

# 空间索引技术研究

熊才权<sup>1</sup>, 马乐乐<sup>1</sup>, 孙贤斌<sup>2</sup>

(1. 湖北工业大学 计算机学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**空间索引可以提高空间数据库的操作效率,目前人们的研究工作更多地集中在空间数据的多维索引的研究上。文中全面地总结了当前空间数据库领域中空间索引以及时空索引的研究进展,描述了R树系列索引的构建思想,节点插入与分裂操作的不同。通过实验深入分析了R树以及R树变体的磁盘访问率,插入,删除,更新的CPU时间,验证了在数据激增的情况下,R树系列索引的复杂性带来的重叠问题会指数递增。由于R树当前应用的深度和广度,研究基于R树的高效时空高维索引技术是解决索引应用问题一个有效方法。提出了索引性能改进的方向在于多种索引技术的结合,尤其是树形结构索引和网状结构索引的结合。

**关键词:**空间数据; R-tree; 空间索引; 高维索引; 时空索引

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2010)10-0219-05

## Research on the Technology of Spatial Index

XIONG Cai-quan<sup>1</sup>, MA Le-le<sup>1</sup>, SUN Xian-bin<sup>2</sup>

(1. School of Computer, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Spatial index can improve operational efficiency of the spatial database. Research is now more focused on the multi-dimensional spatial data research on the index. In this paper, a comprehensive summary of the current field of spatial database research space indexed and spatiotemporal index by a number of experimental pop-depth analysis of the index structure, describes the construction thinking, node insertion and split operation of the R tree index series, through experiments in-depth analysis the CPU time which the R tree and R tree variants's disk access, insert, delete, update. Verify the case of surge in the data, R tree family index of overlap caused by the complexity of the problem exponentially. As the R tree depth and breadth of the current application, it is an effective way to solve application problems of index that research on the efficient tree-based on R tree high dimensional space-time techniques. Finally proposed to improve the performance of the direction of the index is a combination of a variety of indexing techniques, in particular, the index tree structure network structure and the combination of the index.

**Key words:** spatial data; R-tree; spatial index; high dimensional index; spatiotemporal index

## 0 引言

空间数据库的概念是随着地理信息系统的发展而逐渐引起人们的重视的。空间数据是指与二维、三维或更高维空间的空间坐标及空间范围相关的数据,例如地图上的经纬度、湖泊、城市等<sup>[1]</sup>。由于空间数据的特殊性(海量,多维,空间拓扑特征,时间特征),在实际使用的过程当中,传统的B树、B+树、二叉树、ISAM索引、哈希索引等往往不能够保留空间目标的拓扑关系。因此,研究合理的空间索引技术成了制约

GIS发展的一个瓶颈。空间索引技术主要的目的是提高查询的速度,核心是:

- (1)快速的内存计算映射海量的外存空间数据;
- (2)对复杂的空间目标对象进行逐步分割,使得查询路径不需要遍历整个数据库;
- (3)用合理的数据结构表达空间的临近关系和相关性。

## 1 空间索引技术的研究概况

目前国内外最早研究空间索引的成果可追溯到20世纪70年代,1974年R. A. Finkel和J. L. Bentley合作提出了四叉树<sup>[2]</sup>,主要存储空点多维点;1975年J. L. Bentley提出了K-D树<sup>[3]</sup>,对于精确的点匹配查找

收稿日期: 2010-01-25; 修回日期: 2010-04-10

基金项目: 湖北省自然科学基金(2007ABA025)

