

引用格式:程昌秀,沈石,杨山力. 查询计划枚举中的空间启发式规则研究[J].地球信息科学学报,2017,19(5):581-586. [Cheng C X, Shen S, Yang S L. 2017. Study on spatial heuristic rules for query plan enumeration. Journal of Geo-information Science, 19(5):581-586. ] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00581

# 查询计划枚举中的空间启发式规则研究

程昌秀, 沈石, 杨山力

1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 4. 北京师范大学地理数据与应用分析中心, 北京 100875

## Study on Spatial Heuristic Rules for Query Plan Enumeration

CHENG Changxiu\*, SHEN Shi and YANG Shanli

1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. Center for Geodata and Analysis, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Query plan enumeration and query cost estimation are two important steps in a query optimizer of DBMS. The query plan enumeration is responsible for enumerating some candidate query plans with best or better plan. The query cost estimation is used to choose the best plan for execution. However, if the candidate query plans in the first step are too many, the second step has to spend more time on estimating them. In order to save the cost of estimation time and improve execution efficiency of the system, spatial heuristic rules are used to eliminate some impracticable query plans. This paper firstly explained some basic concepts, i.e. query graph, joined tree, and query plan. Then, we put forward three heuristic rules for spatial equal classes and spatial constrained pairs. The first is that spatial join operators should be established on spatial equal classes or spatial constrained pairs. The second is that the orders of join operators should be equal classes, spatial equal classes, non-Cartesian products of ordinary attributes, spatial constrained pairs and Cartesian products of ordinary attributes. The last one is a recursion rules about spatial equal classes. It means, only the attributes in spatial equal classes of a query plan could be transmitted each other. After that, this paper puts forward two rules for spatial indexing tables. The first is that it's better to replace a spatial table with its spatial indexing, when there is a spatial predicate on some spatial attributes. The second is the spatial indexing table must be on the top of its original table in a query plan and there should be a TID join between spatial index table and its original table. In the following sections, we explain the rules mentioned above and analyse how to improve query efficiency by using low cost operation as soon as possible and how to filter out candidate data as few as possible. At last, we present a sample to show how to eliminate some impracticable query plans by those spatial heuristic rules. Those rules are not only for query optimizer, but also for SQL programmer.

**Key words:** spatial query; enumeration of query plans; spatial heuristic rules; spatial constrain pairs; join tree

\*Corresponding author: CHENG Changxiu, E-mail: [chengcx@bnu.edu.cn](mailto:chengcx@bnu.edu.cn)

收稿日期 2016-12-16; 修回日期: 2017-02-20.

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(41222009); 国家自然科学基金面上项目(41271405); 中央高校基本科研业务费专项资金项目。

作者简介: 程昌秀(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向为空间数据库管理系统与GIS应用。 E-mail: [chengcx@bnu.edu.cn](mailto:chengcx@bnu.edu.cn)

**摘要:**在查询计划枚举空间巨大的情况下,空间启发式规则对排除一些不可行或低效的查询计划,提高系统的执行效率有重要意义。本文基于空间等价类、空间约束对的概念,提出了空间连接应建立在空间等价类或空间约束对上的启发式规则,构建了查询计划树中各类连接关系的放置规则以及空间等价类的连接递推规则,提出了空间索引替换表以及空间索引的若干放置规则。论文阐述了如何尽可能用低代价的空间操作,尽早过滤出较少的数据结果,降低参与后续运算的数据量,提高系统查询效率。最后,以空间查询案例为例,展示了这些规则在缩小枚举空间方面的作用。

**关键词:**空间查询;计划枚举;空间启发式规则;空间约束对;连接树

## 1 引言

查询优化器对提高数据库系统的查询性能具有重要意义。在数据库内核中,查询优化器的主要任务是根据SQL语句涉及的表及相关的参数信息,生成多个有效的查询计划,再根据查询代价评估模型,选出代价最低(执行速度最快)的查询计划。空间查询优化通常分为查询计划生成和代价评估2个阶段。查询计划生成按某种规则罗列出所有可能的查询计划,并尽可能囊括最优计划。查询计划的生成包括树形枚举、表排列、操作枚举3个阶段。代价评估则是根据评估模型,选出代价最低(执行速度最快)的查询计划<sup>[1]</sup>。

