Abstract

With the introduction of the competition into power transactions and the increase of the interconnection between regional power systems, the power system operation and control have been more complicated than never before. The visualization technique facilitates the power technicians easily comprehending the operation data from EMS/DMS by virtue of graphs, images and pictures. However, the traditional bitmap format in these advanced applications could not be shared and reused even within the same control area. With the development of network technology, a new technique called Scalable Vector Graphics (SVG) was invented for the purpose of providing a new way to organize the graphic information so as to be easily shared and modified through the webs. The purpose of this paper is to try to apply the SVG technique to solving the existing unshareable and unusable problems of the visualization resources in power systems.

Firstly, a new SVG-based power grid data description model is proposed so that the graphs in power system could be described by the plain-text based SVG format. Secondly, three visualization schemes related to geographic single-line diagram, including GIS-based diagram, voltage contour and the visualization of load flow interface, are designed on the CIM/XML/SVG platform. Finally, other visualization schemes related to simple grid connection diagram, including dynamic update of operation data and electrical component display, are designed on the CIM/XML/SVG platform as well.

All the schemes above are successfully implemented on the Hangzhou Power Company's CIM/XML/SVG platform and the operation result shows that the power grid data description model proposed and the developed visualization schemes are basically effective and feasible.

Keywords: Scalable Vector Graphics (SVG); Common Information Model (CIM); Geographic Information Systems (GIS); visualization technology; voltage contour;

第一章 绪论

可视化技术，又称为科学计算可视化[16]，是20世纪80年代后期随着计算机技术发展而出现的一门技术。其主要做法就是把各种繁杂的数据转换成直观的图形和图像，从而有利于人们正确理解数据的含义[1]。它的主要目的是更加有效地处理和分析越来越多的科学数据和工程数据，以提供一个探索和研究物理现象的先进工具，从而提高科学研究和工程设计的效率。电力系统可视化是指利用可视化技术将用以表示电力系统运行状态的各类数据以图形或图像方式予以显示，以使系统运行人员更方便、更直观地了解当前系统的运行状态，以便其采取的运行控制措施更有效、更有针对性[13]。

1.1 电力系统可视化应用现状

随着互联电力系统的发展，现代电力系统的规模日趋庞大，地理跨度越来越广，电力系统的运行操作人员将不得不时刻面对和处理来自系统中的各种海量数据。如何正确而精练地抽取其中的有用信息，以便系统运行人员对各种复杂状况做出及时的反应，是电力工程师一直关心的课题。随着计算机技术的发展并在电力系统推广应用后，研究人员开始考虑用能容纳大信息量的图形图像资源来展示电力系统的相关数据，辅助系统运行人员及时掌握系统的运行状况并做出正确的决策。

目前，国内外学者对可视化技术在电力系统中的应用做了大量的研究和应用推广工作，在电网数据显示、运行安全状态显示和系统安全、保护状态显示等方面开展了不少工作。随着计算机互联网技术的发展和高性能计算机的普及，电力系统可视化技术正朝着图形图像资源通用性、移植性强、传递方便、图形工作站配置简单化方向发展。

本章按可视化显示内容分别就电网数据可视化、安全运行状态显示、动态安全域的可视化分析、继电保护评估测试显示等电力系统可视化技术做简单的介绍。

[1] 本文所指的可视化与传统意义上的图形图像显示区别在于其背后包含的数据上。

1.1.1 电网数据可视化

1)电网结构

传统的电网结构单线图具有结构清晰、规整的优点，可以将系统节点数据和线路数据清楚的标注到相应的位置上，缺点是它不与实际系统对应，直观性较差。随着电力系统的不断扩大，这种在单线图上标注数据的方式越来越不能满足要求。

基于地理图的点线图直接在地理图上标注节点和线路，其优点是符合实际系统，十分直观，缺点是在某些节点和线路在地理上聚集在一起时，数据的显示过于密集。解法方法是可以选择性的显示满足某一条件的数据，以避免数据显示过于密集甚至重叠。

2)线路数据

电网中线路数据主要指与输电线路相关的潮流断面数据、线路负载率等。潮流断面数据可以直接显示在输电线路图上并用箭头标识方向，使调度人员掌握整个系统的潮流信息。

图 1.1 基于地理信息的潮流分布图

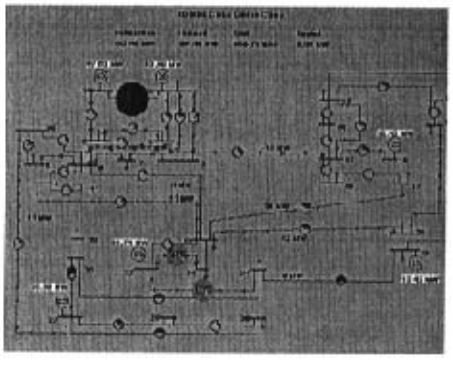


图 1.2 基于单线图的潮流分布图

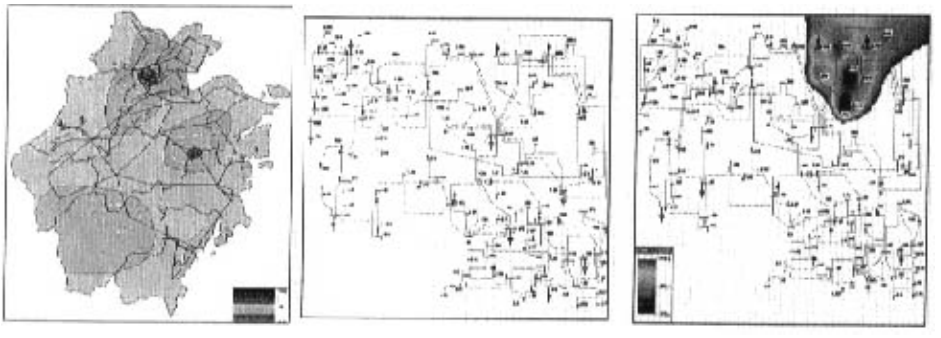
图 1.1[16] 所示是一个基于地理信息的潮流分布图，其中箭头的大小和方向表示潮流的大小和方向。使用地理接线图的优点在于能够使调度员清楚了解各个地区的负荷分配状态，缺点是负荷密集的区域图形过于重叠复杂，出现无法看清的状况。图 1.2 所示是基于单线图的潮流分布图[11]。单线图比较符合调度员的使用习惯，缺点是没有准确地标注各个节点的实际地理位置。基于地理接线图和基于传统单线图的潮流可视化各有优缺点，可以根据不同的需要进行选择。

线路负载率的信息可以放在线路上加以显示。饼图是反映百分率的有效手段，图 1.2 用饼图标识出部分线路的负载率。对于规模较大的电力系统，显示负载率的饼图不能太多太大（否则可能有重叠），可以采用部分显示的方法，即只显示线路上超过一定额度的负载率信息。

3）节点数据

电力系统中的节点数据是离散的，一般采用在图中相应节点位置处标出节点的电压、功角等数值文本信息的方法显示节点数据。这种方式虽然十分准确，但是很难反映出系统的整体情况和电压越限情况。有研究者提出了用柱状图[17]来表示节点电压，每个节点电压用两个柱表示，一个表示实际电压值，一个表示额定电压值。这种方式虽然反映了节点电压的越限情况，但是不能反映电压的地理分布情况。一种改进的方案是利用 3D 显示在地理接线图中标出各个节点的电压柱。采用节点电压等值线的表示方法可以很好的解决电压分布和电压越限情况的显示，文献[5][23]中分别提出了两种电压等值线生成的算法。

同线路数据类似，节点数据也可以基于地理信息或基于单线图显示。图 1.3(a)(b)分别为基于地理图的节点电压分布图（1.3(a)，Matlab 仿真）和基于单线图的传统母线电压分布图（1.3(b)，母线附近标注相应电压值）。另外，还可以结合单线图和等高线技术显示电压分布状况，图 1.3(c)为基于单线图的电压等高线，比较图 1.3(b)和图 1.3(c)可以看出，等高线的方式对于显示节点电压分布情况更加直观明确。



(a) 基于地理图的节点电压等值线 (b)单线图节点附近标注电压数值 (c)基于单线图的节点电压等值线

图 1.3 节点数据可视化显示

1.1.2 安全运行状态显示[20]

系统中各个终端上传的系统状态数据量非常庞大，绝大多数是正常状态数据，不需要调度员干涉。只有小部分非正常状态数据需要调度员做出反应。用3D显示技术对采集的状态数据做可视化分析，可以帮助调度员迅速了解系统的安全状态以及系统的薄弱点。

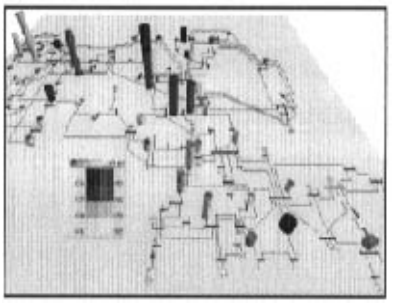
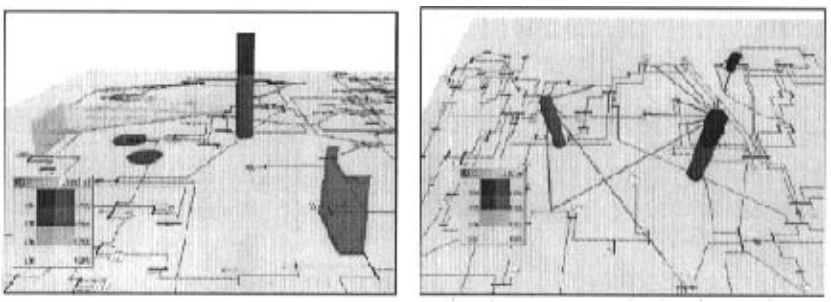


图 1.4 系统安全状态显示

图 1.4 所示为一个示例系统的安全状态显示。图中深色圆柱表示线路过载情况，浅色圆柱表示电压过低情况，如果某处两种情况都存在，表示两种情况的圆柱叠加表示。颜色的深浅用来表示电压过低、线路过载的严重程度，颜色越深越严重。通过上图，调度员对图示区域内的系统安全状态一目了然，以便采取相应的措施来处理系统出现的非正常状态。

图 1.5 所示为上述示例系统进一步的系统薄弱点分析，其中图 1.5(a)是对系统中一个薄弱点的具体分析，深色墙表示和该点相关的输电线路，高度和颜色表示负荷过载程度，浅色圆表示相关母线，半径和颜色表示电压下降程度。图 1.5(b)表明了电压下降、线路过载点相关的线路、母线。

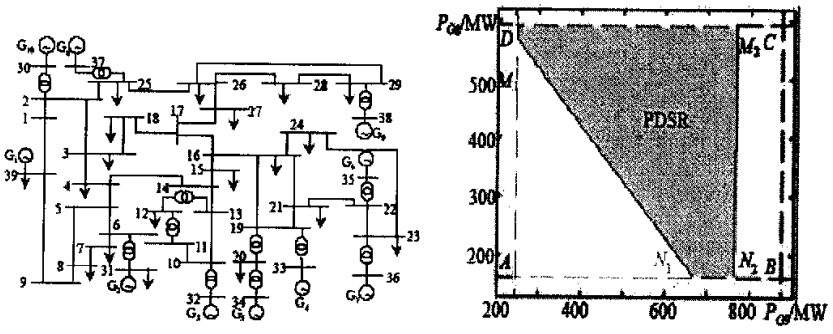


(a)系统薄弱显示 (b)系统薄弱点以及相关对象显示

图 1.5 系统薄弱点显示

1.1.3 动态安全域可视化

电力系统的动态安全域表明对于既定事故前、后的电网结构，系统在经历了既定故障后能否保证暂态稳定[8]。动态安全域可以离线计算，在线使用时针对某一给定事故选择相应的动态安全域，并依据此时的节点注入功率是否位于安全域之内来判别系统运行点是否安全。动态安全域可视化通过一些简单的变换将一维稳定边界映射到二维或三维空间表示。图 1.6 所示为一个动态安全域可视化示例，其中 1.6(a)是 10 机 39 节点系统单线图，考虑母线 26 侧三相接地事故，通过相应算法可以计算出稳定边界，图 1.6(b)为稳定边界在 2 维空间的断面图。



(a)系统接线图 (b) 稳定边界

图 1.6 动态安全域可视化示例

1.1.4 继电保护评估测试显示[20]

继电保护对于系统的安全性和可靠性至关重要，继电保护评估和测试的可视化可以提供直观的系统事故仿真数据曲线，帮助相关人员进行继电保护设备的整定。

1) 距离保护

继电保护的评估测试可视化可以提供保护接线图的显示，事故点及事故类型的选择，来仿真计算各种类型事故。图 1.7 为一种距离保护装置的接线图，图中包括发电机、输电线路、保护装置、变压器、负荷。

