



第七章 空间数据索引



空间索引技术

- 一、 空间索引技术
- 二、 简单格网空间索引
- 三、 KD树索引（二叉树索引）
- 四、 R树索引
- 五、 四叉树索引
- 六、 可扩展的哈希索引
- 七、 多级索引
- 八、 空间填充曲线

一、空间索引技术

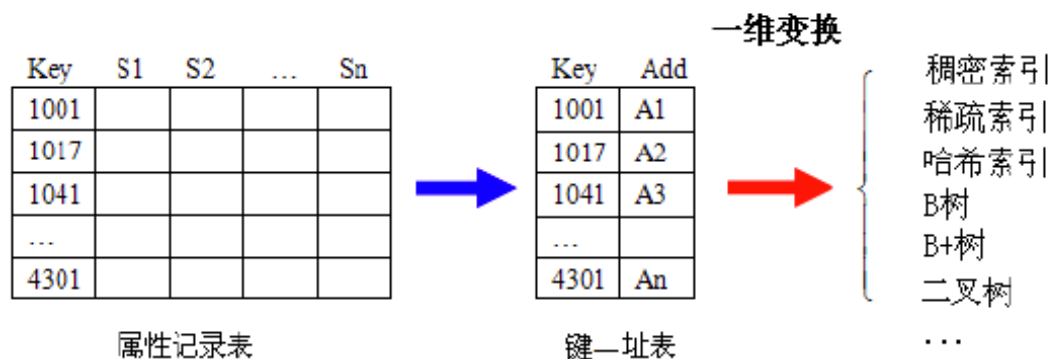
索引是对被索引数据集种的数据的某种属性的**结构化描述**，它使得在对数据进行查询时，不必遍历所有数据，只通过对索引数据的访问，就能得到查询结果或者得到一个能够包含全部查询结果的较小的数据集。**索引结构**包括索引数据结构、索引的建立及维护算法等内容。

空间索引是依据空间实体的位置和形状或空间实体之间的某种空间关系，按一定顺序排列的一种数据机构，其中包含空间实体的概要信息，如对象标识、外接矩形以及指向空间实体的指针等。

借助空间索引的筛选，可以排除大量与特定空间操作无关的地理实体，从而缩小空间数据操作的范围，提高空间数据处理和空间分析的速度和效率。为了提高数据存取和管理的效率，空间数据库都需建立空间索引。

空间索引技术是提高GIS数据检索查询和空间分析的核心技术。

传统的数据库索引技术如B树、B+树、二叉树、ISAM索引、哈希索引等都是针对一维的属性记录的主关键字索引而设计的，不能直接用于空间数据库的索引。



空间数据：多类型、**多维**、动态变化、形状复杂。

空间索引应动态构造、独立于数据、自动增长、快速反应、空间有效。

处理海量数据时还需建立多级索引。

空间索引结构：树结构、线性映射、多维空间区域变换

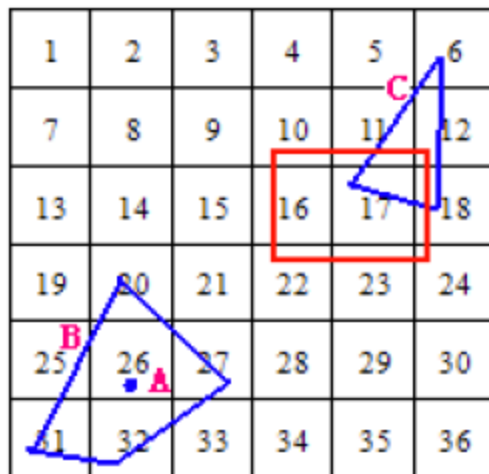
从应用上分为：静态索引、动态索引

一些典型的索引：网格、B树、R树、四叉树、哈希、曲线填充等

二、简单格网空间索引

■ 1) 网格空间索引的基本原理

将地理空间进行规则网格划分，划分成大小相同的网格，然后基于网格建立空间索引，在每个网格索引项里登记上落入该网格的空间对象的目标标识。 关键：网格大小的确定

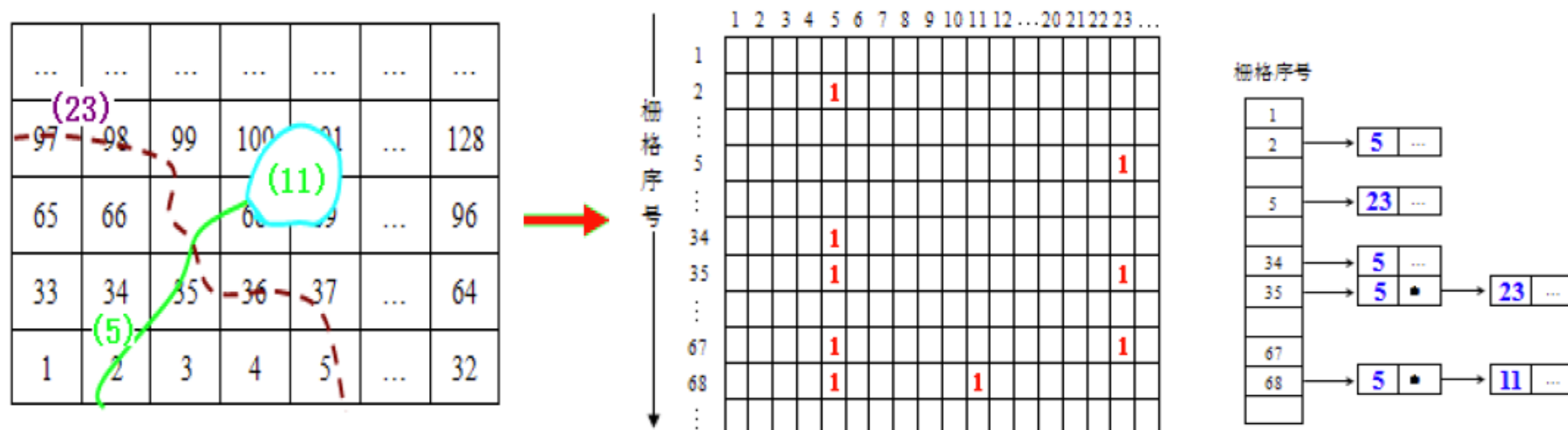


■ 2)简单网格索引编码

1. 传统的简单网格索引编码

每个网格分别对应一个索引条目（记录），在每个索引记录中登记上所有位于或穿过该网格的物体的目标标识。

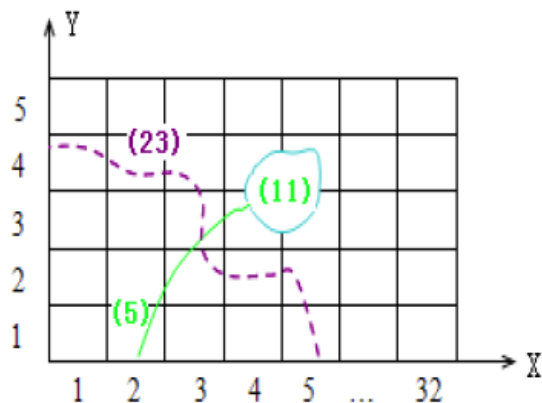
实现方法：变长指针法、位图法。



■ 3)改进型简单网格索引编码

将传统的简单网格索引编码由一维升至二维，变成X和Y两个方向上的编码。将空间对象标识、空间对象所在的网格的X和Y方向上的编码以及空间对象的外包络矩形(Box)作为一条记录存储。

改进型网格索引保持了网格在空间上相邻则编码值也相邻的特性，这样在SQL查询时，就可以使用连续表示方法，而且该索引存储了空间要素的外包络矩形，可以为查询操作过滤掉非查询范围内的要素。



X方向 网格编码	Y方向 网格编码	目标标识	目标外包络矩形
1	1		
2	1	5	[x1,y1],[x2,y2]
3	1		
4	1		
5	1	23	[x5,y5],[x6,y6]
...	
2	2	5	[x1,y1],[x2,y2]
3	2	5	[x1,y1],[x2,y2]
3	2	23	[x5,y5],[x6,y6]
4	2	23	[x5,y5],[x6,y6]
...	

