

输电网单线图自生成的新方法

王治华¹, 董树锋², 张王俊¹, 王伟¹, 王彬², 刘锋², 何光宇²

(1. 上海市电力公司, 上海 200122; 2. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 提出了一种输电网单线图自生成的改进算法, 完善了节点布局的数学模型, 引入多目标以及分区约束项, 提出了一种适合求解该优化问题的遗传算法, 并设计了相应的交叉和变异算子。提出了走线过程中局部优化算法, 减少了线路之间的交叉。基于上述算法, 搭建了以 CIM/SVG 作为输入输出模式的图形系统, 具有良好的交互性和兼容性。对某实际电网进行了单线图自动生成, 计算效率和图形效果都满足工程实用的要求。

关键词: 单线图; 自动生成; IEC61970; CIM; SVG; 遗传算法

A new method for auto-generation of power grid one-line diagrams

WANG Zhi-hua¹, DONG Shu-feng², ZHANG Wang-jun¹, WANG Wei¹, WANG Bin², LIU Feng², HE Guang-yu²

(1. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An improved method for automatically generating one-line diagrams is presented. The model of stations' layout is improved by adding multiple objects and constraints. A genetic algorithm which is suited to solve this problem is designed. Crossover operation and mutation operation in the genetic algorithm make the result satisfy constraints naturally. Local optimization algorithms are used to reduce crossovers among lines. Based on the algorithms above, a graphic system is built using CIM/SVG mode as the input-output mode, which makes the system interactive and compatible. The application result of a real power grid network makes it clear that computing efficiency and graphic effect are good enough for engineering applications.

Key words: one-line diagram; auto-generation; IEC 61970; CIM; SVG; genetic algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0155-07

0 引言

单线图是调度员直观便捷地了解电网运行状态的重要平台和手段。目前输电网络单线图一般利用 CAD 工具手工绘制而成, 随着网络规模不断扩大, 系统维护工作量和成本日益增加。此外, 手动绘制的图形在不同的应用软件之间交互困难, 往往需要各自维护一套图形系统, 加大了开发和维护的成本, 也造成了图形数据冗余。单线图自动生成系统实现图形的自生成、自维护, 具有良好的移植性, 为提高电网调度自动化水平打下了基础, 目前国内外对此问题研究还较少^[1-7]。

Y.S.Ong, H.B.Gooi, C.K.Chan 和 B. Qiu 针对配电网的结构特点对单线图自动生成做了研究^[3], 但相关成果应用于具有复杂网络结构的输电网时效果不佳^[4]。文献^[5]将 CIM/SVG 引入到配电单线图自动生成系统中。文献^[6]针对输电网, 将单线图自生成

分解为节点布局和自动布线两个过程, 节点布局抽象为组合优化问题, 并采用罚函数法求解, 自动布线采用搜索法找寻路径, 取得了较好的效果。但在节点优化布局过程中没有考虑分区的约束, 布局结果往往不能满足调度员对于单线图上节点按分区分布的要求, 同时自动布线时优化目标为连线总长度最小, 这使得节点数目较多时布线过于紧密、交叉次数过多, 很大程度上影响单线图的美观实用。针对以上问题, 文献^[7]引入关键节点的地理信息, 使节点位置与其地理位置相一致, 但线路排布时优化目标仍局限于连线总长度最小。

本文完善了文献^[6]中节点布局的数学模型, 考虑了实际系统分区的特点引入了分区约束, 将节点布局问题转化为一个带约束的优化问题, 设计了适合于求解该优化问题的算法; 改进了线路排布时的路径搜索算法, 提出了走线过程中的局部优化算法, 进一步减少线路之间的交叉, 使图形更加美观。

1 节点布局

在 $m \times n$ 的网格上找到 b 个节点对应实际输电网的 b 个厂站, 称为一个布局 P 。空间存在一个布局集合 P_s , 节点布局就是找到一个布局 P_m , 使得节点之间的连线达到某个目标下的最优。

1.1 数学模型

定义函数 $f_1(P)$ 为节点之间连线总距离, 此时

$$f_1(P) = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b w_{ij} (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \quad (1)$$

