

基于改进果蝇优化算法的输电线雷击位置研究

邹逸程

(国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司)

摘要：本文探讨一种基于改进果蝇优化算法的输电线雷击位置定位方法。随着雷电活动对电力系统的威胁日益加剧，准确定位雷击点变得尤为重要。当前的雷电定位系统存在覆盖范围小、定位精度不足等问题，因此本文提出一种新算法，通过引入变步长和松弛因子以增强搜索能力。研究结果表明，该方法能有效提高雷击位置的准确性。本文为雷电定位技术的进一步发展提供了理论依据和实践参考。

关键词：雷电定位；果蝇优化算法；变步长；松弛因子；电力系统

0 引言

雷电现象在全球范围内普遍存在，尤其在雷电活动频繁的地区，其对电力系统的影响不容忽视。雷电不仅可能导致设备损坏，还可能引发更大范围的电力系统故障。因此，准确快速地定位雷电击中点成为电力行业亟待解决的重要问题。目前，雷电定位系统（Lightning Location System, LLS）在国内已逐渐成熟，能够实现雷电事件的监测与分析^[1]。然而，现有的定位算法在处理复杂环境下的雷击位置时，常常面临精度不足、实时性差的问题。为此，本研究旨在通过改进果蝇优化算法，提升雷电定位的精度和效率，以为电力系统的安全稳定运行提供技术保障^[2]。

1 雷电定位系统

1.1 雷电定位系统研究现状

为满足航天科研、森林防火和电网防雷定位等需要，江苏省已建成了能实时定位闪电位置的 LLS。本

系统主要由省级监测站，中央中心站，通讯系统以及用户终端组成。基于各种方法，LLS 能在短时间内获得雷击目标的具体位置、方向等有关信息。因此，电磁辐射是一种非常有价值的研究手段。其中，地表最小二元定位方法主要有两种：一是二维平面和三维椭圆柱体，二是由于地表低层覆盖区域较小，且地表弯曲程度较小，因此可以使用二维平面定位模式。当地表覆盖区域较大或者地表弯曲程度较大时，需要使用三维椭球体进行定位^[3]。

1.2 雷电定位系统探测原理

LLS 定位系统的定位理论可分为三种：时差法、定向法和组合时差法。时差法的基本原理：通过对闪电传播的电磁波在不同的台站之间的传播距离进行估算，然后用传播速度乘以闪电传播速度，从而确定闪电的位置。由于环境因素，电磁波传播速度受环境因素的影响，以及钟差技术等因素的影响。该算法在原理上存在很大的误差，而且要求观测站数多于 3。方

位估计的原理：以球面三角形为基础，建立双站观测站，实现对地闪的准确定位。但是，由于台站的位置受到很大的影响，从而造成较大的误差。时差和方位一体化定位原则：它是把时差和方位的原则相结合，并对多个测点赋权。最后，利用最小二乘法对闪电的准确定位进行计算^[4]。

2 果蝇优化算法框架

2.1 果蝇优化算法原理

果蝇优化算法（Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA）模拟了果蝇寻找食物的行为，旨在寻找最优解。该算法具有计算量小、结构简单和易于调整的优点。FOA的初始值通过随机化方式生成，确保了搜索过程的多样性和灵活性。果蝇群体通过分布式方式进行合作，其中某一果蝇的故障并不会对整个群体的功能产生影响，因此该算法对初始值的依赖性较小，降低了算法发散的风险^[5]。即：

$$\begin{cases} X_i = X_{axis} + D_{randualus} \\ Y_i = Y_{axis} + D_{randualus} \end{cases} \quad (1)$$

式中， X_i 为第 i 个果蝇在 X 轴上的坐标； Y_i 为第 i 个果蝇在 Y 轴上的坐标； $D_{randualus}$ 为一个随机生成的值，它确保了果蝇在搜索过程中的位置变化，增强了搜索的随机性与灵活性。

此外，更新果蝇的嗅觉历史信息 and 最佳位置公式为：

$$\begin{cases} c_{smell, history} = c_{smdl, best} \\ X_{axis} = X(c_{index, best}) \\ Y_{axis} = Y(c_{index, best}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $c_{smell, history}$ 为果蝇的嗅觉历史信息，它记录了果蝇感知到的最佳食物浓度； $c_{smdl, best}$ 为当前所找到的最佳食物浓度； X_{axis} 和 Y_{axis} 分别为在最佳浓度下果