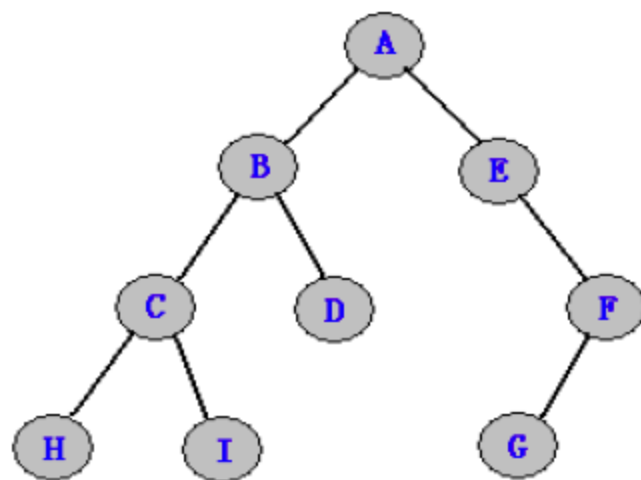
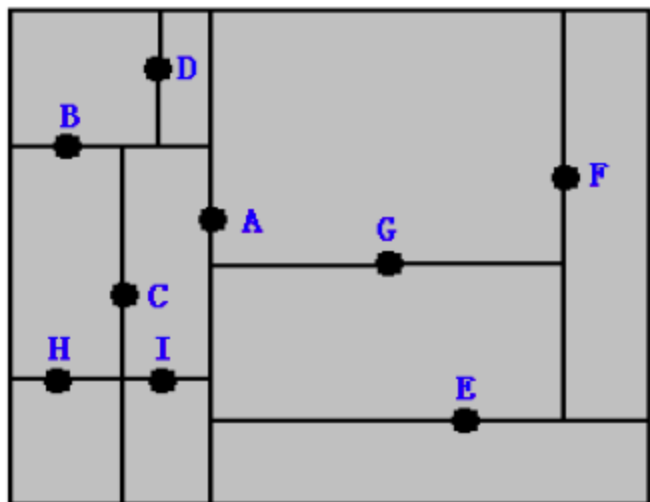
三、KD树索引（二叉树索引）

■ 1) KD树索引 1D、2D、3D、4D、KD

KD树是二叉查找树 (Binary Search Tree, BST) 在k维空间的自然扩展，是一种检索k维空间点的二叉树。

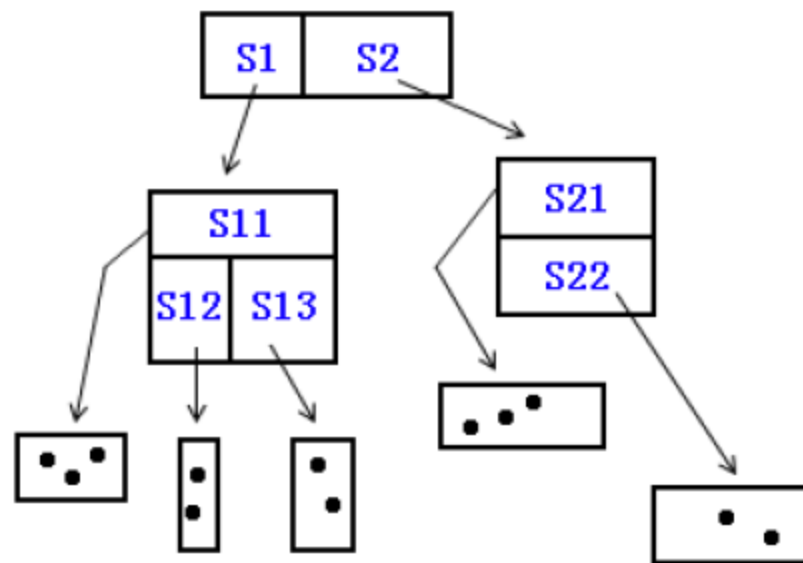
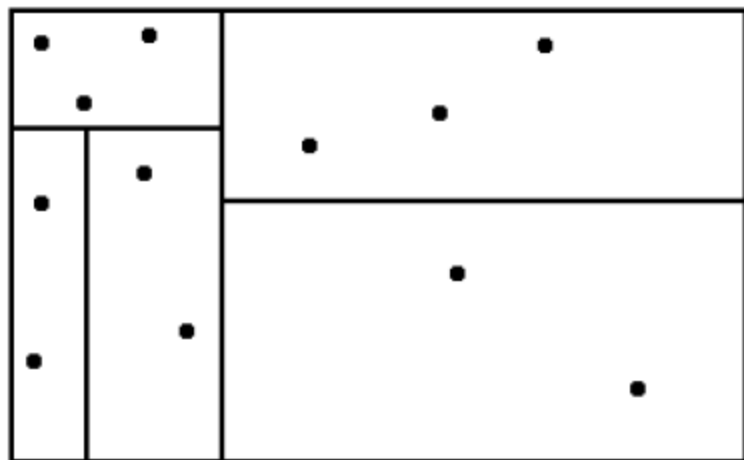
KD树的每个结点都代表一个k维空间点，并且和一个矩形区域相对应，树的根结点和整个研究区域相对应。

KD树的查找、插入、删除。



■ 2) KDB树索引

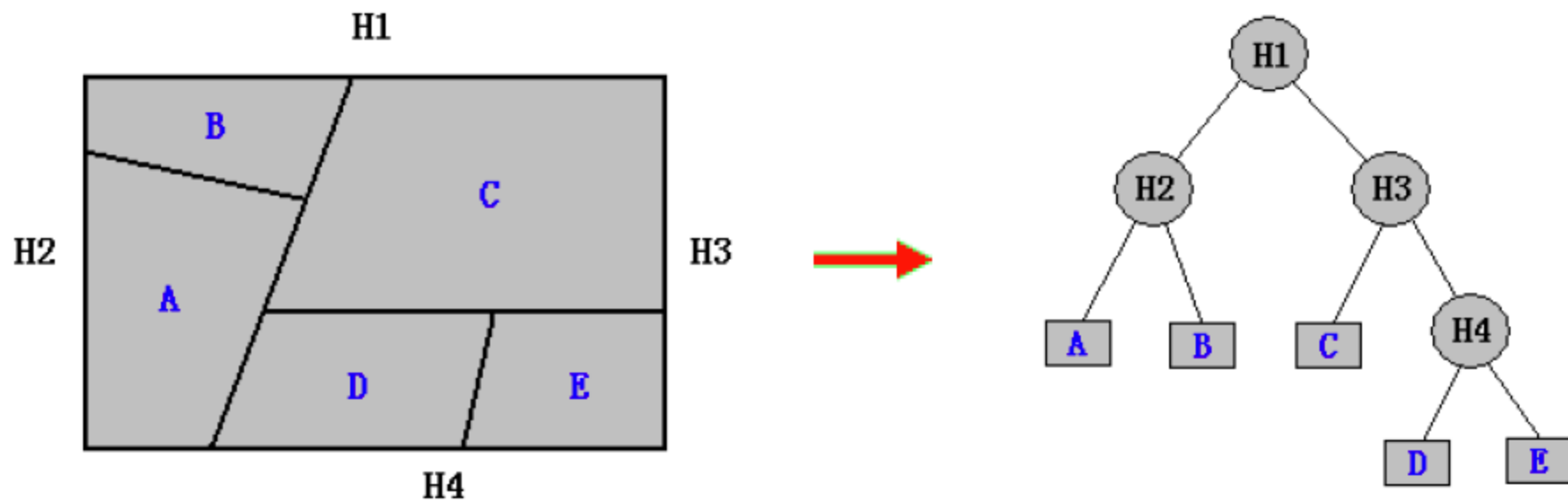
KDB树是KD树与B树的结合，它由两种基本结构—**区域页**（Region Page, 非叶结点）和**点页**（Point Page, 叶结点）构成。点页存储点目标，区域页存储索引子空间的描述及指向下层页的指针。



■ 3) BSP树索引

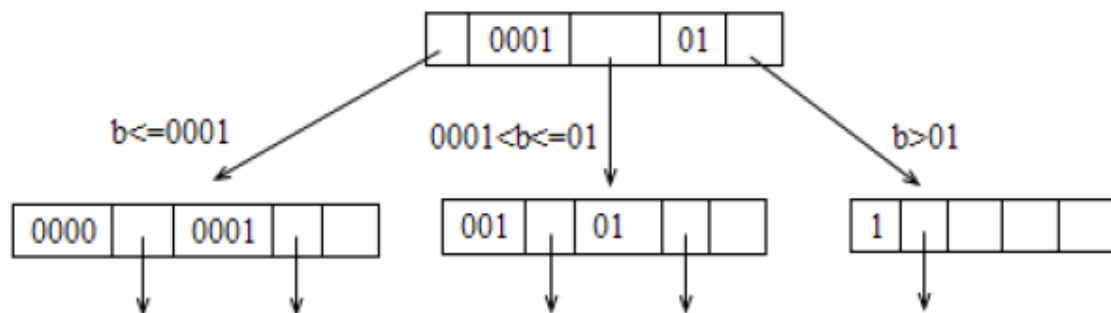
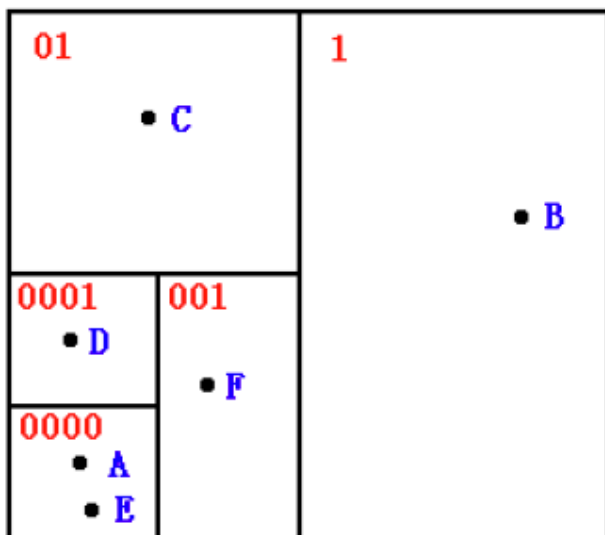
BSP树 (Binary Space Partitioning Tree, 二值空间划分树) 也是一颗二叉树，其是将空间逐级进行一分为二的划分。

