

基于 PSO-AFSA 的特高压猫头塔等电位进入路径优化

吴田^{1,2}, 唐生焱^{1,2}, 邱中华³, 彭勇⁴, 黎鹏^{1,2}, 普子恒^{1,2}, 方春华^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北宜昌 443002; 3. 国网四川省电力公司超高压分公司, 成都 610041; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074)

摘要: 带电作业作为确保特高压线路运行可靠性的重要技术方法, 选择安全高效的等电位带电作业进入路径至关重要。鉴于当前等电位进入路径优化评估标准单一、没有考虑电场分布和放电特性的问题, 文中提出了一种基于分段评估函数的混合粒子群—人工鱼群优化算法 (PSO-AFSA) 路径优化模型。首先, 建立了 1 000 kV 猫头塔输电线路的有限元仿真模型, 并通过与现场试验数据对比验证了模型的准确性; 随后依据常规路径场强分布规律并结合组合空气间隙放电规律, 以 $E_{40\%}$ 作为畸变电场划分点, 构建了基于电场畸变、路径与场强的分段评估函数; 最后, 通过分析作业人员从不同相位进入等电位时, 以不同姿势于地电位与等电位处体表场强的极值及其分布规律, 以及边相和中相几种不同路径进入过程中, 场强分布在径向距离下的分布规律, 结合全局寻优能力强的粒子群优化 (PSO) 和逃离局部最优能力强的人工鱼群算法 (AFSA), 实现了不同位置下等电位进入路径的优化。与传统路径优化方法进行了对比, 结果表明, 所提出的路径优化方法在相同评估模型下避免了对低场强区域的有效位移, 使评估函数值平均降低了 32.865%, 验证了其在等电位路径优化方面的可行性。

关键词: 1 000 kV 猫头塔; 等电位路径优化; 电场畸变; 分段评估函数; PSO-AFSA

Equipotential Entry Path Optimization for Ultra-high Voltage Cathead Towers Based on PSO-AFSA

WU Tian^{1,2}, TANG Shengyi^{1,2}, QIU Zhonghua³, PEN Yong⁴, LI Peng^{1,2}, PU Ziheng^{1,2}, FANG Chunhua^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, China; 4. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: As a crucial technical approach for ensuring the operational reliability of ultra-high voltage (UHV) transmission lines, live working necessitates the selection of safe and efficient equipotential entry paths. Addressing the limitations of current optimization criteria for equipotential access paths—particularly their singular evaluation standard and negligence of electric field distribution and discharge characteristics—this paper proposes a hybrid Particle Swarm Optimization-Artificial Fish Swarm Algorithm (PSO-AFSA) path optimization model incorporating a segmented evaluation function. Initially, a finite element simulation model of 1 000 kV cat-head tower transmission lines was established, with its accuracy validated through comparative analysis with on-site experimental data. Subsequently, based on conventional path electric field distribution patterns and combined air gap discharge characteristics, a segmented evaluation function was developed using $E_{40\%}$ as the threshold for electric field distortion demarcation, integrating field distortion severity, path parameters, and field intensity metrics. Ultimately, through systematic analysis of field intensity extremes and distribution patterns at both ground potential and equipotential states during different postural transitions of operators across various phase entries, as well as radial distance-dependent field distribution characteristics during outer-phase and middle-phase access processes, an optimized equipotential entry path solution was achieved by synergizing the global optimization capability of PSO with the local optimum-escaping strength of AFSA. Comparative studies with conventional path optimization methods demonstrate that the proposed approach reduces unnecessary displacements in low-field-intensity regions under identical evaluation models, achieving an average 32.865% reduction in evaluation function values—thereby conclusively verifying its technical feasibility for equipotential path optimization.

Key words: 1 000 kV cathead tower; equipotential path optimization; electric field distortion; segmented evaluation model; PSO-AFSA

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(5500-202455164A-1-1-ZN); 国家自然科学基金资助项目(51807110)。

Project Supported by Science and Technology Projects of State Grid Corporation of China(5500-202455164A-1-1-ZN), National Natural Science Foundation of China(51807110).

0 引言

特高压输电线路是中国电力网络的关键组成部分,带电作业技术则是确保电力系统连续稳定运行的重要手段^[1-3]。在带电作业过程中,等电位作业方式因其高效性而被普遍采用^[4-6]。进入等电位是等电位作业中的核心步骤,因而开展等电位进入路径方式的研究具有重要意义^[7-8]。

目前,国内外学者在超特高压输电线路等电位作业进入路径优化方面的研究,主要是关于真型塔的仿真试验和基于体表电场的仿真计算:真型试验方面,主要研究组合间隙的放电特性,而难以覆盖种类繁多的塔形;而基于体表电场的仿真计算方法,未结合放电特性,考虑输电杆塔周围存在的极不均匀电场,导线周围产生的空间畸变电场会对组合间隙产生影响,进而导致击穿电压变化,威胁带电作业的安全性^[9]。胡毅等学者通过特高压输电线路组合间隙的真型试验发现,在输电线路带电作业组合空气间隙中,距离导线约 0.4 m 处存在最小放电电压位置,由于极性效应会导致电场畸变,易造成间隙击穿^[10-11]。这表明强场强对于带电作业研究具有重要意义。在传统路径优化中,基于场强数据的路径评估已成为等电位路径优化的主流方法之一。目前,众多研究以体表重点部位的场强大小^[12-13]、进入过程中的体表场强均值^[14]及体表场强最大值^[15]作为路径评估依据,积累了丰富的优化成果。这些评估体系大多参照如空间场强、体表重点部位场强及带电作业危险率等。如孙文秀综合运用超过场强 75% 最大值移动所占比例的评估指标^[16],评估路径的优劣,曲辉等^[17]与方雅琪^[18]在等电位路径优化研究中,引入了带电作业进入过程中的场强畸变概念,进一步丰富了评估方法。

近年来,混合优化算法领域取得了显著进展,其在多个领域展现出独特优势。Farshi 等提出结合 PSO 的全局搜索能力和 GA 的局部搜索能力,显著

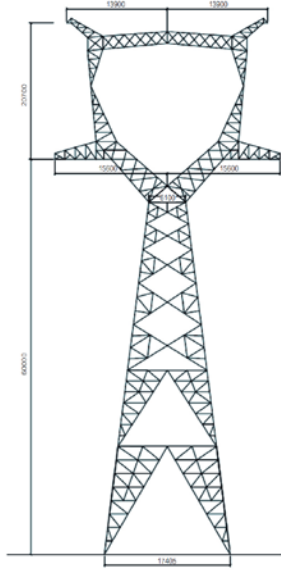
提升了路径优化的效率与精度,能够显著缩短系统的调整时间并减少超调量^[19]; Pourpanah 等对人工鱼群算法(AFSA)的改进变体进行了应用研究,通过引入新的行为机制和参数调整策略,验证了其在复杂环境下的适应性。改进后的 AFSA 在处理多模态优化问题时表现出色,特别是在避免局部最优解方面具有显著优势^[20]; Ali 等提出了一种混合 PSO 与差分进化(DE)的算法,并通过对比 PSO-GA 与 GA-PSO 两种混合算法的性能,发现 PSO-GA 在全局优化问题中表现更优,还显著减少了计算时间^[21]; Varma 等进一步探索了混合优化算法在高维优化问题中的应用,其提出的 GA-HIDMS-PSO 算法在 30 维和 50 维问题上均优于 24 种对比算法,该算法通过动态调整种群结构和优化策略,显著提高了优化效率和精度,特别是在处理高维复杂优化问题时表现出色^[22]。这些研究表明,混合优化算法在不同领域均展现出强大的优化能力,为特高压带电作业路径优化提供了丰富的算法选择和改进思路。

