

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241445

## 快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法

陈锋升<sup>1</sup>, 于仲安<sup>1</sup>, 王梓耀<sup>2</sup>, 吴毓峰<sup>2</sup>, 萧文聪<sup>2</sup>, 潘振宁<sup>2</sup>

(1. 江西理工大学电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510000)

**摘要:** 针对大型配电网最小环集获取耗时, 以及现有优化算法难以在短时间内生成高质量故障重构方案等问题, 提出一种快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法。首先, 基于 Tarjan 算法检测并剔除故障导致的孤岛区域, 并根据最小环与反向边关联特性在最大双连通分量图上利用宽度优先搜索(breadth first search, BFS)找到最小环集。其次, 以最小环作为编码, 针对环消除过程中不可行解的产生原因进行编码优化。然后, 结合故障重构问题, 利用抽样、图论和交叉方式对河马优化算法的 3 个关键搜索过程进行改进。最后, 基于真实的 751 节点大型配电网算例, 展开仿真分析。实验结果表明, 所提方法获取最小环集的时间仅为现有方法的 3.45%, 并且在 5 s 内生成的故障重构策略, 在网损、开关次数和电压偏差方面均优于其他算法。

**关键词:** 配电网; 网络重构; 故障; Tarjan 算法; 最小环

### Coding improvement and application algorithm for rapid distribution network fault reconfiguration

CHEN Fengsheng<sup>1</sup>, YU Zhongan<sup>1</sup>, WANG Ziyao<sup>2</sup>, WU Yufeng<sup>2</sup>, XIAO Wencong<sup>2</sup>, PAN Zhenning<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;  
2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To address the challenges of time-consuming minimum cycle basis acquisition in large-scale distribution networks and the inability of existing optimization algorithms to generate high-quality fault reconfiguration solutions within a short timeframe, a coding improvement and application algorithm for rapid distribution network fault reconfiguration method is proposed. First, the Tarjan algorithm is employed to detect and eliminate islanded regions caused by faults. Based on the correlation between minimum cycles and back edges, the minimum cycle basis on the maximum biconnected component subgraph is identified via breadth first search (BFS). Then, an encoding based on the identified minimum cycles is established, and encoding optimization is performed to eliminate the causes of infeasible solutions during the cycle elimination process. Subsequently, for the fault reconfiguration problem, three key search processes of the Hippopotamus optimization algorithm are enhanced using sampling, graph theory, and crossover methods. Finally, simulation analysis is conducted on a real-world large-scale distribution network with 751 buses. Experimental results demonstrate that the proposed method requires only 3.45% of the time compared to existing methods for acquiring the minimum cycle basis. Moreover, the fault reconfiguration strategy generated within 5 seconds outperforms other algorithms in terms of network loss, number of switching operations, and voltage deviation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207105).

**Key words:** distribution network; network reconfiguration; fault; Tarjan algorithm; minimum cycle

## 0 引言

在推动电力系统迈向高质量发展的新阶段, 确保供电的可靠性变得尤为关键<sup>[1-2]</sup>。配电网作为电力

系统的“最后一公里”, 其故障频发已成为制约可靠供应的主要瓶颈, 给国民生产和发展带来严重影响<sup>[3-5]</sup>。因此, 快速且准确地制定重构策略对于提升配电网的供电可靠性至关重要<sup>[6]</sup>。

网络重构以开关开断为决策变量, 以经济性、可靠性等为目标函数, 考虑潮流平衡约束、拓扑约束等, 本质是一个大规模混合整数优化问题<sup>[3-6]</sup>。目

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52207105); 广东省基础与应用基础研究基金项目资助(2023A1515011598)

前, 针对这一问题的优化方法主要分为两大类: 经典数学优化方法<sup>[6-9]</sup>和启发式算法<sup>[10-15]</sup>。

数学优化方法具有较好的理论支撑, 但采用分支定界等方法(其计算复杂性为伪多项式界)求解大规模配电网时, 存在计算时间过长, 难以满足应急响应要求的问题<sup>[10]</sup>。启发式算法处理复杂的非线性规划问题具有一定的优势, 基于不同的编码策略和算法改进, 已有文献提出了多种方法来提升算法性能和求解效率。首先, 生成树编码和环状编码能够有效提升算法求解性能, 被多篇文献采用。如文献[10-11]利用生成树进行编码, 确保了启发式算法的所有候选解均能满足拓扑约束, 克服传统二进制编码产生大量不可行解的缺陷; 文献[12-16]利用网络的环进行编码, 断开该环网内的一个分段开关使网络维持辐射状, 有效地降低了解的空间。此外, 改进型启发式算法在多目标优化中的应用也有显著进展。文献[15]改进了离散型麻雀搜索算法, 提高了初始种群的多样性和全局搜索能力; 文献[16]改进了量子粒子群算法, 提高了算法的全局收敛性和收敛速度; 文献[17]利用混沌自适应人工鱼群算法在含有储能的配电网中实现多目标求解; 文献[18]采用萤火虫算法, 实现了网络重构与分布式电源选址的同步优化; 文献[19]通过改进和声搜索算法提升了多目标问题的求解效率; 文献[20]利用改进的烟花算法优化了交直流配电网中的多目标重构, 增强了算法的实用性。

然而, 上述研究主要针对负荷波动调整运行方式实现网络重构, 目前针对故障场景下大规模网络重构仍然存在以下问题:

1) 故障场景单一, 未考虑到多重故障会导致孤岛产生, 使得拓扑约束无法满足。

2) 在编码方面, 不同编码各有优缺点, 具体如下表 1 所示。

表 1 编码方式对比

Table 1 Comparison of encoding methods

| 编码方式  | 优点      | 缺点           |
|-------|---------|--------------|
| 二进制编码 | 获取容易    | 解空间庞大且有效解占比低 |
| 生成树编码 | 解空间小且是树 | 获取困难         |
| 环状编码  | 有效解占比高  | 易受环的类型影响     |

从表 1 可知, 生成树编码相比其他编码方式可以不用考虑拓扑约束, 但找到所有生成树需要花费大量的时间<sup>[21]</sup>, 不宜在故障场景中应用。环状编码寻优效果比二进制编码更好, 但环的大小会影响解空间和有效解的占比。而找出所有最小的环虽比生成树简单, 但现有算法也需花费大量时间<sup>[22]</sup>。

3) 部分编码的改进方式存在解缺失(如有序环编码<sup>[15]</sup>)或过程复杂(如修正不可行解<sup>[13]</sup>)等问题。

4) 在优化算法方面, 大部分文献对非离散算法的改进是采用变量取整和引入其他搜索策略, 以此适应离散重构和提升部分性能, 但短时间内得到的重构策略网络损耗较大。

为解决上述问题, 本文提出了快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法。具体贡献如下:

1) 基于 Tarjan 算法剔除孤岛部分, 解决了辐射状约束无法满足的问题。

2) 基于 Tarjan 算法和宽度优先搜索(breadth first search, BFS)快速找到最小环集, 并通过编码生成规则提高有效解占比。

3) 改进河马优化(hippopotamus optimization, HO)算法提升了算法的短时间寻优效果。

## 1 本文方法框架

快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法框架具体如图 1 所示。首先, 利用无向图  $G$  构建配电网模型, 根据故障信息去除对应的  $G$  边, 得到故障后的拓扑  $G_0$ 。基于模型  $G_0$ , 以变电站为源利用 Tarjan 算法进行遍历搜索, 从而获取含有电源连通子图  $G_s$ , 以及  $G_s$  的基本环集和反向边。其次, 利用基本环集构造  $G_s$  的最大双连通分量图  $G_{bc}$ , 根据反向边两端节点的度确定源点和汇点, 基于此在  $G_{bc}$  上利用 BFS 得到最小环集。随后, 利用最小环进行编码, 并根据环间交集对其进行改进减少解空间。然后, 根据以上编码方式, 引入抽样、图论、交叉方法改进 HO 算法的搜索过程, 提升 HO 算法的寻优效果。最后, 建立以网损、开关次数和电压偏差最小的网络重构数学模型, 并进行优化计算, 从而得到配电网故障后的重构策略, 对停电区域进行恢复。

