

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.05.014

基于分区和变电站内外模型的区域电网单线图自动生成

章坚民<sup>1</sup>, 方文道<sup>2</sup>, 胡 冰<sup>2</sup>, 徐冠华<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江省杭州市 310018; 2. 杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江省杭州市 310018)

**摘要:** 区域电网系统单线图将变电站接线图与站间线路连接在同一个平面展现。以 110 kV 地区电网为例, 首先利用其 220 kV 变电站为电网枢纽, 辐射状连接 110 kV 变电站的特征对全网进行分区。提出了使区块内变电站数量较均匀, 区块间的联络线尽可能少的分区方法。对变电站内、外模型图形进行设计。区块内布局布线问题转化为 2 个无耦合的顺序阶段求解: 以线路交叉数和线路曼哈顿距离的加权最小为目标函数, 运用改进的粒子群算法进行变电站外模型元件的优化布局, 然后进行走线; 若变电站同母线出线位置可调, 则内模型图形可进行站内出线位置调整, 否则可直接嵌入到前阶段成果外模型图形的方框内。

**关键词:** 区域电网; 单线图; 电网分区; 变电站内模型图形; 变电站外模型图形; 元件自动布置; 自动布线

0 引言

区域电网系统单线图<sup>[1]</sup>将变电站内的一次图和变电站出线的连接线路布置在同一个平面图上, 在区域调度智能开票、调度操作、基于全网包括变电站设备运行监视等方面有着特殊的用途, 是电网运行、检修、调度等专业很重要的图纸。随着电网规模的不断扩大, 手工绘图与维护工作量大且易出错, 研究自动成图显得更加必要。

国内外关于区域电网系统单线图的研究较少, 文献[1]提出了一种地区电网运行单线图的自动智能布局算法。但这种布局走线方法对小规模的电网布局效果较好, 一旦电网规模扩大, 变电站及线路增多, 则布局效果就不是很理想。

大规模区域电网变电站节点和线路数量均很大, 直接进行优化布局, 难度较大。以地区电网为例, 220 kV 变电站是 110 kV 电网的枢纽, 呈辐射状连接 110 kV 变电站, 不同 220 kV 变电站所连接的 110 kV 变电站群之间往往没有线路连接或者连接线路很少, 这些均为地区电网分区提供了依据。因此, 大规模地区电网优化布局布线问题可以转化为地区电网分区和区块内的变电站优化布局布线 2 个步骤。

1 基于地区电网特征的电网分区

地区电网分区的好坏会直接影响到最后的布局

布线效果。因此, 电网分区时应该满足以下要求: ①各个区块内变电站规模较为均匀; ②各个区块之间的联络线尽可能的少; ③同时也要考虑变电站的相对地理位置。

以某实际地区电网为例进行分区降维。该地区有 220 kV 变电站 16 座, 110 kV 变电站 51 座。分区的具体步骤如下。

步骤 1: 初步分区, 以 220 kV 变电站作为分区依据, 因此划分为 16 个区块, 如图 1 所示(区块以 A, B 等字母命名, 区块括号内的数字为该区块所包含的变电站的数目)。可知: ①区块过多; ②区块内的变电站数量很不均匀, 比如 B 区包含了 6 个的变电站, 而 C 区只包含了 1 个。因此, 需要进一步的归并, 以达到分区的目标。

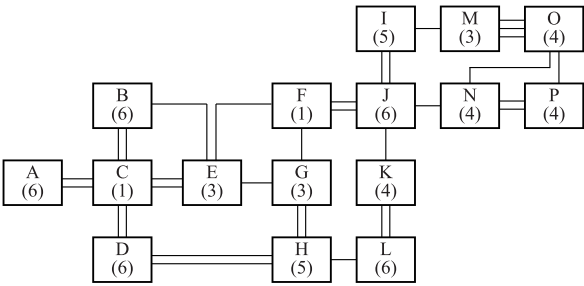


图 1 某地区 220 kV 变电站分布示意图  
Fig. 1 Distribution diagram of 220 kV substations in an area

步骤 2: 按区块间关联强度进行区块归并。区块间的关联强度定义为区块之间的线路数量, 关联强度大的 2 个区块可以归并为 1 个, 归并的同时还

要以区块内变电站规模作为 2 个区块是否合并的标准,一般 1 个区块内的变电站数量以不超过 15 个为宜。图 1 中,M 区与 O 区之间有 3 条联络线,归为 1 个区块;N 区和 P 区之间有 2 条联络线,归为 1 个区块;J 区和 I 区、F 区都有 2 条联络线,归为一个区块;K 区和 L 区有 2 条联络线,归为 1 个区块。归并后的结果如图 2 所示。

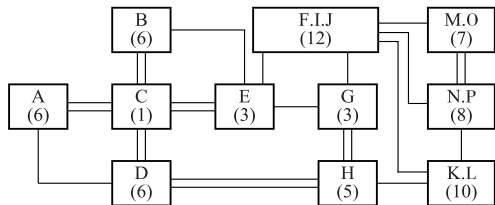


图 2 按照关联强度进行区块划分结果示意图  
Fig. 2 Diagram of zoning according to association strength of blocks

