

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802075

基于改进二进制灰狼优化算法的配网故障定位*

陈磊^{1,2,3} 詹跃东¹ 田庆生³(1.昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2.昆明理工大学云南电网有限责任公司电力科学研究院
研究生工作站 昆明 650217; 3.云南电力试验研究院(集团)有限公司 昆明 650217)

摘要: 灰狼算法具有结构简单、概念清晰、易实现和全局性能好等优点,但由于存在后期收敛速度慢、局部搜索能力弱等缺点。为提高配网故障定位的准确性和快速性,对灰狼优化算法进行了改进。首先,由于配网故障定位方法可以把问题表示为0~1整数规划问题,故引入转换函数,以解决算法在二进制空间里位置更新问题。然后引进动态权重策略,以平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力且加快算法收敛速度。最后加入概率扰动策略,使算法避免过早陷入局部收敛。本文通过配网故障的算例分析来验证改进二进制灰狼优化算法的可行性和高效性。

关键词: 配电网;故障定位;改进二进制灰狼优化算法;容错性;工程实用性

中图分类号: TN7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4099

Fault location of distribution network based on improved binary gray wolf optimization algorithm

Chen Lei^{1,2,3} Zhan Yuedong¹ Tian Qingsheng³(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Kunming University of Science and Technology's Postgraduate Workstation of Yunnan Power Grid Company,
Kunming 650217, China; 3. Yunnan Electric Power Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: The grey wolf algorithm has the advantages of simple structure, clear concept, easy implementation, good global performance, etc., but it has the disadvantages of slow convergence and weak local search ability in the later period. In order to improve the accuracy and rapidity of the fault location of the distribution network, the grey wolf optimization algorithm is improved. First of all, because the network fault location method can represent the problem as 0~1 integer programming problem, the conversion function is introduced to solve the problem of location update in binary space. Then the dynamic weight strategy is introduced to balance the global search capability and local search capability of the algorithm and accelerate the convergence speed of the algorithm. Finally, a probabilistic perturbation strategy is added to avoid premature local convergence of the algorithm. In this paper, the feasibility and efficiency of the improved binary grey wolf optimization algorithm are verified by an example.

Keywords: distribution network; fault location; improved binary gray wolf optimization algorithm; fault tolerance; engineering practicality

0 引言

随着经济和技术的发展,人们对供电可靠性的要求越来越高。而配电网线路故障在整个电网系统故障中占有很高的比例。因此,配电网线路发生故障后,快速准确地找出故障点显得尤为重要。为了减少停电时间,在配电网线路故障发生后,各线路节点上的故障指示器将实时数据通信上传到后台,通过上传的数据,后台迅速处理并进行线路故

障定位,将故障位置通过短信形式发送给维修人员。因此,后台通过算法处理大量实时故障信息的效率显得尤为关键。目前,经过大量研究的算法有矩阵算法、遗传算法等。矩阵算法计算速度快,但容错性差。遗传算法结果较为精确,但计算量大,不利于线路故障定位的实时性^[1-3]。

2014年 Mirjalili 等^[4]提出灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO),该算法模拟狼群的3大基本行为:搜索、跟踪、围剿^[5]。该算法具有结构简单、概念清晰,且易实现、

收稿日期:2018-08-23

* 基金项目:国家自然科学基金(51667012)项目资助

全局性能好等优点^[6-7]。因为灰狼优化算法的全局搜索能力比较好,但在后期的局部收敛方面比较弱,故本文对传统的灰狼优化算法进行改进,进而运用到配电网线路故障定位中。