综上,文中提出了一种基于分段评估函数的混合粒子群—人工鱼群优化算法(PSO-AFSA)的路径优化模型。首先,构建了特高压输电线路的有限元仿真模型,并通过现场试验数据验证了模型的准确性。其次,依据常规路径场强分布规律及组合空气间隙放电特性,以 $E_{40\%}$ 作为畸变电场划分点,构建了基于电场畸变、路径与场强的分段评估函数。最后,结合作业人员体表场强分布规律,利用粒子群优化(PSO)算法的全局寻优能力和人工鱼群算法(AFSA)的局部优化能力,实现了不同位置下等电位进入路径的优化。与传统路径优化方法对比,结果表明,所提方法在相同评估模型下显著降低了路径的平均电场强度,优化效果显著,可对等电位作业的进入路径提供参考。

1 模型构建

1.1 杆塔模型

中国特高压架空输电线路主要采用单回路和双回路塔，其中线路结构以直线塔为主导。单回路塔型主要分为两种：酒杯形塔和猫头形塔。ZMP2型猫头塔尺寸图见图1。



单位: mm

图1 ZMP2型猫头塔尺寸

Fig. 1 Size of ZMP2 cat head tower

如图1结构尺寸所示，文中在模型构建中选择了川渝特高压交流工程1000 kV线路工程中的一段ZMP2型猫头塔^[23]。在输送功率超过6000 MW的情况下，根据边界条件，钢芯铝绞线型号选定为8×JL1/G1A-630/45，子导线外径为34.3 mm，分裂间距设定为400 mm。同时，考虑到当地的覆冰和积污状况，选择了420 kN复合绝缘子双联双挂点I型悬垂串SA15091S-D0601-07以及300 kN复合绝缘子双联双挂点V型悬垂串SA15091S-D0601-18。此外，大均压环的型号为FJ-1000HSZ600^[24]基于具体的杆塔、绝缘子、导线及其金具型号，文中利用SolidWorks软件建立了1:1比例的三维输电线路模型。

研究作业人员进入1000 kV等电位作业的过程中，依据GB/T 10000—2023中人体尺寸参数^[25]，

针对从事工业生产的法定中国成年人(年龄范围18~60岁)的人体尺寸数据构建了人体模型，具体的关键数据见表1。在SolidWorks中，根据上述数据建立对应带电作业过程中站姿与坐姿人体模型，见图2。

表1 成年男性身体各部位尺寸
Table 1 Dimensions of adult male body parts

测量项目	统计值(50%)/cm	近似值/cm
身高	167.8	170
头部	头宽	$a=11, b=9$
	厚度	$c=8$
	头高	椭球体
上身	身長	90
	胸厚	45
	肩宽	25
下身	前臂	31.3/23.7
	腿长	80
	胫高	40
	厚度	22

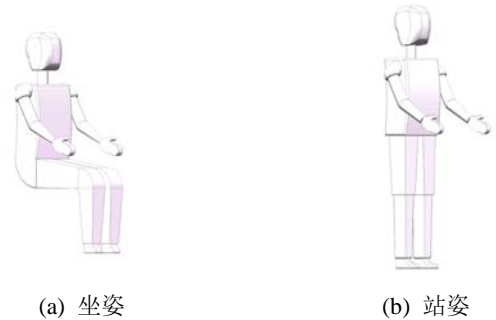


图2 人体模型

Fig. 2 Human model

1.2 有限元模型

为了提高路径优化对实际作业情况的模拟精度和计算效率，对图1中建立的输电杆塔三维模型进行了必要的简化处理。简化后的模型与图2中构建的人体模型进行装配，以确保符合实际作业现场。人体网格剖分见图3。

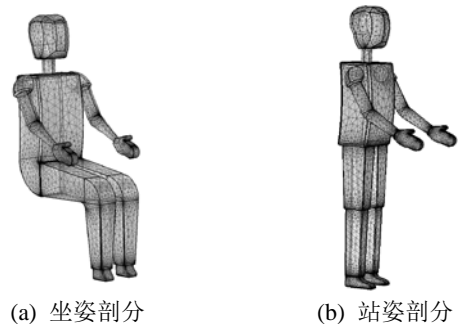
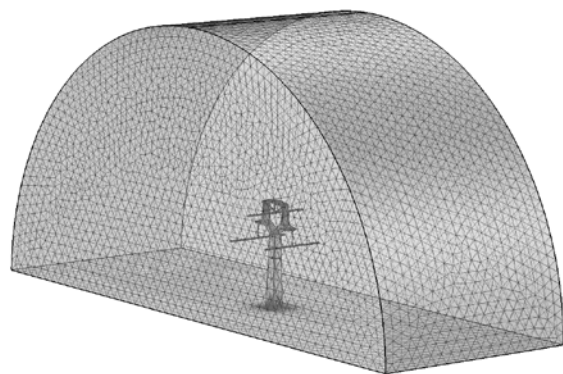


图3 人体网格剖分

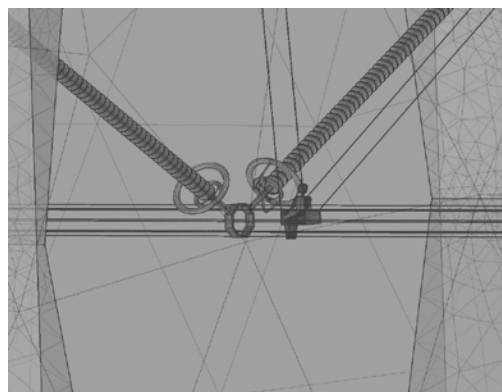
Fig. 3 Human body mesh

随后导入多物理场仿真软件 Comsol 中。在 Comsol 软件环境中采用静电场模拟的方法，构建 1 000 kV 猫头塔输电线路的整体三维模型。

带有平行导线的计算域截断边界通常有半圆柱体、长方体两种形式。由于半圆柱体能贴近实际且能留更大计算裕度，文中采用以大地为截面的半圆柱体来截断计算域边界，上述计算域空间的 4 个



(a) 空气域剖分



(b) 等电位处剖分情况

图 4 空间网格剖分

Fig. 4 Spatial mesh generation

输电导线在某一时刻电位一定，加载恒定电位，对三相八分裂导线分别施加最大运行相电压 $1000/\sqrt{3}$ kV，人工边界上的电位由静电场计算得出，并导入模型。

