

[架空导线]

基于遗传算法的配电线路架空导线引流线夹紧固力优化

文/张志伟 韩光 刘壮 郭俊峰 张振勇
国网河南省电力公司滑县供电公司

随着配电线路运行负荷的逐渐增加，架空导线引流线夹的紧固力分配问题成为保障线路安全稳定运行的关键之一。提出一种基于遗传算法的架空导线引流线夹紧固力优化方法，通过建立紧固力优化数学模型，将紧固力分配问题表述为带多约束的优化问题，并设计适用于实际工况的遗传算法，利用遗传算法的全局搜索能力进行求解。试验结果表明，优化后的紧固力分配方案显著提高紧固力分布的均匀性，减少线夹过载或受力不足的风险，进一步提升配电线路的运行安全性和可靠性。相比传统人工分配方法，该方法表现出更高的优化准确度和适用性。

配电线路是电力系统的重要组成部分，其运行安全性和可靠性直接影响电力的稳定输送和用户用电质量^[1]。在配电线路中，架空导线引流线夹作为关键连接部件，其紧固力的大小不仅关系到导线的固定效果，还对导线的力学性能、长期安全性以及抗风振性能具有重要影响。然而，在实际工程中，由于施工工艺、材料特性和环境条件的复杂性，引流线夹的紧固力难以实现精确控制，容易出现紧固力不足或过大的问题，从而引发线路故障或设备损坏，增加运维成本和安全风险^[2]。基于此，本文提出一种基于遗传算法的配电线路架空导线引流线夹紧固力优化方法，通过构建数学模型，综合考虑引流线夹的力学性能约束和施工工艺要求，以最优紧固力为优化目标，利用遗传算法对紧固力进行优化求解。