BSP树能够与空间对象的分布特征相适应，但是，BSP树的深度通常较大，对各种操作均有不利影响。



■ 4) G树索引

与KD树类似，G树也是按照循环交替的方式对空间进行分割，但它采取的是平均分割空间的方法。各维的属性值，都能规范化到0~1区间，分割的每个区域不超过2个点。

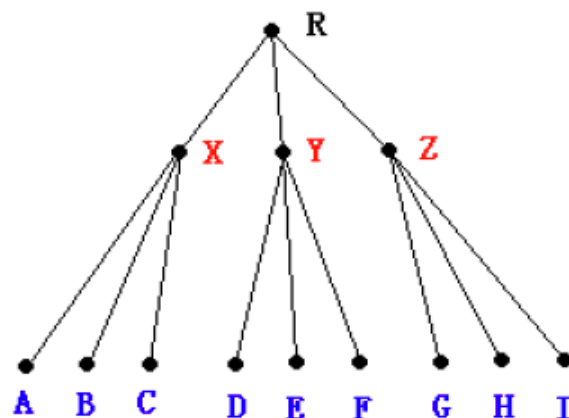
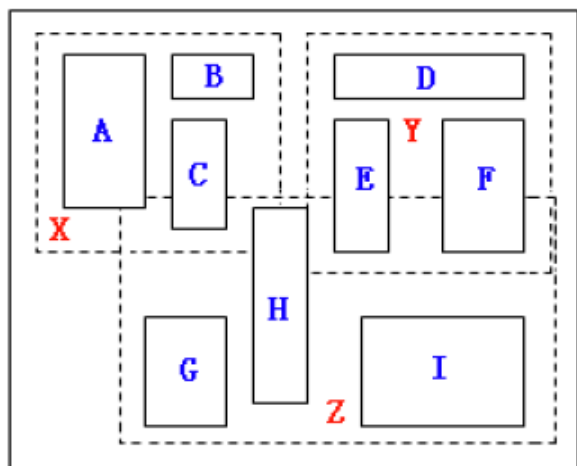


四、R树索引

■ 1) R树索引

R树用空间对象的最小外包矩形R来表示对象的范围。矩形是广义的概念。R树及其众多变种都是一种平衡树，而结构类似于B树。R树利用B树的某些本质特性来处理多维数据。

R树的所有叶子都在同一层，其采用空间聚集的方式把相邻近的空间实体划分到一起，组成更高一层的结点。



R树的查找、插入、删除

结点分裂

R树的特点

R树实例

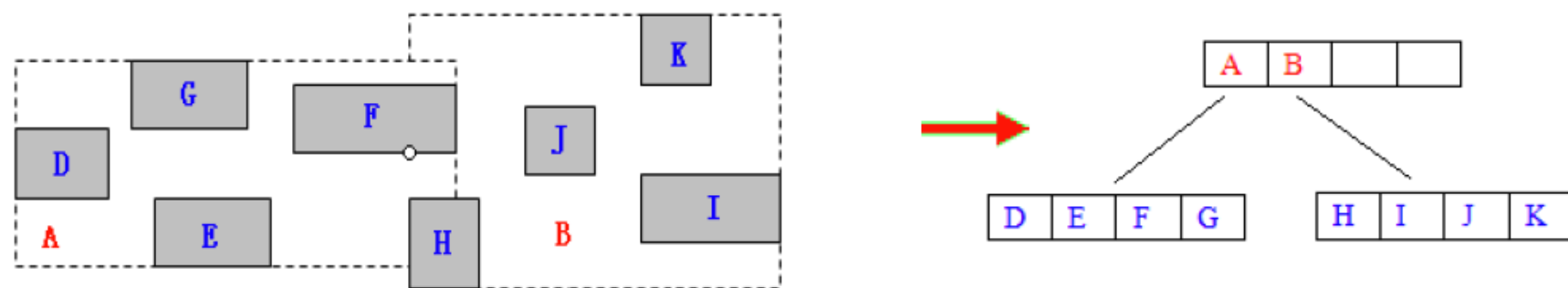
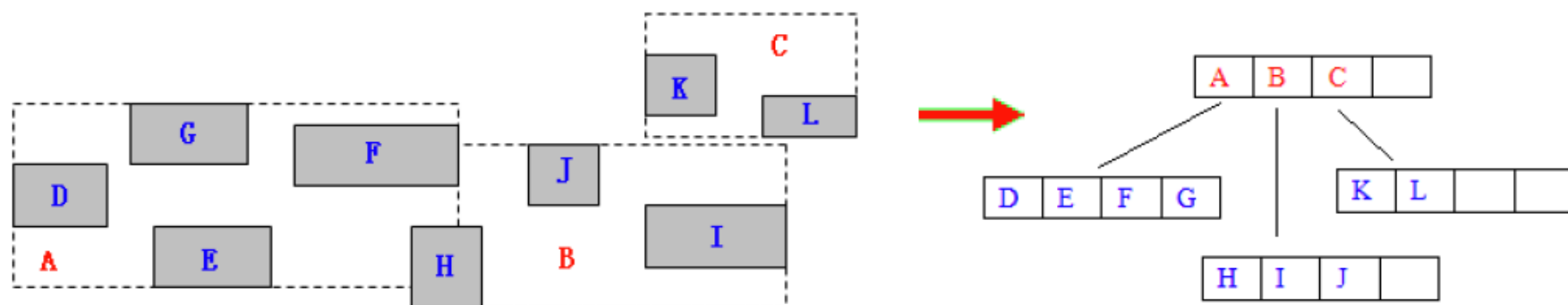


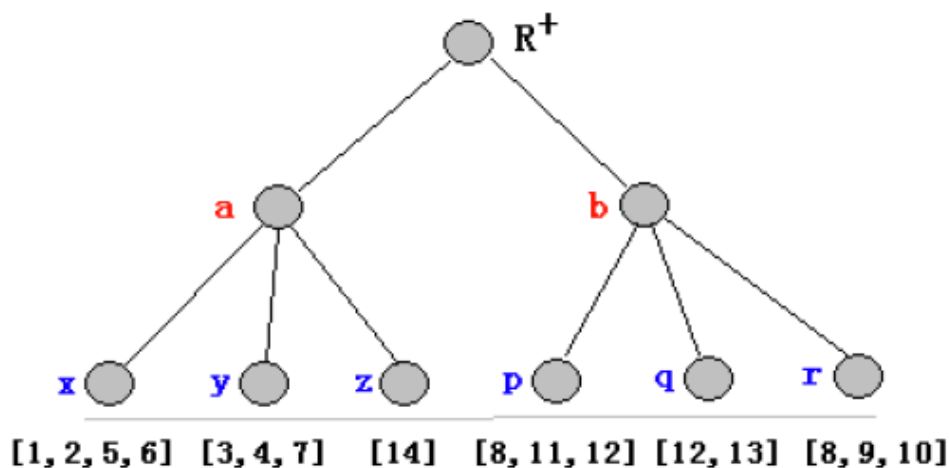
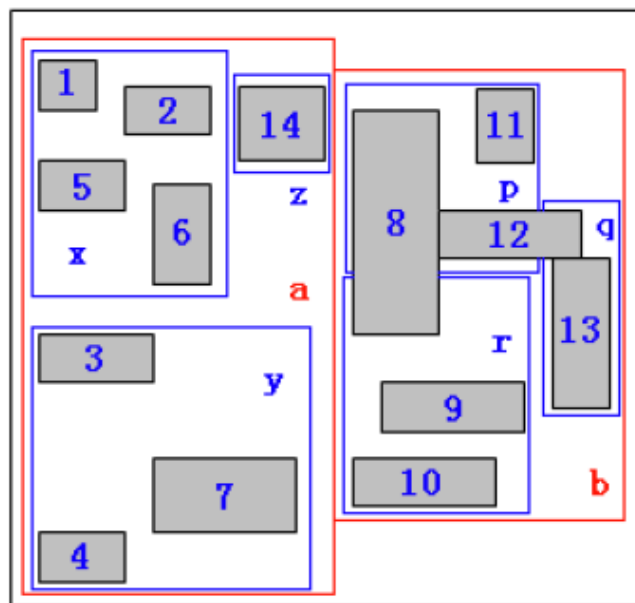
图 5-17 一地图与其对应的 R 树结构



