纵横交叉和粒子群混合算法在配电网重构中的应用

针对粒子群算法在配电网重构过程中收敛慢、稳定性差等特性，结合纵横交叉算法（CSO）和粒子群算法（PSO）的优势，提出一种新的混合算法（CPSO）应用在配电网重构中。在求解过程中采用环路编码方式，这种编码方式有效地减少了粒子的维度和降低了产生无效粒子的概率。混合算法过程是将横向交叉的粒子和PSO算法的粒子进行对比，保留适应度更强的粒子参加下一次迭代。从搜索行为上分析，横向交叉具有平行搜索能力，可以检验搜索过程中潜伏存在的最优解。以典型的33节点和69节点网络为算例，分别进行了不同算法下的网络重构仿真。结果表明，CPSO算法具有收敛速度快、抗干扰性强和优秀的搜索能力。

殷　豪　李德强　孟安波　郭壮志／广东工业大学自动化学院

殷　豪／副教授

关键词／Keywords

配电网重构 · 纵横交叉算法 · 混合算法 · 编码 · 抗干扰性 ·

配电网拥有闭环设计、开环运行的拓扑结构，开环时呈现树状结构，其中包含有少量的联络开关和大量的分断开关。在正常运行时，通过配电网络的重构，一方面可以消除过载、平衡负荷和提高电压质量；另一方面能够降低网损和提高系统的经济性。

根据负荷是否变化，配电网重构可以分为静态重构和动态重构，本文主要研究静态重构问题。这种问题是一种多目标非线性化的优化问题，目前求解的算法主要有以下几种：

1）传统的数学优化算法[1]是直接用现有的数学方法对网络进行优化，这种方法具有对寻优网络无限制的优点，适用于复杂网络的重构寻优。但是这种方法属于“贪婪”的搜索算法，极其耗时。如文献[1]中提到的0－1整数规划法，这种传统的数学优化算法比较成熟，能够获得全局最优解，但存在“维数灾”问题，不能应用在大规模的重构系统中。

2）启发式方法目前主要是最优流模式算法[2]和支路交换法[3]。文献[2]将最优流法运用到子空间求解局部最优解，然后再结合遗传算法在所有子空间的局部最优解中搜索，这种方法解决了受初始网络的制约。

3）人工智能优化算法，如模拟退火法[4]、遗传算法[5-7]、神经网络[8]和粒子群算法[9-10]。这些算法有着不同的优点。遗传算法的二进制编码方式用0和1有效地表示了配电网络开关的闭合、打开，经过复制、交叉和变异来搜索空间的最优值，这种编码方式会随着网络的增大而出现“维数爆炸”等问题。近年来一些论文中都用到混合算法，结合两个或两个以上算法的不同优势来进行配电网重构。文献[8]是将二进制粒子群算法和离散粒子群算法相结合，在编码方式上采用支路编码方式，过程中充分讨论了粒子出现的情况并加以分类，相比传统的二进制粒子群算法，解决了在“维数”上的问题。

本文的混合算法是结合纵横交叉和粒子群两种算法的基础上提出的一种新算法。通过粒子群算法公式可以看出，粒子总是朝着个体最优值和全局最优值的方向前进搜索，这种直线式的搜索往

广东省自然科学基金（博士启动）基金资助项目（S2013040013776），南方电网科技项目（K－GD2013－0103）。

中国知网 https://www.cnki.net

往忽略了可能潜伏存在的最优值。本文引进纵横交叉算法中的横向交叉算子来判断粒子周围是否存在更加优秀的适应度，如果存在则通过竞争算子淘汰适应度差的粒子。这两种算法的结合使得搜索更加精细化。在试验过程中发现，单独的纵横交叉算法在重构过程中能够快速收敛，而粒子群算法在重构过程中能够搜索到优秀适应度，两种算法的结合则继承了它们的优势。

配电网重构数学模型

配电网重构的目标函数是在满足负荷安全运行的情况下，以提高电压质量[11]、提高可靠性[12]、网络损耗最小[13]和均衡负荷[14]等单一指标或多个指标为优化目标。本文以网损最小为目标函数，在不出现“孤岛”和“环路”的情况下，通过对配电网的开关进行闭合或打开来实现配电网络的重构，以达到目标函数的要求。目标函数为

$$\min f=\sum_{i=1}^{L}k_i r_i\frac{P_i^2+Q_i^2}{U_i^2} \tag{1}$$

式中，L为系统支路总数；r_i为支路的电阻；k_i为支路的通断情况（0表示打开，1表示闭合）；P_i和Q_i为支路i的有功功率和无功功率；U_i为支路注入节点电压幅值。