2 路径优化

2.1 数据预处理模型

基于猫头塔边相作业范围广、路径选择多的优点，本研究选择猫头塔边相区域作为等电位进入路径的研究对象。

在使用算法进行路径评估的预处理阶段，需提前对仿真数据进行筛选，使其转变成适用于路径评估的二维数据区。基于等电位作业输电杆塔周围电场仿真结果，提取位于边相工作平面的电场仿真数据，基于导线中心所在的水平面与塔身的交点构建坐标系，设该点为坐标原点(0, 0)。在此坐标体系中，X 轴正方向沿横担向导线延伸，而 Y 轴正方向则指向塔身向天空的垂直方向。在该运动平面坐标系内，以 0.1 m 为间隔划分运动点，共得 160×115

外表面为计算域的边界面，求解域上曲面及大地加载 0 电位，与导线垂直的 2 个求解域截断平面加载自然边界条件。具体剖分情况见图 4；为保证计算的精确度，对于空气域采用极细化网格剖分。

个运动点，并基于猫头塔头的特定几何形状筛选塔头区域无效点。

依据边相区域尺寸，文中选取了坐标为(16, 0)的点作为等电位点，预处理后的数据区域见图 5。其中横坐标正方向为横担方向、纵坐标正方向为塔身方向，单位为 m，色域深浅代表空间场强大小。

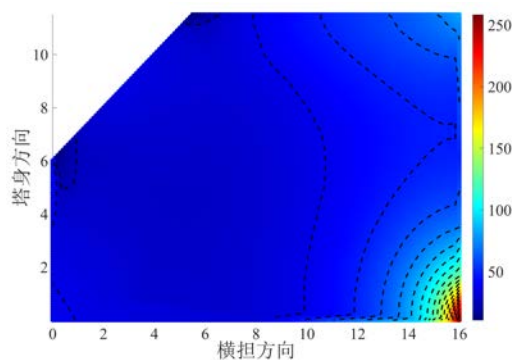


图 5 边相可运动范围

Fig. 5 Range of motion of side phase

2.2 基于 PSO-AFSA 的等电位进入路径优化模型

2.2.1 路径评估函数

带电作业人员进入等电位过程中，运动过程中的作业人员会与塔身和导线之间形成组合间隙。根

据国内外关于组合间隙放电特性的试验研究可知：在操作冲击电压作用下，悬浮电位体与正极性电极间距存在临界放电阈值，基于国内外 500~1 000 kV 带电作业组合间隙试验数据^[26]，当人体距导线 0.4 m 时出现操作冲击放电电压($U_{50\%}$)极小值。随着间距增至 1 m 以上，间隙放电电压呈现趋稳特性，该现象与导线—塔身间隙的电场梯度分布特征密切相关，空间电场强度随离导线距离增大呈指数衰减特性。当背景场强降至最大值的 40%($E_{40\%}$)时，电场强度已低于流注起始阈值，此时悬浮电位体对放电通道发展的扰动作用显著减弱。这一临界场强值可作为电场畸变分析的基准参数，其物理意义在于：当 $E \leq E_{40\%}$ 时，空间电荷的雪崩增长难以维持有效电离过程，放电发展概率急剧下降。基于上述理论，将 $E_{40\%}$ 引入路径评估函数。 $E_{40\%}$ 为背景场强降至最大值的 40%，悬浮电位体对放电通道发展的扰动作用显著减弱。因此 $E_{40\%}$ 可作为电场畸变分析的基准参数。当路径上的电场强度低于 $E_{40\%}$ 部分占比更大时，可认为该路径处于相对安全的区域，从而降低放电风险。选用 $E_{40\%}$ 提供了一个明确的量化标准，能够精确评估路径的安全性，提高路径评估的效率。路径评估函数 δ_{st} 模型如下：

$$w_j = \begin{cases} 1.0, & E(x_i, y_i) > E_{40\%} \\ 0.4, & E(x_i, y_i) \leq E_{40\%} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_{st} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{n, m} w_j E(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n L_{i, i+1}} \quad (2)$$

$$L_{i, i+1} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (3)$$

根据场强畸变程度，将整个作业过程分成两段赋予权重进行优化，式(1)-(3)中： w_j 为基于场强畸变程度对空间场强进行分段的权重值； $E(x_i, y_i)$ 表示坐标(x_i, y_i)所在位置的空间场强大小； n 代表粒子的总数量， m 代表划分的总段数； $L_{i, i+1}$ 表示第 i

个粒子的坐标(x_i, y_i)与第 $i+1$ 个粒子坐标(x_{i+1}, y_{i+1})之间的距离。粒子在运动过程中需满足以下约束条件

$$\begin{cases} E(x_i, y_i) < 30 \text{ kV/cm} \\ 0 \text{ m} \leq x_i \leq 16 \text{ m} \\ 0 \text{ m} \leq y_i \leq 10.5 \text{ m} \\ y_i - x_i \leq 6 \text{ m} \\ x_{i+1} \geq x_i \\ y_{i+1} \leq y_i \end{cases} \quad (4)$$

式(4)考虑到线路为交流线路，人体表面最大场强不得超过空气起晕场强(30.3 kV/cm)^[27]；且需保证运动点运动范围规范在可运动范围内，且符合实际工况下的运动轨迹(往下方、右方和右下方运动)。

2.2.2 混合 PSO-AFSA 算法

目前常用启发式算法解决此类问题^[28]。粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)和鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)是两种现代的启发式优化算法。PSO 在全局搜索方面表现出色，可易陷入局部最优解，且迭代后期收敛速度较慢；而 AFSA 即使初始位置不佳，它也能通过迭代逐渐收敛到最优解，从而表现出强大的鲁棒性^[29]。

利用 PSO 的全局搜索能力结合 AFSA 的高效局部搜索能力，算法能够在保持全局搜索优势的同时，加快收敛速度，并及时跳出局部最优，达到更好的优化效果。混合 PSO-AFSA 算法流程见图 6，混合 PSO-AFSA 算法流程如下。

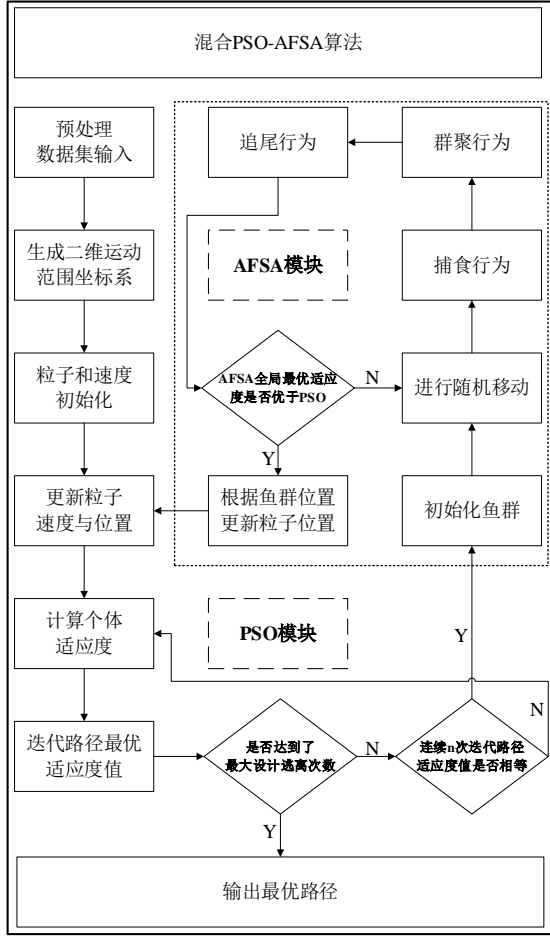


图6 混合 PSO-AFSA 算法流程

Fig. 6 Process of hybrid PSO-AFSA algorithm

1)初始化 PSO 算法的粒子位置和速度,对初始参数进行设置,设置种群规模 $N=150$;最大迭代次数 $T_{\max}=50$;加速因子 $c_1=c_2=1.6^{[30]}$ 。