本文的研究集中在查询计划生成的树形枚举、表排列阶段。早期计划生成的研究重点是将所有可行计划罗列出来,但是当参与查询的表(含索引表)数目过多时“搜索空间巨大”,导致数据库不能忍受优化器消耗的时间时,查询计划生成的研究开始转到尽量减小搜索计划空间的方向上来。例如,对于涉及 $n$ 个表的查询语句,仅其连接树形有 $\frac{C_{2n-1}^{n-1}}{n}$ 种,每种连接树形又对应 $n!$ 个表排列,故查询计划的枚举空间为上述两值的乘积。在如此巨大的枚举空间中,如何引入一些启发式规则、排除一些不可执行的查询计划,以减轻后续代价评估阶段的系统开销是值得研究的问题。

近年来,国内外在空间索引<sup>[2-5]</sup>、查询算法优化<sup>[6-11]</sup>、查询代价估算<sup>[12-15]</sup>等领域有一定的进展,但有关空间查询计划启发式策略的研究较少。这主要是因为空间查询计划生成与数据库系统内核的相关理论和代码关系密切,研究难度较大。本文在开源Ingres代码的基础上,针对查询优化的树形枚举、表排列两个阶段,结合空间数据类型、空间操作的特殊性,提出了一些生成空间查询计划的启发式策略,用于减少查询计划的搜索空间、减少参与运算的空

间数据量,从而提高查询计划的执行效率。

## 2 查询计划树枚举阶段的一些基本概念和限定

查询图和连接树是数据库查询计划枚举阶段2个重要的概念。查询计划枚举的首要任务就是根据各表之间的连接关系(查询图)生成初步的查询计划(连接树)。

### 2.1 查询图

查询图中各节点表示查询语句涉及的关系 $R_1, \dots, R_n$ ,节点间的连接线则表示两端节点表间的连接谓词。查询图是包含 $R_1, \dots, R_n$ 的无向图,理论上包括链状、星状、树状、环状以及团状几种不同的类型,如图1所示。系统通常选用查询图中直接相连的两表参与连接。如果选择了查询图中不直接相连的两表参与连接,则只能采用笛卡尔连接生成结果,即需要对两个表中所有记录一一连接,故算法复杂度大。查询图虽然给出了查询计划中所有可能的连接,但并不决定连接执行的顺序。

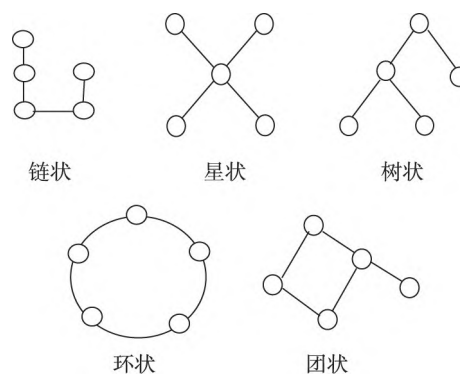


图1 查询图的形状示意

Fig. 1 Demonstration of query graph

### 2.2 连接树

连接树是数据库的内部连接顺序的一种表达形式,其作为逻辑和物理优化的基础,将直接决定查询计划的搜索空间。连接树主要有左深树、右深

树、锯齿树、浓密树4种树形(图2),但是将搜索空间严格限制为左深树。由于左深树与右深树执行过程相同,因此视为同一类树形。采用左深树有2个优势:①在任一查询时刻,只有一个中间结果;②基于左深树的表排列组合远远小于浓密树、锯齿树的表排列组合,从而极大地减小了计划搜索空间。因此,本文主要讨论基于左深树的查询计划。

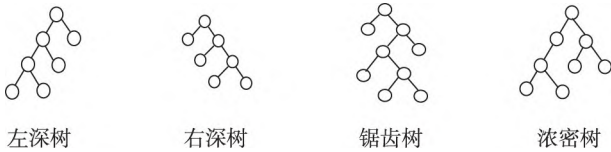


图2 连接树的类型

Fig. 2 Different types of join tree

连接树通常可用一串数字表示。这串数字的第一个数值表示该树形具有的叶子数目,然后,按照广度优先的原则遍历整个连接树,并依次记录经历各节点的左右子节点包含的叶节点数目。例如,对于图3(a)所示的树形可以被标识为4312111,其中,4表示整颗树叶子节点的个数为4,3表示根节点左子节点下叶子节点的个数为3,其后的1表示根节点右子节点下的叶子点的个数为1,按广度遍历的原则依次类推。