式(1)中: (x_i, y_i) 是节点 b_i 的坐标; (x_j, y_j) 是节点 b_j 的坐标; w_{ij} 是节点 b_i 和节点 b_j 之间的线路条数。传统的节点布局问题数学模型可表示为:

$$\min f_1(P), P \in P_s$$

应用中发现以 $\min f_1(P)$ 作为优化目标得到的节点布局为了追求连线最短距离, 在节点数量较多时导致连线密集且连线之间交叉较多。

考虑布局的不同需求, 增加目标函数。比如节点之间尽可能直线相连, 则可定义 $f_2(P)$ 为总直线条数, 此时

$$f_2(P) = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b w_{ij} u_{ij} \quad (2)$$

式(2)中: $u_{ij} = 1$, 如果节点 b_i 和节点 b_j 纵向相邻或横向相邻; 否则 $u_{ij} = 0$ 。

同样, 节点连线折线段尽可能少, 可以定义 $f_3(P)$ 为直线条数和三端线之和:

$$f_3(P) = \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^b w_{ij} v_{ij} \quad (3)$$

式(3)中: $v_{ij} = 1$, 如果节点 b_i 和节点 b_j 可以用直线或三段线相连; 否则 $v_{ij} = 0$ 。

采用式(2)或式(3)时, 可用 $\max f(P)$ 作为目标函数。无论用哪一式作为优化目标都是大规模组合优化问题, 求解较为困难, 宜采用启发式算法求解。

考虑到实际输电网一般会按照地理位置分成多个区, 手工绘制的单线图也通常相应地将图分成多个区域, 因此设 z 个分区为 a_1, a_2, \dots, a_z , 则 $m \times n$ 网格由 z 个区域 r_1, r_2, \dots, r_z 与之对应。引入约束, 当节点 b_i 对应的厂站 i 属于分区 a_k , 布局必须满足 $b_i \in r_k$ 。数学模型为:

$$\min f_j(P), P \in P_s$$

$$\text{s.t. } b_i \in r_k, i \in a_k$$

1.2 遗传算法流程

遗传进化算法是模拟自然界进化中优胜劣汰的优化过程, 原则上能以较大的概率找到全局的最优解, 具有并行、通用、鲁棒性强, 全局收敛性好等优点^[4]。遗传算法的缺点是计算速度慢, 在节点布局优化这个问题上, 只要种群规模和最大遗传代数不太大, 计算速度可以满足在线应用的要求。本文采用的算法流程如图1所示。

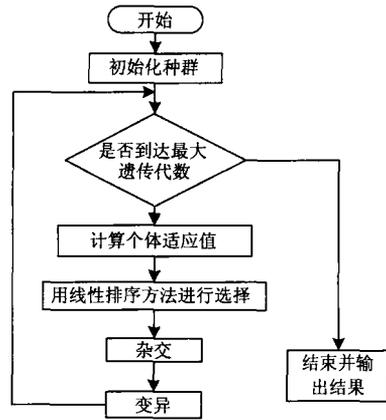


图1 遗传算法流程图

Fig.1 Flow chart of GA

1.3 编码和选择

节点布局 P 作为研究个体, 每个个体用一个二维数组 $a[b][2]$ 表示, $(a[i-1][0], a[i-1][1])$ 表示第 i 个节点在网格中的坐标。种群中每一个个体以一定概率被选中进行交叉, 被选中的概率与个体的适应值有关, 个体的适应值函数可以用式(1)、式(2)或式(3)。本文使用排序的方法计算个体被选中的概率, 设种群个体数目为 s , 适应值函数使用式(1)时, 将 s 个个体按从小到大的顺序排序, 当适应值函数使用式(2)或式(3)时, 将 s 个个体按从大到小的顺序排序, 排序后第 i 个个体被选中概率用式(4)计算。

$$pro = (1.1 - 0.2 \times i / (s + 1)) / s \quad (4)$$

1.4 交叉和变异

交叉和变异是遗传算法中最重要的算子, 本文设计了适用于节点布局优化问题的交叉和变异算子, 能够保证交叉和变异之后的后代满足约束 $b_i \in r_k$, 如果 b_i 对应的厂站属于分区 r_k 。