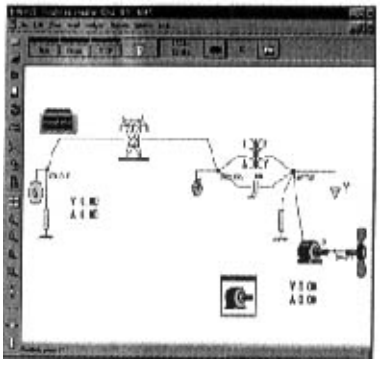
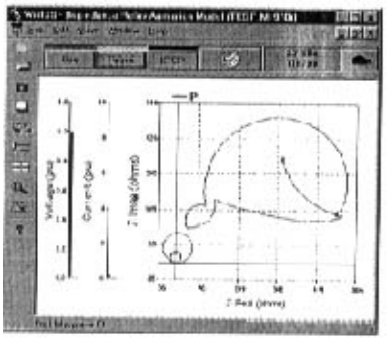
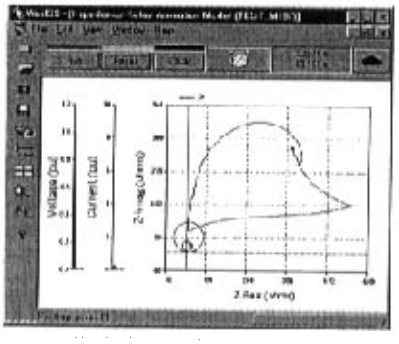


图 1.7 距离保护接线图

测试时确定事故点，进行仿真计算后所获得的数据经过可视化模块的分析，产生直观的曲线显示（图 1.8(a)、(b)）相关人员通过故障曲线图，立即可以判断发生故障时保护装置能否动作。



(a) 115kV 母线单相接地故障仿真曲线



(b) 13.8kV 母线三相接地故障仿真曲线

图 1.8 故障仿真曲线

2) 差动保护

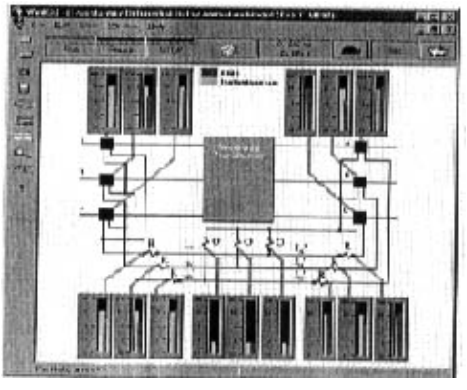


图 1.9 115kV 母线单相接地故障仿真图

图 1.9 为差动保护测试事故仿真数据的可视化显示。图中用两个相邻的矩形柱表示保护动作的整定值和系统实际值。在实际运行中这些矩形柱随时间动态变化，相关人员通过此图可以立即判断出事故发生后保护装置是否动作。

1.1.5 设备管理可视化

设备管理可视化主要用于显示设备管理、环境管理、防范防灾管理、资产管理各个模块的规划配置报告的显示，设备状态监视图形显示等。

1) 设备检修管理

设备检修管理可视化帮助检修人员了解特定时间段内需要检修的设备及其相关联的线路等信息，极大的方便了相关人员安排检修计划。

2) 设备故障管理

当系统中有设备发生故障时，设备管理可视化系统应该能够迅速的在地理接线图中用较为明显的颜色显示出故障设备所在厂站以及相关联的线路和厂站，便于相关人员及时处理故障设备。

1.2 本文的主要工作和意义

电力信息技术随着计算机技术的飞速发展，已经从原有的各个孤立系统逐步开始往集成化的方向发展，各个系统间需要共享资源来提高工作的效率和决策分析的准确性。许多电力企业逐步采用 CIM（Common Information Model）[1]标准、组件技术和企业门户技术来不断的整合自己的系统，但是他们不可避免的遇上了一个问题：如何交换图形数据？众多电力系统图形信息，最基本的应当是电网数据和电力系统的运行状态的可视化图形信息，它是系统运行人员对可视化功能的首要需求。电网数据和电力系统运行状态可视化以及可视化图形信息 web 发布的研究越来越重要。现有的电力系统运行状态可视化技术中，一种典型的实现方式是：首先通过电力系统仿真软件计算得出计算结果，然后利用集成现有的可视化图形软件（例如 PowerWorld、JViewer 等）进行数据分析和图形显示。在进行网络发布中存在的主要问题是，可视化系统生成的图形数据发布方式大多采用格式非公开的位图图像或者 Java Applet。位图图像的图像大小和内容都是固定的，难以满足用户的交互操作需求，并且图像缩放时存在图像质量下降的现象；Java

Applet 解决了用户交互操作的问题，但是在速度、可编辑性、可重用性方面存在较多问题。另一方面，随着系统互联及电力市场的引入，使得关心电网运行状态的主体有所变化，从而产生对部分电网数据信息共享的需求，进一步地相关人员也希望能够共享系统的部分图形资源，能一目了然地获知相关信息数据。如原来仅电网公司和其他电力系统相关部门需要了解有关的电网信息，在电力市场环境下市场参与人员需要及时了解电网的运行状况以便正确做出决策；而互联系统的调度人员为更准确的掌握电网的运行状况，也希望能了解相邻系统的部分信息（包括图形图像资源信息）。这就对电力系统运行状态可视化提出新的要求：希望能够增强可视化资源的开放性和灵活性，满足系统新的发展需要。

近年来随着计算机网络技术的发展，SVG（Scalable Vector Graphics）的出现为电力系统运行可视化图形数据的 web 发布提供了一种开放性的解决方案。SVG 是由 W3C 组织开发的一种开放标准的文本式矢量图形描述语言，主要面向网络应用。SVG 作为一种矢量图形它相对于位图来说具有无可比拟的优势，在图形复杂程度不大的情况下，它比位图图像文件量小的多，可无极缩放，它可以对图形元素进行精确定位，文字在 SVG 图像中保留可搜索状态，也可以通过一定的交互方式进行编辑。SVG 图形文件是文本文件，可以方便的用任意文本编辑浏览编辑。由于 SVG 是一种基于 XML 的语言，它继承了 XML 的跨平台性和可扩展性。SVG 支持 SMIL（Synchronized Multimedia Integration Language），使得在图片内进行交互成为可能，SVG 支持 Javascript，可以方便的由程序语言来动态生成。SVG 完全支持 DOM，允许程序或脚本动态地存储和上传文件的内容、结构或样式。

通过将电力系统运行状态可视化系统中的图形数据采用 SVG 格式来进行图形数据的存储、传输和展现，可以有效的解决专有格式的位图图像在数据 Web 发布中的问题。通过分析现有的电网可视化应用方案可以看出：电网可视化应用较多是在地理接线图或者系统单线图的基础上，将数据转化为二维或三维图形对象进行展示。SVG 能够准确描述电力系统图元并提供精确的图形元素定位，非常适合描述地理接线图或者电网单线图，这就为用 SVG 来展示电网可视化的图形提供了可能性。

在此背景下，本文对 SVG 在电力系统的几个应用方面做了一些探索性的工

作，本文涉及的工作包括：底层包括 SVG 的图形图像资源描述设计；上层应用包括基于 SVG 的地理接线图设计，基于 SVG 的等值线方案设计，基于 SVG 的电网潮流显示设计和 SVG 图元动态着色。

本文主要分为六章。第一章概述了目前国内外电力系统中可视化技术的应用领域和现状，并简要分析了电力信息化对电网数据可视化的需求；第二章主要介绍可视化相关技术，重点介绍 SVG 规范；第三章着重分析基于 SVG 的电网数据可视化系统的实现框架以及其实现的平台基础；第四章通过具体实例说明基于地理接线图的可视化功能的实现；第五章具体说明基于厂站一次接线图的可视化功能的实现，包括图元动态着色，量测数据实时更新，并给出了一些具体实例；第六章是论文总结部分，总结自己所作的工作和今后的工作设想。第三、四、五章是论文的重点内容。

第二章 可视化技术

可视化技术是一门交叉学科，涉及的范围较为广泛，它不仅包括计算数据可视化，而且包括实验和测量数据的可视化。可视化技术学科是一门融合数学、计算机、图形图像处理以及其他相关领域的交叉学科，本身的内容博大精深，限于篇幅本章只对本文工作中涉及到的可视化技术基础知识做简单地介绍；另外SVG技术规范是本文工作基石，本章将对SVG技术的发展和特点做简单地介绍。

2.1 可视化技术分类

可视化技术根据所参照的依据不同可以有多种分类方法，最为常用的是根据源数据的类型进行分类，可以将可视化技术分为点数据可视化技术、标量场可视化技术、矢量场可视化技术。

2.1.1 点数据可视化技术

点数据可视化技术是对定义域中的一些点进行映射，其关键是如何将n维空间中的点向二维图像平面投影。

一维点、二维点和三维点的投影方法比较直接。一维点的情况最为简单，可用符号直接标注在坐标轴上。二维点也可以采用一种直接的显示方法，在显示平面上可直接将二维点的两个值对应到(x,y)坐标值上。三维点可采用投影方法，将三维点三个值对应到图像空间的三个坐标轴上，再将这些点向二维显示平面进行投影。投影模式可以采用简单的光照模型，即将第三维的深度信息用光照强弱表示或用符号的大小、颜色直接表示第三维信息。

高维点的显示则较为复杂，比较有代表性的方法是 Chernoff 脸方法和Andrews 绘图法[32]。

点数据的可视化技术在电力系统中应用集中在各种数据曲线表达技术中，如变压器负荷曲线、AGC 曲线等。

2.1.2 标量场可视化技术

标量场可视化是目前可视化技术研究较多的领域。

最简单的标量场是一维标量场，如同表示函数 $y=f(x)$ 一样，一维标量场可以直接用函数曲线画图表示，其基本方法是在 $x-y$ 平面内，根据采样点的值，构造插值函数 $F(x_1)$，根据 $F(x_1)$ 生成采样点之间的线段。插值函数的选择要求能保持原数据集中的隐含属性，如单调性、正值性、凸包性等。常用的有线性插值，埃尔米插值，以及三次或高次样条插值。在采样数据本身精度较低的情况下，更多的是采用逼近的方法，它更能反映出原函数的特性，常用的是最小二乘法逼近。

二维标量场可看成是二维平面网格点或是散乱点上的数据分布，其关键还是如何构造其插值函数或逼近函数。对于网格数据，最简单的方法是采用双线性插值，仅依赖四个网格点构造其插值函数。其形式为：

$$F(x,y)=a_1+a_2x+a_3y+a_4xy \qquad \text{（公式 1）}$$

要获得较好的连续性，可采用双三次插值，它要 计算一阶导和二阶导，其形式为：

$$F(x,y)=\sum_{i=0}^{3}\sum_{j=0}^{3}a_{ij}x^iy^j,0\le x,y\le 1 \qquad \text{（公式 2）}$$

它很容易映射到一个单元上，常见的有双三次 Hermite 函数和双三次 Bezier 函数。

散乱数据插值的方法就更多了，如进行三角划分后，对三角片上的点采用双线性插值或双三次插值。

二维标量场的等值线绘制是二维标量场可视化的主要技术，如地理中的等高线，气象中的等温线都是其具体实例。

标量场可视化技术在电力系统中的应用也相当广泛，基于各类接线图的节点数据可视化都可参照标量场可视化方法，本文第四章中将对等值线绘制方法在电力系统节点电压等值线的绘制应用做具体阐述。

2.1.3 矢量场可视化

矢量场可视化要求用图形图像方式显示每一矢量的大小和方向，一种方法是采用标量显示技术显示矢量每一分量的分布，另一种方法就是对大小和方向同时进行显示，后者更直接更容易被人们接收。

矢量场的几何表示一般有点表示、线表示和面表示三种方法。

点表示是最直接的方法，对采样点上每点数据的大小和方向采用能表示大小和方向的图标来表示，如箭头、锥体、有向线段等。这种方法适用于较小的简单矢量场，对于大型复杂的矢量场不太适用，众多箭头只能让观察者觉得繁乱，无法清晰地解释原数据场地分布。

线表示是用的较多的一种方法，主要有场线和质点轨迹两种，场线是在某一时刻$^{*}t$，连接各点矢量的一条有向曲线，如电磁场中的磁力线等。质点轨迹是某一质点经过该矢量场时的一条轨迹。对于线表示，主要时要选择合适的起始点。

如果场线可看作时一点的运动轨迹，那么场面就是一条非场线曲线经过矢量场的运动轨迹，场面比场线更能抽取出矢量场内部的矢量分布，它的构造主要有两种方法，一种是采用场线连接生成场面，另一种是对矢量场采用拓扑结构的分解，抽取出矢量场内部的几种拓扑结构，后者更能对整个场的分布有全局的把握。

2.2 可视化研究模型

2.2.1 基于可视分析的研究模型

通常分析研究一种现象时，一般要经过以下几个阶段。

(1)建模（Modeling） 研究人员首先通过观察，将有关信息归纳成物理模型，即确定哪些变量有意义，哪些变量可忽略，并选取时空区域和相关的物理定律，明确模拟目标，然后导出物理模型的理想化数据模型，包括控制方程、边界条件、初始条件以及定义域与数学表达式。在电力系统可视化应用的研究中，这一步工作主要表现为针对某一具体分析目标从各种数据中提取所需要分析的部分数据，并建立相应的数学模型。