## 2 快速配电网故障重构方法

重构问题本质是找无向图中的生成树, 而破圈法相比直接找出所有生成树更容易。但破圈法的效果会受环的大小影响, 其中最小环的解空间小、且有效解占比最高。因此, 本文以最小环作为编码, 并求出配电网的重构方案。

### 2.1 配电网无向图模型

本文采用无向图  $G = (V, E)$  来描述配电网的拓扑结构, 其中, 集合  $V$  表示配电网中的各个节点(站房、杆塔等), 集合  $E$  则表示这些节点之间的支路。

### 2.2 预处理

在故障场景下, 重构目的是通过调整联络/分段

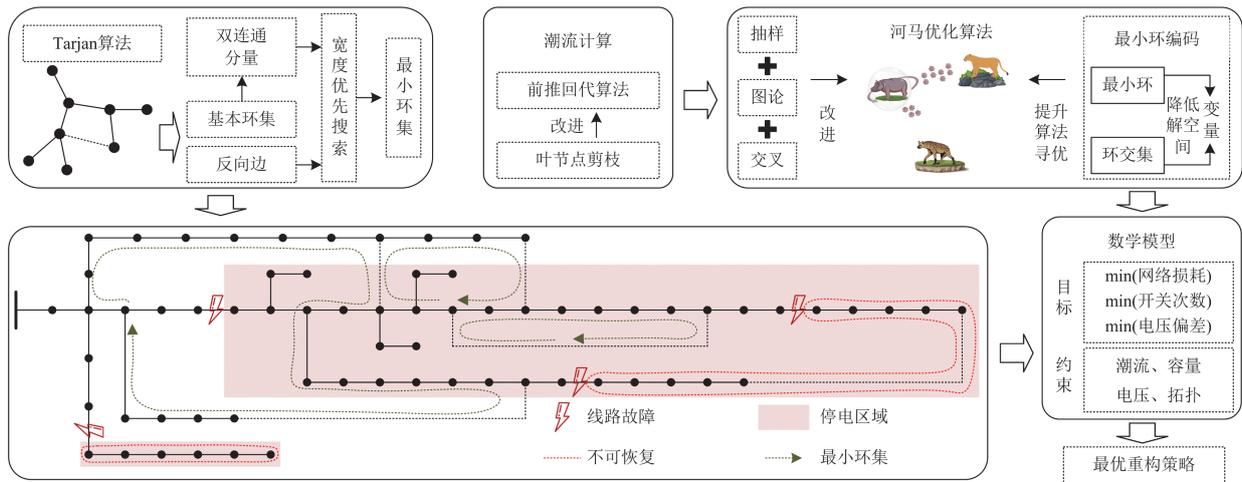


图 1 快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法的框架图

Fig. 1 Framework for coding improvement and application algorithm for rapid distribution network fault reconfiguration

开关恢复供电中断的区域。然而,故障会产生孤岛,导致拓扑约束无法满足。同时,孤岛区域无法通过重构策略进行恢复,无需在重构中考虑。此外,故障会导致拓扑发生改变,需要重新寻找网络中的环,作为算法的输入。

2.2.1 故障拓扑处理

通常负荷接入配电网时会配有熔断器,其在发生故障时对拓扑影响较小。因此,本文不考虑节点发生故障的情况。

对于支路故障,需要先确定断开的支路集合  $E_o$ ,并在  $G$  中移除  $E_o$ 后,得到故障后的配电网子图  $G_o$ ,即  $G_o = G - E_o$ 。其中,支路故障主要分为断路和短路两类,其获取  $E_o$ 的方法如下。

- 1) 对于断路故障。 $E_o$ 为断路处的支路。
- 2) 对于短路故障。由于需要进行故障隔离,需要找到故障点邻近的开关。通常站房间的支路两侧都有开关(如图 2(a)所示),而杆间通常只有一个开关或没开关(如图 2(b)所示)。为此,本文假设当短路发生在含有开关的支路上时  $E_o$ 为该支路,而发生在未含有开关的支路时  $E_o$ 为两侧开关(通过搜索找到)。

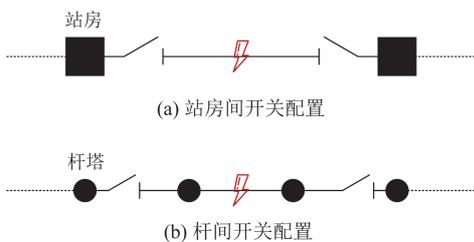


图 2 不同类型线路的开关配置

Fig. 2 Switch configuration for different type of lines

2.2.2 基于 Tarjan 算法的故障拓扑分析

本文通过 Tarjan 算法<sup>[23]</sup>找到  $G_o$ 的含电源连通分量的节点  $R$ ,并构造配电网的重构子图  $G_s(G_s = G_o[R])$ ,从而避免孤岛带来的影响。此外,该算法是基于深度优先搜索(depth first search, DFS)实现的,因此能够依据反向边找到无向图  $G_s$ 中的基本环集(一组线性无关的环)。

传统的 Tarjan 算法需要依靠时间戳和追溯值实现,为了简化这一过程,本文依据 DFS 路径  $P_d$ 简化基本环的获取。具体而言:以电源为源开始 DFS,并把找到的节点存入集合  $R$ 中,记录节点的路径  $P_d$ 。当节点  $v$ 的邻居  $u$ 在  $R$ 中,且不是  $v$ 的父节点,则边  $(v,u)$ 是反向边并形成了环。而环可以通过  $P_d(v)$ 得到,即在  $P_d(v)$ 中找到  $u$ 至  $v$ 的那一部分(如图 3 所示)。

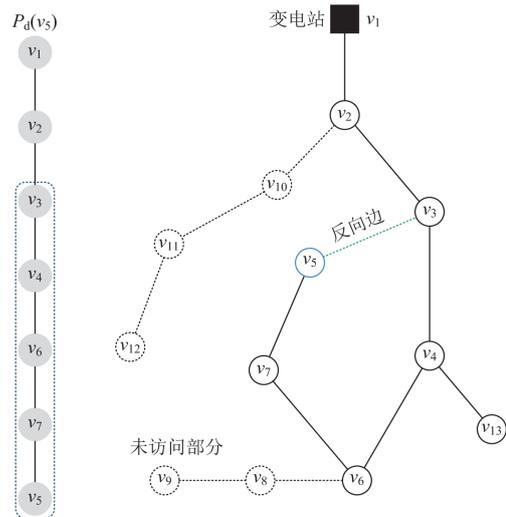


图 3 基本环获取方法

Fig. 3 Fundamental cycle acquisition method

通过上述过程找到  $R$  和  $G_s$  的基本环集, 但基本环集作为编码, 存在解的重复性高和空间较大的问题。因此, 还需要找到  $G_s$  的最小环集。

### 2.2.3 基于 BFS 的最小环集获取方法

传统最小环算法为了确保结果的准确性, 需要多次对图进行修改并计算节点间的最短路径, 耗费了大量的时间<sup>[22]</sup>, 导致对时间要求极高的故障场景不适用。