（1）潮流约束方程

$$P_i=V_i\sum_{j=1}^{N}V_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij}) \tag{2}$$

$$Q_i=V_i\sum_{j=1}^{N}V_j(G_{ij}\sin\delta_{ij}-B_{ij}\cos\delta_{ij}) \tag{3}$$

式中，P_i、Q_i分别为节点i的输入有功功率、无功功率；V_i、V_j分别为节点i、j的电压；G_{ij}、B_{ij}和δ_{ij}分别为节点i、j之间的电导、电纳和相角差。

（2）不等式约束

$$\begin{aligned}V_{i\min}\leqslant V_i\leqslant V_{i\max}\\ S_i\leqslant S_{i\max}\\ S_t\leqslant S_{t\max}\end{aligned} \tag{4}$$

式中，$V_{i\min}$和$V_{i\max}$为i节点电压V_i的上下限，S_i和$S_{i\max}$为线路流过的功率和最大容许值；S_t和$S_{t\max}$为各变压器流出的功率值和最大容许值。

（3）网络拓扑结构

网络重构后呈现树状结构，不出现“孤岛”和“环路”。

配电网编码方式

配电网重构有很多种编码方式，其中有二进制编码、支路编码和环路编码等方法。其中二进制编码方式最容易理解，通过0和1两个数反应配电网中开关的通断，但是这种方法如果不加以改进会随着配电网的规模增大而出现“组合爆炸”等情况。同胚图简化下的支路编码方式存在较多的不可行解，对于编程要求高。环路编码方式可以有效避免二进制组合爆炸和同胚图不可行解等情况，同时可以提高程序运行效率，易于实现配电网重构编程的需要。

本文采用环路编码方式，根据文献[6]制订了两条规则。

规则1：不在环路内的支路上的开关必须闭合。

规则2：基于网架结构合理，当目标函数为网损最小时，则与电源点相连的开关必须闭合。也就是符合规则条件的支路不参与重构过程。

同时将这两规则应用在环路编码中，根据规则化简典型69节点配电系统。如图1所示。

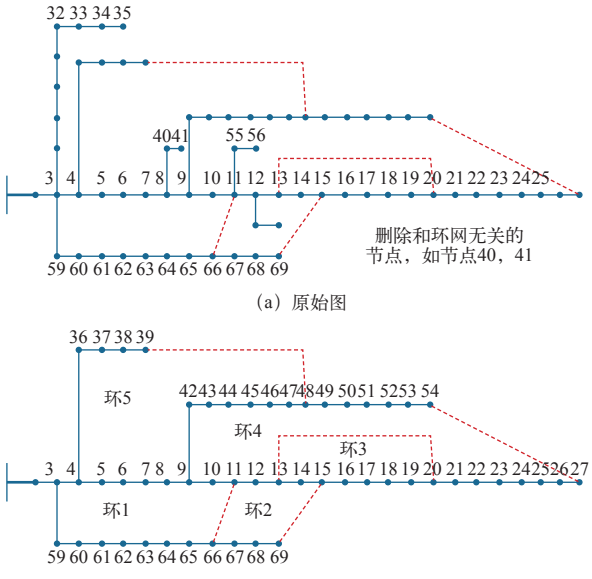

图1　69节点网络化简

图1中总共包含5个独立回路为环1、环2、环

中国知网 https://www.cnki.net

3、环4和环5以及所包含的支路，分别用编码$L1$、$L2$、$L3$、$L4$和$L5$表示。如环1所包含的支路对应的编码$L1=\{3,4,5,6,7,8,9,10,11,59,60,61,62,63,64,65,66\}$。在生成粒子的第一维时，在$L1$中随机抽取一条支路作为粒子的第一维，以此方法分别在其他回路中抽取支路。例如其中一个粒子表示为[2 3 5 6 8]，这个粒子所对应的分别是环1中的第二条支路（支路编号为4）、环2中的第三条支路（支路编号为13）、环3中的第五条支路（支路编号为17）、环4中的第六条支路（支路编号为18）和环5中的第八条支路（支路编号为37）。因为是随机生成的粒子，所以不能确定是否符合配电网结构要求，为了防止配电网在重构过程中出现“孤岛”和“回路”从而产生无效粒子，引入判断函数。判断函数的功能是在生成新的粒子过程中，粒子的每一个维度在取支路时避免和相交环路取到相交部分。例如环1和环2（$L1$和$L2$），其中包含的支路都在括号内，即