(2)求解（Solution） 根据数学模型，采用相应的数值方法建立计算模型，送

入计算机（计算模拟），获得计算结果。

(3)解释与评价（Interpretation & Evaluation）可视化在该阶段发挥重要作用，它从模拟数据到可视化图形图像数据的变换，使得研究人员能以视觉图像方式对模拟结果进行观察，做出解释和评价（如图 2.1）。基于 SVG 的可视化方法将计算模拟所获得的结果用 SVG 图像描述方式生成图形文件或图形文件片断，完成从数据到图像的变化。

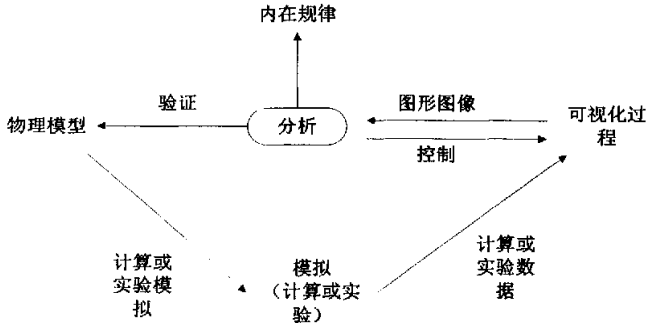


图 2.1 基于可视分析的研究模型[33]

2.2.2 可视化过程模型

由图 2.1 可知，可视化过程中的输入数据包含 2 类，一类是来自模拟阶段的计算或实验数据，另一类是来自分析阶段中产生的控制可视化过程命令。可视化过程输出为可视化的图形图像信息，以供分析用。进一步可将来自模拟阶段的数据到图形图像的变换过程细分为下面 4 个模块，这也是可视化分析一般过程流程。

✧ 数据预处理

可视化模块输入数据来自计算机模拟数据和实验/测量数据，或者从数据库中调用。计算机模拟可以产生的数据包括数值数据、几何数据（几何造型）与图像数据；科学试验/测量数据包括数值数据和图像数据。因此，可视化数据预处理模块应能根据需求处理数值数据、几何数据和图像数据三类数据。

数值数据又称属性数据，用来表示温度、速度等，在电力系统中可以用于表示电压、功率、频率等信息。属性数据通常可以划分为标量、矢量和张量形式，

是可视化技术应用人员最关心的数据。属性数据有时也可能与几何数据有联系。几何数据用来表示对象的形状，包括点、线、多边形、曲面等。图像数据通常以位图形式表示，例如扫描图像数据或者计算机生成的光栅图像数据等待。

数据预处理部分的研究内容包括以下四个方面：

1）数据格式化及其标准化；

2）数据描述语言和操纵语言；

3）数据变换技术；

4）数据压缩与解压缩技术。

✧ 映射

映射模块应完成将数值数据转变为几何数据的功能，因此映射功能实质是一种构模功能，是可视化技术的核心，可视化系统处理的数据类型随着应用领域的不同而不同，从而对不同类型的应用数据应采用不同的可视化技术。

✧ 绘制

绘制功能将完成几何数据转换成图像数据的过程。计算机图形学理论和方法体统了丰富的绘制算法，例如扫描转换、隐藏面的消除，光照模型、明暗处理、透明与阴影、纹理映射和反走样技术等等。本文中绘制功能模块的实现主要依靠SVG 规范提供的基本图形描述方法，将可视化分析结果表达为 SVG 图像。

✧ 显示

显示功能模块的功能是将绘制模块生成的图像按照用户指定的要求（如指定的输出设备，显示窗口大小及位置，存贮格式等）进行输出，有些类似于图形用户界面（GUI）。SVG 图形图像可以直接在浏览器中显示，因此本文中可视化应用的显示功能模块采用直接在客户端 IE 浏览器浏览的形式。

上述可视化过程可以用图 2.2 表示。由图可以看出，可视化系统的组成分为两类，一类是数据交换语义层（用矩形框表示），它包含应用数据、几何数据、图像数据等 3 个层次数据。另一类是变换数据的功能模块（用椭圆框表示），它包含了滤波模块和映射模块，前者完成在同一语义层的变换，后者完成在不同语义层的变换。

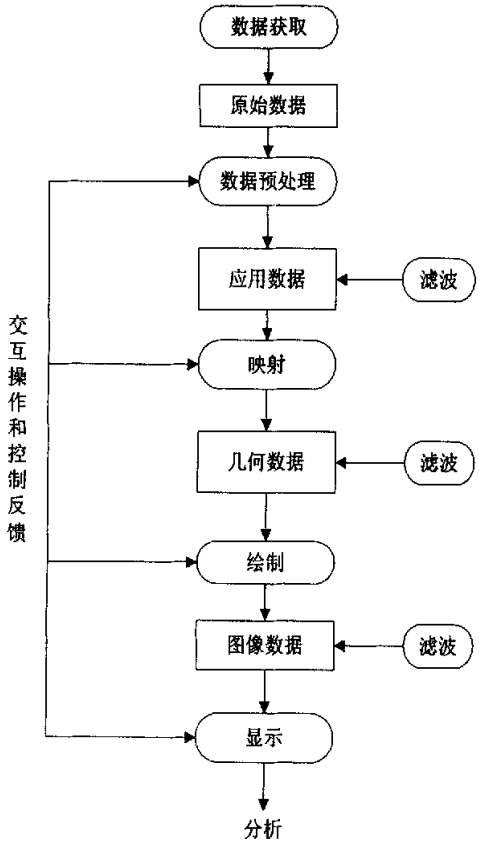


图 2.2 可视化过程流程图

2.3 标量场可视化和等值线抽取

二维标量场可看成是定义于某一面上的一维标量函数 $F = F(x,y)$，所谓等值线是由所有点 (x_i,y_i) 定义，其中 $F(x_i,y_i) = F_i$（F_i 为一给定值），将这些点按一定顺序连接组成了函数 $F(x,y)$ 值为 F_i 时的等值线。

对于二维标量场，其数据往往是定义于某一网格面上的。根据网格类型的不同，其等值线抽取方法也各有不同。网络具体可以分成：正规化网络（regular grid）和非正规化网络（irregular grid）。前者几何连通性是隐含的，如常见的正交网格；而后者显式地定义了单元的几何属性，如常见的三角片网络，结点位置、边、单元都要显式定义。根据等值线抽取时的网络单元处理次序，等值线的抽取方法具体可分成两类，网格序列法和网络无关法。

网格序列法

网格序列法（grid sequence）的基本思想是按网格单元的排列次序，逐个处理每一单元内相应的等值线段。在处理完所有单元后，就自然生成了该网格中的等值线分布。根据网格类型可分为正规网格和非正规化网格。

网格无关法

前节介绍的网格序列法是一种按网格单元排列次序逐个单元处理的方法。在实际情况中，对于某一个值的等值线，其穿过的单元数往往只占整个网格单元数的较小部分（10%以下）。因此，这种遍历所有网格单元的处理方法效率不高，特别是在大型密集网格分布的情况下效率就更低。网格无关法（grid free），就是针对这种情况的一种等值线生成方法。

网格无关法通过给定等值线的起始点，或先求出其起始点，利用该点附近的局部几何性质，计算该等值线的下一点，然后，利用已经求出的新点，重复计算下一点，知道达到区域边界，或回到原始起点。

2.4 地理信息系统

地理信息系统（GIS－Geographic Information Systems）是介于信息科学、空间科学与地球科学之间的交叉科学，是计算机、软件、地理数据以及用来有效地获取、存储、修改、操作、分折和显示所有与地理有关信息的有机集合体[31]。它是融计算机图形和数据库于一体的信息管理系统。目前，国外已有许多电力企业在日常工作中开始应用 GIS 解决方案，完成对作业的控制、整合与监测。使企业能够创建、管理、处理并在各个部门之间共享综合性空间信息，从而支持重大决策。自 20 世纪 90 年代中期，国内部分电力企业开始尝试 AM/FM/GIS 的应用，以后一些大型供电企业开始在通用或专业 GIS 软件技术的支持下，建立大规模电力 GIS 应用系统。

GIS 在电力系统中主要应用于配网管理系统 [32]。如线损分析、可靠性管理、负荷管理、相序分析等等。随着电网 GIS 建设的深入，必然要求其与 EMS 实时系统等有效结合，提高现有电网调度参数管理水平。

本文所提到的基于地理接线图的可视化分析应用是以地理信息系统为基础，将地理信息与电力系统节点运行数据、线路运行数据相结合，在此基础上进行可视化分析，并将分析结果显示于地理图层之上。这种形式能使运行人员迅速了解到所分析显示的运行数据的地理分布情况，为运行状态分析、预测等提供相关信息。

2.5 SVG 技术

SVG（Scalable Vector Graphics，可升级矢量图像）是一种开放标准的文本式矢量图形描述语言，是 W3C 公司在 2000 年 8 月最早发布的。使用 SVG 可以在网页上显示出各种各样的高质量矢量图形，包括图像处理中常见的许多功能，如图形、文字、动画、色彩、滤镜效果等。最关键的是 SVG 完全用普通文本描述，是一种专门为网络而设计的基于文本的图像形式。

2.5.1 SVG 的历史

1985 年，Adobe 公司发布了用于打印的 PostScript，它是一种与具体设备无关的可编程语言。SVG 和 PostScript 类似，都是基于文本形式，能够很好地描述可缩放的文字和图像，只是用 PostScript 所形成的文件很大，不适合于在网络上传输。

矢量图形在网络上并不是一个新概念。1998 年 4 月，来自 Adobe、IBM、Netscape 以及 Sun 公司的几支开发队伍向 W3C 提交了基于 XML 的 PGML（Precision Graphics Markup Language，精确图形标记语言）的语言规范；同年 5 月，HP、Macromedia、Microsoft 和 Visio 等公司也提交了同样基于 XML 的 VML（Vector Markup Language，矢量标记语言）规范。于是 W3C 公司综合两者之长，组织了最早的 SVG 工作组。他们于 1998 年 10 月提交了 SVG 的需求分析报告。

1999 年 2 月，SVG 草案出台，经过不断地修改更新，最终形成了第一份实验性地实现规划。2000 年 8 月，W3C 正式发布 SVG 图像格式建议书——SVG1.0 规范。经过不断地更新修改，目前最新的规范是 SVG1.2 版本。

2.5.2 SVG 技术的特点

✧ 基于 XML 标准

XML 是公认拥有无穷生命力的下一代网络标记语言。与 HTML 一样，XML 也源自一种比较早的通用标记语言 SGML（Standard Generalize Markup Language），它拥有 HTML 语言所缺乏的伸缩性与灵活性。

SVG 开始设计时就以 XML 为基础，这使得它能同 HTML、CSS、DOM、XSL、JavaScript、CGI 一样成为一种新的标准。

✧ 矢量图形

矢量图形由线框和填充物等组成，它由计算机根据矢量数据进行计算，然后绘制而成。矢量图形相对于位图有以下特点：

1）文件的大小与图形的复杂程度有关，而与图形的具体尺寸无关；

2）图形的显示尺寸可以无极缩放，变化后不影响图形质量。所以再图形复杂程度不大的情况下，矢量图形具有文件量小、可无极缩放的优点。

由于矢量图形的这些特征，使得它尤其适合于网上传播，所以许多公司都开发出用于网上传输的矢量格式，但是各公司自行开发的矢量图形没有统一的标准，SVG 的出现迅速改变了这一状况。专门负责标准制定的 W3C 公司统一负责 SVG 标准制定，这使得 SVG 像 HTML、XML 一样成为浏览器默认支持的格式，并且由于众多厂商的支持，使得制作 SVG 的工具软件大大增加。

✧ 文本构成的图像

SVG 是一种文本格式的图像，可以不用任何图像处理工具，仅仅用记事本就可以生成一个 SVG 图像。

建立在文本基础上的 SVG 图像中的所有描述语句都可以直接观察到，所以非常容易进行修改与更新，“可升级”的特点在这里可以得到恰当的反映。

✧ 灵活的文件格式

SVG 可升级的特性不仅仅表现在再次修改方面，还表现在其灵活的文件格式。在以前的图像中，文本通常作为位图保存于图像中，图像形成以后不能单独对文本进行修改；在 PNG 格式中这一点有所改进，文本可作为一个独立的层存在。SVG 则更灵活地扩展了图像的文件格式，它由三个部分组成：矢量图形、文字和点阵图像。SVG 不仅仅可以应用矢量图形和文字对象，同样可以引入点

阵图像而制作出任何其他格式图像所能达到的效果。SVG 的文本格式使得它能在任何时候被修改，甚至在页面的运行过程中我们也可以对很多部分做即时的修改，并且其中的图形描述还可以重复使用。

✧ 支持交互性

图片和交互在以前是分开地概念。例如在一个网页中，按钮仅仅是一个图片，按钮的交互部分是由网页中地 Script 语言来实现。SVG 地出现突破了这个限制，它支持 SMIL（Synchronized Multimedia Integration Language，同步多媒体集成语言），使得在图片内进行交互成为可能，这是以前地图像所不能做到的。

✧ 内嵌字型数据

SVG 采用了一种科学的方法来解决动态字体问题，它内嵌了图像中所出现的文字字型数据，用户不需要下载所有的字体文件，这对于中文用户来说相当便利。

SVG 的“矢量描述”并不是一个全新的概念，但它综合了矢量图形、点阵图像和纯文字的优点，用一种标准来进行描述，这较之于目前网络上流行的压缩式点阵图像优越。而且文字与图形不是封装于 SVG 内，而是借助 DOM 和 Script 等手段与外界交互，更胜于一般的 GIF 或 JPEG 图像。

