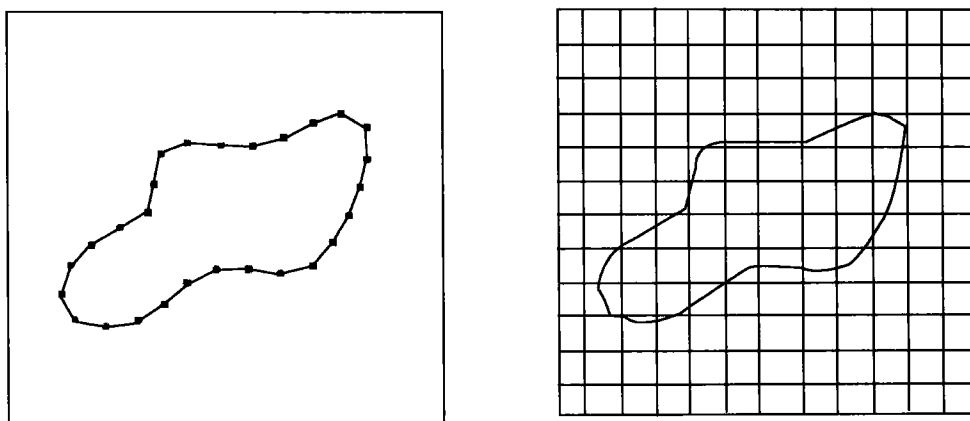
角形的不规则三角网、把空间分成不同类型多边形的泰森多边形等都属于这种类型。不规则分布的采样点是不规则的人为点对象，道路是不规则的人为线对象，地下管道则是这种类型的体对象。

4) 规则的人为空间对象

任何规则的空间分区都会产生规则形状的面对象，如栅格影像上的正方形像元、基于六边形或等边三角形的格网等。断面直线和横切面是这种类型的线对象和面对象，立方体元是典型的三维对象。

从空间对象的规则与不规则角度来看，栅格数据模型和矢量数据模型的主要区别是：栅格数据模型使用规则的人为空间对象，矢量数据模型则使用不规则的自然或人为空间对象。

空间对象既可以是简单形式的，也可以是复合形式的。一个复合的对象可以由两个或多个单一对象组成，例如，相互连通的湖泊可被看做是复合对象，由一群单个的湖组成。在矢量模型中，采用边界表达面对象，因此，地图上的多边形在矢量模型中为简单对象；但是，在栅格模型中，同一多边形则由多个像元组成，因此该对象是复合的，由具有相同属性的简单像元组成（如图 1.2 所示）。

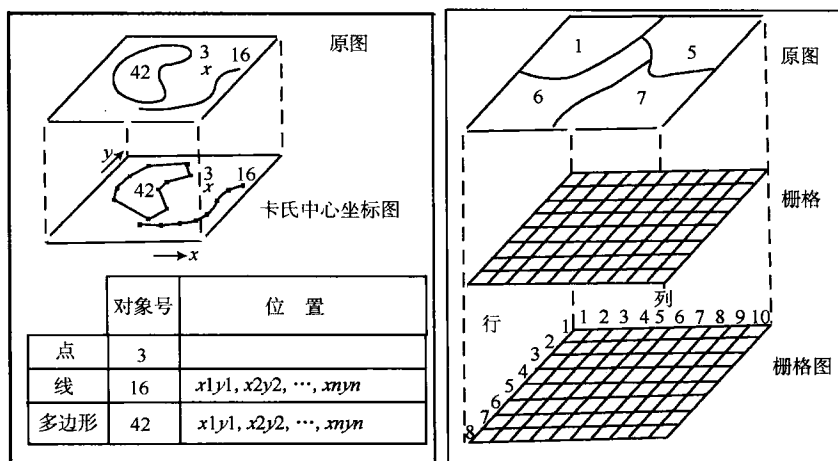


(a) 矢量模型中由边界表达的面对象 (b) 栅格模型中同一属性像元的空间枚举表示

图 1.2 矢量模型和栅格模型中的多边形

3. 空间数据模型

对计算机来说，栅格模型特别适用于刻画像地球重力场那样的连续的空间变量。栅格可以用数字矩阵来表达（见图 1.3），它以一种简单的文件结构存储在磁盘中，文件按顺序包含像元的直接地址。数字扫描设备和视频数字化仪能够产生栅格形式的数据，许多输出设备也是基于栅格模式，如视频显示器、行式打印机和喷墨绘图仪等。运用栅格模型进行数字图像处理和分析已被广泛应用于遥感、医学成像、计算机视觉和其他有关领域。