图 4 和附录 A 表 A1 分别是 DFS 后的图和基本环集, 从表 A1 中可知, 部分基本环有可能是最小的, 但缺乏直接判定的方法, 需要对图修改并通过最短路径验证, 该过程较为复杂。

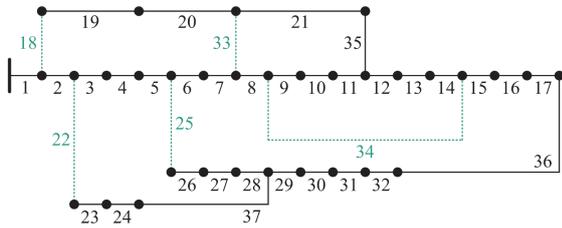


图 4 DFS 搜索后的 IEEE33 节点配电网

Fig. 4 IEEE33-bus distribution network after DFS

通过观察图 4 可知, 每个最小环都含有反向边。因此, 可以通过 BFS 找到反向边两个点最短距离, 从而找到最小环, 省略了验证过程。具体步骤如下。

1) 确定  $G_s$  的最大双连通子图  $G_{bc}$ 。为了减少 BFS 的搜索范围, 只需要关注含有环的部分, 即最大双连通分量。虽然 Tarjan 算法能够找到无向图的所有双连通分量, 但最小环只在最大的双连通分量中。因此, 无需重复使用 Tarjan 算法, 可依据基本环集, 确定最大双连通分量子图  $G_{bc} = G_s[V_{bc}]$ 。

$$V_{bc} = V_1^{fc} \cup V_2^{fc} \cup \dots \cup V_m^{fc} \quad (1)$$

式中:  $V_{bc}$  表示最大双连通分量的节点;  $V_m^{fc}$  表示第  $m$  个基本环的节点。

2) 寻找最小环集。以反向边中度最小的为源, 其余为汇。在  $G_{bc}$  上利用 BFS 确定源至汇的路径(路径数  $\leq$  汇的度)。根据 BFS 到达汇的次数确定路径类型, 第一次为反向边, 第二次为最小环, 第  $n$  次为其他环。其他环有可能是最小环之一, 但验证过程较为复杂, 重点关注最小环即可。因此, BFS 第二次到达汇便可结束。最后, 对所有反向边重复该步骤, 得到  $m$  个最小环, 并去除重复的最小环。

3) 当最小环数量少于基本环时, 利用  $G_{bc}$  中剩余的节点  $V_{sc}$  构造子图  $G_{mc} = G_{bc}[V_{sc}]$ 。

$$V_{sc} = V_{bc} - V_1^{mc} \cup V_2^{mc} \cup \dots \cup V_k^{mc} \quad (2)$$

式中:  $V_k^{mc}$  表示第  $k$  个最小环的节点。

从子图  $G_{mc}$  的每个连通分量获取一个边, 然后重复步骤 2) 求出这些边对应的最小环, 并去除重复的最小环, 从而找到  $G_s$  剩下的最小环。

## 2.3 改进河马优化算法

### 2.3.1 编码策略改进

以最小环集为编码时, 在破圈过程中大部分不可行解是由于两个环同时选择公共部分造成的。基于此, 本文对最小环集编码进行改进, 具体如下:

1) 求环间的公共边, 将其记为  $E_{12}^1, \dots, E_{ij}^1$ 。

$$E_{ij}^1 = E_i^{mc} \cap E_j^{mc} \quad (3)$$

式中:  $E_i^{mc}$  表示第  $i$  个最小环的边集。

2) 随机生成抽取顺序。

3) 依据抽取顺序, 从每个最小环随机抽一个边。当  $E_i^{mc}$  抽到的边  $e \in E_{ij}^1$  时,  $E_j^{mc}$  要在去掉  $E_{ij}^1$  后再随机抽取一个边。若出现空集情况, 则重复步骤 2)、步骤 3)。

通过上述方法, 便得到了一组破圈边, 并将其作为算法的输入。为了方便, 后续用函数  $C(E_{mc})$  表示上述过程。

与传统编码方法相比, 该方法剔除了大部分不可行解, 从而减少了解的空间。此外, 变量为边, 并非通过映射方式转化为数字, 可以引入图论方法改进搜索策略, 进一步提高算法的求解效率。

### 2.3.2 算法改进

HO 是一种新颖的元启发式优化算法, 其借鉴了河马在自然环境中的行为模式, 将这些行为抽象为一系列数学模型和优化策略<sup>[24]</sup>。

HO 的探索与利用平衡机制, 使其能够在搜索空间中快速有效地得到有效解, 这对于在故障恢复中快速得到重构策略极其重要。但 HO 采用连续编码, 迭代后生成的结果为连续实数, 而本文采取的是组合形式的编码策略, 导致其不能直接在 HO 中运用。为此, 本文对 HO 每个阶段进行针对性的改进, 具体改进如下。

1) 初始化种群。

由于编码方式为具体的边, 因此需要基于上述方法生成  $n$  只河马, 具体为

$$X_i = C(E_{mc}), i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{X}_i$  为第  $i$  只河马的位置;  $x_{ij}$  为第  $i$  只河马的第  $j$  个变量。

2) 第一阶段搜索, 更新雄性河马和未成熟河马在河中的位置。

雄性河马  $\mathbf{X}_M$  与占据主导的河马(全局最优)  $\mathbf{X}_D$  竞争。由于变量是离散类型, 因此参考遗传算法的交叉方式, 利用  $\mathbf{X}_M$  与  $\mathbf{X}_D$  交叉改变部分变量, 实现雄性河马靠近主导地位的河马, 以此达到竞争目的, 具体的位置更新公式为

$$\mathbf{X}_i^M : x_{ij}^M = \begin{cases} x_j^D & r_1 \geq \gamma \\ x_{ij} & r_1 < \gamma \end{cases} \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, m$$

式中:  $\mathbf{X}_i^M$  为第  $i$  只雄性河马;  $r_1$  为  $[0,1]$  的随机数;  $\gamma$  为每次判断生成的  $[0,1]$  随机数;  $x_{ij}^M$  和  $x_j^D$  分别为雄性河马和占据主导地位河马的变量;  $K$  为河马总数的一半, 即  $K = n/2$ 。

未成熟河马  $\mathbf{X}_{FB}$  由于好奇心会离开母亲, 在河马群  $\mathbf{X}_{MG}$  中移动, 并且会根据衰减因子  $\tau$  作出不同的决策。当  $\tau \geq 0.6$  时, 从  $\mathbf{X}_{MG}$  每一列随机抽一个元素生成候选解作为  $\mathbf{X}_{FB}$ 。当  $\tau < 0.6$  时, 从  $E_{mc}$  中去掉  $\mathbf{X}_i$  对应的边, 得到新的边集合  $E_{fbc}$ , 并基于改进编码方式生成一组候选解作为  $\mathbf{X}_{FB}$ 。

$$\mathbf{X}_i^{FB} : x_{ij}^{FB} = \begin{cases} \text{choice}(\mathbf{X}_j^{MG}) & \tau \geq 0.6 \\ C(E_{fbc}) & \tau < 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, K, j = 1, 2, \dots, m$$

$$\tau = \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad (8)$$

式中:  $T$  为最大迭代次数;  $t$  为当前迭代次数;  $\text{choice}(\cdot)$  表示随机抽取 1 个元素;  $\mathbf{X}_j^{MG}$  为  $\mathbf{X}_{MG}$  中的第  $j$  列;  $\mathbf{X}_i^{FB}$  为第  $i$  只未成熟河马;  $x_{ij}^{FB}$  为第  $i$  只未成熟河马的第  $j$  个变量。