蝇在 X 轴和 Y 轴的坐标。

2.2 果蝇优化算法改进

本项目以果蝇为研究对象，针对其进化过程中易出现“早熟”现象，提出一种新的遗传算法。即通过改变步长、放松系数等参数来提高算法的寻优能力，提高了算法的适应性。

2.2.1 变步长

传统的固定步长 FOA 算法在步长设置上存在一定的局限性。当步长设置过小时，搜索效率会显著降低，而如果步长过大，则可能导致无法找到全局最优解。为了解决这一问题，在此基础上，提出一种可变步长方法，并在此基础上进行改进。在每次迭代过程中，该方法都可以根据实际情况进行适当的调整，以达到加快寻优的目的。这里有一个公式，用来计算一个苍蝇在它的起始点上的下一个随机地点：

$$\begin{cases} X_i = X_{axis} + 2 \times dL \times D_{randalus} - dL \\ Y_i = Y_{axis} + 2 \times dL \times D_{randalus} - dL \end{cases} \quad (3)$$

式中， dL 为搜索的步长； (X_{axis}, Y_{axis}) 为果蝇的初始坐标。该公式通过对初始位置进行微调，使果蝇在搜索空间中能够更有效地探索新的位置。同时，果蝇在当前坐标下的浓度判定值为：

$$c_i = \frac{1}{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}} \quad (4)$$

在给定坐标下的 X_i 表达式为：

$$X_i = \pm \sqrt{\frac{1}{c_i^2} - Y_i^2} \quad (5)$$

步长 dL 的计算公式为：

$$dL = \frac{h}{c_i} \quad (6)$$

式中， h 为一个常数，且其范围为 $0.1 < h < 10$ ，代表 Y_i 对步长的影响程度。通过该公式，步长随着浓度判定值 c_i 的增大而减小。在远离最佳解的情况下，为了加速寻得，在远离最佳解的情况下，采用增大的

步骤来提高寻优的效率；为了防止寻优失败，在逼近最佳解的同时，逐步减小了步长。

2.2.2 松弛因子

常规的 FOA 方法只能在 2D 搜索空间内进行，当将其拓展到 3 维时，将会遇到“桃大战”，而不能求出全局最好的结果。在此基础上，提出一种新的松弛系数方法。针对上述问题，本项目拟将松弛系数应用于风味含量判断中：将所有变量都取为正数，对其进行大、小区域的随机搜寻，从而使算法容易在步中过早地陷入局部极值。即：

$$c_i = c_i + \alpha \quad (7)$$

其中， α 的计算公式为：

$$\alpha = (0.5 - k) \times D_{\text{ist},i} \quad (8)$$

式中， k 为一个随机值，取值范围为 [0, 1]； α 为松弛因子，能够对 c_i 进行调整，使其可能获得负值。这样的调整有助于果蝇跳出局部极值，寻找全局极值，增强算法的适应性与探索能力，通过引入变步长与松弛因子，这些改进将使 FOA 在求解输电线雷击位置问题时更加高效和准确，从而提高其实际应用价值。

3 基于 MFOA 的输电线雷击定位算法

3.1 雷电定位原理

因为地球是一个近似椭圆的球形物体，所以椭球面模型更为准确。设 t 时刻的雷击坐标为 $S(N, E)$ ， N 、 E 分别代表纬度和经度，探测站坐标为 $D_i(N_i, E_i)$ 。由探测站观察的雷电抵达时刻和方位表示为：

$$t_i = t + \frac{L_{ip}}{c} + \varepsilon_i \quad (9)$$

$$\varphi_i = \theta_{ip} + e_i \quad (10)$$

式中， L_{ip} 、 θ_{ip} 分别为探测站与雷电位置间的大地线长度、方位角； ε_i 为时间的误差； e_i 为方位的误差。

果蝇与原点间的距离，即探测站与雷击点的距离误差可表示为：

$$D_{\text{ist},i} = |c\varepsilon_i| = |ct_i - ct_0 - L_i| \quad (11)$$

其中， t_0 为探测站计算的雷电发生时间平均值，具体展开为式 (12)；式 (13) 和式 (14) 分别为时间差定位、时间差与定向综合定位的适应度函数。即：

$$t_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(t_i - \frac{L_{ip}}{c} \right) \quad (12)$$