按照步骤 2 分区的时候会面临这样的情况: 1 个变电站与多个变电站都有相同的关联强度。如图 2 中,C 区分别与 A 区、B 区、D 区、E 区都有 2 条联络线,D 区又与 H 区有 2 条联络线,而将它们几个区块进行归并则区块略显庞大,所以要进行拆分。

步骤 3:按区块规模和关联强度进行选优归并。选优归并先从规模最小的区块开始,依次纳入关联最紧密的区块。由图 3(a)可见,C 区的规模最小,但由于 C 区与 4 个区块都有相同大小的关联强度,因此,先不对它归并,从与它连接的 4 个区块中挑选出最小的区块进行归并,此处为 E 区(若相连接的几个区块联络强度相同,区块规模也相同的话,则优先选择出线最多的区块)。与 E 区关联最紧密的区块为 C 区,则将它们归并为同一个区块,归并后为区块 C.E,规模大小为 4,见图 3(b),至此归并进行 1 次。接着继续挑选规模最小的 G 区进行同样的操作,H 区与其关联最为紧密,则将它们进行归并,合并后区块为 G.H,规模大小为 8,见图 3(c)。类似的方法,逐步挑选出剩余区块中规模最小的区块重复上述操作,直到进一步的归并使得某一区块规模过大(超过 13),则分区结束,即图 3(d)。至此归并结束,整个地区电网被划分为 8 个区块。

步骤 4:区块的进一步调整。电网分区的一个重要的考虑因素是分区后的变电站地理相对位置应该尽量不变或变化不太大,以最大程度满足调度人员的习惯。本文结合变电站的实际地理位置和区块之间的联络线指标,把 F.I.J 区块划分为 F.I 区和 J 区。至此,整个地区电网分区结束,全网分区后的布局图如图 4 所示。可见,最终分区的效果良好,区块间的联络线不多,线路清晰,区块大小较为均匀。

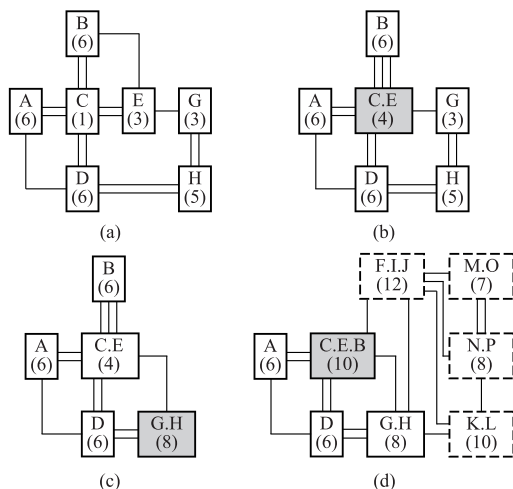


图 3 区块拆分过程  
Fig. 3 Block splitting process

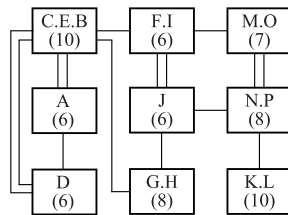


图 4 地区电网分区后的区块布局  
Fig. 4 Layout of blocks of regional power grid

## 2 区块内变电站优化布局

### 2.1 布局的基本思路

区块内变电站优化布局就是在给定的矩形空间内布置变电站,使得变电站之间的连接线路的总长度最短,并且线路交叉点数最小。

### 2.2 变电站图形模型的建立

变电站是电网系统单线图最核心的部件,本文借鉴内模型和外模型<sup>[2]</sup>概念进行描述。

1) 变电站图形外模型,以方框和进出线描述(见图 5)。外模型一般只显示本级及上级 2 个电压等级的进出线即可,按规则布置在变电站方框上方的左、右两侧。

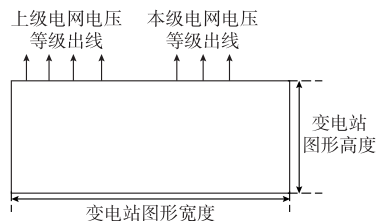


图 5 变电站外模型  
Fig. 5 External model of substation

2) 变电站内模型图形, 即描述变电站内一次主设备连接的单线图。一般变电站具有 3 种电压等级及以下(厂用电除外)的主设备连接, 如图 6 所示的布置模型具有通用性; 其高度可以统一, 而其宽度主要与上级、本级电压等级的线路间隔、主变压器间隔数量有关。

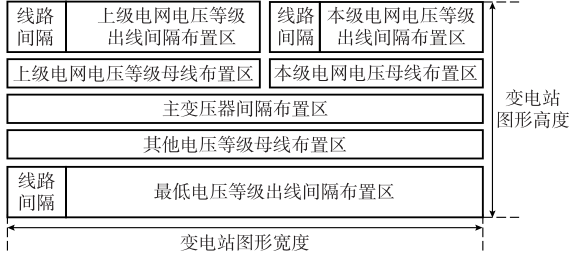


图 6 变电站内模型的布置原则  
Fig. 6 Layout principle of internal model of substation

### 2.3 目标函数

根据以上分析可知, 基于变电站外模型的变电站布置和线路布线算法, 是生成电网系统单线图的核心。对于较大规模的复杂网络, 如果交叉点数多了, 即使线路长度很短, 对单线图的分析影响也很大, 因此以“变电站均匀分布, 线路交叉尽可能少, 在交叉点数尽可能少的情况下线路长度最短”为主要布置布线原则。本文将线路的交叉点数和线路曼哈顿距离综合起来作为目标函数。