作者简介: 熊才权(1966-),男,湖北鄂州人,博士,教授,研究领域为人工智能、数据挖掘、空间数据库。

具有和二叉树一样良好的性能(平均查找长度为  $1 + 4\log n$ );1979 提出了非同构的 K-D 树<sup>[4]</sup>,目的是为了减低其删除代价。80 年代 J. T. Robinson 将 KD 树与 B 树结合,提出 K-D-B 树<sup>[5]</sup>;为了索引非点状的空间目标,Matsuyama 提出了 MKD 树<sup>[6]</sup>,B. C. Ooi 提出了 SKD-树<sup>[7]</sup>;J. Nienergelt 等提出了网格文件的思想<sup>[8]</sup>,可以将空间进行划分,通过格网地址寻找磁盘页,类似还有 R 文件<sup>[9]</sup>、EXCELL 方法与 PLOP 哈希<sup>[10]</sup>,这一类方法主要用于多维点,对于其他目标并不适用;Hibert 曲线<sup>[11]</sup>,位置键这一类的方法可以将空间目标映射成为一维的目标,这样就可以按照已经成熟的一维数据库来进行存取;这一时期还出现了一种对以后研究产生深远影响的空间索引技术——R 树<sup>[6]</sup>,R 树的主要问题是中间目录矩形的大量重叠会导致查找路径的不唯一,严重影响其性能。90 年代以后是空间索引技术的高速发展期,这个时期的研究开始向四叉树,R 树类索引聚集,如 Beckman 等设计了 R\* 树<sup>[12]</sup>,指出区域重叠并不意味着更坏的平均检索性能,而插入过程才是提高检索性能的关键,他提出了一系列结点优化原则,设计了结点的强制重新插入技术。这一成果提高了空间利用率,减少了节点分裂次数;1994 年,Kamel 等提出了 Hilbert R 树<sup>[13]</sup>,主要思想是利用 Hilbert 分形曲线对 K 维空间数据进行一维排序,进而对树节点进行排序,并对排序后得到的节点集实施滞后分裂算法以获得较高的存储利用率;2001 年,Huang 提出了 Compact R 树;2002 年,Braktasolas 等提出了 CR 树<sup>[14]</sup>,认为动态 R 树的创建本质是一个聚类问题;HB 树<sup>[15]</sup>与 HB\* 树<sup>[16]</sup>也是一种重要的多维动态索引结构,与 R 树相比较,对维数不敏感,具有较高的空间利用率和查询效率。国内如陆锋等<sup>[17]</sup>提出基于 Hilbert 排列码的 GIS 空间索引方法,对 Morton 码、Gray 码、Hilbert 码和 Sierpinsky 码的空间聚类特征进行了分析和比较,得出了 Hilbert 码在空间查询中效率最高的结论;曹加恒等在 WINDOWSNT(世界之眼)上实现了 G 树<sup>[18]</sup>,它能有效地解决空间数据库中 N 维空间数据的索引问题;史文中等提出了基于凸多边形的空间索引结构——CP 树<sup>[19]</sup>,用凸多边形来近似空间目标,有效地减少了 R 树类的空间重叠问题;郭菁等提出了 QR 树<sup>[20]</sup>,即将整个索引空间划分成多级子索引空间,然后对每级的子索引空间均采用 R-树进行索引。其实质是将一棵“大”的 R-树分解成多棵“小”的 R-树,从而减少索引空间重叠,提高查找性能。QR-树可以看作是一棵特殊的“四叉树”(2k 叉树,k 为空间维数),这棵“四叉树”的每个节点均指向一棵与其对应索引空间相关联的 R-树;卢炎生等在

R 树索引的基础上提出了一种新的空间数据库索引结构 CQRtree<sup>[21]</sup>,CQRtree 是 CELLQtree 树和 R 树的组合,其实质是将一棵大的 R 树分解成多棵小的 R 树,分解后以略大的空间开销换取了更高的查询性能。国内目前最新的研究成果有:张军旗等人对聚类与查询性能之间的关系进行理论分析,提出一种新的基于聚类分解的高维度量空间 B+-tree 索引,它通过聚类分解对数据进行更细致的划分来减少查询的数据访问<sup>[22]</sup>;蔡浴泓等在 R\* 树索引结构的基础上融合了传统的四叉树索引方法的精髓,提出了一种改进的 R\*-Q 树索<sup>[23]</sup>,有效地减少了空间数据索引码的交叠因子交叠率;李佳田等<sup>[24]</sup>提出一种基于线性四叉树结构并顾及矢量与栅格计算性质的 Voronoi 图生成方法,其核心思想是利用线性四叉树结构以减小空间剖分所产生的空间复杂度,改变膨胀模拟操作的计算方向以减小时间复杂度。赵园春<sup>[25]</sup>与龚俊<sup>[26]</sup>等人分别在并行 R 树和 R 树的节点选择上做了优化与改进,邓红艳等<sup>[27]</sup>提出了一种用于空间数据多尺度表达的 R 树变形索引结构 SDMR 树。何小苑等<sup>[28]</sup>针对 R 树与 Hilbert R-树的特点,提出对 Hilbert R-树节点进行聚类的索引算法,较好地解决相邻数据的聚类存放,使叶节点 MBR 面积减小,内部节点交叠降低。这里用图 1 来说明随着时间的推移,空间索引技术的一系列进展。

