

[架空导线绝缘子]

基于遗传算法的10 kV架空导线绝缘子最优布置方案设计

文/王震宇 马意超 兰培耕 常立庆 李晓东
国网河南省电力公司林州市供电公司

为提高10 kV架空导线绝缘子布置的电气性能、机械性能及经济性，提出一种基于遗传算法的最优布置方案设计方法。通过分析架空导线绝缘子的分布特性，构建以电压分布均匀性、受力均衡性和成本优化为目标的数学模型，并结合约束条件，设计适应度函数。遗传算法通过编码、选择、交叉和变异等遗传操作，快速迭代搜索全局最优解。实验结果表明，与传统布置方案相比，优化后的绝缘子布置呈现光滑的“U”形，呈现更加均匀的电场与机械性能分布，降低了局部过载风险，并显著提高整体系统的运行可靠性和经济性。

10 kV架空导线广泛应用于配电网中，其运行的稳定性和安全性直接关系到电力系统的可靠性。在架空线路的建设和运行过程中，绝缘子的布置方案是影响线路性能的重要因素^[1]。合理的绝缘子布置不仅能有效提高线路的电气性能和机械稳定性，还能降低系统成本，并减少外部环境对线路运行的影响。目前的绝缘子布置设计方法多依赖于经验或简单的优化算法，难以全面兼顾多种目标和约束条件，存在设计效率低和方案优劣不稳定的问题。本文从110 kV架空导线绝缘子分布特性的分析入手，构建基于遗传算法的10 kV架空导线绝缘子最优布置问题模型，并详细设计遗传算法的优化流程和适应度函数。在此基础上，通过仿真实验验证优化方案的有效性和优越性，为架空线路的安全性、经济性和高效运行提供理论支持和实践指导^[2-3]。

10 kV架空导线绝缘子分布特性分析

10 kV架空导线是高压输电网络中的重要组成部分，其绝缘子分布设计直接关系到线路的电气安全和运行稳定性。绝缘子不仅起到支撑导线和保持电气绝缘的作用，还需应对复杂的环境条件，如风

荷载、污秽、湿度以及雷击等。

1. 分布电场特性分析

在10 kV架空导线中，绝缘子的分布电场呈现不均匀状态，容易导致局部放电，从而加速绝缘子的老化。绝缘子的分布电场如图1所示。

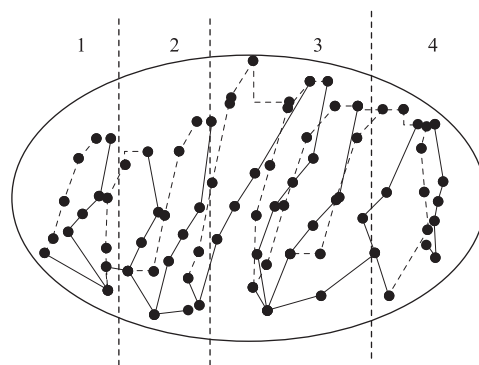


图1 绝缘子的分布电场

由图1可知，在电场1、电场2、电场3和电场4中，绝缘子串分布的方式是不同的。电场1和电场4是在弱电场条件下绝缘子的分布情况，而电场2和电场3则是在强电场条件下绝缘子的分布情况。单串绝缘子的等效电路可用串联电容模型表示，每片

绝缘子上的电压分布为

$$U_i = \frac{Q}{C_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中, U_i 为第*i*片绝缘子的电压; Q 为通过绝缘子的总电荷量; C_i 为第*i*片绝缘子的电容。

由于靠近导线端的绝缘子电容值较大, 导致其承受的电压较小, 而远离导线端的绝缘子电容较小, 则承受的电压较大。这种不均匀分布特性会降低绝缘子的整体耐压水平^[4]。

为改善分布电场, 本位采用均压环的方法, 使得绝缘子的电压分布更加均匀。均压后单片电压分布表示为

$$U'_i = \frac{C_{eq}}{C_i} U \quad (2)$$

式中, C_{eq} 为均压环作用下的等效电容; U 为总电压。

2. 机械特性分布分析

在机械特性上, 绝缘子需承受导线的张力、风荷载以及冰覆重力等综合作用力。受力模型可表示为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = T \cos \theta + \frac{C_d A \rho v^2}{2} + mg \quad (3)$$

式中, F 为绝缘子承受的总力; F_1 为导线的张力; T 为导线张力; θ 为导线悬挂角度; F_2 为风荷载; C_d 为阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; v 为风速; F_3 为冰覆重力; m 为冰覆质量; g 为重力加速度。