### 2.4 基于变电站外模型的变电站布置

#### 2.4.1 系统单线图数学模型

##### 1) 变电站

$$\text{Sub}_j(i, p, k, m_j, n_j) = \text{Sub}(\text{SubID}(j), \text{Source}(i), \text{District}(p), \text{Voltage}(k), x_j, y_j) \quad (1)$$

式中: SubID 为变电站的标识码;  $j$  为变电站序号; Source 为变电站的所属控制分区属性;  $i$  为分区编号; District 为变电站的属地公司属性;  $p$  为属地公司编号; Voltage 为变电站最高电压等级属性;  $k$  为电压等级编号;  $x_j, y_j$  分别是变电站图形左上角在图纸上的坐标, 是本问题需要求解的量;  $m_j$  为该变电站所分配到的条数;  $n_j$  为该变电站在第  $m_j$  条中分配到的块的顺序。

##### 2) 线路

$$\text{Line}(q) = \text{Line}(\text{LineID}(q), \text{Voltage}(k), \text{SubID1}(j), \text{SubID2}(r), x_{1j}, x_{2r}, \text{Cline}()) \quad (2)$$

式中: LineID 为线路标识码;  $q$  为线路序号; Voltage 为线路电压等级属性; SubID1 为该线路的起端变电站标识码, 对应变电站序号  $j$ ; SubID2 为该线路的末端变电站标识码, 对应变电站序号  $r$ ;  $x_{1j}, x_{2r}$  分别为该线路的 2 个端点对应变电站内模型图形的内

部横坐标, 本文将变电站内部的一次接线图视为已标准化的图形, 即  $x_{1j}, x_{2r}$  预先可知; Cline() 用于描述线路系统单线图。

Cline() 与 2 个变电站是否同层(采用双折线)还是异层布置(采用四折线)、变电站布局后的位置和线路在变电站内模型的坐标均相关, 是本问题需要求解的量。

#### 2.4.2 图纸布置及变电站定位

借鉴文献[1]的电网系统单线图的布置示意图(见图 7), 但采用电路元件与印制板的布置描述: 变电站的外模型长方形, 具有统一固定长度  $H_g$ , 其宽度与变电站内模型布置有关, 可事先获得。对宽度进行规整化, 即选定一个单位长度  $W_g$ , 变电站  $j$  的宽度转化为该单位长度的倍数  $N_j$ , 因此变电站外模型可以当做带  $H_g \times N_j$  矩形底座的电子元件。印制板平面上有平行的  $N_{\text{layer}}$  条元件插槽, 每条插槽又分为  $n$  个紧挨的  $H_g \times 1$  矩形底座的槽位。这些槽和槽位, 用来插入变电站外模型电子元件。印制板的左右两侧为宽为  $W_b$  的垂直走线廊道, 每条元件插槽的上部有  $H_b \times n$  的水平走线廊道, 用于变电站外模型电子元件之间的连接线路。

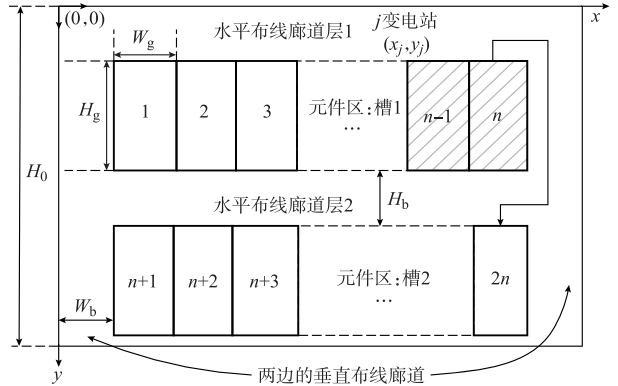


图 7 布置布线区示意图  
Fig. 7 Layout of the diagram

设图纸总宽度为  $W_0$ , 图纸宽高比  $\alpha$  将作为参数进行优选, 则可得图纸的总高度为  $H_0 = W_0 / \alpha$ ; 设变电站总数为  $n_s$ ; 则变电站的条数  $N_{\text{layer}}$  和每一层的网格数  $n$  也可以进一步的确定, 有

$$N_{\text{layer}} = \text{Celing} \left( \frac{\sum_{j=1}^{n_s} N_j W_g}{W_0 - 2W_b} \right) \quad (3)$$

$$n = \text{Celing} \left( \frac{\sum_{j=1}^{n_s} N_j}{N_{\text{layer}}} \right) \quad (4)$$

