

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.021

1 000 kV 特高压线路带电作业等电位过程路径优化设计

张宇娇^{1,2}, 陈嫣冉¹, 王良凯¹, 智 李¹, 黄雄峰^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 特高压线路电压等级高、结构尺寸大、局部场强畸变更严重等特点给带电作业提出更高的技术要求。为研究1 000 kV特高压交流线路采用吊篮法等电位作业的最优路径,文中利用有限元法计算分析了作业人员等电位作业过程中的体表场强动态分布,并结合粒子群优化算法求解等电位作业的最优路径,最后对路径安全性进行了现场试验。研究表明:特高压交流直线塔带电作业人体表面最大场强约为2 468 kV/m,现有防护措施能够保证带电作业人身安全;试验数据验证了路径优化方法的可行性和可靠性,为后续特高压线路其它塔型等电位作业路径选取提供设计参考。

关键词: 特高压交流; 带电作业; 直线塔; 路径优化; 粒子群算法

Path Optimization Design of Equipotential Live Working in 1 000 kV UHV Transmission Lines

ZHANG Yujiao^{1,2}, CHEN Yanran¹, WANG Liangkai¹, ZHI Li¹, HUANG Xiongfeng^{1,2}

(College of Electrical & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The UHV has higher voltage, larger structural size and more serious local field distortion, which puts higher technical requirements for live working. In order to explore the optimal path when using the hanging basket method for equipotential operation of 1 000 kV UHV AC line live working, this paper uses the FEM to calculate the dynamic distribution of the surface field strength of the workers during the process of entering the equipotential. Combined with the particle swarm optimization algorithm, the optimal path of the equipotential is obtained. Finally, the field safety of the optimized path is tested. The research results show that the maximum field strength of the human body surface is approximately 2 468 kV/m, and the existing safety protection measures can ensure the personal safety of the UHV live working. The test data verifies the feasibility and reliability of the path optimization method, and provides a design reference for the path selection of other tower-type live working in UHV lines.

Key words: UHV AC; live working; tangent tower; path optimization; particle swarm optimization

0 引言

特高压线路是我国输电系统的骨干网架,一旦发生非计划停运将危及整个电网系统的安全稳定运行,对国民生活和生产造成重大损失^[1-4]。为保证特高压线路持续、安全、稳定供电,增强输电系统可靠性,需在不停电情况下进行消缺作业。但特高压带电作业电压等级更高、局部场强畸变更严重,极端条件下气体放电规律更为复杂,而且没有成熟理论可

遵循,目前仍处于研究和探索阶段^[5-8]。文[9-10]研究了特高压线路带电作业人体场强分布、安全距离和组合间隙等问题,但未讨论进入路径选取问题;文[10]根据操作冲击放电试验结果,验证了电场分布与 U_{50} 的密切关系,并计算不同进出等电位路径所需要的最小安全间隙,但未分析作业人员的体表电场强度;文[11]探讨了进入强电场的方式选择及路径选取,而其仅仅只在3种典型作业的作业路径中来寻优;文[12]以带电更换绝缘子为出发点,研究了

收稿日期:2019-10-31; 修回日期:2019-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51577106);湖北省杰出青年基金项目(2019CFA085)。

Project Supported by National Science Foundation of China(51577106), Hubei Provincial Science Fund for Distinguished Young Scholars(2019CFA085).

在特高压直流线路的电场中处于特定的典型位置点时的人体表面的合成电场强度;文[13]建立了作业人员在直升机中的仿真模型,通过仿真计算得到了人体表面的电场强度,并给出了直升机作业方法下的侵入路径,然而铁塔结构限制了直升机的侵入角度和侵入路径;文[14]通过仿真分析空间位置点作业人员体表场强动态分布,探讨了特高压直流线路作业人员进入等电位的最优路径,但均假定进入路径为直线,所选计算数据点较少,不符合带电作业实际工作情形。

综上所述,目前国内外对于特高压带电作业方式以及作业时最优路径的选取的相关研究大都是通过模拟试验和数值仿真计算。模拟试验对试验条件要求较高,也需要花费大量时间和精力,在试验过程中也存在一定危险性,而数值仿真法对于空间场强的计算点数目又比较少,所得到的计算结果的优化程度有待提高。因此有必要考虑对带电作业空间区域内带电作业人员可能经过的所有路径中的各个位置点进行人体表面电场强度仿真计算,选取更符合实际作业要求的最优路径。文中利用有限元数值计算方法,仿真分析带电作业人员等电位过程中的体表场强动态分布,结合粒子群优化算法设计得到吊篮法中人体进出特高压线路空间电场的最优路径,并通过现场试验验证了本文所提出的方法的可行性。