配电线路架空导线引流线夹紧固力优化数学模型

1. 优化目标

紧固力优化通过确定一个合理的紧固力值 F_{opt} ，

使得引流线夹在正常运行和极端条件下都能保持稳定。优化目标包括以下几个方面：

1) 最小化疲劳损伤。导线与线夹接触界面的应力分布影响导线疲劳寿命，目标是减小疲劳损伤函数 $D(F)$ 。

2) 提高抗滑动性能。紧固力过小可能导致导线滑动，影响线路稳定性，通过最小化滑动风险函数 $S(F)$ 实现。

3) 优化施工成本。紧固力设置直接影响施工难度和材料消耗，需最小化成本函数 $C(F)$ ^[3]。

综合以上目标，优化目标函数表达为

$$\min_F J(F) = \alpha_1 D(F) + \alpha_2 S(F) + \alpha_3 C(F) \quad (1)$$

式中， α_1 、 α_2 、 α_3 为权重系数，用于平衡各目标的重要性； F 为紧固力。

疲劳损伤函数 $D(F)$ 与接触界面应力相关，假设应力-寿命曲线满足幂律关系，疲劳损伤表示为

$$D(F) = \int_0^T \left(\frac{\sigma(F)}{\sigma_{th}} \right)^n dt \quad (2)$$

式中， $\sigma(F)$ 为紧固力对应的接触应力； σ_{th} 为材料的疲劳限； n 为疲劳曲线的斜率； T 为使用周期。

滑动风险 $S(F)$ 通过摩擦力与滑动力的平衡关系确定, 定义为

$$S(F) = \max\left(0, \frac{F_{\text{ext}}}{\mu F} - 1\right) \quad (3)$$

式中, F_{ext} 为外部作用力(如风力、振动等); μ 为接触面的摩擦系数。

施工成本 $C(F)$ 与紧固力值成正比, 假设为线性关系, 表示为

$$C(F) = c_1 F + c_2 \quad (4)$$

式中, c_1 和 c_2 为成本系数。

2. 约束条件

在配电线路架空导线引流线夹紧固力优化中, 为了保证模型的实际可行性, 优化过程需要满足材料强度约束、施工工艺约束和环境适应性约束等约束条件。

引流线夹的紧固力 F 不应超过材料的屈服强度, 否则会导致引流线夹或导线发生永久变形。该约束表示为

$$F \leq \frac{\sigma_y A}{\mu} \quad (5)$$

式中, σ_y 为引流线夹材料的屈服强度; A 为接触面积; μ 为接触摩擦系数^[4]。

同时, 为了避免紧固力过小而导致松脱, 紧固力应满足最小值约束

$$F \geq F_{\min} \quad (6)$$

式中, $F_{\min}$ 为根据导线稳定性和抗滑移要求确定的最小紧固力值。

紧固力的实际设定受到施工设备和工具性能的限制。施工过程中施加的最大紧固力 $F_{\max}$ 不得超过施工工具的额定负荷, 同时需要考虑施工误差 ΔF 的影响。该约束表示为

$$F \leq F_{\text{tool}} - \Delta F \quad (7)$$

式中, F_{tool} 为施工工具的最大可承受力; ΔF 为施工过程中可能出现的误差范围。

配电线路长期暴露于外部环境中, 需考虑环境因素对紧固力的影响, 如温度变化、风荷载和振动等^[5]。这些条件会导致引流线夹受力变化, 从而要求紧固力能够满足以下动态约束

$$F \mu \geq F_{\text{ext}} + \Delta F_{\text{env}} \quad (8)$$

式中, F_{ext} 为外部作用力(如风力和振动力); ΔF_{env} 为环境变化引起的附加力; μ 为摩擦系数。

为确保紧固力的长期稳定性, 模型还需要约束其在温度波动范围 $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$ 内的性能表现。

综合以上约束, 最终的紧固力优化问题需要满足以下约束关系

$$F_{\min} \leq F \leq \min\left(F_{\text{tool}} - \Delta F, \frac{\sigma_y A}{\mu}\right) \quad (9)$$

同时, 确保在动态环境作用下满足抗滑移要求。

遗传算法下配电线路架空导线引流线夹紧固力优化

1. 优化模型的编码与解码

优化模型的变量是紧固力, 其值需要在满足约束条件的范围内优化。因此, 采用遗传算法下的编码方式将连续的紧固力值映射为遗传算法的个体表示, 并通过解码将个体表示转化为实际的紧固力值, 以进行目标函数的评估。

在本问题中, 优化的目标是确定配电线路架空导线引流线夹的合适紧固力。假设有 n 个不同的线夹需要进行优化, 每个线夹都有一个对应的预紧力值 F , 其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。

为了将这些紧固力值映射到遗传算法的基因表达式中, 对紧固力进行编码。本文选择实数编码, 即直接使用紧固力值的浮动来表示每个个体的基因。

每个个体的基因由多个浮动值组成, 每个浮动值表示一个线夹的紧固力 F_i 。紧固力的范围有约束, 即 $F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max}$, 因此将每个紧固力值限制在这一范围内。

个体的基因可以表示为一个长度为 n 的实数数组

$$\mathbf{F} = [F_1, F_2, \dots, F_n] \quad (10)$$

式中, F_i 为第 i 个线夹的紧固力。

在编码时通过缩放和偏移, 将实际的紧固力值转化为适合遗传算法处理的基因值。

解码过程则是将遗传算法中基因的表达转换回物理上的设计参数。解码过程的目的是将遗传算法搜索的基因(即在0~1之间的浮动值)映射回原始的紧固力值。

对于每个基因 Gene_i , 解码过程通过以下公式进行

$$F_i = F_{\min} + \text{Gene}_i \cdot (F_{\max} - F_{\min}) \quad (11)$$

式(11)将基因 Gene_i 转换为实际的紧固力值

F_i ，并将其限制在设定的最小值和最大值之间。

通过解码过程，将遗传算法优化得到的基因值转化为物理可实现的紧固力参数，进而应用于配电线路架空导线引流线夹的设计和优化^[6]。

2. 遗传算法的关键步骤设计

在配电线路架空导线引流线夹紧固力优化问题中，遗传算法下配电线路架空导线引流线夹紧固力优化的关键步骤包括初始种群的生成、适应度函数的构建、选择算子、交叉算子和变异算子。