统一的标准和开放性是 SVG 的强大生命力所在。标准统一可以增强网络的交流，结束目前业界各种格式并存的混乱局面；开放性则有利于日后的各种新的元素加入其中以扩充其功能。使用 SVG 时，客户端的软件负责解释 SVG 文本并将其转化成实际的矢量图形，这样文字仍然是文字，线条仍然是线条，还可在客户端即时修改。

SVG 作为 W3C 组织正式推荐的图像格式，拥有众多的支持机构。像 Adobe 公司新推出的 Adobe 图像处理套件，如 Illustrator、Photoshop 中集成 SVG 功能，并且提供 Netscape Navigator 和 Internet Explorer 的插件，以便使其能够直接支持 SVG 文件的浏览。现在只要安装 Adobe 公司提供的免费插件 SVG Viewer[34]就可以直接用 IE 或 Netscape 浏览 SVG 图形。

2.5.3 SVG 简单实例

以下我们给出一个简单矢量图形的 SVG 描述代码示例。矢量图形一般以算法指令来描述，例如一个实心圆的矢量图形可以这样来生成：以坐标（50，80）

为圆心画一个半径为 10 个象素的圆，用黑色填充。程序清单 1 给出了描述这一圆的示例。

程序清单 2.1：

```
<?xml version="1.0" encoding="iso-8859-1"?>
<!DOCTYPE svg PUBLIC "-//W3C//DTD SVG 20000303 Stylable//En"
"http://www.w3c.org/TR/2000/03/WD-SVG-20000303/DTD/svg-20000303-stylable.
dtd">
<svg width="100" height="200">
    <circle cx="50" cy="80" r="10" style="fill:black"/>
</svg>
```

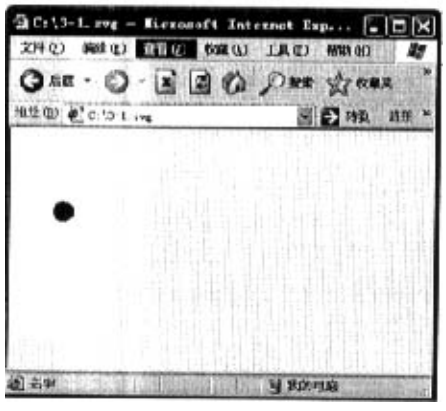


图 2.3 在浏览器中显示的 2-1.svg 图形

将程序清单 2.1 给出的文本保存成 2-1.svg ，用安装了 SVG Veiwer 插件浏览器打开以后显示效果如图 2.3 所示。

第三章 基于SVG的可视化系统构架设计

3.1 概述

目前很多电力系统应用软件或者仿真软件（如 PowerWorld、Matlab 等）可以做到对电力系统可视化图形的显示和支持，但是这些系统采用各自不同的实现技术和方法，不同系统之间的图形和数据共享困难，并且对于不同的操作平台系统的移植和兼容性较差。国际电工技术委员会 IEC 所提议的 IEC 61970 和 IEC61968 已成为电力企业进行应用集成时所采用的两大标准体系，它们分别描述了能量管理系统和配电管理系统的应用程序接口。两个系列标准共同定义了一种电力系统公共信息模型 CIM。它主要定义了电力系统模型交换的数据标准。SVG 作为一种图形标准，采用本章所提出的电网图形描述格式，可以将图形对象与 CIM 数据模型对象关联起来，实现图模一体的数据模型。

由于和数据模型对象直接对应，因此在用 SVG 图形表示的电网图形如地理接线图、厂站一次接线图等，不再是以往 EMS 系统中的简单图形，而真正成为了一种可扩展可移植的图形资源。在此基础上，利用各种电网可视化技术生成新的 SVG 图形，如节点电压等高线、潮流图等，这些图像集中了大量数据信息，能够辅助系统人员更有效地处理和分析纷繁的电网数据，给系统运行人员提供更加直观的操作平台。

本文在依托杭州电力局已建成的电力企业集成总线，以其开发的 CIM 标准数据服务器为数据来源建立公共信息交互平台[30]之上，实现了电网数据可视化的部分功能模块。它参考了标准的 EMS API 结构体系，以 CIM 作为数据模型，研究 SVG 在电网数据可视化应用中的可行性和实际效果，并在此基础上提供交互的功能，为将来的离线分析电网运行数据提供一种解决思路。

3.2 基于SVG的电网数据图形描述格式

电网数据的表示一般有传统的系统单线图和基于地理的电网接线图。传统的电网结构单线图具有结构清晰、规整的优点，但是它不与实际系统对应，直观性

较差。随着电力系统的不断扩大，这种在单线图上标注数据的方式越来越不能满足要求。基于地理图的电网接线图直接在地理图上标注节点和线路，其优点是符合实际系统，十分直观，在此基础上进行数据的可视化分析渲染，效果较好。以下我们主要讨论后面章节用到的基于地理接线的电网数据和一次接线图的 SVG 结构设计。

3.2.1 基于地理接线的电网数据结构设计

SVG 是基于 XML 的网络标记语言，底层用一种基于对象的树型结构表示，所以在将电网数据转化成 SVG 表示时必须先分析电网数据的层次关系。

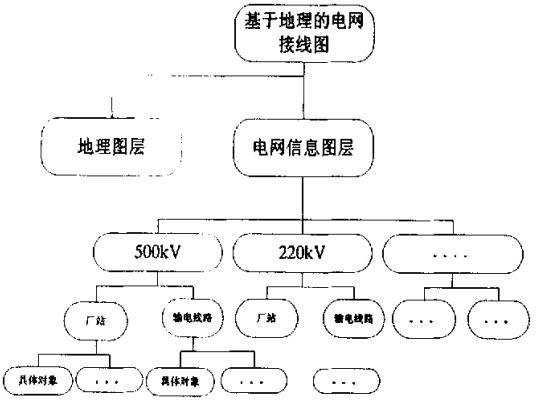


图 3.1 基于地理的电网接线 SVG 图形文件结构

SVG 提供一些基本图形元素，适合用空间实体模型来描述电网接线图，即用空间对象的节点表征实际存在的变电站、发电厂，用节点间连线表征输电线路。根据实际需要，我们采用图 3.1 所示的结构组织方法，来实现 SVG 格式的电网接线图。图中最上层代表整体方案，第二层分为地理图层和电网信息图层，第三层可以根据电压等级或者控制区域具体划分。由于电力系统具有分层分区控制的特点，其中的电网可以很好的表示为上述的树型结构。

为了方便的对所描述的对象进行操作，我们对所有描述对象都采用 SVG 的分组元素<g>做为主元素。例如，程序清单 3.1 描述一条输电线路：

程序清单 3.1

```
<g id="AC-Lfc2410" >
  <polyline points="47.4666281,-203.795581 14.8295003,-18.67612 " />
</g>
```

元素<g>的“id”属性确定了该线路的代码，其子元素<polyline>用于具体描述线路。

3.2.2 一次接线图结构设计

另一种重要的电网图形资源是一次接线图，主要用于描述厂站设备布局和运行状况，能够帮助电网运行人员迅速并准确地掌握设备的运行状况。图3.2是本文示例的一个Schema片断图示用SVG图形描述厂站一次接线图的结构。

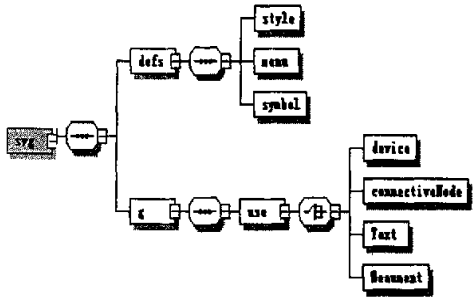


图3.2　SVG文档表示厂站一次接线图的Schema片断

从图3.2中可以看出，整个SVG文档主要有两大部分组成：图元、样式描述和图形的具体渲染两个部分。

1)图元、样式描述

这一部分主要用于图形模板的定义以及样式说明，在<defs>元素中描述。其中<style>元素定义了样式描述的规范，包括各个电压等级分别用何种颜色表示，图中各种标注的字体字形等信息；<menu>元素描述了自定义鼠标右键菜单，用户可以根据需要定制合适的自定义菜单；<symbol>元素定义了电力系统一次接线图中用到的各种图元，包括闸刀、开关、变压器、同步机、母线等。

2)图形的具体渲染

其中包括了各个设备图形的渲染，以及连接线、说明文字等的渲染，同时也包含了这些设备、线路的位置信息。

我们以一个简单三圈变压器为例具体说明图元的定义和具体渲染。一个简单三圈变压器图形由三个线圈图元组成，具体代码及说明如程序清单3.2所示。

程序清单 3.2：

```
<symbol id="winding">
    <desc>transformer_winding</desc>
    <circle cx="0" cy="0" r="12" />
    …
</symbol>
```

程序清单 3.2 的图元定义中，<symbol>元素属性“id”表示该图元的 id 号。其子元素<desc>给出了一个图元的说明，<circle>定义了一个圆形，用来表示变压器的线圈。

程序清单 3.3：

```
<g id="TqaZ1">
 <use id="TqaZ1L" transform="translate(800 824) " xlink:href="#winding" class="kv35" />
 <use id="TqaZ1M" transform="translate(810 828) " " xlink:href="#winding" class="kv220"
      />
 <use id="TqaZ1H" transform="translate(790 828) "   xlink:href="#winding" class="kv500"
      />
</g>
```

程序清单 3.3 具体渲染了一个三圈变压器，用<g>元素将变压器三个线圈组合成一个整体，属性“id”表示变压器的 id 代码。<use>元素渲染线圈，属性“transform”描述了变压器线圈在图中的位置（x、y 坐标），属性“xlink:href”表示引用图元 symbol 的 id 号，“class”属性表示采用的描述样式，“class=″kv500″”表示该线圈用 500kv 电压等级的描述样式来渲染。图 3.3 为例中变压器的显示效果。

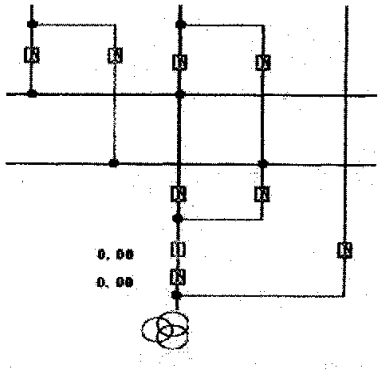


图 3.3 三圈变压器

按照图 3.2 格式组织的文档具有很好的可读性，既可以查看整个图像，又可以容易的直接读懂文档的源代码。在实际应用中，上述两个部分也可以分别作为

两个SVG文件来存储，这样可以增加图元文件的独立性。不同应用软件系统进行图形信息交互时可以共享电力图形的位置信息，同时使用各自的图元信息，即保留了各自系统的特点又可以实现信息的统一，使得图形信息可以真正成为电力企业的一种资源。

图3.4是一幅应用基于SVG的图元对象描述模型生成的电力系统厂站接线图（静态图）在安装了Adobe SVG Viewer浏览插件的IE中的显示效果。

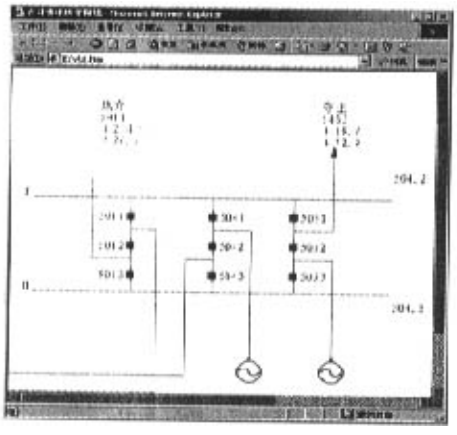


图 3.4 某厂站结线图（部分）

3.2.3 图形对象与数据模型的统一

应用 SVG 技术的一个重要目的是图模一体，只有图形而没有对应数据模型的描述是不完备的，建立图模一体的图形资源模型是电力系统图形资源高级应用的基础。SVG 所描述对象的属性数据有两种表示方法。

1)内联法，即在 SVG 文档中直接标注，将属性数据和所对应的描述对象放在同一分组中。SVG 并没有提供用于厂站、输电线路等对象的属性描述元素，一些简单的属性可以用<desc>元素来描述，但是较为复杂的属性信息则需要自己定义属性描述元素来满足要求，或者用<metadata>元素引入其他 XML 命名空间的元素来描述属性信息。

2)外联法，属性数据存储在外部文件或数据库中，通过一定的对应关系将所描述的对象与其属性相关联。例如通过 SVG 文件中所描述对象的 id 属性进行关联。相较第一种方法而言，这种方法中图形文件和属性数据模型文件相分离，简

化了对象id编码的复杂程度，对于同一对象图形和属性数据采用相同的id也不会发生冲突，并可以使SVG文件更为简洁，重用性更好，特别是对于一些实时数据，用这种表示方法能够更为方便的获取外部数据库中的数据信息。上文代码即采用这种方式，通过分组元素<g>的id属性将此线路的图形与属性数据模型文件中id为"AC-Lfc2410"的线路联系起来。