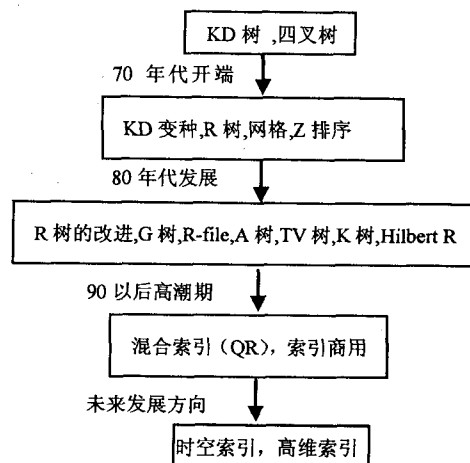


图 1 空间索引发展历程

空间索引的方法很多,但基本原理都类似,即采用分割原理,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。然后利用不同的数据结构对分割的区域进行组织,以达到快速访问数据项的目的,下面对空间索引进行简单的分类,分类的目的是为了找出同一类技术当中的共同优势,以及存在的普遍性的问题。如图 2 所示。

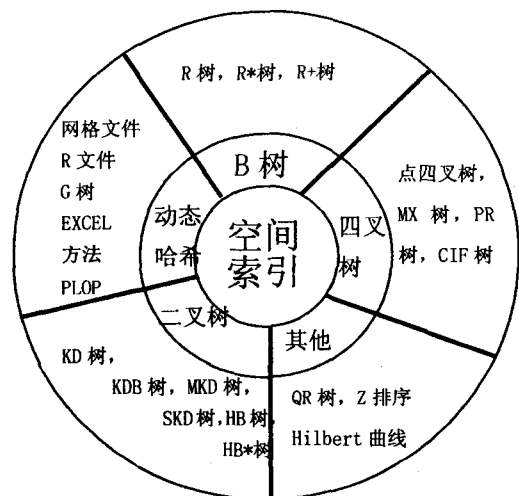


图2 按照空间索引的演化体系分类

由图 2, 可以得出如下四点:

- 1) 二叉树类索引主要基于多维点,对于区域查找,效率较差;
- 2) 基于 B 树的索引,继承了 B 树优点,平衡度高,对于点和非点目标都具有良好的性能,缺点是结构复杂,对维数敏感,易产生目录重叠现象;
- 3) 四叉树类索引:应用于栅格数据的管理中;
- 4) 基于哈希与空间目标排序的方法,都是将索引空间划分为网格,前者使用多维数据点,后者理论上讲适用于复杂目标,但易丢失空间关系;
- 5) 混合类索引一般综合了两种或以上的索引技术的优点,如 QR 树,一般具有优越的性能。

## 2 几种商用空间索引技术分析

## 2.1 R 树索引族

R 树是目前最流行的动态空间索引结构,广泛应用于原型研究和商业应用中,如 ORACLE 公司的 Spatialware, Mapinfo 公司的 Mapinfo 和 Informix 的 GeoSpatial DataBlade 等均采用了 R 树类索引其后,人们在此基础上针对不同空间运算提出了不同改进。经过 20 多年的发展,产生了不少 R 树变体。

## 2.2 三种 R 树索引(R 树, R\* 树, R+ 树)的比较

首先简单的回顾一下 R 树的特点:

设  $M$  为一个节点的最大实体数, 设  $m = M/2$  为标识一个节点的最小实体量, R 树满足以下特性:

- 1) 除根节点外所有叶节点都包含  $[m, M]$  个索引纪录。
- 2)  $I$  是包含  $n$  维空间数据的最小矩形。
- 3) 根节点外所有非叶节点都包含  $[m, M]$  个孩子。
- 4) 每个非叶节点的实体项,  $I$  是最小的矩形包含

有孩子节点中所包含的矩形。

- 5) 根节点至少包含 2 个节点, 除非它是叶节点。所有叶节点在同一层上。

图 3 说明了 R 树的构建过程以及结构。

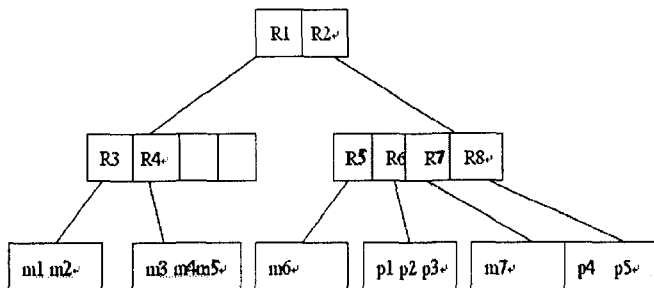


图 3 R 树结构图

见图 3:让空间上靠近的空间要素拥有尽可能近的共同祖先,能提高 R 树的查询效率。插入中选择子树的标准,分裂操作、插入操作中选择子树的标准,分裂操作中的分裂算法,都是为了体现这一目标。但是用什么样的规则来衡量空间要素的聚集,是一个非常复杂的问题。由于衡量的方法不一样,由此产生了众多的 R 树的变型(R\* 树,R+ 树)。

R+ 树主要用整体和局部优化的思想,减少了 R 树中间目录矩形的重叠,R 树插入节点时采用的仅仅是覆盖矩形的面积最小的分裂算法,但分裂后的两个矩形之间会有部分区域重合,造成了查找时搜索路径的不唯一,R+ 树分裂节点时采用了有效的划分空间的算法,保证了目录矩形之间不能有重复的区域,性能得到了提升。

R\* 树的基本原理和 R 树类似,主要有两点不同:

- (1)插入算法不同,  $R^*$  树插入新的节点的时候尽量保证所插入的位置是让中间的目录矩形扩展最慢, 这样使得在索引点状数据时性能得到很大提升。
- (2)在处理溢出节点的分裂时, Guttman 提出的是只要分裂后的面积和最小, 为此他定义了线性和平方的两种计算面积和的方法; 而 Beckmann 则认为: 即使存在重叠, 也并非坏事, 仍然可以将溢出节点重新让它插入到溢出的目录矩形中去, 这样做的好处就是空间上临近目标在索引结构中仍然会在一起, 从而动态地保证了中间节点总是最优的。  $R^*$  树被认为是一种最好的  $R$  树的变体。

以高校 1:2000 的实验数据,用 VC++6.0 平台模拟三种 R 树的实现,通过基本的插入、查找、删除进行性能测试,主要的测试指标有磁盘块访问次数、响应时间等。实验表明,R\* 树与 R+ 树经过了优化,性能更为优越,在数据量不是很大时,R\* 树性能最优,但是构建树的过程耗费的时间也最长,查找以及删除时