$$X_i = X_{\min} + (X_{\max} - X_{\min}) \times \text{rand}(0,1) \quad (5)$$

$$V_i = (V_{\max} - V_{\min}) \times \text{rand}(0,1) \quad (6)$$

根据式(5)、(6)在空间内随机均匀初始化粒子的位置和速度,随机均匀设定空间中每个粒子的当前位置 X_i ,并初始化每个粒子的速度 V_i ,为了避免过早陷入局部最优解,对位置和速度进行限制,速度范围为 $[-V_{\max}, V_{\max}]$,初始速度设置为 0,为保证精度,设定 $V_{\max}=10$ 。

2)第 i 个粒子的坐标为 (x_i, y_i) ,该坐标的空间场强为 $E(x_i, y_i)$,为适应算法中 PSO 部分的需求,需要设定适应度函数,提出

$$\mu_E = \delta_{st} \quad (7)$$

式(7)中,为依式(2)路径评估模型所计算得第 n

条路径的路径适应度值 δ_E ,选取场强之和 E 比上总路径长度 L 取得最小值的一条路径。且运动点 (x_i, y_i) 需要满足式(4)约束条件。

3)更新粒子的速度和粒子的位置,根据以下公式对每个粒子的速度 V_i 进行更新:

$$V_{i+1}^k = \omega V_i^k + c_1 R_1 (P_{id}^k - X_i^k) + c_2 R_2 (P_{gd}^k - X_i^k) \quad (8)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_{i+1}^k \quad (9)$$

式(8)、(9)中: X_i^k 为第 i 个粒子于第 k 次迭代下的位置; ω 为粒子的惯性权重; V_i^k 为第 i 个粒子于第 k 次迭代的速度;加速因子 $c_1=c_2=1.6$ 为预设条件; R_1 和 R_2 是分布于 $[0, 1]$ 区间的随机自然数; P_{id}^k 为第 i 个粒子于在第 k 次迭代下取得局部最优适应度值时的位置; P_{gd}^k 为粒子在第 k 次迭代下的全局最优适应度值时的位置,两者初始位置均为 0。

4)在优化算法的迭代过程中,首先计算新位置的适应度值并与当前值进行比较,以判断是否进入人工鱼群算法(AFSA)阶段。基于 3)中粒子速度和位置优化公式,迭代过程中持续计算整个路径的总适应度,并与历史最优适应度进行对比。若新适应度优于历史最优解,则更新历史最优解。每次迭代后进行比较,迭代收敛后,将其与之前迭代得到的全局最优适应度值进行比较。如果局部最优适应度值大于全局最优适应度值,则认为存在陷入局部最优解的风险,转入 AFSA 阶段。

5)算法进入 AFSA 阶段后,需增强搜索的局部探索能力,并尝试跳出 PSO 陷入的局部最优。个体首先进行随机移动,根据式(10)获得 X_1 位置;并且在运动范围内进行捕食行为,尝试获得适应度更高的解,如式(11)进行捕食行为:

$$X_1 = X_0 + V_l R_d \quad (10)$$

$$X_1 = X_0 + S_p (X_k - X_0) R_d \quad (11)$$

式(10)、(11)中: X_0 为鱼群当前的位置; V_l 为鱼群的视野范围,即运动区域; R_d 为 $[0, 1]$ 之间的随

机数； S_p 为鱼群的移动步长； X_k 为鱼群在捕食过程中找到的解；若捕食行为成功，则进行 X_1 更新，否则一直随机移动到最大捕食次数 ρ 。若视野范围内解的数量 spo_1 大于 1 且拥挤度 $\Delta_1=spo_1/spo$ 小于阈值 Δ_0 ，则个体向视野范围内所有个体的位置中点移动，即式(12)。否则个体继续进行捕食行为，如果个体视野范围内存在多个解且拥挤度低，则可以进行追尾行为，向适应度最高的个体靠拢，以式(13)更新位置。

$$X_i = \frac{1}{spo_1} \sum_{j=1}^{spo_1} X_j \quad (12)$$

$$X_i = X_0 + S_p (X_{best} - X_0) R_d \quad (13)$$

$$Q_m = X_{AFSA} \quad (14)$$

式(12)-(14)中， X_{best} 为目前计算视野范围内适应度最好的个体。并根据式(14)更新全局最优解 G_{best} 。若 AFSA 阶段获得的解的适应度优于当前的全局最优解 Q_m ，则更新全局最优解；并将 AFSA 阶段找到的更优解转化为 PSO 的最优解作为输出，如果 AFSA 未能找到比当前全局最优解更优的解，则返回 PSO 阶段继续全局搜索。

3 结果与讨论

3.1 空间场强及体表电场分布

本研究基于三维有限元方法构建了 1 000 kV 猫头塔输电线路电场仿真模型，并对其空间场强进行了仿真分析。对其边相和中相的电场分布进行仿真，结果见图 7。

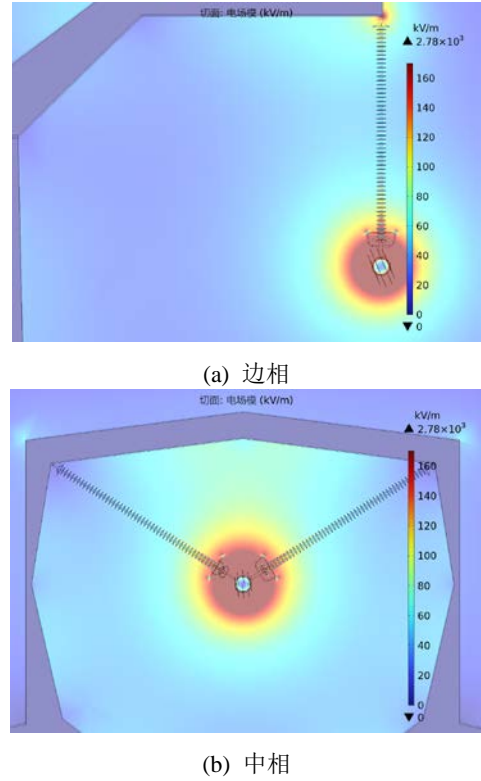
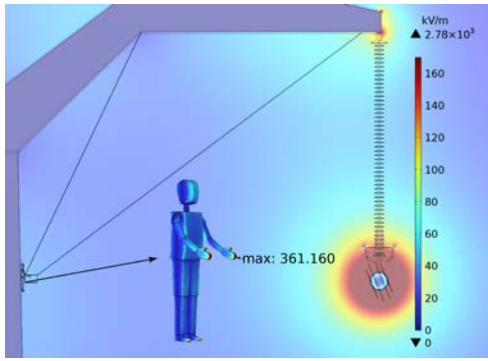


