

基于邻接矩阵的图形化网络拓扑分析方法

周琰, 周步祥, 邢义

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 介绍了基于面向对象的网络拓扑模型, 在此基础上, 针对不同元件类型利用面向对象的方法定义了元件类。利用自动生成的邻接矩阵来进行分析搜索, 能够很好地得出节点间的拓扑关系, 并且能够根据网络中开关的变化实现动态修改, 完成了拓扑分析的两个任务: 等值节点划分和电气岛划分, 从而避免了利用常用邻接矩阵法拓扑分析时, 邻接矩阵的 $(n-1)$ 次自乘运算, 提高了分析的效率。实际应用表明, 这种基本邻接矩阵的分析方法具有一定的实用价值。

关键词: 拓扑分析; 邻接矩阵; 配电网; 面向对象(OO)

Graphical power network topology analysis based on adjacency matrix

ZHOU Yan, ZHOU Bu-xiang, XING Yi

(College of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper introduces the network topology model based on object oriented, and on this basis defines elements classes according to different types of elements. Analyzing the adjacency matrix which generated automatically can get the topology relations which can be modified dynamically based on the changes of switches among the nodes commendably and accomplish the task of topology analysis, i.e. the division of equivalent nodes and electrical islands. This method avoids $n-1$ times matrix multiplication with itself which is involved in the traditional adjacency matrix algorithm, and also improves the efficiency. Real application shows that this algorithm based on adjacency matrix is of certain practical value.

Key words: topology analysis; adjacency matrix; distribution network; object oriented(OO)

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)17-0049-04

0 引言

网络拓扑分析是 DMS 应用管理软件中的重要组成部分, 它是各种电力计算的基础。作为一个公用的基础模块, 其性能直接影响 DMS 中其他应用软件的运行, 其计算速度直接影响整个高级应用软件的速度。

网络拓扑的任务是处理开关状态的变化, 形成网络元件的连接关系, 它的实质就是将节点/开关描述的模型转化为母线/线路描述的数学模型。在已有的配电网拓扑模型研究的成果中, 已经提出过配电网设备模型和拓扑模型^[1], 并取得了较好的应用效果。随着配电网的飞速发展, 电网结构越来越复杂, 电网结构的改变、开关状态的改变都很频繁, 所以简单快捷的拓扑分析方法是非常必需的。对于网络拓扑的分析方法, 目前主要有两种: 邻接矩阵法和树搜索法。传统的邻接矩阵法, 比较烦琐, 需要进行 $(n-1)$ 次自乘运算, 当网络结构复杂, 节点较多时, 效率较低。树搜索法主要分为基于深度优

先和基于广度优先的两种方法。树搜索法速度较快, 但是对于变电站中复杂接线方式和环网情况的适应性较差。

本文采用的基于面向对象的方法建立设备模型, 利用邻接矩阵, 设计了一个简单且效率较高的网络拓扑分析算法, 能够较快地得出节点间的拓扑关系, 同时能够根据开关的实时变化动态修改。

1 网络设备的层次结构模型

采用面向对象技术, 主要围绕对象的建模, 对象模型的好坏直接影响到系统的可维护性、可扩充性。面向对象的建模方法一般是采用自上而下的方法, 首先从具体问题中分离出具体对象实体, 然后运用抽象、概括的方法提取出共性。对于各种电力设备, 我们首先抽象概括出它们的共性形成一个基类 CElement, 然后各种其他类型的电力设备, 均继承于 CElement。CElement 结构描述如下。

CElement (设备)

{

```

编码
图形属性
管理属性
.....
}

```

在基类 CElement 中，“编码”是指在程序中按照一定规则的统一编码；“图形属性”用于描述设备在网络结构图中的位置，记录了设备的端口坐标，颜色等等，用于保存和恢复设备图元。“管理属性”主要用于电网管理。

文献[2]提出了将各种元件分成了几大类，这样在程序中维护的类变得很多，相互之间的联系不紧密，对于本文来说，形成邻接矩阵很不方便，所以在本文中采用一个基类，其他电力设备类型全部继承这个基类。图 1 表示了模型间的层次关系。