式中: Celing( $x$ ) 表示不小于  $x$  的最小整数。

应用粒子群算法搜索最优布置过程中采用该变

电站所在网格的最小编号  $p_j$  来表征其位置,  $p_j$  与  $(x_j, y_j)$  的关系为:

$$x_j = \left( \text{Remainder} \left( \frac{p_j}{n} \right) - 1 \right) W_g + W_b \quad (5)$$

$$y_j = (H_b + H_g) \text{Floor} \left( \frac{p_j - 1}{n} \right) + H_b \quad (6)$$

式中:  $\text{Remainder} \left( \frac{p_j}{n} \right)$  表示返回  $p_j$  除以  $n$  的余数, 若  $p_j < n$  则返回  $p_j$ ;  $\text{Floor}()$  表示返回不大于指定浮点数的最大整数。

$p_j$  必须满足: ① 变电站分配的位置不能重合; ② 一个变电站不能在 2 层中布置。在式(5)和式(6)中, 由于  $(x_j, y_j)$  是表示变电站方框图形左上角在图纸上的坐标, 与文献[1]的不同, 这样就将变电站内模型与外模型在图形上进行了完全解耦, 降低了求解的复杂性。

#### 2.4.3 最优自动布置的改进粒子群算法实现

电网系统单线图自动生成的本质是变电站外模型的布置和布线问题; 将不同宽度的  $n_s$  个变电站元件放置到所设计的有单元槽位的插槽中, 元件的上部出线, 布线在水平廊道和垂直廊道中进行。目标是  $n_s$  个变电站元件全部安插到位, 使得布线清楚、交叉少。这样就将原问题转化为一个求最优解的问题。

首先采用粒子群算法, 获得可行的变电站元件布置, 也就是变电站外模型电子元件全部能插到位; 然后对这些可行的布置进行布线走线, 获得不同的目标值; 优选这些可行的布置布线结果, 产生新的粒子群, 得到新的可行元件布置, 再进行布线优化, 获得新的目标值。依此继续, 一直到获得满意的结果。

##### 1) 自动布置布线的复合目标函数

选择布置布线图的总交叉点数和线路的总长度 2 个权重的融合作为优化目标函数, 有

$$P_{\text{best}} = \epsilon N_{\text{cross}} + L \quad (7)$$

式中:  $N_{\text{cross}}$  为经过布线优化后的总的交叉点个数;  $L$  为布线后的线路总曼哈顿长度;  $\epsilon$  为  $N_{\text{cross}}$  在  $P_{\text{best}}$  中的权重因子,  $\epsilon$  越大则交叉点数在自动布置布线优化过程中越占据主导地位。

由于  $L$  的值相对于  $N_{\text{cross}}$  大很多, 经过多次试验比较,  $\epsilon$  取 5 000 到 10 000 较为合适, 本文取  $\epsilon$  为 10 000。

##### 2) 标准粒子群算法和改进粒子群算法

假定  $d$  维空间中存在  $m$  个粒子<sup>[3-5]</sup>, 每个粒子根据如下公式更新自己的速度和在解空间的位置:

$$\begin{aligned} v_{ij}^{(t+1)} &= \omega v_{ij}^{(t)} + c_1 r_1 (p_{ij}^{\text{best}(t)} - p_{ij}^{(t)}) + \\ &c_2 r_2 (p_{Gj}^{\text{best}(t)} - p_{ij}^{(t)}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$p_{ij}^{(t+1)} = p_{ij}^{(t)} + v_{ij}^{(t)} \quad (9)$$

式(8)、式(9)中各变量的含义请参阅附录 A。

在本文应用中,  $d$  值等于该地区电网的变电站个数  $n_s$ ; 一个粒子  $i$  的位置向量  $p_i$  即为一种布置方案,  $p_{ij}$  表示第  $i$  种布置方案中第  $j$  个变电站接线图所在布置层网格的最小编号; 式(8)、式(9)按变电站所占网格数  $N_j$  从大到小的先后顺序对变电站更新速度和位置。

#### 3) 最优布置布线求解过程

基于改进粒子群算法的最优布置的具体求解步骤大致与文献[1]一致。在获得了可行布置, 并布线走线后, 按照式(7)得到目标函数值。若目标值不满意或未达到一定的迭代次数, 则按式(8)、式(9)获得新的可能布置, 继续粒子群算法。

迭代  $T$  次使目标值达到设定值之后, 获得了变电站最优布置  $p_G^{\text{best}(T)} = (p_{G1}^{\text{best}(T)}, p_{G2}^{\text{best}(T)}, p_{G3}^{\text{best}(T)})$ , 从而获得基于变电站外模型的最优系统单线图。

## 2.5 布线走线

### 2.5.1 布线问题及目标

布线是指在所有变电站布置已确定的情况下, 进行线路的走线操作。布线目标为: ① 走线不允许重合, 允许交叉但要求交叉尽可能少; ② 走线尽可能的短。

### 2.5.2 布线走线的基本规则

采用双折线作为同层布线, 四折线作为异层布线。具体的过程分为顺序布线、优化布线 2 个步骤<sup>[6]</sup>。基本思路与文献[6]类似, 以下只描述关键技术点。