图 7 场强分布

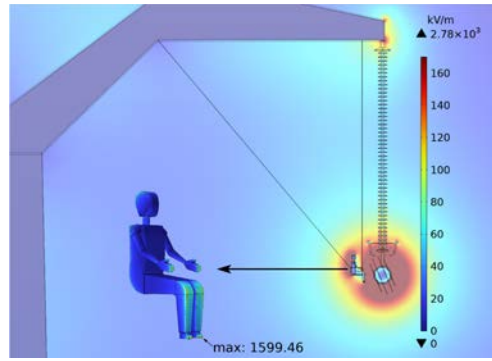
Fig. 7 Field intensity distribution

如图 7 所示，导线表面的场强的平均值约为 1 500 kV/m，最大值为 2 780 kV/m，且最大值出现在导线的两端。根据中国电力科学研究院的相关实验数据，1 000 kV 输电线路导线的最大表面场强通常处于 2 000~2 500 kV/m 的范围内^[31]。通过对比可知，本研究得到的场强数值与实验数据数量级一致，且误差较小，表明该模型能够为后续的路径仿真提供有效依据。

为研究带电作业人员在不同相位(边相与中相)、姿态(站姿与坐姿)及所处电位(地电位与等电位)下的体表电场特点，本研究构建了不同姿态的人体模型，并将其与 1 000 kV 猫头塔进行装配，进而开展电场仿真。计算得出作业人员体表电场的极大值大小及分布规律，结果见图 8、9。



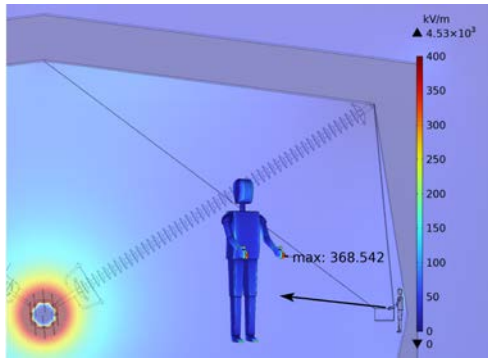
(a) 边相地电位处



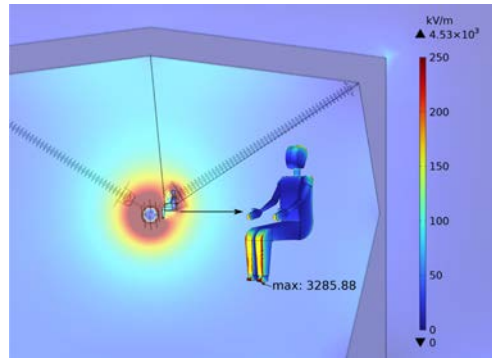
(b) 边相等电位处

图 8 边相体表场强及最大值

Fig. 8 Surface field strength and maximum value of edge phase



(a) 中相地电位处



(b) 中相等电位处

图 9 中相体表场强及最大值出现处

Fig. 9 Mesophase surface field strength and its maximum value

如图 8、9，作业人员在边相和中相塔身地电位附近时的体表场强分布情况为：边相地电位附近，作业人员站姿准备进入吊篮时，最大场强 361 kV/m，位于手部前端；坐姿位于吊篮内移至等电位区域时，最大场强增至 1 599 kV/m，出现于脚尖处。中相地电位附近，作业人员站姿准备进入吊篮时，最大场强 369 kV/m，位于手部前端；坐姿移至等电位区域时，脚尖处最大场强增至 3 286 kV/m。场强最值及位置见表 2。

如表 2 所示，带电作业人员在边相和中相两处进行带电作业时，其体表场强分布及最大值出现部位不同。穿戴屏蔽服后，虽电势分布均匀，但因体表形状不规则，体表场强分布仍不均。且作业人员存在会使原有空间电场畸变，导致局部场强异常增加^[32]。采用吊篮法时，身体突出部位易成畸变点，场强显著增大。

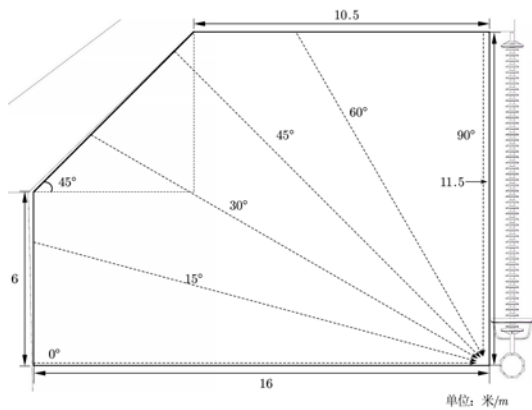
表 2 场强最值及位置

Table 2 Maximum field strength and location

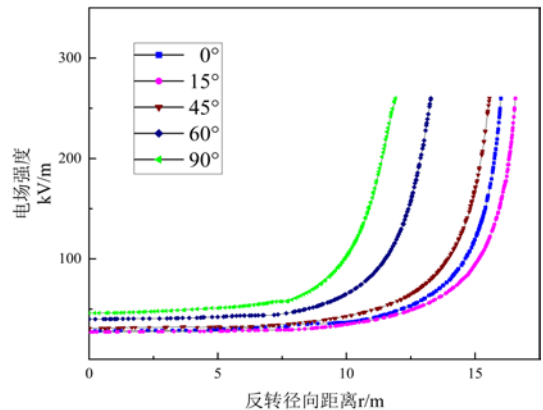
位置	$E_{\max}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	部位
边相地电位	361.160	指尖
中相地电位	368.542	指尖
边相等电位	1599.46	脚尖
中相等电位	3285.88	脚尖

3.2 不同路径下的电场分布特点

在实际作业中，作业人员通常从塔身或横担处出发，这些位置与地面相连，可视为地电位点，进而进入等电位区域。在固定进入角度 θ 的条件下，结合极坐标系的特点，以等电位点为极点，反转极坐标距离 r ，以 r 为横坐标，空间场强大小为纵坐标，绘制不同角度下边相和中相场强随反转径向距离变化的曲线，结果见图 10、11。