为了提升局部搜索能力, 本文从  $\mathbf{X}$  中随机抽样一半的种群, 作为  $\mathbf{X}_{MG}$ 。

$$\mathbf{X}_{MG} = \text{sample}(\mathbf{X}, K) = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1^{MG} \\ \mathbf{X}_2^{MG} \\ \vdots \\ \mathbf{X}_K^{MG} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{X}_K^{MG}$  为河马群中第  $K$  只河马;  $\text{sample}(\mathbf{X}, K)$  表示从  $\mathbf{X}$  中随机抽样  $K$  只河马。

3) 第二阶段搜索, 河马抵御捕食者。

结合本文编码策略, 生成一个候选解作为捕食者  $\mathbf{X}_p$ 。由于捕食者与河马位于同一个环中, 所以河马与捕食者间存在最短路径  $E_s$  和最长路径  $E_L$ 。

河马在面对捕食者时会采取驱赶和攻击两种策略保护自己, 具体如图 5 所示。

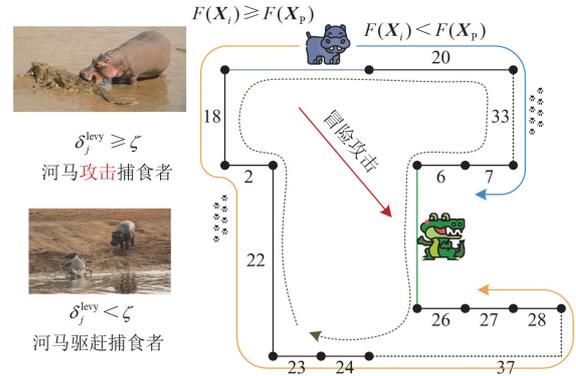


图 5 第二阶段搜索策略

Fig. 5 Search strategy of second phase

攻击策略: 河马有一定概率冒险攻击捕食者, 即河马到达捕食者的位置。

驱赶策略: 河马通过靠近方式吓跑捕食者。当河马个体优于捕食者时, 沿最短路径迅速逼近(在  $E_s$  中随机取一个), 实现快速驱赶策略; 若河马个体劣于捕食者, 则沿最长路径缓慢逼近(在  $E_L$  中随机取一个), 实现谨慎驱赶策略。

$$\mathbf{X}_i^R : x_{ij}^R = \begin{cases} x_j^p & \delta_j^{\text{levy}} \geq \zeta \\ \omega & \delta_j^{\text{levy}} < \zeta \end{cases} \quad (10)$$

$$\omega = \begin{cases} \text{choice}(E_L^i) & F(\mathbf{X}_i) \geq F(\mathbf{X}_p) \\ \text{choice}(E_s^i) & F(\mathbf{X}_i) < F(\mathbf{X}_p) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{X}_i^R$  为第  $i$  只河马面对捕食者的位置,  $i = K+1, K+2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ ;  $x_{ij}^R$  为该河马的变量;  $x_j^p$  为捕食者的第  $j$  个变量;  $E_L^i$  和  $E_s^i$  分别为第  $j$  个变量的最长路径和最短路径;  $\omega$  为河马驱赶捕食者的取值;  $\delta_j^{\text{levy}}$  为第  $j$  个变量的莱维分布取值;  $\zeta$  为攻击阈值, 本文取 1。

4) 第三阶段搜索, 河马从捕食者手中逃脱。

当河马无法抵御捕食者时, 河马会离开当前区域, 跑到最近的安全位置避免被捕食者伤害。具体而言, 在  $E_{fbc}$  中进行抽样, 抽样数量会随着迭代次数的增加而减少。

$$E_j^{\text{ec}} = \text{sample}\left(E_j^{\text{fbc}}, \left[(1-\tau)|E_j^{\text{fbc}}|\right]\right) \quad (12)$$

$$\mathbf{X}_i^E : x_{ij}^E = \begin{cases} \text{choice}(E_j^{\text{ec}}) & E_j^{\text{ec}} \neq \emptyset \\ x_{ij} & E_j^{\text{ec}} = \emptyset \end{cases} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$$

式中:  $E_j^{\text{fbc}}$  和  $E_j^{\text{ec}}$  分别为第  $j$  个变量对应的边集合和

抽样后的最小环边集； $|\cdot|$ 表示集合的势； $\mathbf{X}_i^E$ 为第*i*只河马逃跑后的位置； $x_{ij}^E$ 为*i*只河马逃跑后的位置第*j*个变量。

### 2.4 基于树状结构改进前推回代潮流计算

虽然前推回代法求解配电网潮流效果好，但在重构中需要频繁确定计算顺序。因此，本文针对树状结构的特点，确定潮流计算的顺序，从而省略了频繁确定计算顺序的过程。

前推回代法是从网络的末端逐步往电源递推计算。针对这一过程，本文利用无向树的度实现，具体步骤如下。

1) 找到无向树 $G_T$ 中度为1的节点，并去掉电源节点，记为集合 $V_1 = \{v_1^1, v_2^1, \dots, v_\beta^1\}$ 。

2) 结合树拓扑特点可知， $v_\beta^1$ 仅有一个邻居 $u_\beta$ 。基于此，确定末端支路 $e_\beta^1 = (u_\beta, v_\beta^1)$ 并开始前推计算。同时，用 $E_1^1$ 记录第1次计算的末端支路，去掉树 $G_T$ 的 $V_1$ 节点。

3) 重复步骤1)一步骤2)，直至完成前推计算。

4) 回代计算与前推计算相反，因此，可基于前推计算记录的末端支路顺序实现。即回代计算时，按照 $E_n^1 \rightarrow \dots \rightarrow E_2^1 \rightarrow E_1^1$ 的顺序求解。

5) 完成一次前推回代计算后，若不满足收敛条件，下一次迭代计算可直接基于末端支路顺序求解。

## 2.5 数学模型

### 2.5.1 目标函数

本文以网损、开关动作次数和电压偏差最小为目标函数，具体为

$$\min F = \min(w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3) \quad (14)$$

式中： $F$ 为综合目标函数； $f_1$ 、 $f_2$ 和 $f_3$ 分别为网损、开关动作次数和电压偏差的成本； $w_1$ 、 $w_2$ 和 $w_3$ 均为权重系数，根据实际情况的重要程度设定<sup>[16]</sup>，且满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ 。

$f_1$ 、 $f_2$ 和 $f_3$ 的计算公式为

$$f_1 = C_1 \sum_{e \in E} I_e^2 r_e \quad (15)$$

$$f_2 = C_o (|L| + |B|) \quad (16)$$

$$f_3 = C_v \sum_{v \in V} |U_v - U_N| \quad (17)$$

式中： $C_1$ 、 $C_o$ 和 $C_v$ 分别为网损、开关动作和电压偏差的成本系数<sup>[25-27]</sup>； $I_e$ 为边*e*的电流； $r_e$ 为边*e*对应支路的电阻； $L$ 和 $B$ 分别表示动作的联络开关集合和分段开关集合； $U_v$ 为节点*v*的电压； $U_N$ 为额定电压。

### 2.5.2 约束条件

本文以潮流、电流、电压、拓扑为约束条件。

#### 1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_v + \sum P_v^{\text{in}} + \sum P_v^{\text{out}} = 0 \\ Q_v + \sum Q_v^{\text{in}} + \sum Q_v^{\text{out}} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中： $P_v$ 为节点*v*的有功功率； $P_v^{\text{in}}$ 为节点*v*流入的有功功率； $P_v^{\text{out}}$ 为节点*v*流出的有功功率； $Q_v$ 为节点*v*的无功功率； $Q_v^{\text{in}}$ 为节点*v*流入的无功功率； $Q_v^{\text{out}}$ 为节点*v*流出的无功功率。