通过这两种方式，可以使SVG图形和电网数据模型相关联实现图模一体的图形信息资源。在应用程序中，利用SVG的交互性能，可以对SVG的对象进行操作，从数据模型文件中获取相应的属性数据和相关的实时测量值，进行可视化分析并显示可视化分析的结果。

3.3 公共信息平台设计框架[30]

本文中电网数据可视化应用功能模块都基于公共信息平台之上，并通过该平台实现部分图形界面上的交互操作。目前电力企业对于可视化的需求越来越巨大，电网运行人员面对的是大量枯燥无味的海量数据，在公共信息平台上应用可视化技术以后，电网数据信息变得更加直观，并可以通过对图形的操作获取对应的数据模型信息，而且具有很高的效率。本节将具体介绍公共信息平台的设计框架。

3.3.1 总体框架

随着Internet的深入推广应用，分布式结构已成为将来信息系统的主要解决方案。因此，公共信息平台的设计使用Web Service构架——利用Internet实现图形和数据的传输，对硬件和软件没有附加的要求，便于实现多用户访问。

作为一个Web Service应用，它应该是标准的客户端——服务器构架，在此基础上，实现图形和电网模型之间的交互。因此，公共交互平台分为三个部分：公共信息模型库、公共图形库和交互平台。它的核心是交互平台，本文中所有可视化应用功能模块都是基于此平台上实现的，其总体结构图如图3.5所示。

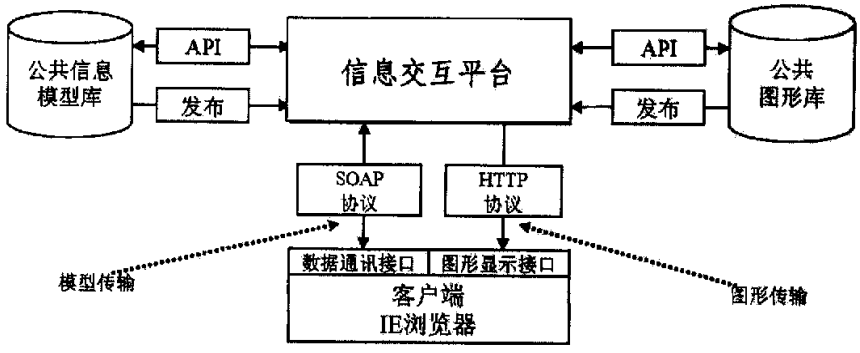


图 3.5　公共信息交互平台总体结构框架

公共信息平台实现了一个 SOAP 服务器。它在启动的时候预处理获得的模型数据，当用户通过客户端与平台连接时，图形可以通过 HTTP 协议直接由 IE 浏览器加载，并通过处于客户端的一个图形显示接口进行显示。服务器端部署的可视化高级应用服务，通过数据通讯接口与客户端进行数据交互，其底层是基于 SOAP 传输协议的。在信息关联上，图形中的各对象包含有唯一的 ID 映射到模型中具有相同 ID 的数据对象，因此图形与模型可进行对应，从而实现交互；而在信息传输上，由于两个接口的相对独立，达到了模型数据与图形数据的分离，互不影响，大大增加系统的可靠性和稳定性。

3.3.2 公共信息模型库

公共信息模型库是用来定义、管理的电力企业中各种运行参数的，所有的信息模型在整个电力企业中是唯一的。电网数据可视化系统中所涉及到的所有电网运行参数、量测数据都来自公共信息模型库。本文所述及的公共信息模型库参照杭州电力局开发完成的 CIM 标准数据服务器上的 CIM 标准数据库。

公共信息模型库的数据来源于 EMS 及 SCADA 系统，按照数据的变化时间，分为静态模型数据和动态模型数据。静态模型数据，即在一段时间内不会发生改变的电网模型数据，比如开关、闸刀、变压器等一些设备的属性等等，同时页包括各种设备之间的关联关系和设备与量测的关联关系。CIM 标准数据服务器在启动时一次性从 EMS 转换并导入，信息交互平台同样只需要在启动时一次性读入。动态模型数据是指随时间变化的数据，例如 SCADA 系统中的实时测量数据，它们需要在不同的时间捕捉，CIM 标准数据服务器是经由数据采集系统实时转

发达到数据的及时更新，而在信息交互平台中，使用CIS接口规范中的高速数据访问接口实现数据的读入。

3.3.3 图形数据库

图形数据库用于管理基于SVG的图形信息，其设计结构如图3.6所示，图形的数据源来自电力系统中其他的应用系统，如EMS、DMS系统等。可以利用程序或现有的转换工具将原有EMS、DMS系统中的图形按照3.2节所说明的电网图形数据SVG描述方法转换成SVG格式的图形。

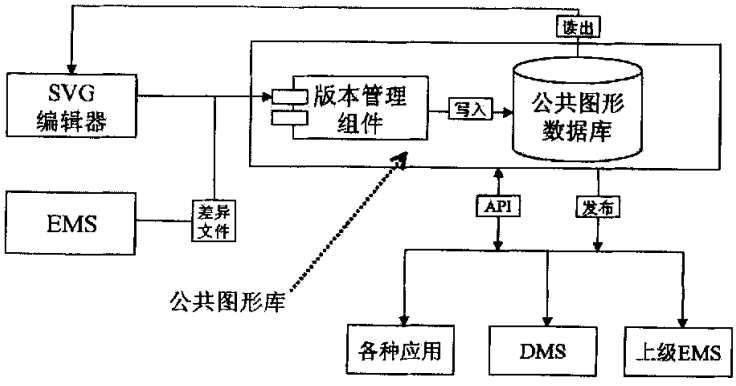


图3.6　公共图形库结构框图

在图形数据写入公共图形库之前需要经过版本管理组件，其目的是为了维护数据的可靠性。版本管理组件主要工作是记录每次图形文件修改的信息。SVG图形编辑器使管理者可以对图形库中SVG文件在必要的时候进行可视化编辑。在图形源发生改变时，也可以通过重新转换图形或者根据差异文件修改SVG文件的方式对图形库中SVG图形进行修改。

3.3.4 公共信息模型平台

交互平台是整个架构体系的主体，是信息模型与图形进行交互以及数据可视化分析的场所。它作为整个Web Service的核心，选择Apache SOAP应用服务器策略中的Apache Tomcat作为这个平台的实现基础。这个实现基础将整个服务器分为客户端与服务端两个部分，将公共信息模型和各种高级应用程序包裹在后台服务端上，而前台（客户端）包裹SVG图形以及客户端程序，前后台之间通过

SOAP 协议进行信息传递，服务器端将按照客户端程序要求给出可视化分析结果，从而达到模型与图形交互以及显示可视化分析结果目的。以下就以节点电压等值线的交互实现过程为例具体讲述公共信息交互平台的实现。

SOAP 服务器的实现

简单对象访问协议 SOAP(Simple Object Access Protocol)是一个传输级的规范。它是基于 XML，针对分布式计算环境下的信息交换而设计的。

SOAP 协议由几个部分组成：首先是封套(envelope)，它用来描述小的内容以及如何处理它的一些线索；第二部分由自定义数据的实例的编码规则组成，这是 SOAP 最关键的部分之一，体现了它的可扩展性；最后一部分说明了封套的应用和用来描述 RPC 调用与响应的数据编码规则，包括作为底层传输协议的 HTTP 的使用。

SOAP 支持的数据类型是由 XML Schema 数据类型规范定义的。所有在 SOAP 编码的块中使用的数据类型都必须是直接由 XML Schema 规范中获得或者是衍生的类型。值得注意的是，虽然 SOAP 代表的原始含义是简单对象访问协议，但实际上协议本身并没有规定对象是什么。对 SOAP 来说，任何东西都只是编码成 XML 形式的数据。SOAP 协议规范第五节的编码方式规定了一套将一个对象转变成 XML 标志的规则。所有对这个对象的引用也都必须通过使用 ID 和 href 属性被编码。

目前，使用 SOAP 的最常见的用法是 RPC 形式的分布式计算，即通过客户端远程调用服务端的方法，实现请求——响应的过程。

在整个 SOAP 服务器的实现过程中，首先需要编写服务端的程序，在此假设服务端的程序包含在 java 类 edu.zju.ee.soapServer.SoapServer 中，存放在服务器的 webapps 文件夹下，等值线生成的方法名为 getCurve()；然后需要将这个方法部署到服务器上，由此对外进行发布，部署符中定义此服务的名称和此服务调用的类及类中的方法，部署符如图 3.7 所示。

Deployed Service Information

'urn:TopoPaint' Service Deployment Descriptor

Property	Details
ID	urn:TopoPaint
Scope	Application
Provider Type	java
Provider Class	edu.zju.ee.soapServer.SoapServer
Use Static Class	false
Methods	xmlStart, gdaStart, initPaint, fastPaint, refreshPaint, getAllSwitchState, getAllAttrs, getAssetAttrs, getMeaValue, getHdaMeaValue, deleteService, getLineMeas, getTransMeas, getCurve
Type Mappings	
Default Mapping Registry Class	

图 3.7　SOAP 服务部署符

最后，在任意一台与服务器连通的机器上运行程序清单 3.4 所示的客户端程序即能够远程调用到 getCurve()方法，两者之间还可以通过加入不同的参数进行不同数据类型的信息传递。

程序清单 3.4：

```
public class TestFunction {
    public static void main(String[] args) throws Exception {
     URL url = new URL("http://localhost:8080/soap/servlet/rpcrouter");
     //Build the call
     Call call = new Call();
     call.setTargetObjectURI("urn:TopoPaint");
     call.setMethodName("getCurve");
     call.setEncodingStyleURI(Constants.NS_URI_LITERAL_XML);
     Vector params = new Vector();
     DocumentBuilder docbuilder = XMLParserUtils.getXMLDocBuilder();
     Document doc = docbuilder.newDocument();
     Element element = doc.createElement("attrList");
     ..........
     params.addElement(new Parameter("name", Element.class, element,
                              Constants.NS_URI_LITERAL_XML));
     call.setParams(params);
     // Invoke the call.
```

```
        Response resp = null;
        try {
            resp = call.invoke(url, "");
        } catch (SOAPException e) {
            System.err.println("Caught SOAPException (" + e.getFaultCode()
                + "): " + e.getMessage());
        }
        // Check the response.
        if (!resp.generatedFault()) {
            ...
        } else {...}
    }
```

服务端的功能实现

平台服务端的主要工作是信息模型的读入、可视化分析应用程序的运行和与客户端的通讯。可视化分析应用将在第四章和第五章中具体介绍，与客户端的通讯包含在服务器实现中，在此简要介绍信息模型的读入。

CIM 信息模型库的数据发布可以设计成静态文本类型和动态服务器类型。静态文本类型指以 XML 文件为数据载体进行数据传递，因此数据读入就是静态 XML 文件的解析过程；而动态服务器类型指的是建立一套完全符合 IEC 61970 标准中的 CIS 接口规范的数据读取接口进行数据访问。本平台针对这两种情况分别设计了两种数据读取方式。

✧ 静态文本数据读取

在静态 XML 文件解析领域，有两种比较常用的解析手段：DOM 和 SAX。DOM 解析器是对 XML 文档进行完全操作，将整个文档解析为树状结构并将其全部放入内存，可对文档进行修改，并能随机存取；而 SAX 解析器是基于时间响应的，它遍历整个 XML 文档，然后通知所有的事件，速度非常快，适用于较大 XML 文件的解析。通常一个电力企业的电网模型是很庞大的，因此可以选用 SAX 解析器进行解析。Java 类包中，已经自带了 SAX 解析器，因此只需要将其继承下来，并按照自己的数据处理规则覆写以上类中的各个接口，形成自己的解

析器。

✧ 动态接口数据读取

动态接口完全符合CIS接口规范，公共信息模型的数据分为两种，一种是静态的，即一段时间内不变化的数据，比如开关、变压器等设备的属性值；另一种是动态值，指的是随时间变化的值，比如测量值等。因此，在导入数据的时候，应用到CIS中的两类接口，即通用数据访问接口（GDA）和高速数据访问接口（HSDA）。

GDA提供用于访问基于CIM模型的公共数据所需的API服务。GDA是请求/应答式API，主要包括：读(有过滤条件和无过滤条件)、写和变化通知。面向请求/应答的服务是相对于SCADA数据快速访问的同步、非实时（或近实时）地访问复杂数据结构。HSDA是在OPC DA和OMG DAIS的基础上发展而来的，提供了高速数据访问的一个规范。它所访问的数据可以是电力系统的实时数据、计算数据等参数，这些数据带有时间戳和质量码。HSDA数据访问服务过程是：(1)一个客户浏览DAIS服务器中的数据，并选择它想访问的数据；(2)客户利用上面做的选择来建立要访问的数据的一个描述，并发出数据访问调用；(3)如果访问调用是异步的，服务器在准备好以后发送响应到客户；(4)如果访问是一个订阅请求，则服务器向客户发送更新的数据。通用数据访问接口一般用于读取静态的电网模型数据，由于本文平台采取读取完数据再进行其他应用的方式，在GDA中使用get_resource_ids()和get_extent_values()两个接口完成所有的数据导入过程，然后再进行其他应用。get_resource_ids()方法是用来取得各种CIM类的资源标识，接着get_extent_values()方法就根据刚才取得的资源标识迅速地将所有的此种CIM类对象全部取回来。高速数据访问接口通常用于来订阅测量值，一旦测量值发生改变，数据服务器会迅速地通知客户端，并传递改变后的测量值。