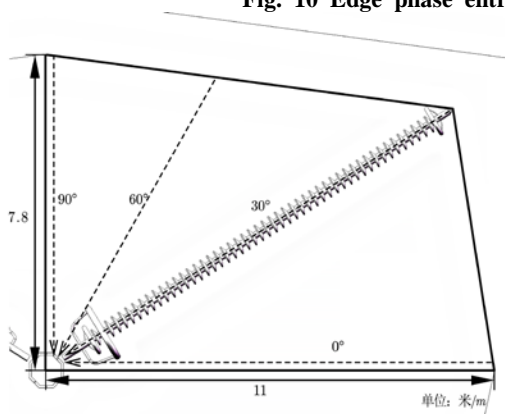
(a) 边相作业可运动范围及常规路径



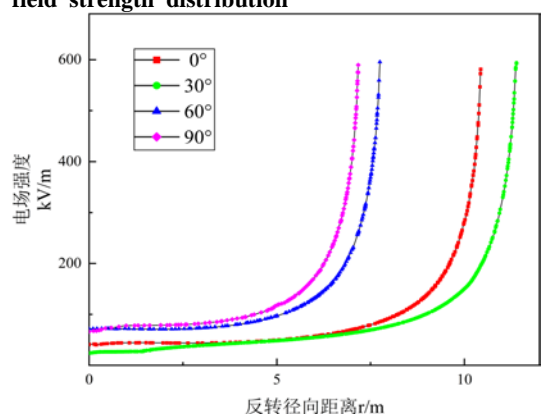
(b) 边相作业路径场强变化曲线

图 10 边相进入角度及场强分布

Fig. 10 Edge phase entry angle and field strength distribution



(a) 中相作业可运动范围及常规路径



(b) 中相作业路径场强变化曲线

图 11 中相进入区域及进入场强分布曲线

Fig. 11 Mesophase entry region and entry field strength distribution curve

如图 10(a)和 11(a)分别为边相和中相常规进入角度，作业人员根据所处相位不同，选择不同的进入路径。边相作业人员在以导线为中心的 90° 范围内选择 0° 、 15° 、 30° 、 45° 的路径，从塔身地电位出发，或选择 60° 、 90° 的路径，从横担地电位处出发。

中相作业人员则在 180° 范围内选择进入路径，考虑对称性，实际限定在 90° 内，包括 0° 、 30° 、 60° 、 90° 的路径，其中 90° 路径为垂直进入等电位点。如图 10(b)和 11(b)分别为对应的进入角度下的空间场强大小变化曲线。场强分布占比见表 3。

表 3 场强分布占比

Table 3 Field strength distribution ratio

边相角度/ $^\circ$	$\leq E_{40\%}/\%$	$\geq E_{40\%}/\%$	中相角度/ $^\circ$	$\leq E_{40\%}/\%$	$\geq E_{40\%}/\%$
0	62.93	37.07	0	69.69	30.31
15	65.45	34.55	30	68.72	21.28
30	65.98	34.02	60	64.19	35.81
45	69.19	30.81	90	67.19	32.81
60	65.79	34.21			
90	62.50	37.50			

如表 3 所示，对边相与中相各路径进行统计并计算场强分布占比。在边相的每种进入方式下，初始场强均低于 50 kV/m ，但靠近等电位点时，空间场强可升高至 250 kV/m 。同样，在中相的每种进

入方式下，初始场强均低于 100 kV/m ，且靠近等电位点时，场强可达到 600 kV/m 。通过对数据的分析，可以得出以下结论：在预设路径下，无论是从边相还是中相进入，当从地电位点向等电位点移

动时,均会出现电场畸变现象。以 0° 进入角度为例,作业过程中场强小于等于 $E_{40\%}$ 的径向距离占比为62.93%。无论是边相还是中相,场强小于等于 $E_{40\%}$ 的占比稳定在60%至70%这一区间内,而场强大于等于 $E_{40\%}$ 的占比则均在40%以下。

在场强相对较低的区域内,运动过程所占比例显著高于场强较高的区域,且路径畸变程度较大的区域在整个运动过程中的占比相对较小,且电场畸变现象在不同区域的表现存在明显差异。因此,需要对电场畸变区域进行划分,对畸变严重区域进行单独考虑,以在确保作业安全的前提下提升作业效率。

3.3 优化结果

在边相可运动范围平面上,以地电位点为路径起始点,起始点可选在塔身或横担部分;终点为导

线处的等电位点。基于 PSO-AFSA 的等电位进入路径优化模型评估,结合组合间隙放电特性,考虑临界放电阈值及背景场强降至最大值40%时的电场强度特性,在路径优化过程中,重点分析了放电理论中的关键因素,如悬浮电位体与正极性电极间距的临界放电阈值,以及背景场强降至最大值40%时电场强度低于流注起始阈值的特性,此时悬浮电位体对放电通道发展的扰动作用显著减弱。从起始点至终点进行路径寻优。

在优化过程中,调整路径确保路径上的电场强度始终处于安全范围内,尤其是当路径上的电场强度低于临界场强值的部分占比更大时,可认为该路径处于相对安全的区域,从而降低放电风险。选取两种算法计算下,使路径优化评估函数取得最小值的最优路径,结果见图12、13。