#### 2) 电压约束

$$U_v^{\text{min}} \leq U_v \leq U_v^{\text{max}} \quad (19)$$

式中： $U_v^{\text{max}}$ 、 $U_v^{\text{min}}$ 分别为节点*v*的电压上、下限。

#### 3) 电流约束

$$I_e \leq I_e^{\text{max}} \quad (20)$$

式中： $I_e^{\text{max}}$ 为边*e*的电流上限。

#### 4) 拓扑约束

由于本文重构方法是基于破圈法实现的，满足节点比边多1个的条件。因此，只需要满足连通性约束，即可保证拓扑是辐射状的。

$$N_c(G_r) = 1 \quad (21)$$

式中： $N_c(G_r)$ 表示重构后配电网无向图 $G_r$ 的连通分量数量。

## 2.6 整体流程图

快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法的流程如图6所示，其步骤如下。

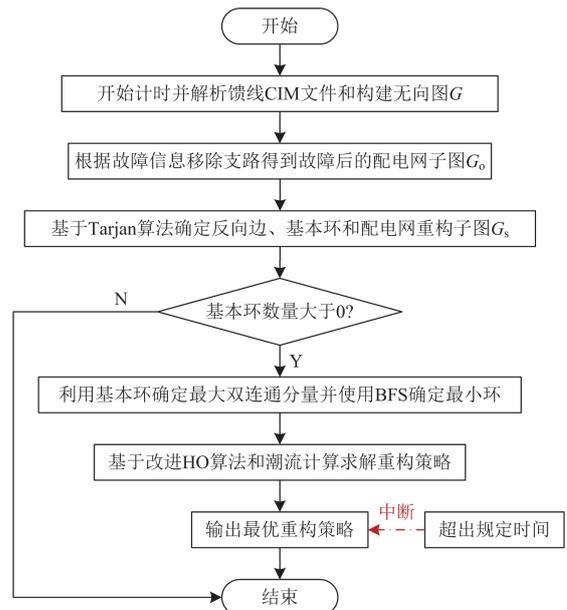


图6 整体流程图

Fig. 6 Overall flow chart

1) 开始计时。从电网管理平台获取故障馈线的公共信息模型(common information model, CIM), 并构建配电网无向图  $G$ 。

2) 输入故障位置, 根据 2.2.1 节的方法隔离故障和构建故障的配电网子图  $G_0$ 。

3) 基于 2.2.2 节方法分析  $G_0$  得到反向边和基本环, 并构造重构子图  $G_s$ 。

4) 若基本环的数量大于 0, 则进入下一步继续求解重构。否则, 直接结束。

5) 根据 2.2.3 节的方法, 利用基本环构造最大双连通分量图  $G_{bc}$ , 在  $G_{bc}$  上利用反向边和 BFS 找到所有最小环。

6) 根据 2.3 节改进 HO 算法和 2.4 节改进潮流方法求解 2.5 节重构数学模型。

7) 迭代完成后输出最优重构策略。需要注意的是, 当超出规定时间时终止迭代, 直接输出当前最优结果。

### 3 案例分析

为了验证本文所提方法的有效性, 本文在系统环境: i5-12500(处理器)、32 G(运行内存)条件下, 利用 python3.8 编译本文算法进行仿真测试。

#### 3.1 算例介绍

本文选取 IEEE69 节点系统和云南省真实配电网验证本文方法。

##### 1) IEEE69 节点系统

本文采用如图 7 所示的 IEEE69 配电网, 该网络总负荷为  $3802 + j2694$  kVA。假设所有线路的最大载流量为 500 A。

##### 2) 云南省真实配电网

本文采用如图 8 所示的 751 节点配电网, 该网络总运行变压器为 142 台(总容量为 23 946 kVA), 总开关为 225 台, 主干线型号为 YJV22-3-240(最大载流量为 480 A), 支线型号为 JKLGJYJ-185(最大载流量为 340 A)和 LGJ-70(最大载流量为 215 A), 线路总长为 70.643 km。上述两种线路故障场景如表 2 所示。

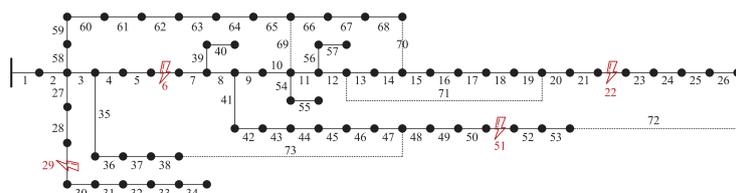


图 7 IEEE69 节点配电网

Fig. 7 IEEE69-bus distribution network

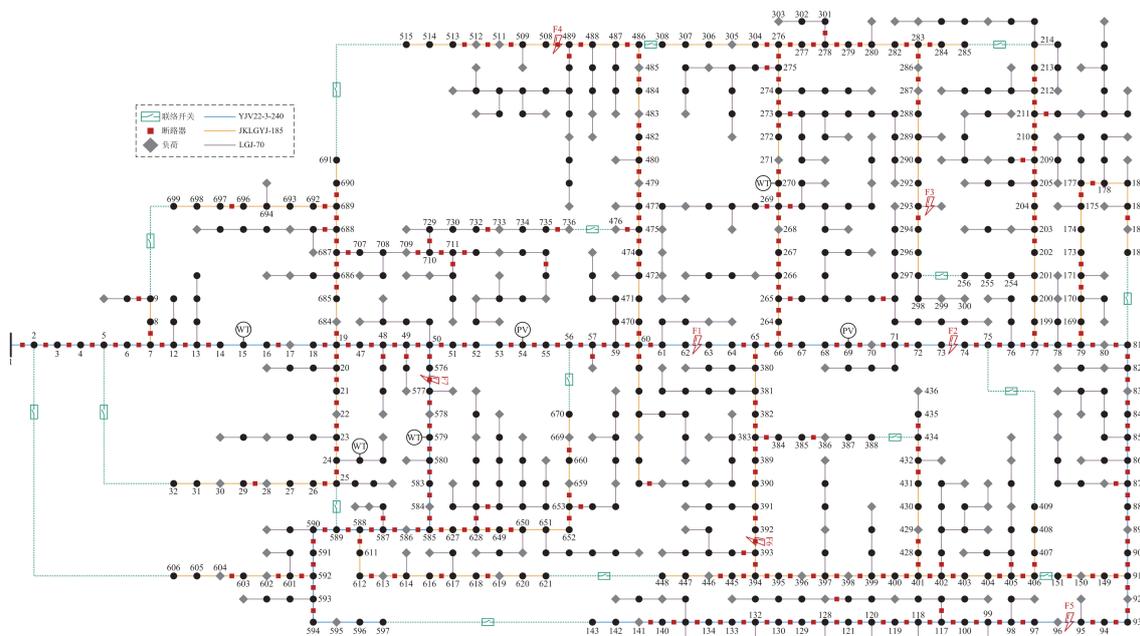


图 8 751 节点真实配电网

Fig. 8 751-bus real distribution network

表 2 故障场景

Table 2 Fault scenario

| IEEE69 编号 | 故障线路    | 751 节点编号 | 故障线路     |
|-----------|---------|----------|----------|
| Case1     | 6       | Case5    | F1       |
| Case2     | 22、51   | Case6    | F2       |
| Case3     | 29、51   | Case7    | F3、F7    |
| Case4     | 6、22、51 | Case8    | F4、F5、F6 |

