

分布式空间数据分片与跨边界拓扑连接优化方法*

朱欣焰^{1,2+}, 周春辉³, 芮维¹, 夏宇⁴

¹(武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079)

²(武汉大学 空天信息安全与可信计算教育部重点实验室, 湖北 武汉 430079)

³(武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063)

⁴(江西师范大学 地理与环境学院, 江西 南昌 330022)

Distributed Spatial Data Fragmentation and Cross-Border Topological Join Optimization

ZHU Xin-Yan^{1,2+}, ZHOU Chun-Hui³, GUO Wei¹, XIA Yu⁴

¹(State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

²(Key Laboratory of Aerospace Information Security and Trusted Computing of the Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

³(Navigation College, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

⁴(School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang, 330022, China)

+ Corresponding author: E-mail: geozxy@263.net

Zhu XY, Zhou CH, Guo W, Xia Y. Distributed spatial data fragmentation and cross-border topological join optimization. *Journal of Software*, 2011, 22(2): 269–284. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3798.htm>

Abstract: This paper aims at explaining the cross-border topological join queries of spatial fragments of the zone fragmentation data in distributed spatial database (DSDB), and the optimizing methods for such queries are proposed. First, the fragmentation and distribution of spatial data in a distributed environment are discussed, and the extra principles for spatial data fragmentation are put forward, including spatial clustering, non-partitioning on spatial objects, and maintaining logical seamless. Then, the fragment joins in zone fragmentation are classified into two categories: cross-border join and non-cross-border join; the topological relationships are also classified into two categories. Thus, the emphasis is put on the two types of cross-border topological joins. Two theorems for cross-border topological join optimization are proposed and proved. Based on the theorems, the optimizing rules for cross-border spatial topological join are given, including the removing rules and the transforming rules of fragment joins. Finally, tests are designed to compare three join strategies that include Naïve join strategy, semi-join strategy and the proposed strategies. The results show that the proposed methods greatly improve the cross-border join optimizing efficiency. Therefore, the theorems and methods proposed in this work can be applied to the optimization of distributed cross-border spatial topological queries.

Key words: spatial database; zonal fragmentation; cross-border; topological join; distributed query; optimization

* 基金项目: 国家自然科学基金(40971232, 41023001); 国家高技术研究发展计划(863)(2007AA12Z201); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金; 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费; 武汉大学优秀博士论文培育基金(2008-25)

收稿时间: 2009-07-07; 定稿时间: 2009-12-02

摘要: 研究分布式空间数据库(distributed spatial database,简称 DSDB)中数据按区域分片时的跨边界片段拓扑连接查询问题,并提出相应的优化方法.首先研究了分布式环境下的空间数据的分片与分布,提出了空间数据分片的扩展原则:空间聚集性、空间对象的不分割性、逻辑无缝保持性.然后,将区域分割分片环境下的片段连接分为跨边界和非跨边界两类;同时,将拓扑关系分为两类,重点研究跨边界的两类片段拓扑连接.提出了跨边界空间片段拓扑连接优化的两个定理,并给出了证明.以此为基础,给出了跨边界空间拓扑连接优化规则,包括连接去除规则和连接优化转化规则.最后设计了详细的实验,对自然连接策略、半连接策略以及所提出的连接策略进行效率比较,结果表明,所提出的方法对跨边界连接优化有明显优势.因此,所提出的理论和方法可以用于分布式跨边界拓扑关系查询的优化.

关键词: 空间数据库;区域分片;跨边界;拓扑连接;分布式查询;优化

中图法分类号: TP311 **文献标识码:** A

地理信息系统(GIS)的核心是空间数据库.空间数据在生产、管理、维护、应用服务等方面的分布特征,决定了空间数据管理必然向分布式方向发展.分布式空间数据库主要分为区域分片(zonal fragmentation)和层分片(layer fragmentation)^[1].目前,空间数据查询连接优化研究大都集中在层分片的情况,而对区域分片的研究则很少.

在区域分片情况下,分布式空间数据管理有其自身的特点.例如,区域分片的分布式空间数据库存在跨边界的空间相关性,即跨边界无缝查询问题.如图 1 所示,如果要查询图 1(a)中存储在场地 A 的空间对象 a_1 的相邻对象,则必然要涉及场地 B 中 b_1 和 b_3 对象;如果要查询图 1(b)中距离对象 L 一定缓冲区范围内的空间对象,则可能要涉及场地 A 中的空间对象.不仅如此,由于缓冲区的大小可变,缓冲区查询还可能跨越不相邻的空间片段.这种由于空间相关性带来的跨边界查询处理问题,在集中式数据库中是不存在的.

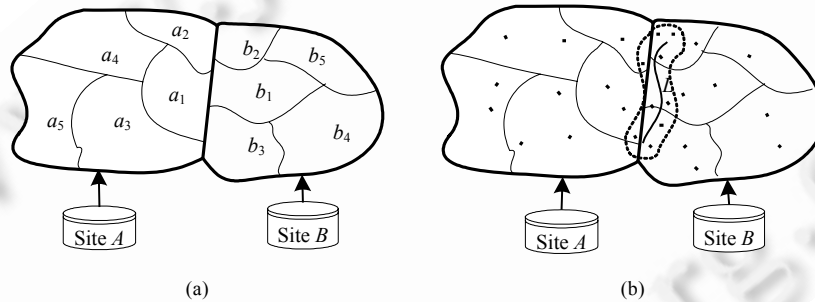


Fig.1 Problems of cross-border query in a distributed spatial database based on zonal fragmentation

图 1 区域分片的分布式空间数据库跨边界查询问题

从已有的研究和实践来看,实现上述分布式空间数据跨边界(无缝)查询的方法之一是在应用层次上由用户来确定场地之间的相关性,即由用户来确定将查询发送到哪些相关的局部场地.这种方式不符合分布式数据库透明性的要求,并且随着数据分布场地的增加以及片段的增加,空间数据的相关关系越来越复杂,由用户自己来确定场地间数据的相关性实际上不太现实.另一种方法是按传统分布式数据库连接的分配规则^[2,3]将全局查询连接操作转化为各片段的连接操作.这种方式会把所有可能的相关片段间的连接全部列出,并且全部要进行实际连接操作.这种方式可以保证分布式空间数据查询任何可能相关的片段间连接不会遗漏,保证结果的正确性,同时可以实现分布式空间查询的透明性.但这些片段连接中有许多连接是对最终结果没有贡献的多余操作,这些多余的操作不仅增加了片段连接时间,而且由于各片段数据分布在不同的场地,片段间连接需要在不同场地之间传送大量数据,因此查询处理的效率会受到很大的影响.由此可见,虽然第 2 种实现方式是一种更加可行的方式,但关键问题是如何对空间片段连接进行优化.因此,第 2 种方式实现分布式空间数据跨边界无缝查询的关键是片段连接的优化处理问题.本文主要研究区域分片的分布式空间数据跨边界拓扑连接优化.

1 国内外研究进展

区域分片也称为空间分割(spatial partitioning)分片或横向分片,是指同一地理覆盖的空间信息分裂成存放在不同场地相同结构的数据库表;层分片也称为专题分割(分片)(thematic partitioning)或纵向分片,是指同一区域不同主题层的空间信息存放在不同的场地.实际数据分布时,可以将上述两种分割方法混合使用.关于空间数据的分片和分布,已有一些理论研究和实践应用^[4-6].马荣华^[4]在研究大型 GIS 海量数据的无缝组织时,按横向和纵向组织的不同讨论了下面 4 种数据分布策略:(1) 本地数据库的横向无缝组织;(2) 本地数据库的纵向无缝组织;(3) 本地数据库与远地(异地)数据库之间的横向无缝组织;(4) 本地数据库与远地(异地)数据库之间的纵向无缝组织.Abugov 研究了在不同物理表中如何进行空间数据有效分割与存储^[5],以提高数据库的效率.Wladimir 等人在研究计算网格环境下的分布式空间数据库架构时使用了专题分片^[6].总体而言,空间数据库的数据分片与分布主要是传统分布式数据库的研究基础和成果,在空间数据的特殊性方面研究不足.

在集中式空间数据库中,空间查询通常使用过滤和精化两步来进行优化^[7,8].空间查询依赖空间索引、空间查询优化、空间连接(spatial join)算法等因素.空间索引通过有效减少搜索空间来提高查询效率;空间查询优化主要通过调整空间查询算法的执行步骤来降低执行时间.分布式空间数据库的空间连接是影响空间查询效率的重要操作^[9,10].空间连接优化是空间查询优化的关键技术之一.