1 模型建立

1.1 环境模型

文中选择1 000 kV淮—上线直线塔作为研究对象,塔型SK301,呼高75 m;导线型号为8×JL/G1A-630/45,子导线外径33.8 mm,分裂间距400 mm;采用300 kN复合绝缘子双联I型悬垂串,串长9 000 mm,串间距离600 mm;大均压环型号为FJ-1000HSZ-600;作业人员模型参考《GB/T10 000—1988中国成年人人体尺寸》的统计数据^[15]。整体环境仿真模型见图1。

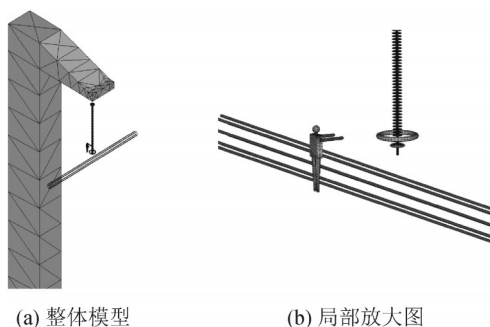


图1 仿真模型3D视图

Fig. 1 Simulation model 3D view

1.2 有限元模型

通过有限元计算软件Ansys进行仿真,建立整体三维模型和一个立方体空气域模型,为了控制网格剖分数,将空气域模型大小近似设为整体三维模型的2倍,空气域6个面为计算域边界,并对6个边界条件进行设定^[16]。首先对空气域下表面边界条件进行确定,SK301型杆塔下横担导线对地高度为65 m,计算所建立的空气域模型中,导线到空气域下表面高度为20 m,下表面边界并非零电位,导线相电压为 $1\,000/\sqrt{3} \approx 635$ (kV),通过计算得知下表面电位为198.38 kV,因此在空气域下表面给定一个电位边界条件,加载电位198.38 kV^[17],空气域另外5个面的边界条件近似取下表面边界条件,均给定电位边界条件为198.38 kV。对导线、近导线侧绝缘子及大均压环施加高电位635 kV,对铁塔、近横担侧绝缘子、防鸟害中均压环及大地施加零电位^[18-20];由于作业人员身穿屏蔽服,当作业人员未接触带电体处于悬浮电位时,对作业人员及吊篮进行耦合电位;当作业人员靠近带电体附近0.5 m时,进行等电位操作,此时作业人员体表电位和所接触带电体电位相同^[21]。

2 模型计算

2.1 体表场强分布

通过网格剖分、荷载加载、求解计算等步骤得到在等电位作业位置时作业人员采用不同姿势的人体体表场强分布。剖分情况见图2。其中整体剖分网格数达到2 919 325个,节点4 025 649个,场强分布云图见图3。针对人体模型手、脚、头部和高压端(如导线、均压环等)精细控制网格,可提高有限元计算结果准确性,其余部分网格自适应剖分,控制网格边长,剖分较为稀疏,可以减少计算时间,提高计算效率。