#### 2.5.3 顺序布线

顺序布线即按变电站自左到右、从上至下; 每个变电站线路按照给定的排序, 从左到右, 先进行同层线路的布线, 再进行异层线路的布线。同层和异层都按照先布上级电网电压线路, 再布本级电网电压线路的顺序。

##### 1) 同层布线

同层布线步骤是: ① 计算线路水平距离; ② 距离短的先布线; ③ 布线在廊道里自下而上布置; ④ 允许交叉, 不许重叠, 即若线道重叠, 则向上避让。

##### 2) 异层布线

异层布线有 4 个拐点; 若不避让, 则首尾 2 个拐点的坐标是确定的。步骤如下: ① 计算首尾 2 点的曼哈顿距离; ② 距离短的先布线; ③ 使用右(左)垂直通道的, 绕线避让空间自左(右)向右(左); ④ 允许交叉, 不许重叠, 若线道重叠则向外部避让发展。

#### 2.5.4 优化布线

优化布线主要指解除交叉点的拆线、重布线。



保护性拆线指不新占线道的拆线重布线策略;而非保护性拆线指要使用新的线道的拆线重布线策略。

### 1) 保护性拆线

保护性拆线可分为水平廊道优化和垂直廊道优化。因为系统单线图中变电站同一母线出线顺序是固定的,因此,保护性拆线主要是指垂直廊道优化。垂直廊道的优化要判断是否能消除交叉。

### 2) 非保护性拆线

非保护性拆线重布线策略,由于要占用新的线道,必须判断占用的新线道不能与其他已有的线路重叠,同时要判断是否能有效减少交叉点。

## 3 应用实例

运用本文的方法对图4中的区块C.E.B(共有9个变电站,13条线路)内的电网系统单线图进行自动布局布线,经过布局布线后得到的图形如图8所示,此时是基于变电站外模型的,没有展现出变电站内部接线图,用一个矩形来表征变电站的位置。交叉点个数为4个,目标函数值为1630。共迭代50次,耗时129s。完整的电网系统单线图见附录B图B1,此时已在图8的布局布线基础上将标准的变电站接线图嵌入对应的变电站外模型图形的方框内。附录B图B2为整个地区的电网系统单线图。

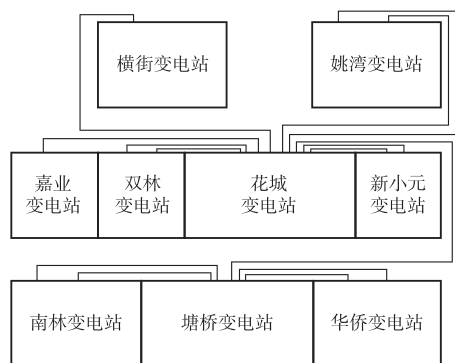


图8 基于变电站外模型的变电站最优布局布线  
Fig.8 Layout and routing of substation based on external model of substation

对文献[1]提出的案例进行了计算,原图见附录B图B3(a),采用本文算法在同母线的出线端口位置可调和不可调情况下的优化结果分别见附录B图B3(b)和(c),前者交叉点数从22个降至2个,后者交叉点数从22个降至12个。本文与文献[1]提出的算法的差异性在附录C中进行了说明。

## 4 结语

考虑到较大规模地区电网系统单线图布局走线的复杂性,本文针对地区电网的特征,首先对全网进行分区,以达到降低求解维度的目标。同时,对区块

内的变电站优化布局求解时,建立了变电站内、外模型图形,将原问题转化为两无耦合的顺序阶段求解,有效地降低了原问题的维度,提高了效率。本文提出的地区电网系统单线图自动布局布线解决方案具实用性,实际案例也表明生成的系统单线图线路清晰,交叉点少,布局均匀,效果良好。同样的方法也适合于大区(网调)、省网(省调)和县市(县调)的电网系统单线图的自动生成。

附录见本刊网络版(<http://aeaps.sgepri.sgcc.com.cn/aeaps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 邢佳磊,杨洪耕,何亚平. 地区电网运行单线图的智能自动布局[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):59-64.  
XING Jialei, YANG Honggeng, HE Yaping. Intelligent automatic layout of single-line diagrams for regional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 59-64.
- [2] 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):61-65.  
ZHANG Jianmin, LOU Jian. Automatic generation of single-line SVG format diagram for distribution feeder systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 61-65.
- [3] 刘佳,李丹,高立群,等. 多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(31):22-28.  
LIU Jia, LI Dan, GAO Liqun, et al. Vector evaluated adaptive particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 22-28.
- [4] 卢志刚,董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化,2006,30(24):39-43.  
LU Zhigang, DONG Yuxiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43.
- [5] SHI Y, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, May 4-9, 1998, Anchorage, AK, USA: 69-73.
- [6] 章坚民,张自聪,郭峰,等. 调度大屏电网潮流图自动生成:(二)自动布线[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):36-40.  
ZHANG Jianmin, ZHANG Zicong, GUO Feng, et al. Automatic generation of transmission network single-line power flow diagram for dispatching large screen display: Part two automatic routing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 36-40.