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c\varepsilon_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_{\text{ist},i}^2 \quad (13)$$

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((c\varepsilon_i)^2 + e_i^2 \right) \quad (14)$$

$$= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ (ct_i - ct_0 - L_{ip})^2 + (\varphi_i - \theta_{ip})^2 \right\}$$

按式 (15) 记录最佳和最差味道浓度值及其位置，即：

$$\begin{cases} c_{\text{smell,history}} = c_{\text{smell,best}} \\ X_b = X(c_{\text{index,best}}) \\ Y_b = Y(c_{\text{index,best}}) \\ c_{\text{smell,history}} = c_{\text{smell,worst}} \\ X_w = X(c_{\text{index,worst}}) \\ Y_w = Y(c_{\text{index,worst}}) \end{cases} \quad (15)$$

式中， (X_b, Y_b) 为最佳味道浓度值 $c_{\text{smell,best}}$ 时的位置； (X_w, Y_w) 为最差味道浓度值 $c_{\text{smell,worst}}$ 时的位置。按照式 (16) 和式 (17) 计算种群其为浓度的平均值 $c_{\text{smell,avg}}$ 和方差 σ^2 ：

$$c_{\text{smell,avg}} = \sum_{i=1}^{M_{\text{pop}}} c_{\text{smell},i} / M_{\text{pop}} \quad (16)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{M_{\text{pop}}} (c_{\text{smell},i} - c_{\text{smell,avg}})^2 / M_{\text{pop}} \quad (17)$$

给定方差阈值 δ ，若 $\sigma^2 \leq \delta$ ，则执行排斥操作，按式 (18) 更新群体位置；反之，执行吸引操作，根据式 (19) 更新群体位置。即：

$$\begin{cases} X_{axis} = X_{axis} - X_w \\ Y_{axis} = Y_{axis} - Y_w \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} X_{axis} = X_{axis} - X_b \\ Y_{axis} = Y_{axis} - Y_b \end{cases} \quad (19)$$

3.2 参数求解

在椭球上进行大地坐标的反演，就是根据经纬度来求出两个点之间的直线长度和方向。已有的研究成果主要包括高斯平均引数法，距离约束的高斯投影法，以及计算量大的数值解法等。而贝塞尔法是一种不依赖于距离的方法，它可以在 10m 范围内进行反演。为此，本文将这一方法应用于地球本体的反演中，并给出相关的计算流程。在此基础上，给出一种基于 MFOA 输电线路防雷定位的算法流程，如图 1 所示。

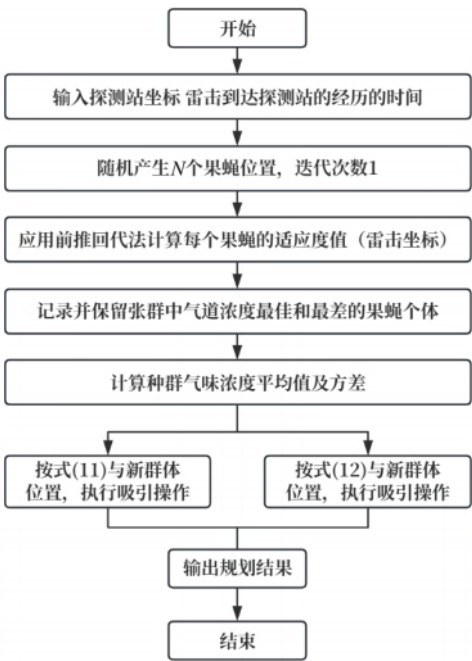


图 1 基于 MFOA 输电线路雷击定位算法流程图

4 仿真分析

在一个区域内，每一台测点与它检测到的闪击时间见表 1。

表 1 探测站坐标及其探测的雷击发生时间

站号	探测站坐标				到达 时间/s
	北纬		东经		
1	35°15'	13. 882"	109°95'	32. 797"	0. 619893
2	37°93'	13. 318"	110°57'	63. 169"	0. 619893
3	34°41'	31. 197"	110°82'	53. 170"	0. 619924
4	36°10'	55. 558"	115°01'	12. 800"	0. 620183
5	37°02'	61. 910"	115°49'	49. 010"	0. 620243
6	37. 49'	46. 260"	115°46'	58. 885"	0. 620330