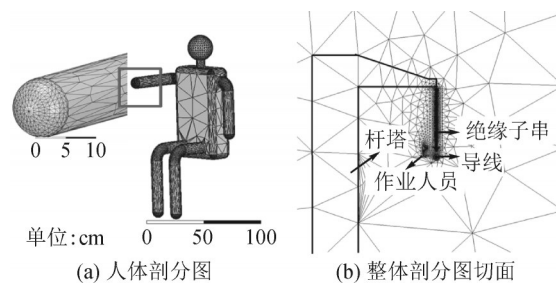


图2 局部与整体剖分图

Fig. 2 Partial and overall dissection

图2、3中数据表明,当作业人员采用坐姿等电位作业时,体表最大场强为1 764 kV/m,最大值出现在头部;当作业人员采用站姿等电位作业时,体表

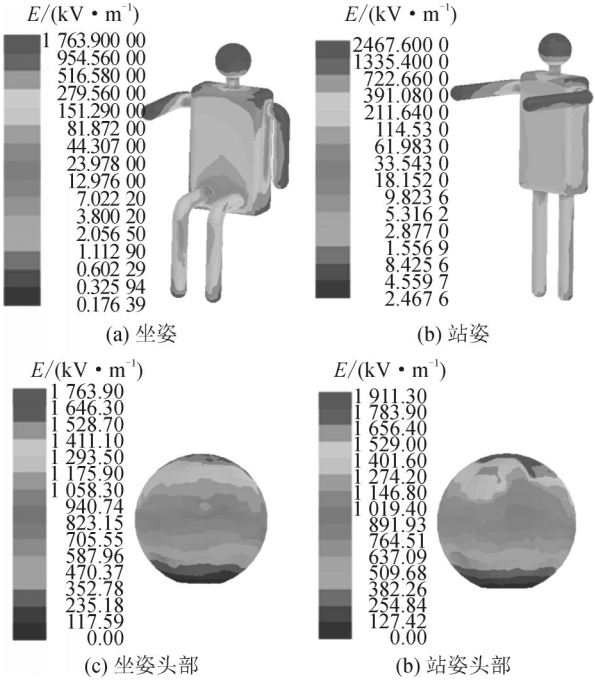


图3 直线塔等电位两种姿势下人体体表场强分布

Fig. 3 Field strength distribution of human body under two postures of linear tower equipotential

最大场强为2 468 kV/m,最大值出现在手部,面部场强最大值为1 911 kV/m。需要说明的是,在进行带电作业静电场仿真计算时并未考虑空间电晕的影响,因此计算值与实际值之间可能存在一定误差。

等电位不同姿势人体各部位场强分布情况见表1。从表1可以看出,等电位作业时头部、指尖、脚尖场强较高,胸部场强较低,而且站姿等电位电工手部场强远大于坐姿电工手部场强,两者相差856 kV/m。人体其他部位相差不多,不过总体而言,坐姿等电位电工体表场强要低于站立前伸式,建议等电位作业人员控制头部不超过导线侧均压环高度,尽量降低重心进行作业检修。

表1 等电位人体各部位场强分布

人体部位	equipotential human body	
	坐姿	站姿
头部	1 764	1 911
手部	1 612	2 468
腿部	1 570	1 274
胸部	512	438

2.2 空间场强分布

对于1 000 kV 直线塔采用塔上吊篮法进入等电位作业,其可能的运动区域见图4。在运动区域内以横担中心所在位置为原点,取水平方向为X轴,取横担垂直方向为Y轴,建立直角坐标系,则空间任意位置对应坐标系内某一点(x,y)。为了研究空间电场

随位置和路径的变化规律,提取不同位置处的人体表面场强最大值,记为 E_m , E_m 可表示为关于空间坐标 x 和 y 的二元函数,其三维图像见图5。其中, X 轴所表示的是空间中某点与设定原点的水平距离, Y 轴所表示的是空间中某点与设定原点的垂直距离, $E_m(x,y)$ 则反映了该点处人体表面场强最大值随路径位置的变化趋势。

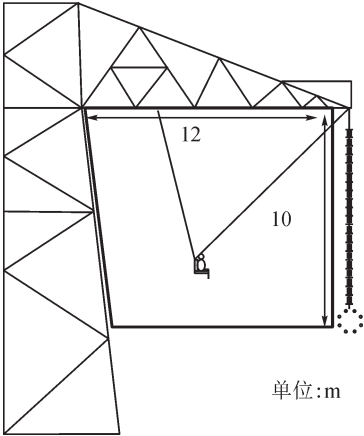


图4 吊篮法可能进入路径范围

Fig. 4 Possible path range of the hanging basket method

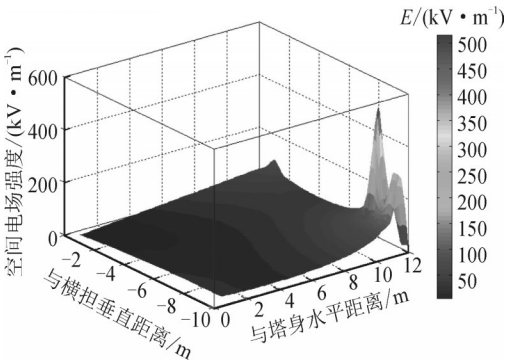


图5 空间场强随路径位置变化趋势

Fig. 5 The trend of electric field strength as a function of path

三维曲面的峰值出现在均压环及导线附近,且从地电位通过各种不同路径向导线靠近时,可以直观的看出曲面呈现出不断上升的趋势,见图5。而这一不断上升的趋势则反映了在作业人员进入等电位过程中场强逐渐增大,人体体表场强也在不断增大,并且距离导线越近的位置场强增幅越大。