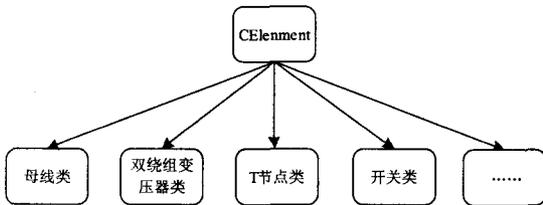


图 1 模型间层次关系

Fig.1 Hierarchical relation among models

在具体的设备模型中定义关联属性，因为不同类型的设备的端口数目是不同的，比如有 1 端口、2 端口、3 端口设备，而且对于母线这类设备，它的端口数目是不定的，这些是设备的非共性，所以在设备类中分别定义。对于在母线类，有两种处理方法，一是在母线类中定义一个链表^[3]，用来标识与之关联的设备，二是不需要定义端口的数目以及连接关系，这些相关信息都可以从与之相关联的电力元件中获得，避免了数据结构中表示连接关系的数组 Relat[]或链表。

对于确定端口数目的设备，直接定义，以开关模型为例子。

```

开关
{
  继承属性（从 CElement 来）
  关联属性
  其他属性
}

```

在关联属性中，由于已经确定了端口的数目，只需要维护两个特定类型的变量来记录与开关的连接情况，避免了不确定情况。

在图形数据库一体化平台上，针对配电网中各

类具体电力设备设计好各种图元，在做出网络连接图的时候，自动生成了电力网络中各电力设备之间的连接关系。在图 1 中，引入了一个 T 结点的类型，这样，在就可以在节点判定的时候，直接可以根据元件的类型将 T 结点作为一个新的节点来考虑。

2 邻接矩阵和拓扑关系的形成

邻接矩阵法应用于网络拓扑分析，一般包含如下的步骤：

- (1) 形成网络连接关系的邻接矩阵 A ；
- (2) 对形成的邻接矩阵进行 $n-1$ 次自乘运算，得到全连通矩阵 T ；

(3) 分析得到的全连通矩阵 T ，进行母线划分或者电气岛划分。这种根据邻接矩阵的逻辑自乘得到结果，来进行等值节点划分和确定电气岛组成的方法称为邻接矩阵法。

邻接矩阵法的第一步就是要形成网络元件的相互关联关系，根据第二部分可知，在接线图的绘制过程中，已经记录下各元件之间的连接关系，这样各元件之间的连接关系信息保存在元件的关联属性中，具体描述如图 2 所示。

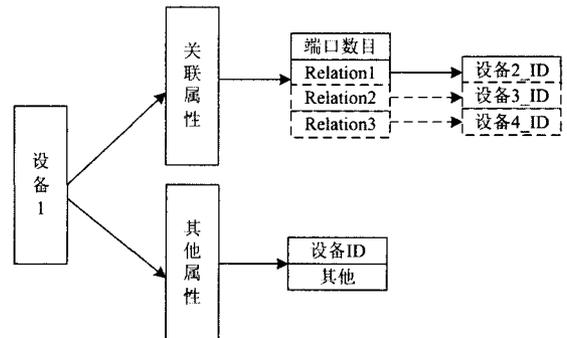


图 2 设备模型连接关系描述

Fig.2 Distribution of relations among device models

图 2 中的虚线表示不同的电力设备可能有不同的端口连接数目。通过关联属性中的具体内容能够形成网络设备之间的连接矩阵，记为 M 。

根据文献[1]中获得网络中节点的判定条件和算法，可以得到网络中符合条件的网络结点，条件如下：①所有母线节点；②连接了 3 个以上元件的节点；③只连接了一个线路元的节点（该节点是线路末端）；④通过判断其他开关的状态，还可能增加节点。

对所有节点进行分析，用以上的条件进行筛选，初步确定符合条件的节点，得到了节点的数目，即得到节点邻接矩阵 N 的维数，并记录下各个节点在 M 中的位置。

下一步就是通过对邻接矩阵 M 的搜索, 来形成邻接矩阵 N 。在矩阵 N 形成的过程中, 得到了任意连接的节点间的关联路径, 即所经过的电力设备, 通过对这些电力设备的类型和状态判断, 可以用来进行节点的等值; 通过对这些电力设备的属性的记录, 可以形成支路信息。这样在网络结构比较复杂, 设备元件繁多的情况下, 避免了传统邻接矩阵法必须的 $n-1$ 次自乘运算。

