

基于改进 YOLOv7 的二次回路触点氧化缺陷 在线检测方法

冷 维

(国能常州发电有限公司)

摘要：现有的二次回路触点氧化缺陷检测方法由于检测手段单一、成像质量不高以及算法识别能力不足等原因，导致其触点氧化缺陷量化识别精度较低，为此设计基于改进 YOLOv7 的二次回路触点氧化缺陷在线检测方法。为提高微小触点氧化缺陷识别准确率，设计微距成像装置，利用其实现二次回路触点的微距成像。对于获取的二次回路触点微距图像，利用 Sobel 算子检测二次回路触点边缘。设计基于改进 YOLOv7 的触点氧化缺陷检测模型，输入检测到的二次回路触点边缘，实现二次回路触点氧化缺陷在线检测。测试结果表明，设计方法能够实现毫米级触点氧化缺陷量化识别与亚毫米级触点氧化缺陷量化识别。设计方法的微小触点氧化缺陷 AUROC 较大，区分正常样本和微小缺陷样本的能力很强。

关键词：微距成像装置；Sobel 算子；改进 YOLOv7；二次回路；触点氧化缺陷；在线检测

2025.07.pqgy
77

0 引言

在火电厂的复杂电力系统中，二次回路作为连接测量仪表、控制设备和执行机构的纽带，承担着传输控制信号、监测设备状态的重要职责。然而，二次回路触点在长期运行过程中，由于工作环境恶劣、电流负载波动等因素，容易出现氧化缺陷^[1]。触点氧化会导致接触电阻增大，影响信号的传输质量和速度，严重时甚至会导致信号中断或误传，进而影响火电厂设备的正常运行和电力系统的稳定性。此外，触点氧化还可能引发设备故障，增加维修成本，降低火电厂的运营效率。基于该背景开展火电厂二次回路触点氧化缺陷检测的研究。这不仅有助于提升火电厂的运行效率和稳定性，降低维修成本，还能够推动智能化技术

在电力行业的应用和发展。

当前，研究人员正在积极探索和应用新技术，以提高二次回路故障、缺陷检测的准确性。其中文献 [1] 详细解析了红外测温技术的运作机理，并结合实例深入剖析了继电保护设备及二次回路异常发热的根源。然而，对于触点氧化这类微小缺陷，其温度变化可能并不显著，导致测温结果难以准确反映触点氧化的实际情况。文献 [2] 设计了一种基于模糊均值聚类算法的继电保护二次回路故障检测方法。该方法通过收集二次回路的状态数据，并运用算法进行智能分类，实现了故障模式的精准归类。基于这些分类特征，进一步构建了故障检测模型。然而模糊均值聚类算法的性能高度依赖于所收集的状态数据的准确性和完整性。如

果数据存在噪声、缺失或异常值，将直接影响聚类效果和故障检测模型的准确性。文献 [3] 提出了一种配网超声波带电检测技术及其缺陷分类识别方案。该技术通过构建仿真模型并调整训练规则，有效消除了二次回路缺陷信号中的噪声。最终利用最优超平面技术实现了缺陷的精准分类识别。然而超声波信号在传播过程中容易受到环境噪声、电磁干扰等因素的影响，导致信号质量下降。这会影响到音频循环放电特征向量的构造和缺陷分类的准确性。因此设计基于改进 YOLOv7 的二次回路触点氧化缺陷在线检测方法。

1 二次回路触点氧化缺陷在线检测方法设计

1.1 二次回路触点微距成像与触点微距图像触点边缘检测

设计一种微距成像装置，实现二次回路触点的微距成像，提高微小触点氧化缺陷识别准确率。设计的微距成像装置由索尼微单相机 ZV-E10+ 索尼微距镜头 FE 50mm F2.8 MACRO、微距闪光灯、升降架构成。将微距闪光灯放置在相机的侧面，与镜头形成一定的角度。这样可以避免光线直接照射到镜头上造成反光，同时能够更均匀地照亮触点区域。调整闪光灯的角度和距离，确保光线能够充分覆盖触点，并突出其细节。根据拍摄环境和触点的反光率，手动调节闪光灯的亮度，确保光线既不过曝也不过暗。为了减少相机震动对拍摄质量的影响，使用快门线和遥控器来触发快门。