(1) 初始种群的生成策略

初始种群是遗传算法的基础，影响算法的收敛性。为了优化配电线路架空导线引流线夹的紧固力，首先需要确定待优化的设计参数，了解线夹的预紧力、夹具角度以及夹紧力的分布等^[7]。假设每个个体的基因代表不同的紧固力参数，通过随机生成每个个体的基因值来构建初始种群。生成的初始种群能覆盖设计空间的不同部分，有助于算法在搜索过程中找到最优解。

(2) 构建适应度函数

适应度函数用于衡量每个个体的优劣。紧固力优化目标是最大化导线与线夹之间的接触力，同时保证机械稳定性和安全性。目标函数 $J(F)$ 反映紧固力和结构安全性之间的关系，设计为目标函数和约束条件的综合考虑。

假设目标是最小化紧固力的总变化量，并确保所有约束条件得以满足，则适应度函数可以定义为

$$\text{fitness}(F_i) = \frac{1}{1 + J(F_i)} \quad (12)$$

式中， $J(F_i)$ 为个体 F 对应的紧固力优化目标函数值。

(3) 选择算子

选择算子负责根据适应度值选择优秀个体。对于配电线路引流线夹的紧固力优化问题，选择算子能够确保适应度较高的个体进入下一代，从而提高优化效率^[8]。

通过计算适应度的累积概率，个体的选择概率与其适应度成正比。假设总适应度为 $S = \sum_{i=1}^N \text{fitness}(F_i)$ ，个体 F_i 被选中的概率为

$$P_i = \frac{\text{fitness}(F_i)}{S} \quad (13)$$

(4) 交叉算子

交叉算子通过将两个父代个体的基因进行交换，产生新的子代个体，从而在搜索空间中引入新的解。在紧固力优化中，交叉算子可以通过交换父代个体中不同参数（如紧固力、夹具角度等）的值来生成新解。通过交换不同部分的基因，子代个体能够继承父代的优秀特征。本文采用多点交叉，在多个位置上进行交叉操作，使得更多的基因参与到优化中，进一步增加种群的多样性。

(5) 变异算子

随机改变个体中的一个基因值，通过随机选择一个基因，并在给定的范围内随机变动其值：

随着迭代次数的增加，逐渐减少变异幅度，从而控制搜索空间的大小。变异操作公式为

$$F'_i = F_i + \Delta F \cdot \text{rand}(-1, 1) \quad (14)$$

式中， ΔF 为变异幅度； $\text{rand}(-1, 1)$ 为在 $[-1, 1]$ 范围内均匀分布的随机数。

随着迭代次数的增加，逐渐减少变异幅度，从而控制搜索空间的大小。变异操作公式为

$$F'_i = F_i + \Delta F \cdot \left(1 - \left(\frac{t}{T} \right)^r \right) \quad (15)$$

式中， t 为当前代数； T 为最大代数； r 为控制因子。

通过上述关键步骤，遗传算法能够逐步优化配电线路架空导线引流线夹的紧固力。每一步的优化操作都根据问题的具体特点进行调整，从而提高算法的效率和结果的准确度。

试验研究

为验证基于遗传算法的配电线路架空导线引流线夹紧固力优化方法的实际应用效果，设定实验。试验的对象为一个典型的配电线路系统，包含5个引流线夹，优化的目标是通过遗传算法确定每个线夹的最佳紧固力，使得导线与线夹之间的夹持力分配均匀，并确保每个线夹的负载在安全范围内。试验数据包括引流线夹的最大承载力、导线的重量，以及外部环境的影响因素（如风速、气温等）。为确保优化效果真实性，所有数据均为根据实际配电线路情况进行设定，且采用计算机仿真进行优化计算。

在试验过程中，首先使用遗传算法初始化一个包含50个个体的初始种群，每个个体代表一种紧固力分配方案。每个个体由5个基因组成，分别对应

5个线夹的紧固力。初始时，这些紧固力值在设定范围内（10~50 kN）随机生成。随后，通过适应度函数对每个个体进行评估，适应度函数主要衡量每个方案的负载均衡性和安全性。适应度高的个体被选中进行交叉和变异操作。交叉操作通过交换两个父代个体的部分基因，产生新的子代个体；变异操作则对个体基因进行随机调整，增加种群的多样性，防止陷入局部最优解。通过这一过程，种群逐代更新，逐步逼近最优解。