3. 环境特性对绝缘子分布的影响

在污秽和高湿度条件下, 绝缘子表面可能形成导电层, 从而降低绝缘水平^[5]。污秽的影响程度用污秽度参数 $ESDD$ 表示, 其对闪络电压的影响关系为

$$U = k(ESDD)^{-n} \quad (4)$$

式中, U 为闪络电压; k 和 n 为经验系数, 由实验测定。

针对环境影响, 分布式设计需充分考虑绝缘子的污秽等级和清扫难易程度, 采用耐污绝缘子或加强绝缘距离以提高运行可靠性。

基于遗传算法的10 kV架空导线绝缘子布置通道设置

1. 遗传算法优化目标函数

为实现绝缘子布置方案的最优设计, 需综合考虑电气性能、机械稳定性和经济性等多方面因素,

构建多目标优化模型。

优化电气性能的目标是降低电场的均匀性, 减少局部放电风险。绝缘子的电压分布均匀性通过电压分布不均匀系数 K_u 来衡量, 其计算公式为

$$K_u = \frac{\max(U_i) - \min(U_i)}{U_{avg}} \quad (5)$$

式中, U_i 为第*i*片绝缘子的电压; U_{avg} 为绝缘子上的平均电压。

目标是使 K_u 最小化, 即 $\min K_u$ 。

为确保线路的机械可靠性, 需要尽可能降低绝缘子承受的总力, 确保机械稳定性, 通过控制绝缘子布置的空间位置, 优化线路张力和风荷载分布, 从而使 F 最小化。

经济性目标是减少绝缘子数量和布置成本。假设绝缘子的单价为 C_{unit} , 总成本可表示为

$$C = NC_{unit} \quad (6)$$

式中, N 为绝缘子数量。

目标是使 C 最小化。

综合考虑上述目标, 采用加权求和法构建优化目标函数。

$$F' = w_1 K_u + w_2 F + w_3 C \quad (7)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数。

根据实际需求分配权重, 最终的优化目标是 $\min F'$ ^[6]。

2. 遗传算法设计下最优布置

在10 kV架空导线绝缘子布置优化中, 遗传算法作为一种启发式搜索算法, 通过模拟自然选择与遗传机制, 寻找满足约束条件的全局最优解。遗传算法设计下最优布置流程如图2所示。

第一步: 编码与初始种群生成。将绝缘子布置方案表示为染色体, 每个染色体由一组基因组成, 基因表示绝缘子的空间位置、数量等参数。假设种群规模为 p , 通过随机初始化生成初始种群

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_p\} \quad (8)$$

式中, X_i 为第*i*个布置方案, 包含绝缘子位置和相关特性参数^[7]。

第二步: 设计适应度函数, 评估每个个体(布置方案)的优劣。根据目标函数 F' 计算适应度值, 目标是最小化 F'

$$f(X_i) = \frac{1}{1 + F'(X_i)} \quad (9)$$

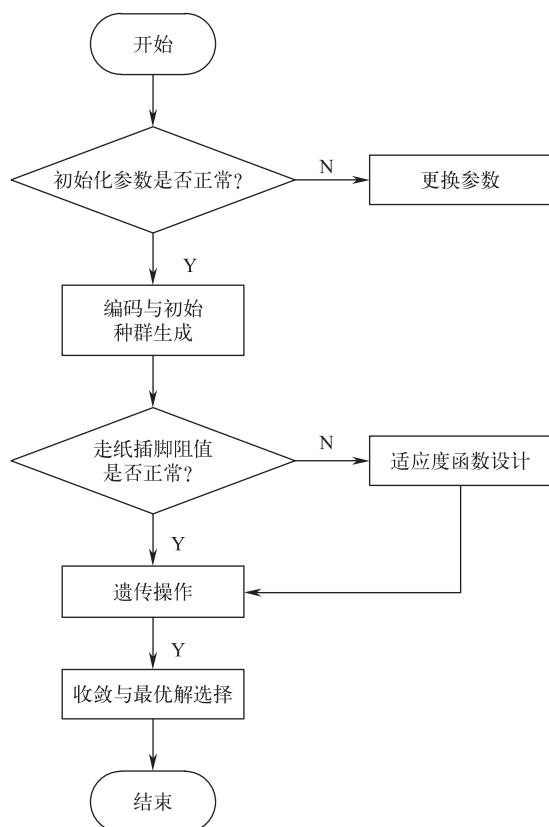


图2 遗传算法设计下最优布置流程

式中, F' 为综合目标函数 (包括电气性能、机械稳定性和经济性)。

通过适应度值选择优质个体参与后续遗传操作。

第三步: 遗传操作。

采用轮盘赌法或锦标赛法选择适应度值较高的个体, 确保优质基因能够遗传至下一代。在选中的父代染色体之间进行交叉操作, 生成新的子代染色体。设两个染色体 X_p 和 X_q 的交叉率为 p_c , 交叉后子代染色体为

$$X_{\text{new}} = p_c X_p + (1 - p_c) X_q \quad (10)$$

交叉操作提高了种群的多样性, 有助于跳出局部最优解。

以变异概率随机改变染色体中的某些基因值^[8]。

第四步: 收敛与最优解选择。经过多代迭代后, 当种群适应度的变化趋于稳定或达到预设的最大代数 $G_{\max}$ 时, 算法停止。最终选择适应度值最高的染色体作为最优布置方案

$$X_{\text{optimal}} = \arg \max_{X_i} f(X_i) \quad (11)$$

第五步: 实际布置优化结果。通过遗传算法, 获得的最优绝缘子布置方案不仅能满足电气、机械和经济等多目标约束, 还可以适应复杂的工程场景, 为实际工程提供科学有效的参考依据。