■ 2) R⁺树索引

R⁺树的特点：中间结点的目录矩形之间不能重叠，结点中的数据项和索引项的数目没有严格限制（但有最大数目的限制），叶结点中的数据矩形允许重叠，一个空间对象标识可能重复存储在多个叶结点种。

R⁺树的查找、插入、删除、结点分裂、优缺点。

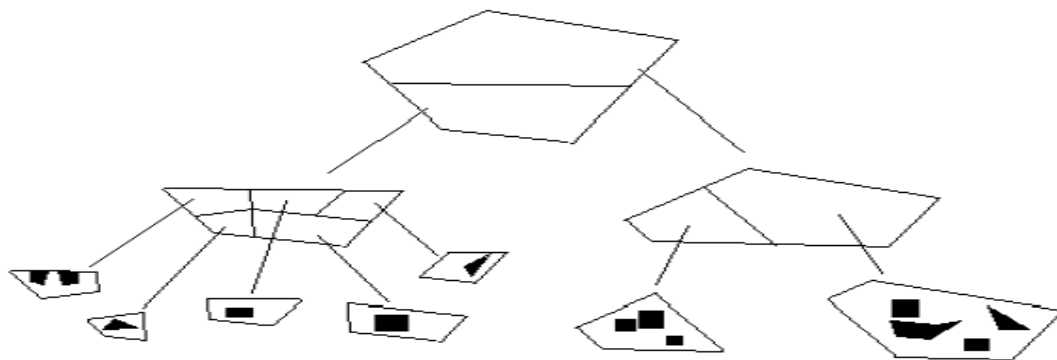


■ 3) R*树索引

R*树的特点：在结构上与R+树完全相同，在树的构造、插入、删除、检索算法上也基本相同，但在算法上做了许多细致的研究，特别在插入算法方面作了较多改进，显著提高了性能。

■ 4) CELL树索引

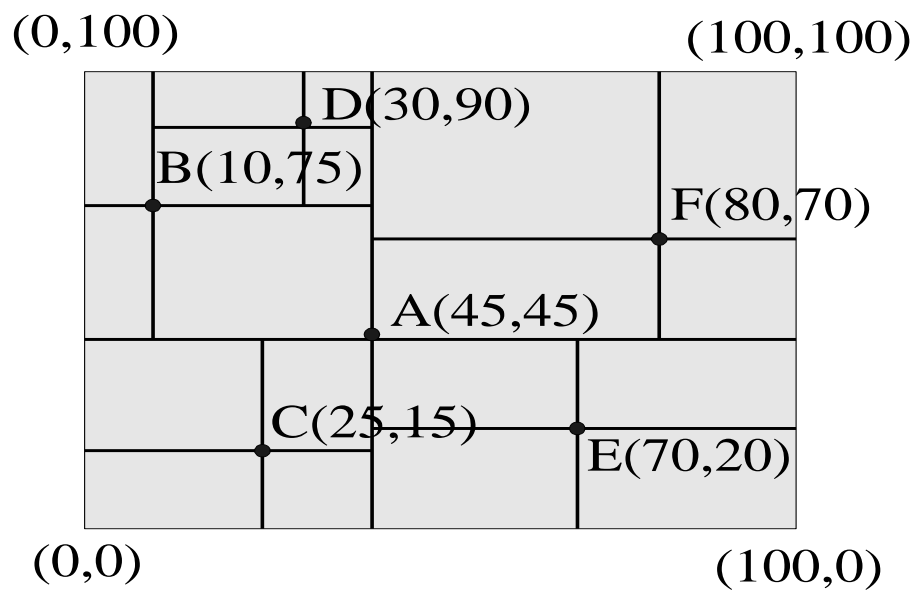
CELL树的特点：用凸多边形对空间进行划分，子空间不重叠。CELL树的磁盘访问次数比R树和R+树都少，搜索性能高。



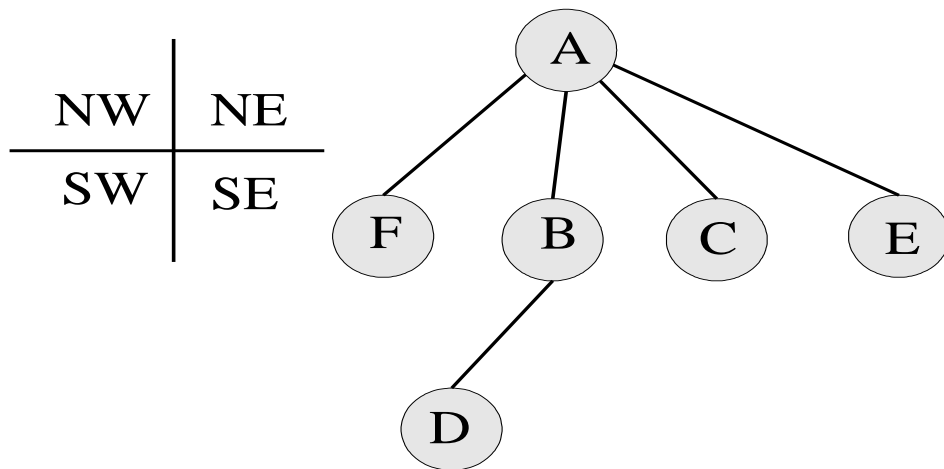
五、四叉树索引

1) 点四叉树索引

- 点四叉树是QuadTree的一个变种，主要是针对空间点的存储表达与索引，与KD树相似，两者的差别是在点四叉树中，空间被分割成四个矩形，四个不同的多边形对应于SW、NW、SE、NE四个象限。
- 点四叉树的每个结点存储了一个空间点的信息及孩子结点的指针。



(a) 平面图



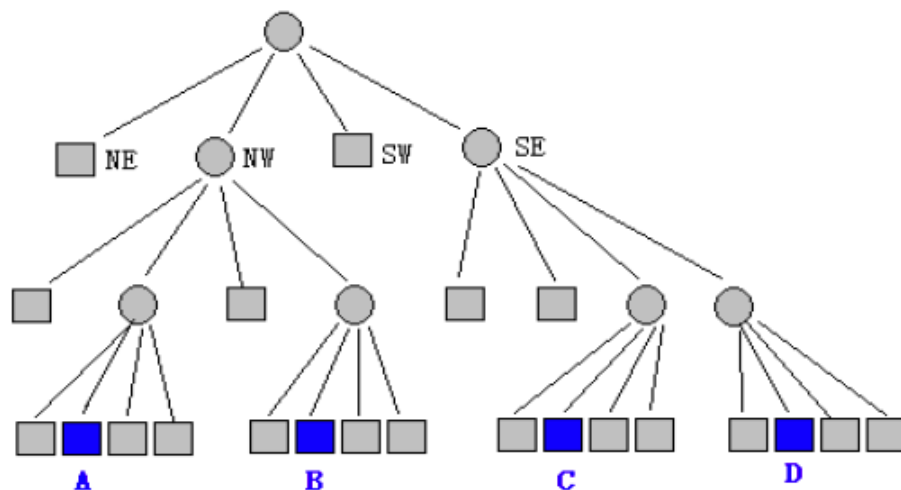
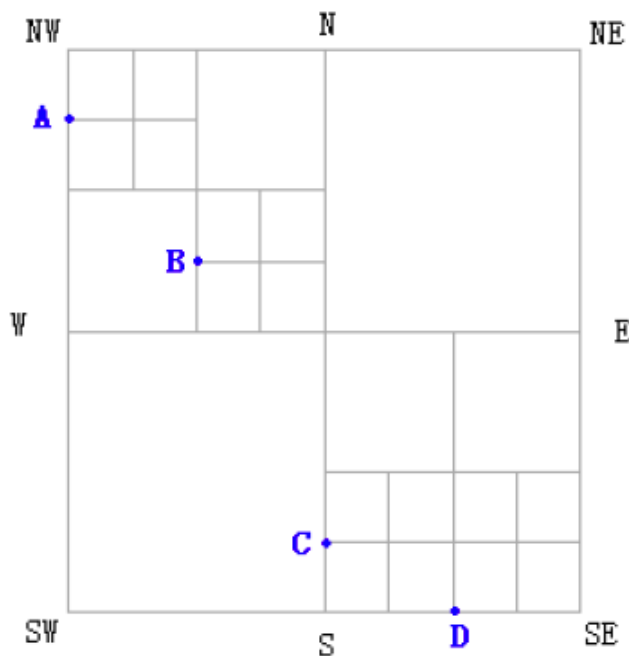
(b) 结构图

