

基于 SVG 的电网故障处理自动化系统

郑贵省, 赵 锐, 于 波, 张国庆, 白丽娜, 郭 强

(天津军事交通学院基础部, 天津 300161)

摘 要: 将 SVG 运用于 10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统的网络建模与表达, 通过研究电网 SVG 图形描述和设备图元建模, 提出基于坐标和节点融合的设备连接关系生成方法, 实现基于设备模型的拓扑自动生成、完整性检查和故障信息的容错, 设计并实现系统 SVG 图形 Web 发布方法。现场运行取得了良好的效果。

关键词: SVG 图模; 电网故障; 定位; 隔离; 拓扑分析

SVG-based Fault Auto-Processing System for Power Networks

ZHENG Gui-xing, ZHAO Rui, YU Bo, ZHANG Guo-qing, BAI Li-na, GUO Qiang

(General Courses Department, Tianjin Academy of Military Transportation, Tianjin 300161)

【Abstract】 SVG is applied to create and express networks in 10 kV power network location, insulation and resume system. This paper describes graph and models device metafile for power network by SVG. The method of creating connection based on coordinate and node fusing is put forward. The fault tolerance of filed device information is considered. Creating topology automatically and examining integrality based on device model are implemented. The Web issuing means of SVG graph is discussed, and the system is realized. It is very effective when it is applied.

【Key words】 SVG graph model; power network fault; location; insulation; topology analysis

1 概述

SVG 是 W3C 组织发布的一种开放标准的文本式矢量图形描述语言, 基于 XML 的特性使其适合作为异构系统间图形交换的载体^[1]。以其良好的可扩充性、更利于检索、减少网络流量、互操作性和重用性等特点, 国际电工委员会已将 SVG 确定为图形交换的标准格式。图模一体化技术在电网自动化领域得到了很好的应用, 其核心思想是利用图形生成设备模型和拓扑结构, 使图形和数据库相互对应^[2-3]。图形信息以 SVG 方式存储和传输时, 用户通过解析、过滤 SVG 文档获得自己感兴趣的图形信息, 并能够根据应用需要形成新的 SVG 图形, 如由电力主接线图形成实时监控、潮流分析、培训仿真等不同应用所需要的图形。在 10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统中, 需要完成对电网结构的图形化描述, 生成拓扑矩阵, 根据拓扑矩阵, 实现电网的故障定位、隔离、恢复与校核、电网着色等功能。本文采用基于 SVG 的图模一体化技术, 完成系统的可视化建模和表达。

2 10 kV 电网故障处理自动化系统设计

10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统的总体框架如图 1 所示, 图模软件结构如图 2 所示。

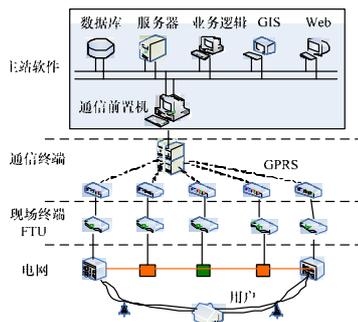


图 1 系统总体架构

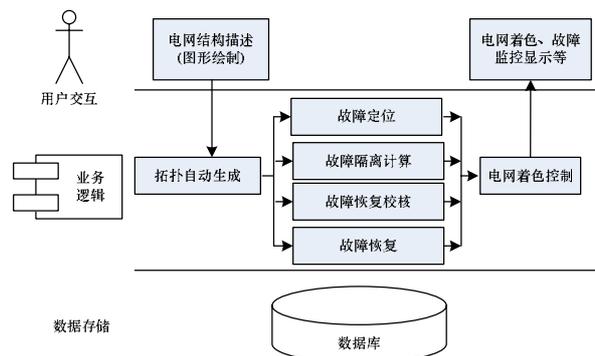


图 2 图模软件结构

系统总体架构电网图形的表达和建模是 10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统软件的支持部分, 对整个软件的良好的人机交互和实时准确地完成电网的状态监控具有关键的作用。