3 路径优化

3.1 优化模型

吊篮法进出等电位路径优化设计的基本思想是在满足作业人员体表场强小于空气起晕场强(屏蔽服满足安全防护要求)的前提下,使经过路径人体体表平均场强值最小。这个问题属于非线性规划的目标函数优化问题,在求解过程中以路径点处场

强平均值为目标函数,以人体表面最大场强不超过空气起晕场强(3 135 kV/m)及安全运动区域为约束条件,其数学模型为

$$\min E_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i(x, y)}{\sum_i path_{i,i+1}} \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} E_i(x, y) < 3\ 000 \text{ kV/m} \\ 0 \text{ m} \leq x \leq 12 \text{ m} \\ -10 \text{ m} \leq y \leq 0 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: E_i 为第*i*个路径点的空间场强; $path_{i,i+1}$ 为两个相邻路径点 $E_i(x, y)$ 之间的距离。

3.2 粒子群算法应用

3.2.1 建立栅格环境模型

文中选用粒子群算法(PSO)求解采用等电位作业时最优路径。首先对作业人员进入等电位可能运动区域进行栅格法环境建模,将可能的运动范围被等间距划分为一个*M*行*N*列的位置矩阵*D*。吊篮法带电作业人员进入等电位可能运动空间大小设置为12 m×10 m,*X*轴为作业人员距离塔身的距离;*Y*轴为作业人员距离横担的距离。假设起点坐标为*s*(0, 0),终点坐标为*g*(12, -10)。依据所采集的人体尺寸数据,人体模型大小在1 m³以内,为保证求解准确性,将计算位置点间距设定为0.5 m,则求解区域被划分为*M*=20行、*N*=24列的480个计算位置点。

环境模型中每个栅格都可用直角坐标(*x, y*)唯一标志,其栅格值*G*为该位置点带电作业人员体表的电场强度。根据前期空间位置处人体表面场强计算结果*E*定义栅格模型各位置处场强值为

$$G(i, j) = E(x, y) \quad i \in [0, M], j \in [0, N] \quad (3)$$

3.2.2 确定粒子的适应度函数

适应度函数是PSO算法中用来评价运动路径优劣性的指标,它决定了算法能否收敛于最优解。首先依据前期通过式(3)所得场强值*G*(*i, j*)确定粒子运动到(*i, j*)点时带电作业路径场强值之和*E*为

$$E = \sum_{k=1}^n G(i, j) \quad (4)$$

式(4)中:*n*为粒子所经过位置点个数; $G(i, j)$ 为粒子第*k*个位置点的作业人员人体表面最大电场强度。

在此运动过程中通过的路径长度为

$$l = \sum_{i=1}^d \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (5)$$

式(5)中:*l*表示一个粒子经过所有相邻位置点之间的距离和,即作业路径总长度; (x_i, y_i) 表示该粒子当前坐标; (x_{i+1}, y_{i+1}) 表示粒子下一位置坐标。

为了确保路径满足实际作业要求,因此引入惩

罚函数。当作业人员从起点向等电位终点移动过程中,运动空间垂直于地面,考虑到作业人员自身重力影响及实际吊篮法带电作业可操作性,粒子运动至下一个位置点的方向选择只有3种,见图6。因此在适应度函数上引入一个惩罚函数,从而限制粒子不能向-*X*轴和+*Y*轴方向运动。