交叉算子: 选择两个个体 $a_1[b][2]$ 和 $a_2[b][2]$, 随机选择某一个区域设为 r_k , 属于 r_k 的节点集为 E ,

在 E 中依次取出节点, 将 $a_1[b][2]$ 和 $a_2[b][2]$ 中保存的坐标交换, 如式 (5) 所示。

Loop $i \in E$

$$\begin{aligned} tmpx &= a_1[i-1][0]; \\ tmpy &= a_1[i-1][1]; \\ a_1[i-1] &= a_2[i-1]; \\ a_2[i-1][0] &= tmpx; \\ a_2[i-1][1] &= tmpy; \end{aligned} \quad (5)$$

end loop

变异算子: 某一个个体 $a[b][2]$, 节点 i 属于区域 r_k , 随机从区域 r_k 中取出未被 $a[b][2]$ 中节点所覆盖的点 (x, y) , 令 $a[i-1][0] = x$, $a[i-1][1] = y$ 。

本文采用定常的交叉和变异概率, 交叉和变异发生的概率分别是 P_c , P_m 。

2 布线过程

第一部分介绍的节点布局优化算法是在一个全局优化目标下计算出每个节点的坐标, 这一部分介绍已知所有节点的坐标情况下的布线过程, 以及如何使用一些局部优化的方法减少线路之间的交叉, 使走线更加美观。

第 i 个节点 b_i 的坐标为 (x_i, y_i) , $0 \leq x_i \leq m$, $0 \leq y_i \leq n$, 第 j 个节点 b_j 的坐标为 (x_j, y_j) , $0 \leq x_j \leq m$, $0 \leq y_j \leq n$, 这两个节点之间有 w_{ij} 条线路相连, 以这两个节点为例说明布线过程。整个布线过程可以分为端口位置确定、连线类型确定、路径搜索和连线位置调整四个步骤, 本文采用文献[5]提出的路径搜索方法, 下面对其他三个步骤进行详细介绍。

2.1 端口位置确定

每一个节点在图中对应一个矩形, 第 i 个矩形与第 j 个矩形之间连接线的首末段称为出线端口。根据节点 i 和节点 j 的相对位置可决定出线方向, 即端口位于矩形的哪一条边上, 端口位置确定流程图如图 2 所示。

出线方向确定后, 根据节点该方向边上端口的数量, 计算端口之间的间隔, 进而确定端口的具体位置。为使相邻节点之间的出线端口在同一竖直线或同一水平线上, 选择间隔时应采用两节点计算间隔中的最小值。

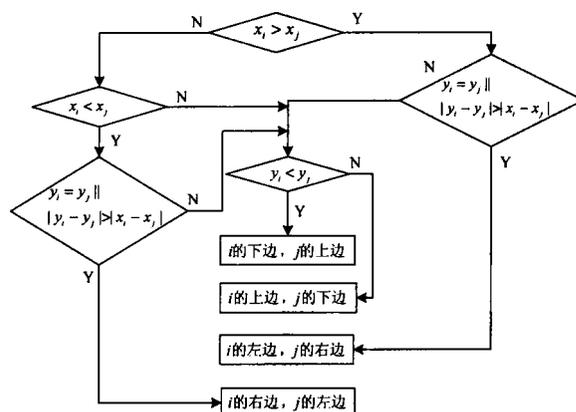


图 2 确定端口位置流程图

Fig.2 Flow chart of building terminal positions

2.2 连线类型确定

节点之间用三种线形连接, 分别是直线, 三段线和五段线, 如图 3 所示。

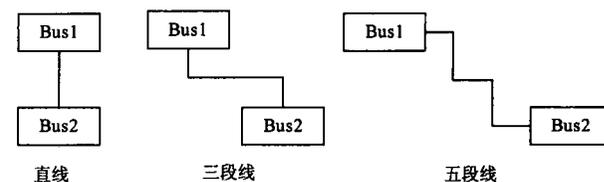


图 3 连接线类型

Fig.3 Type of lines

节点 i 和节点 j 如果横向或纵向相邻使用直线连接, 如果不相邻使用如下算法判断节点 i 和节点 j 之间用三段线还是五段线连接。

1) 根据节点 i 和节点 j 之间连接线端口所在位置确定搜索方向, 比如端口在节点 i 的左边沿, 节点 j 的右边沿, 则节点 i 往右搜索, 节点 j 往左搜索, 同时记录下 $d_{ij} = |x_i - x_j|$ 。