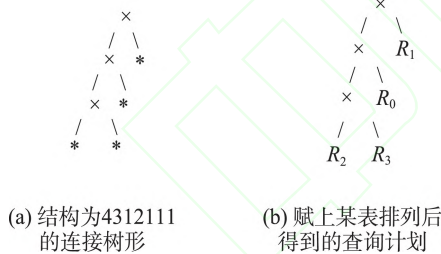


图3 连接树形与查询计划

Fig. 3 An example of join tree shape and one of its query plan

另外,对于随机生成的表排列 $R_2 R_3 R_0 R_1$ ,赋予图3(a)后,其生成的左深树连接计划如图3(b)所示。

### 3 空间启发式策略

空间启发式策略就是针对空间数据类型、空间操作的特殊性,为缩小查询计划的搜索空间、减少参与运算的空间数据量而制定的一系列策略。这些策略可以引导查询计划枚举向最(较)优的方向发展,提高系统执行效率。

#### 3.1 空间等价类与空间约束对的规则

空间关系谓词是空间查询中最为常用的连接谓词,包括相等(Equals)、相离(Disjoint)、相交(Intersects)、相接(Touches)、跨越(Crosses)、包含(Within)、被包含(Contains)、交叠(Overlaps)<sup>[16]</sup>等。其中,仅Equals符合等价关系的定义<sup>[13]</sup>,可用等价类的启发式规则。而其它空间谓词均不符合等价关系自反性、对称性和传递性的要求<sup>[17]</sup>。例如,Disjoint、Touches、Overlaps、Crosses不具备自反性和传递性,Within、Contains则不具备上述任一特性。将非等值空间谓词连接的属性定义为“空间约束对”,详细定义见文献[18]。空间等价类与空间约束对的启发式规则如下:

(1) 规则①:连接树的空间连接关系应建立在空间等价类、空间约束对之上。若连接关系不建立在空间等价类或空间约束对上,则只能采用笛卡尔积生成结果,此时不仅执行代价会较大,而且连接结果集也相当大,导致参与后续操作的数据量大,查询效率低。

(2) 规则②:自下而上,查询计划树中各类连接关系的放置顺序是非空间等价类、空间等价类、非笛卡尔积的属性连接对、空间约束对、笛卡尔积的属性约束对。本规则是按上述操作执行结果集从少到多、执行代价从低到高的顺序排列的。非空间等价类的连接结果集通常是最少的、而且执行代价较低,因此通常建议将其放在查询树的下端(第1位)先执行,空间等价类的连接结果集也很少,但其CPU代价略高于非空间等价类,故通常排在第2位执行。非笛卡尔积的属性对连接与空间约束对在连接结果集方面难以区分多少,但空间约束对的CPU代价明显高于非笛卡尔积的属性对连接操作,故非笛卡尔积的属性连接对、空间约束对分别排在第3位、第4位执行。尽管笛卡尔积的属性约束对的CPU代价不高,但若把它放置查询计划树的底端,其连接结果集往往非常大,将极大增加了后续操作的时间复杂度,故常常把它放在查询计划树的上端(最后)执行。

(3) 规则③:由于空间等价类的递推性,规则①的空间连接关系还可以建立在与某属性互为空间等价类的两属性上。例如,在 $T_1.a_1ST\_EqualsT_2.a_2$  and  $T_2.a_2ST\_EqualsT_3.a_3$ 的连接条件中,SQL语句显式地给出 $T_1.a_1$ 和 $T_2.a_2$ 、 $T_2.a_2$ 和 $T_3.a_3$ 是空间等价类,因此,可直接建立连接关系。由于等价类的传递性

(即  $A \Leftrightarrow B, B \Leftrightarrow C$ , 则  $A \Leftrightarrow C$ ),  $T_1.a_1$  和  $T_3.a_3$  也是空间等价类, 它们之间也可以进行连接。特别是当  $T_1.a_1 \text{ST\_Equals } T_3.a_3$  的执行结果集较少时, 先执行  $T_1.a_1$  和  $T_3.a_3$  之间的连接效率更高。

### 3.2 空间索引的放置规则

空间索引是加快空间查询执行速度的另一个利器。在空间数据库中, 若存在空间索引、且 SQL 语句使用了空间拓扑关系谓词或几何对象列, 则空间索引很可能会加入计划树中。在查询计划搜索中, 空间索引树的放置通常应该遵守规则④和规则⑤。

(1) 规则④: 若查询语句中的空间谓词仅涉及到图形列的 MBR, 则可使用该空间表的索引表替代该表, 即空间索引替换。因为空间索引的 KEY 列已经存储了图形的 MBR 信息。在执行阶段, 基于空间索引的访问可以有效降低 I/O 次数, 降低查询消耗的时间。