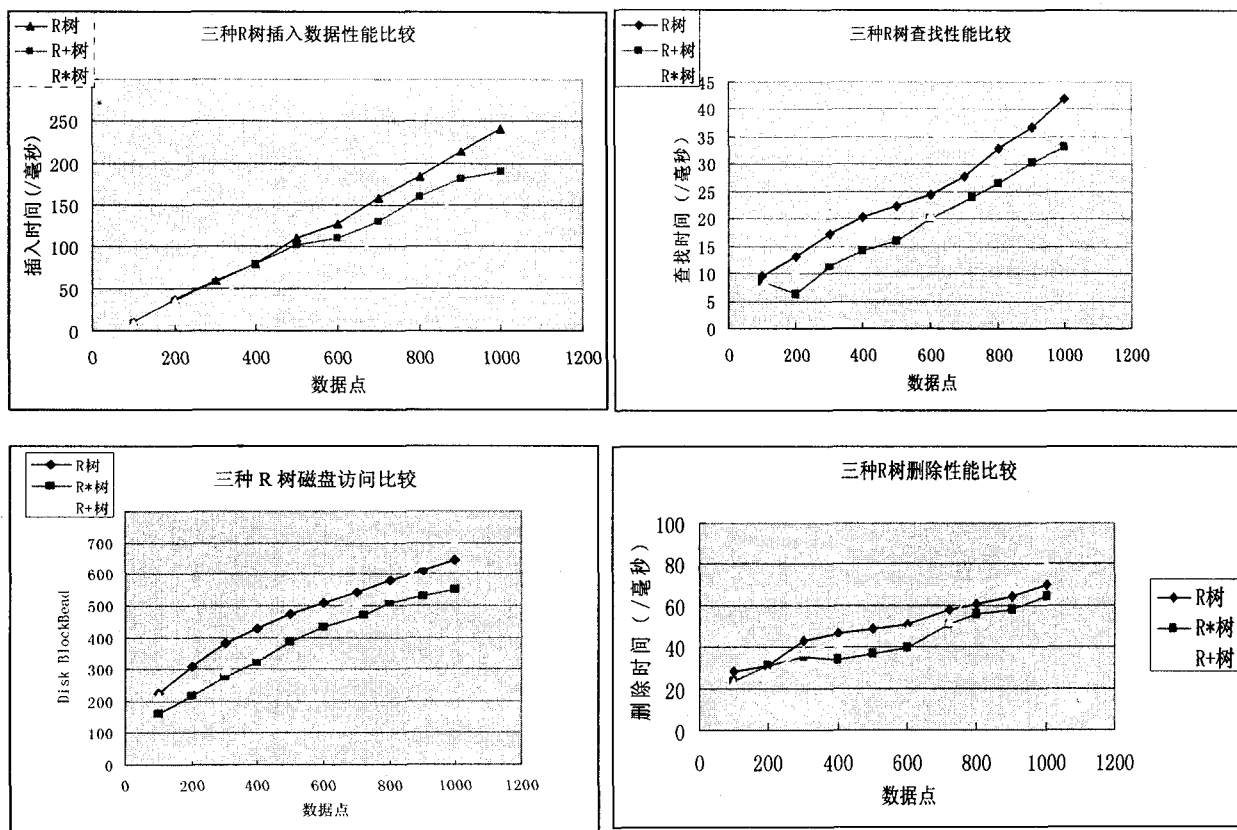


图4 三种算法实际在运行的时候性能的差异

R\*树与R+树明显优于R树,节点空间利用率也得到了很大程度的提升,反映出的问题是三种树的性能在数据量比较大的时候处理器计算时间均出现了指数递增,这说明了在数据激增的情况下,R树系列的索引的复杂性带来的问题依然没有得到有效的解决。测试的指标随着数据量的变化曲线如图4所示。

R树的性能高低主要体现在插入路径的选择以及节点的分裂上,所以要优化R树的性能,使其能在海量的空间数据库中发挥重要作用,所采用的思路主要有以下几点:

1. 在数据节点插入时的节点选择上,采用更为合理的方式,使插入节点后目录矩形重叠最小。
2. 在节点分裂的时候,采用有效的分裂方式,尽量使分裂在本层实现,不影响上下层。
3. 通过和其它的成熟索引技术融合,开发出更为合理的复合型的索引。

### 2.3 时空索引

时空数据与传统空间数据最大的区别就是数据库在不断地被更新,时空索引即是在普通空间索引的基础上引入了时间维度的变化,空间目标不仅存在着位置上的变化,而且随着时间的演变而发生位置的移动,如GPS定位车辆,土壤侵蚀变化,森林火灾等,现有的时空索引如3DR树<sup>[29]</sup>是典型的索引过去状态的一种