目前对空间数据连接优化已有大量的研究成果,但针对区域分片的分布式空间片段连接优化研究几乎仍是空白,而且已有的空间数据库连接优化研究存在以下一些缺陷:(1) 对空间连接谓词研究不够全面,大部分研究都以空间拓扑交(intersects)为例来进行研究,但空间拓扑关系“交”的连接优化方法不适用所用的空间拓扑关系谓词,如拓扑关系 Disjoint 就不能使用 Intersects 的优化方法,特别是在分布式区域分片的情况下,如不加区别,则可能会产生错误的结果;(2) 目前的集中式空间数据库连接优化研究中,对于两个没有索引或只有 1 个索引的两个数据集进行空间拓扑连接优化时,许多重要方法,如种子树连接法^[11]、空间哈希连接法^[12]、索引分割方法^[13]等,都是先对连接数据集进行矩形分割,再将对应空间区域进行连接,最后合并产生整个连接结果.除了存在缺陷(1)中所述的问题以外,在区域分片的分布式空间数据库中,跨边界连接时不可能是对应区域,同时空间片段也不一定是矩形分片(如图 1 所示),因此,这些方法对分布式空间数据跨边界连接并不适用.

Jacox 等人对空间连接技术进行了全面的研究总结^[4],从他引用的资料以及目前公开发表的文献来看,有关分布式空间连接方面的研究还很少.在不考虑区域分片的特殊性情况下,分布式空间查询处理中的空间交(intersection)连接操作主要有 3 种策略^[15-17].第 1 种策略称为全连接策略,也称为天真策略^[15],将一个场地参与连接的一个关系记录全部传到另外一个场地,并利用集中式空间数据库的空间连接算法进行处理.这种策略的主要问题是传输和执行代价都较高.第 2 种策略是半连接策略(semijoin strategy)^[15,16].这种策略使用传统分布式关系数据库中的分布式连接方法,即基于半连接关系操作来减少传输代价.Abel 建议使用空间半连接操作,它是关系操作的空间版本^[15].通过空间近似减少不必要的空间对象,半连接策略能够减小通信传输代价.半连接策略几乎总比全连接策略更有效^[16].天真策略和半连接策略的具体步骤将在第 5.1 节中详述.第 3 种策略称为 MR2 (multiple step with remote indices, version 2)^[17].MR2 充分利用了分布式处理固有的并行机制和空间数据已存在的本地索引,效率与前两种策略相比有较大的提高.但 MR2 要求各局部数据库采用相同的索引机制,要求分布式的空间对象有全局对象标识,R*树算法也需要进行修改以反映全局标识的引用;MR2 策略不适用于异构空间数据库的情形,这些使得 MR2 策略的适应性也受到较大的限制.以上这 3 种空间连接策略都没有考虑区域分片的特殊性.

到目前为止,分布式空间连接优化工作还没有专门针对区域分片的空间数据库来研究,还没有完全适应分布式空间数据跨边界查询处理的有效的研究成果.

2 空间数据的分片与分布

传统分布式数据库中数据分片主要通过选择和投影操作来完成.选择操作作用于水平分片,投影操作作用于垂

直分片.数据分片时,通过逻辑谓词和逻辑表达式来确定分片的条件.空间数据分片时,除了传统的逻辑谓词以外,空间数据库中还可以用空间关系谓词(函数)来表达逻辑关系^[18],空间数据分片可以通过空间分割来实现.

2.1 空间分割与合并

2.1.1 裁剪与分割

空间分割是用一个面对象对另一组对象进行空间划分,将与面对象相交的部分划分为一个对象集,剩下的部分形成另一个对象集.空间分割可以由基本的裁剪操作实现.面对象 a 对另一个对象 b 进行裁剪操作 $Clip$,得到内部和外部对象分别表示为 $Clip_{in}, Clip_{out}$,可以用点集定义为:

- $Clip_{in}(a,b)=\{p|p\in a\wedge p\in b\wedge dim(a)=2\};$
- $Clip_{out}(a,b)=\{p|\neg(p\in a\wedge p\in b)\wedge dim(a)=2\}.$

其中, $dim(a)=2$ 表示对象 a 是二维对象,即裁剪对象.裁剪操作将一个对象分解成多个独立的新对象,或者将一个物理无缝对象变成物理有缝、逻辑无缝的多个对象.

空间分割操作 $Partition$ 可以表示为:

- $Partition_{in}(s,F)=\{Clip_{in}(s,f)|f\in F\wedge dim(s)=2\};$
- $Partition_{out}(s,F)=\{Clip_{out}(s,f)|f\in F\wedge dim(s)=2\}.$

其中, F 是被分割的对象集合, s 是分割面对象.对象集 F 被面对象 s 分割后所得内部分割 $Partition_{in}(s,F)$ 是一个对象集,它由 s 对 F 中的每个对象进行裁剪后的内部结果对象组成.对象集 F 被面对象 s 分割后所得外部分割 $Partition_{out}(s,F)$ 是一个对象集,它由 s 对 F 中的每个对象进行裁剪后的外部结果对象组成.

当进行空间分割的面对象不是单个而是一个集合时,可以依次进行分割.

设 S 为分割面对象几何, $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 则分割后各部分内部可以表示为

$$Partition_{in}(s_1, F), Partition_{in}(s_2, F), \dots, Partition_{in}(s_n, F).$$

分割后外部可以表示为

$$Partition_{out}\left(\bigcup_{i=1}^n S_i, F\right),$$

其中, $\bigcup_{i=1}^n S_i$ 表示 S 中每个面进行合并,上述表示可用 $Partition_{out}(S, F)$ 来简化表示.

2.1.2 合并

空间合并是空间分割的逆操作.空间合并操作可分为基于对象的空间合并和基于集合的空间合并两种.基于对象的空间合并是对象裁剪操作的逆操作,将两个或两个以上的几何对象合并为一个几何对象,如图 2 所示.图 2(a)是两个有交叠的几何对象合并.图 2(b)是两个逻辑无缝的子对象的合并,裁剪的逆操作主要是指这种情况.合并操作可以是面与面、线与线进行合并.

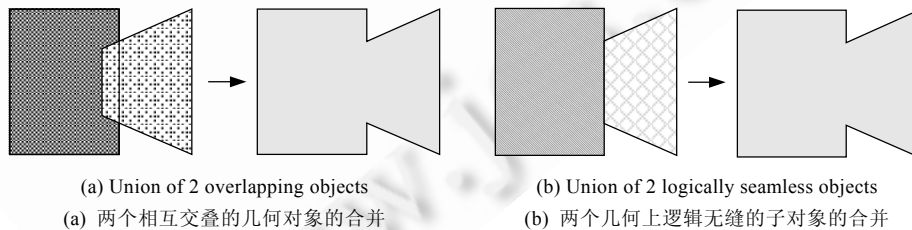


Fig.2 Union of geometric objects

图 2 几何对象合并

基于集合的并操作与基于对象的并操作不同,前者不对对象的几何信息进行改变,不合并成新对象,只是多个集合合并成一个集合;后者需要改变对象的几何信息,合并后形成新的几何对象,是对象本身的合并.基于集合的并操作是分布式数据库中水平分割的逆操作.区分两种不同类型的并操作,是为了更好地讨论分布式空间

数据库的分片问题.为了区分两者,本文用 $Union_{obj}$ 表示基于对象的并操作,用 $Union_{set}$ 表示基于集合的并操作.

2.2 空间数据分片方式

对于以关系数据库存储的空间数据库来说,一个空间数据的逻辑片段是关系的一部分.Laurini 把空间数据的分片分为主题分片、区域(分割)分片、异构分片这 3 种方式^[1],但没有深入进行研究.国内研究分布式空间数据库的分片方法通常分为水平分片(区域分片)、垂直分片、专题分片^[19-21].本文综合已有研究,将空间数据的分片分为水平分片、垂直分片、专题分片、区域分片、混合分片.