章坚民(1962—),男,通信作者,教授,硕士生导师,主要研究方向:电力及能源系统自动化与信息化系统建模和系统开发、嵌入式应用。E-mail: zhangjm@tom.com

方文道(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向:电子信息集成技术及其在电力系统中的应用。

胡冰(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向:电子信息集成技术及其在电力系统中的应用。

(下转第85页 continued on page 85)

## Regional Power Grid System Single-line Diagram Automatic Generation Using Grid Dividing and Internal/External Substation Models

ZHANG Jianmin<sup>1</sup>, FANG Wendao<sup>2</sup>, HU Bing<sup>2</sup>, XU Guanhua<sup>2</sup>

(1. College of Antomation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The regional power grid system single-line diagram is one in which the lines between substations and the substation internal primary single-line diagrams are shown together on one and the same plane. Take the 110 kV prefectural power grid as an example. A grid dividing method requiring rather uniform number of substations within a section and the least possible line connections between section blocks is proposed by taking advantage of the 220 kV substations as the hub of the radially formed 110 kV substation group to divide the prefectural grid into sub-grids. A design is made for the internal and external substation diagrams of the substation layout/routing inside a sub-grid, and the initial layout/routing problem is converted to a two-stage problem in sequence but without coupling. The first stage is layout and routing optimization based on the external substation diagram model, with the least intersection number and Manhattan distance of lines as the objective function. An improved particle swarm optimization algorithm is designed for assembling of the external substation rectangle, followed by a carefully designed algorithm for line routing. If the positions of outgoing lines of the substation from the same bus are adjustable, then the instation outgoing line adjustment of the internal model diagram can be performed. Otherwise the entire system diagram is just the result of the first stage with the box directly embedded in the single-line diagram of substation.

**Key words:** regional power grid system; single-line diagram; grid division; internal substation model diagram; external substation model diagram; component assembling; automatic routing

## 附录 A

正文中式(8)、(9)中：变量  $p$  表示粒子的位置， $v$  表示粒子的速度；下标  $i$  为粒子序号，共有  $m$  个，即粒子的种群规模为  $m$ ，本文取值为 40；下标  $j$  表示每个粒子的空间维度， $j=1,2,\dots,d$ ， $d$  值等于该地区电网的变电站个数  $n_s$ ； $t$  为当前进化代数； $r_1, r_2$  为均匀分布于  $[0,1]$  的随机数； $c_1, c_2$  为加速常数； $w$  为惯性权重； $v_{ij}^{(t)}$  为第  $i$  个粒子速度向量的第  $j$  个分量在  $t$  次进化时的值； $p_{ij}^{(t)}$  为第  $i$  个粒子位置向量的第  $j$  个分量在  $t$  次进化时的值，如 2.4.2 介绍的其值为第  $i$  种布置方案中第  $j$  个变电站在布置层网格的最小编号；第  $i$  个粒子的位置向量  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$  即为一种布置方案；而  $p_{ij}^{best(t)}$  为在  $t$  次进化时第  $i$  个粒子最优位置时的第  $j$  个分量的值， $p_{Gj}^{best(t)}$  为在  $t$  次进化时群体最优位置时的第  $j$  个分量的值。