客户端的功能实现

客户端的功能实现就是如何实现SVG图形与客户端程序之间的通讯。由于SVG图形可以直接在IE浏览器中显示，但是它不能与客户端程序进行直接的通讯，因此在它们中间加入两个过渡层，一个是JavaScript语言，另一个Applet技术。JavaScript脚本可以直接嵌入SVG图形中，它主要用于对SVG图形对象

进行操作，对SVG提供的各种事件进行相应；Applet加载到html页面中，主要的作用是作为客户端程序与服务器端进行交互。程序清单3.5给出了一个客户端页面的实例。

程序清单3.5：

```
<html>
<head><title>Title</title></head>
<body>
<embed name="SvgViewer" width="1066" height="843" src="test.svg"
        type="image/svg-xml"
        pluginspace="http://www.adobe.com/svg/viewer/install/"></embed>
<script language="JavaScript" src="applet.js"></script>
<applet code="edu.zju.ee.SoapClient" archive="topopaintclient.jar" name="TopoPainting"
        width=1 height=1>
</applet>
...
</body>
</html>
```

例中<embed>元素引入SVG文件，用于显示SVG图形（例中引入test.svg文件）；<script>元素嵌入所需的javascript脚本程序，它可以直接加在html文本中，也可以如例中所示通过引入外部脚本文件（applet.js）的方式；<applet>元素用于声明所需Applet模块的源码（code）以及其存放的文件(archive)，并定义在脚本中引用Applet函数时所适用的名称（name）。

在客户端图形开启的时候，先通过Applet技术将包裹有客户端程序的类调入机器内存，进行交互时，SVG图形通过调用JavaScript程序中的方法与包裹在Applet中的客户端程序进行交互，从而进一步与后台服务端进行通讯。

第四章 基于地理接线图可视化应用

4.1 地理接线图

地理接线图是指用点和线在地理图上标注电网的节点和线路，节点位置与实际地理位置一致，线路的位置符合基本的实际线路走向，可以根据需求确定线路描绘的精确程度。地理接线图符合实际系统，十分直观。但是，在某些节点和线路在地理上聚集在一起时，数据显示存在问题。在这种情况下可以选择性的显示满足某一条件的数据，以避免数据显示过于密集甚至重叠。

电网的地理接线图是电网数据可视化的基础图形。图 4.1 给出了一个电网地理接线图的例子：杭州地区电网地理接线图，图中标注了部分厂站和线路。利用此图可以帮助运行人员迅速了解电网的结构和分布情况。在此图的基础上，可以应用多种电网数据可视化分析，例如查询线路、厂站的属性信息，快速查找线路、厂站，计算生成电网节点电压等值线，显示线路潮流等等，这些将在后面的小节中具体说明。

利用 SVG 提供的超级连接功能，可以通过点击地理接线图上的厂站节点连接到（显示）该厂站一次接线图。例如在图 4.1 中点击青云变电站图标可以连接显示图 4.2 的青云变一次接线图。

在一次接线图中，显示了厂站内一次设备运行状态。与传统 EMS 系统中图形不同，该一次接线图中设备图形是直接与设备属性数据模型相关联的，利用 SVG 交互功能能够访问到设备的属性数据。

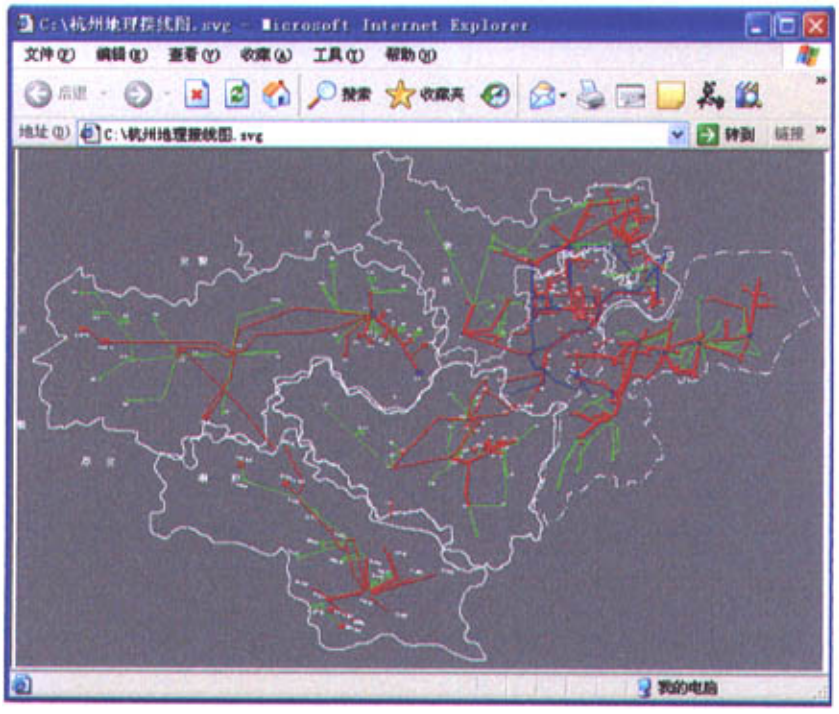


图 4.1 杭州地区电网地理接线图

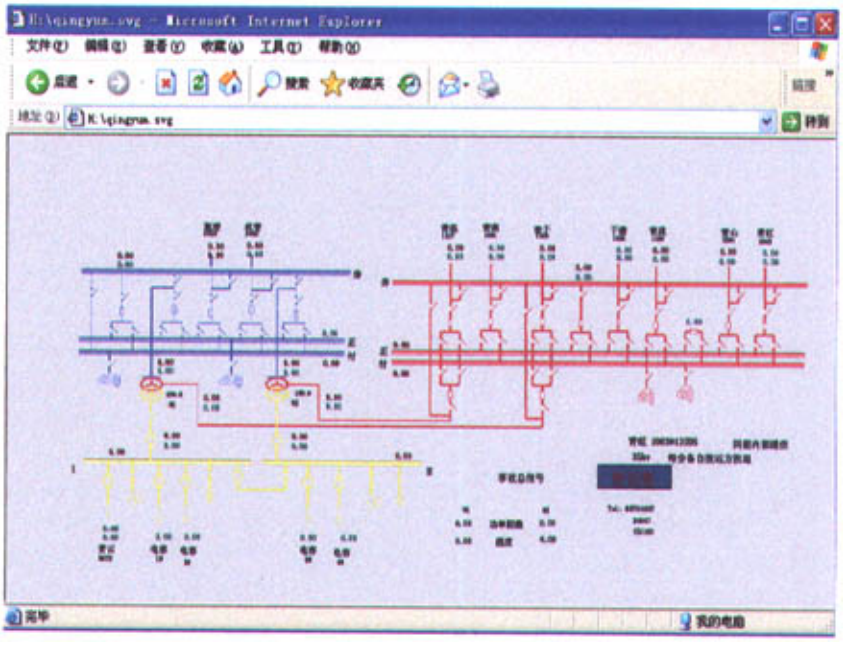


图 4.3 青云变一次接线图

4.2 节点电压等高线

节点电压属于电网的节点数据，相对于线路数据可视化表达较为困难，因为他是离散的，在现实世界中没有普遍被接受的概念与其对应。

节点数据目前一般都是采用表格数据形式或在电网接线图的相应节点上用文本方式显示。其优点是数据显示准确，也能清楚地描述数据地地理分布情况，缺点很难能清晰地反映越限情况和节点数据分布模式，当系统规模变大时上述问题尤为突出。节点数据文本显示方式尽管十分准确，但是并不直观。以节点电压为例，一般电力系统调度人员希望能一眼就看出整个系统的电压分布，显然上述文本显示方式难以满足要求。

文献[18]提出的双色矩形描述方式可较好地解决上述问题。该描述方式用矩形柱表示电压情况，如图 4.4(a)示例的矩形，就像水杯中注入水量的情形，中间的两色之间分界线表示正常电压情况，杯顶一般对应电压标幺值 1.05，杯底对应 0.95，中间对应额定电压。图中上部为绿色，下部为蓝色，这就好像在绿色杯子中注入蓝色的水。图 4.4(b)矩形为绿色，表示杯中没有水，对应电压越下限。图 4.4(c)矩形为蓝色，表明水满溢，对应为电压越上限。越上、下限部分的颜色可以相同或者用不同颜色突出越限情况的严重程度。

作为一种节点数据显示方式，双色柱图显示在一般规模的电力系统中的应用效率很高，但其在大规模电力系统中的应用会出现问题，当节点增多时，矩形柱可能会出现交叠。虽然减小矩形图标面积可以一定程度避免交叠情况出现，但是还是会存在由于矩形柱拥挤而造成视觉错觉的问题。例如：某一小区域节点电压普遍偏低，而同时某一较大区域节点电压普遍偏高，这时的情形会出现两个区域绿色面积大小相当，则会造成这两个区域电压水平相同的错觉。为了解决上述问题，文献[27]提出了采用颜色标度来表示电压大小的解决方法。该方法中节点数据数值大小由矩形柱的颜色来反映。屏幕中放置一个色卡来提示各种颜色所对应的数值大小。如图 4.5 所示色卡，定义了相应电压水平的颜色。

可以想象，随着系统规模的增加，表示电压大小的矩形柱越来越小，矩形柱之间也越来越紧密。当矩形柱小到一定程度时，这时看上去系统电压水平的显示是连续的颜色标度显示。这就是利用等高线(contouring)方法来描述电压分布的基本思想。

(a)双色矩形描述 (b)电压越下界 (c)电压越上界

图 4.4 双色矩形电压描述法

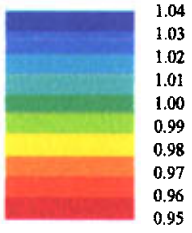


图 4.5 电压水平色卡

所谓利用等高线来描述电压分布的方法就是用颜色等高线图(color contour map)来显示电压分布，该显示方法类似于温度的等高分布。由于电网节点数据是离散分布的量，可以参考可视化方法中离散标量场等值线的生成方法，做电压等值线。

4.2.1 等值线分析模块

目前讨论电压等值线实现的文献较少，文献[23]提出了一种电压等值线的显示方法。它通过计算图中各关键点电压值，对非节点处电压利用距离加权的方法计算其电压值，最后用不同的颜色标示相应的电压值。此方法虽有较好的显示效果，但不适用于矢量图形的表现。因此本文参考离散场数据等值线获取方式[5][6]，采用基于三角网格的等值线实现方法，具体步骤如图 4.6 所示。

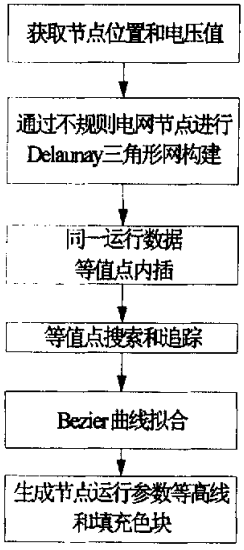


图 4.6 电压等值线生成步骤

对图 4.6 的步骤解释如下：

（1）获取节点位置和电压值。基于第三章提出的 SVG 图形文件结构，电压节点位置信息和节点电压值信息分别储存在 SVG 图形文件和外部数据文件或数据库中，因此首先要根据需要分析的地域或者电压等级等条件将相关的位置信息和电压数值提取出来，存放在简单链表中。

（2）生成 Delaunay 三角网格。根据上一步骤提取的节点位置信息形成 Delaunay 三角网格。

（3）等值点插值。根据给定的电压值采用线性插值的方法对三角网格的各个边插值，将插值生成的等值点存入等值点列表中。为了避免等值线从三角网络的节点穿过，对于节点电压等于给定电压值的情况做一定的数学处理，即将该节点电压减去一个很小的正数，以保证等值线从三角网络的边穿过并且不影响电压分布情况的准确性。

（4）等值点搜索和追踪。对等值点列表处理，根据三角网格的拓扑关系顺序的找出同一等值线上的等值点。

（5）Bezier 曲线拟合。由于 SVG 目前仅提供了贝赛尔二次、三次曲线和椭圆曲线这几种曲线表现形式，因此在对每组等值点进行曲线拟合时本文采用了贝赛尔三次曲线拟合[24]。