- 点四叉树的结构简单，对于精确匹配的点查找性能较高，查找路径只有一条。
- 但对区域查找，查找路径有多条，查找性能较差。
- 其搜索过程和KD树相似，如果想从Point QuadTree中删除一个点的话，则会引起相应的子树的重建，一个简单的方法是将所有子树上的数据重新插入。

2) MX四叉树索引

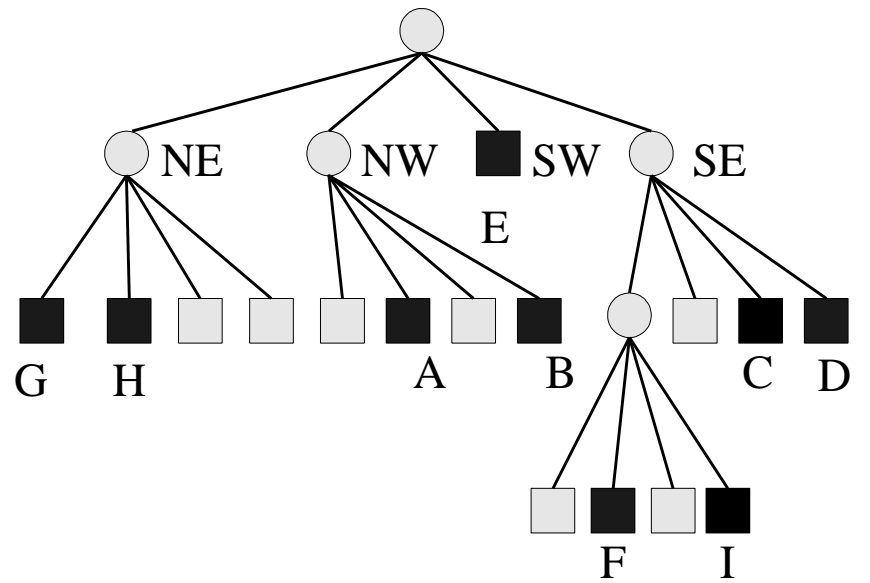
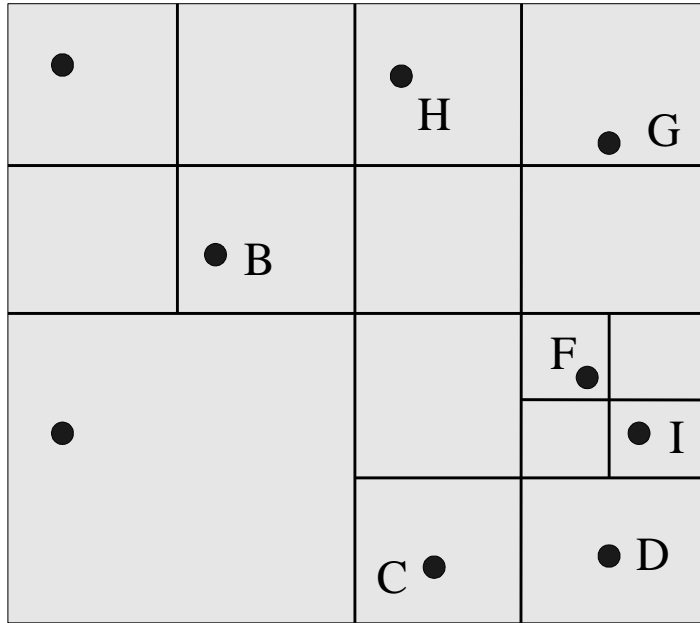
正方形空间被递归地等分为四个子正方形，直到每个正方形之内的空间点不超过给定的桶容（如一个对象）。。

特点：所有空间点都位于叶结点、树的深度是平衡的、可以采用线性四叉树进行存储。插入时可能导致树的深度变化（叶结点需重新定位）



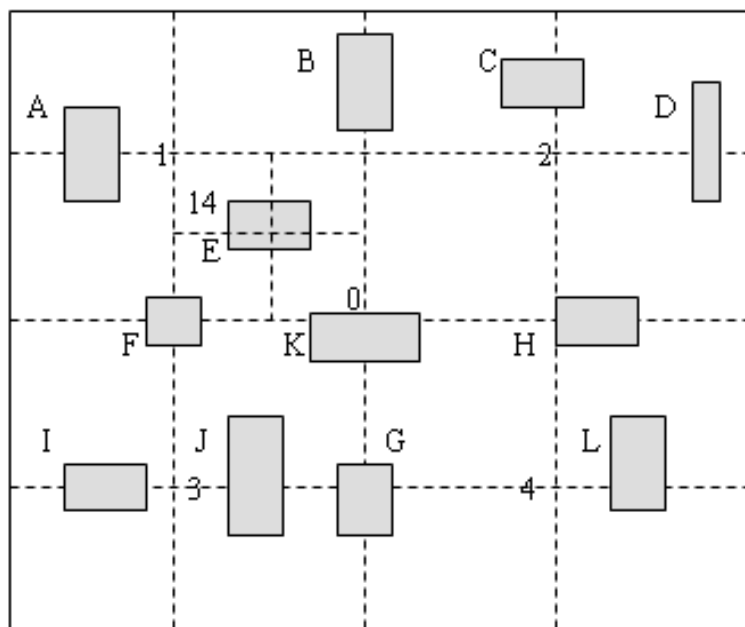
3) PR四叉树

- PR四叉树是点四叉树的一个变种，它不使用数据集中的点来分割空间。在PR四叉树中，每次分割空间时，都是将一个正方形分成四个相等的子正方形，依次进行，直到每个正方形的内容不超过所给定的桶量（比如一个对象）为止。
- PR四叉树叶子结点可能不在树的同一层次；叶子结点的黑结点或空结点分别表示数据空间某一位置空间点的存在与否。

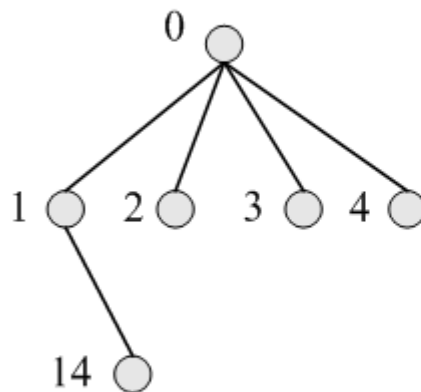


4) CIF四叉树索引

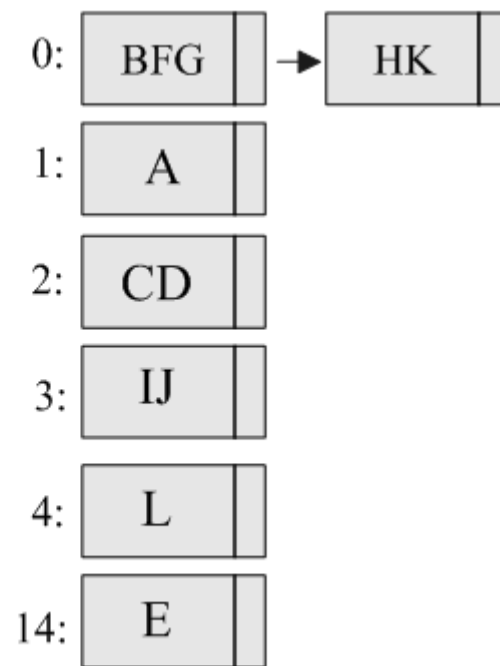
- 它的组织方式与区域四叉树相似，数据空间被递归地细分直至产生的子象限不再包含任何矩形。
- 在分解的过程中，与任一划分线相交的矩形与该划分线对应的象限相关联，矩形只属于完全包围它的最小象限。



