文章编号:1674-2974(2018)02-0095-08 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2018.02.12

基于解空间高效编码的配电网重构连续化算法*

江亚群[1†],罗春辉[1],江辉[2],黄纯[1]
(1.湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2.深圳大学 光电工程学院,广东 深圳 518060)

摘 要:提出一种基于解空间高效编码的配电网重构连续化算法.推导基于负荷电流的网损计算近似公式以估计开关交换支路范围,压缩解空间,提高寻优效率;建立连续变量解与离散变量解存在映射关系的双种群解空间,避开直接求解离散变量,减小计算量且适用连续变量优化方法求解;在一定编码规则下降维并减小变量置信区间半径后,通过编码规则和算法特性从概率上规避第一类非有效解,比对专家库完全规避第二类非有效解,使潮流计算次数大幅减少;改进纵横交叉算法,横向交叉引入方向性,采纳模糊聚类思想将静态纵向交叉因子动态化,收敛速度和精度得到改善.仿真结果验证了该方法的正确性和有效性.

关键词:配电网重构;连续化优化算法;编码;解空间;纵横交叉算法
中图分类号:TM727 **文献标志码**:A

Continuous Algorithm for Distribution Network Reconfiguration Based on Efficient Encoding of Solution Space

JIANG Yaqun[1†],LUO Chunhui[1],JIANG Hui[2],HUANG Chun[1]
(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan Univ, Changsha 410082, China;
2. College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: This paper proposed a continuous algorithm for distribution network reconfiguration (DNR) based on efficient encoding of solution space. By estimating the exchange range of switch exchange through deduced approximate formula of network loss, the solution space was compressed and the efficiency of optimization was improved. To avoid directly solving discrete variables, a double-population solution space including discrete variables and continuous variables solutions was established, which can reduce the amount of calculation and is suitable to apply continuous variable optimization method to solve DNR problem. After reducing the radius of the confidence interval variables, two kinds of non-effective solutions were avoided, and the number of times of power flow calculation was also decreased. The improved crisscross optimization algorithm improves the convergence speed and precision. Simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: distribution network; ontinuous optimization algorithm; coding; solution space; crisscross optimization algorithm

* **收稿日期**:2017-02-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677060), National Natural Science Foundation of China(51677060);广东省自然科学基金资助项目(2016A030313041), Natural Science Foundation of Guangdong Province (2016A030313041);深圳市国际合作研究项目(GJHZ20150313093836007), Shenzhen International Cooperation Research Project(GJHZ20150313093836007)
作者简介:江亚群(1971—),女,湖南桃源人,湖南大学副教授,博士
† 通讯联系人,E-mail:yaqunjiang@21cn.com

配电网中存在少量常开联络开关和大量常闭分段开关,网络重构通过切换两类开关的开合状态实现运行方式调整,达到降低网损、平衡负荷、消除过载和提高电能质量的目的.

网络重构本身为 NP 难题,关键在于如何避免不可行解并准确、快速找到全局最优解.目前应用于配网重构的方法主要有解析类方法、启发式方法、随机优化方法等.传统解析类方法[1-2],由于计算量大、速度慢,不适用于大规模配电系统;启发式方法主要有支路交换法[3-4]和最优流模式法[5],其物理意义明确、计算速度快,但缺乏严密可行的数学理论保证解的全局最优性;随机优化方法包括遗传算法[6]、禁忌搜索算法[7]、模拟退火法[8-9]、粒子群算法[10-12]等,这类算法物理意义不清晰、收敛速度慢,但适合寻找全局最优解,是求解大规模非线性整数规划问题比较有效的方法.

目前,随机优化方法在配网重构中应用较为广泛.编码对随机优化方法的寻优效率至关重要.对于约束优化问题,编码需要考虑尽量减少解空间中的不可行解,反复陷入不可行域并判断新解的可行性会严重影响寻优效率,也会增加陷入局部最优的风险.文献[12]采用二进制编码的改进粒子群算法,结合 Tabu 搜索提高了可行解产生概率.文献[13]提出二进制编码联络开关、十进制编码分段开关相结合的无不可行解编码方法,并应用和声算法对网络重构模型进行求解,但编码解码过程比较复杂.文献[14]按等效支路组编码,并对支路组和组内支路应用二进制粒子群算法求解,收敛速度还有待提高.文献[15]将二进制纵横交叉算法(Crisscross optimization algorithm, CSO)[16]应用于配网重构,采用等效支路组判断网络拓扑,避免不可行解,但并未有效减少变量维数,解空间中不可行域较大,寻优效率难以保证.