2) 记录下节点 i 与第一个找到的节点之间的距离为 d_1 , 如果在该方向上没有找到节点, $d_1 = +\infty$, 节点 j 与第一个找到的节点之间的距离为 d_2 , 如果没找到, $d_2 = +\infty$ 。

3) 如果 $d_1 + d_2 > d_{ij}$, 节点 i 和节点 j 之间用三段线连接, 否则, 节点 i 和节点 j 之间用五段线连接。

2.3 节点间连线位置调整

确定了节点 i 和节点 j 之间端口的位置和连接线类型之后, 可以用搜索法找出线路路径。如果两个节点之间有多条线路连接, 为了减少线路交叉, 需要进行局部优化。对于三段线, 如图 4 所示, 调整前的搜索顺序 1-4, 2-5, 3-6, 将搜索的顺序调整

为 3-6, 2-5, 1-4, 产生的路径之间就没有交叉。

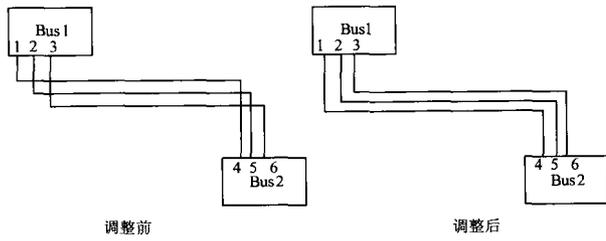


图 4 三段线的调整

Fig.4 Regulation of three section line

对于五段线, 无法适用改变搜索顺序的方法, 使用交换的方法进行调整。如图 5 所示, 将搜索结果 1-2, 3-4, 5-6 变换到新的 1-2, 3-4, 5-6 消除原来线路之间的交叉, 变换的算法如下:

线段 1-2, 3-4, 5-6 的横坐标保存在一个二维数组 $x[3][2]$ 中, 新的横坐标用 $newx[3][2]$ 保存, 设变量 $d_1=x[0][0]+x[2][0]$, $d_2=x[0][1]+x[2][1]$, 则 $newx[0][0]=d_1-x[0][0]$, $newx[0][1]=d_2-x[0][1]$, $newx[1][0]=d_1-x[1][0]$, $newx[1][1]=d_2-x[1][1]$, $newx[2][0]=d_1-x[2][0]$, $newx[2][1]=d_2-x[2][1]$, 变换之后纵坐标不变。将上面的变换推广到有 n 条线路连接的情况, 横坐标保存在 $x[n][2]$ 中, $d_1=x[0][0]+x[n-1][0]$, $d_2=x[0][1]+x[n-1][1]$, $newx[k][0]=d_1-x[k][0]$, $newx[k][1]=d_2-x[k][1]$, 其中 $k=1,2,\dots,n-1$ 。

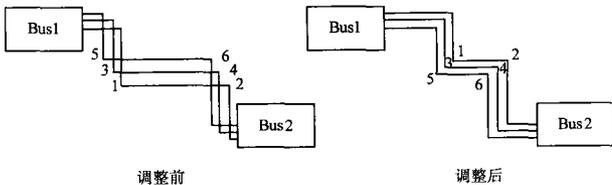


图 5 五段线的调整

Fig.5 Regulation of five section line

3 图形系统的搭建

本文基于上述算法设计了实用的图形系统, 该系统使用 IEC61970 标准定义的公共信息模型(CIM)^[4] 作为数据输入, 使用可扩展矢量图形(SVG)作为图形存储格式, SVG 是国际电工委员会确定的图形交换的标准格式^[4]。

3.1 基于 CIM 的模型输入

自生成算法需要获知厂站间拓扑关系, CIM 文件中则包含了设备及其关联关系的模型数据, 采用基于 CIM 的模型输入, 不仅能动态获得网络拓扑, 同时提高了图形生成系统的可移植性。

将拓扑关系描述为矩阵 A , A 的形式如式 (6)