(a) 平面图



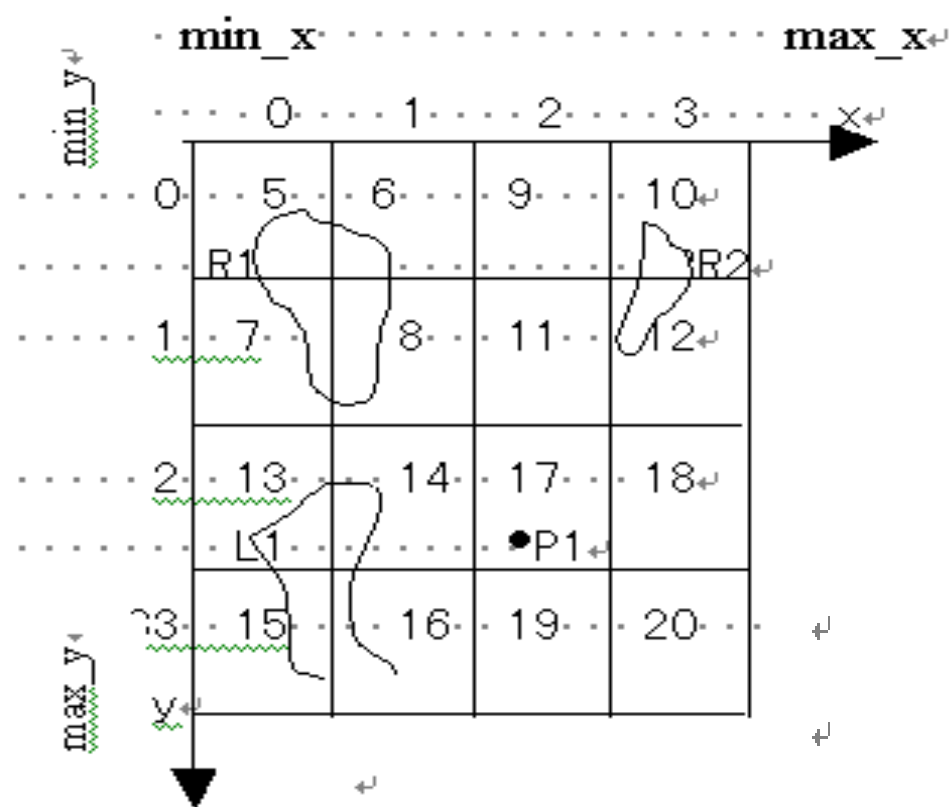
(b) 结构图



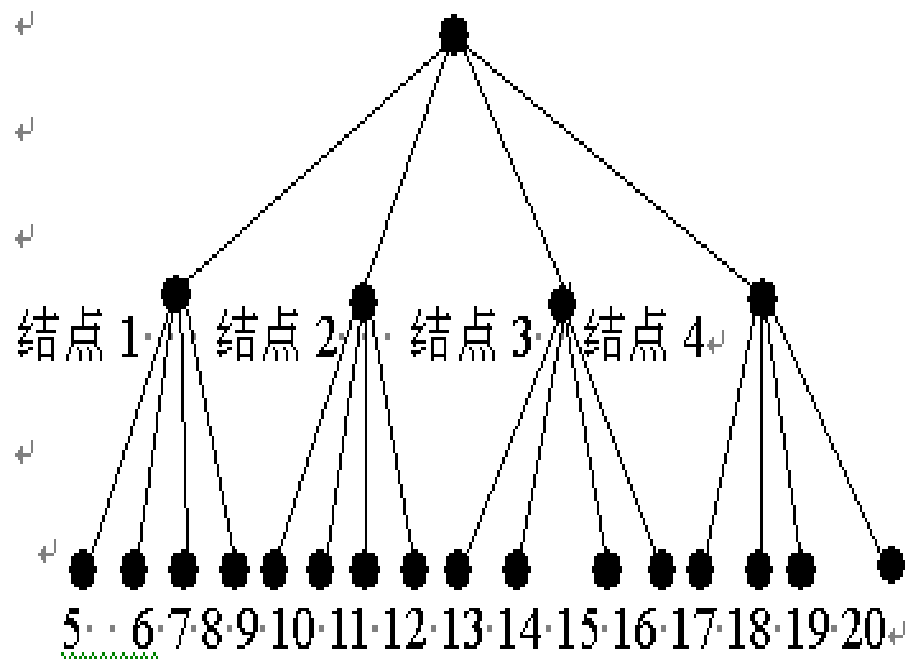
(c) 桶表

5) 基于固定网格划分的四叉树索引

- 在基于固定网格空间划分的四叉树空间索引机制中，二维空间范围被划分为一系列大小相等的棋盘状矩形，即将地理空间的长和宽在X和Y方向上进行 2^N 等分，形成 $2^N \times 2^N$ 的网格，并以此建立N级四叉树。
- 在四叉树中，空间要素标识记录在其外包络矩形所覆盖的每一个叶结点中。
 - 但当同一父亲的四个兄弟结点都要记录该空间要素标识时，则只将该空间要素标识记录在该父亲结点上，并按这一规则向上层推进。