实验研究

为验证本文设计的基于遗传算法的 10 kV 架空导线绝缘子最优布置方案, 与未优化前进行实验对比, 设置实验参数见表 1。

表1 实验参数

项目	参数
线路/kV	220
绝缘电阻/MΩ	5~10
特征量	绝缘子表面电压
电晕脉冲	接触式脉冲
X射线	非接触式脉冲

根据上述实验参数进行实验, 对比引入本文技术前后, 绝缘子的分布情况, 得到实验结果如图 3 所示。

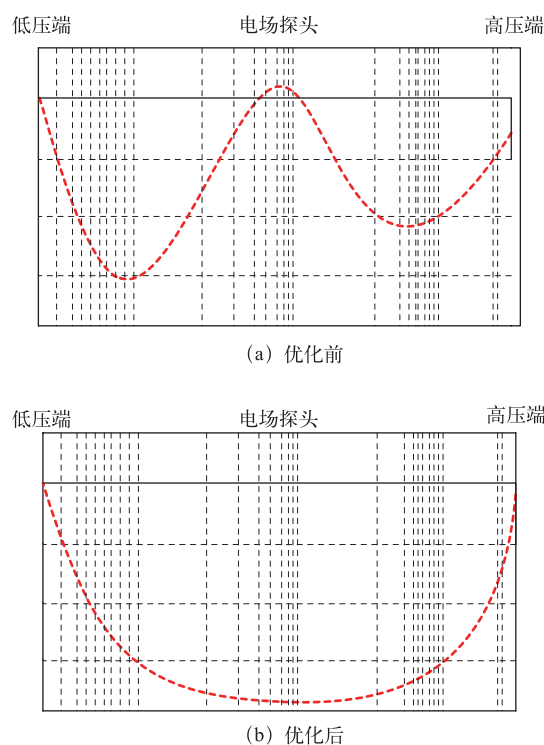


图3 绝缘子的分布情况实验结果

通过实验结果分析可以发现, 优化前的绝缘子分布特性曲线呈现明显的“S”形波动。这种波动反映出绝缘子在不同位置的电气性能和机械性能差

异较大，部分绝缘子承受的电压和机械应力显著高于其他位置。这种不均衡状态导致局部绝缘子的过载或性能劣化，增加击穿风险，并可能缩短绝缘子的使用寿命，从而降低整体布置的可靠性。

优化后的绝缘子分布曲线呈现光滑的“U”形，说明经过遗传算法优化后，各个绝缘子的电气性能和机械性能更加均匀。电压分布趋于平稳，机械受力得到合理分配，避免局部绝缘子过载的问题。同时，这种均衡分布有效提升整体布置的电气安全性和机械稳定性，为绝缘子提供更长的使用寿命和更高的可靠性。

对比两种曲线可以看出，优化后的布置方案显著优于优化前的状态。通过遗传算法优化设计，成功避免劣化绝缘子的产生，并减少潜在的运行故障。实验结果验证优化方法的科学性和实用价值，为10 kV架空导线绝缘子的实际工程布置提供有力的技术支持。

结束语

本文围绕10 kV架空导线绝缘子布置优化问题，基于遗传算法提出一种最优布置方案设计方法。通过对绝缘子分布特性的深入分析，构建以电气性能、机械性能和经济性为目标的优化模型，并通过遗传算法实现了解决方案。实验结果表明，优化后的布置方案有效改善绝缘子的电压分布和受力均匀性，避免局部过载和性能劣化现象，提高整体布置的安全性和可靠性。EA

(收稿日期：2024-12-18)

参考文献

[1] 郭裕钧, 杨晨光, 张血琴, 等. 动车车顶绝缘子气动减阻优化及绝缘性能研究[J]. 高压技术, 2023, 49(5): 1917-1926.

[2] 刘书山, 刘兰兰, 肖乔莎, 等. 基于GA-SA算法的无人机巡检输电铁塔三维航迹优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2438-2446.

[3] 徐嘉臻, 孙国立, 李要锋, 等. 盆式绝缘子闪络的典型异物红外图像识别算法[J]. 信息技术, 2024, 48(2): 160-165.

[4] 庚振新, 崔兆轩, 张瑞亮, 等. 超高压输变电装备三支柱绝缘子稳健性设计研究[J]. 变压器, 2023, 60(7): 40-44.

[5] 陈丰收, 吕述晖, 李安琪. 基于快速非支配排序遗传算法的阻尼器多目标优化布置[J]. 世界地震工程, 2023, 39(1): 109-117.

[6] 张香成, 徐宏辉, 赵军, 等. 基于改进遗传算法的磁流变阻尼器多目标空间优化布置[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2023, 50(5): 85-94.

[7] 李智杰, 石昊琦, 李昌华, 等. 基于改进遗传算法的影像中心布局优化方法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(6): 1173-1184.

[8] 李泽军, 都腾飞, 李仲树. 基于柔性遗传算法的化工产线数字孪生仿真研究与优化[J]. 制造业自动化, 2023, 45(11): 142-146.