3.2 仿真实验

3.2.1 本文方法测试

为了验证本文方法的有效性，采用本文方法对上述两个案例进行仿真测试，IEEE69 和 751 节点仿

表 3 短时间故障重构仿真结果

Table 3 Simulation results of short-term fault reconfiguration

| 故障场景  | 只考虑网损  |    |         | 只考虑开关动作 |    |         | 只考虑电压偏移 |    |         | 都考虑 ( $w_1=1/3, w_2=1/3, w_3=1/3$ ) |           |               |
|-------|--------|----|---------|---------|----|---------|---------|----|---------|-------------------------------------|-----------|---------------|
|       | 网损/kW  | 次数 | 电压偏差/kV | 网损/kW   | 次数 | 电压偏差/kV | 网损/kW   | 次数 | 电压偏差/kV | 网损/kW                               | 次数        | 电压偏差/kV       |
| Case1 | 56.62  | 9  | 15.89   | 80.66   | 3  | 17.48   | 57.02   | 9  | 15.48   | <b>58.02</b>                        | <b>5</b>  | <b>15.83</b>  |
| Case2 | 39.14  | 6  | 6.10    | 78.74   | 0  | 11.55   | 39.21   | 6  | 6.08    | <b>39.32</b>                        | <b>4</b>  | <b>6.26</b>   |
| Case3 | 42.19  | 7  | 8.36    | 86.44   | 1  | 16.19   | 42.19   | 7  | 8.09    | <b>42.48</b>                        | <b>5</b>  | <b>8.88</b>   |
| Case4 | 52.22  | 7  | 12.20   | 69.97   | 3  | 17.32   | 52.83   | 7  | 11.96   | <b>52.72</b>                        | <b>5</b>  | <b>12.18</b>  |
| Case5 | 206.96 | 29 | 233.76  | 378.76  | 21 | 346.63  | 212.40  | 29 | 199.20  | <b>218.34</b>                       | <b>23</b> | <b>221.47</b> |
| Case6 | 204.91 | 31 | 231.40  | 277.48  | 21 | 268.24  | 212.74  | 29 | 207.73  | <b>206.39</b>                       | <b>25</b> | <b>222.63</b> |
| Case7 | 161.52 | 30 | 180.31  | 247.41  | 16 | 267.14  | 179.18  | 26 | 170.51  | <b>168.40</b>                       | <b>18</b> | <b>174.47</b> |
| Case8 | 161.20 | 29 | 178.75  | 340.41  | 17 | 334.41  | 168.41  | 27 | 177.61  | <b>183.09</b>                       | <b>21</b> | <b>207.94</b> |

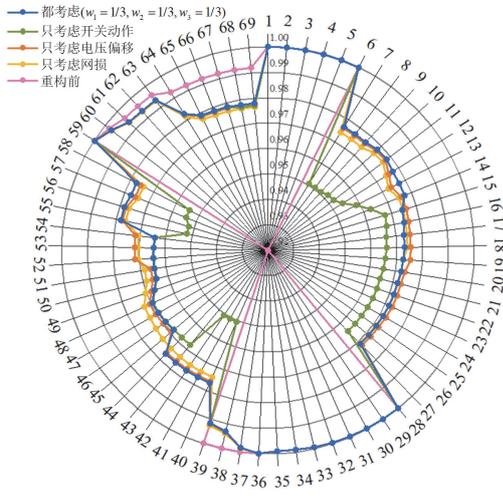


图 9 Case1 故障重构前后电压对比

Fig. 9 Voltage comparison before/after fault configuration of Case1

进一步分析表明，与仅考虑以网损或电压偏移为目标相比，多目标模型显著降低了开关动作的次数。同时，与仅考虑以开关动作次数为目标相比，本文的多目标模型在网损和电压偏差的控制方面(如图 9 所示)做出的牺牲更小。

3.2.2 算法稳定性验证

选择真实配电网的 Case7 为算例，并且考虑网

真结果如表 3 所示，IEEE69 的 Case1 故障重构前后电压对比如图 9 所示。算法设置：河马数量  $n$  为 16，最大迭代次数  $T$  为 1000，潮流计算收敛精度为  $10^{-4}$ ，计算时间为 5 s。

从表 3 和图 9 可知，本文所提方法能够在短时间内求出一个可行的重构策略，从而实现了快速恢复停电区域的供电。此外，本文所提的多目标模型能够有效综合网损、开关动作次数和电压偏差 3 个方面，相较于单一目标优化，展现出了更为卓越的性能，实现了更全面的优化效果。

损、开关动作次数和电压偏差目标 ( $w_1=1/3, w_2=1/3, w_3=1/3$ )。基于以上内容，解除计算时间的限制，重复 200 次独立实验，并记录 5 s、10 s 和最终的结果，记为 S5、S10 和 SF，收敛曲线如图 10 所示，箱线图如图 11 所示。

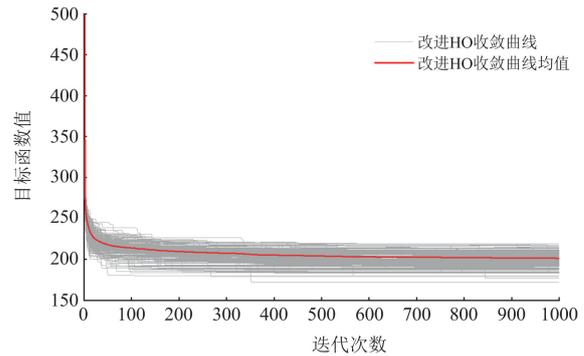


图 10 改进 HO 收敛曲线

Fig. 10 Improved HO convergence curve

从图 10 可知，改进后的 HO 算法巩固并提升了原算法在探索与开发之间平衡的能力。具体来说，在较小的种群规模条件下，算法在初期迅速地解引导至接近最优解的区域，随后算法的收敛速度有意放慢，以便进行更为精细的搜索。这种策略有助

于避免算法过早地收敛到局部最优解。值得注意的是, 算法在初期快速接近最优解的特性对于故障重构至关重要, 因为在紧急情况下, 需要迅速找到一个可行且优质的解决方案, 而非过分追求全局最优解。

如果要在电网中应用, 期望人工精确设定优化算法的参数并不现实。相反, 采用一组通用的参数设置, 并规定一个合理的求解时间, 这种做法更为实际且可靠。基于这一考虑, 本文方法重点关注在不同时间限制下算法输出结果的稳定性, 以确保其在实际应用中的有效性。

由图 11 可知, 改进后的 HO 算法在各个时间点的输出结果表现出了良好的稳定性, 且随着时间的推移, 四分位距逐渐减小。具体而言, 在算法初期阶段(S5 和 S10), 箱体范围较大, 但呈现出逐步缩小的趋势, 表明算法在早期阶段优化效果不断提升。此外, 异常值数量较少, 表明算法在探索解空间的同时, 优化结果未出现大幅度偏离。中位数较低(网损分别为 168 kW 和 146 kW, 开关动作次数分别为 18 次和 16 次, 电压偏差分别为 174 kV 和 157 kV), 进一步说明算法在初期阶段已经具有较好的优化能力。最终结果(SF)显示, 3 个优化目标的箱体范围均显著收缩至较小范围, 表明算法在优化后期已基本收敛, 结果趋于稳定。网损、开关动作次数和电压偏差均达到了较优值, 充分证明了改进后算法的有效性和鲁棒性。