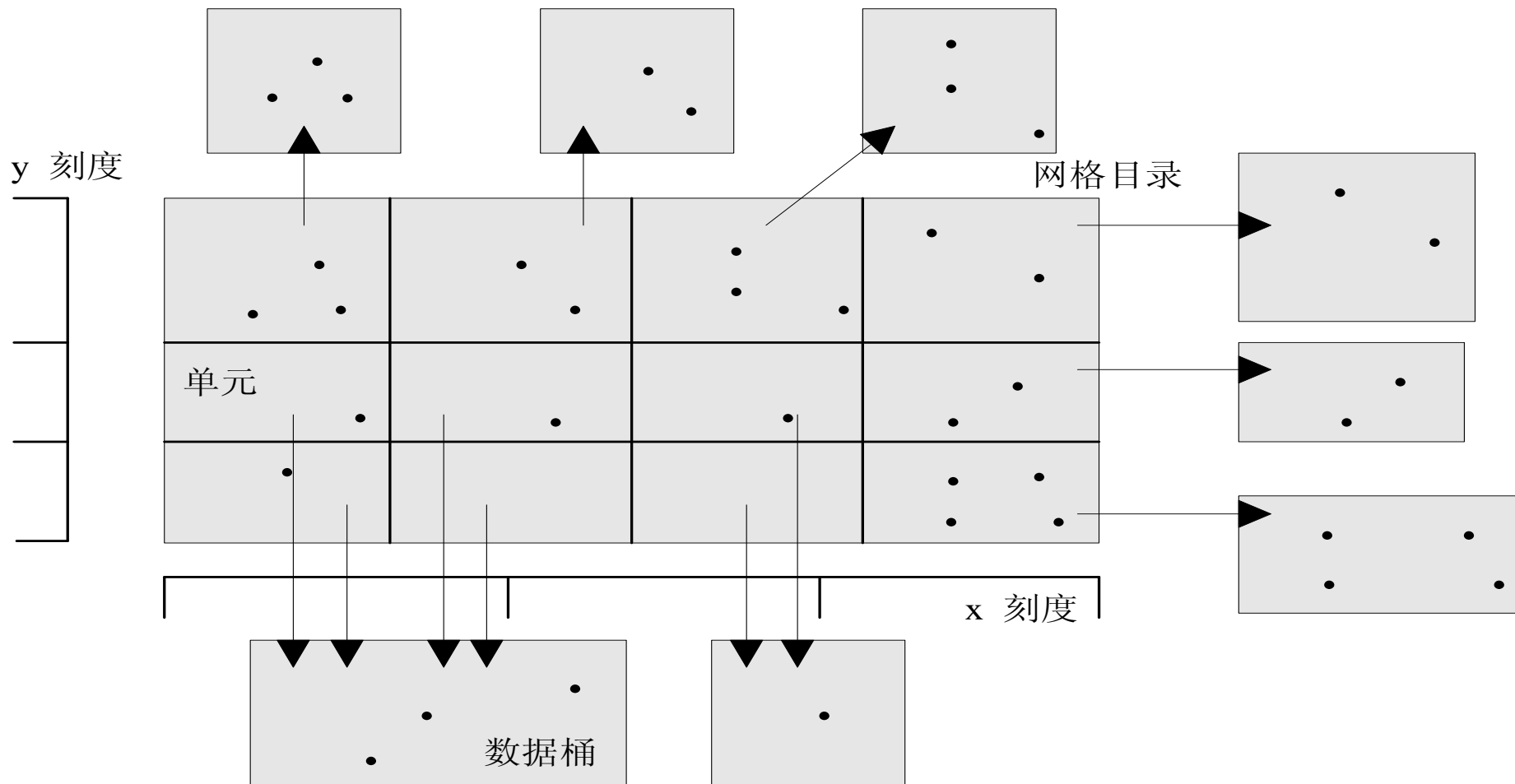
有效减少了大的空间要素（跨越多个网格）在结点中的重复记录。



六、可扩展的哈希索引

网格文件

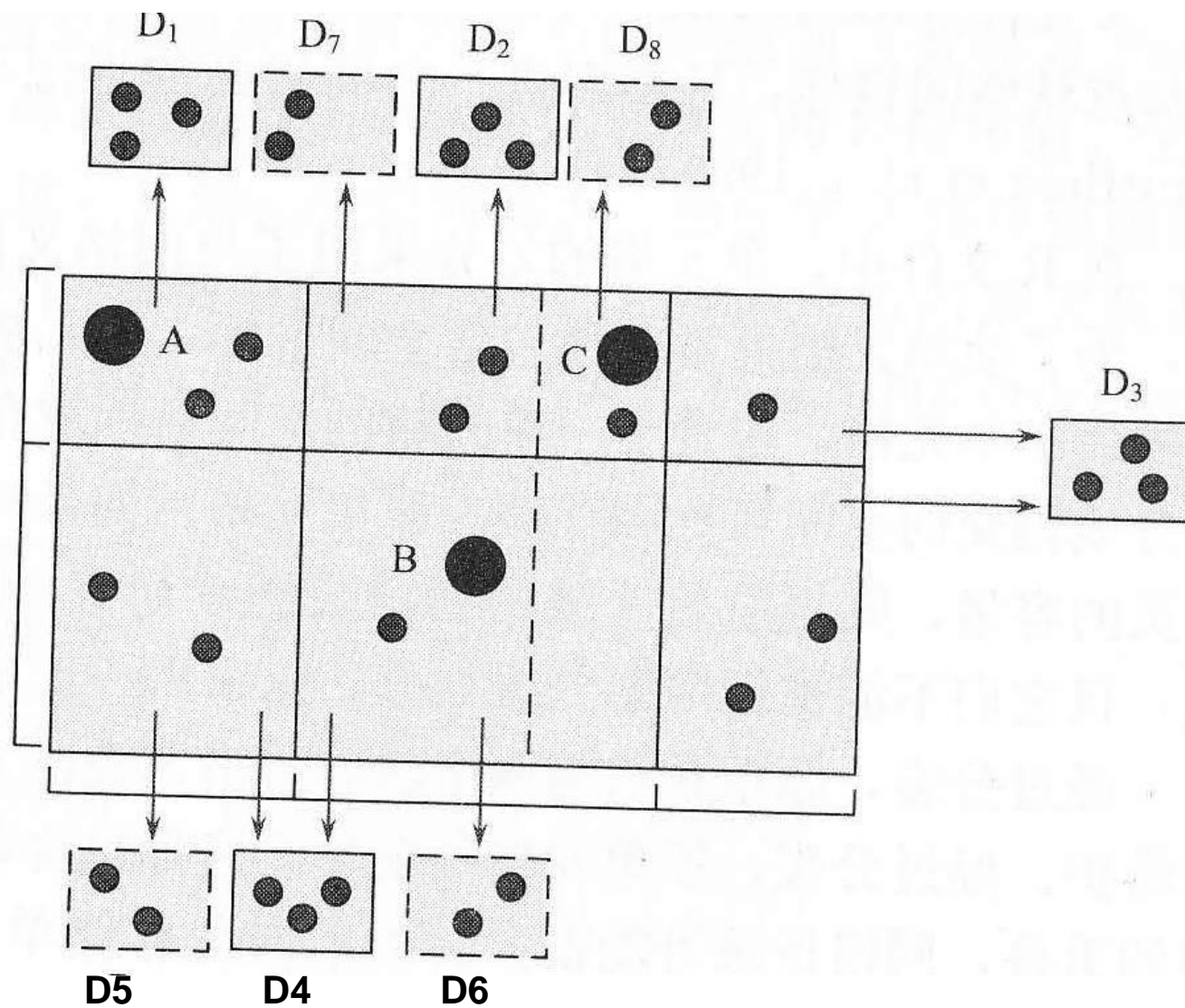
- 网格文件是一种典型的基于哈希的存取方式，它是由包含着很多与数据桶相联系的单元的网格目录来实现
- 对于二维空间为平行于x或y轴的直线，这一超平面将数据空间划分为两个子空间。所有的边界一起将整个数据空间划分成许多k维的矩形子空间，这些矩形子空间称为网格目录，由一个k维的数组表示。



网格文件的结构

■ 目录项（即网格目录数组的元素）和网格单元元网格目录的对应关系。网格目录的地址，对应一个磁元网格数据桶，一般一个数据桶包含了一个网格数据目标，称为数据页。

■ 数据页所对应的一个或多个网格单元称之为数据桶。数据桶区域存储的区域两个不相交。每个数据桶存储多个网格单元，只要这几个网格单元一起形成一矩形的区域。



网格文件插入目录示意图

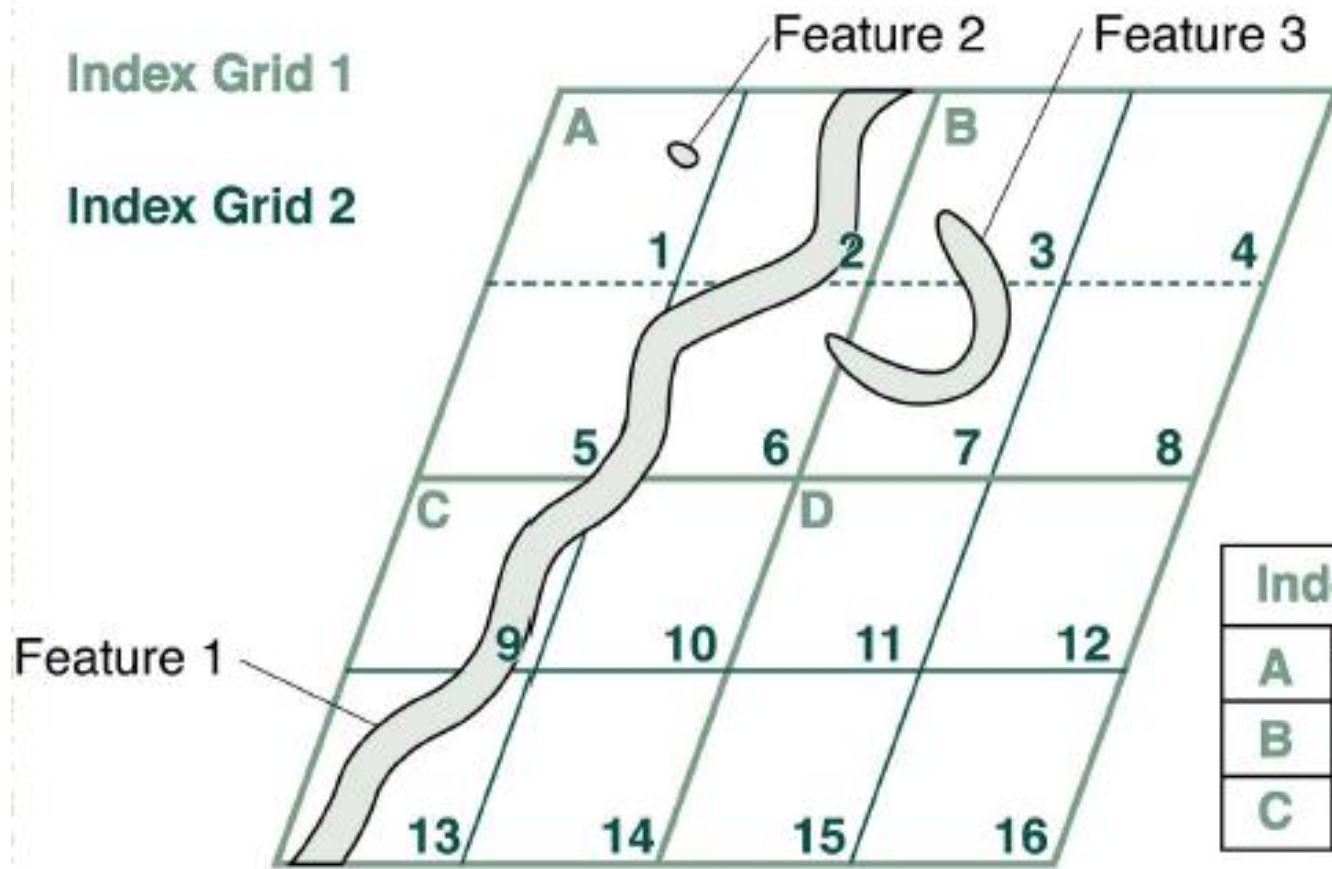
七、多级索引

- ◆ 多级索引：将多个不同或相同的索引方法组合使用，对单级索引空间或者空间范围进行多级划分，解决超大型数据量的GIS系统检索、分析、显示的效率问题。
- ◆ 多级索引由于其多级的结构特性，往往可以很好地利用计算机硬件资源的并行工作特性，如多CPU，磁盘阵列等，来提高检索的效率。

多级索引方法很多，不同的单级索引组合便可以构成不同的多级索引方法。但是由于每种索引的特性不同，所以如何将多种索引融合成一体构成一种高效的多级索引也是空间索引的一个研究方向