上述编码方法虽能部分或完全避免不可行解,但收敛速度仍有提升空间.收敛速度可从收敛时间和收敛迭代次数两个尺度去衡量.配电网重构中,潮流计算的耗时占计算时间的绝大部分,因此减少收敛时间的关键点在于减少潮流计算的次数.收敛迭代次数主要取决于随机算法进化的方向性引导,同时进化机制要保证不会陷入局部最优.

本文对配电网重构中解空间的降维及压缩方法进行研究,并对编码方式进行改进.首先,通过网损计算近似公式估计开关交换支路范围,实现降维并减小变量置信区间半径.其次,将实数编码和离散编码结合,建立连续变量解和离散变量解存在映射关系的双种群解空间,将实数解映射到离散解空间,利用离散解的同一维中二进制和十进制的切换巧妙地避免同一支路集合断开多条支路产生不可行解的情况,同时避开直接求解离散变量,降低求解难度.再次,通过编码规则和算法特性从概率上规避第一类非有效解,比对专家库完全规避第二类非有效解,减少潮流计算次数.此外,改进了 CSO 算法的横向交叉操作和纵向交叉因子,使寻优效果更好.

1 网络重构数学模型

1.1 经济性重构目标函数

经济性重构目标函数为:

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

式中:T 为支路数;k_i 为支路 i 上开关的开合(0/1)状态;r_i 为支路 i 的电阻;U_i 为支路 i 的末端节点电压;P_i、Q_i 分别为节点 i 的注入有功和无功.

1.2 潮流及网络拓扑约束

潮流约束:

$$f(\boldsymbol{P}_G, \boldsymbol{Q}_G, \boldsymbol{P}_L, \boldsymbol{Q}_L) = \boldsymbol{0} \tag{2}$$

$$g(\boldsymbol{P}_G, \boldsymbol{Q}_G, \boldsymbol{V}, \boldsymbol{S}) \leqslant \boldsymbol{0} \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{P}_G$、$\boldsymbol{Q}_G$ 分别为电源节点的有功和无功出力矢量;$\boldsymbol{P}_L$、$\boldsymbol{Q}_L$ 分别为负荷节点的有功和无功消纳矢量;$\boldsymbol{V}$ 为节点电压矢量;$\boldsymbol{S}$ 为支路复功率矢量.

拓扑约束:

$$\text{grid} \in \text{GRID} \tag{4}$$

式中:grid 为当前网络的拓扑结构,GRID 为所有支撑树集,即满足无环网无孤岛的网络拓扑集合.

2 估计开关交换的支路范围

为降低重构寻优搜索次数,先通过网损近似计算确定最优解存在的最小支路范围,降低解空间维数并缩小变量置信区间半径.

在重构过程中,闭合一个联络开关将形成一个环网,由于环网可理解为两端供电网,如图 1 所示.

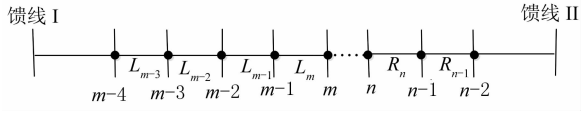

图 1 具有联络的两馈线配电系统

Fig. 1 Distribution system with two feeders

考虑到系统中无功补偿的作用,忽略无功功率和电压影响($U_i=1$ pu).

定义联络开关 k 两端分别为左右支路组,不妨记 m 端至馈线Ⅰ电源点为 L 支路组,n 端至馈线Ⅱ电源点为 R 支路组.两支路组中支路电流表示为

$$\begin{cases} I_{Li} = \sum_{j=i}^{m} I_j \\ I_{Ri} = \sum_{j=i}^{n} I_j \end{cases} \tag{5}$$

式中:I_{Li}、I_{Ri}分别表示左右支路组中支路 i 的电流;I_j表示节点 j 的负荷电流.若闭合联络开关 k,打开 L 支路组中开关 Li,开关交换后该环网的网损为

$$P_{\text{latter}} = \sum_{i=1}^{m}(I_{Li}-I_k)^2 r_{Li} + \sum_{i=1}^{n}(I_{Ri}+I_k)^2 r_{Ri} + I_k^2 r_k \tag{6}$$

对公式(6)变形得到

$$P_{\text{latter}} = I_k^2 r_{\text{loop}} + 2I_k\left(\sum_{i=1}^{n} I_{Ri} r_{Ri} - \sum_{i=1}^{m} I_{Li} r_{Li}\right) + \sum_{i=1}^{m} I_{Li}^2 r_{Li} + \sum_{i=1}^{n} I_{Ri}^2 r_{Ri} \tag{7}$$

注意到,$\sum_{i=1}^{m} I_{Li}^2 r_{Li} + \sum_{i=1}^{n} I_{Ri}^2 r_{Ri}$ 即为开关交换前的网损,记作 P_{former}.其中,r_{loop}为闭合联络开关未打开分段开关时的环网总电阻,I_k和 r_k分别为联络开关所在支路的电流和电阻.