$$L1=\{3,4,5,6,7,8,9,10,11,59,60,61,62,63,64,65,66\}$$

$$L2=\{11,12,13,14,15,66,67,68,69\}$$

可以看出69这条支路是环1和环2相交的支路，所以当环1取到69这条支路作为粒子的第一维时，环2就要避免和环1取到相交支路。判断函数如下：

If $pop(1)=\{69\}$

$pop(2)=\{L2$中除了69以外的支路$\}$

else $pop(1)\neq\{69\}$

$pop(2)=\{L2$任选$\}$

判断函数中$pop(1)$，$pop(2)$代表粒子的第一维和第二维。用以上方法处理就可以避免环1和环2出现“孤岛”和“环路”。而其他相邻环路相交部分不止一条支路，所以当粒子的某一维取到和其他环路相交支路时，那么相交环路在抽取支路时就要避免相交部分的所有支路组合。这种方法应用在粒子生成过程中就可以有效避免无效粒子的产生。

CPSO混合算法及流程图

1. 混合算法

混合算法（CPSO）是纵横交叉算法（CSO）和粒子群算法（PSO）的组合，其中包含纵横交叉算法中的横向交叉算子、竞争算子和粒子群算法的搜索方法，它继承了两种算法各自的优点。横向交叉算子可使平行位置上的粒子进行信息互换，而粒子群算法中粒子飞行方向为最优解飞行方向。当PSO粒子的方向被确定后，总是朝着个体极值和全局极值前进，从而忽略了周围可能潜伏存在的最优值。因此在PSO算法的基础上，在每一次搜索过程中引入CSO算法中的横向交叉算子，不仅可以使粒子朝着确定方向上搜索，同时也能判断其周围是否存在更加优秀的粒子，从而得以更新种群。

（1）粒子群算法搜索方式

这种方法以“粒子”作为函数的可行解，通过计算可行解的适应度来选出最优“粒子”，再从最优“粒子”来判别新“粒子”的飞行方向和距离。在粒子飞行的过程中会产生两个极值：一个是个体极值，是个体当前所找到的最优解；另一个是全局极值，是种群搜索到的最优解。其方程为

$$v_{id}^{k+1}=v_{id}^{k}+c_1r_1(p_{id}^{k}-x_{id}^{k})+c_2r_2(p_{gd}^{k}-x_{id}^{k}) \quad (5)$$

$$x_{id}^{k+1}=x_{id}^{k}+v_{id}^{k+1} \quad (6)$$

式中，c_1和c_2为学习因子，为非负常数；r_1和r_2为区间内[0,1]内的随机数；v为粒子的飞行速度，$v_{i\min}<v<v_{i\max}$；x为粒子；p_{gd}和p_{id}为全局极值和个体极值。

（2）横向交叉算子

这种搜索方式是由儒家的中庸思想和遗传算法的交叉操作共同启发下创造出的一种方法，即在两个不同粒子中产生一个折中的新粒子来更新整个种群。其方程为

$$MS(i,d)=r_1x(i,d)+(1-r_1)x(j,d)+c_1[x(i,d)-x(j,d)] \quad (7)$$

$$MS(j,d)=r_1x(j,d)+(1-r_1)x(i,d)+c_1[x(j,d)-x(i,d)] \quad (8)$$

式中，r_1和r_2为[0,1]之间的随机数；c_1和c_2为[−1,1]之间的随机数；MS（i,d）和MS（j,d）分别为第i和j个粒子；x（i,d）和x（j,d）为两个不同的粒子。

（3）竞争算子

竞争算子的流程如图2所示。

中国知网 https://www.cnki.net

```
Procedure 竞争算子
    1:   FOR i = 1 to M
    2:   评估MS（i,d）、MS（j,d）
    3:   IF the MS（i,d）优于MS（j,d） THEN
    4:   zbest←MS（i,d）
    5:   ELSE zbest←MS（i,d）
    6:   END IF
    7:   END FOR
```

