

TDLRtree 时空数据库索引结构及实现算法 在变电站仿真系统中的应用

解大¹, 余江燕², 唐寅初³, 王丽芳⁴

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 中国电力投资集团公司高级培训中心, 上海 200240;
3. 上海飞平电子技术有限公司, 上海 200240; 4. 上海市电力公司教育培训中心, 上海 200432)

摘要: 提出了一种新的基于 TDLRtree 时空数据库索引结构来表示系统拓扑结构的方法。整体上采用以时间为轴的方式对系统拓扑结构情况进行记录, 通过一部分对象采用单链表, 另一部分对象采用双链表的方式来简化对系统拓扑结构的重构。该方法避免了传统重构中重构树的复杂过程, 通过对原有树变化后的遍历来代替了重构树, 简化了重构的算法, 提高了系统效率。通过变电站仿真系统的运行证实了该方法的有效性。

关键词: 时空数据库; TDLRTree 索引结构; 变电站仿真系统

Application of TDLRtree index structure and implementation algorithm for spatio-temporal database in substation simulation system

XIE Da¹, YU Jiang-yan², TANG Yin-chu³, WANG Li-fang⁴

(1. Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Advanced Training Center of China Power Investment Corporation, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Fei Ping Institute Technology Ltd., Shanghai 200240, China; 4. The Educational and Training Center of Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200432, China)

Abstract: This paper presents a new TDLRtree index structure for spatio-temporal database to describe the topology of power system. The system topology structure is recorded by adopting time-axis way at the top. A part of objects is used single-link table and the others are used double-link table to simplify the restructure of system topology. The algorithm avoids complex calculation in traditional restructure method. Since the algorithm traverses original tree changed instead of tree restructure, restructure method is simplified and calculation efficiency is improved. The application in substation simulation system proves the availability.

Key words: spatio-temporal database; TDLRtree index structure; substation simulation system

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0044-06

0 引言

变电站是电力系统的重要组成部分, 变电站的安全可靠运行对维持电力系统的稳定运行和保证供电的可靠性有十分重要的意义^[1,2]。但由于电力系统的特殊性, 要在实际运行的变电站中对人员进行培训是不切实际的, 于是便引入了变电站仿真技术^[3-5]。

目前, 国内外变电站仿真培训系统主要分为实物仿真和纯软件仿真两种类型。由于实物仿真的硬件投资高, 灵活性差, 所以随着计算机技术和多媒体技术的发展和完善, 纯软件仿真已成为仿真培训系统的必然趋势^[6-9]。

在软仿真中, 准确快速地表达出变电站一次接线图的拓扑结构是变电站仿真系统有效运行的关键问题^[10-12]。目前, 传统构建拓扑结构的方式是从供

电电源开始, 通过遍历所有节点和支路, 并根据这些节点和支路与电源连接的情况来判断进行拓扑结构生成的。这种方式需要进行大量的运算, 比较耗费系统资源, 对系统配置要求也较高。

本文根据拓扑结构的重构特性, 提出一种新的基于 TDLRtree 时空数据库索引结构理论^[13-15]的构建拓扑结构的方法。最后利用变电站仿真系统对传统方法和新方法进行了对比研究。研究表明, 在系统结构发生改变后, 新的方法不仅可以快速、准确地表达出当前的拓扑结构, 减少了传统方式重建拓扑结构所需的资源, 而且实现了系统状态的重放。

1 TDLRTree 时空数据库索引结构

1.1 时空数据库理论

时空数据库(Spatial-Temporal Database)是能够

同时处理时态数据和空间数据的数据库系统。从当前的研究现状来看, 已经提出的大部分时空数据库索引结构都是从空间数据库的 Rtree 发展而来的。

在时空数据库的索引结构中, 空间和时间信息是分开存储的。节点结构可以表示为(S,T,P), 其中, S用于存储空间信息, T用于存储时间信息, P用于存储指向子树的指针。根据时空数据库的节点结构定义时空对象为 $H_{oid} = (oid, S_{oid}, T_{oid})$ $oid \in OBJ$, 其中, OBJ是时空数据库的对象域, S_{oid} 、 T_{oid} 是oid标识的对象在时空数据库中存在的空间域和时间域。设 $\forall \theta_{oid} \in \Pi$, 定义时空函数 $f_{oid}(t)$, 其中 $t \in T_{oid}$, $f_{oid}(t) \in S_{oid}$; 设 Π 是时空函数对象集, 可以表示为 $\Pi = \{\theta_{oid} | oid \in OBJ\}$, 其中设静止对象集为 Π_s , $\Pi_s \subseteq \Pi, \forall \theta_{oid} \in \Pi_s$, 设运动对象集为 Π_n , $\Pi_n \subseteq \Pi, \forall \theta_{oid} \in \Pi_n$; 静止对象和运动对象的区别可以表现为: 静止对象所对应的时空函数 $f_{oid}(t)$ 为常数函数, 而运动对象所对