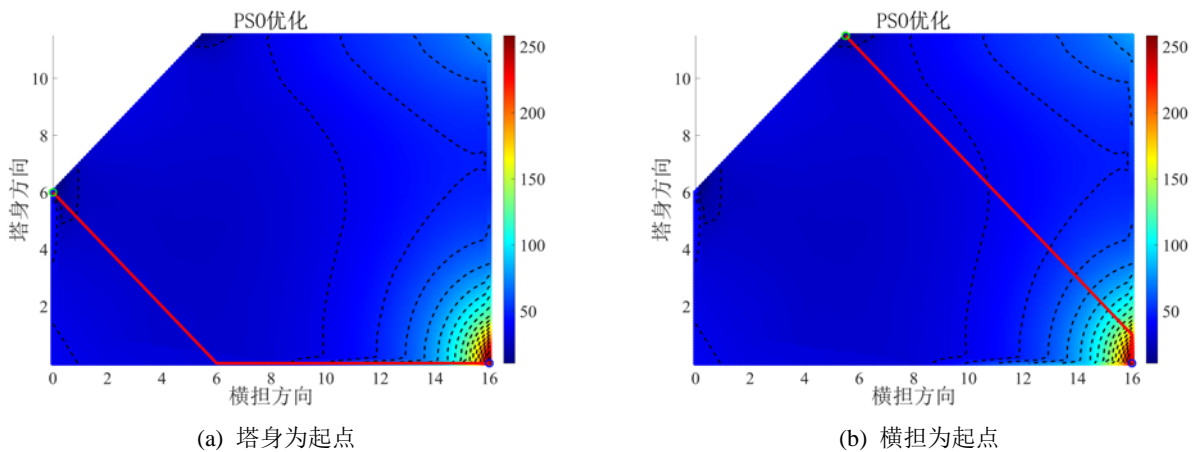


图 12 传统 PSO 路径优化
Fig. 12 Traditional PSO path optimization

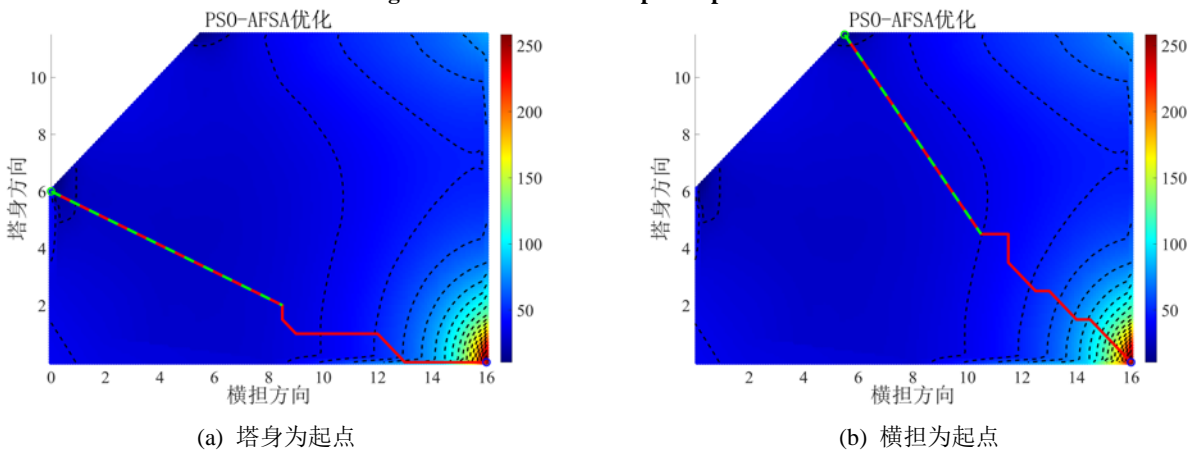


图 13 PSO-AFSA 路径优化
Fig. 13 PSO-AFSA path optimization

如图 12、13 所示,分别展示了两种算法对于不同起点下的等电位作业路径的优化效果。图 12

为传统 PSO 优化后的路径,其中实线段代表最优路径;图 13 为基于分段评估函数的混合粒子群—人工鱼群优化算法路径优化后的路径,条纹线段表示场强未畸变区域的路径优化结果。

文中选取了当前在优化算法领域广泛应用的 3 种经典算法 PSO、AFSA 和 WOA 检验文中所提出的 PSO-AFSA 算法的优化性能,通过迭代试验进行性能比较。以路径评估函数为例,其迭代过程见图 14。

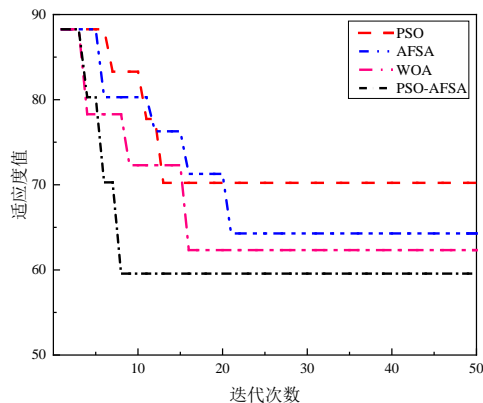


图 14 收敛曲线对比

Fig. 14 Alignment of convergence curves

如图 14 所示, PSO 在迭代 13 次后适应度值收敛于 72.827 3, AFSA 在迭代 21 次后稳定于 64.28 3 7, WOA 在迭代 16 次后稳定于 62.328 1, 而 PSO-AFSA 前期保持着快速收敛速度,在 8 次后适应度值收敛稳定于 59.560 9, 相比于前 3 种算法, PSO-AFSA 具有收敛快、寻优快、收敛精度高的优势。

L_1 和 L_2 分别表示塔身及横担地电位至等电位点的总位移长度,均与常规路径相近; δ_1 和 δ_2 则分别代表塔身及横担出发的评估函数值,平均降低 32.8 65%。优化结果对比见表 4。

表 4 优化结果对比

Table 4 Comparison of optimization results

参数	PSO	PSO-AFSA	优化率/%
L_1/m	18.4853	17.7226	4.12
L_2/m	16.2971	15.8492	2.74
δ_{s1}	88.6791	59.5609	32.83
δ_{s2}	85.4902	57.3621	32.90

如表 4 对优化结果进行对比分析,计算适应度对比和位移距离对比。这一结果表明,所提出的算

法能保证无效位移距离较短的同时,优化适应度值并有效选择出更为安全的路径。

4 结论

为了对 1 000 kV 交流猫头塔等电位吊篮法进入路径进行优化,文中采用了一种基于分段评估函数的混合粒子群—人工鱼群优化算法(PSO-AFSA)路径优化模型,对边相进入路径进行了优化,得出以下结论:

1)作业人员在塔身地电位采用站姿时,边相与中相最大场强分别达 361、369 kV/m,集中于手部前端;转入吊篮坐姿后,场强极值转移至脚尖,边相激增至 1 599 kV/m,中相达 3 286 kV/m,较站姿提升约 7.9 倍。屏蔽服虽可均衡电势,但受人体非对称几何特征影响,仍存在显著场强梯度。

2)在常规角度进入等电位的过程中,对于边相角度,当角度从 0° 增加至 90° 时,场强低于 $E_{40\%}$ 的比例在 62.50%~69.19%之间波动,而场强高于 $E_{40\%}$ 的比例则在 30.81%~37.50%之间。对于中相角度,场强低于 $E_{40\%}$ 的比例在 64.19%~69.69%之间,而场强高于 $E_{40\%}$ 的比例则在 21.28%~35.81%之间。这些数据表明,在不同角度进入等电位的过程中,大部分路径段处于低场强区域。

3)提出了一种基于分段评估函数的混合粒子群—人工鱼群优化算法(PSO-AFSA)路径优化模型,与常规路径优化进行对比方式可知,该算法可保证不增加多余位移的情况下,使评估函数值平均降低了 32.865%,验证了其在等电位路径优化方面的可行性。

参考文献:

[1] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.