所示, w_{ij} 是编号为 i 和编号为 j 的两个节点之间的连线条数。 A 矩阵是对角线元素都为 0 的对称矩阵, 而且一般情况下有很好的稀疏性。

$$A = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} & \cdots & w_{1b} \\ & & & & \\ & & w_{ij} & & \\ & & & & \\ & & & & w_{bb} \end{bmatrix} \quad (6)$$

基于 CIM 形成 A 矩阵的步骤如下:

1) 解析描述 CIM 的 XML 文件, 并在内存中形成一套 CIM 标准定义的对象。

2) 找出所有 CIM 核心包中的 Substation 对象, 设一共有 b 个, 从 1~ b 进行编号, 置 A 矩阵所有元素初值为 0。

3) 找出所有 CIM 电线包中的 ACLineSegment 对象, 遍历所有 ACLineSegment, 找出该 ACLineSegment 两端的两个 Substation, 设这两个 Substation 的编号分别为 i 和 j , 使 $w_{ij} = w_{ij} + 1$ 。遍历结束后 A 矩阵自动生成。

算法的另一个输入是分区信息, 通过人机交互界面输入。

3.2 使用 SVG 格式存储图形

SVG 是 W3C 组织推出的开放的基于 XML 的二维图形描述语言, 非常适合数据交换和图形转换, 在电力系统也有广泛应用^[3]。使用 SVG 存储自生成的图形, 可以方便地和现有调度自动化应用软件集成, 大大提高了灵活性和兼容性。

本文设计的系统自定义了一套内部类表示基本图元(矩形、圆、椭圆、弧线、直线和多边形), 并用这些类的组合表示复杂图形, 使用 Java2D 技术将图形输出到 Swing 组件, 同时将内部类输出到 SVG 格式文件进行图形存储。使用开源软件包 batik 中的 SVG DOM 解析来实现图形读取。图形系统支持图形的任意比例缩放以及图形自动生成后用鼠标拖动的方式对图形进行调整, 每次用鼠标拖动节点后自动进行重新布线。系统的界面见附录中图 1。

4 算例

用本文提出的方法对某实际输电网络进行了单线图自动生成的测试, 该实际输电网络包括 75 个厂站, 205 条线路, 并分为 7 个子分区。本文自生成了 7 个分区单线图和 1 个全网单线图, 附录中图 2~4 给出了部分自生成图形。表 1 给出了节点布局优化

算法的一些参数。

表 1 遗传算法的参数

种群个体数目	100
最大遗传代数	50
杂交概率 P_c	0.8
变异概率 P_m	0.05

采用式 (2) 作为个体的适应值函数, 图 6 显示了种群平均适应值随遗传代数的增加的变化情况。整个图形的生成在 CPU 为 Pentium(R) 4, 主频为 3.00 GHz, 内存容量为 1 GB 的个人计算机上, 用时 1.25 s (不包括解析 CIM 文件的时间)。

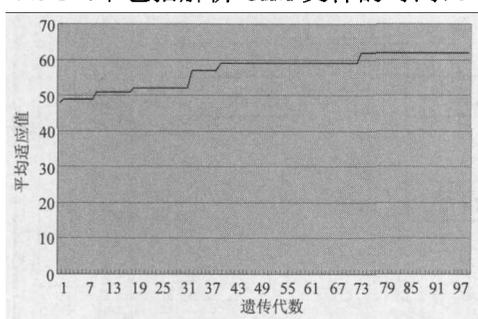


图 6 种群平均适应值曲线图

Fig.6 Curve of population average fitness

5 结论

通过实际输电网络单线图自动生成的实验表明, 本文提出的节点布局改进模型以及走线局部优化算法能够克服原有算法的局限性, 更有效地生成美观、清晰的单线图。通过合理设计遗传算法中交叉和变异算子, 在单线图上将厂站分布在对应分区中, 符合调度员看图的习惯。图形系统采用 CIM/SVG 模式实现模型输入和图形输出, 具有很好的移植性。在效率上, 单线图的生成在 1.3 s 内就可完成, 完全满足工程使用的要求。