应的时空函数 $f_{oid}(t)$ 为非常数函数。如果设时空对象 θ_{oid} 在某时刻 t 的时空状态为 $\sigma_{oid}(t)$, 则可表示为 $\sigma_{oid}(t) = (oid, f_{oid}(t), t)$ 关系式。

另外, 对时空数据的包含关系可以分为空间包含关系和时空状态包含关系。对空间包含关系的定义为: 设空间包含关系 c^s , $\forall f_{oid1}(t), f_{oid2}(t)$, 其中:

$$f_{oid1}(t) = \{x_{oid11}, y_{oid11}, x_{oid12}, y_{oid12}\} \quad (1)$$

$$f_{oid2}(t) = \{x_{oid21}, y_{oid21}, x_{oid22}, y_{oid22}\} \quad (2)$$

如果 $x_{oid11} > x_{oid21}, y_{oid11} < y_{oid21}, x_{oid12} < x_{oid22}, y_{oid12} > y_{oid22}$, 则有 $f_{oid1}(t) \subset^s f_{oid2}(t)$ 。

对时空状态包含关系的定义为, 设时空状态包含关系 c^σ , $\forall \sigma_{oid1}(t), \sigma_{oid2}(t)$:

如果有 $f_{oid1}(t) \subset^s f_{oid2}(t)$ 成立, 则有 $\sigma_{oid1}(t) \subset^\sigma \sigma_{oid2}(t)$ 。

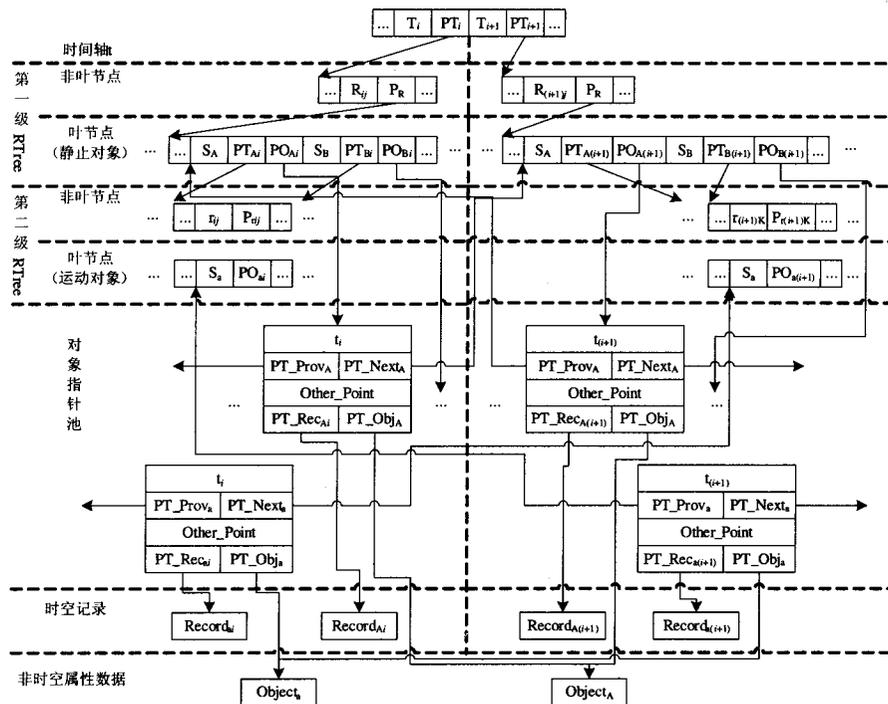


图1 TDLRtree结构

Fig.1 TDLRtree structure

1.2 TDLRtree的体系结构

根据时空数据库理论, 通过利用系统中静止对象的特殊性, 可以有效限制索引结构的重构范围; 而对索引结构中数据的查询, 则可使用双向链表来链接对象的历史和将来状态。于是便提出了

TDLRtree (Temporal Double Level Rtree) 索引结构。

在 TDLRtree 中, 以时间轴 t 作为整个索引的入口, 由某一时刻 t 开始, 进入一个两级 Rtree, 对系统中所有 t 时刻有效的时空对象在 t 时刻处在的空间状态进行索引。其体系结构如图 1 所示。