3 应用

3.1 电网模型的建立

图 3 给出了一个典型的网络结构图, 其中包括了母线, 断路器, 双绕组变压器, 分段开关, 发电机, 负荷。

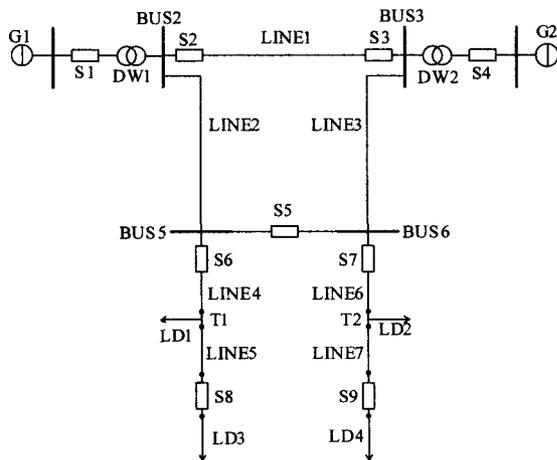


图 3 网络结构图

Fig.3 Network structure diagram

首先在图形化平台上做出如图 3 所示的网络结构图, 然后根据定义好的网络元件的数据结构, 得到了各个电力元件之间连接关系如表 1 和表 2 所示。

表 1 网络元件连接关系

Tab.1 Connection relations of network elements

ID	Rela1	Rela2	ID	Rela1	Rela2
G1	BUS1		DW2	BUS3	S4
G2	BUS4		LD1	T1	
S1	BUS1	DW1	LD2	T2	
S2	BUS2	LINE1	LD3	S8	
S3	LINE1	BUS3	LD4	S9	
S4	DW2	BUS4	LINE1	S2	S3
S5	BUS5	BUS6	LINE2	BUS2	BUS5
S6	BUS5	LINE4	LINE3	BUS3	BUS6
S7	BUS6	LINE6	LINE4	S6	T1
S8	LINE5	LD3	LINE5	T1	S8
S9	LINE7	LD4	LINE6	S7	T2
DW1	S1	BUS2	LINE7	T2	S9

表 2 T 节点连接关系表

Tab.2 Connection relations of T nodes

ID	Relation1	Relation2	Relation3
T1	LINE4	LD1	LINE5
T2	LINE6	LD2	LINE7

3.2 拓扑形成

根据表 1 和表 2 的描述, 可以得出关于网络设备之间关系的连接矩阵 M , 因为 M 中绝大多数的元素都是零元素, 所以为了减少存储的空间, 可以将 M 改写成邻接表的形式, 即将邻接矩阵的 n 行改为 n 个单链表, 把同一个顶点发出的边连接在同一个单链表中。邻接表是邻接矩阵的改进形式, 它的具体形式如图 4。

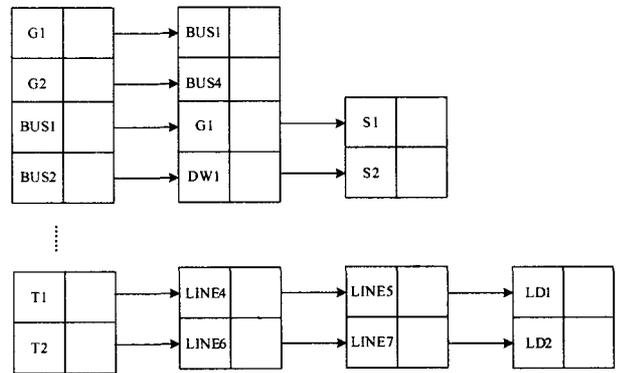


图 4 网络关系的邻接表形式

Fig.4 Adjacency table of network relations

这样在进行开关操作, 以及其他一些改变网络运行状态的时候, 只需要简单的记录相关的电力设备的相关端口的变化, 即改变邻接表的相应位置。

用邻接矩阵 M 或者其相应的邻接表进行拓扑分析, 首先要进行节点的选择和提取, 此时并没有考虑节点等值和合并。根据网络元件的类型, 图 2 中的节点有: 所有的母线 BUS1~BUS6; T 节点 T1, T2; 线路末端 LD3, LD4, G1, G2。它们构成了一个 12×12 的矩阵 N 。依次编号为 1~12。