简单的索引,空间信息还是存储到R树中,而时间信息作为第三维与空间范围相结合,空间利用率高,TPR树在R\*树的基础上引入了时间函数的范围矩形,又叫时参矩形(TPBR),TPR<sup>[30]</sup>树能索引连续的空间对象,HR树<sup>[31]</sup>的主要思想是用两棵树,只更新随着时间变化的节点,其他的节点则共享,在处理时间片查询时性能优越,但是,节点更新时带来的结构上的变化造成了大量的数据冗余。MV3R树<sup>[32]</sup>结合了MVR-tree和3DR-tree的优点,处理时间间隔查询时具有较好的性能,被认为是一种高效的时空索引。时空索引面临的主要问题就是数据更新频繁,插入与删除操作过多,需要不断地重构树,如何提高空间利用率是未来研究时空索引的一个热点。

### 3 空间索引的发展

一方面,随着GIS的广泛普及,空间数据的数据量越来越大,索引的使用固然可以起到降低查询时间,优化查询性能的作用,但是由于数据量的巨大,索引本身维护和管理也同时需要大量的时间,所以研究索引的管理和优化方法已成为当务之急。

另一方面,空间数据的维数越来越高,所以近年来人们正在开始研究高维空间数据的存储问题。前面讨论的树形索引,在维数不很高的情况下有很好的检索

性能,但当维数很高时,则面临检索困难<sup>[33]</sup>。国内外学者目前正在着力实现高维数据索引,一种方法就是降维(空间填充曲线,奇异值分解,距离映射算法),各种高维数据索引的性能还需要建立完整的评价体系。

#### 4 结束语

通过总结国内外20多年来空间索引技术的研究经验,理清了各种技术之间的关系与区别,并指出了未来研究的方向。空间索引技术是数据库理论、GIS技术、计算机科学、数学等多门学科的交叉学科,前人提出的算法尽管已经取得了很不错的效果,但是在某些应用领域仍然不尽人意。目前的空间索引研究较多地局限在传统索引的优化与改良上,而对高维空间索引技术、空间关系、空间数据仓库等索引技术研究比较少。随着计算机硬件技术的发展,空间索引的分布化或并行化正成为一种崭新的研究思路,这将成为今后空间索引研究的一个新的热点。