2.2.1 水平分片

把全局空间关系的所有元组按特定条件划分成若干互不相交的子集,每个子集为全局空间关系的一个逻辑片段.这些片段通过对全局关系施加选择运算得到,其条件表达式中可以包含空间操作运算.对这些片段实行 $Union_{set}$ 操作可以恢复全局空间关系.例如,有两个空间关系 $City$ 和 $River$,其中, $City$ 有属性:城市名 $Name$ 、所属省份名 $ProvName$ 、人口 Pop 和几何信息 $Shape$ 等; $River$ 有属性:河流名 $Name$ 、长度 $Length$ 和几何信息 $Shape$ 等.对于 $City$ 全局空间关系,可以按城市面积进行分片,两个分片分别表达为:

$$\textcircled{1} \sigma_{Ares(Shape) \geq 1000}(City);$$

$$\textcircled{2} \sigma_{Ares(Shape) < 1000}(City).$$

如上述例子的分片结果,水平分片可能会使空间上相邻的对象分布在不同片段中,这取决于选择运算的条件.下面的分片则保持了空间对象的聚集性:

$$\textcircled{1} \sigma_{ProvName="湖北"}(City);$$

$$\textcircled{2} \sigma_{ProvName="湖南"}(City);$$

$$\textcircled{3} \sigma_{ProvName="江西"}(City);$$

...

2.2.2 垂直分片

与一般分布式数据库相同,垂直分片把全局空间关系的属性集合分成若干子集,通过对全局关系作投影运算来实现.在目前的空间数据模型中,每个空间对象实际上一共有 1 个几何信息描述,反映到一个空间数据表格中,只有 1 列是空间几何属性.由于垂直分片要满足不相交规则,因此,空间关系模式的垂直分片只有 1 个片段含有几何属性.因此,垂直分片后的关系模式中有一个是空间关系模式.从这个意义上说,垂直分片不是严格意义上的空间数据分片.

2.2.3 专题分片

专题分片又称为层分片、纵向分片,是指将相同区域的空间数据不同的主题层分成不同的片段,如,不同时相、不同分辨率的影像层、DEM 数据层、建筑物层、地籍层、行政区层、水系层、路网层等.具体的分层方式和粒度要根据实际应用来决定.专题分片中的图层和关系数据库中的关系模式具有相似的意义.

2.2.4 区域分片

地理区域分片又称为分割分片、横向分片,是指按一定地理空间划分,将空间数据划分成互不重叠的不同片段.如图 1 所示的分割分片将空间数据划分为 2 个片段并存储在两个场地;图 3(a)则划分为 3 个片段.

分割分片通过空间分割操作(partition)来实现.对于关系数据库来说,分割分片与水平分片既有联系,又有区别.当对空间数据进行分割时,如果分割过程中不会产生任何对象的裁剪(切割),此时分割分片可以通过一个水平分片来实现,分割的结果实际上是对一个空间关系模式按照一定的空间范围条件进行选择的结果.分割分片与水平分片的最大区别是,分割分片可以对空间对象进行裁剪,存在空间对象的分裂(分割).对于分割分片,如果有对象分裂,则相应的属性也需要进行分裂.传统的按图幅来划分空间数据是一种按图幅范围对全局空间数据进行分割分片的结果.

设 L_i 是 1:25 万比例尺空间数据中的第 i 层的所有对象集, $i=1,2,\dots,n$, n 为最大层数. S_j 表示各省行政区域多边形, $j=1,2,\dots,m$, m 为省份个数,则按省界划分的分割分片可以表示为

$$\begin{aligned} \text{分片 1: } & \bigcup_{j=1}^n \text{Partition}_m(s_1, L_j); \\ \text{分片 2: } & \bigcup_{j=1}^n \text{Partition}_m(s_2, L_j); \\ & \dots; \\ \text{分片 } m: & \bigcup_{j=1}^n \text{Partition}_m(s_m, L_j). \end{aligned}$$

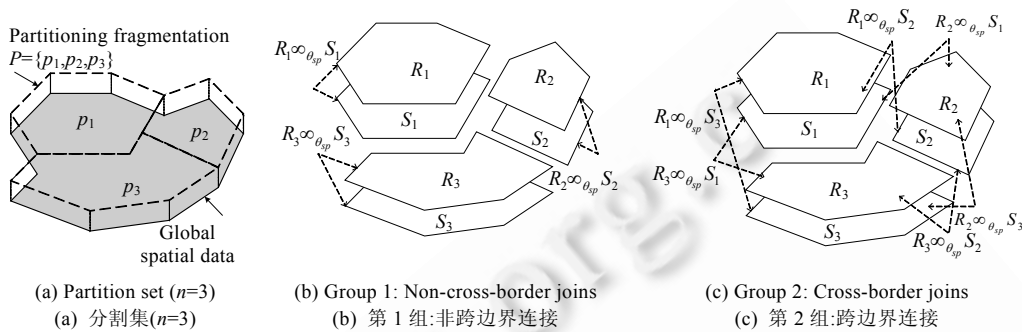


Fig.3 Transition global join to fragment-fragment joins

图 3 全局连接转化为片段间连接

将分割分片恢复成全局关系需要使用基于对象的并操作 $Union_{obj}$ 和基于集合的并操作 $Union_{set}$ 两种操作,这也是分割分片与水平分片的主要区别之一.可以先进行对象合并再进行集合合并,也可以先进行集合合并再进行对象合并.两种方法顺序不同,但都可以恢复全局关系.

分割分片的片段之间的对象不能有交.设分割区域的面对象集 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$,根据分割分片的概念,则 s_1, s_2, \dots, s_n 之间在空间上互不重叠,且构成问题域的一个完全空间覆盖,我们称 S 为分割集.对于空间关系 R ,用分割集 S 对 R 进行分割,得到的分割分片片段集合表示为 $PF_S(R)$.如果由分割集 S 中面对象 s_1, s_2, \dots, s_n 分割后的结果片段分别对应于 R_1, R_2, \dots, R_n (即 R_i 由 s_i 分割得到),则

$$PF_S(R)=\{R_1, R_2, \dots, R_n\} \text{ 且 } R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n = \emptyset.$$

2.2.5 混合分片

混合分片实际上是上述几种分片方式的混合运用,如可以将部分数据按主题层分片,部分数据按区域分割分片和水平分片;也可以先进行区域分割分片再进行主题分片.根据实际需要来确定.

在上述几种分片方式中,专题分片、分割分片是最常用的空间数据的分片方式.专题、水平、分割这 3 种分片方式本质上都没有改变空间数据关系模式结构(表结构没有改变),分割分片可能会对空间数据库中的元组(空间对象)进行分割,生成多个元组.分割分片实际上是一种特殊的水平分片,它满足空间聚集性.

2.3 空间数据分片原则

和一般分布式数据库一样,空间数据的分片应该满足,完备性、不相交、可重构性这 3 条原则^[22].除此以外,我们认为对空间数据进行分片时还需要考虑下列扩展原则:

(1) 空间聚集性.在进行空间数据分片时,一个全局空间数据若能满足空间上相邻的对象划分到一个片段中,则这种分片方式具有空间聚集性.水平分片不一定具有空间聚集性,例如第 2.2.1 节中的两个例子,前一个未保持空间聚集性;后一个则能够保持空间聚集性.专题分片、分割分片都满足空间聚集性.由于空间数据具有很大的相关性,空间显示、查询、分析等大部分操作都与这种空间相关性密切关联.因此,满足空间聚集性的分片方式可以提高空间数据处理的效率,减少空间数据在网络中的数据传输量.同时,分布式空间数据库系统各场地局部空间数据库应具有自治性,空间的聚集性分片也是满足局部应用的要求.

(2) 空间对象的不分割性.在进行空间数据分片时,一个全局空间数据如果没有一个对象发生分裂,则称这种分片方式具有空间对象的不分割性.进一步可以将空间对象的不分割性分为几何不分割、几何与属性不分割.几何不分割是指几何数据不产生分裂,几何与属性不分割是指一个空间对象的几何数据和属性数据存在于一个片段中.水平分片和专题分片具有空间对象的不分割性,而分割分片方式一般会产生对象的分裂.例如,以省界对道路网、水系进行分割分片,则跨越多个省的道路对象和河流对象就必然会被分裂;又如,按图幅分割分片后,图幅边界处有交叠的所有对象都会产生分裂.空间对象分割后,原来物理无缝的空间数据库会变成物理有缝^[23].物理有缝会给空间查询、分析等操作带来不便.因此,空间数据分片时尽量做到空间对象不分割性.当然,应用需要和不分割性、不同的空间数据分片原则之间往往有矛盾,需要具体分析.例如,必须按行政区分割来进行分片时,就不能保证空间对象的不分割性.

(3) 逻辑无缝保持性.一个全局空间数据如果分片过程中存在对象分裂,通过合并操作($Union_{obj}$)后得到的全局数据如果是逻辑无缝的,则称空间数据分片具有逻辑无缝保持性.例如,图 2(b)即为一种保持逻辑无缝的合并操作.由于在空间数据处理过程中可能产生几何缝隙问题,分割分片由于处理存在误差可能会产生缝隙,也就不满足逻辑无缝保持性.