## 附录 B

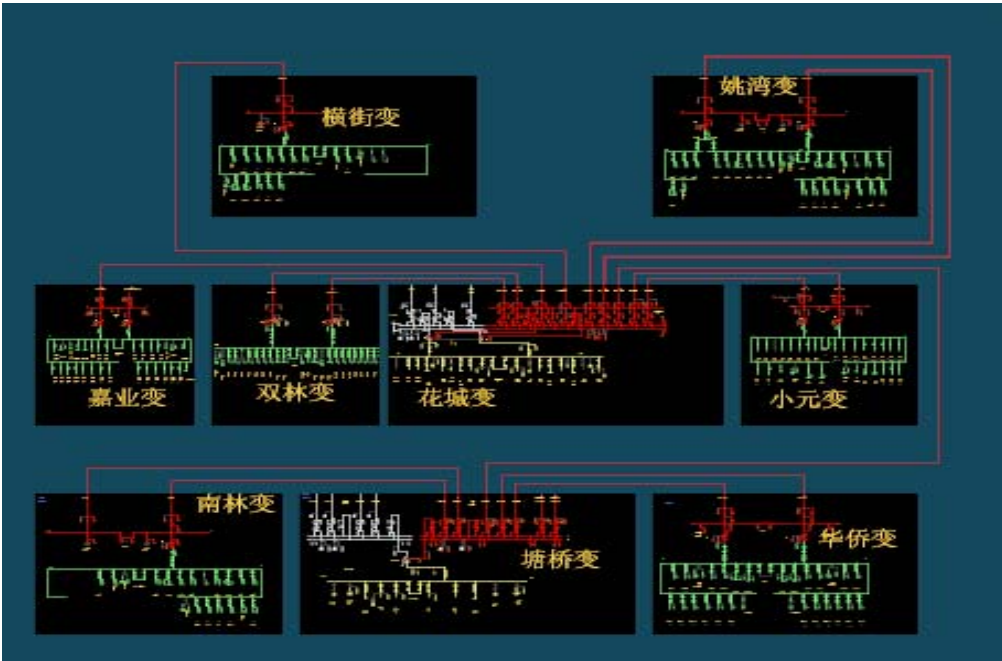
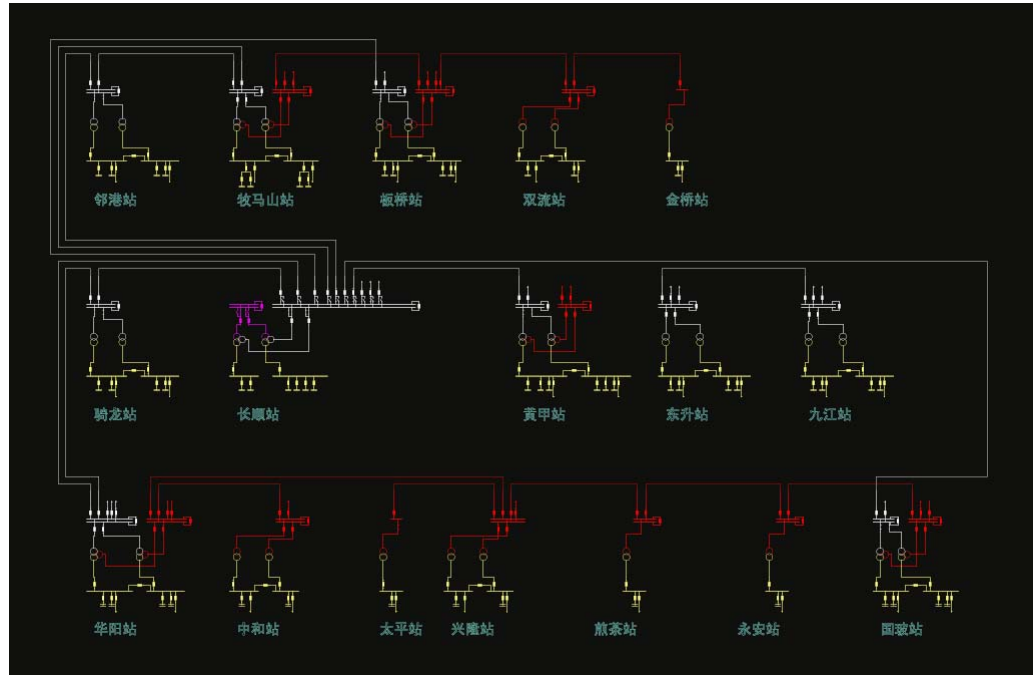


图 B1 区块 C.E.B 内的电网系统单线图  
Fig.B1 Complete single-line diagram of transmission grid in block C.E.B

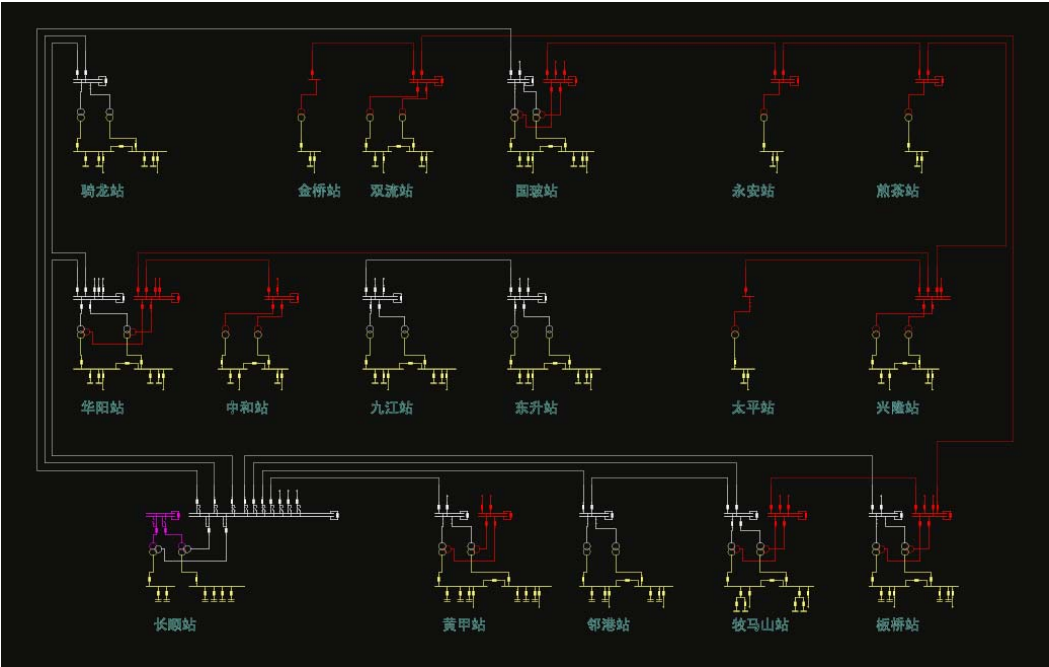


图 B2 一幅完整的某地区电网系统单线图  
 Fig.B2 A complete system single-line diagram of a case study district