从 TDLRtree 的结构图中可以看出, 在时间 t 轴上节点的结构为: $[t, PT]$, PT 是指向第一级 RTree 的指针。在这一层中, 只跟时间有关, 而与具体数据无关。在第一级 RTree 中, 存储的是静止对象, 是限制索引结构重构范围的关键。在第二级 RTree 中, 存储的是运动对象, 根据这些对象的状态的改变就会得到很多时空记录数据。

2 TDLRtree 的实现算法

需要利用 TDLRtree 的索引结构, 需要知道它的两个关键实现算法。设 TDLRtree 体系结构中的第一级 RTree 和第二级 RTree 分别为 RTreeFirst 和 RTreeSecond。

算法一是用于当在 TDLRtree 中插入时空对象 θ_{oid1} 在时刻 t 的时空状态 $\sigma_{oid1}(t) = (oid1, f_{oid1}(t), t)$ 时, 对 TDLRtree 的更新。其更新算法为: 如果 θ_{oid1} 是运动对象, 将运动对象 θ_{oid1} 插入到 TDLRtree 的第二级 RTree 中, 并更新第二级 RTree 中双向链表信息; 若 θ_{oid1} 是静止对象, 将静止对象 θ_{oid1} 插入到 TDLRtree 的第一级 RTree 中, 并更新第一级 RTree 中双向链表信息。程序语言表示如下:

```
If ( $\theta_{oid1} \in \prod_n$ ) {
  If ( $(\exists \theta_{oid2} \in \prod_S) \&\& (\sigma_{oid1}(t) \subset^{\sigma} \sigma_{oid2}(t))$ ) {
    Insert  $\sigma_{oid1}(t)$  into RTreeSecond ( $\sigma_{oid2}(t)$ );
    Link PoolNodes Pointers;
    return; }
}
```

```
Insert  $\sigma_{oid1}(t)$  into RTreeFirst ( $t$ );
Link PoolNodes Pointers;
```

算法二是用于当一个对象 θ_{oid} 发生运动时, 其时空状态由 $\sigma_{oid}(t_1)$ 改变为 $\sigma_{oid}(t_2)$, 需要对 TDLRtree 进行更新。其更新算法为: 如果 θ_{oid1} 是运动对象, 先删除现有 θ_{oid1} 中的节点, 再调用算法一来更新数据和双向链表信息; 若 θ_{oid1} 是静止对象, 则需先创建一个集合 $K_{oid}(t_1)$, 记录 $\sigma_{oid}(t_1)$ 为根的二级 RTree 上的所有叶子节点, 再删除现有 θ_{oid1} 中的节点, 最后调用算法一来更新数据和双向链表信息。程序语言表示如下:

```
If ( $\theta_{oid1} \in \prod_n$ ) {
  Delete  $\sigma_{oid1}(t_1)$ ;
```

```
  Insert  $\sigma_{oid1}(t_2)$  into TDLRtree;
}
Else {
  Create  $K_{oid(t1)} = \{\sigma_{x(t1)} \mid \sigma_{x(t1)} \subset^{\sigma} \sigma_{oid}(t)\}$ ;
  Delete  $\sigma_{oid1}(t_1)$ ;
  for each  $\sigma_{x(t1)} \in K_{oid(t1)}$ 
    Insert  $\sigma_{x(t1)}$  into TDLRtree;
  Insert  $\sigma_{oid1}(t_2)$  into TDLRtree;
}
```

3 TDLRtree 的索引结构在变电站仿真系统中的应用

在变电站仿真系统中, 所有的断路器和闸刀位置都是不会因为拓扑结构的改变而改变, 所以将这些设备设定为整个系统中的静止对象; 而节点和支路则会因为系统拓扑结构的改变而改变, 可能会有插入到系统中或从系统中删除之类的操作, 所以将节点和支路设定为整个系统中的运动对象。

由于在变电站仿真系统中要频繁地进行潮流计算, 所以需要不断地遍历当前正在系统中的节点和支路的情况, 并进行拓扑分析。传统的方式是通过遍历所有节点和支路, 并分析连接情况生成新的拓扑结构。在这种方式下, 系统速度随着系统中节点和支路数的增加而变慢, 这部分的计算也成为了系统最大的负担。