参考文献

- [1] One Y S, Gooi H B, Chan C K. Automatic generation of one-line diagrams[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission, and Distribution, 147 (5) : 292-298.
- [2] Walker J Q. A node-position algorithm for general trees[J]. Software Practice and Experience, 1990, 20(7): 685-705.
- [3] Qiu B, Gooi H B. Web-based SCADA display systems (WSDS) for access via internet[J]. IEEE Trans on Power Systems, 15 (2) : 681-686.
- [4] Qiu B, Gooi H B. Development of java based SCADA display system(JSDS) for access via internet[C]. // Proceeding of ARC Workshop on Emerging Issues and Method in the Restructuring of the Electric Power

- Industry. Perth (Australia): 1999.
- [5] 章坚民, 楼坚. 基于 CIM/SVG 和面向对象的配电单线图自动生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 65-69. ZHANG Jian-min, LOU Jian. Automatic generation of single-line diagram for distribution feeder system based on CIM/SVG and object-oriented design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (22): 65-69.
- [6] 宋适宇, 何光宇, 徐彭亮, 等. 输电网单线图的自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (24) : 12-15. SONG Shi-yu, HE Guang-yu, XU Peng-liang, et al. Automatic generation of single-line diagrams for transmission networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (24) : 12-15.
- [7] 徐彭亮, 何光宇, 梅生伟, 等. 基于地理信息的输电网单线图自动生成新算法[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 13-16. XU Peng-liang, HE Guang-yu, MEI Sheng-wei, et al. Application of geographic information in automatic generation of single-line diagrams for power transmission networks[J]. Power System Technology, 2008, 32 (21): 13-16.
- [8] Kiump R, Schooley D, Overbye T. Advanced visualization platform for real-time power system operation[C]. //Proceedings of 14th Power System Computation Conference. Sevilla(Spain): 2002.
- [9] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算[M].北京: 清华大学出版社, 1998. PAN Zheng-jun, KANG Li-shan, CHEN Yu-ping. Genetic algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [10] 张慎明, 刘国定. IEC 61970 标准系列简介[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14) : 1-6. ZHANG Shen-ming, LIU Guo-ding. Introduction of standard IEC 61970[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (14) : 1-6.
- [11] 董朝霞, 戴琦, 杨峰. 基于 CIM 和 SVG 的电网建模技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (5) : 58-61. DONG Zhao-xia, DAI Qi, YANG Feng. Power network modeling method based on CIM and SVG[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18 (5) : 58-61.
- [12] 李亚平, 姚建国, 黄海峰, 等. SVG 技术再电网调度自动化系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 80-82. LI Ya-ping, YAO Jian-guo, HUANG Hai-feng, et al. Application of SVG in the dispatching automation system of power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (23) : 80-82.
- [13] 王康元, 张洁, 朱丽娟. 基于 SVG 的电网数据可视化图形描述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 84-87. WANG Kang-yuan, ZHANG Jie, ZHU Li-juan. SVG-based power grid data description and visualization[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2006, 18 (5) : 84-87.
- [14] 冒宇清, 唐晓莉, 姜彬. 基于 SVG/Web Service 的 Web

监控技术在 EMS 中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 91-96.

MAO Yu-qing, TANG Xiao-li, JIANG Bin. Application

of web monitoring technique based on SVG and web service in EMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 91-96.