1 基于灰狼优化算法的改进

1.1 灰狼优化算法

灰狼狼群具有严格的等级制度,如图 1 所示,等级制度为金字塔模式。

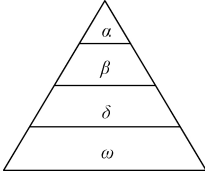


图 1 灰狼的等级制度

灰狼狼群高效地捕杀猎物的根本原因是灰狼严格的等级制度。金字塔的顶层是 α 狼, α 狼负责决策。第 2 层是 β 狼,负责协助 α 狼作出决策。第 3 层是 δ 狼,主要负责侦查、捕猎等任务。底层是 ω 狼, ω 狼主要是为了平衡种族内部关系。在猎捕的目标逃跑时,其余的灰狼个体进行包围,随机从各个方向包围猎物,最终成功围剿^[8]。

在 GWO 算法描述中,由 α, β, δ 对猎物进行追捕, ω 在前三者的指导下对猎物进行围剿,直至捕猎成功。在解决连续函数优化问题时,预设灰狼个数为 N ,搜索空间维数为 G 维,第 i 只灰狼个体的位置记作 $x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iG}$,当前最优前 3 个体依次记为 α, β 和 δ ,剩余其他灰狼个体记为 ω ,猎物的位置即为全局最优解^[9]。在围捕时,灰狼群体的围剿依据如下。

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

式中:猎物在第 t 代时的位置用 $X_p(t)$ 表示;灰狼个体在第 t 代时的位置用 $X(t)$ 表示;摆动因子用常数 C 表示, C 的取值公式如下。

$$C = 2r_1 \quad (2)$$

式中: r_1 为随机数, $r_1 \in [0, 1]$ 。

更新每个灰狼个体位置的公式如下。

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (3)$$

式中: A 表示收敛因子, A 的取值公式如下。

$$A = 2ar_2 - a \quad (4)$$

式中: r_2 为随机数, $r_2 \in [0, 1]$ 。随着一次次迭代, a 呈线性,从 2 向 0 递减。

当猎物的位置被灰狼确定时,头狼 α 会率领 β 狼和 δ 狼追捕猎物。在追捕目标的任务中, α, β, δ 狼是距离猎物最近的三头狼,于是可以用这三头狼的位置可以用来确定猎物的位置,用下式表述^[10]。

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha(t) - X(t)| \quad (5)$$

$$D_\beta = |C_2 X_\beta(t) - X(t)| \quad (6)$$

$$D_\delta = |C_3 X_\delta(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 D_\alpha \quad (8)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 D_\beta \quad (9)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 D_\delta \quad (10)$$

$$X_p(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3)/3 \quad (11)$$

式(5)~(10)表示为其他灰狼个体与 α, β, δ 狼之间的距离,继而可以通过式(11)确定灰狼个体向猎物前进的方向。

1.2 二进制灰狼优化算法

在连续问题上进行处理时,狼群可以通过连续的位置来进行捕猎。通过式(8)~(10), α, β 和 δ 狼的位置进行更新。但是在离散问题上, α, β 和 δ 狼的位置更新则不是这样的。在二进制空间中需要让灰狼位置的更新在“0”与“1”之间转换,那么就需要引入转换函数在 α, β 和 δ 之间建立关联。于是,需要引入一种解决离散问题优化算法,即二进制灰狼优化算法(binary grey wolf optimizer, BGWO)^[11]。

在解决二进制问题时,位置更新就是在“0”与“1”之间的转变。初始化 α, β 和 δ 位置,用式(12)表示。

$$X_i = [X_j], X_j = \begin{cases} 0, & rand < 0.5 \\ 1, & rand \geq 0.5 \end{cases} \quad (12)$$

$i = \alpha, \beta, \delta \quad j = 1, 2, \dots, G$

式中: G 表示优化问题的维度。

如前文所述,需要引入转换函数来更新灰狼位置^[12],转换函数如下。

$$\begin{cases} S(X_\alpha(t)) = \frac{1}{1 + \exp(|X_\alpha(t)|)} \\ S(X_\beta(t)) = \frac{1}{1 + \exp(|X_\beta(t)|)} \\ S(X_\delta(t)) = \frac{1}{1 + \exp(|X_\delta(t)|)} \end{cases} \quad (13)$$

$$X_i = [X_j], X_j = \begin{cases} 0, & rand < S(X_i(t)) \\ 1, & rand \geq S(X_i(t)) \end{cases}$$

$$i = \alpha, \beta, \delta \quad j = 1, 2, \dots, G \quad (14)$$

通过式(13)、(14)把连续问题转换成离散问题。依照下式更新灰狼位置。

$$X(t+1) = round\left(\frac{X_\alpha(t) + X_\beta(t) + X_\delta(t)}{3}\right) \quad (15)$$