空间聚集性和空间对象的不分割性不是空间数据分片必须遵守的原则,而是可选或需要关注和考虑的原则.逻辑无缝保持性是分布式空间数据库中分割分片必须满足的原则,否则,由各片段重构全局关系时就可能与分片前的全局关系存在差异,也就不满足可重构性.

2.4 空间数据分布方式

空间数据的分片解决如何将空间数据划分成逻辑片段,而空间数据的分布则是解决如何将逻辑片段分配到具体的物理场地上去.和一般分布式数据库一样,空间数据的分布也可以采用完全分割方式、完全复制方式、部分复制方式等方式.

分布式数据库的一个重要设计原则是使数据与应用程序实现最大程度的本地化^[24].这样,应用程序使用的数据大多来自本地,只有少数的数据来自远程场地,减少了数据传输,提高了系统效率.空间数据的分布也一样,大多数空间数据的应用是针对专题和区域分割进行的,因此根据用户需要针对应用尽量将空间数据分布到用户应用频度较高的或用户最易访问场地上.针对空间数据应用的区域性,一般将同一区域不同类型、不同图层的空间数据聚集分布.

3 分布式空间数据跨边界拓扑连接优化方法

3.1 区域分片的跨边界连接与非跨边界连接

设全局空间关系 R, S 在分割集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 上进行无缝分割,得到的分片如下:

- $PF_P(R) = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$;
- $PF_P(S) = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

图 3(a)为 $n=3$ 时的分割示例.实现跨边界查询的方法是,按分配规则可将全局连接转化为下面各片段的连接^[2,3]:

$$\begin{aligned} R \infty_{\theta_{sp}} S &= (R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n) \infty_{\theta_{sp}} (S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n) \\ &= (R_1 \infty_{\theta_{sp}} S_1) \cup (R_1 \infty_{\theta_{sp}} S_2) \cup \dots \cup (R_1 \infty_{\theta_{sp}} S_n) \cup (R_2 \infty_{\theta_{sp}} S_1) \cup (R_2 \infty_{\theta_{sp}} S_2) \cup \dots \cup (R_2 \infty_{\theta_{sp}} S_n) \cup \dots \cup \\ &\quad (R_n \infty_{\theta_{sp}} S_1) \cup (R_n \infty_{\theta_{sp}} S_2) \cup \dots \cup (R_n \infty_{\theta_{sp}} S_n) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, ∞ 表示连接, θ_{sp} 表示连接所使用的空间拓扑关系谓词表达式.

公式(1)表示的空间片段连接可以分成下面两组:

$$\left. \begin{array}{l} \text{第1组: } (R_1^{\infty_{\theta_{sp}}} S_1), (R_2^{\infty_{\theta_{sp}}} S_2), \dots, (R_n^{\infty_{\theta_{sp}}} S_n) \\ \text{第2组: } (R_1^{\infty_{\theta_{sp}}} S_2), \dots, (R_1^{\infty_{\theta_{sp}}} S_n), (R_2^{\infty_{\theta_{sp}}} S_1), (R_2^{\infty_{\theta_{sp}}} S_3), \dots, \\ (R_2^{\infty_{\theta_{sp}}} S_n), \dots, (R_n^{\infty_{\theta_{sp}}} S_1), (R_n^{\infty_{\theta_{sp}}} S_2), (R_n^{\infty_{\theta_{sp}}} S_{n-1}) \end{array} \right\} \quad (2)$$

第 1 组中每个片段连接对应的操作数(空间关系)在空间上是一致的(完全覆盖),也就是说,每个连接是在同一空间区域范围内.我们把第 1 组片段连接称为同一空间区域片段连接(也称非跨边界连接),如图 3(b)所示.这组连接优化问题在集中式空间数据库中已经解决,可以利用已有的空间连接优化成果进行优化.第 2 组片段连接在空间区域上没有重叠.我们把第 2 组连接称为不同空间区域的片段间连接(也称跨边界连接),如图 3(c)所示.跨边界连接的数目比非跨边界连接数目要多,且随着分割区域数目的增多呈快速增长,必须进行优化.

3.2 空间拓扑关系谓词及拓扑连接分类

空间拓扑关系判断是空间连接区别与非空间连接的主要特征.空间邻接、包含关系、穿越、落入、定位、缓冲等空间查询都直接与空间拓扑关系的判断紧密相关.OGC(open GIS consortium)在其简单要素访问规范^[18]中定义了适合在关系型数据库或对象——关系型数据库——中对地理要素进行存储和访问的简单要素模型以及一组空间拓扑关系算子.在此基础上,OGC 还制订了地理信息系统的空间查询标准^[25],指出空间数据库应该实现 GIS 所需要的基本空间运算和分析功能.本文所指的空间对象,即指符合简单要素访问规范定义的地理要素,包括属性和几何特征两个方面,但本文主要研究其与拓扑有关的几何特征.有关空间拓扑关系的定义研究较多,主要包括四交模型(four-intersection model,简称 4IM)^[26-28]和九交模型^[29,30].OGC 的简单要素访问规范在定义空间关系操作时同时采纳了四交模型^[26]和维度扩展的九交模型(dimensionally extended nine-intersection model,简称 DE-9IM)^[29],并对每个 4IM 中的关系定义给出了 DE-9IM 的等价表示.

简单要素访问规范定义的 8 个常用的关系谓词,包括 Crosses,Disjoint,Within,Contains,Equals,Touches,Intersects,Overlaps,其中,4IM 中定义的 Disjoint,Touch,Cross,Within 和 Overlap 这 5 个谓词在文献^[27]中被证明是互斥和完备的.在 4IM 中定义的 Within 关系的含义涵盖了 DE-9IM 中定义的 Within,Contains 和 Equals 这 3 个关系谓词,所以这个互斥完备集的形式可以扩展为如下 5 个集合: {Crosses}, {Within,Contains,Equals}, {Touches}, {Overlaps}, {Disjoint}.结合规范中给出的 8 个关系谓词的定义不难得出以下结论:规范给出的 8 个空间谓词是完备而非互斥的,而 Disjoint 与其他 7 个关系谓词互斥.

在此基础上,经过分析可知,不同空间拓扑关系操作在跨边界片段连接上具有一定规律性,有许多多余的连接可以去除,从而减少连接个数.如 Crosses,Within,Contains,Equals,Touches,Intersects,Overlaps 等空间拓扑关系判断只对空间上相邻片段连接有效.因此,对这些操作,如果片段在空间上不相邻,则片段连接对最后的查询结果没有贡献(片段连接结果为空),片段间的连接可以去除.这部分跨边界空间拓扑关系只可能会与区域分片的相邻(或相交)片段有关;而另一部分则不然,但这部分只有 Disjoint 关系,不仅与相邻(或相交)片段有关,而且还涉及到整个问题域的空间对象.于是,在研究跨边界的空间拓扑关系问题时可以其分为两类,一类与跨边界的相邻片段的相关,另一类与所有片段相关,见表 1.

Table 1 Classification of spatial topological relations

表 1 空间拓扑关系分类

Classification	Spatial topological relationship predicates
The 1st class	Crosses, Within, Contains, Equals, Touches, Intersects, Overlaps
The 2nd class	Disjoint

3.3 跨边界拓扑连接优化方法

跨相邻边界的第 1 类拓扑连接的结果对象都在两个相邻片段的最小外包矩形(minimum bounding rectangle,简称 MBR)的交矩形附近,片段间连接优化也必须从其交矩形入手.如图 4 所示, A, B 是两个相邻的片段,两片段的 MBR 分别是 R_a 和 R_b ,两个 MBR 的交矩形为 R .两片段间第 1 类空间查询结果对象一定与交矩形 R 相交.不失一般性,先给出下面的空间拓扑关系定理:

定理 1. 任意分割区域的两个片段,如果两片段的对象之间有第 1 类空间拓扑关系,则满足第 1 类空间拓扑关系的对象必与两个片段分割边界的 MBR 交矩形相交。

如图 5 所示,设 A, B 是任意分割区域的两个片段.片段 A, B 的 MBR 分别用 $MBR(A), MBR(B)$ 表示, $MBR(A)$ 和 $MBR(B)$ 的交矩形用 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 表示.根据定理 1,如果两片段的对象间有第 1 类空间拓扑关系,则满足第 1 类空间拓扑关系的对象与 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 相交.只需证明 A, B 中不与 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 相交的对象之间不存在第 1 类拓扑关系即可.4IM 和 DE-9IM 都用点集模型来描述空间拓扑关系^[26,29],简单要素访问规范中的空间几何对象都是拓扑封闭的(topologically closed),其点集包含其内部和边界上的所有点^[18].