(a) 矢量模型中空间对象的表示 (b) 栅格模型中空间数据的表示

图 1.3 空间数据的表示

与此相反，矢量模型非常适于表达图形对象和进行高精度制图。在栅格模型中要想精确地刻画点、线、多边形和符号等图形要素，没有很小的像元是困难的，即使这样做了也会占用很大的存储空间。在矢量模型中，包围多边形面的线是由一系列相连的点或中间点 (Vertices) 组成的，每个中间点也就是一个空间坐标对，因此称之为矢量。如果中间点之间非常接近，坐标表达非常精确，则曲线就可以被精确描述。数字化仪产生矢量形式的坐标对数据，数字笔式绘图仪能够产生线条平滑的图形和图件。然而，矢量数据存储的数据结构要比栅格数据复杂，以矢量形式进行图形叠加的算法也很复杂。

栅格和矢量模型最根本的不同在于它们表达的空间概念不同。栅格模型采用面域或空域枚举来直接描述空间目标对象；矢量模型用边界或表面来表达空间目标对象的面或体要素，通过记录目标的边界，同时采用标志符 (Identifier) 表达它的属性来描述对象实体。

1) 栅格模型

在栅格模型中，点是一个像元，线由一串彼此相连的像元构成，但有时像元太粗糙而无法与空间目标很好地拟合。在建立栅格时，像元的大小一旦固定，也就丢失了某些高分辨情况下的细节信息。栅格模型中每一个栅格像元层记录着不同的属性，这些像元大小是一致的。像元通常是正方形，有时也用到矩形、六边形和等边三角形。像元的位置由纵横坐标决定，每个像元的空间坐标并不一定要直接记录，因为像元记录的顺序已经隐含了空间坐标。行列信息和原点的地理位置则被记录在每一层中。

栅格的空间分辨率是指一个像元在地面所代表的实际面积大小。对于 100m 的分辨率，一个面积为 100km² 的区域就有 1000×1000 列栅格，即 100 万个像元；而对于 10m 的分辨率，同样的面积就有 10000×10000 列栅格，即 1 亿个像元。如果每个像元占一个计算机存储单位，即 1 字节 (Byte)，那么该图像就要占用 100MB 的存储空间，对于一幅图像来说，这是一个相当大的存储空间。随着分辨率的增大，对存储空间的要求还将成几何级数的增加，因此栅格模型需要用能通过压缩节省存储空间的数据结构来表示。在栅格模型中，选择空间分辨率时，必须考虑到存储空间和处理时间的开销。

栅格数据处理对某些任务来说非常有效，栅格模型的一个优点就是不同类型的空间数据层不需要经过复杂的几何计算就可以进行叠加操作，如两幅或更多幅遥感图像的叠加操作等。但是它对某些任务来说就不那么有效了，如比例尺变换、投影变换等。栅格数据表达形式非常适于模拟空间的连续变化，特别适于模拟属性特征的空间变化程度很高的区域，如在卫星图像上所表现的海岸带分布。

2) 矢量模型

矢量模型的基本类型起源于“Spaghetti 模型”[如图 1.4 (a) 所示]。点用空间坐标对表示，线由一串坐标对组成，面是由线形成的闭合多边形。矢量模型能方便地进行比例尺变换、投影变换及输出到笔式绘图仪或视频显示器上。

如果空间目标对象的空间特征信息与其属性特征信息一起存储，那么，根据属性特征的不同，点可用不同的符号来表示，线可用不同的颜色或粗细程度不等的线来描绘，多边形则可以填充为不同的图案和色彩。