（6）等值线生成并填充颜色。等值线生成后根据电压的高低分层着色。最

后生成的分析结果也用 SVG 格式表示。

4.2.2 电压等值线工作流程

电压等值线高级应用模块的工作流程如图 4.7 所示。

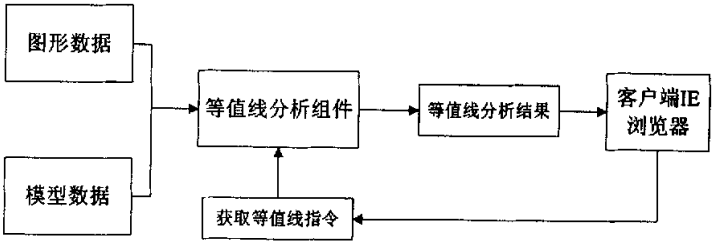


图 4.7 电压等值线的应用流程

服务器启动时，客户端访问电压等值线服务之后，给出需要做等值线的电压等级、区域等信息，通过图形显示接口就可以根据电压等值线分析产生的结果在电网接线图上渲染等值线，通过图形可以直观地了解当前的网络电压分布状况。在图形中可选择不用电压等级的等值线绘制，电压等值线分析组件随之进行可视化分析，并对图形重新进行绘制获得新的等值线图。另外，可以通过 CIS 规范中的高速数据接口，订阅遥测数据，一旦其发生改变，CIM 数据服务器会迅速地通知交互平台，平台就可以根据这些数据重新进行电压等值线计算分析，从而实时的更新图中电压分布情况，使运行人员可以及时了解电压分布情况的变化，帮助预测可能发生的越限情况。

4.2.3 实例

图 4.8 为浙江省电网某时刻电压等值线分布情况示意图，从图中可以看出浙江省的北部个别地区（杭州附近）电压偏低（图中深色处），南部有一狭长地区（温州附近）的电压也较低，其他区域相对较好。这和实际情况符合，因为上述地区正好是一些大的负荷中心，电压要低于其他区域。由此可见电压等值线能够清晰的描述网络电压的分布情况，对于这一时刻电压过低地区一目了然。如果出现电压越限情况，还可以通过程序进行重点提示。

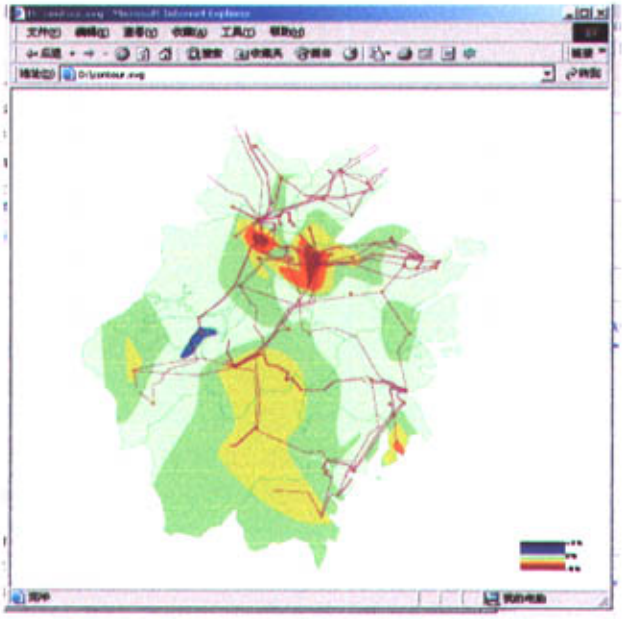


图 4.8 电压等值线

电压等值线这种节点数据的可视化显示分析方法不仅适用于节点电压的可视化显示，同时也可用于节点电价、线路负载情况、功率传输分布系数等节点数据的可视化显示。

4.3 电网潮流示意图

潮流示意图主要用于显示系统潮流的分布状况。结合某一区域的地理特征，潮流示意图可以形象地描述区域内潮流大小和方向。

4.3.1 电网潮流示意图

电网潮流示意图绘制流程如图 4.9 电网潮流示意图绘制流程所示。服务器启动时，客户端访问此项服务之后，给出需要描绘潮流的线路信息，图形显示接口就可以根据从 CIM 数据服务器中获取的相应潮流，通过可视化平台分析生成潮流示意图形的 SVG 文件，返回客户端。用户在客户端浏览器即可看到潮流示意。

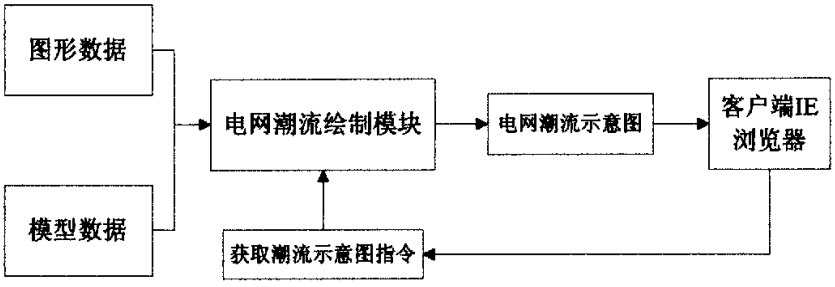


图 4.9 电网潮流示意图绘制流程

潮流的描述方式可以根据用户需要进行定义，例如使用沿线路流动的箭头表示，线路的粗细和箭头的大小表示潮流绝对数值的大小，箭头方向以及箭头流动方向表示潮流方向。同样，可以通过 CIS 规范中的高速数据接口，订阅遥测数据，一旦其发生改变，CIM 数据服务器可以迅速地通知交互平台，平台就可以根据这些数据重新进行渲染潮流示意图。

4.3.2 实例

图 4.10 显示了浙江电网某一时刻断面潮流的分布情况，图中线路的粗细表征流过该线路的潮流大小，线路上箭头表示潮流方向。结合图 4 同一时刻的电压等值线图，流向杭州地区的两条 500kV 主干线路（一条是外省往杭州方向，一条是宁波往杭州方向）的潮流较大，这和实际情况是符合的。利用 SVG 的动画功能，表示潮流方向的箭头可以沿线路移动，可以更加直观的表现潮流流动的方向感和各线路潮流相对大小。

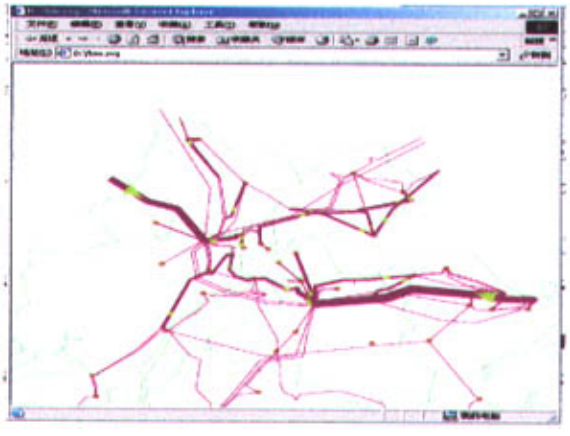


图 4.10 浙江电网某一时间断面潮流分布情况（部分）

第五章 基于一次接线图的可视化应用

上一章所介绍的基于地理接线图的可视化应用主要体现在对电网运行的整体情况的分析，例如电压分布情况等，而系统一次接线图更多是关注系统和厂站内具体设备的运行情况。在电网地理接线图中调出所需关注的一次接线图后，可以在该一次接线图上进一步做可视化分析应用，例如厂站内设备运行情况的动态着色、变压器或线路负载率的显示、预警等。

5.1 动态着色

动态着色是指利用电网拓扑结构分析结果，在一次接线图上根据设备电压等级、实际运行状态（带电状态）用规定颜色、图标显示设备状态，并根据遥信值的改变实时改变设备显示情况。该应用功能的实现基础是电网拓扑结构分析。

在本文所应用的公共交互平台上，拓扑分析所需的数据都已完备，整个动态着色过程分为两个阶段：根据电网数据对电网模型进行拓扑分析取得系统拓扑结构；结合图形可视化，将电网模型中的图元进行动态着色。

利用 SVG 的交互性，用户还可以在一次接线图中改变开关的状态来人工触发改变网络的拓扑结构，预见网络带电状态的变化。

51.1 拓扑分析组件

电网拓扑分析就是根据电力网络中开关的开断状况，通过一定的算法计算出网络的实时结构拓扑，拓扑分析一般可分为三个过程：①连接关系分析：根据传导设备之间的连接关系，形成连接点模型；②厂站结线分析：根据开关的开合状态，确定连接点之间的联结关系，由连接点模型形成拓扑点模型；③系统网络分析：分析整个网络的拓扑点由闭合支路联接成多少个子系统（拓扑岛），由拓扑点模型形成拓扑岛模型。

对于连接关系分析，公共信息模型 CIM 已经定义了相应的类，读入即可，不需要另行处理。

在厂站结线分析中，原理上采用集合划分的方法，主要是根据开关的状态进行新拓扑点的生成或者已存在拓扑点的归并，最终形成一个完整的拓扑点——连接点关系模型的集合。这种算法虽然简单，但在具体实现的时候集合划分方法不可避免地要涉及到多重遍历，大大增加了运算时间，不适合实时分析的要求，需要做少许改进。

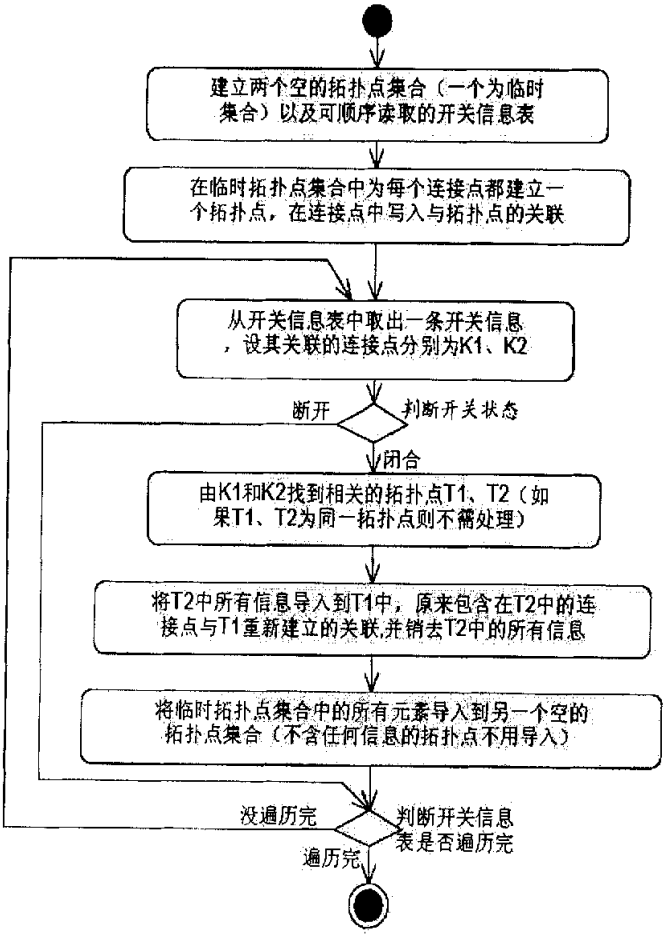


图 5.1　厂站结线分析流程

在集合划分方法中，由于拓扑点是动态生成的，连接点——拓扑点关联关系只能形成单向关联，即只在拓扑点中包含连接点的信息，因此在处理新的连接点信息时，必须遍历已生成的拓扑点集合去证实其是否已经关联了其中的拓扑点，无形中增加了大量的运算时间。而且在拓扑点归并过程中会涉及到拓扑点的消去，可能会带来潜在的隐患影响软件的运行安全

图 5.1 为改进以后的厂站结线分析流程，在改进后的方法中，先将所有的连接点都新建成各个独立的拓扑点，连接点中包含了与拓扑点的关联信息，在处理新信息的时候不需要再去判断此连接点关联的拓扑点生成与否，这样在归并拓扑点时就避免了遍历比较；在拓扑点归并过程中只消去拓扑点中的信息，而拓扑点对象依然存在，最后在进行一次总的导入，在安全性方面得到了很大的提高。

系统网络分析和厂站结线分析在思想上都是一致的，只是厂站结线分析建立在对开关的分析基础上，而系统网络分析是建立在对支路的分析基础上的，即将联络线、变压器、同步机、负荷以及电抗等支路设备视作闭合的开关，分析原理与厂站结线分析一致。

5.1.2 动态着色工作流程

动态着色高级应用模块的工作流程如图 5.2 所示。

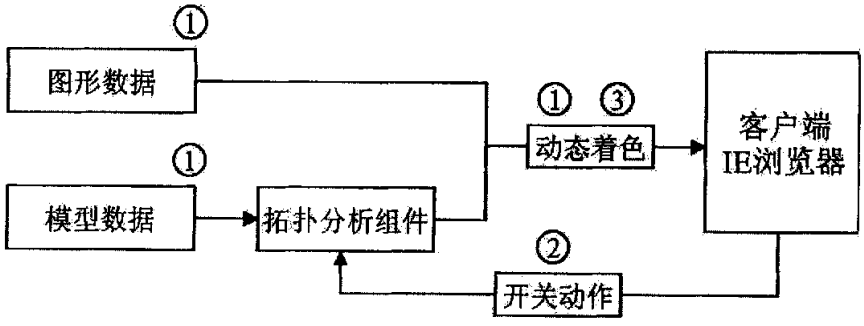
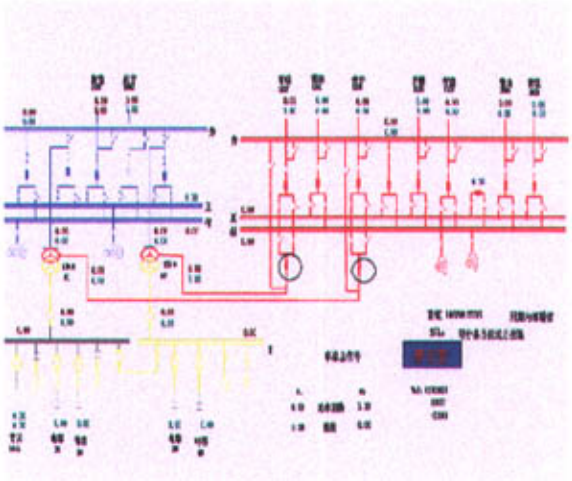