利用 TDLRtree 索引结构中的链表, 可以很好地将一次接线图中这些节点和支路在不同时刻的状态联系起来, 并通过链表的联通情况表示出当前节点和支路是否在当前拓扑结构中。这样, 在不同时刻下, 不仅可以表现出各节点和支路的有电、失电状态情况, 而且还可以通过运动对象之间的连接情况真实地表示出当前一次接线图的拓扑结构, 从而避免了传统方式存在的问题。另一方面, 由于 TDLRtree 结构中, 最顶层的链表使用的是时间轴 t , 所以可以更容易地达到操作重放、冻结操作等与时间相关的功能要求。

4 应用算例分析

4.1 算例基本描述

图 2 是上海某变电站部分线路图, 该站有 110 kV、35 kV、10 kV 3 个电压等级, 并通过 3 个母线分断分为两个部分, 现取其中的部分线路进行分析。


```

Typedef struct Branch{
    TBranch CurBranch;
    TBusLink StartBus,EndBus;
}*BranchLink;
TBus CurBus=B1101;//设初始节点为 B1101
Void FindNewBranch(TBus CurBus){
    If CurBus!=nil{
        For (i=0;CurBus.ConnectBranchCount-1;i++){
            If(CurBus.ConnectBranch[i]!=nil)&&(CurBus.ConnectBranch[i].InPF){
                AddNewBranchToNewSystem(CurBus.ConnectBranch[i]);
                FindNewBranch(CurBus.ConnectBranch[i].EndBus);}
        }}}
Void Main(){
    //从初始节点 B1101 开始遍历
    FindNewBranch(CurBus);
}

```

同样设节点的数量为 M ，支路的数量为 N ，每一次进行比较为 1。根据其算法可以知道，使用 TDLRTree 索引结构进行一次重构拓扑结构的时间复杂度为 $T(O)=M+N$ 。由时间复杂度可以看出，当节点和支路的数量增加 1 时，所需要进行比较的工作量将最少增加 2 次，最多增加 $M+N$ 次。

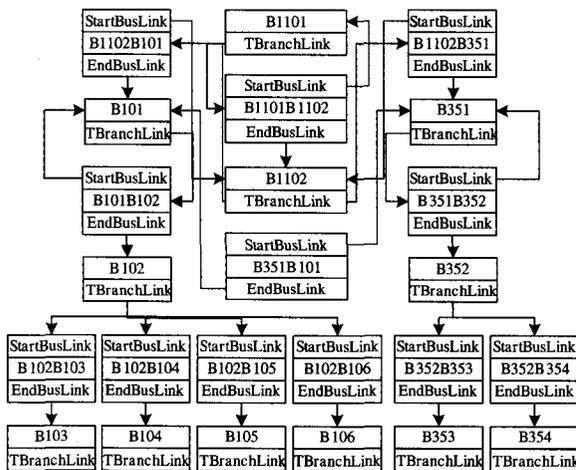


图3 第二级RTree中运动对象链表图

Fig.3 Objects link diagram in the second RTree

另外，由于支路对象使用双链表而节点对象采用单链表，所以从 B1101 节点遍历时，遍历不到断开的支路；但当断路器闭合要增加支路时，又可以通过支路对象的双链表结构方便的找到连接该支路

的节点，重新连接上节点对支路的指针，刷新了拓扑结构。

根据本算法编制的变电站实时仿真软件现已成功应用于中国电力投资集团公司高级培训中心和上海电力公司教育培训中心等单位，软件整体运行速度快，效果良好。

5 结论

(1) 新方法中当断路器产生动作时，可以通过静态对象断路器对运动对象支路的指针直接找到断路器所控制的支路。

(2) 新方法准确地完成了重构系统拓扑结构的任务，较传统方式相比提高了重构速度、节约了系统资源。

(3) 采用新方法在进行重放功能时，有效简化了执行操作的复杂度。

参考文献

- [1] 刘曲, 张东英, 刘燕华, 等. 变电站仿真培训系统的理论及其发展[J]. 现代电力, 2002, 19(5): 25-30. LIU Qu, ZHANG Dong-ying, LIU Yan-hua, et al. Theory and Development of Training Simulator for Substation[J]. Modern Electric Power, 2002, 19(5): 25-30.
- [2] 侯俊, 李蔚清, 林昌年. 变电站三维交互场景仿真关键技术研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 70-75. HOU Jun, LI Wei-qing, LIN Chang-nian. Research on Key Technologies of Three Dimension Interactive Scene Simulation for Substation[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 70-75.
- [3] 王邦志, 林昌年, 蒲天骄, 等. 变电站集中监控仿真培训系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 21-24. WANG Bang-zhi, LIN Chang-nian, PU Tian-jiao, et al. Design and Implementation of a Training Simulator for Substation Control Centre[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 21-24.
- [4] Vangilder S. New Techniques for Substation Training[A]. In: PES Panel session 1999 IEEE Winter Power Meeting[C]. 1999.
- [5] 张永翔, 段绍辉, 杨卫东, 等. 深圳供电局变电培训仿真系统[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 16-18. ZHANG Yong-xiang, DUAN Shao-hui, YANG Wei-dong, et al. Substation Operator Training Simulation System of Shenzhen Power Supply Bureau[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 16-18.
- [6] 龚庆武, 姜芳芳, 陈义飞. 基于虚拟现实技术的变电