经过500代的迭代，遗传算法最终给出一组最优的紧固力分配方案。根据基于遗传算法优化后的配电线路架空导线引流线夹紧固力分配方案，实验结果见表1。

表1 实验结果

(单位: kW)

线夹编号	优化后的紧固力	传统人工分配方案	紧固力差异
线夹1	25	30	-5
线夹2	30	33	-3
线夹3	28	27	+1
线夹4	32	35	-3
线夹5	27	32	-5

从表1中可以看出，优化后的方案相较于传统的人工分配方案，紧固力分配更加均匀，并且各个线夹的负载差异较小。传统人工分配方案中，部分线夹的紧固力值较高（如线夹1、线夹4），而其他线夹的紧固力则较低（如线夹3、线夹5）。这种不均衡的分配容易导致某些线夹过载或过轻，进而影响导线的稳定性。而在优化后的方案中，线夹的紧固力分布更加均衡，使得每个线夹承受的负载相对接近，避免因负载差异过大而引发的安全风险。这种优化方案能够更好地提高配电线路的稳定性和可靠性，减少线路运行中的故障概率。

综上所述，本实验验证基于遗传算法的配电线路架空导线引流线夹紧固力优化方法的有效性。该方法不仅提高线路的安全性和稳定性，还优化负载分配，减少因过载或负载不均引发的风险，具有广泛的应用前景。在实际工程中，基于遗传算法的优化方法可为设计人员提供更为精确和高效的紧固力分配方案，为配电线路的安全运行提供保障。

结束语

本文基于遗传算法提出一种优化配电线路架空导线引流线夹紧固力的方法，通过建立紧固力优

化数学模型，将紧固力分配问题转化为约束优化问题，并设计适应于实际需求的遗传算法流程。试验结果表明，该方法能够实现线夹紧固力的均衡分配，显著降低线夹因负载不均而导致的损坏风险，提高配电线路运行的安全性和可靠性。与传统人工分配方案相比，优化后的紧固力分配更加精准，避免因经验不足或人为误差引发的负载不均现象。此外，遗传算法的高效搜索能力使得优化过程具有良好的收敛性和鲁棒性，进一步验证其在工程应用中的可行性和有效性。未来工作中，可结合实际运行数据，对优化模型进行动态调整，进一步提升算法对复杂工况的适应能力，同时探索将其他智能优化算法与遗传算法结合，以实现更优的紧固力分配方案，为配电线路的智能化管理提供更强有力的技术支持。EA

(收稿日期: 2024-11-19)

参考文献

[1] 梅红坤, 张德帅, 王泽跃, 等. 基于遗传算法优化BP神经网络的输电线路耐张线夹的温度预测方法分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(9): 268-269.

[2] 杨冬, 沈鹏飞, 陈谷雨, 等. 高压线引流线夹螺栓预紧装置拧紧力分析及控制方法[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(11): 95-98.

[3] 岳嵩, 常伟, 李畅, 等. 考虑接触电阻的耐张线夹引流板发热故障检测[J]. 电力电子技术, 2022, 56(2): 59-61.

[4] 杜民生, 白兴东, 周璋鹏, 等. 机械智能辅助带电作业关键技术与作业机器人设计[J]. 广东电力, 2023, 36(12): 57-62.

[5] 冯玉, 吴凯, 吴少雷. J型线夹用带电接引流线装置的设计与仿真[J]. 机械设计与制造, 2024(6): 326-330.

[6] 王海霖, 谭海铭, 危秋珍, 等. 自补偿定位J型线夹安装工具的设计[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 193-196.

[7] 陈盛慧, 叶良, 徐光年, 等. 智能化视觉系统在配电网带电接火上的应用[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(3): 228-231.

[8] 董选昌, 曲烽瑞, 李艳飞, 等. 架空线路耐张线夹三维温度场仿真分析及验证[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 991-1004.