- [2] 胡毅, 刘凯, 彭勇, 等. 带电作业关键技术研究进展与趋势[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1921-1931.
HU Yi, LIU Kai, PENG Yong, et al. Research status and development trend of live working key technology[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1921-1931.
- [3] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [4] 吴东, 潘俊文, 邹明, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 157-164.
WU Dong, PAN Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on ± 800 kV DC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 157-164.
- [5] WANG Linong, ZHANG Qiushi, HU Jianxun, et al. Research on complex gap discharge model of live working on EHV and UHV high-voltage transmission lines[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2014, 37(1): 11-18.
- [6] 刘庭, 胡毅, 刘凯, 等. 超高压交流/特高压直流同塔多回输电线路塔宽及离子流对带电作业间隙放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3261-3267.
LIU Ting, HU Yi, LIU Kai, et al. Influence of Tower width and ion current density on live-working gap flashover characteristics of EHVAC/UHVDCT transmission line on the same Tower[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3261-3267.
- [7] 李勇伟, 袁骏, 赵全江, 等. 中国首条 1 000 kV 单回路交流架空输电线路的设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 117-126.
LI Yongwei, YUAN Jun, ZHAO Quanjiang, et al. Design of the first 1 000 kV AC single-circuit overhead transmission line in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 117-126.
- [8] 张秋实, 王力农, 方雅琪, 等. 等电位人员一杆塔构架间隙放电特性 仿真分析方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2415-2423.
ZHANG Qiushi, WANG Linong, FANG Yaqi, et al. Discharge characteristics simulation method of equipotential Worker-Tower structure gap[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2415-2423.
- [9] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 1 000 kV 交流输电线路带电作业组合间隙研究[J]. 电力设备, 2007, 8(8): 1-5.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research on live working complex gap for 1 000 kV AC transmission lines[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(8): 1-5.
- [10] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 特高压交流输电线路带电作业现场应用试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2053-2058.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. On-site application test of live working of UHV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2053-2058.
- [11] 胡毅, 刘凯, 王力农, 等. 1 000 kV 同塔双回输电线路带电作业技术试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2668-2673.
HU Yi, LIU Kai, WANG Linong, et al. Experimental research of live working on 1 000 kV double circuit AC transmission line on the same Tower[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2668-2673.
- [12] 唐波, 吴玮华, 刘任, 等. 500 kV 紧凑型同塔双回输电线路带电作业进入等电位方法[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 113-119.
TANG Bo, WU Weihua, LIU Ren, et al. Entering the equipotential method for live working of 500 kV compact double circuit transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 113-119.
- [13] 方雅琪, 彭勇, 苏梓铭, 等. 特高压紧凑型线路带电作业人员体表电场仿真计算[J]. 中国电力, 2015, 48(10): 77-83.
FANG Yaqi, PENG Yong, SU Ziming, et al. Computation of body surface electric field during live working on 1 000 kV AC compact transmission lines[J]. Electric Power, 2015, 48(10): 77-83.
- [14] 秦威南, 郭云鹏, 汤春俊, 等. 特殊工况下超高压输电线路等电位作业体表场强分布及安全性评估[J]. 南方电

- 网技术, 2022, 16(12): 134-141.
- QIN Weinan, GUO Yunpeng, TANG Chunjun, et al. Electric field intensity distribution and safety assessment of EHV transmission lines equipotential work under special working conditions[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 134-141.
- [15]刘会家, 刘仕奇, 李本良, 等. 基于体表电场的 500 kV 交直流同塔双回线路进入等电位的路径研究[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 176-182.
- LIU Huijia, LIU Shiqi, LI Benliang, et al. Research on entering path to equipotential level of 500 kV AC-DC double-circuit transmission line according to body surface electric field strength[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 176-182.
- [16]孙文秀, 丁玉剑, 姚修远, 等. 特高压跳线串带电作业人体电场分布特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 150-157.
- SUN Wenxiu, DING Yujian, YAO Xiuyuan, et al. Analysis of body surface electric field distribution for live working on UHV jumper insulator string[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 150-157.
- [17]曲辉, 林涛, 陈鹤冲, 等. 高海拔地区特高压杆塔的合成电场和电位转移电流实测研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 220-224.
- QU Hui, LIN Tao, CHEN Hechong, et al. Study on synthetic electric field and potential transfer current of UHV Tower in high attitude area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 220-224.
- [18]方雅琪, 王力农, 李姗姗, 等. 1 000 kV 变电站检修人员电场防护方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 144-150.
- FANG Yaqi, WANG Linong, LI Shanshan, et al. Maintenance personnel protection of entering equipotential electric field in 1 000 kV substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 144-150.
- [19]FARSHI H, VALIPOUR K. Hybrid PSO-GA algorithm for automatic generation control of multi-area power system[J]. IOSR Journals, 2016, 11(1): 18-29.
- [20]POURPANAH F, WANG Ran, LIM C P, et al. A review of artificial fish swarm algorithms: recent advances and applications[J]. Artificial Intelligence Review, 2023, 56(3): 1867-1903.
- [21]ALI A F, TAWHID M A. A hybrid PSO and DE algorithm for solving engineering optimization problems[J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2016, 10(2): 431-449.
- [22]VARNA F T, HUSBANDS P. Genetic algorithm assisted HIDMS-PSO: A new hybrid algorithm for global optimisation[C]//2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). [S.l.]: IEEE, 2021: 1304-1311.
- [23]王晓京, 胡文华, 张景锋, 等. 1 000 kV 特高压交流输电线路输送能力与电压降关系计算[J]. 中国勘察设计, 2021(s1): 94-98.
- WANG Xiaojing, HU Wenhua, ZHANG Jingfeng, et al. Calculation of the relationship between transmission capacity and voltage drop of 1 000 kV UHV AC transmission line[J]. China Exploration & Design, 2021(s1): 94-98.
- [24]卞星明, 张福增, 王黎明, 等. 1 000 kV 交流复合绝缘子均压环参数设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 980-986.
- BIAN Xingming, ZHANG Fuzeng, WANG Liming, et al. Design of grading rings for 1 000 kV AC composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 980-986.
- [25]李金亮, 杨淼, 刘夏清, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电更换 V 型绝缘子串进出电场方式研究[J]. 陶瓷避雷器, 2017(4): 189-193.
- LI Jinliang, YANG Miao, LIU Xiaqing, et al. Research in method for entering the electric field of live replacing the V-type insulator string on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4): 189-193.
- [26]伍绍铨, 王力农, 高嘉辰, 等. 正极性操作冲击电压下组合空气间隙放电物理模型[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1389-1401.
- WU Shaocheng, WANG Linong, GAO Jiachen, et al. Physical model of combined air gaps under positive switching impulse[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1389-1401.
- [27]段娜娜, 王雪焕, 徐伟杰, 等. 不同电离系数和附着系数对导线起晕场强的影响综述[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 1-9.

DUAN Nana, WANG Xuehuan, XU Weijie, et al. Summary of the influence of different ionization coefficients and attachment coefficients on the corona inception field strength[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 1-9.

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

LIU Shushan, LIU Lanlan, XIAO Qiaosha, et al. 3D track optimization of UAV(unmanned aerial vehicles)inspection of transmission Tower based on GA-SA[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(6): 2438-2446.

[29]GAO Shun, FAN Shouwen, FAN Shuai, et al. Dynamic precision reliability of the aircraft landing gear retraction mechanism under coupled extreme working conditions[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(7): 6075-6094.

[30]LING Qinghua, LI Zexu, LIU Wenkai, et al. Multi-objective particle swarm optimization based on particle contribution and mutual information for feature selection method[J]. The Journal of Supercomputing, 2024, 81(1): 255.

[31]谢天喜, 刘鹏, 李靖, 等. 交流 1 000 kV 同塔双回输电线路复合绝缘子电场分布[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 224-229.

XIE Tianxi, LIU Peng, LI Jing, et al. Electric field distribution of composite insulator on AC 1 000 kV double circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 224-229.

[32]JIANG C, ZOU D, LI J, et al. Research on electric field distribution of UHVDC transmission lines and body surface during live working[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 231(1): 012004.

吴田(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事带电作业、电网运行维护及外绝缘等方面的工作(E-mail: wutian_08@163.com)。

唐生焱(2002—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能带电作业(E-mail: 32411510@qq.com)。