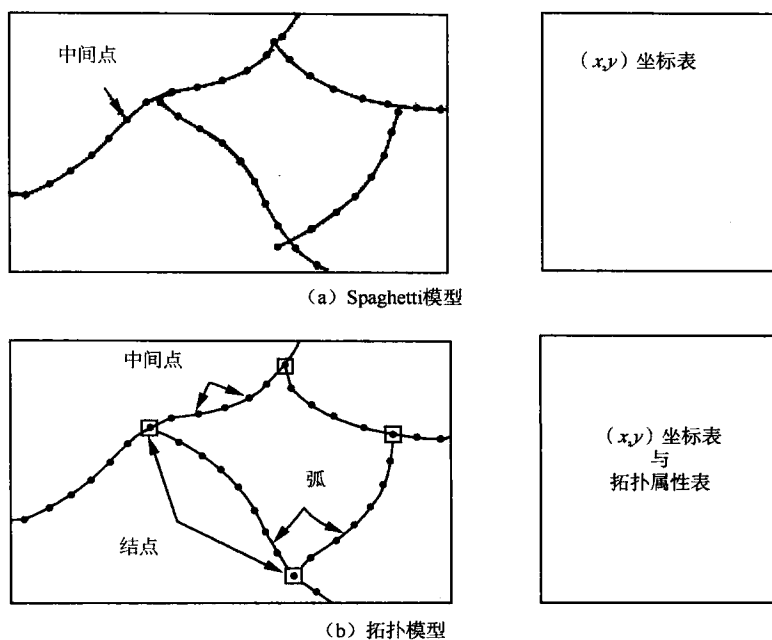


图 1.4 Spaghetti 模型和拓扑模型

一些计算机辅助制图软件包 (CAD) 为数字制图和图形要素显示提供了很好的功能。这些软件包不只局限于表达二维目标，它们采用先进的计算机可视化技术，可以表示面和体。然而，这些矢量化系统是否具有真正的地理信息系统功能的关键，则在于它们是否采用了拓扑结构数据来描述空间目标之间的空间关系。在矢量模型中，拓扑属性是进行叠加和模型操作的关键所在，根据拓扑规则建立的矢量数据结构是区分拓扑数据模型和 Spaghetti 数据模型的关键。

在拓扑模型中，多边形的边界被分割成一系列的弧和结点。弧、结点和多边形之间的空间关系在属性表中定义 [如图 1.4 (b) 所示]。在 Spaghetti 模型中，两个相邻的多边形

之间的共同边界分两次记录，这会浪费存储空间，同时也导致双重边界不能精确地匹配。在拓扑模型中，弧的左、右多边形被精确定义，因此多边形边界不会重复。

空间目标的拓扑属性〔如邻接性、包含关系（Containment）和连接性〕不会随着诸如移动、缩放、旋转和剪切等变换而改变，而空间坐标及一些几何属性（如面积、周长、方向等）会受到影响。在拓扑模型中，空间目标的拓扑属性是在 Spaghetti 模型空间坐标基础上定义的。在地理信息系统中，拓扑生成意味着给 Spaghetti 文件增加拓扑结构。例如，假设有一幅用 CAD 软件生成的多边形 Spaghetti 图，在进行空间分析操作之前可在地理信息系统中增加或建立拓扑关系。一旦空间数据进入拓扑模型，改变、增加或删除多边形边界不仅影响到中间点的空间坐标，也影响到弧和结点的拓扑属性。

采用矢量模型表达的空间数据文件比栅格文件占用的存储空间要小。矢量模型非常适合于表达地图上的图形目标，点和一些小的多边形都能被精确地表达，因为中间点能较好地拟合光滑曲线。拓扑模型使需要拓扑信息的计算机处理很有效，但拓扑生成比较耗时。目前，大多数地理信息系统都支持矢量和栅格两种方式，以充分利用两种数据结构的优点。

3) 不规则三角网模型

不规则三角网模型采用不规则多边形拟合地表，它主要用来描述数字高程表面。在 TIN 模型中，点的位置控制着三角形的顶点，这些三角形尽可能接近等边，这样地表地形就可以由一组三角形很好地表示出来。三角网的一个优点是，其三角形大小随点密度变化而自动变化，数据点密集时生成的三角形小，数据点较稀时生成的三角形较大。由等高线数字化得到的点，在等高线较密时，数据点的密度也相应较高，如陡坡上的三角形比缓坡上的三角形小且密。TIN 表示不连续对象时也具有一定的优势，可用来表示悬崖、断层、海岸线和山谷谷底。把 TIN 转化为栅格，可用线性内插方法，也可用非线性内插方法，如生成平滑的平面来消除三角面之间的不连续性。

泰森模型的特点是：组成多边形的边总是与两相邻点的连线垂直，并且多边形的任何位置总是离多边形内的点最近，离相邻多边形内的点较远（如图 1.5 所示）。泰森多边形可用于对表面（如高原面）进行模拟，每一个高原面的高度为常数且等于内部样点的高度。用 TIN 来表示时，这些面具有坡度；用泰森多边形表示时，这些面是平面。