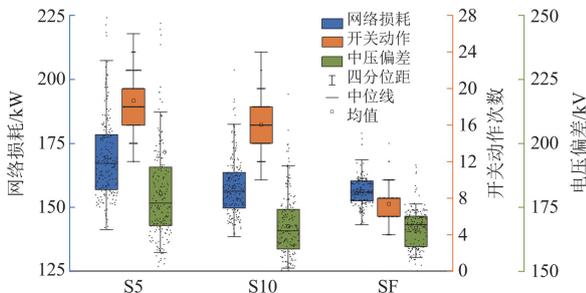


图 11 改进 HO 输出结果箱线图

Fig. 11 Box plot of improved HO output result

综上, 改进后的 HO 算法在求解大规模配电网故障重构模型时表现出良好的性能。在初始阶段, 算法结果稳定性较好, 且网损、开关动作次数和电压偏差的中位数较低, 满足应急场景下对优化效率和解的质量要求。在优化后期, 算法进一步收敛, 保证了结果的全局性和稳定性。这表明, 改进后的 HO 算法不仅能够有效解决大规模故障重构问题, 同时也具有较强的实际应用潜力。

### 3.2.3 对比实验

#### 1) 优化算法对比

以 Case7 为算例, 在相同的参数配置下, 本文选择了灰狼优化、能量谷优化、鲸鱼优化算法, 以及未改进的 HO 算法作为对照组。由于本文提出的改进编码方法是基于组合优化的形式, 它并不适用于这些对照算法。因此, 这些算法均采用了传统的十进制环状编码方式。此外, 为了进一步验证改进 HO 算法的性能, 还引入经典的数学优化方法作为额外的对比基准。

由图 12 和表 4 可知, 改进后的 HO 算法在收敛速度和最终收敛值两个关键指标上均优于其他对比算法。这种优势主要归功于以下几个方面的创新。

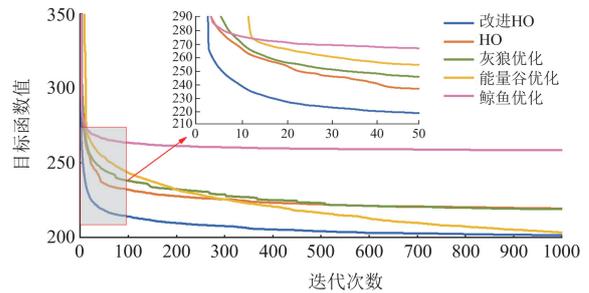


图 12 收敛曲线对比

Fig. 12 Comparison of convergence curves

表 4 不同优化算法 S5 求解结果与求解效率对比

Table 4 Comparison of S5 solution results and efficiency of different optimization algorithms

| 方法    | 总耗时/s   | 网络损耗/kW       | 动作次数      | 电压偏差/kV       |
|-------|---------|---------------|-----------|---------------|
| 改进 HO | 593.519 | <b>168.40</b> | <b>18</b> | <b>174.47</b> |
| HO    | 694.751 | 186.34        | 20        | 193.83        |
| GWO   | 461.257 | 176.24        | 24        | 189.99        |
| EVO   | 451.639 | 197.57        | 22        | 211.66        |
| WOA   | 581.391 | 217.36        | 24        | 227.18        |
| 数学优化  | >999    | —             | —         | —             |

(1) 编码改进: 通过提高有效解的占比, 提升了搜索过程中解的质量。与传统的将边映射为十进制数的编码方式相比, 改进算法以边为变量避免了传统编码方式中四舍五入导致的解空间失真, 降低了陷入局部最优的风险。

(2) 搜索方式的优化: 结合编码和重构问题的特点, 改进的 HO 算法调整了搜索策略, 使其更加适应问题的特性, 从而提高了搜索效率。

此外, 在实际应急场景中, 快速输出可靠结果至关重要。本文方法在 S5 的输出结果证明了其求解效率较高, 这一特点恰好满足应急环境下的迫切需求。

综上所述, 改进的 HO 算法不仅在收敛速度和最终收敛值上表现卓越, 而且在实际应用中展现出了更高的求解效率和鲁棒性, 特别是在需要快速响

应的应急场景下，本文方法的优势更为明显。

2) 改进编码对比

以 IEEE33 和 IEEE69 为算例，选择基本环集和最小环集作为编码与本文方法进行对比，以验证本文所提改进编码的优势，具体如表 5 所示。

表 5 不同编码方式的解空间数量和有效解占比对比

Table 5 Comparison of the number of solution spaces and the proportion of effective solutions for different encoding methods

| 编码方式 | IEEE33        |              | IEEE69         |              |
|------|---------------|--------------|----------------|--------------|
|      | 解空间/个         | 有效解占比/%      | 解空间/个          | 有效解占比/%      |
| 本文方法 | <b>61 246</b> | <b>82.86</b> | <b>406 787</b> | <b>92.78</b> |
| 最小环集 | 86 240        | 58.84        | 541 008        | 69.76        |
| 基本环集 | 370 440       | 13.70        | 1 935 360      | 19.50        |

由表 5 结果可知，本文改进的编码能够显著减小解空间，并提高有效解的占比。而有效解占比的提高能够显著提升算法的寻优效果，并确保短时间内能找到可行解。

3) 最小环获取对比

以 IEEE33、IEEE69、751 节点配电网为算例，重复 100 次实验避免误差，验证本文方法的优越性。由于最小环算法受配电网规模影响较大，而最小环只在最大双连通分量中。为此，本文加入子图  $G_{bc}$  作为对比，结果如表 6 所示。

表 6 不同最小环方法的获取效率对比

Table 6 Comparison of acquisition efficiency of different minimum cycle algorithms

| 方法                | IEEE33        | IEEE69        | 751 节点配电网     |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| 本文方法              | <b>0.0120</b> | <b>0.0171</b> | <b>0.0714</b> |
| 最小环算法             | 0.0315        | 0.0615        | 12.339        |
| 最小环算法( $G_{bc}$ ) | 0.0326        | 0.0511        | 2.0672        |

由表 6 结果可知，本文提出的方法显著减少了获取最小环所需的时间，即使在子图  $G_{bc}$  中本文方法获取最小环的时间也仅占最小环算法的 3.45%。

虽然可以通过修改拓扑结构(合并边)进一步简化拓扑，并提升最小环算法的效率，但本文方法在不修改拓扑的情况下仍能保持较高的求解效率。

综上，在应急场景下，该方法为优化算法的求解节省了大量时间，从而能够进行更多次的求解，提升解的质量。

4) 改进潮流对比

在辐射状网络中，前推回代在求解效率和精度方面均优于其他方法。因此，本文只对比不同前推回代算法的求解效率。以节点分层、支路分层作为对比，重复改进 HO 算法迭代 1000 次的实验，从而

验证本文改进潮流方法的优越性。

从表 7 结果可知，本文方法求解效率优于现有方法，特别是在处理大规模网络时，其效率提升更为明显。

表 7 不同潮流计算方法的计算效率对比

Table 7 Comparison of calculation efficiency of different power flow calculation

| 方法   | IEEE33       | IEEE69       | 751 节点配电网     |
|------|--------------|--------------|---------------|
| 本文方法 | <b>43.56</b> | <b>86.81</b> | <b>593.52</b> |
| 节点分层 | 62.71        | 132.71       | 949.37        |
| 支路分层 | 54.12        | 115.67       | 875.73        |

4 总结

本文从实际电网业务和人员操作的角度出发，提出了一种快速配电网故障重构的编码改进及其应用算法，以实现应急场景下快速制定重构方案，主要结论如下。

1) Tarjan 算法可以有效剔除故障配电网中的孤岛，确保能够满足辐射状约束，并得到一组基本环集和反向边。由于每个最小环都恰好含有一个反向边，且基本环集所组成的  $G_{bc}$  恰好含有所有最小环。基于该特性可利用 BFS 在  $G_{bc}$  上找到最小环集，从而大幅度减少最小环集获取的时间。

2) 在环状编码中，大部分无效解是由两个环同时取到公共边所引起的。因此，通过制定编码生成规则避免同时取到公共边，可以有效减少不可行解的数量，以提升算法的寻优效果。