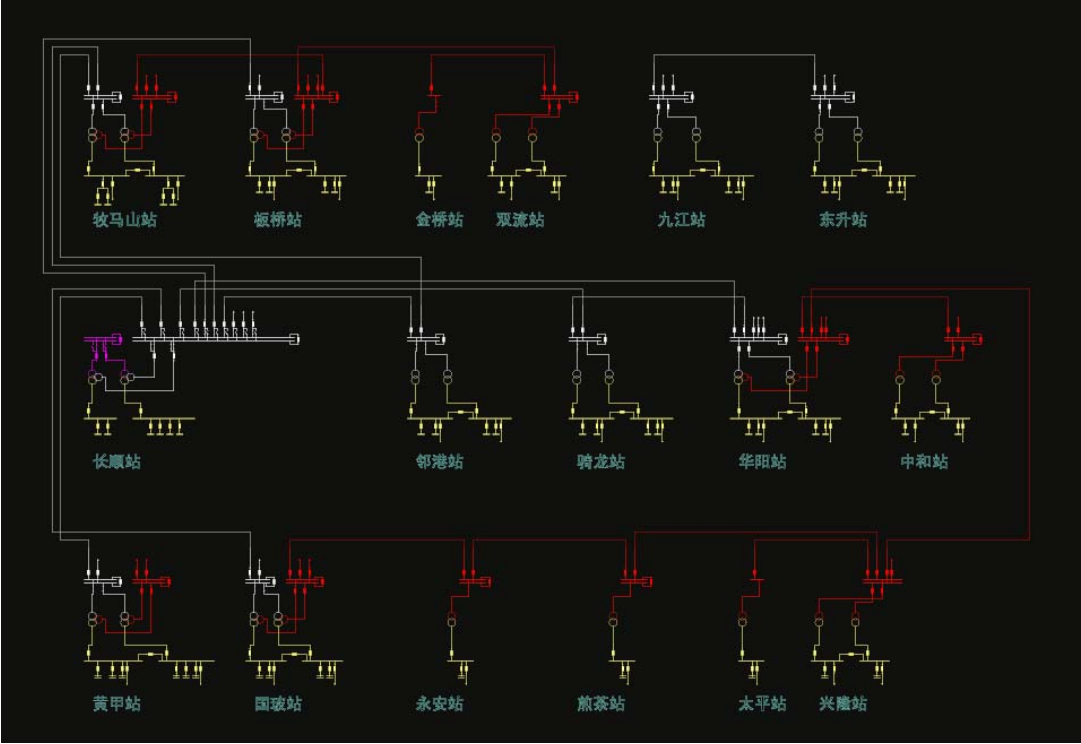


(a) 文献[1]的一个案例的原图





(b) 文献[1]案例在同母线的出线端口位置可调情况下的优化结果



(c) 文献[1]案例在端口位置固定情况下的优化结果

图 B3 单线图

Fig.B3 Single-line diagrams

## 附录 C

本文对文献[1]的方法进行了一定的调整和改进，主要体现为：

### 1)变电站的图形内模型与外模型设计

电网系统单线图自动生成的本质是变电站外模型的布局和布线问题；文献[1]的特点是①变电站出线顺序固定；②系统图绘制时，将变电站布局、站外走线和站内布置与走线一并处理；其中变电站的外模型即变电站坐标设置成为变电站内部单线图的中心横坐标，和低压侧母线纵坐标，强化了内外模型的耦合度。而本文提出了变电站外模型的变电站坐标为变电站内部单线图的左顶点即  $(0, 0)$ ，将内外模型的图形坐标完全解耦。因此内模型求解完全不影响第一阶段的优化。

### 2)区块内系统单线图生成的 2 阶段算法

变电站外模型的布局和走线作为第一阶段的问题。变电站出线顺序的固定是为了满足与变电站现场设备的安装顺序一致以便于操作员使用。研究发现有许多后续走线的线路交叉都可以通过横向调整线路的左右出线顺序来避免。若同一母线的出线可调作为该阶段的优化选择，则内模型根据第一阶段的优化结果进行站内布线；否则，内模型可直接嵌入外模型的变电站方框内。该分段算法，再次有效地降低了原问题的维度，提高了效率。

### 3)变电站外模型尺寸及图纸尺寸

文献[1]采用了所谓最小变电站单元宽度，事先需获取所有变电站对应变电站最小单元的宽度倍数。本文认为，变电站内模型按一定规则制作，可以通过制作后的图形获取其宽度，并可通过求解自动获取以上信息。

### 4)优化方法

本文对文献[1]的布局、布线提出了一些改进：①在布局优化模型中，每个布局将进行布线优化；②布局优化目标不同，优化布线的交叉点和线路曼哈顿距离的加权最小作为目标函数；③变电站同一母线的出线顺序可调，作为布局布线的一个选项；④布线方面的改进比较大，进行了较为细致的设计。