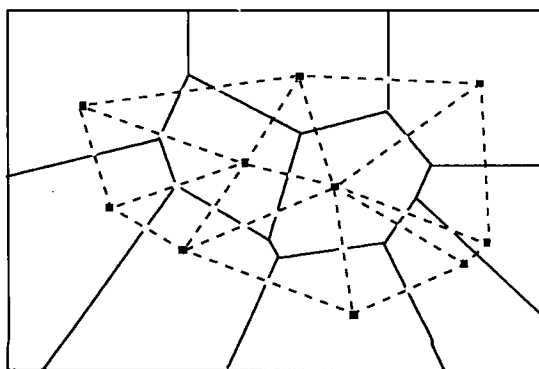


图 1.5 三角形（点画线）与泰森多边形（实线）

1.1.2 空间数据结构

空间数据结构是指对空间数据进行合理的组织,以便于进行计算机处理。数据结构是数据模型和文件格式之间的媒介。例如,游程编码是一种适用于栅格数据模型的数据结构,它能以各种各样的格式写到数据文件里。数据模型和数据结构之间的区别很模糊,事实上,数据模型是数据表达的概念模型,数据结构是数据表达的物理实现,前者是后者的基础,后者是前者的具体实现。栅格结构现在广泛应用于图像处理系统和栅格地理信息系统。矢量结构则主导了CAD系统和有着强大制图功能的矢量地理信息系统。数据结构的选择取决于数据的性质及其使用的方式。大多数地理信息系统都同时采用栅格和矢量模型及适用于这两种模型的其他几种数据结构,不同的结构用于不同的任务,这要看哪种结构是最有效和最合适的。例如,一个具有属性特征的样点集可以有几种存在形式:①带空间坐标的属性表;②作为一个栅格存在,栅格值由这些点的属性内插得到;③以矢量形式存在,表达由栅格生成的等高线图上的多边形边界并作为一个不规则三角网存在。这些结构都有其优缺点,它们之间可以互相转换。

1. 栅格结构

对于一个用方格网密集采点的区域,一个包含其空间坐标和属性的表,代表了它的最简单的数据结构。

1) 完全栅格结构

大多数数字图像处理系统采用完全栅格结构。最简单、最常用的完全栅格结构是限制一个栅格数据层只存储栅格的一种属性,并且把属性值限定在0~255的整数范围内(一字节对应一个像元)。在完全栅格结构里,像元顺序一般以行为序,以左上角为起点,按从左到右、从上到下的顺序扫描。

完全栅格结构可以以波段顺序来组织(BSP格式),单一波段或属性值以行的顺序来存放,如果有两个以上的属性,那么第二波段就在第一波段结束后才开始存放。多波段图像也可以以逐行格式(BIL)或以逐像元格式(BIP)来记录。对于BIL,先存储各波段的第一扫描行,然后是各波段的第二扫描行;对于BIP,先存储第一个像元所有波段上的值,再存储第二个像元各波段值。BIP与BIL格式有利于图像复合操作,因为同一像元属性值的物理地址是在一起的。但对于显示较大的多波段影像,BSP则更有效。

常用的栅格图像结构只存储0~255的整数(1B)。一个像元两字节则能容纳 $2^{15} \sim 2^{15}$ 的有符号整数,其中有一位用来存储符号。影像的属性值能表示为指向属性表的指针。这对数字地图特别有用,数字地图里的地图单元或多边形都用来存储属性。在这种情况下,一字节的整数范围常显得不够大,因为属性表常有256条以上的记录,因此,对于每个指针需要分配两字节以上的空间。

2) 游程编码

随着像元尺寸的减小,完全栅格结构影像的存储空间呈几何级数增长,由此使一些高分辨率数据因存储空间变得太大而无法管理,尤其是对于三维数据,这种现象最为明显。存储空间的压力能通过压缩方法减轻。游程编码是一种简单的数据结构,它能极大地减小

存储空间。

表 1.1 是 5 行 10 列栅格的游程编码的主要规则。有相同属性值的邻近像元被合并在一起称为一个游程，游程用一对数字表示；每个游程对中的第一个值表示游程长度，第二个值表示游程属性值（类别）；每一个新行都以一个新的游程开始。表示游程长度的数值位数由影像的列数决定，游程属性值则由影像的最大类别数决定。通常用两字节存储游程长度，一字节存储游程属性值。

表 1.1 5 行 10 列栅格的游程编码

行 \ 列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	游标编码
1	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	(4, A), (3, B), (3, A)
2	A	A	A	B	B	B	A	A	A	C	(3, A), (3, B), (3, C), (1, C)
3	A	A	B	B	B	A	A	A	C	C	(2, A), (3, B), (3, A), (2, C)
4	A	B	B	B	A	A	C	C	C	C	(1, A), (3, B), (2, A), (4, C)
5	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	(6, A), (4, C)