2.1 设备图元建模

电力设备图元模型包括图形属性和应用属性。图形属性指设备在图形系统中的几何表示, 应用属性为存储在数据库中供各种应用使用的设备参数等信息。设备图元建模即实现设备图形属性和应用属性的关联统一。图形是设备信息的直观显示, 大多数设备在图形系统中都用一致的图标表示。SVG 标准通过预定义形状的若干组合, 在模形定义中实现图形与设备对象的对应。设备对象中存在一类特殊的元件, 其不同状态下具有不同的图形表示, 如刀闸在闭合和断开时对应不同的图元。这时需要针对各种状态定义多个图元, 由图元

作者简介: 郑贵省(1975 -), 男, 副教授、博士, 主研方向: 电网故障自动化处理; 赵 锐, 教授、硕士; 于 波、张国庆、白丽娜、郭 强, 讲师、硕士

收稿日期: 2009-09-14 E-mail: zgxcn@163.com

模型 ID 加以区分。

2.2 图形编辑及存储

图形编辑是图形系统的基本功能，本系统建立了设备图元模型，各设备图元用相同名称的类封装，所有图元类均包含绘图方法，该方法在画布上绘制图元的同时，将图元位置等信息添加到 DOM 对象中，保持图形显示和 SVG 文档的同步。图元形状固定，但其大小、填充颜色、旋转角度等图形属性可以通过鼠标操作改变。在设备图元绘制完成后设置该图元所代表设备的属性信息。图形编辑平台还支持图元模型的自定义功能，通过基本形状的组合构建新的图元模型，并设置该类图元应具有的应用属性，在数据库中自动创建相应的二维表。

图元绘制完成后，输入设备的应用属性信息存储为数据库二维表中的记录。图元的空间信息以 DOM 树的形式存在于内存中，遍历 DOM 树节点，将所有图元信息格式化输出为 SVG 文件保存。

2.3 自动拓扑分析

拓扑结构是潮流分析、状态估计等应用的基础，它直接关系到系统的可扩展性和图形发布的实时性。拓扑分析分为 2 个过程，连接关系(原始拓扑)分析和网络拓扑分析。本系统以 SVG 图形模型为基础，采用优化算法实现拓扑分析，其结果保存为 XML 文档，用于信息发布或潮流计算等分析模块。

2.3.1 节点和设备自动编号

在 10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统的网络拓扑中，拓扑抽象的 2 类主要设备为开关和源端，将开关和源端分别抽象为双端口图元和单端口图元，同时开关设备抽象为支路。拓扑图节点和支路自动编号的基本步骤是：(1)源端和开关设备节点和支路单独编号。将开关设备依次编号即为支路编号，最大支路编号即为开关设备数目 b ；将开关设备的节点独立依次编号，最大节点编号为 $n = 2b$ ；将源端节点编号，最大编号为 $n = 2b + k$ ， k 为源端数目。(2)节点融合。根据 SVG 图形中节点的坐标进行节点连接关系识别，有连接的节点编号相同。

对于 10 kV 手拉手网络开关设备接线，把每一源端和开关元件的端口作为拓扑图的节点，开关作为拓扑图的支路(当开关闭合时该支路连通，开关断开时该支路断开)，自动编号如图 3 所示。

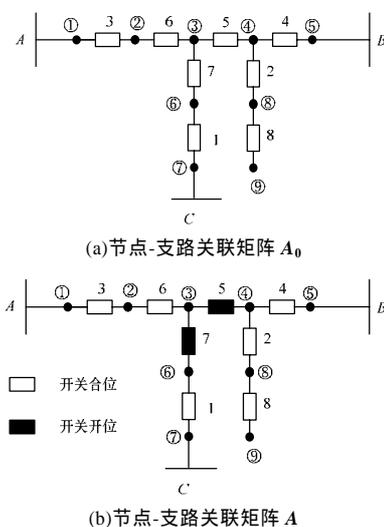


图 3 节点和支路自动编号示意图

2.3.2 连接关系分析

连接关系分析即根据传导设备之间的连接关系，形成连接点模型。在实际渲染预定义的设备图元时，定义了 viewBox 属性即视口属性，它指定了渲染图元的区域大小，结合 translate 属性值可以精确定位该设备图元在画布中的显示区域，判断连接线端点是否在设备图元的显示区域内，确定连接线是否与该设备相连接。连接线描述了设备间的关联关系，将其抽象表示为连接点，连接点信息为关联设备 ID，遍历连接线图层的所有连接线，合并连接线相交的连接点信息，得到连接点模型。