#### 参考文献:

- [1] 郭薇,郭菁,胡志勇.空间数据库索引技术[M].上海:上海交通大学出版社,2006.
- [2] Finkel R A, Bentley J L. Quadrees: A data structure for retrieval on composite keys[J]. Acta Informatic, 1974, 4(1): 1-9.
- [3] Bentley J L. Multidimensional Binary Search Trees used for Associative searching[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(9): 509-517.
- [4] Bentley J L. Multidimensional Binary Search Trees in Database Applications[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1979, 5(4): 333-340.
- [5] Robinson J T. The K-D-B-tree: a search structure for large multidimensional dynamic indexes[C]//In: Proceedings of the 1981 ACM SIGMOD international conference on Management of data. New York: ACM, 1981: 10-18.
- [6] Guttman A. R-Trees: A Dynamic Index Structure for Spatial Searching[C]//In: ACM SIGMOD Record. New York: ACM, 1984: 47-57.
- [7] Matsuyama T, Hao L V, Nagao M. A file organization for geographic information systems based on spatial proximity[J]. Int Journal Comp Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 26(3): 303-318.
- [8] Nievergelt J, Hinterberger H, Sevcik K C. The Grid File: An Adaptable, Symmetric Multikey File Structure[J]. ACM Trans Database Sys, 1984, 9(1): 38-71.
- [9] Hutflesz A, Six H-W, Widmayer P. The R-File: An Efficient Access Structure for Proximity Queries[C]//In: Proceedings of the Sixth International Conference on Data Engineering. Washington: IEEE Computer Society, 1990: 372-379.
- [10] Ralf H-G, Praktische I-IV, FernUniversität H. An introduction to spatial database systems[J]. SPECIAL ISSUE: Special issue on spatial database systems, 1994, 3(4): 357-399.
- [11] Biswas S. One-dimensional B-B polynomial and Hilbert scan for graylevel image coding[J]. Elsevier Science, Oxford, 2004, 37(4): 789-800.
- [12] Beckmann N, Kriegel H, Schneider R, et al. The R\*-tree: An efficient and robust access method for points and rectangles[C]//In: Proc ACM SIGMOD Conf. Atlantic City, NJ: [s. n.], 1990: 322-331.
- [13] Kamei I, Falout S, Hilbert C. R-tree: An improved R tree using fractals[C]//In: Proceedings of the 20th VLDB. Santiago, Chile: [s. n.], 1994: 500-509.
- [14] Brakatsoulas S, Pfoser D, Theodoridis Y. Revisiting Rtree construction principles[C]//In: Proceedings of the 6th ADBIS. Bratislava, Slovakia: [s. n.], 2002: 149-162.
- [15] Lomet D, Salzberg B. The HB-tree: a robust multi-attribute search indexing method[C]//In: Proc 5th Data Engineering Conf. Los Angeles, CA: [s. n.], 1989: 625-658.
- [16] 金树东,冯玉才,孙小微.多维索引hB树的改进方法-hB\*树[J].软件学报,1998,9(3):206-212.
- [17] 陆锋,周成虎.一种基于Hilbert排列码的GIS空间索引方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(5):424-428.
- [18] 曹加恒,张剑,谭辉,等.空间索引的新机制-G树[J].武汉大学学报:自然科学版,1998,44(1):50-52.
- [19] 史文中,郭薇,彭奕彰.一种面向地理信息系统的空间索引方法[J].测绘学报,2001,30(2):156-161.
- [20] 郭菁,周洞汝,郭薇,等.空间数据库索引技术的研究[J].计算机应用研究,2003(12):12-14.
- [21] 卢炎生,向祥兵,潘鹏. CQRtree 空间数据库索引结构及实现算法[J].计算机工程与科学,2006,28(6):108-111.
- [22] 张军旗,周向东.基于聚类分解的高维度空间索引B-Tree[J].软件学报,2008,19(6):1401-1412.
- [23] 蔡浴泓,孙蕾.基于R树的空间数据索引技术的探索[J].计算机应用与软件,2008,25(12):169-171.
- [24] 李佳田,陈军,赵仁亮,等.基于线性四叉树结构的Voronoi图反向膨胀生成方法[J].测绘学报,2008,37(2):236-242.
- [25] 赵园春,李成名,赵春宇.并行R树空间索引中叶节点大小的确定方法研究[J].测绘科学,2008,33(4):94-97.
- [26] 龚俊,柯胜男,鲍曙明.一种全新的R树节点选择算法[J].计算机应用研究,2008,25(10):2946-2948.
- [27] 邓红艳,武芳,翟仁健,等.一种用于空间数据多尺度表达的R树索引结构[J].计算机学报,2009,32(1):177-183.
- [28] 何小苑,闵华清.基于聚类的Hilbert R-树空间索引算法

(下转第227页)

端与服务端同时插入、客户端与服务端同时更新,Action 属性设置为 Continue,忽略冲突并继续执行同步;类型为客户端更新的同时服务端删除,Action 属性设置为 RetryWithForceWrite,重新尝试逻辑以强制应用变更。

## 5 权限设计实现

安全模块是智能客户端应用的重要部件。基于角色的访问控制(Role - Based Access Control, RBAC)逐渐取代了其他两种访问控制<sup>[11,12]</sup>。把基于角色的访问控制应用到安全模块的设计,对加强安全控制管理有一定的积极作用。这里的角色包括:系统管理员、派送员及一般用户。系统管理员依据角色为用户分配权限,以确保不同用户严格按照自己拥有的权限执行相应操作,维护系统安全<sup>[13]</sup>。例如,对移动购物应用可设计如图 3 所示的权限管理机制。