(2) 规则⑤: 若主空间表及其空间索引表同时出现在查询计划中, 则其空间索引表不能出现在该表的连接操作之后, 且索引表的连接结果必须与该表再进行空间元组号 (Tuple ID, TID) 连接, 即以空间索引表为查询入口, 根据索引中记录的 TID 查找原空间数据表记录的过程。若存在 2 个空间表  $T_1, T_2$ , 其空间索引分别为  $I_1, I_2$ , 图 4 则示出了几种符合该规则的表放置情况。图 5 给出了违反规则②的几种放置情况。在图 5(a) 中, 第一步已经完成了  $T_1$  和  $T_2$  的精确连接, 如果再与粗略的  $I_1$  进行连接, 该操作就失去了意义; 在图 5(b) 和 (c) 中, 空间表  $T_1$  在经过投影-约束、连接操作后, 就失去了 TID 信息, 就无法实现与其索引  $I_1$  进行关联。图中的“6”表示数

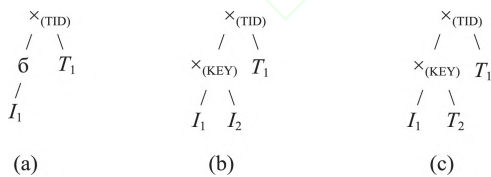


图 4 合法的  $I_1$  位置

Fig. 4 Legal location of  $I_1$

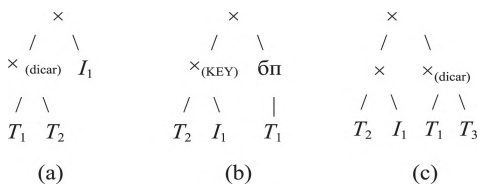


图 5 联合校验异常点分布

Fig. 5 Distribution of outliers detected by combined method

数据库中的选择操作, “ $\pi$ ”表示数据库中的投影操作; “ $\times$ ”表示数据库中的连接操作, “ $\times$ ”后括号内的字符表示该连接类型。图中 dicar 表示笛卡尔连接; TID 表示 TID 连接; Key 表示 Key 连接, 即 2 个空间表之间按某种空间算子进行关联的连接方法。

## 4 启发式策略在缩小计划搜索空间方面的作用

以某市某区的社区数据、公司数据以及建筑物数据的查询为例, 展示空间启发式规则在缩小计划搜索空间方面的作用。查询语句如下:

```
select count(*)
from HDcompanies, HDbuiltups, HDcommunities
where HDcompanies.a04= HDbuiltups.ca_id
and HDcommunities.shape st_intersects HDbuiltups.Shape
```

其中, HDcommunities 表为社区多边形数据, 字段为 fid、shape 等; HDcompanies 为公司点数据, 字段为 fid、shape、a04 等; HDbuiltups 表为建筑物多边形数据, 字段为 fid、shape、ca\_id 等; spidx\_HDcommunities 为 HDcommunities 表的索引表。

以图 3(a) 所示的节点数为 4 的左深树为例, 若用  $R_0, R_1, R_2, R_3$  分别代替 HDcompanies 表、HDbuiltups 表、HDcommunities 表、spidx\_HDcommunities 表, 则用穷举法, 4 个表有 24 种表排列, 图 5 列出的所有可能的执行计划 (共 24 种)。由于  $R_0$  的 a04 字段和  $R_1$  的 ca\_id 字段互为非空间等价类,  $R_1$  的 shape 字段和  $R_2$  的 shape 字段、 $R_2$  的 shape 字段和  $R_3$  的 MBR 字段是空间约束对, 而  $R_0$  和  $R_2, R_0$  和  $R_3$  之间不存空间等价类或空间约束对关系, 故计划中  $R_0$  与  $R_2, R_0$  与  $R_3$  不应同时在一层的叶节点上 (参见规则①), 故图 6 中 (c)-(f)、(m)、(n)、(s) 和 (t) 的查询计划应该被淘汰。另外, 由于  $R_3$  是  $R_2$  的空间索引, 根据规则⑤, 索引  $R_3$  不应该出现在基表  $R_2$  之上, 故图 6(a)、(g)、(i) 和 (j) 的查询计划也应该将被淘汰。经上述启发式规则作用后, 图 6 中剩下的可用计划仅有 12 个。淘汰计划超过了全计划的一半, 极大减少了需要评估的查询计划数, 提高了空间查询效率。