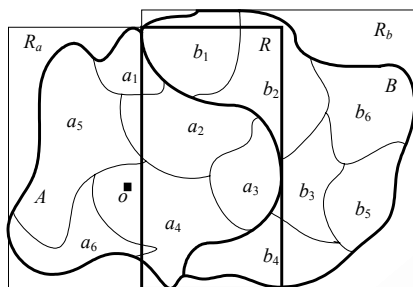


Fig.4 Join optimization between spatial adjacent fragmentations

图 4 空间相邻片段间连接优化

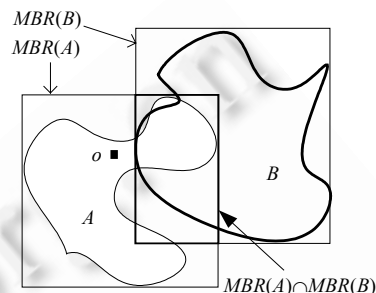


Fig.5 The 1st type join optimization between arbitrarily partitioned fragmentations

图 5 任意分割区域的片段间的第 1 类连接优化

参照点集拓扑理论,下面给出定理 1 的证明.

证明:设片段 A, B (包括 A, B 的内部和边界)用点集表示为 $S_A = \{P/P \in A\}, S_B = \{P/P \in B\}$. 同样地,矩形 $MBR(A)$ 、矩形 $MBR(B)$ 用点集表示为 $S_{MBR(A)} = \{P/P \in MBR(A)\}, S_{MBR(B)} = \{P/P \in MBR(B)\}$. 由交矩形 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 的定义,其点集表示为 S_{MAB} , 满足:

$$S_{MBR(A) \cap MBR(B)} = \{P/P \in MBR(A) \wedge P \in MBR(B)\} = \{P/P \in MBR(A) \cap MBR(B)\} = S_{MBR(A)} \cap S_{MBR(B)} \quad (3)$$

根据最小外包矩形 MBR 的定义, $S_A, S_B, S_{MBR(A)}, S_{MBR(B)}$ 之间满足以下关系:

$$S_A \subseteq S_{MBR(A)} \quad (4)$$

$$S_B \subseteq S_{MBR(B)} \quad (5)$$

设片段 A 内任一空间对象 o 用点集表示为 $S_o = \{P/P \in o\}$, 则有 $S_o \subseteq S_A$, 结合公式(4), 可得

$$S_o \subseteq S_{MBR(A)} \quad (6)$$

若 o 与交矩形 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 不相交, 即 o Disjoint $MBR(A) \cap MBR(B)$, 则

$$S_o \cap S_{MBR(A) \cap MBR(B)} = \emptyset \quad (7)$$

代入公式(3), 得 $S_o \cap (S_{MBR(A)} \cap S_{MBR(B)}) = \emptyset$, 即

$$S_o \cap S_{MBR(A)} \cap S_{MBR(B)} = \emptyset \quad (8)$$

由公式(6)可知, $S_o \cap S_{MBR(A)} = S_o$, 所以公式(8)变为 $S_o \cap S_{MBR(B)} = \emptyset$, 结合公式(5), 可得 $S_o \cap S_B = \emptyset$, 即 o Disjoint B 成立.

因为 B 中任一对象均是 B 的子集, 所以 o 和 B 中的所有对象均满足 Disjoint 关系. 如第 3.2 节所述, 8 个关系中, Disjoint 关系与其他关系是互斥的, 所以 o 和 B 中的所有对象均不可能满足关系 Crosses, Within, Contains, Touches, Overlaps, Intersects, Equals 关系. 即 o 和 B 中的所有对象均不存在第 1 类空间拓扑关系. 同理, B 中的任一对象 o' 如果不与 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 相交, 则与 A 中的所有对象均不存在第 1 类空间拓扑关系. 即 A, B 中不与 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 相交的对象不存在第 1 类空间拓扑关系. 证毕. \square

由定理 1 可知, 如果两片段的对象间有第 1 类空间拓扑关系, 则满足第 1 类空间拓扑关系的对象与两个片段分割边界的 MBR 交矩形相交; 反过来, 如果两个片段分割边界的 MBR 不相交, 则两个片段间的空间对象不会

有第 1 类拓扑关系.于是有下面的规则:

规则 1(片段间第 1 类连接去除规则). 如果参与连接的两个空间片段的边界的 MBR 不相交,则片段间第 1 类连接可以去除.

如果连接表达式 θ_p 属于第 2 类,则空间片段拓扑连接不可去除.

定理 2. 同一分割集分割的相邻两个片段,如果两片段的对象间有第 1 类空间拓扑关系,则满足第 1 类空间拓扑关系的对象与两个片段公共边界的 MBR 相交.

如图 6(a)所示, A, B 两个空间片段的公共边界是 L, M 是 L 的 MBR.根据定理 2, A, B 两个片段间满足第 1 类空间拓扑关系的对象必与 M 相交.图 6(b)是当 A, B 两个空间片段的公共边界多于 1 条线的情况,图中 A, B 的公共边界为 L_1, L_2, A, C 的公共边界为 L_4, B, C 的公共边界为 L_3 .此时, A, B 两个片段的公共边界的 MBR 是 $MBR(MBR(L_1) \cup MBR(L_2))$,如图 6(b)中 M_1 所示.图 6(c)是公共边界的另一种特例.

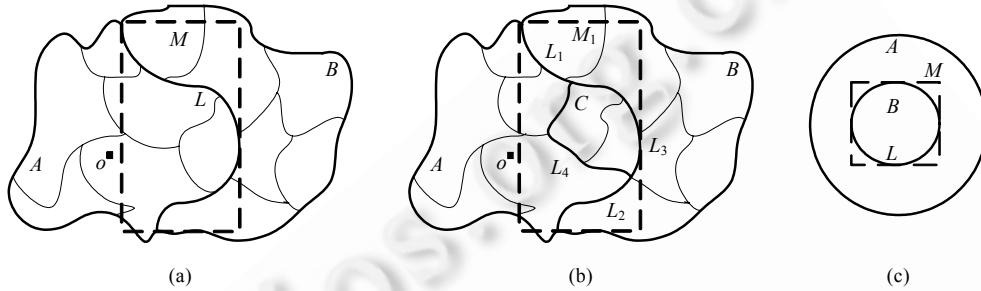


Fig.6 Illustration of Theorem 2

图 6 定理 2 图示

下面给出定理 2 的证明.

证明:如图 6(a),设 o 是片段 A 内的任一空间对象,则对象 o 、片段 A, B 、边界 L 及其外包矩形 M ,用点集分别表示为 $S_o = \{P/P \in o\}, S_A = \{P/P \in A\}, S_B = \{P/P \in B\}, S_L = \{P/P \in L\}, S_M = \{P/P \in M\}$.显然有:

$$S_o \subseteq S_A \quad (9)$$

$$S_L \subseteq S_M \quad (10)$$

由第 2.2 节中分割集的概念可知:

$$S_A \cap S_B = S_L \quad (11)$$

若 o 与 M 不相交,即 $S_o \cap S_M = \emptyset$,结合公式(10),有 $S_o \cap S_L = \emptyset$,代入公式(11),变为 $S_o \cap (S_A \cap S_B) = \emptyset$,即 $S_o \cap S_A \cap S_B = \emptyset$.由公式(9)可知, $S_o \cap S_A = S_o$,于是有 $S_o \cap S_B = \emptyset$,即 o Disjoint B 成立.

与定理 1 的证明类似, o 和 B 中的所有对象不存在第 1 类空间拓扑关系.同理, B 中的任一对象 o' 如果不与 A, B 两个片段公共边界的 MBR 相交,则与 A 中的所有对象均不存在第 1 类空间拓扑关系.即 A, B 中不与两个片段公共边界的 MBR 相交的对象不存在第 1 类空间拓扑关系;反之, A, B 间存在第 1 类空间拓扑关系的对象必与两个片段公共边界的 MBR 相交.证毕. \square

由定理 2 可知,同一分割集得到的两个空间片段如果没有公共边界,则两个片段间的空间对象不会有第 1 类拓扑关系.于是有下面的规则:

规则 2(同一分割集片段间第 1 类连接去除规则). 如果参与连接的两个空间片段没有公共边界,则片段间第 1 类连接可以去除.