显然,网损改变量为

$$I_k^2 r_{\text{loop}} + 2I_k\left(\sum_{i=1}^{n} I_{Ri} r_{Ri} - \sum_{i=1}^{m} I_{Li} r_{Li}\right) \tag{8}$$

第二项中$\sum(\cdot)$为节点 i 以馈线Ⅰ和馈线Ⅱ的源节点作为参考的电压降,可见负荷从 L 支路组向 R 支路组转移时要使网损降低,其必要条件为 R 支路组压降明显小于 L 支路组压降,即节点 n 的电压要明显高于节点 m 的电压.

考虑 I_k为连续变量,对式(8)微分

$$\frac{\mathrm{d}P_{\text{latter}}}{\mathrm{d}I_k} = 2\left(\sum_{i=1}^{n} I_{Ri} r_{Ri} - \sum_{i=1}^{m} I_{Li} r_{Li}\right) + 2I_k r_{\text{loop}} \tag{9}$$

事实上,对于给定配电网架和负荷,必定存在一种网络拓扑形式满足网损最小,从而有式(9)为零,驻点即最优转移负荷为

$$I_{k,\text{opt}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} I_{Li} r_{Li} - \sum_{i=1}^{n} I_{Ri} r_{Ri}}{r_{\text{loop}}} \tag{10}$$

由于忽略了节点电压变化的影响,环网外的各支路功率将不受该环网结构调整的影响,实质上近似网损与精确网损的误差范围不大[17].

考虑式(6)的二次特性及 I_k的物理特性,区间$[0,\ 2I_{k,\text{opt}}]$为估计范围.值得注意的是,当 L 支路组与 R 支路组压降差较小(小于给定精度 δ)时,根据压降差大小确定支路组已经失效,例如下文 IEEE 33 节点配电系统[18]中节点 17 比节点 32 相对源节点的压降要大,但目前 IEEE 33 节点的公认最优解表明该环打开开关所在支路为 31－32,这就证明两支路组压降差较小时须更换判据.

图 2 所示代表了一般情况.A、B、C 和 D 分别表示该环网中联络开关所在支路到最大电流支路的两条路径中某一路径上的四条支路,此处原则上取与 $I_{k,\text{opt}}$最接近的两个支路,则只可能存在三种情形:

如果满足 $\begin{cases} |I_{k,\text{opt}}-I_D| > |I_{k,\text{opt}}-I_B| \\ |I_{k,\text{opt}}-I_A| > |I_{k,\text{opt}}-I_C| \end{cases}$,则选择支路 B、C;

如果满足 $|I_{k,\text{opt}}-I_D| < |I_{k,\text{opt}}-I_B|$,则选择支路 C、D;

如果满足 $|I_{k,\text{opt}}-I_A| < |I_{k,\text{opt}}-I_C|$,则选择支路 A、B.

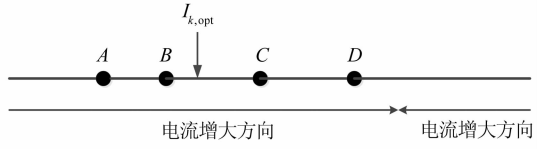

图 2　支路估计三情形判定

Fig. 2　Three situations judgment for branch estimate

其中,I_A、I_B、I_C 和 I_D 分别为 A、B、C、D 四条支路的电流,电流增大方向的两条路径表示联络开关所在支路到最大电流支路的走向.

仿真表明该判断规则足以保证两支路组压降差小于给定精度时的估计准确度,但由于忽略了节点电压变化的影响,当估计支路含联络节点且该环接有下游支路时,同时保证节点电压不越限,下游支路很小的电流变化可能引起一定的估计偏差.对此,修正偏差,将联络支路加入估计支路.

3　编码方法与非有效解定义

3.1　网络简化及编码方法

在应用随机优化方法进行配网重构时,如果编码方式不合理,会导致在初始化和迭代过程中产生

大量不可行解.本文采用如下编码规则:

1)删除与环网无关的支路和节点(电源节点除外);

2)将解环具有同一效果的支路合并到同一支路集合;

3)定义连续解空间中解的每一维(即一个变量)表示一个支路集合,维数为被估计支路集合数,采用实数编码;

4)定义离散解空间中解的每一维(即一个变量)表示一条支路,维数为所有等效支路集合数,采用二进制和十进制两种编码方式.第一步,采用二进制编码对被估计支路集合进行选择.若该维为 0,表示该支路集合没有选中,集合中所有支路均处于闭合状态;若该维为 1,表示该支路集合被选中.注意,未被估计支路集合所占维全部置零.第二步,采用十进制编码对选中支路集合中的支路进行选择.若该维为正整数 n,表示该支路集合中第 n 条支路断开.