## 5 结论

针对空间等价类、空间约束对等概念和空间索引关键技术, 提出了建立空间连接的相关规则以及

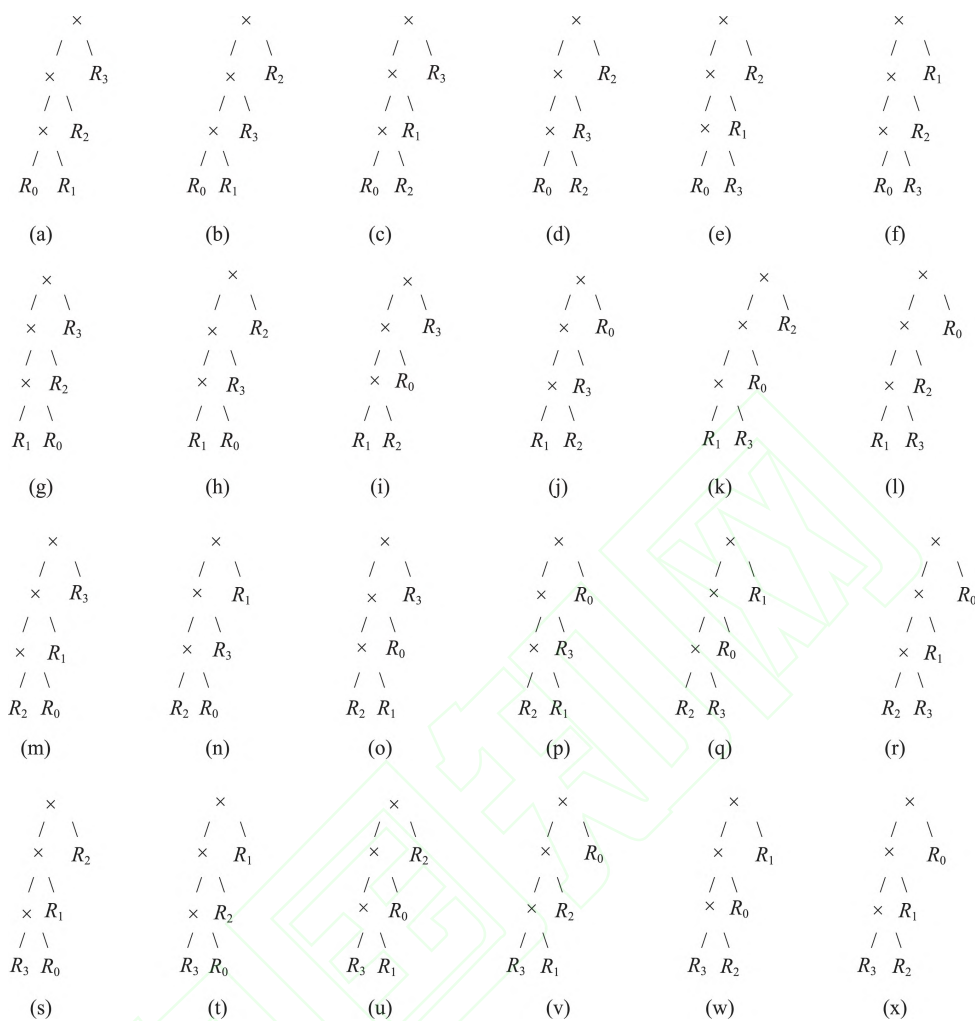


图6 图3(a)所示树形对应的所有查询计划  
Fig. 6 All query plans of tree shape in Fig. 3 (a)

放置空间索引的相关规则,这些规则可以减少参与运算的中间结果集、排除诸多不可行的查询计划,对减轻后续代价评估阶段的系统开销有重要意义。本文给出的规则有较高的通用性,不仅可以加入于空间查询优化器中,也可按这些规则编写空间查询语言,对提高空间数据库的查询效率有重要意义。

参考文献 (References):

[ 1 ] 王珊.数据库系统概论(第四版)[M].北京:高等教育出版社,2008. [ Wang S. Introduction to database system (fourth edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. ]  
 [ 2 ] 吴明光.一种空间分布模式驱动的空间索引[J].测绘学报,2015,44(1):108-115. [ Wu M G. A spatial distribution pattern-driven spatial index[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015,44(1):108-115. ]  
 [ 3 ] 龚俊,朱庆,张叶廷等.顾及多细节层次的三维R树索引扩展方法[J].测绘学报,2011,4(2):249-255. [ Gong J, Zhu