在进行网络设备的搜索过程中, 利用邻接矩阵可得出任意两个节点之间的连接关系和它们之间路径即支路信息, 搜索的流程图如图 5 所示。

下面描述了实现上述流程的伪代码。

```

Void BeConnect(){
    for(m=0;m<node.count;m++)//遍历所有节点
    {
        for(j=0;j<length;j++)//遍历各节点连接关系
            if(两个元件是连接的){
                Do{
                    得到下一个设备
                }
            }
    }
}
    
```

```

    设置访问标志为 1
    加入到对应链表中
  }
  While(current.类型!=节点类型)
}
}
}
}

```

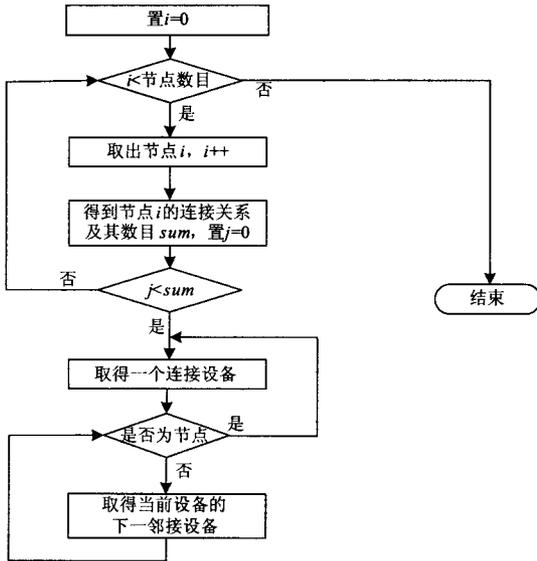


图5 节点关系搜索流程图

Fig.5 Flow chart of researching on nodes relations

程序执行后，在矩阵 N 中记录了各节点之间关联关系，对于每个 $N_{ij}=1$ 维护一个链表 $LIST[i,j]$ ，用来记录搜索经过的网络元件，元件在被遍历的时候加入到链表中。在访问过的电力设备的属性中设置访问属性为已访问，在后面的遍历中直接跳过，这样提高了遍历的速度。下面是对于图 2 搜索后形成了节点间关系矩阵 N 。

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在搜索完毕后，就可以进行节点的等值。在图中，

例如 BUS5 和 BUS6 分别对应节点 5 和节点 6，它们之间是相互连接的，并且它们之间只有一个处于闭合状态的断路器，这样便实现了节点之间的合并。

网络拓扑的另一个问题是电气岛的识别。对于基于邻接矩阵的网络拓扑，电气岛的识别可以通过对节点邻接矩阵利用类似于深度优先算法实现，包括以下的步骤：

(1) 首先在节点关系矩阵 N 中，从任意一节点出发，遍历节点相关行中的元素，得到与它相连接的节点；

(2) 再从这些节点一一出发，重复 (1) 的步骤，利用矩阵 N 得出和这些节点相连接的节点，以此类推直到没有遍历到新的节点或者没有节点遍历，这样一个电气岛就形成了。

(3) 在剩下的节点中，再任意取一节点，重复上面的步骤，得到其他的电气岛。

具体流程如图 6 所示。

从上面可以看出，这种基于邻接矩阵的电气岛的识别，可以看成是一个数学图论问题，即首先由图得到节点关系矩阵 N ，通过矩阵 N 中节点之间的关系，得到属于同一电气岛的节点，这样，电气岛的划分就完成了。图 6 显示了一个电气岛形成的详细过程。

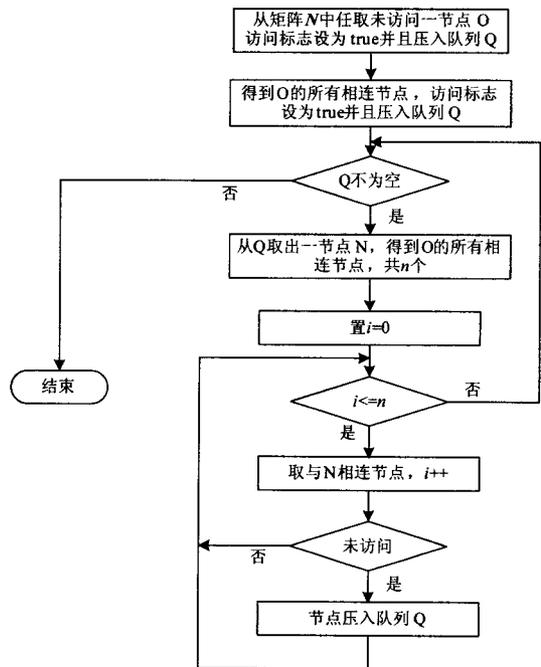


图6 电气岛形成流程图

Fig.6 Flow chart of generating electrical island

(下转第 56 页 continued on page 56)