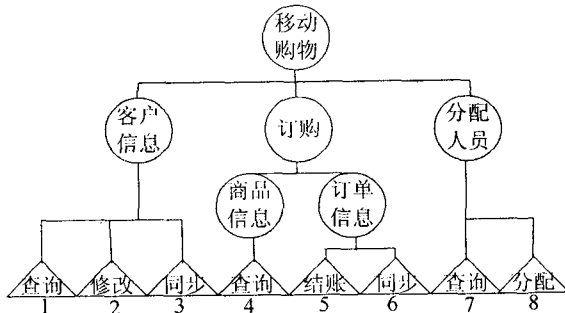


图 3 权限管理

其中,派送员操作 1、2 和 3;一般用户只能操作 4、5、6;系统管理员有权操作全部,包括更新用户角色和权限。User 表 Right 字段可以标识操作权限。普通用户、派送员、系统管理员 Right: “00111000”、“00000111”、“11111111”。应用依据 0 和 1 值设置按钮 Enabled 属性,控制按钮是否可用。

## 6 结束语

课题研究基于 Visual Studio 2008 平台,应用部署

于 CHS Windows Mobile 6 Classic Emulator 模拟器。通过设置同步方向、数据表、数据项、命令等,加强了对应用的控制。进一步的研究和实践,是对各功能的改进、利用并移植到真实设备。

### 参考文献:

- [1] 徐 毅. 基于智能客户端的工作流模型设计[J]. 计算机仿真, 2008(12): 281 - 284.
- [2] 王焕彬, 夏靖波. 智能客户端技术在军用装备管理中的应用研究[J]. 微计算机信息, 2008(8): 8 - 11.
- [3] 朱 涛, 张水平, 李云云, 等. 基于智能客户端架构的自助服务系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2007(16): 205 - 208.
- [4] Kuayk R. Web services: Standardizing EAI[J]. eAiJournal, 2002(4): 23 - 25.
- [5] Anagnostopoulos C, Vergados D, Kayafas E, et al. A computer vision approach for textile quality control[J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12(1): 31 - 44.
- [6] Microsoft 公司. MSDN 技术资源[DB/OL]. 2008. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb384572.aspx>.
- [7] 索红光, 王雷全. 智能客户端系统中数据同步策略的研究与实现[J]. 计算机工程与设计, 2007(2): 351 - 354.
- [8] 彭玉卓, 杨开英, 马 俊. Smart Client 技术实现 MIS 系统中的离线应用[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(3): 200 - 203.
- [9] 侯利军. LINQ 数据访问技术—基于 C# [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [10] Barbara D, Imielinski T. Sleepers and workaholics: Caching strategies in mobile environments[J]. Journal of VLDB, 1995, 4(4): 567 - 602.
- [11] Sandhu R, Coyne E, Feinstein H, et al. Role - Based Access Control Model[J]. IEEE Computer, 1996, 29(2): 38 - 47.
- [12] 陈启泓, 邹 杜, 艾 飞, 等. 基于 RBAC 的限制约束在权限控制中的实现[J]. 微计算机信息, 2009(7): 3 - 6.
- [13] 蒋 伟. Ajax 在整合框架中的研究与应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.

(上接第 223 页)

- [J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 40 - 42.
- [29] Simonas S, Christian S, Scott J, et al. Indexing the Positions of Continuously Moving Objects [C]//In: Proceedings of the 2000 SIGMOD International Conf. on Management of Data. Dallas, TX, USA: [s. n.], 2000: 331 - 342.
- [30] Mario A N, Jefferson R, Silva O. TOWARD HISTORICAL R - TREES[C]//In: The ACM Symposium on Applied States. [s. l.]: [s. n.], 1998: 235 - 240.
- [31] Yufei T, Dimitris P. The MV3R - Tree: A Spatio - Temporal

Access Method for Timestamp and Interval Queries[C]//In: Proceedings of the 27th VLDB Conference. Roma, Italy: [s. n.], 2001: 431 - 440.

- [32] Guo Jing, Guo Wei, Zhou Dongru. Indexing of Constrained Moving Objects for Current and Near Future Positions in GIS [C]//In: Proceedings of the 1st International Multi - Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS' 06). [s. l.]: [s. n.], 2006: 504 - 509.
- [33] 张明波, 陆 锋, 申排伟, 等. R 树家族的演变和发展[J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 289 - 300.