1.3 改进二进制灰狼优化算法

1) 引入动态权重策略

因为在连续的迭代过程中,全局最优并不一定每次都是 α 狼,但是 ω 狼又会持续地向 α, β, δ 狼靠拢,致使最终得到的可能是局部最优,所以本文加入灰狼位置更新权重的概念并通过不断地动态调整权重,从而使算法平衡全局寻优和局部寻优^[13]。

在 GWO 中, ω 狼根据 α, β 和 δ 狼的位置,向猎物逼近。

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha \quad (16)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta \quad (17)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta \quad (18)$$

计算权重比例的公式如下。

$$\omega_1 = |X_1| / (|X_1| + |X_2| + |X_3|) \quad (19)$$

式中: ω_1 是 ω 狼向 α 狼位置更新的权重比例。

$$\omega_2 = |X_2| / (|X_1| + |X_2| + |X_3|) \quad (20)$$

式中: ω_2 是 ω 狼向 β 狼位置更新的权重比例。

$$\omega_3 = |X_3| / (|X_1| + |X_2| + |X_3|) \quad (21)$$

式中: ω_3 是 ω 狼向 δ 狼的位置更新的权重比例。

最终的迭代公式为:

$$X(t+1) = (\omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \omega_3 X_3) / 3 \quad (22)$$

2) 引入概率扰动策略

为了加强算法跳出局部寻优的能力,且完善动态权重策略,引入概率扰动策略^[14]。扰动概率公式如下。

$$P = \frac{(G-1)e^{(t-1)/T}}{4G} \quad (23)$$

式中:扰动概率用 P 表示;最大迭代次数用 T 表示;维度用 G 表示。通过式(23)可知,在迭代初期,扰动概率相对较小,以便算法的快速全局寻优;在迭代后期,扰动概率较大,避免算法陷入局部寻优。通常情况下,最大迭代次数很大,所以在迭代后期 t 无限趋近 T 时,扰动概率公式可精简为如下。

$$P = \frac{(1-1/G)e^{(t/T-1/T)}}{4} \rightarrow \frac{(1-1/G)e}{4}$$

对灰狼个体进行扰动的公式如下。

$$M(t+1) = L_b + r_3 \cdot (U_b - L_b), r_3 < P \quad (24)$$

式中:扰动后的灰狼个体用 M 表示;灰狼个体位置的下界用 L_b 表示;灰狼个体位置的上界用 U_b 表示; r_3 为随机数, $r_3 \in [0, 1]$ 。扰动后的灰狼个体通过如下更新公式更新:

$$X(t+1) = \begin{cases} M(t+1), & f(M(t+1)) < f(X(t+1)) \\ X(t+1), & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中:第 $t+1$ 代扰动个体 M 用 $f(M(t+1))$ 表示;灰狼个体 X 的目标函数值用 $f(X(t+1))$ 表示。

2 基于改进 BGWO 的配网故障定位原理及算法

2.1 配网故障定位基本原理

配网线路发生故障之后,安装在各个分段开关、联络开关处的故障指示器检测到故障电流。故障指示器检测到故障电流向主站上报“1”信号,故障指示器未检测到故障电流向主站上报“0”信号,主站接收到这些“0”、“1”的离散信息,通过故障定位程序判定故障区间。因此,需要用改进的二进制灰狼优化算法来处理离散的信号。