图2 竞争算子的流程

流程图中M是种群的粒子总数，MS（i,d），MS（j,d）代表两个不同的粒子，zbest是用来储存最优粒子的中介值。

横向交叉算子、粒子群搜索方法和竞争算子是混合算法的三部分。通过式（5）来判别粒子x_{id}^{k}的飞行方向，在飞行到达之后计算粒子的适应度，接着引入横向交叉来搜索新粒子周围的粒子并计算适应度。用竞争算子判断新粒子的周围是否存在更加优秀的粒子，如果存在则用周围粒子替代新粒子进入下一次迭代；如果不存在则保持原有的粒子。很明显混合算法在搜索准确度上有了更进一步的提高，同时这种方式能在全局收敛上起到了重要的作用。

用CSO和PSO产生新粒子时，由于学习因子和随机数的约束，使得粒子取得非整数，这样的数不符合配电网络的要求。在对整数编码解码后，变为以二进制为编码方式的粒子。根据文献[2]中的sigmoid函数来将新粒子离散化，这种函数可以将粒子的每一维的状态限制为整数，使得非整数粒子离散化为符合配电网络要求的粒子。sigmoid函数公式为

$$S(v_{id}^{k+1})=1/[1+\exp(-v_{id}^{k+1})] \tag{9}$$

离散化约束条件为

$$\begin{cases} x_{id}^{k+1}=1 & r_{\text{and}}()<S(x_{id}^{k+1}) \\ x_{id}^{k+1}=0 & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

式中，$r_{\text{and}}()$为区间[0,1]上一随机数。

2. 算法流程图

算法流程图如图3所示。

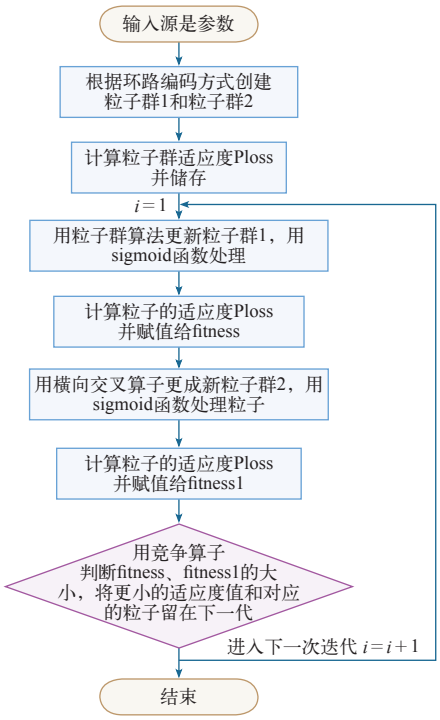

图3 CPSO算法流程图

算例

1. 算例一

对IEEE 33节点网络系统进行了重构，IEEE 33在闭环的情况下有33个节点、37条支路、其中有5个联络开关、额定电压为12.66 kV和网络总负荷为3 715＋j2 300 kV·A。在闭环的情况下一共有5个基本环路，计算过程中粒子的维数是5。IEEE 33网络结构所图4所示。

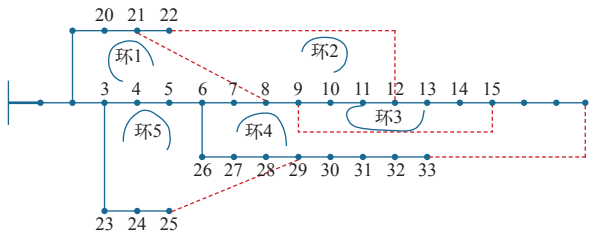

图4 IEEE 33网络结构图

本文用三种方法对IEEE 33配电网络进行重构，这样方便分析算法的优势。CSO、PSO和CPSO算法的参数的设定为：种群规模为20，最大迭代次数为30次。潮流计算采用前推回代法[15-16]，前后两次迭代过程中所有节点中最大电压幅值修正量小于10^{-4} kV，图5为三种算法的收敛曲线。