Q, Zhang Y T, et al. An efficient 3D R-tree extension method concerned with levels of detail[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011,4(2):249-255. ]  
 [ 4 ] 花杰,邢廷炎,芮小平.一种适合多源地球物理数据三维可视化的快速空间索引技术[J].地球物理学进展,2013,28(3):1626-1636. [ Hua J, Xing T Y, Rui X P. A fast spatial index method for 3D-visualization of multi-source geophysical data[J]. Progress in Geophysics, 2013,28(3): 1626-1636. ]  
 [ 5 ] Gilberto Gutiérrez, José R. Paramá, Nieves Brisaboa, et al. The largest empty rectangle containing only a query object in Spatial Databases[J]. Geoinformatica, 2014,18 (2):193-228.  
 [ 6 ] 黄铁,张奋.改进的基于R-树的空间连接代价模型[J].计算机工程与设,2009,30(7):1691-1693. [ Huang T, Zhang F. Improved cost model for spatial joins using R-trees[J]. Computer Engineering and Design, 2009,30(7):1691-1693. ]

- [7] 付仲良,刘思远,俞志强.一种双映射变换的空间索引及空间连接算法研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2014,39(10):1248-1251. [Fu Z L, Liu S Y, Yu Z Q. A novel spatial index with a high-performance spatial join [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014,39(10):1248-1251. ]
- [8] Fabio Gomes de Andrade, Cláudio de Souza Baptista, Clodoveu Augusto Davis Jr. Improving geographic information retrieval in spatial data infrastructures[J]. *GeoInformatica*, 2014,18(4):793-818.
- [9] Zhu Y Q, Hua L. Optimization of RDF link traversal based query execution[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2013,29(1):27-32.
- [10] 张舜,邓亚丹,钟志农.一种基于访问图优化的缓存替换算法[J].计算机应用与软件,2010,27(9):46-48. [Zhang S, Deng Y D, Zhong Z N. A buffer replacement algorithm based on call graph optimisation[J]. *Computer Applications and Software*, 2010,27(9):46-48. ]
- [11] 赫高进,熊伟,陈萃,等.基于MPI的大规模遥感影像金字塔并行构建方法[J].地球信息科学学报,2015,17(5):515-522. [He G J, Xiong W, Chen L, et al. An mpi-based parallel pyramid building algorithm for large-scale RS Image[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(5):515-522. ]
- [12] 朱焰炉,程昌秀,陈荣国,等.基于直方图的空间查询选择率估计研究[J].计算机科学,2010,37(12):125-148. [Zhu Y L, Cheng C X, Chen R G, et al. Selectivity estimation for spatial query based on histogram[J]. *Computer science*, 2010,37(12):125-148. ]
- [13] 陈海珠.基于闭欧拉直方图的空间查询代价模型[J].软件,2013,34(6):61-64. [Chen H Z. The cost model of spatial queries based on closed eulerhistogram[J]. *Software*, 2013,34(6):61-64. ]
- [14] 李博涵,秦小麟,陈逸菲等.基于PQR-tree的空间查询代价模型[J].计算机工程与科学,2012,34(5):161-167. [Li B H, Qin X L, Chen Y F, et al. A cost model for spatial queries based on PQR- tree[J]. *Computer Engineering&Science*, 2012,34(5):161-167. ]
- [15] 颜勋,陈荣国,程昌秀,等.内嵌式空间数据库优化器代价评估框架及实现[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(6):726-730. [Yan X, Chen R G, Cheng C X, et al. Optimizer cost estimation framework and implementation for spatially-enabled database[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011,36(6):726-730. ]
- [16] 郭庆胜,杜晓初,刘浩.空间拓扑关系定量描述与抽象方法研究[J].测绘学报,2005,34(2):123-128. [Guo Q S, Du X C, Liu H. Research on quantitative representation and abstraction of spatial topological relation between two regions[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(2):123-128. ]
- [17] 左孝凌,李为鑑,刘永才.离散数学[M].上海:上海科学技术文献出版社,1982. [Zuo X L, Li W J, Liu Y C. *Discrete mathematics*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific&Technical Publishers,1982. ]
- [18] 程昌秀,杨山力,宋晓眉,等.空间约束对概念的提出与实现[J].地球信息科学学报,2015,17(9):1009-1013. [Cheng C X, Yang S L, Song X M, et al. Concept of spatial constrained pairs and its implementation[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2015,17(9):1009-1013. ]