将改进的二进制灰狼优化算法运用到配网故障定位问题中,灰狼的维数表示配网中馈线区段的总数,灰狼个体的位置表示配网中馈线区段的状态(即“0”或“1”)^[15]。在每次迭代时,通过适应度函数评价各个灰狼个体位置的优劣,更新灰狼的当前全局最优位置,进而更新各个灰狼个体的

位置,直至达到迭代次数。最终得到狼群的全局最优位置即为所求的各馈线区段的实际状态,从而判断出故障位置。

2.2 适应度函数

由于各个待求的馈线区段实际状态信息应与实际上传的故障信息偏差最小,本文构造适应度函数如下^[16]。

$$F_{ii}(S_B) = \sum_{j=1}^N |I_j - I_j^*(S_B)| + \mu \sum_{j=1}^N |S_B(j, i)| \quad (26)$$

式中: N 表示配网中故障指示器总个数; S_B 表示配电网中故障指示器的设备状态,其取值 1 或 0,分别表示故障指示器故障和正常; I_j 表示第 j 个故障指示器检测到的故障电流信息,值为 1 表示该故障指示器检测到了故障电流,值为 0 表示未检测到故障电流; $I_j^*(S_B)$ 表示故障指示器的期望状态,若故障指示器检测到故障电流,其期望状态为 1,反之则为 0; $\sum_{j=1}^N |S_B(j, i)|$ 表示配网中故障指示器总数; μ 表示故障诊断权重系数, $\mu \in [0, 1]$,经过多次试验对比,本文取值 0.6。适应度函数值越小,其解越准确。

2.3 算法流程

算法流程如图 2 所示,详细步骤如下。

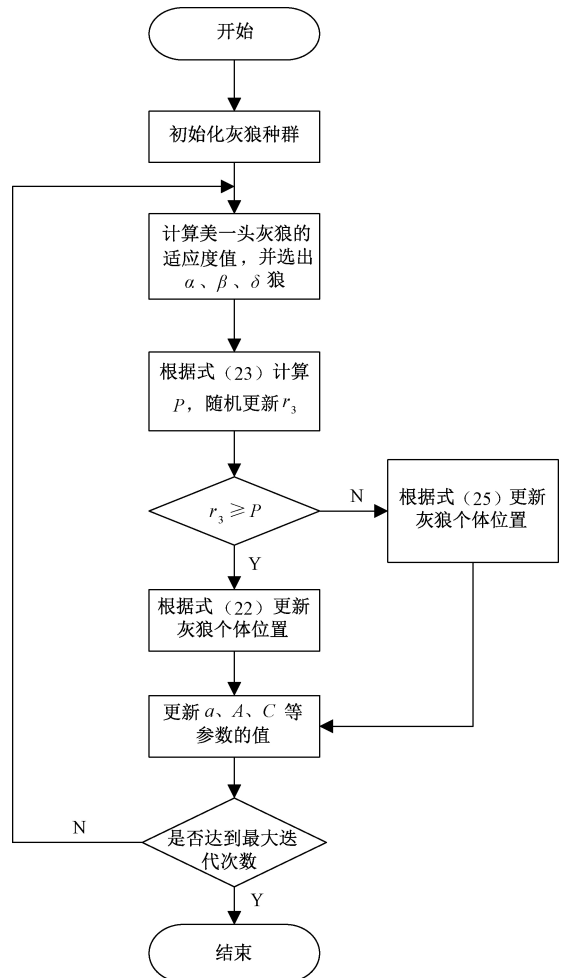


图 2 算法流程

1) 根据配电网馈线区段数确定狼群的维数 G , 狼群个体数 N , 最大迭代数 T ;

2) 初始化种群, 随机产生 N 个 G 维狼群 X_1, X_2, \dots, X_G , 每一个灰狼个体均由 0 或 1 组成;

3) 通过适应度函数式(26)计算每一个灰狼个体的适应度值。因为配网故障定位是求适应度函数的最小值, 所以对适应度值排序, 将最优适应度值及其对应位置记录下来;