如图 3 中,若规定一个重构单环只含一个联络支路,则支路 2-3、3-4、4-5、5-25、25-26、26-27、27-28、28-24、24-23、23-22、22-2 构成一个单环.从解环的角度,断开支路 22-2 或 23-22 或 24-23 效果一样,因此节点 2 至节点 24 的所有支路归并到同一支路集合,在连续解空间中用一维表示.若把联络支路归到某一支路集合,支路集合只有 10 个,意味着解变量维数降低,则连续变量解每一分量的实数值可通过 sigmiod()函数即 $1/(1+\exp(-x/\mu))$ 转变为区间[0,1]上的概率值,这里陡度参数 μ 取合适的定值.为保证网络拓扑辐射状,断开支路数不能改变,概率值最大的 5 个变量决定该支路集合有支路断开而置 1,其余置 0.然后,在离散解空间对选中支路组随机选择支路 n.值得注意的是,每一个支路集合中并不包含所有解环等效支路,这是由上节估计支路交换范围决定了备选支路,从计算量上相当于二次降维.同时,被选中支路集合利用二进制和十进制的切换巧妙地避免了同一支路集合断开多条支路产生不可行解的情况.

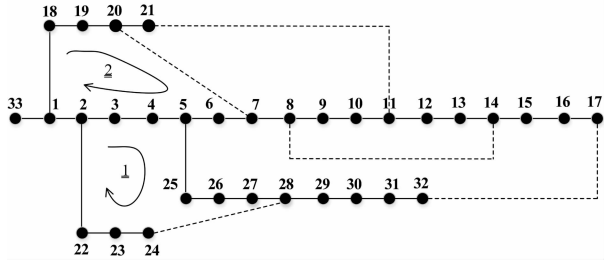

图 3 IEEE-33 节点配电系统单线图

Fig. 3 Single-line diagram of IEEE-33 node distribution system

文献[15]提出对网络进行等效支路的化简并作为判断新解是否满足网络拓扑的条件,但仍然对删除与环网无关的支路和节点后剩余的单一支路进行二进制编码,不能有效降维并避免不可行解的出现.

3.2 连续化思想引入

由于离散优化算法随组合数增加,求解难度急剧增大且收敛速度难以保证,本文并不将适用于连续变量的优化算法二进制化或十进制化.已有连续化方法是将原离散问题转化为关于连续变量的规划问题然后求解,如将 0-1 变量松弛为区间[0,1]上的连续变量,求解后再"舍入化整",其弊端在于某些场景下实质仍为次优解,如无功优化中并联电容器的投切组别和变压器的分接头档位均是离散变量,发电机有功、无功出力为连续量,多个离散量的就近取整很可能导致整个解收敛不到最优.由于配网重构迭代过程需要将连续变量转换为离散变量进行潮流计算并校验约束,该思想并不适用.文献[15]在类似上述过程后又转换成连续变量进行迭代,如此反复.事实上,问题就在于同一解空间中变量从连续再次转换成离散时,易陷入不可行域难以逃出且种群多样性急剧下降,均不利于问题的求解.

本文为 3.1 节中实数编码和离散编码的解建立两种映射关系,通过 sigmiod()函数从实数解映射到二进制解,再反映射到另一映射关系中的原象整数解,因而从连续解对应到整数解的这种确定性是随机中的确定性,利于应用连续优化求解算法在含配电网络整个支撑树集的全局寻优空间中获得全局最优解,且有效降低了变量维数,保证了求解速度.

3.3 非有效解的定义及有效规避

网络重构中约束检验和进化判据要依赖潮流计算,由于潮流计算占整个运行时间绝大部分,若对每一代每一个体进行潮流计算,不必要的多次重复潮流计算势必会延长收敛时间,因此有必要提出非有效解这一概念.

与不可行解或无效解的定义不同,非有效解首先可行,即满足辐射状且不失负荷.本文定义两类非有效解.第一类非有效解是指重构后比重构前网损更大,或者在满足寻优过程中的网损值比初始网损更小的前提下,本次迭代产生的解比之前某次迭代产生的解更劣,即网损更大;第二类非有效解是指第 n 次迭代产生第 $m(m<n)$ 次迭代产生的相同解.