对于获取的二次回路触点微距图像，利用 Sobel 算子通过计算二次回路触点微距图像灰度的一阶梯度的绝对值之和来检测二次回路触点边缘，增强二次回路触点边缘的清晰度。

由于灰度图像仅包含亮度信息，便于后续处理。将获取的二次回路触点微距图像从 RGB 色彩空间转换为灰度图像。使用加权平均法实现二次回路触

点微距图像灰度化处理，具体如下式：

$$\text{Gray}(x, y) = 0.299 \cdot R(x, y) + 0.587 \cdot G(x, y) + 0.114 \cdot B(x, y) \quad (1)$$

式中， $R(x, y)$ 为二次回路触点微距彩色图像在坐标 (x, y) 处的红分量； $G(x, y)$ 为二次回路触点微距彩色图像在坐标 (x, y) 处的绿分量； $B(x, y)$ 为二次回路触点微距彩色图像在坐标 (x, y) 处的蓝分量； $\text{Gray}(x, y)$ 为二次回路触点微距灰度图像在坐标 (x, y) 处的像素值^[4]。

分别对二次回路触点微距灰度图像的每个像素点应用水平和垂直方向的 Sobel 算子，计算其灰度梯度。其中二次回路触点微距灰度图像水平方向的梯度计算公式具体如下：

$$H_x(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \text{Gray}(x+i, y+j) \cdot H_x[i][j] \quad (2)$$

式中， $H_x[i][j]$ 为水平方向上的 Sobel 算子。

二次回路触点微距灰度图像垂直方向的梯度计算公式具体如下：

$$H_y(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \text{Gray}(x+i, y+j) \cdot H_y[i][j] \quad (3)$$

式中， $H_y[i][j]$ 垂直方向上的 Sobel 算子^[5]。

将水平和垂直方向的梯度绝对值相加，得到二次回路触点微距灰度图像每个像素点的梯度幅值。具体操作为：

$$H(x, y) = |H_x(x, y)| + |H_y(x, y)| \quad (4)$$

式中， $H(x, y)$ 为二次回路触点微距灰度图像每个像素点的梯度幅值。

设定一个阈值，将梯度幅值大于阈值的二次回路触点微距灰度图像像素点标记为边缘点。边缘检测阈值公式具体如下：

$$\text{Edge}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } H(x, y) > T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中， T 为设定的阈值； $\text{Edge}(x, y)$ 为边缘检测结果；1 为二次回路触点微距灰度图像边缘点；0 为二

次回路触点微距灰度图像非边缘点。

利用检测到的二次回路触点微距灰度图像边缘点实现触点氧化缺陷在线检测。

1.2 基于改进 YOLOv7 的触点氧化缺陷在线检测

设计一种基于改进 YOLOv7 的触点氧化缺陷检测模型，实现二次回路触点氧化缺陷在线检测。设计的触点氧化缺陷检测模型具体如下：为了提升触点氧化缺陷的检测性能，对 YOLOv7 网络架构进行改进：鉴于触点氧化缺陷的细微特性，重新标定了先验框^[6]。此外还对网络结构进行改进，旨在保持触点氧化缺陷的初级表面特征的同时，有效提取其深层次的、高级的语义信息。

重新标定先验框以捕捉微小的二次回路触点氧化缺陷，采用的锚框聚类算法是 K-means++ 算法。对于二次回路触点微距灰度图像数据集中的每个锚框，计算它与每个聚类中心之间的 IoU（交并比）值。计算公式具体如下：

$$C = \min \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^L \left[1 - \frac{v_{\text{box}_i} \cap v_{\text{anc}_j}}{v_{\text{box}_i} \cup v_{\text{anc}_j}} \right] \quad (6)$$