机、减出力等措施, B 系统执行切负荷措施, 钢铁企业供电系统能够保持频率稳定, 系统频率(标么值)曲线如图 2 所示。

5 结论

经过对钢铁企业供电系统的大量仿真实验, 区域安全稳定控制系统能够综合供电系统的运行信息、实时检测功率平衡情况, 能够在各种正常及检修运行方式下快速、准确地采取有效控制措施, 维持系统的频率稳定, 提高了钢铁企业供电系统的安全稳定性。

参考文献

[1] 周佃民, 李凯, 李关定, 等. 钢铁企业负荷管理系统设计与实现[J]. 电力需求侧管理, 2008, 10(1):28-30. ZHOU Dian-min, LI Kai, LI Guan-ding, et al. Design and Realization of Electric Load Management System in Iron & Steel enterprises[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(1):28-30.

[2] 周全仁, 张海. 现代电网自动控制系统及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. ZHOU Quan-ren, ZHANG Hai. Modern Power System Automatic Control System and Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[3] 陈兴华, 吴烈鑫, 吴国丙, 等. 安全稳定控制系统切负荷量分配算法[J]. 继电器, 2007, 35(11): 26-29. CHEN Xing-hua, WU Lie-xin, WU Guo-bing, et al. Distributing Algorithm of Load-shedding for Security and Stability Control System[J]. Relay, 2007, 35(11): 26-29.

[4] 李宝兴, 全宇文, 任敏哲. 电力系统安全稳定控制的分析与展望[J]. 西北电力技术, 2005, (5): 13-16. LI Bao-xing, QUAN Yu-wen, REN Min-zhe. Analysis & Prospect of Power System Safe and Reliable Control[J]. Northwest China Electric Power, 2005, (5): 13-16.

[5] 范文涛, 薛禹胜. 电力系统紧急控制[J]. 继电器, 1998, 26(3): 1-5. FAN Wen-tao, XUE Yu-sheng. Power System Emergency Control[J]. Relay, 1998, 26(3): 1-5.

收稿日期: 2008-10-06; 修回日期: 2008-11-07

作者简介:

马光磊(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: maguanglei0208@163.com

肖仕武(1974-), 男, 硕士生导师, 从事继电保护的教学工作;

雷瑞丰(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(上接第 52 页 continued from page 52)

4 结论

根据面向对象的方法对电力网络中的元件进行建模, 抽象概括出元件的基类, 通过继承的方法来实现各种电力元件。这样, 模型便具有了良好的扩展性和通用性, 在此基础上, 方便地形成网络元件的邻接矩阵(邻接表), 对邻接矩阵(邻接表)进行一次搜索形成了节点之间的初始连接关系, 并且记录了连接路径, 通过路径上的网络元件的类型和状态来对节点进行等值, 避免了繁琐的矩阵自乘运算, 具有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] 周步祥, 刘欣宇. 基于网络图形的配电网拓扑分析方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8):67-70. ZHOU Bu-xiang, LIU Xin-yu. Network Graph-based Power Distribution Network Topology Analysis and Its Application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8):67-70.

[2] 吴文传, 张伯明. 基于图形数据库的网络拓扑及其应

用[J]. 电网技术, 2002, 26(2):14-18. WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A Graphic Database Based Network Topology and Its Application[J]. Power System Technology, 2002, 26(2):14-18.

[3] 陈实君, 周步祥, 胡美蓉. 基于面向对象与链式存储结构的配电网拓扑分析方法[J]. 继电器, 2006, 34(21):29-32. CHEN Shi-jun, ZHOU Bu-xiang, HU Mei-rong. Distribution Network Topology Analysis And Application Based on Object Oriented and Linked Storage Structure[J]. Relay, 2006, 34(21):29-32.

收稿日期: 2008-09-23; 修回日期: 2009-04-15

作者简介:

周 琰(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息管理; E-mail zhouyan_scu@163.com

周步祥(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统自动化、计算机应用等方面的教学与科研工作;

邢 义(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息管理。