图 3(a)给出节点-支路关联矩阵 A_0 ，称为原始节点-支路关联矩阵。断开其中的某些开关后，如图 3(b)所示，定义开关状态向量 $S = [s_i]$ ， s_i 与开关 i 的状态相对应。当开关闭合时， $s_i = 1$ ，开关断开时， $s_i = 0$ 。这样， $S = [1 1 1 0 1 0 1]$ 。 A 是 A_0 的每一行与 S 的各个对应元素进行“与”运算后得到的。此时对应的节点-支路关联矩阵 A 称为当前节点-支路关联矩阵或简称为节点-支路关联矩阵。

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

2.3.3 网络拓扑分析

网络拓扑分析可分为厂站接线分析和系统网络分析。厂站接线分析采用节点融合法，其主要思想是通过开关寻找与其关联的连接点，以开关状态判定这些连接点生成一个或多个拓扑点，形成拓扑点模型。拓扑点信息包含与该拓扑点关联的所有设备信息，遍历母线图层的所有母线，可以容易转换为母线模型，满足不同应用的需要。

系统网络分析和厂站接线分析在意义上是一致的，只是厂站接线分析建立在对开关的分析基础上，而系统网络分析建立在对支路的分析基础上，即将联络线、变压器、发电机及负荷等支路设备视作闭合的开关，其分析原理与厂站接线分析一致。

对电力网络主接线的辨识实际是找出网络中节点间的连通关系^[4-5]。显然，这种连通关系是可以传递的，即如果 i 节点与 j 支路相联，同时，支路 j 又与节点 k 相联，则节点 i 与节点 k 是相联的。

如果节点 i 与节点 k 相联，而节点 k 又与节点 l 相联，则节点 i 与节点 l 也是相联的。

定义节点-节点连通矩阵(它与网络图论中的节点-节点关联矩阵有区别) $C = [c_{ij}]$ ，其中，当节点 i 与节点 j 连通时，

$c_{ij} = 1$, 不连通时, $c_{ij} = 0$, 显然 C 是对称矩阵。以上连通关系的传递性质可表示如下:

(1) 若 $a_{ij} = 1, b_{jk} = 1$, 则 $c_{ik} = a_{ij} \cap b_{jk} = 1$;

(2) 若 $c_{ik} = 1, c_{kl} = 1$, 则 $c_{il} = c_{ik} \cap c_{kl} = 1$ 。

对于具有 m 个节点、 n 条支路的网络, 定义以下矩阵乘法运算:

$$C = A \cdot B \quad (1)$$

$$c_{ij} = \bigcup_{k=1}^n (a_{ik} \cap b_{kj}) \quad (2)$$

其中, \cap 表示“与”运算; \cup 表示“或”运算。

那么, 当 A 为节点-支路关联矩阵、 B 为支路-节点关联矩阵时, c_{ij} 将表示节点 i 与节点 j 通过任一支路的关联情况。当然, 只要节点 i 与节点 j 有一条支路相联, 则 $c_{ij} = 1$ 。 $C = [c_{ij}]$ 表示节点与节点之间的连通性, 称为节点-节点连通矩阵。这时的节点-节点连通矩阵仅仅表示了节点之间的直接连通性质, 把它称为 1 级节点-节点连通矩阵, 并记为 $C^{(1)}$ 。由于连通性的传递性质, 可以用 1 级节点-节点连通矩阵 $C^{(1)}$ 进行上面定义的矩阵乘法运算, 得到 2 级节点-节点连通矩阵:

$$C^{(2)} = C^{(1)} \cdot C^{(1)T} \quad (3)$$

$C^{(2)}$ 在 $C^{(1)}$ 的基础上, 运用连通关系的传递性, 将节点之间的部分间接连通关系也表示出来, 用 $C^{(2)}$ 再自乘 $C^{(2)}$, 得到 $C^{(3)}$, ..., 直到 $C^{(n)} = C^{(n-1)} \cdot C^{(n-1)T}$ 。这时, 通过传递, 所有连通的节点之间的关联值都是 1, 而不连通的节点间关联值为 0。 C 不再变化时, 网络中的所有连通关系都已表示出来。运用连通关系的传递性, 所有连通的节点之间的关联值都是 1, 而不连通的节点间关联值为 0, 如对于图 2(b):

$$C^{(3)} = C^{(2)} \cdot C^{(2)T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^{(4)} = C^{(3)} \cdot C^{(3)T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