为进一步压缩，可以让游程跨行或跨列，属于同一类的像元归为一个游程，一幅大小为 1024×1024 像素、类别值全部为 1 的影像的游程编码对是 (1048576, 1)。但这个特殊的游程长度已无法用两字节来存储。对数字化地图进行游程编码能大大节省存储空间，即使是一幅平均游程长度很小的卫星影像图，也能节省部分存储空间。

3) Morton 顺序和 Morton 坐标

完全栅格结构的扫描顺序对游程编码的效率有较大影响。图 1.6 是栅格的 4 种扫描顺序：行序 (Row Order)、行主序 (Row-Prime Order)、Morton 顺序和 Hilbert-Peano 顺序。

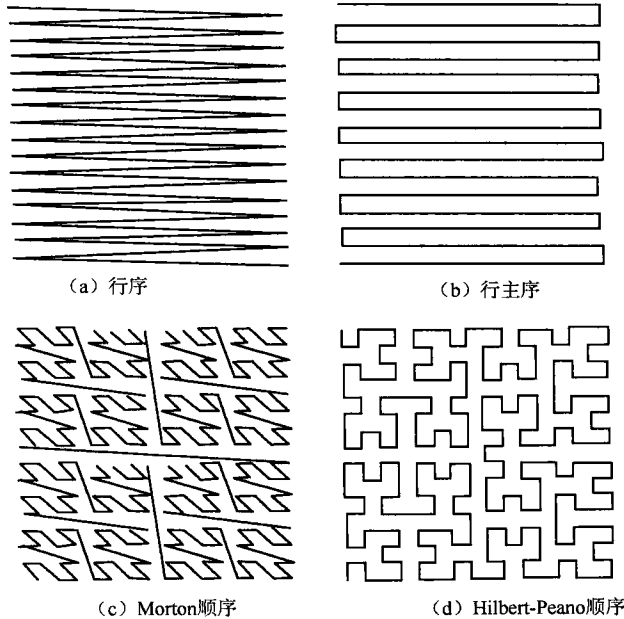


图 1.6 4 种不同的栅格扫描顺序

根据 Morton 顺序把影像中的像素相连得到的轨迹呈“Z”字形 [如图 1.6 (c) 所示]，

“Z”字形影像（边长是2的指数倍）中的像元可以用 Morton 地址来建立索引，每个 Morton 坐标是 Morton 轨迹中表示空间位置的一个简单的数值。Morton 坐标有利于空间查询，两个坐标值合成了一个值，不再需要分别查找行和列。Morton 索引可大大提高某些操作的效率，如查找地图上靠近某一特定位置的类别值等。在 Morton 序列中的像元从不交叉，从而减少了数值的跳跃。该轨迹以 2×2 的模式递推排序，各层均如此，如图 1.7 所示，在第 2 层（Level2）有 4 个等大的矩形块，它们分别是 0、1、2 和 3，在第 1 层（Level1），3 个第 2 层的矩形块又被细分了，在第 0 层（Level0），3 个第 1 层的矩形块又被细分。Morton 坐标系中的数位与层、块的大小成反比。

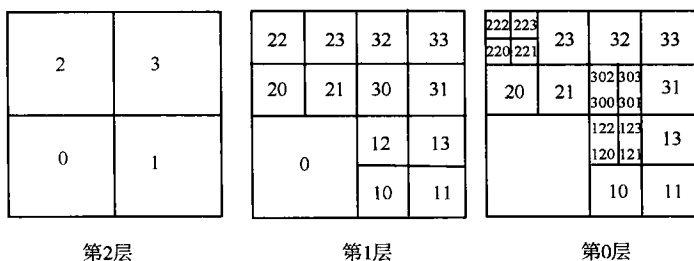


图 1.7 连续等分方块的 Morton 编码

4) 区域四叉树和八叉树

四叉树和八叉树都是层形数据结构，它们分别把某像元块连续等分成 4 块或 8 块。

假设有一个 8 行 \times 8 列的栅格图像 [如图 1.8 (a) 所示]，像元值以黑（为 1）白（为 0）二值分布。把该图像分成 4 份，如果每块由黑白混合组成则进一步分成四份，至得到属性均一的图像块，在图像等分的第 3 个阶段（第 0 级），图像块就等同于像元。在图 1.8 (b) 中，最大的图像块按 Morton 顺序显示，并从西南角开始标上十进制注记符。