规避第一类非有效解只能依赖良好编码规则和

算法特性进行概率上的规避,而事实上低维度编码下第二类非有效解占比较大,尤其到迭代后期,导致收敛时间延长,通过建立满足约束且无重复解的专家库比对实现规避第二类非有效解不必要的多次重复潮流计算,进而减少收敛时间.规避思想如下:

1)首先将初始化的实数种群,按映射关系得到整数形态的离散种群,并进行潮流计算前的拓扑约束检验和潮流计算后的节点电压约束和线路容量约束等检验,对不满足约束的个体重新生成,直到形成满足约束的离散种群,对该离散种群的个体查重并得到无重复个体的新离散种群,建立初始专家库;

2)将每次迭代产生的满足拓扑约束的新离散种群与专家库进行比对,只有当前个体在专家库无记录时才进行潮流计算.

4　改进 CSO 算法及重构步骤

4.1　改进 CSO 算法

CSO 算法是一种基于种群的随机搜索算法,采用横向交叉和纵向交叉的双搜索机制,交叉结果呈链式反应在整个种群中蔓延,该机制使得 CSO 算法在解决复杂优化问题时,相比其它群智能优化算法,在全局收敛能力和收敛速度方面具有明显优势[18].其基本原理如下.

1)横向交叉

横向交叉是在种群中以一定概率选中的两个不同且不重复个体所有维间进行的一种算数交叉:

$$M_{\mathrm{hc}}(i,d)=r_1X(i,d)+(1-r_1)X(j,d)+c_1(X(i,d)-X(j,d)) \tag{11}$$

$$M_{\mathrm{hc}}(j,d)=r_2X(j,d)+(1-r_2)X(i,d)+c_2(X(j,d)-X(i,d)) \tag{12}$$

式中:i、j 代表种群中任意两个不同个体;d 代表维度;X、M_{hc}分别代表父代和子代种群;均匀分布随机数 r_1、$r_2\in[0,1]$;均匀分布随机数 c_1、$c_2\in[-1,1]$.

2)纵向交叉

纵向交叉可使陷入局部最优的维度有机会跳出,一旦选中两个不同且不重复的维 d_1 和 d_2,则种群所有个体对 d_1 维进行算数交叉:

$$M_{\mathrm{vc}}(i,d_1)=r_3X(i,d_1)+(1-r_3)X(i,d_2) \tag{13}$$

式中:均匀分布随机数 $r_3\in[0,1]$.

由于仅依靠交叉操作进行寻优,没有利用问题的特有性质,所以收敛速度慢,局部精确寻优能力差.现对横向交叉作如下改进:

$$X_{\mathrm{con},i}^{k+1}=\omega_i^k(X_{\mathrm{con,b}}^k-X_{\mathrm{con},i}^k)+X_{\mathrm{con},i}^k \tag{14}$$

其中,

$$\omega_i^k=\omega_{\mathrm{l}}+(\omega_{\mathrm{u}}-\omega_{\mathrm{l}})\frac{F_{\mathrm{b}}^k-F_i^k}{F_{\mathrm{b}}^k-F_{\mathrm{w}}^k} \tag{15}$$

ω_{u}、ω_{l}分别为扰动因子 ω_i^k 的上下限;F_i^k 为第 k 次迭代第 i 个个体的适应度;F_{b}^k、F_{w}^k 分别为第 k 次迭代种群中最优和最劣个体的适应度;$X_{\mathrm{con,b}}^k$、$X_{\mathrm{con},i}^k$ 分别为实数编码种群中的最优个体和第 i 个个体.

改进的横向交叉不再是一种完全的随机变异,而是基矢量在以 $X_{\mathrm{con,b}}^k-X_{\mathrm{con},i}^k$ 为差分矢量的方向上搜索,从矢量运算的角度来说,朝适应度更优的个体方向搜索利于更快收敛到全局最优.

CSO 算法纵向交叉因子 P_{vc},其直接决定多少维参与纵向交叉从而影响个体的自我认知行为.若按标准算法将其取固定值,则并未充分利用种群信息.为此,本文采纳模糊聚类的思想提出随种群信息自适应变化的 P_{vc}^k.

$$P_{\mathrm{vc}}^k=P_{\mathrm{vc\,max}}+\gamma^k(P_{\mathrm{vc\,min}}-P_{\mathrm{vc\,max}}) \tag{16}$$

其中,

$$\gamma^k=\begin{cases}\dfrac{\sqrt{(F_i^k-\dfrac{1}{M-1}\sum\limits_{j=1,j\neq i}^{M}F_j^k)^2}}{F_{\mathrm{w}}^k-F_{\mathrm{b}}^k}, & F_{\mathrm{b}}^k\neq F_{\mathrm{w}}^k\\ \gamma^{k-1}\mathrm{rand}(), & F_{\mathrm{b}}^k=F_{\mathrm{w}}^k\end{cases} \tag{17}$$

式中:M 为种群规模,rand()为区间[0,1]均匀分布的随机数.