式中， v_{box_i} 为二次回路触点微距灰度图像数据集中第 i 个先验框的区域大小； M 为二次回路触点微距灰度图像数据集中需要检测的触点氧化缺陷目标数量； v_{anc_j} 为第 j 个聚类中心 Anchor 的区域大小； i 为聚类中心 Anchor 个数； l 为随机选取的作为原始聚类中心的数据点点数。

IoU 值越高，表示锚框与聚类中心越相似。将每个锚框分配给予其 IoU 值最大的聚类中心。对于每个聚类，利用基于形状和大小的加权平均法重新计算其中心（即新的触点氧化缺陷检测锚框参数）。重复分配样本到聚类中心以及重新计算聚类中心的步骤，直到聚类中心不再发生显著变化。得到的聚类中心即为重新标定的先验框。这些框更能够代表二次回路触点

微距灰度图像数据集中的目标形状和大小分布，从而提高触点氧化缺陷检测模型的性能。

改进后的模型由输入层、SPPFCSPC 模块、Gold-YOLO 网络模块、检测头构成。二次回路触点微距灰度图像边缘检测结果首先经过输入层，输入层的输入具体如下式：

$$\alpha = \text{Edge}(x, y) \quad (7)$$

结合 SPPF 和 CSP 结构优势，SPPFCSPC 模块旨在实现网络模型在计算效率和梯度优化上的全面提升。SPPFCSPC 模块将输入的二次回路触点微距灰度图像边缘检测结果分为两个通道进行处理。其中一个通道使用分组 1×1 卷积进行处理，以高效地整合二次回路触点微距灰度图像边缘检测结果中的特征，同时保持特征图的空间分辨率。而另一个通道则主要使用具有相同并行结构（ 5×5 MaxPool）的多个滤波器，增强模型对二次回路触点微距灰度图像边缘检测结果中多尺度特征的提取能力^[7]。此外，在第二个通道中使用 Group-Conv 分支提取二次回路触点微距灰度图像中更复杂的特征，Group-Conv 分支的结构如下式：

$$\beta = \theta \cdot \zeta_{1 \times 1} + \rho \cdot \zeta_{3 \times 3} \quad (8)$$

式中， $\zeta_{1 \times 1}$ 为串联的 1×1 卷积； θ 为 $\zeta_{1 \times 1}$ 的组数； $\zeta_{3 \times 3}$ 为串联的 3×3 卷积； ρ 为 $\zeta_{3 \times 3}$ 的组数^[8]。

最后，将这两个通道连接在一起。

Gold-YOLO 网络模块负责实现触点氧化缺陷特征对齐与融合以及触点氧化缺陷特征增强。该模块引入了一种创新的聚合 - 分发架构，此架构包含三大组件：特征对齐单元、特征融合单元及特征增强单元。特征对齐单元负责汇集并校准跨层级、异尺度触点氧化缺陷特征；特征融合单元运用卷积技术，将这些校准后的特征融合，提炼出全局的触点氧化缺陷信息；特征增强单元负责将此全局信息注入检测头^[9]。通过 YOLOv7 模型中的检测头实现二次回路触点氧化

缺陷检测。

2 实例测试

2.1 实验过程

对于设计方法，通过实例测试其实际表现。利用设计方法实施某火电厂电力系统的二次回路触点氧化缺陷在线检测。首先利用设计的微距成像装置，实现二次回路触点的微距成像。设计的微距成像装置如图 1 所示。