应用 MFOA 方法对地表的雷电进行探测。该模式以 50 只果蝇和 90 只果蝇为研究对象。算法中的适应度是根据迭代时间变化而变化的。首先，根据 6 个观测站到被雷击点的距离，得到该区的地闪坐标 (35, 36' 28.421", 113' 27' 25.236")，通过得到第 1 代果蝇 (X₁, Y₁)，(X₂, Y₂)，...，(X₅₀, Y₅₀)，通过对每一组的气味含量进行估算，得到最优气味时的种群所在的位置作为后代种群的起点，得到变量的迭代周期，从而完成对后代种群的更新。重复以上的过程，直至迭代次数最多为 90 次（此处最多为 90 次），此时，在最佳味道密度处，果蝇处的位置为最佳。它的闪电坐标为 (36° 25' 19.348", 111° 81' 14.165")，而真正的闪电坐标为 (36° 25' 13.79", 111° 80' 60.79")。迭代过程如图 2 所示。

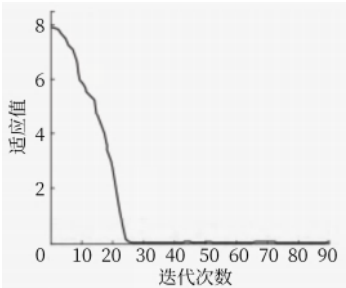


图 2 基于 MFOA 雷电定位计算的迭代过程

5 结束语

基于改进果蝇优化算法的输电线路雷击位置研究表明，现有的雷电定位系统虽然在一定程度上能实现雷击点的及时定位，但其准确性和稳定性仍有待提高。

通过引入变步长和松弛因子，对果蝇优化算法进行改进后，算法的搜索能力和灵活性得到了显著提升，能够有效避免早熟收敛的问题，从而更准确地定位雷电发生位置。研究结果为电力系统的雷击监测提供了一种新思路和技术支持，对提升电力设备的安全性和可靠性具有重要意义。

参考文献

[1] 袁涛，王肖田，司马文霞，等. 山区输电线路雷击跳闸预警的融合算法研究 [J]. 电工技术学报，2023，38（9）：2528-2540.

[2] 厉仄平，伍冲翀，熊来红，等. 基于机器学习和雷电感应电压的输电线路雷击定位方法 [J]. 高压电器，2022，58（12）：109-116.

[3] 何思阳. 基于主成分分析算法的综合考虑多因素输电线路灾害风险评估研究 [J]. 电工技术，2022（3）：25-26，30.

[4] 石万宇，魏军强，赵云灏. 基于改进麻雀算法—支持向量机的输电线路故障诊断 [J]. 浙江电力，2021，40（11）：38-45.

[5] 陈雷，吴浩，李栋，等. 基于集成学习的HVDC输电线路雷击故障识别方法 [J]. 电力系统及其自动化学报，2022，34（5）：102-110.

（收稿日期：2024-11-20）

（上接第81页）

[2] 郑昕恺，陈梓荣. 基于模糊均值聚类的继电保护二次回路故障检测方法 [J]. 自动化应用，2024，65（16）：81-83.

[3] 王金龙. 配网超声波带电检测技术及缺陷分类识别方法 [J]. 自动化应用，2024，65（9）：164-166.

[4] 方志泓，王理博，朱煜，等. 核电站蒸汽发生器传热管电磁超声导波自动化检测系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报，2024，38（4）：225-233.

[5] 曾静岚，叶兆平，施广宇，等. 基于110kV实体模型的电力变压器局放高频脉冲电流传播特性试验研究 [J]. 高压电器，2023，59（12）：152-159.

[6] 金硕，朱琳，张晓星，等. 电源侧干扰信号在换

流变压器对称加压试验回路中的传播特性分析 [J]. 高压电器，2023，59（1）：109-116，125.

[7] 关正祺，李海英，宋建成. 千米钻机电控系统二次回路瞬态干扰分析与抑制 [J]. 工矿自动化，2023，49（7）：126-133，140.

[8] 屈斌，张佳成，张昭宇，等. GIS设备非电接触松动缺陷的振动试验研究与特性分析 [J]. 高压电器，2023，59（8）：136-145，6.

[9] 王洪彬，周念成，廖建权，等. 基于瞬时功率相平面的柔性直流电网后备保护 [J]. 高电压技术，2023，49（3）：1273-1283.

（收稿日期：2025-02-19）