4) 将前 3 步最优适应度值灰狼个体位置分别记录为 $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$;

5) 当 $t \leq T$ 时($t = 1, 2, \dots, n$), 根据式(23)计算 P , 若 $r_3 \geq P$, 则依据式(22)更新各灰狼个体的位置; 若 $r_3 < P$, 则依据式(25)更新各灰狼个体的位置;

6) 更新 a, A, C 等参数的值;

7) 达到最大迭代次数, 算法终止, 全局最优位置即为各馈线区段的状态。

3 算例分析

本算例基于配电线路故障在线监测系统在线路故障仿真, 引用云南省大理市供电局的某 10 kV 线路拓扑图。如图 3 所示, 对配网线路中的故障指示器和馈线区段进行编号。基于改进的二进制灰狼优化算法, 用 MATLAB 软件对配网故障定位问题进行仿真, 为了测试改进的 BGWO 算法的故障定位效果和算法的收敛性, 本算例设置单点故障、单点故障且有畸变信息、多点故障和多点故障且有畸变信息 4 类情况。具体参数设置如下: 搜索空间维数 $G = 13$, 灰狼种群规模 $N = 50$, 最大迭代次数 $T = 100$ 。

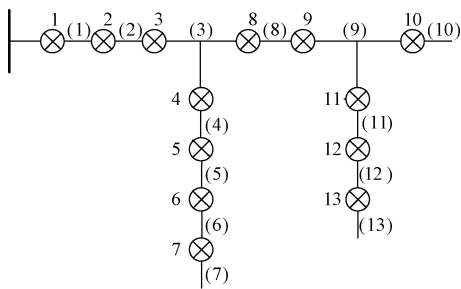


图 3 配电网线路拓扑图

3.1 单点故障仿真

预设馈线区段(8)、(5)、(12)分别发生故障, 测试有无畸变信息情况下的定位效果。因为初始化种群, 随机生成 50 个 13 维狼群, 所以每次迭代过程均不一样, 为了更好地检验算法的收敛效果, 程序连续运行 60 次, 测试结果如表 1 所示。

如表 1 所示, 在区段(8)发生单点故障时, 故障指示器上报信息为 1110000100000, 表明故障指示器 1、2、3、8 经历了故障电流, 不存在畸变信息, 据算法计算, 输出结果为 0000000100000, 显示故障发生在区段(8), 故障定位准确。

表 1 单点故障测试结果

输入	畸变位数	结果
1110000100000	0	0000000100000
1110100100010	2	0000000100000
1111100000000	0	0000100000000
1111100000001	1	0000100000000
1110000110110	0	0000000000010
1010010110110	2	0000000000010

当故障指示器上报 1110100100010 时, 存在少量畸变信息, 即故障指示器 5、12 误报, 最后输出结果仍然是 0000000100000, 显示故障发生在区段(8), 故障定位准确。

3.2 多点故障仿真

为检验本算法在多点故障情况时的定位效果, 分别预设馈线区段(5)、(10)同时发生故障, 区段(6)、(10)、(11)同时发生故障, 区段(7)、(12)同时发生故障, 程序连续运行 60 次, 在有畸变信息的情况下, 故障定位仍然准确, 表明该算法的容错性良好。测试结果如表 2 所示。

表 2 多点故障测试结果

输入	畸变位数	结果
1111100111000	0	0000100001000
1111100011010	2	0000100001000
1111110111100	0	0000010001100
0110110011100	3	0000010001100
1111111110110	0	0000001000010
1011011100110	3	0000001000010

如表 2 所示, 在区段(5)、(10)同时发生故障时, 故障指示器 1、2、3、4、5、8、9、10 检测到故障电流, 其他故障指示器未检测到, 因此无畸变信息时输入为 1111100111000, 经算法计算, 输出结果为 0000100001000, 表明区段(5)、(10)处故障, 故障定位准确。当有畸变信息时, 假设故障指示器 8 漏报, 故障指示器 12 误报, 则输入为 1111100011010, 经算法计算, 输出结果仍然是 0000100001000, 故障定位准确。但有一种情形该算法会出现定位误差, 若故障区段的前一个故障指示器发生漏报, 故障则会定位到相邻前一区段。因此, 相比较于其他同类算法, 本算法仍不能解决此问题。