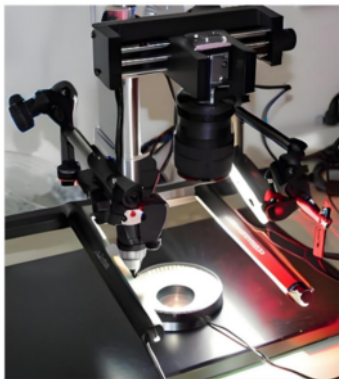


图 1 设计的微距成像装置

对于获取的二次回路触点微距图像，利用 Sobel 算子检测二次回路触点边缘，增强二次回路触点边缘的清晰度。其中实验参数设置情况如表 1 所示。

表 1 实验参数设置情况

序号	参数项目	参数设置数值
1	T	梯度幅值最大值的 20%
2	Sobel 算子内核大小	3×3
3	$H_x[i][j]$	$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
4	$H_y[i][j]$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$

检测到的二次回路触点微距灰度图像边缘点如图 2 所示。

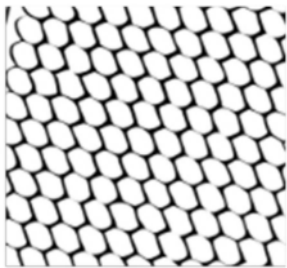


图 2 检测到的二次回路触点微距灰度图像边缘点

利用设计的基于改进 YOLOv7 的触点氧化缺陷检测模型，实现二次回路触点氧化缺陷在线检测。其中实验参数设置情况如表 2 所示。

表 2 实验参数设置情况

序号	参数项目	参数设置数值
1	i	12
2	l	8
3	学习率	0.001
4	训练轮数	100
5	损失函数	YOLOv7 模型的损失函数
6	ϑ	3
7	ρ	2
8	批处理大小	32
9	优化器	Adam
-	-	-

测试设计方法的触点氧化缺陷量化识别精度，首先测试设计方法是否能够实现亚毫米级触点氧化缺陷量化识别，接着测试设计方法的微小触点氧化缺陷 AUROC，也就是在微小触点氧化缺陷识别中接收特性曲线下方的面积。在触点氧化缺陷检测中，它反映了模型区分正常样本和微小缺陷样本的能力。AUROC 值越高，表示设计方法在区分正常和微小触点氧化缺陷样本方面的性能越好。将红外测温在继电保护二次回路中的应用方法、基于模糊均值聚类的继电保护二次回路故障检测方法、配网超声波带电检测技术及缺陷分类识别方法作为对比方法。

2.2 测试结果分析

设计方法与对比方法的亚毫米级触点氧化缺陷量化识别结果对比如图 3 所示。

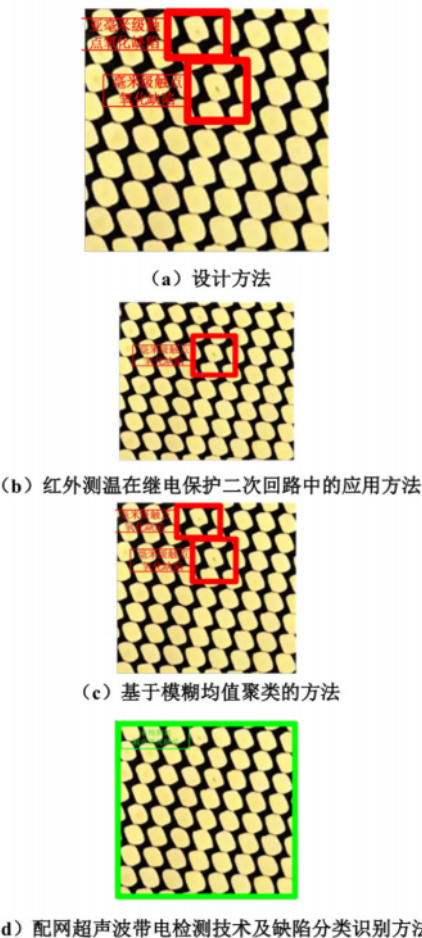


图 3 亚毫米级触点氧化缺陷量化识别结果

由图 3 可知，设计方法能够实现毫米级触点氧化缺陷量化识别与亚毫米级触点氧化缺陷量化识别，其表现优于其他对比方法。设计方法表现优越的原因总结如下：设计方法采用高性能的微距成像装置，能够捕捉到触点表面的微小细节。利用 Sobel 算子进行边缘检测，通过计算灰度梯度来增强触点边缘的清晰度，有效提取了触点边缘特征。基于触点边缘特征，利用改进的 YOLOv7 检测模型实现了氧化缺陷检测。该过程中不仅通过重新标定先验框，更好地适应了触