从图5中分析可知CSO算法在配电网重构过程中拥有较好的收敛特性，10代左右即可收敛，但在收敛结束时的适应度稍差一些。PSO一般在15代

中国知网 https://www.cnki.net

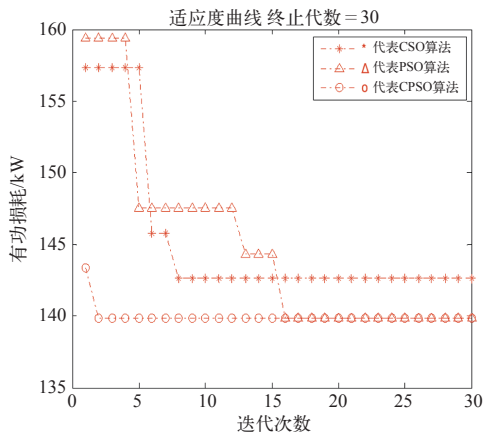

图5 CSO、PSO和CPSO迭代收敛曲线

左右开始收敛，但能搜索到优秀的适应度。CPSO在2～3代开始收敛，并且收敛到优秀的适应度。表1为CSO、 PSO和CPSO搜索出的最优粒子所对应的开关闭合组合、网损和最低节点电压。

表1 CSO、 PSO和CPSO算法优化结果

算法	打开开关集合	网损/kW	最低节点电压（pu）
重构前	7－20 8－14 11－21 17－32 24－28	202.68	0.911 3
CSO算法	6－7 8－9 13－14 31－32 24－28	142.626 7	0.926 56
PSO算法	6－7 8－9 13－14 31－32 24－28	139.551 3	0.937 78
CPSO算法	6－7 8－9 13－14 31－32 24－28	139.551 3	0.937 78

从图5和表1可知，CSO收敛能力强，PSO能搜索出优秀的适应度。而CPSO既可以快速收敛，也可以搜索出优秀的适应度。从图5和表1中可以看出CPSO只需要较少的收敛次数，在2～3代即可以收敛，同时网损是139.551 3 kW，最低节点电压0.937 78 (pu)。说明CPSO既吸收了CSO收敛快的特性，又吸收了PSO能搜索到优秀适应度的特性。

混合算法结合了两种算法的优点，收敛速度明显加快，准确性也没有发生变化。说明了CPSO算法在IEEE 33节点重构过程中是有效的。根据文献[8]提出的算法有效性的验证方法，采集30组数据对CPSO进行稳定性分析，如图6所示。

从图6可以看出CPSO在30次优化过程中仅有4次没有收敛到139.551 3 kW，也就是以86.66%的概率搜索到最优值，其中3次误差都是在1 kW以内，

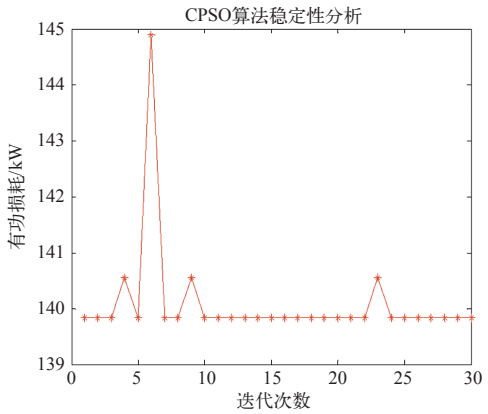

图6 CPSO算法稳定性分析

因此说明CPSO算法具有较好的鲁棒性。

2. 算例二

本文利用CPSO算法对美国PG&E 69节点配电网络进行重构，在闭环的情况下共有73条支路，69个节点，其中有5个联络开关，额定电压为12.66 kV，总负荷为3 802.19＋j2 694.60 kV·A，网络结构如图1的原始图所示。参数设定种群规模为15，最大迭代次数为30次。重构前网络的有功损耗是225.0 kW，重构后网损是97.662 4 kW。优化结果如表2所示。

表2 69节点优化结果

状态	打开开关集合	有功网损/kW	最低节点电压（pu）
重构前	11－66 13－20 15－69 27－54 39－48	225.0	0.909
重构后	11－66 14－15 13－20 27－54 50－51	99.662	0.936 31

迭代过程中在经过6～7代即可以收敛到99.662 4 kW，这说明CPSO算法不会随着网络的增大而减慢收敛速度。相比重构前网络损耗已大大减少，最低节点电压也有部分提高，说明混合算法CPSO在大节点配电网中的应用是可行的。