3) 利用边作为优化算法的编码，避免了传统编码方式中四舍五入导致的解空间失真问题。在此基础上，引入抽样、交叉和图论方法对传统的 HO 算法进行改进，强化了原算法在探索与开发之间的平衡能力，从而在初期迅速引导解接近最优解，实现短时间内找到一个可行且优质的重构方案。

附录 A

表 A1 基本环集  
Table A1 Fundamental cycle

| 编号 | 环(边形式)  |
|----|---|
| 1  | 6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,36, 36, 32, 31, 30, 29, 28, 27, 26,25 |
| 2  | 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,36,32,31,30,29,37, 24,23,22     |
| 3  | 9,10,11,12,13,14,34   |
| 4  | 2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,35,21,20,19,18                                  |
| 5  | 8,9,10,11,35,21,33  |

## 参考文献

- [1] 明煦. 构建新型电力系统打造高质量发展“新引擎”[J]. 大众用电, 2023, 38(9): 5-6.  
MING Xu. Building a new type of power system to create a high-quality development “new engine”[J]. Popular Electricity, 2023, 38(9): 5-6.
- [2] 张洋瑞, 赵俊鹏, 史轮, 等. 考虑边缘电源接入的煤改电台区供电可靠性分析方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 58-62, 200.  
ZHANG Yangrui, ZHAO Junpeng, SHI Lun, et al. Reliability analysis method of power supply in coal-to-electricity station considering the access of edge power supply[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 58-62, 200.
- [3] 徐玉琴, 许佳敏. 基于暂态零序电流图像识别的配电网单相接地故障区域定位[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 33-39.  
XUYuqin, XU Jiamin. Single-phase ground fault area location of distribution network based on transient zero-sequence current image recognition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 33-39.
- [4] GHOLIZADEH N, KAZEMI N, MUSILEK P. A comparative study of reinforcement learning algorithms for distribution network reconfiguration with deep Q-learning based action sampling[J]. IEEE Access, 2023, 11: 13714-13723.
- [5] 唐巍, 张志刚, 张璐, 等. 考虑柔性负荷整形的含源配电网线路升级与开关配置综合优化[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 109-119.  
TANG Wei, ZHANG Zhigang, ZHANG Lu, et al. Comprehensive optimization of upgrade and switch configuration for active distribution line considering flexible load shaping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 109-119.
- [6] 卞艺衡, 别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 33-39.  
BIAN Yiheng, BIE Chaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 33-39.
- [7] HONG H, HU Z, GUO R, et al. Directed graph-based distribution network reconfiguration for operation mode adjustment and service restoration considering distributed generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 142-149.
- [8] WANG L, WU W, LU Q, et al. Optimal aggregation approach for virtual power plant considering network reconfiguration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(3): 495-501.
- [9] 罗龙波, 陈明辉, 王雯沁, 等. 考虑分级重构的配电网安全低碳两阶段运行优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 36-45.  
LUO Longbo, CHEN Minghui, WANG Wenqin, et al. A two-stage secure and low-carbon operation optimization for a distribution network considering multi-level reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 36-45.
- [10] 林济铿, 刘阳升, 潘毅, 等. 基于 Mayeda 生成树实用算法与粒子群算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6150-6158.  
LIN Jikeng, LIU Yangsheng, PAN Yi, et al. Mayeda spanning tree practical method combined with particle swarm algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6150-6158.
- [11] ZHANG J, YUAN X, YUAN Y. A novel genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 143-149.
- [12] 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(8): 100-105.  
XIANG Xiaorong, LIU Dichen, XIANG Nong, et al. Distribution network restructuring based on parallel tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 100-105.
- [13] 薛毓强, 吴小雁, 魏文新. 基于环路组搜索方式及分环替代策略相结合的配电网重构[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 263-269.  
XUE Yuqiang, WU Xiaoyan, WEI Wenxin. Distribution network reconfiguration with BPSO based on combination of loop group search and individual loop replacement[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 263-269.
- [14] 史训涛, 柯清派, 袁智勇, 等. 考虑光伏和负荷随机性的含柔性开关配电网故障重构[J]. 南方电网技术, 2020, 14(7): 56-61.  
SHI Xuntao, KE Qingpai, YUAN Zhiyong, et al. Fault reconfiguration of distribution networks with soft open points considering the uncertainties of photovoltaics and loads[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(7): 56-61.
- [15] 李浩, 张禄亮, 麦章渠, 等. 基于改进离散型麻雀搜索算法的配电网恢复重构方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 16-22, 30.

- LI Hao, ZHANG Luliang, MAI Zhangqu, et al. Distribution network recovery reconfiguration method based on improved discrete sparrow search algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(7): 16-22, 30.
- [16] 刘迪, 张强, 吕干云. 量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 58-65.  
LIU Di, ZHANG Qiang, LÜ Ganyun. Improvement and application of quantum-behaved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 58-65.
- [17] 谭慧娟, 李世明, 郭文鑫, 等. 基于混沌自适应人工鱼群算法的含家庭储能配电网快速重构方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 468-477.  
TAN Huijuan, LI Shiming, GUO Wenxin, et al. Fast reconfiguration method of distribution network with household energy storage based on chaotic adaptive artificial fish swarm algorithm[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(5): 468-477.
- [18] NAGUIB M, OMRAN W, TALAAT H. Performance enhancement of distribution systems via distribution network reconfiguration and distributed generator allocation considering uncertain environment[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(3): 647-655.
- [19] 吴建旭, 于永进. 基于改进和声搜索算法的多目标配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 78-86.  
WU Jianxu, YU Yongjin. Multi-objective distribution network reconstruction optimization based on improved harmonic search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 78-86.
- [20] 刘洁, 赵晓君, 贾宇琛, 等. 基于改进烟花算法的含高比例新能源的交直流配电网动态重构[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 64-71.  
LIU Jie, ZHAO Xiaojun, JIA Yuchen, et al. Dynamic reconstruction of AC/DC distribution network with high proportion of new energy based on improved fireworks algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 64-71.
- [21] GABOW H, MYERS E. Finding all spanning trees of undirected and directed graphs[J]. SIAM Journal on Computing, 1978, 7(3): 280-287.
- [22] KAVITHA T, MEHLHORN K, MICHAIL D, et al. An  $O(m^2n)$  algorithm for minimum cycle basis of graphs[J]. Algorithmica, 2008, 52(3): 333-349.
- [23] HOPCROFT J, TARJAN R. Efficient algorithms for graph manipulation[J]. Communications of the ACM, 1973, 16(6): 372-378.
- [24] AMIRI M, HASHJIN N, MONTAZERI M. et al. Hippopotamus optimization algorithm: a novel nature-inspired optimization algorithm[J]. Science Report, 2024, 14.
- [25] 周玮, 党伟, 芝昕雨, 等. 基于灵活性资源调节和网络重构的 P2P 交易的阻塞管理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 83-93.  
ZHOU Wei, DANG Wei, ZHI Xinyu, et al. A congestion management approach for P2P transactions based on flexible resource regulation and network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 83-93.
- [26] 杨胡萍, 李晓馨, 曹正东, 等. 考虑风光的两阶段配电网动态重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 12-21.  
YANG Huping, LI Xiaoxin, CAO Zhengdong, et al. A two-stage dynamic reconfiguration method for distribution networks considering wind and solar power[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 12-21.
- [27] GAO H, WANG R, HE S, et al. Bi-level stackelberg game-based distribution system expansion planning model considering long-term renewable energy contracts[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-15.

收稿日期: 2024-10-28; 修回日期: 2025-03-25

作者简介:

陈锋升(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图论、配电网规划。E-mail: 894060860@qq.com

(编辑 许威)