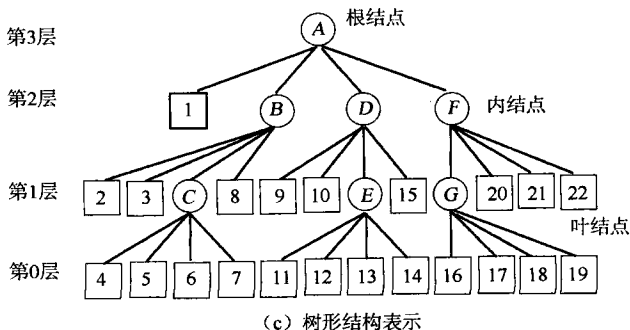
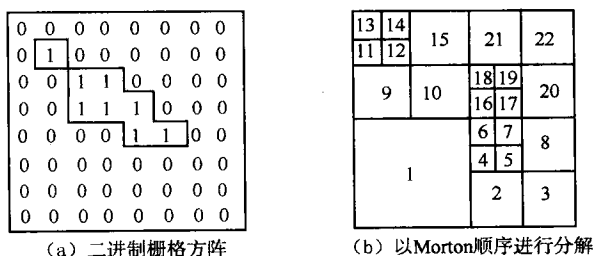


图 1.8 栅格图像及其 Morton 分解与树形表示

图像还可以表示为一棵树 [如图 1.8 (c) 所示], 方框表示叶结点并用序列号标记, 内部结点 (非叶结点) 用圆圈来表示并用字母标记, 顶部是根结点。每个结点都代表一个图像块, 图像块的大小取决于它在树中的层次高低, 最低层 (最深) 为第 0 层, 在这一层的图像块与栅格像元等同。

一般来说, 地图上所记录的属性值有许多。当图形以树形结构表示时, 叶结点包含的像元 (第 0 层图像块) 对应某一类别值, 叶结点没有子结点, 它们的类型或黑或白。内部结点由于类别混合形成灰色, 内部结点的子结点可以是新的内部结点也可以是最后的叶结点。

八叉树与四叉树类似, 唯一的不同是前者每个父结点有 8 个子结点并且地址码也是八进制数。

运用四叉树或八叉树来代替完整的栅格结构的目的是, 为了节省栅格数据的空间需求。通常, 如果空间精度增加一倍 (如行、列数增加), 栅格数据会增加到原先的 4 倍, 而四叉树的大小还仅仅是原先的两倍。随着图像精度的提高, 四叉树的深度也会增加, 此时栅格方式与四叉树方式存储空间的差异会更明显。但是, 栅格图像在相邻像元连续变化的情况下有时无法进行压缩, 如棋盘格式, 线性四叉树所需空间是完全栅格的两倍, 因为在第 0 层每个像元都是一个叶结点。空间上的节省提高了某些算法处理四叉树的效率, 因此四叉树地址可以用单个 Morton 地址来表示, 查找某一地址的图像块时就比较快捷。两幅或多幅四叉树表示的影像的叠置也同样比较有效。

另外, 无论是从栅格数据还是从矢量数据构建四叉树或八叉树, 都比较费时, 特别是对层次较多而且空间变化复杂的树更是如此。同样, 某些操作运用四叉树结构时与完全栅格相比反而更慢。四叉树数据的显示比游程编码数据要慢。四叉树不利于需要创建新树的操作, 如转置、旋转或比例尺变换等。选择是否运用四叉树表示栅格数据, 需要在处理速度和存储容限之间做折中。

2. 矢量数据结构

1) Spaghetti 结构

在 Spaghetti 结构中, 坐标表是与每一个基本的空间对象 (点、线或多边形) 相联系的 (如表 1.2 所示)。它不使用拓扑属性, 因而对地图遍历时需要查找所有的空间坐标。这对查询操作非常不利, 但显示非常方便。点、线和多边形都有各自的坐标表, 彼此并不相连。这种连接只有通过计算空间坐标才能确定。即使在一幅复杂程度为中等的地图中, 空间坐标也要占大量的存储空间, 比如分析一个点是否在某个多边形内或确定两条线的交点等操作就非常费时。表 1.2 表示了简单的点、线和闭合多边形的数据结构 (Spaghetti 结构), 在该结构中线和多边形都没有拓扑数据, 多边形的公共边界是两个相邻多边形的公共部分, 所以被定义了两次。