4 结 论

文献[9]、[12]均将二进制粒子群算法运用到配网故障定位问题中, 本文与其相比, 改进的二进制灰狼算法具有结构简单、概念清晰、易实现、全局性能好等优点。针对灰狼算法存在后期收敛速度慢、局部搜索能力弱等缺点, 本文进行了改进。二进制粒子群算法和本文方法均能保持较高的准确性, 但是本文引入的两种策略, 更容易跳出局部寻优, 全局搜索能力更好。

为提高配网故障定位的准确性和快速性,对灰狼优化算法进行了改进。本文引进动态权重策略,以平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力且加快算法收敛速度。加入概率扰动策略,使算法避免过早陷入局部收敛,无法寻得全局最优解。通过算例分析,验证了改进的BGWO算法在配网故障定位中,无论是在单点故障,还是多点故障等情况下,故障定位均准确且高效。同时,在存在少量的非关键畸变信息时,依然能够快速准确地定位,证明改进的BGWO算法有较好的容错性和较高的稳定性,在配网故障定位中,具有很好的工程实用性。

参考文献

- [1] 马腾飞,高亮.含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):64-68.
- [2] 王艳松,宗雪莹,衣京波.配电网故障定位容错算法[J].电力自动化设备,2018,38(4):9-15.
- [3] 张志文,刘军,周冠东,等.基于改进二进制万有引力算法的含DG配电网故障定位[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):30-34.
- [4] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3):46-61.
- [5] 龙文,蔡绍洪,焦建军,等.求解高维优化问题的混合灰狼优化算法[J].控制与决策,2016,31(11):1991-1997.
- [6] 陈昌帅.二进制灰狼优化算法的研究与分析[J].信息系统工程,2016(7):136-138.
- [7] 郭振洲,刘然,拱长青,等.基于灰狼算法的改进研究[J].计算机应用研究,2017,34(12):3603-3606,3610.
- [8] 陈闯,RYAD CHELLALI,邢尹.采用动态权重和概率扰动策略改进的灰狼优化算法[J].计算机应用,2017,37(12):3493-3497,3508.
- [9] 李超文,何正友,张海平,等.基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J].电力系统保护与控制,2009,37(7):35-39.
- [10] 罗佳,唐斌.新型灰狼优化算法在函数优化中的应用[J].兰州理工大学学报,2016,42(3):96-101.
- [11] WANG J, XING C, HU Y, et al. Distribution network fault location algorithm based on TWACS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017.
- [12] 胡清,张强.基于改进二进制粒子群算法的配电网故障定位[J].南京工程学院学报(自然科学版),2016,14(3):77-81.
- [13] YANG WR, WU H Y, LI L B, et al. Planning of distribution network with DG based on artificial fish swarm algorithm [J]. Power System Protection & Control, 2010.
- [14] 金星,邵珠超,王盛慧.一种基于差分进化和灰狼算法的混合优化算法[J].科学技术与工程,2017,17(16):266-269.
- [15] 龙文,赵东泉,徐松金.求解约束优化问题的改进灰狼优化算法[J].计算机应用,2015,35(9):2590-2595.
- [16] 魏政磊,赵辉,韩邦杰,等.具有自适应搜索策略的灰狼优化算法[J].计算机科学,2017,44(3):259-263.

作者简介

陈磊,1993年出生,硕士研究生,主要研究方向为配网自动化。

E-mail:987701130@qq.com

詹跃东,1963年出生,教授,主要研究方向为电力电子技术、分布式电源接入技术研究等。

田庆生,1979年出生,高级工程师,主要研究方向为配用电技术等。