结束语

本文在研究纵横交叉算法和粒子群算法在配电网重构时，发现纵横交叉算法拥有收敛快的特性，粒子群算法拥有搜索优秀粒子的特性。结合前两种算法优势的情况下提出一种新的混合算法应用在配电网重构中。

在配电网重构的粒子构造中，采用环路编

中国知网 https://www.cnki.net

码方式，即环路总数代表维数，单个环路代表粒子的一个维度。这种编码方式能够有效地减少粒子的维度。采用横向交叉算法和粒子群算法搜索方法后，粒子的适应度进行比较，保留适应度更好的粒子参与下一次迭代，并分别用IEEE 33和PG&E 69节点进行了仿真计算。试验结果说明混合算法能够应用在配电网重构过程中，并且拥有CSO和PSO算法的收敛速度快和较强的搜索能力的优势。

参考文献

[1] Sarma N D R，Prakasa Rao K S．A new 0－1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems [J]．Electrical Power System Research，1995 (33)．

[2] 刘蔚，韩祯祥．基于最优流法和遗传算法的配电网重构 [J]．电网技术，2004，28 (19)：29-33．

[3] 李启旺，袁荣湘，丁伟，等．灵敏度分析与支路交换法相结合的配电网重构算法研究 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (10)：62-65，70．

[4] Nara Koichi，Kitagawa Minoru．Distribution systems loss minimum reconfiguration by simulated annealing method [C]．International Conference on Adances in Power System Control，Operation and Management，Hong kong，1991：461-466．

[5] 邹必昌，龚庆武，李勋．基于负荷平衡的配电网重构遗传算法研究 [J]．电力系统保护与控制，2011，39 (6)：80-83，111．

[6] 尹洪，刘天琪，李樊，等．基于免疫遗传算法的含分布式电源配电网重构 [J]．电力系统及其自动化学报，2014，26 (4)：15-19．

[7] 余贻鑫，邱炜，刘若沁．基于启发式算法与遗传算法的配电网重构 [J]．电网技术，2001，25 (11)：19-22．

[8] Hayashi Y，Lwarnoto S，Furuya S，et al．Efficient determination of optimal radial power system structure using Hopfield neural network with constrained noise [J]．IEEE Transactions on power Delivery，1996，11 (3)：1529-1535．

[9] 白丹丹，刘观起，郭丽．基于改进粒子群算法的配电网重构的研究 [J]．华北电力大学学报，2006，33 (6)：20-23．

[10] 李振坤，陈星莺，余昆，等．配电网重构的混合粒子群算法 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (31)：35-41．

[11] 毕鹏翔，刘健，张文元．以提高供电电压质量为目标的配网重构 [J]．电网技术，2002，26 (2)：41-43．

[12] 徐留杰，王击，邹凤娇．基于降低网损和提高可靠性的配电网络重构 [J]．计算机技术与发展，2009，19 (2)：193-195，198．

[13] 徐留杰，王击，邹凤娇．基于降低网损和提高可靠性的配电网络重构 [J]．计算机技术与发展，2009，19 (2)：193-195，198．

[14] 靳晓凌，赵建国．基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡化配电网重构 [J]．电网技术，2005，29 (23)：40-43．

[15] 李国胜，华泽玺，苗轶如．基于MATLAB与VC++混合编程实现配电网重构算法 [J]．贵州大学学报：自然科学版，2012，29 (3)：51-54．

[16] 韩学军，陈鹏，国新凤，等．基于潮流计算的配电网重构方法 [J]．电网技术，2007，31 (17)：60-63．

[17] 任怀溥，盛四清，王晓蔚．基于改进二进制粒子群优化算法的网络重构研究 [J]．电网与清洁能源，2011，27 (8)：40-43，49．

[18] 刘柏私，谢开贵，周家启．配电网重构的动态规划算法 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (9)：29-34．

[19] 张炳达，刘洋．应用进化规划变异算子的配电网重构算法 [J]．电网技术，2012 (4)：202-206．

[20] 毕鹏翔，刘健，张文元．配电网络重构的研究 [J]．电力系统自动化，2001，25 (14)：54-60．

（收稿日期：2015－05－12）EA

中国知网 https://www.cnki.net