4.2　网络重构计算步骤

1)读入配电系统原始数据,全网初始潮流计算,得初始网损和初始节点电压分布;

2)调用降维且压缩变量置信区间半径子程序对每个环进行交换支路估计;

3)确定变量维数和恒量(未被估计的支路集合)维数,以及各变量的连续(实数)编码和离散(整数)编码变量区间数;

4)根据各种群维数结合两种群映射关系初始化实数种群并形成初始离散种群,计算后者的潮流分布,并形成初始专家库;

5)对实数种群运用式(14)进行改进后的横向操作,映射和反映射形成得到满足拓扑约束的离散种群后与专家库比对,进行部分个体的潮流计算并约束检验,通过竞争算子保留占优解,更新专家库;

6)对横向操作后的离散种群计算本次迭代的 P_{vc}^k,将上一步交叉操作改为纵向交叉,重复后续过程;

7)判断迭代是否结束,若是则输出结果,若否则转步骤 5).

5 算例分析

仿真环境:系统软件 Windows 7,内存 2.00 GB,CPU 为 Intel Core i3,主频 2.10 GHz,编程环境 MATLAB R2010b. 基本参数:种群规模 $M_1=100$,$M_2=20$,横向交叉因子 $P_{hc}=1$,静态纵向交叉因子 $P_{vc}=0.7$,扰动因子上限 $w_u=0.7$、下限 $\omega_l=0.1$,自适应纵向交叉因子上限 $P_{vcmax}=0.8$、下限 $P_{vcmin}=0.2$,迭代次数 $D_1=100$,$D_2=20$,$D_3=30$.

对 2 个算例进行仿真分析. 算例 1 是 IEEE 33 母线配电系统[18],种群规模 M_1,迭代次数 D_1. 图 4 为该系统重构前后的节点电压分布图,可见重构之后节点电压分布改善明显,最低节点电压由母线 17 改为母线 31,标幺值由 0.913 1 上升到 0.937 8.

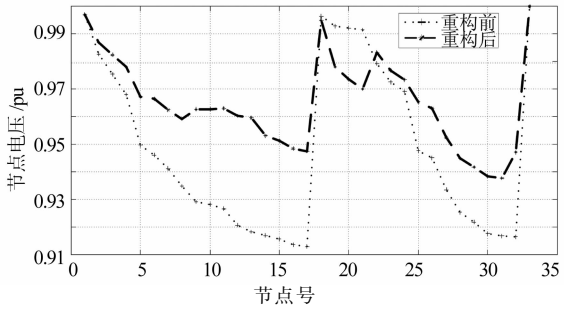

图 4 重构前后节点电压分布

Fig. 4 Voltage profile for IEEE 33 node system before and after reconfiguration

图 5 为不同 CSO 的寻优收敛曲线,其中 DRCSO 为标准 CSO 算法降维并缩小区间半径处理后的改进,SADRCSO 在此基础上改进为自适应纵向交叉,ISADRCSO 则为本文考虑非有效解后的改进算法,可见其收敛速度得到明显提升.

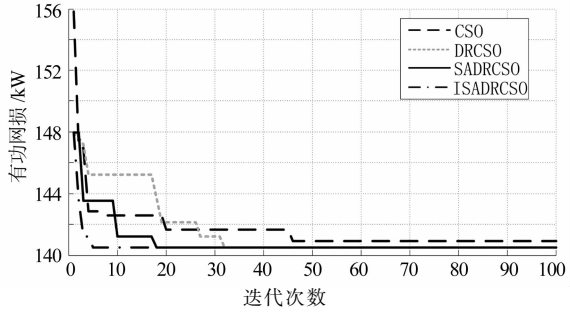

图 5 不同 CSO 收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of different CSO

上述算法在给定迭代次数下均收敛到最优解,打开支路为 6-7、8-9、13-14、24-28 和 31-32,网损由初始值 202.68 kW 下降到 139.55 kW. 表 1 为该算法性能比较,为减小随机误差,各算法均运行 20 次. DRCSO 降维并缩小区间半径后相对 CSO 的平均收敛时间减少 40%,ISADRCSO 考虑规避非有效解后相对 SADRCSO 平均收敛时间减少 74.9%,平均收敛迭代次数仅 5 次,显然比文献[16]的收敛速度更快,连续运行 20 次均收敛到全局最优,鲁棒性也更好.