发现 $C^{(3)}$ 不再变化, 这时, 已把网络中的所有连通关系都表示出来, 由 $C^{(3)}$ 可见, 节点连接成以下 3 组: 节点 1, 2, 3 为一组; 节点 4, 5, 8, 9 为一组; 节点 6, 7 为一组, 即原图分裂为 3 个子图。

2.3.4 模型完整性检查

网络拓扑是进行电力系统分析和计算的基础, 拓扑结构的准确性非常重要。一方面, 在建立拓扑时, 不允许有悬空端子即孤立的导电设备存在(备用除外); 另一方面, 当电网状态发生变化时, 可能使母线段所对应的计算节点数发生变化, 也可能引起开环、闭环等接线方式变化。拓扑结构需要能够正确反映这些变化。因此, 经过拓扑分析, 对模型的完整性进行检查非常重要。

在 10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统中, 需要根据输入的网络图形, 生成故障定位矩阵, 进行故障恢复的校验操作和设备的动态着色。应用网络拓扑关系, 便可很容易地形成活岛内的支路和母线的连接关系, 对模型进行完整性检查; 根据开关的开合状态和设备的连接关系确定设备的带电状态进行动态拓扑着色, 实际上就是判断各电气岛是活岛(电气岛上存在发电机或等值电源等设备)还是死岛。属于活岛的设备处于带电状态, 否则处于失电状态。利用该拓扑法可方便地对 10 kV 电网的故障恢复操作进行校验。

2.4 数据容错性

在对图 3(b) 电网拓扑模型自动分析的基础上, 根据电源端, 自动完成电网络的区域划分, 并重新编号, 见图 4。假设网络连接的正方向是正常运行时网络的功率方向, 若线路 A 上沿正方向从监控节点 i 到监控节点 j 之间存在一条支路, 则置电源端 A 的网络描述矩阵 D_A 中的元素 $D_{ij} = 1$; 其他情况下, D_A 中相应的元素均置 0, 即:

$$D_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 存在支路且线正方向由 } i \text{ 指向 } j \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

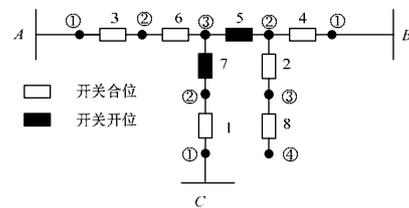


图 4 根据电源端分裂出的 3 个子图

据此, 图 3(b) 根据电源端分裂为 3 个子图, 见图 4。可得电源端 A, B, C 的故障定位描述矩阵 D_A, D_B, D_C

$$D_A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D_C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同时将大大减少故障定位中的计算量。容错计算过程以网络描述矩阵为 D_B 的子图为例进行描述, 如收到节点 4 发来的故障信息, 找到 D_B 中第 4 列最后一个为 1 的值, 即 $a(2, 3) = 1$, 则会上溯, 因为所在行号为第 3 行, 所以应该收到节点 3 的故障信息, 再上溯应该收到节点 2 发来的信息, 若没收到节点 1 或节点 2 的故障信息, 自动进行数据容错, 参与运算。

2.5 图形 Web 发布

本系统基于 B/S 体系结构实现图形信息发布功能。当客户端浏览器发出对某一应用图形的请求时, JSP 响应请求, 向图形数据服务程序(Serverlet)提出服务要求, 获取数据信息, 动态生成 SVG 文件返回客户端。数据层包含 2 类数据: SVG 图形文件(包含所有图层信息)和综合数据(满足应用所需的数据或 XML 增量文件)。图形数据服务程序通过 JDBC 从数据库抽取数据或解析相应 XML 增量文件获得数据, 同时创建 DOM 文档, 将不需要显示图层的 display 属性设置为 none, 并把 DOM 文档内容填入相应的应用图层中, 由图形数据服务程序动态生成待发布的 SVG 文件。

3 系统实现

软件用 C# 开发, 图模平台基于 SVG, 数据库使用 Oracle。10 kV 电网故障定位、隔离与恢复系统的电网故障监控界面见图 5, 基于 SVG 的电网网络编辑界面如图 6 所示。

(下转第 244 页)