定理 1 描述的是任意分割区域的两个片段间第 1 类空间拓扑关系的规律,而定理 2 描述的是同一分割集分割得到的两个片段间第 1 类空间拓扑关系的规律,因此定理 1 更具一般性.

3.4 两个相邻多边形 MBR 的交矩形的特例处理

两个相邻多边形 MBR 的交矩形存在一些特殊情况.如图 7 所示,两相邻多边形 MBR 的交可能是一条线(如

图 7(a)、图 7(b)所示),甚至是一个点(如图 7(c)所示).同时,由于几何计算存在误差,也可能影响以 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 对空间对象进行选择的结果正确性.对于上述问题,只需要对 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 进行容差扩展(tolerance expansion,简称 TE)即可解决.

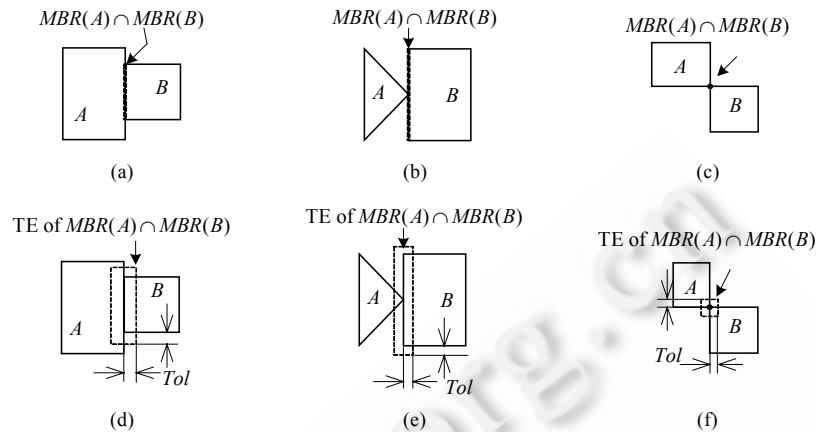


Fig.7 Special intersection rectangles of MBRs of adjacent polygons and the corresponding solutions

图 7 相邻多边形 MBR 的交矩形的特例及其处理方法

设容差值为 Tol , $MBR(A) \cap MBR(B)$ 的坐标为 (x_{min}, y_{min}) 和 (x_{max}, y_{max}) , 则经过容差扩展后其坐标变为 $(x_{min} - Tol, y_{min} - Tol)$ 和 $(x_{max} + Tol, y_{max} + Tol)$. 例如上述图 7(a)~图 7(c) 特例情况下的 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 经过容差扩展后的结果如图 7(d)~图 7(f) 所示. 本文 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 是指进行容差扩展后的矩形.

4 跨边界空间拓扑连接优化转化规则

4.1 空间片段间的第1类拓扑连接优化转化规则

根据定理 1, 区域分片的两个空间片段 A, B 的第 1 类拓扑连接的结果对象与 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 相交, 因此可以先用 $MBR(A) \cap MBR(B)$ 对两个片段的空间对象分别求交, 再对两个交的结果集进行空间连接; 根据定理 2, 同一分割集分割得到的两个片 A, B 的第 1 类拓扑连接的结果对象与公共边界的 MBR 相交, 也可以用公共边界的 MBR 对两个片段的空间对象分别求交, 再对两个交的结果集进行空间连接. 为了描述上的方便, 这里将这两种情况过滤的矩形统一成为过滤 MBR, 即 FMBR:

$$FMBR = \begin{cases} MBR(A) \cap MBR(B), & A, B \text{ 为任意两个区域分片的空间片段, 且 } MBR(A) \cap MBR(B) \neq \emptyset \\ MBR(L), & A, B \text{ 为同一分割集分割的两个空间片段, 且 } A, B \text{ 有公共边界 } L \\ \emptyset, & A, B \text{ 为任意两个区域分片的空间片段, 且 } MBR(A) \cap MBR(B) = \emptyset; \\ & \text{或者 } A, B \text{ 为同一分割集分割的两个空间片段, 且 } A, B \text{ 无公共边界} \end{cases}$$

因此, 有下面的规则:

规则 3(空间片段间第 1 类连接转化规则). 两个跨边界片段的第 1 类空间连接可以转化为先用 FMBR 对两个片段的空间对象分别进行过滤, 再对两个过滤后的结果集进行空间连接.

由于 FMBR 对连接片段进行了有效的过滤, 使得参与连接的两个片段的对象个数减少, 因此起到优化作用. 这种优化方法称为片段边界矩形交过滤的第 1 类连接优化策略 FJOSFBI(first type fragment join optimization strategy by filtering of MBR intersection).

4.2 空间片段间的第2类拓扑连接优化策略

对第 2 类空间连接进一步细分, 一类是参与连接的两个片段的 MBR 相交, 称为 2A 类; 另一类是参与连接的两个片段的 MBR 不相交, 称为 2B 类.

对于 2A 类,由于是 Disjoint 空间拓扑查询,片段之间的连接不能使用前面的 FJOSFBI 优化策略,也需要按集中式空间数据库的连接方法处理;如果两个片段分割边界的 MBR 不相交,则两个片段间不会有对象相交(intersect),因此两个片段间的空间对象都满足 Disjoint 关系.此时,片段间 2B 类连接可以用笛卡尔积来替代.由于这种替代没有复杂的空间关系判断,所以起到优化的作用,因此有下面的优化规则.

规则 4(片段间第 2 类连接优化策略). 如果参与连接的两个片段的分割边界的 MBR 不相交,则片段间第 2 类连接可以转化为两个片段的笛卡尔积.

上述优化称为片段间第 2 类连接的笛卡尔积转化策略 SFJOSTC(second type fragment join optimization strategy by transforming to Cartesian product).

需要注意的是,如果参与连接的两个片段的分割边界的 MBR 相交,片段间第 2 类连接也不能简单地通过两个片段分割边界的 MBR 交矩形去过滤.

5 实验与分析

5.1 实验环境、数据和方法

实验中的节点机器为 PC 机,CPU 主频为 2.4G,内存为 1G.实验数据包括 5 个片段:中国 1:25 万湖北(Hubei)、湖南(Hu'nan)、江西(Jiangxi)、江苏(Jiangsu)这 4 个省的县市级行政区划数据(county),按 4 个省的省界进行区域(分割)分片,共 4 个片段;全国 1:100 万铁路数据(rail),按专题分片,全国铁路 1 个片段.将 5 个片段分别存储在 5 个节点的 Oracle Spatial 9i 空间数据库中,每个片段数据的数据量、对象个数见表 2.

Table 2 Details of the datasets used in the experiments
表 2 实验所用的数据集说明

Data	County				Rail (China)
	County 1 (Hubei)	County 2 (Hu'nan)	County 3 (Jiangxi)	County 4 (Jiangsu)	
Objects number	80	87	104	77	493
Data size	1 876K	1 972K	2 722K	3 252K	288K

我们设计了 3 个实验对本文的优化策略进行验证.其中,实验 1 是相邻区域分片的第 1 类空间拓扑连接,实验 2 是混合分片第 1 类连接,实验 3 是第 2 类空间拓扑连接.对每个实验中的跨边界片段连接,用天真策略 NS (Naïve strategy)、空间半连接策略 SS(semi-join strategy)与本文提出的连接策略进行比较(由于 MR2 适应性受到较大的限制,这里暂不考虑).如两个片段 R, S 进行连接时,假设 R 在节点 A (场地 A), S 在节点 B (场地 B).天真策略分 3 步:第 1 步将 R 从 A 节点的数据库中取出,传送至 B 节点;第 2 步将 R 写入 B 节点数据库,并建空间索引;第 3 步进行空间连接.半连接策略分 6 步:第 1 步从 A 节点取出 R 的 MBR 集 R' ,传送至 B ;第 2 步将 R' 写入 B 节点数据库;第 3 步进行 R' 与 S 的 Intersect 连接,得到 S 的子集 S' ;第 4 步将 S' 传送至 A ;第 5 步将 S' 写入 A 节点数据库并建空间索引;第 6 步进行 R 与 S' 的空间连接.本文提出的优化策略和 SFJOSTC 在第 4 节中已有论述,实验中 FJOSFBI 策略主要包括过滤、传输、建库、建索引和连接等步骤,SFJOSTC 策略在第 5.4 节中进行说明,这里不再赘述.