点氧化缺陷的细微特性，还引入了 SPPFCSPC 模块和 Gold-YOLO 网络模块，增强了模型对多尺度特征和复杂特征的提取能力。

设计方法与对比方法的微小触点氧化缺陷 AUROC 测试结果如图 4 所示。

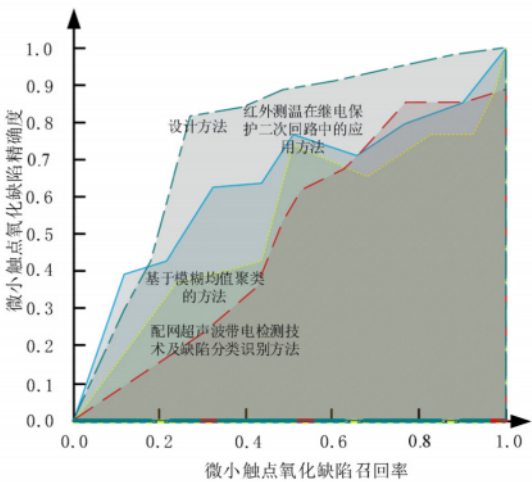


图 4 微小触点氧化缺陷 AUROC 测试结果

设计方法的微小触点氧化缺陷 AUROC 最大，说明设计方法区分正常样本和微小缺陷样本的能力更强。

3 结束语

在研究中，设计一种高效的二次回路触点氧化缺陷在线检测方法，通过微距成像与边缘检测技术的结合，以及改进 YOLOv7 检测模型的应用，实现了对触点氧化缺陷的精确识别。实验结果表明，该方法在亚毫米级触点氧化缺陷量化识别和微小触点氧化缺陷 AUROC 方面表现优越。

参考文献

- [1] 伍惠铨，曾智斌，钟鉉州，等. 红外测温在继电保护二次回路中的应用 [J]. 江西电力，2024，48（2）：13-15，19.

（下转第 86 页）

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。

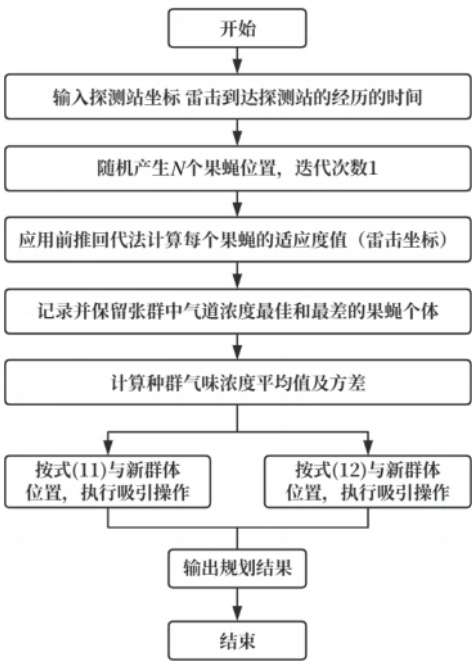


图 1 基于 MFOA 输电线路雷击定位算法流程图

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。

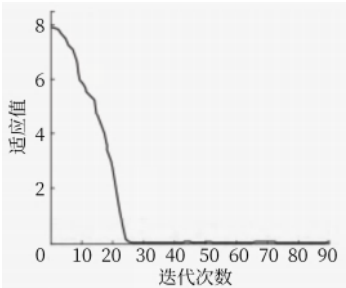


图 2 基于 MFOA 雷电定位计算的迭代过程

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）