附录A

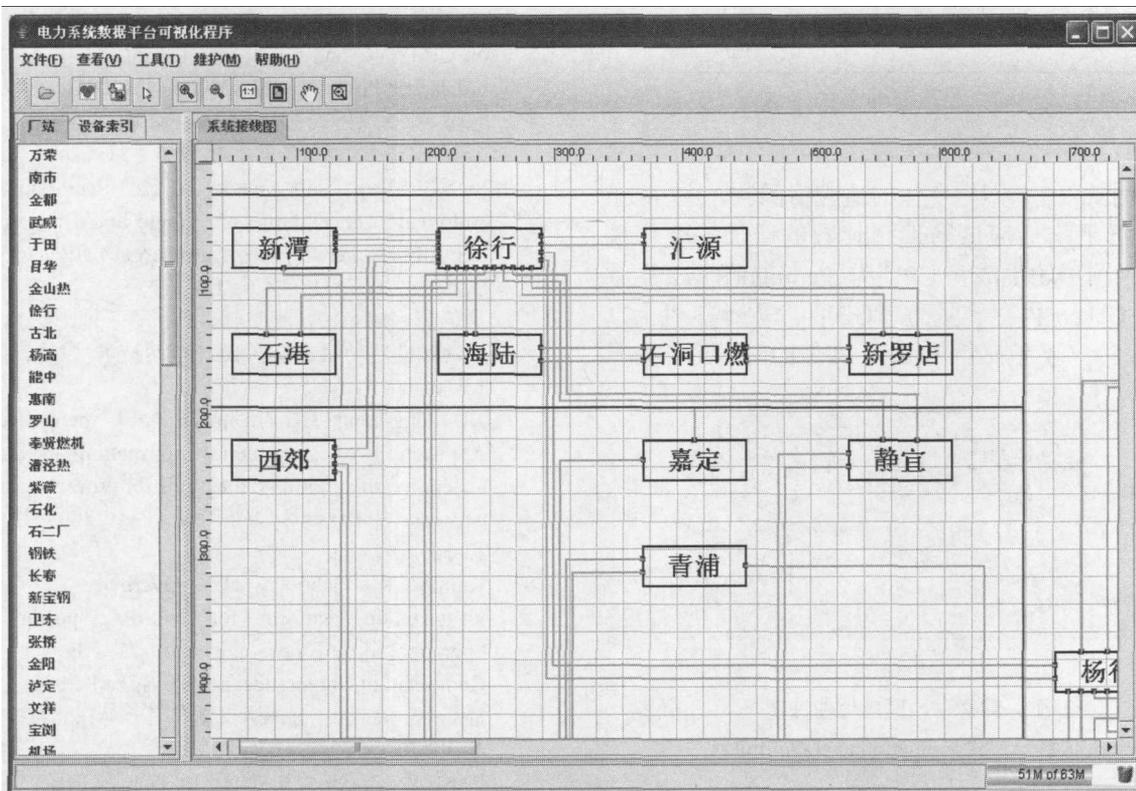


图 1 电力系统可视化系统界面

Fig.1 Interface of power system visualization system

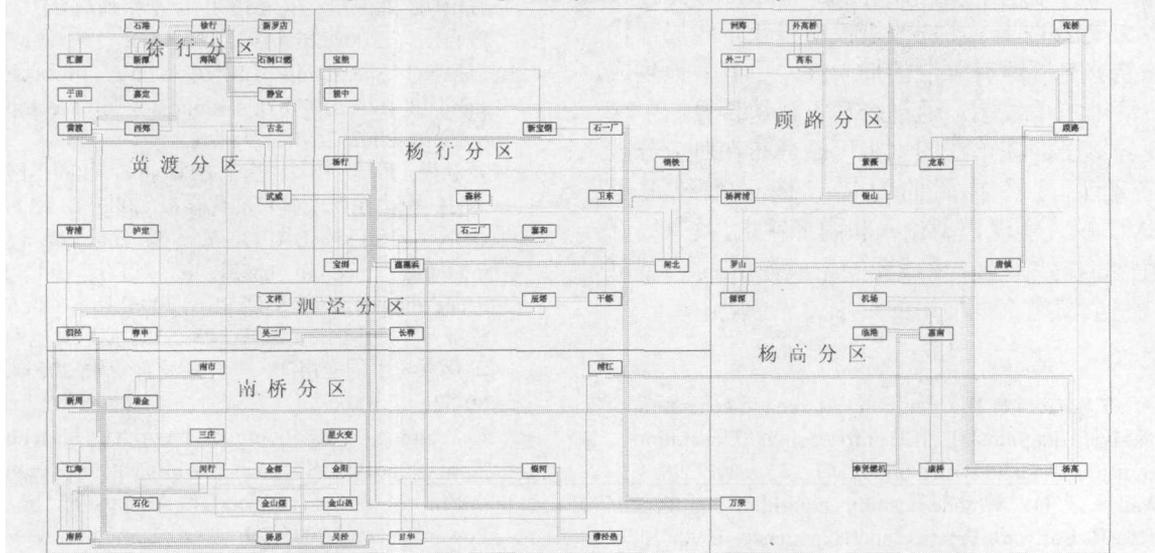


图 2 自动生成的某实际运行电网单线图 (75 个节点, 205 条支路)

Fig.2 One-line diagram of network of Shanghai power grid, China (75 buses, 205 branches)