- 站仿真培训系统[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 74-77.
- GONG Qing-wu, JIANG Fang-fang, CHEN Yi-fei. Virtual Reality Technique Based Substation Training Simulator[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 74-77.
- [7] 季刚, 陆达. 一种通用的变电站仿真培训系统构建平台[J]. 继电器, 2005, 33(13): 68-72, 76.
- JI Gang, LU Da. A General Substation Training and Simulating System Constructing Platform[J]. Relay, 2005, 33(13): 68-72, 76.
- [8] 姜芳芳, 来文青, 龚庆武, 等. 虚拟现实在变电站仿真培训系统中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 68-70.
- JIANG Fang-fang, LAI Wen-qing, GONG Qing-wu, et al. Application of Virtual Reality in Substation Simulation and Training System[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 68-70.
- [9] 陈天翼, 邱家驹, 邱淘西. 电力系统虚拟现实场景开发研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(5): 7-10.
- CHEN Tian-yi, QIU Jia-ju, QIU Tao-xi. PC-based VR Environment of a Power System Training System[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(5): 7-10.
- [10] 杨永生, 郝小欣. 分布交互式仿真技术在变电站仿真中的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(9): 49-53.
- YANG Yong-sheng, HAO Xiao-xin. Application of High Level Architecture/Run Time Infrastructure(HLA/RTI) to Substation Simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(9): 49-53.
- [11] 曾祥辉, 宋玮, 邓健, 等. 面向对象的电力图形系统的分析和设计[J]. 继电器, 2004, 32(5): 36-39.
- ZENG Xiang-hui, SONG Wei, DENG Jian, et al. Object-oriented Analysis and Design of Graphic System of Power System[J]. Relay, 2004, 32(5): 36-39.
- [12] 张炳达, 陈伟乐, 黄大鹏. 变电站控制与信号系统的仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 60-63.
- ZHANG Bing-da, Chan W L, HUANG Da-peng. Simulation of Control and Signal System for Substations[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 60-63.
- [13] Tzouramanis T, Vassilakopoulos M, Manolopoulos Y. Overlapping Linear Quadrees and Spatio-temporal Query Processing[J]. The Computer Journal, 2000, 43(4): 325-343.
- [14] Kollios G, Gunopulos D, Tsotras V, et al. Indexing Animated Objects Using Spatio-temporal Access Methods[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2001, 13(5): 758-777.
- [15] 卢超, 卢炎生. TDLRtree 时空数据库索引结构及实现算法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(5): 743-746.
- LU Chao, LU Yan-sheng. TDLRtree Index Structure and Implementation Algorithm for Spatio-Temporal Database[J]. Mini-Micro Systems, 2005, 26(5): 743-746.

收稿日期: 2008-01-14

作者简介:

解大(1969-), 男, 副教授, 主要从事电力系统仿真研究; E-mail: xieda@sju.edu.cn

余江燕(1969-), 女, 高级工程师, 主要从事实时仿真系统的设计和研究;

唐寅初(1981-), 男, 工程师, 主要从事电力系统软件工程研究。

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [8] 陈晓林, 刘俊勇, 宋永华, 等. 利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 75-81.
- CHEN Xiao-lin, LIU Jun-yong, SONG Yong-hua, et al. Use of CFDs and FTRS to Hedge Against Risks of Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 75-81.
- [9] Lise W, Kruseman G Long-term Price and Environmental Effects in a Liberalised Electricity Market[J]. Energy Economics, 2006, 06(5):230-248.
- [10] Aron R, Ungar L, Valluri A. A Model of Market Power and Efficiency in Private Electronic Exchanges[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 187(3): 922-942.

收稿日期: 2008-01-21; 修回日期: 2008-03-04

作者简介:

周婷(1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源经济学和水电电力市场方向研究; E-mail: zhouting02@gmail.com

王丽萍(1956-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水电能源经济、电力市场与水电站经济运行。