表 1 4 种 CSO 算法性能比较

Tab. 1 Performance comparison among four CSO algorithms

名称	平均收敛时间/s	平均收敛迭代次数	收敛到全局最优的次数
CSO	68.361	46	17
DRCSO	46.506	32	20
SADRCSO	26.796	18	19
ISADRCSO	6.724	5	20

算例 2 是 PG&E 配电系统的一部分,为 69 母线系统[18],图 6 比较了种群规模 M_2、迭代次数 D_2 时采取降维并缩小区间半径的 ISADRCSO 与无事先估计支路范围操作的 ISACSO 的收敛情况. 不难发现,ISADRCSO 迭代 3 次就全局收敛,其中收敛时间 3.585 s;ISACSO 则需迭代 10 次局部收敛,其中收敛时间 9.679 s.

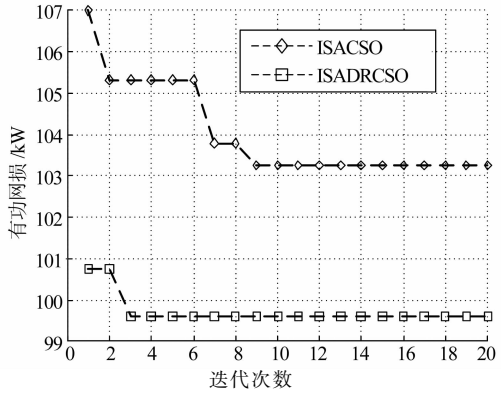

图 6 两种 CSO 收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of two CSO

为保证 ISACSO 全局收敛,将其种群规模改为 M_1,迭代次数改为 D_3,全局收敛性才得到保证,但鲁棒性不强. 迭代 14 次全局收敛,其中收敛时间 80.864 s,最小网损为 99.603 2 kW.

以文献[17]中节点编号为例,本文重构结果断

开支路为 10－70、12－19、13－14、46－47 和 50－51,而其它算法[19－21]尽管和本文个别断开支路不同但网损和最低节点电压相同.实质上节点 45、46 和 47 均无负荷,从而断开支路 44－45、45－46、46－47 或 47－48 的效果一样.因此,本文重构结果与其它多数算法一致.其中,免疫算法[19]平均收敛迭代次数 34,而模糊遗传算法[20]连续 50 次运行最好的一次需迭代 300 次才收敛,混合粒子群算法[21]平均收敛迭代次数在 10 次以上,收敛时间 7.609 s,本文连续运行 50 次平均收敛迭代次数为 4.4 次,平均收敛时间 3.781 s,显然收敛速度得到明显提高.然而,二进制纵横交叉算法[15]断开支路为 11－66、13－20、12－13、46－47 和 50－51,显然为次优解,不难验证.

图 7 为 ISADRCSO 连续运行 50 次的收敛迭代次数和收敛时间曲线图,其中最大收敛迭代次数为 10 且只出现 4 次,仅有 3 次运行局部收敛.

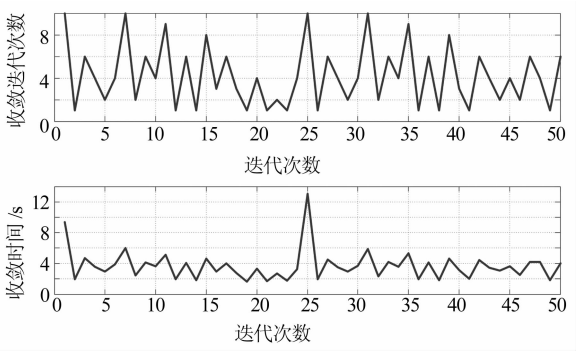

图 7　50 次运行的收敛迭代次数和收敛时间
Fig. 7　Number of iterations and convergence time of 50 times run

在本文编码方式下,进行支路估计后搜索支路数从 57 降到了 18,变量维数和区间半径都大幅减小,在低维解空间有效规避非有效解后收敛速度进一步提高.与其它算法的比较,充分说明了本文方法的有效性.

6　结　论

本文研究配电网重构的解空间降维、压缩及编码改进方法,提出重构的连续化优化算法.

1)推导基于负荷电流的网损计算近似公式确定最优解存在的最小支路范围,压缩解空间,提高了寻优效率.

2)建立连续变量解和离散变量解存在映射关系的双种群解空间,避开直接求解离散变量,防止计算量随组合优化问题规模增大呈指数增长.该方法对于探索如何将适用连续变量的有效数学方法和优化理论用于离散变量优化模型也具有参考意义.

3)定义非有效解,通过依赖编码规则和算法特性从概率上规避第一类非有效解,并比对专家库完全规避第二类非有效解,潮流计算次数大幅减少,缩短计算时间.

4)采用改进 CSO 算法,通过加入横向交叉操作的方向性引导以及动态化纵向交叉因子,算法性能得到改善,与其它算法比较,收敛速度更快.

5)算例仿真表明,本文方法能有效找到全局最优解,且计算速度有明显优势.