图 5.2　动态着色的应用流程

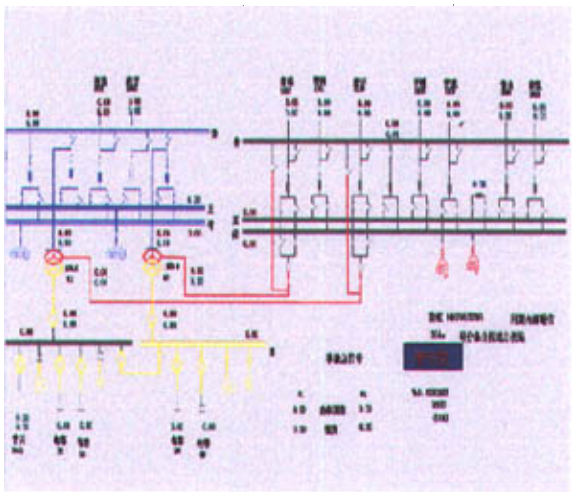
服务器启动时，读入模型数据到拓扑分析组件中并进行拓扑分析，客户端访问此项服务之后，图形显示接口就可以根据拓扑分析产生的结果对图元进行动态着色（步骤 1），通过图形可以直观地了解当前的网络带电状况。在图形中可离线进行开关的操作（步骤 2），拓扑分析组件随之进行快速拓扑分析结果，并对图形重新进行着色（步骤 3），由此可以预见网络所发生的状态改变。另外，可以通过 CIS 规范中的高速数据接口，订阅遥信数据，一旦其发生改变，CIM 数据服务器会迅速地通知交互平台，平台就可以根据这些数据改变相应的图元状态和颜色，图形就可以自动地实现动态着色。

5.1.3 实例

下面将以青云变厂站接线图为例说明设备动态着色的显示效果。图 5.2(a)显示了青云变厂站内某时刻的设备运行情况，其中用蓝色、红色和黄色分别表示220kV、110kV、35kV 电压等级，各电压等级母线带电情况一目了然。此时图中画圈的两个断路器处于闭合状态，利用 SVG 的交互性，在客户端通过脚本改变这两个断路器的状态，使其打开，图形自动更新为图 5.2(b)，断路器断开以后110kV 母线失电，图中显示为灰色。



(a)开关动作前



(b)开关动作后

图 5.2 动态着色演示图

5.2 电网运行状态监控

安全运行一直是电力企业的工作重点，其依据是从 SCADA 搜集的各种电力网络实时数据。在电网运行当中，比较关注的运行状态包括电网的带电状态、各种遥测数据是否越限等等。电网带电状态可以利用上一节的动态着色方式解决，本节主要阐述如何对各种遥测数据进行监控。

利用公共信息交互平台，通过数据通讯接口中的 HSDA 系列接口，可以高速地获得 SCADA 系统中不断刷新的遥测数据，从而进行实时的可视化分析生成相应的可视化分析图形。客户端通过通讯接口从服务器获得这些图形数据，并通过图形显示接口显示在图形上相应的地方，由于测量数据可通过订阅方式不断地刷新，因此可以在页面上实时地查看可视化分析结果，达到电网运行状态监控的效果。

图 5.3 青云变运行状态监视

本文以变压器负载率情况监控和输电线路负载率情况监控为例说明可视化方法在电网运行状态监控方面的应用。仍以青云变为例，图 5.3 显示了该厂站中变压器运行情况。图中用矩形柱来显示变压器的负载情况（标示于变压器旁边），一般情况下，变压器负载率低于 65%，视为运行负荷正常，矩形柱主体颜色为绿色（见图 5.3 中 1 号主变）。如变压器负载率超过 65%，用橙色矩形柱显示负载率（图 5.3 中 2 号主变），以提起警示。当变压器负载率超过 100%时，变压器边将出现一个红色警示图标，并将具体越限数值显示于图标边上。实际应用中，运

行人员更关注一段特定时间段内变压器负载情况，因此可以在变压器和线路附近添加变压器负载变化曲线。此外，对于运行人员所关心的变压器的油压、温度等情况也可以用相应的状态曲线显示于一次接线图中变压器附近。

线路负载情况监控也可以用类似的方法处理。图 5.3 中用饼图来显示厂站内线路负载率：负载率低于 65%时不显示，表示负载率正常；负载率超过 65%时用黄色饼图显示，负载率超过 100%时则用红色图标警示。

第六章 小结与展望

电力信息技术随着计算机技术的飞速发展，已经从原有的各个孤立系统逐步开始往集成化的方向发展，各个系统间需要共享资源来提高工作的效率和决策分析的准确性。如何解决电力系统中丰富的图形资源共享问题，进而在此基础上开发电力系统高级应用，是本文的一个研究重点。

通过将电力系统运行状态可视化系统中的图形数据采用 SVG 格式来进行图形数据的存储、传输和展现，可以有效地解决专有格式的位图图像在数据 Web 发布中的问题。同时 SVG 能够准确描述电力系统图元并提供精确的图形元素定位，非常适合描述地理接线图或者电网单线图，这就为用 SVG 来展示电网可视化的图形提供了可能性。

本文主要完成了基于 SVG 的可视化技术在电力系统中的一些基础应用，由于时间上的限制，部分工作还有待今后进一步的深入。首先，对于 SVG 图形资源的维护问题尚待进一步完善。本文中电网数据可视化所依据的地理接线图都是通过其他系统图形转换成 SVG 格式图形的方法获得。如果电网的接线方式有所改变，或者增加节点、线路，在这种情况下，如何方便的修改 SVG 图形是下一步研究所要解决的问题。较为理想的解决方式是增强 SVG 图形的编辑功能，使其能够直接在图形上进行修改。

其次，基于 SVG 的电网运行数据的可视化分析，除了用于数据显示，还可以更多的应用于运行环境监测、运行安全状态显示以及运行趋势预测以及等方面。利用 SVG 强大的动画和交互功能，能够用于表现区域负荷密度随气温变化而改变的过程，通过这一功能，运行人员可以根据气象预测信息预测负荷情况。此外，也可以利用 SVG 图形表现雷雨、台风等特殊气象可能对电网设备造成的影响，从而可以帮助运行人员及时处理发生的问题以及安排检修计划。这些功能的实现有待于进一步的研究试验，相信在不久的将来能够实现实际应用。

另外，GIS 系统的应用越来越广泛，它作为承载地理信息的信息系统，在电网参数管理、电网规划诸多方面有着很广阔的应用前景，因此，以 GIS 系统作为可视化应用的平台将成为趋势。 GML(Geography Markup Language)是基于 XML

的空间信息编码标准，由 OpenGIS Consortium (OGC)提出，得到了许多公司的大力支持，如 Oracle、Galdos、MapInfo、CubeWerx 等，它的目标是使得一个应用系统开发者能够从网上透明地获取任何空间数据和任何空间数据处理功能或方法，而不管它的数据格式和数据模型。GML 将空间信息和图形解释分离，同样式基于 XML 语言的 SVG 规范用于 GML 的图形解释是非常合适的。CIM 和 GML 的信息融合以及基于 SVG 的实现技术也许将成为电力系统可视化应用的重要发展方向之一。

参考文献

[1] 杨光（编译），电网可视化技术，国际电力，2004，8（2），45-47

[2] 陈传波，吴方文，基于 SVG 的图元对象描述模型的研究，华中科技大学学报（自然科学版），2002，30（10），50-52

[3] 石东源，卢炎生，王星华等，SVG 及其在电力系统软件图形化中的应用初探，继电器，2004，32（16），37-40

[4] 刘娆，李卫东，吕阳，电力系统运行状态可视化技术综述，电力系统自动化，2004，28（8），92-97，99

[5] 胡之武，邱家驹，王康元，电力系统节点运行数据等高线可视化实现方法，电力系统自动化，2005，29（8），55-59

[6] 刘树春，基于数据离散场等值线绘制的研究，淮海工学院学报，2002，11（2），12-15

[7] 孔炜，王文平，SVG 在发电厂设备在线状态图中的应用，工业控制计算机，2005，18（1）

[8] 王成山，许晓菲等，电力系统电压稳定域的局部可视化描述及其应用，电机工程学报，2004，24（3），1-5

[9] 陈玮，罗毅等，动态监视下电力系统状态的可视化，电力系统自动化，2004，28（8），68-71

[10] 徐云和，谢刚生等，基于 SVG 的空间数据的可视化，计算机应用研究，2005，2，46-48

[11] 张旭，尹振江，基于 SVG 的空间数据组织及 Web 表现的研究，计算机应用研究，2003，130-132

[12] 范庆春，可视化环境下的图形建模方法，安徽电力职工大学学报，2003，8（3），31-33

[13] 韩祯祥，吕婕，邱家驹，科学计算可视化及其在电力系统中的应用前景，电网技术，1996，20（7），22-27

[14] 李清泉，谢智颖等，基于 SVG 的空间信息描述与可视化表达，测绘学报，2005，34（1），58-63

[15] 张洁，王康元，夏翔，基于SVG的电力图形资源描述研究，第20届高校电力系统年会论文集，2004年10月，河南郑州大学

[16] McCormick B H, DcFanti T A, Brown M D, et al. Visualization in Scientific Computing, 1989, 22(8):12-25

[17] Thomas J. Overbye, Jamie D. Weber, Visualization of Power System Data, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000, 1228-1234

[18] Pramod M. Mahadev, Richard D. Christie , Envisioning Power System Data : Concepts and a Prototype System State Representation, IEEE Transactions on Power Systems , 1993 , 8(3) , 1084-1090

[19] Thomas J. Overbye, et al, Visualization of Power Systems: Final Report , PSERC Publication , 2002

[20] Yan Sun , Thomas J. Overbye, Visualizations for Power System Contingency Analysis Data, IEEE Transactions on Power Systems , 2004, 19(4),1859-1866

[21] A P.Sakis Meliopoulos, George J.Cokkinides, A virtual Environment for Protective Relaying Evaluation and Testing, Proceedings of the Hawaii International Conference On System Sciences, 2001

[22] Sealable Vector Graphics (SVG) 1.1 Specification, http://www.w3.org/TR/SVG

[23] James D.Weber, Thomas J.Overbye, Voltage Contours for Power System Visualization, IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 404-409

[24] Philip J. Schneider, An Algorithm for Automatically Fitting Digitized Curves, Graphics Gems, 1990 , 612-626

[25] Ray Klump, Warren Wu, Greg Dooley, Displaying Aggregate Data, Interrelated Quantities, and Data Trends in Electric Power System, Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, 6-9, January, 2003, Big Island, HI, USA

[26] Raymond P. Klump, James D. Weber, Real-Time Data Retrieval and New Visualization Techniques for the Energy Industry, Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, 7-10 January 2002, Big Island, HI, USA

[27] Hirotaka Mitsui, Richard D. Christie, Visualizing Voltage Profiles for Large Scale Power Systems, IEEE Computer Applications in Power, 1997, 6, 32-37

[28] Su Jifeng, Jia Hongjie, Visualization of Voltage Stability Region of Bulk Power System,

IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 1665-1668

[29] Thomas J. Overbye et al, New Methods for the Visualization of Electric Power System Information, IEEE Symposium on Information Visualization, 2000, 131-136

[30] 袁泉，基于 SVG 的公共信息交互平台，继电器，2005，33（12），66-68

[31] 邱家驹，吴臻，李继红，基于地理信息系统的电网参数管理系统，浙江电力，2000，5，4-6

[32] 石教英，蔡立文编著，科学计算可视化算法与系统，科学出版社，1996 年 9 月

[33] 李晓梅，黄朝晖，蔡勋等，并行与分布式可视化技术及应用，国防工业出版社，6-8，2004 年 6 月

[34] Adobe SVG Viewer，http://www.adobe.com/svg/viewer/install/main.html

致谢

衷心感谢邱家驹教授和王康元老师对我的悉心指导和亲切关怀。在两年半的学习生活中，两位老师严谨踏实的治学态度、开拓进取的科学精神、诲人不倦的教学态度，给我留下了深刻的印象，尤其王康元老师带领我们深入到实际课题当中，学到了许多书本上所没有的知识，有力地促进了我学习、研究和动手能力的提高，我今后的工作生活都将受益匪浅。

在研究生学习阶段中，实验室里的袁泉、王轶文、仇宏祥、卞晓猛、周昊、李晓波、朱丽娟同学和室友刘华蕾、郭容、李明月给了我很多热情鼓励和无私帮助。藉此机会向所有帮助过我的老师和同学们致以诚挚的谢意。

感谢我的父母，一直以来是他们辛勤的工作给了我舒适的学习和生活环境；感谢我的家人和亲戚，是他们一直在背后默默支持我的学业。谢谢所有关心和帮助过我的朋友。
助过我的朋友。

张 洁

2006 年 2 月于浙江大学