Index Grid 1

Index Grid 2

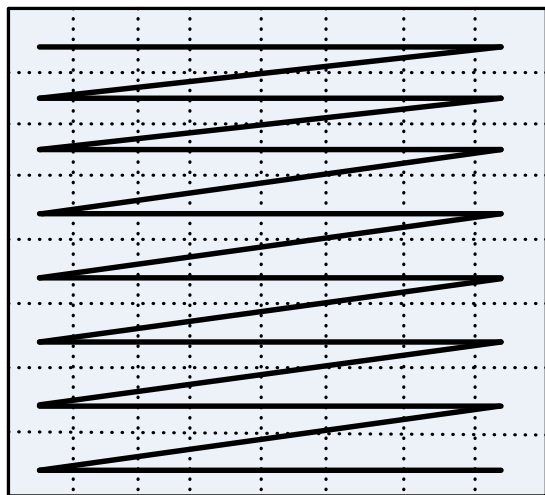


Index 2

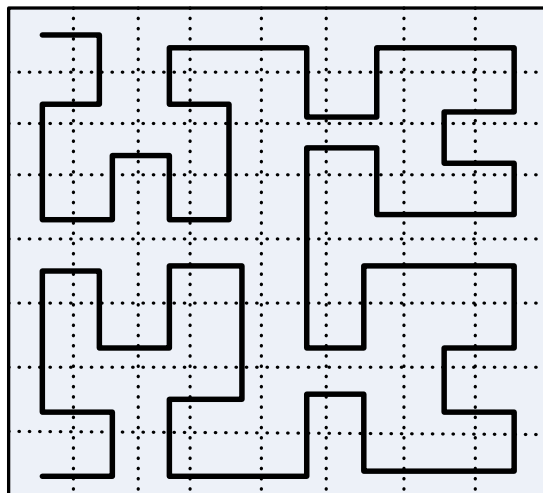
1	2
2	1
3	3
5	1
6	1,3
7	3
9	1
10	1
13	1

八、空间填充曲线

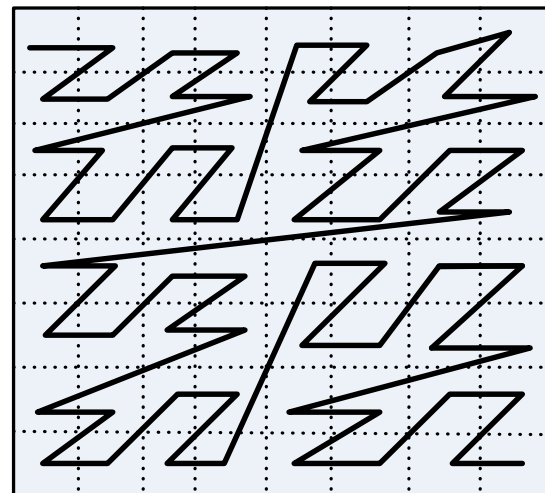
- 空间填充曲线是一种重要的近似表示方法，将数据空间划分成大小相同的网格，再根据一定的方法将这些网格编码，每个格指定一个唯一的编码，并在一定程度上保持空间邻近性，即相邻的网格的标号也相邻，一个空间对象由一组网格组成。这样可以将多维的空间数据降维表示到一维空间当中。
- 理想的空間映射方法是：在多维空间中聚集的空间实体，经过填充曲线编码以后，在一维空间中仍然是聚集的。



(a) 行排序



(b) Hilbert排序



(c) Z排序

1) Z-ordering曲线（peano曲线）

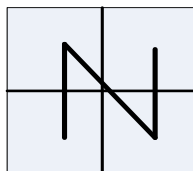
- **Z-排序（Z-ordering）** 技术将数据空间循环分解到更小的子空间（被称为**Peano Cell**），每个子空间根据分解步骤依次得到一组数字，称为该子空间的**Z-排序值**。
- 子空间有不同的大小，**Z-排序**有不同的长度，显然，子空间越大，相应的**Z-排序值**越短。这里，分辨率（**resolution**）是指最大的分解层次，它决定了**Z-排序值**的最大长度。

$2^n \times 2^n$ 个分区， 编号为 $0 \sim 2^n \times 2^n - 1$

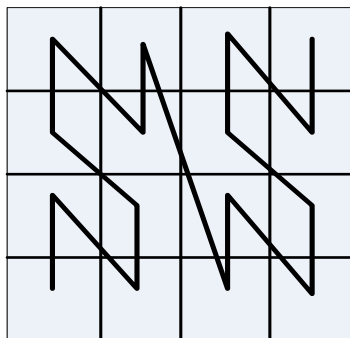
$n=0$



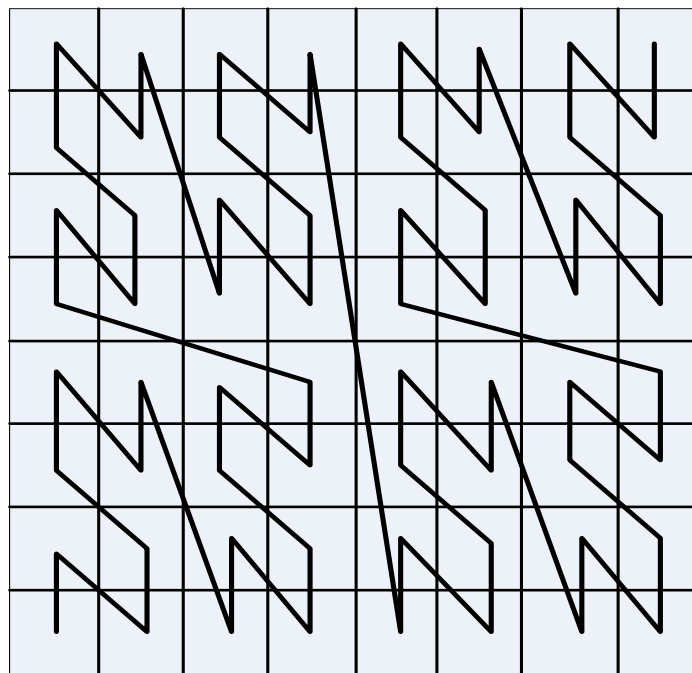
$n=1$



$n=2$



$n=3$



Z-排序示例

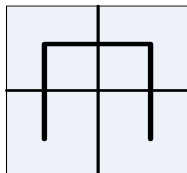
2) Hilbert曲线

- 与Z-排序类似，Hilbert曲线也是一种空间填充曲线，它利用一个线性序列来填充空间，其构造过程如图5-33所示。
- 实验证明，Hilbert曲线的方法比Z-排序好一些，因为它没有斜线。不过Hilbert曲线算法的计算量要比Z-排序复杂。

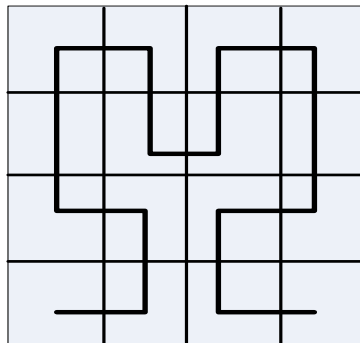
$n=0$



$n=1$



$n=2$



$n=3$

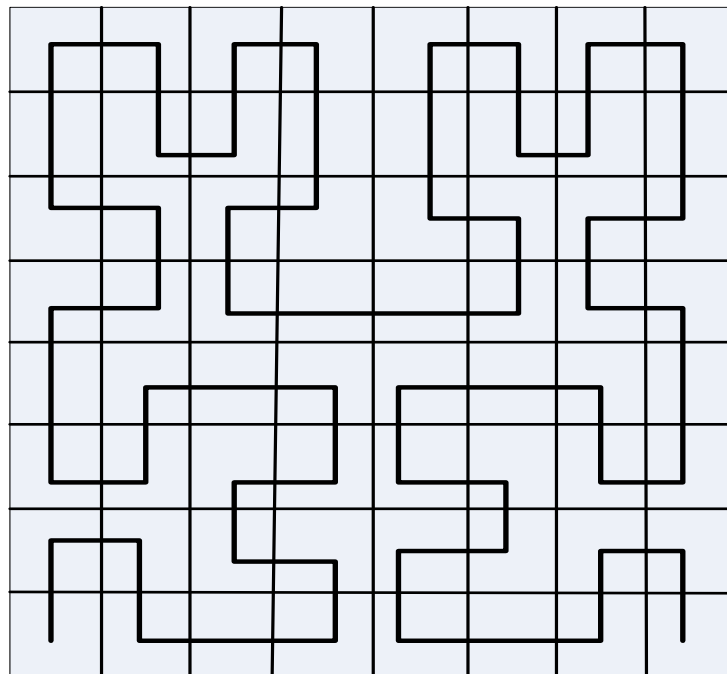


图5-33 Hilbert曲线示例

空间索引的方法很多，但基本原理都是采用分割原理，把查询空间划分为若干区域，通常为矩形或者是多边形，这些区域包含空间要素并且可唯一标识。

目前，分割方法一般可归纳为两种：一种是规则分割法，另一种是对象分割法。

规则分割法是将地理空间按照某种规则或半规则方式分割，分割单元间接地与空间要素相关联，空间要素的几何形状可能被分割到几个相邻的单元中，这时空间要素的描述保持完整，而空间索引单元只存储空间要素地址的参考信息。在对象分割法中，索引空间的分割直接由空间要素来确定，索引单元包括空间要素地址的参考信息和空间要素的外包络矩形。

常见的空间索引方法一般都是**自上而下、逐级划分地理空间**，从而形成各种空间索引结构。比较有代表性的**规则分割法**包括网格系列索引。基于**对象的分割法**主要是包括**R**系列树索引。每一类空间索引方法都有其优越性和使用范围的局限。下表是在对各种类型索引研究的基础上归纳出来的索引综合性能对照表

本讲重点内容

- 空间索引的定义
- 各种空间索引方法