为了对各种策略的性能进行评估,实验统计各阶段的执行时间,包括片段间连接的优化过滤时间(FiltTime)、场地间数据传输时间(TranTime)、传输到连接场地后建库与建空间索引时间(DbTime)、进行连接并生成结果时间(JoinTime)以及总时间(TotalTime),并进行比较分析.CPU,I/O 等时间实际上已包含在上面的时间花费中.

5.2 相邻区域分片的第 1 类空间拓扑连接优化策略实验与分析

实验使用的查询语句为:Select $A.name, B.name$ from County A , County B where Touches($A.shape, B.shape$);实验对天真策略 NS、空间半连接策略 SS 和本文的 FJOSFBI 这 3 种策略进行效率比较.全局表 County 被分割成多个片段,见表 2.因此,全局查询按公式(1)和公式(2)被分解成多个片段连接.我们对其中的 3 个跨边界片段连

接,County 1 \leftrightarrow County 2,County 1 \leftrightarrow County 3 和 County 2 \leftrightarrow County 3,分别采用 3 种连接策略进行了 9 次实验,3 种策略对同一组数据的连结所得结果经验证是正确的.每种连接策略各阶段的耗时都采用 3 组数据实验结果的平均值.3 种连接策略的实验结果见表 3.图 8 采用直方图进行直观表示,其中,图 8(a)比较了各阶段的总时间和连接时间,图 8(b)比较了过滤时间、传输时间和建库建索引时间.

Table 3 Cost comparison of 3 join strategies with the 1st type spatial join (ms)
表 3 第 1 类空间连接的 3 种策略的代价比较 (ms)

	NS	SS	FJOSFBI
TotalTime	147 453	102 090	21 324
FiltTime	0	431	499
TranTime	1 291	738	354
DbTime	2 618	1 482	809
JoinTime	143 545	99 439	19 662

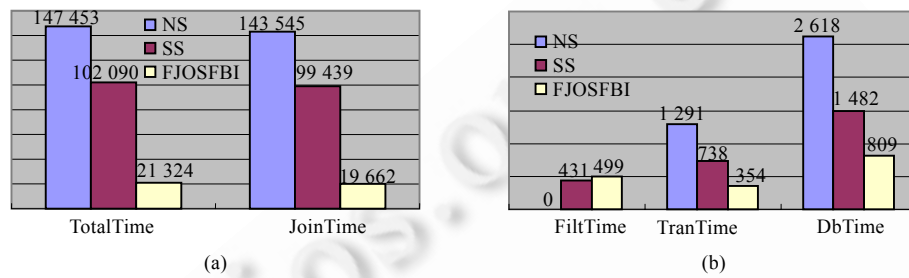


Fig 8 Diagram of cost comparison of 3 join strategies with the 1st type spatial join (ms)

图 8 第 1 类空间连接的 3 种策略的代价比较图示(ms)

从上述实验结果可以看出,对于相邻分割分片的跨边界片段第 1 类连接,3 种策略中,本文提出的片段边界矩形交过滤优化策略 FJOSFBI 的总时间花费最小,半连接策略 SS 次之,天真策略 NS 花费最大,并且 FJOSFBI 策略的优化效果明显.进一步分析可知,FJOSFBI 的过滤时间比半连接策略 SS 要长,天真策略 NS 没有过滤时间.正是由于有了实际连接之前的有效过滤优化,使得数据传输时间、建库与索引时间、本地连接时间都比其他两种策略要短,从而使得总时间明显缩短,达到优化的目的.

5.3 混合分片第 1 类连接优化性能实验与分析

如果空间数据库数据分片采用混合分片,也可以按规则 3 进行优化实验与分析.实验数据一个是用全国 1:100 万铁路数据,按专题分片,即全国铁路一个片段,在一个场地;另一个是县市行政区划数据,按分割分片,取其中湖北省的片段.两个片段的数据分别存储在不同节点的 Oracle Spatial 9i 空间数据库中.

使用的查询语句为(湖北省有哪些铁路,各自通过哪些县?):`Select A.name, B.name from cities A, Rail B where Intersects(A.shape,B.shape)`.实验同样分别使用天真策略 NS、空间半连接策略 SS 和本文的片段边界矩形交过滤优化策略 FJOSFBI 进行连接进行实验.实验结果见表 4,表 4 的图示结果如图 9 所示.

Table 4 Cost comparison of 3 join strategies with the 1st type spatial join based on compound fragmentation (ms)
表 4 混合分片第 1 类空间连接的 3 种连接策略的代价比较 (ms)

	NS	SS	FJOSFBI
TotalTime	303 076	68 027	5 161
FiltTime	0	500	47
TranTime	356	533	239
DbTime	1 110	594	275
JoinTime	301 610	66 400	4 500

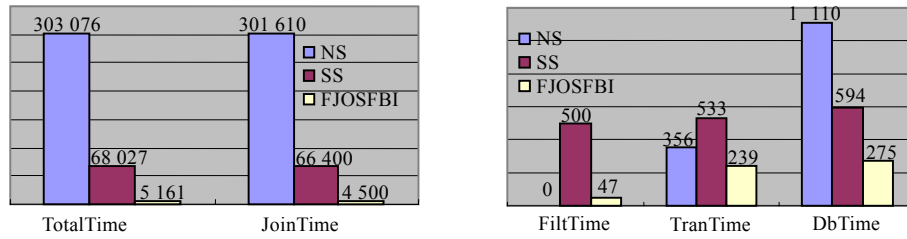


Fig.9 Diagram of cost comparison of 3 join strategies with the 1st type spatial join based on compound fragmentation (ms)

图9 混合分片第1类空间连接的3种连接策略的代价比较图示(ms)

从上面的实验可以看出,对于分割分片与专题分片组成的混合分片,第1类片段连接使用 FJOSFBI 策略的优化效果同样明显.当专题分片与分割分片的空间覆盖范围相近时,优化效果可能不明显;特别地,如果两者范围完全相同,则 FJOSFBI 的效果比天真策略还差.可以通过判断两者的范围关系来决定何时使用 FJOSFBI 策略,但具体还需进一步研究.

5.4 第2类空间拓扑连接优化实验与分析

第2类空间拓扑连接的是两个空间关系的全连接,用半连接策略得不到优化,因此,实验使用天真策略 NS 和本文提出的 SFJOSTC 策略.实验数据选用湖北与江苏两个相离的片段.

设 R, S 分别是区域分片的不相邻的两个空间片段, R 在 A 场地, S 在 B 场地,空间索引为 R 树索引.用 SFJOSTC 策略分为 2 步:第 1 步将 S 送到场地 A ;第 2 步在 A 场地作 S 与 R 的笛卡尔积,得到边界 Disjoint 连接结果.用 SFJOSTC 策略进行第 2 类片段连接时没有数据过滤时间,也没有索引建立时间.

NS 策略查询语句为:Select $A.name, B.name$ from County $A, County B$ where Disjoint($A.shape, B.shape$).

SFJOSTC 策略查询语句为:Select $A.name, B.name$ from County $A, County B$.

实验结果见表 5.图 10 采用直方图进行直观表示.

Table 5 Cost comparison of two join strategies with the 2nd type spatial join (ms)
表5 第2类空间连接的两种连接策略的代价比较 (ms)

	NS	SFJOSTC
TotalTime	7 983	997
TranTime	1 014	982
JoinTime	6 969	15

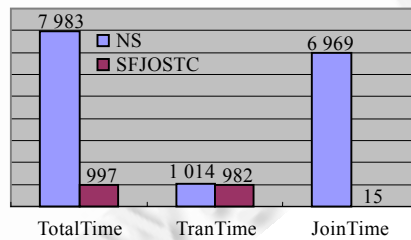


Fig.10 Diagram of cost comparison of two join strategies with the 2nd type spatial join based on partition fragmentation (ms)

图10 区域分片第2类空间连接的两种连接策略的代价比较图示(ms)

从实验结果可以看出,区域分片的跨边界第2类空间拓扑连接在两个片段分割边界的 MBR 不相交时,使用本文提出的 SFJOSTC 策略的效率远远高于直接进行空间连接.