参考文献

[1] SARMA N D R, PRAKASA R K S. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J]. Electric Power System Research, 1995, 33(2):125－131.

[2] 王艳松,孙桂龙,曹明志.基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(10):30－36.
WANG Y S, SUN G L, CAO M Z. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016,44(10):30－36. (In Chinese)

[3] 李鹏,江辉,孙芊,等.基于群搜索优化算法的配电网重构[J].电网技术,2010,34(12):114－118.
LI P, JIANG H, SUN Q, *et al*. Distribution network reconfiguration based on group search optimizer[J]. Power System Technology, 2010, 34(12):114－118. (In Chinese)

[4] 李辰雷,卫志龙,韩连山.序优化理论在配电网重构中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(8):41－48.
LI C L, WEI Z L, HAN L S. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8):41－48. (In Chinese)

[5] 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):30－33.
LIU W, HAN Z X. Distribution network reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2004, 28(19):30－33. (In Chinese)

[6] 颜湘武,段聪,吕正,等.基于动态拓扑分析的遗传算法在配电网重构中的应用[J].电网技术,2014,38(6):1640－1643.
YAN X W, DUAN C, LÜ Z, *et al*. Application of dynamic topological analysis based genetic algorithm in distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2014, 38(6):1640－1643. (In Chinese)

[7] 向小蓉，刘涤尘，向农，等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构[J]. 电网技术，2012，36(81)：100－105.
XIANG X R，LIU D C，XIANG N，*et al*. Distribution network reconfiguration based on parallel tabu search algorithm [J]. Power System Technology，2012，36(81)：100－105. (In Chinese)

[8] 俞隽亚，王增平，孙洁，等. 基于支路交换—粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(13)：95－99.
YU J Y，WANG Z P，SUN J，*et al*. Service restoration of distribution network based on the branch exchange-particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control，2014，42(13)：95－99. (In Chinese)

[9] 张珂，吕林，孙宇乐. 基于隶属度时段划分的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(3)：51－57.
ZHANG K，LÜ L，SUN Y L. Dynamic reconfiguration of distribution network based on membership partition of time intervals[J]. Power System Protection and Control，2016，44(3)：51－57. (In Chinese)

[10] 卢扬，吴俊勇，郝亮亮. 基于改进 MOBPSO 算法的含分布式电源的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(7)：62－68.
LU Y，WU J Y，HAO L L. Multi-objective distribution network reconfiguration with distributed generations based on improved MOBPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control，2016，44(7)：62－68. (In Chinese)

[11] 文娟，谭阳红，雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(16)：73－78.
WEN J，TAN Y H，LEI K J. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control，2015，43(16)：73－78. (In Chinese)

[12] 许立雄，吕林，刘俊勇. 基于改进粒子群优化算法的配电网络重构[J]. 电力系统自动化，2006，30(7)：27－30.
XU L X，LÜ L，LIU J Y. Modified particle swarm optimization for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems，2006，30(7)：27－30. (In Chinese)

[13] 陈春，汪沨，刘蓓，等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报，2015，30(7)：34－43.
CHEN C，WANG F，LIU B，*et al*. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(7)：34－43. (In Chinese)

[14] 马草原，孙展展，尹志超，等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. 电工技术学报，2016，11(31)：120－128.
MA C Y，SUN Z Z，YIN Z C，*et al*. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，11(31)：120－128. (In Chinese)

[15] 殷豪，周玉龙，孟安波. 二进制纵横交叉算法在配电网重构中的应用[J]. 电网技术，2016，40(1)：270－275.
YIN H，ZHOU Y L，MENG A B. Application of binary crisscross optimization algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology，2016，40(1)：270－275. (In Chinese)

[16] MENG A，CHEN Y，YIN H，*et al*. Crisscross optimization algorithm and its application[J]. Knowledge-Based Systems，2014，67：218－229.

[17] BARAN M E，WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery，1989，4(2)：1401－1407.

[18] 王守相，王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京：高等教育出版社，2007：139－145.
WANG S X，WANG C S. Modern distribution system analysis [M]. Beijing：Higher Education Press，2007：139－145. (In Chinese)

[19] 蒙文川，邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报，2006，26(17)：25－29.
MENG W C，QIU J J. An artificial Immune algorithm to distribution network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE，2006，26(17)：25－29. (In Chinese)

[20] 刘莉，陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网络重构[J]. 中国电机工程学报，2000，20(2)：66－69.
LIU L，CHEN X Y. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms [J]. Proceedings of the CSEE，2000，20(2)：66－69. (In Chinese)

[21] 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.
LI Z K，CHEN X Y，YU K，*et al*. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE，2008，28(31)：35－41. (In Chinese)