6 结 论

跨边界空间数据查询是区域分片的分布式空间数据库中的固有问题,跨边界空间片段连接优化是提高其查询效率的关键技术之一.本文首先研究了分布式空间数据库分片的问题,提出了空间数据分片的扩展原则:空间聚集性、空间对象的不分割性、逻辑无缝保持性;其次,从两方面入手来研究基于区域分片的分布式空间数据片段连接优化方法:一是减少片段连接个数;二是减少参与连接的空间对象个数.根据区域分片的跨边界连接的特征,基于 OGC 标准中定义的空间拓扑关系,本文将其分为两类(第 1 类空间拓扑关系和第 2 类空间拓扑关系),分别研究其跨边界拓扑连接的优化方法.在提出了第 1 类空间拓扑关系定理的基础上,本文提出了区域分片的跨边界片段间第 1 类拓扑连接去除规则、第 1 类拓扑连接转化规则以及空间片段间的第 2 类拓扑连接优化策略.其中,第 1 类拓扑连接去除规则可以减少跨边界片段连接个数,第 1 类拓扑连接转化规则可以减少参与连接的空间对象个数,同时也减少了分布式数据库中不同场地间的数据传输量.实验结果表明,本文提出的方法对跨边界连接优化有明显的效果.

致谢 在此,我们向对本文工作给予支持和建议的老师和同学表示感谢.

References:

- [1] Laurini R. Spatial multi-database topological continuity and indexing: A step towards seamless GIS data interoperability. *Int'l Journal of Geographical Information Science*, 1998,12(4):373–402. [doi: 10.1080/136588198241842]
- [2] Kossmann D. The state of the art in distributed query processing. *ACM Computing Surveys*, 2000,32(4):422–469. [doi: 10.1145/371578.371598]
- [3] Özsu MT, Valduriez P. *Principles of Distributed Database Systems*. 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [4] Ma RH. Seamless organization of the huge volume of data in large GIS. *Remote Sensing Information*, 2003,(3):44–48 (in Chinese with English abstract).
- [5] Abugov D. Oracle Spatial Partitioning: Best Practices. Oracle White Paper, 2004. 1–18. <http://www.oracle.com/technetwork/database/enterprise-edition/spatial-twp-partitioningbp-10gr2-05-134277.pdf>
- [6] Meyer WS, de Souza JM, Ramirez MR. Secondo-Grid: An infrastructure to study spatial databases in computational grids. In: *Proc. of the VII Brazilian Symp. on Geoinformatics*. 2005. 1–19. <http://www.geoinfo.info/geoinfo2005/papers/p8.pdf>
- [7] Orenstein JA. Spatial query processing in an object-oriented database system. *SIGMOD Record*, 1986,15(2):326–336. [doi: 10.1145/16894.16886]
- [8] Brinkhoff T, Kriegel HP, Schneider R, Seeger B. Multi-Step processing of spatial joins. *SIGMOD Record*, 1994,23(2):197–208. [doi: 10.1145/191843.191880]
- [9] Ramirez MR, de Souza JM. Distributed spatial query processing over MPI. 2003. 1–8. <http://www.cos.ufjf.br/uploadfiles/es59603.pdf>
- [10] Fornari MR, Comba JLD, Iochpe C. Query optimizer for spatial join operations. In: *Proc. of the 14th Annual ACM Int'l Symp.—Advances in Geographic Information Systems*. New York: ACM, 2006. 219–226. [doi: 10.1145/1183471.1183508]
- [11] Lo ML, Ravishankar CV. Spatial joins using seeded trees. In: Snodgrass RT, Winslett M, eds. *Proc. of the 1994 ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data*. New York: ACM, 1994. 209–220. [doi: 10.1145/191839.191881]
- [12] Lo ML, Ravishankar CV. Spatial hash-joins. In: Widom J, eds. *Proc. of the 1996 ACM SIGMOD Int'l Conf. on Management of Data*. New York: ACM, 1996. 247–258. [doi: 10.1145/233269.233337]
- [13] Mamoulis N, Papadias D. Slot index spatial join. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2003,15(1):211–231. [doi: 10.1109/TKDE.2003.1161591]
- [14] Jacox EH, Samet H. Spatial join techniques. *ACM Trans. on Database Systems*, 2007,32(1):1–44. [doi: 10.1145/1206049.1206050]
- [15] Abel DJ, Ooi BC, Tan KL, Power R, Yu JX. Spatial join strategies in distributed spatial DBMS. In: Egenhofer MJ, Herring JR, eds. *Proc. of the 4th Int'l Symp. on Advances in Spatial Databases*. London: Springer-Verlag, 1995. 348–367. [doi: 10.1007/3-540-60159-7_21]
- [16] Tan KL, Ooi BC, Abel DJ. Exploiting spatial indexes for semijoin-based join processing in distributed spatial databases. *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering*, 2000,12(6):920–937. [doi: 10.1109/69.895802]
- [17] Ramirez MR, de Souza JM. Distributed processing of spatial join. In: *Proc. of the Anais do III Workshop Brasileiro de*

- GeoInformática—GeoInfo 2001. 2001. 1–8.
- [18] Open Geospatial Consortium (OGC). Simple feature access—Part 1: Common architecture. OpenGIS Implementation Specification for Geographic Information, Version 1.2.0, 2006. 1–94. <http://www.opengeospatial.org/standards/sfa>
- [19] Wang ZG. The distribute & programme and management of magnanimity spatial data. *Geo-Information Science*, 2000,3(1):67–70 (in Chinese with English abstract).
- [20] Lu F, Liu H, Hu SH. A WebGIS system based on distributed spatial database. *Computer Era*, 2003,(9):3–4 (in Chinese with English abstract).
- [21] Ou Y. Distributed spatial data management [MS. Thesis]. Zhengzhou: Information Engineering University of the People's Liberation Army, 2004 (in Chinese).
- [22] Sa SX, Wang S. Introduction to Database Systems. 3rd ed., Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese).
- [23] Zhu XY. Research on cross-border seamless query optimization and processing in distributed spatial database based on partitioning fragmentation [Ph.D. Thesis]. Wuhan: Wuhan University, 2007 (in Chinese).
- [24] Chen JR, Yan JR, Ye TR. Introduction to Distributed Database Design. Beijing: Tsinghua University Press, 1992 (in Chinese).
- [25] Open Geospatial Consortium (OGC). Simple feature access—Part 2: SQL option. OpenGIS Implementation Specification for Geographic Information, Version 1.2.1, 2006. 1–110. <http://www.opengeospatial.org/standards/sfs>
- [26] Egenhofer MJ, Franzosa RD. Point set topological spatial relations. *Int'l Journal of Geographical Information Systems*, 1991,5(2): 161–174. [doi: 10.1080/02693799108927841]
- [27] Clementini E, Felice PD, Oosterom PV. A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In: Abel DJ, Ooi BC, eds. *Proc. of the 3rd Int'l Symp. on Advances in Spatial Databases*. London: Springer-Verlag, 1993. 1–20. [doi: 10.1007/3-540-56869-7_16]
- [28] Clementini E, Felice PD. A model for representing topological relationships between complex geometric features in spatial databases. *The Int'l Journal of Information Sciences*, 1996,90(1-4):121–136. [doi: 10.1016/0020-0255(95)00289-8]
- [29] Clementini E, Felice PD. A comparison of methods for representing topological relationships. *The Int'l Journal of Information Sciences*, 1995,3(3):149–178. [doi: 10.1016/1069-0115(94)00033-X]
- [30] Clementini E, Sharma J, Egenhofer MJ. Modeling topological spatial relations: Strategies for query processing. *Computers and Graphics*, 1994,18(6):815–822. [doi: 10.1016/0097-8493(94)90007-8]

附中文参考文献:

- [4] 马荣华.大型 GIS 海量数据的无缝组织初步研究.遥感信息,2003,(3):44–48.
- [19] 王泽根.海量空间数据组织及分布式解决方案.地球信息科学,2000,3(1):67–70.
- [20] 卢峰,刘翰,胡少华.基于分布式空间数据库的 WebGIS 系统.计算机时代,2003,(9):3–4.
- [21] 欧阳.空间数据的分布式管理[硕士学位论文].郑州:解放军信息工程大学,2004.
- [22] 萨师煊,王珊.数据库系统概论.第3版,北京:高等教育出版社,2002.
- [23] 朱欣焰.基于分割分片的分布式空间数据库跨边界无缝查询优化与处理研究[博士学位论文].武汉:武汉大学,2007.
- [24] 陈建荣,严隽永,叶天荣.分布式数据库设计导论.北京:清华大学出版社,1992.



朱欣焰(1963—),男,江西婺源人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为空间数据库,地理信息服务.



吴维(1981—),男,博士,主要研究领域为地理信息服务.



周春辉(1978—),男,博士,主要研究领域为地理信息系统,分布式系统.



夏宇(1981—),男,博士,主要研究领域为分布式空间数据库.