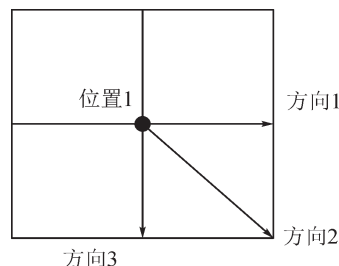


图6 粒子到下一位置点运动方向

Fig. 6 The direction of the particle to the next position

惩罚函数表示为

$$punish = \sum MN \quad x_i > x_{i+1} \text{ or } y_j > y_{j+1} \quad (6)$$

式(6)中,*M*和*N*分别为终点的横坐标和纵坐标。

最终确定粒子的适应度函数为

$$fitness = \frac{E}{l} + punish \quad (7)$$

文中所设计数学模型以带电作业进入等电位路径点的场强平均值作为目标函数,在此基础上加入方向惩罚函数,使得适应度函数的评价标准更高,从而搜索得到的最优路径更符合实际带电作业进入路径的规划要求。

3.2.3 更新粒子的速度和位置

确定适应度函数后,通过MATLAB软件来进行算法模拟,完成路径搜寻。首先在带电作业目标区域中初始化一群粒子并设置初始值,用位置、速度和适应度值3项指标考察该粒子特征,适应度值由适应度函数(即目标函数)确定,其数值大小代表粒子的优劣^[22-24]。设置参数种群规模*N*=150、最大迭代次数*T*_{max}=600、加速因子*c*₁=*c*₂=1.46;随机均匀设定种群中各粒子的初始位置*X*和初始速度*V*。同时为避免粒子出现盲目搜索或陷入局部最优解,一般将其速度限制在一定的区间[-*V*_{max}, *V*_{max}]、[*X*_{min}, *X*_{max}],设定为*V*_{max}=24, *X*_{min}=0, *X*_{max}=12。

通过算法随机给定初始*X*、*V*,根据目标函数*fitness*计算各粒子初始适应度值。根据适应度函数确定初始粒子适应度值,及粒子在初始位置处生成的带电作业路径上平均场强值,定为该粒子的初始个体极值*P*_{best0}和初始全局极值*G*_{best0}。例如,初始化后系统随机*V*₁₁=2、*X*₁₁=1时,由于初始运动路径为0,初始值*P*_{best0}=0、*G*_{best0}=0。

下一步进行速度、位置更新^[23-25]。在每次迭代

搜寻最优解过程中,粒子通过比较个体极值 P_{best} 和全局极值 G_{best} 的适应度值来更新自身速度和位置,速度和位置更新公式为

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \quad (8)$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \quad (9)$$

$$\omega(k) = \omega_{\text{start}} - (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \left(\frac{k}{T_{\text{max}}} \right)^2 \quad (10)$$

式(8)-(10):中, X_i 为第 i 个粒子的位置; ω 为粒子的惯性权重,通过改变 ω 可增强其局部搜索能力; T_{max} 为最大迭代次数,取 $T_{\text{max}}=600$; 惯性权重初始值 $\omega_{\text{max}}=0.9$, 惯性权重终止值 $\omega_{\text{min}}=0.4$; $d=1,2,\dots,D$; $i=1,2,\dots,n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为第 i 个粒子的速度; c_1 和 c_2 是加速因子,为非负常数; r_1 和 r_2 是分布于 $[0,1]$ 区间的随机自然数。 P_{id} 表示第 i 个变量的个体极值,即在当前路径过程中第 i 点时适应度函数值; P_{gd} 表示全局最优解,即采用当前搜寻方案作为带电作业路径时适应度函数值。

根据式(6)、(8)、(9)更新粒子速度的同时需要计算对新位置处粒子的个体极值 P'_{best} (粒子 X_i^k 到 X_i^{k+1} 位置的平均场强值),以及全局极值 G'_{best} (从起点运动到 X_i^{k+1} 位置的路径平均场强)。计算新种群中各粒子适应度值,将每个粒子当前适应度值与历史最优适应度值进行对比,若当前计算所得到的粒子适应度值 P'_{best} 小于历史最优值 P_{best} ,则更新其历史最优值 P_{best} 为当前适应度值;将每个粒子当前适应度值 G'_{best} 与全局最优适应度值 G_{best} 进行对比,若当前粒子适应度值 G'_{best} 小于全局最优值 G_{best} ,则用当前适应度值更新全局最优值 G_{best} [24-25]。所有数据信息更新后将迭代次数 $k=k+1$ 。例如,初始处粒子数据更新为 $V_{12}^1=0.9 \times 2+0=1.8$, $X_{12}^1=1+1.8=2.8$,由此可以得到 $P_{\text{best}}=5.714\ 285$, $G_{\text{best}}=5.714\ 285$ (注:初次迭代初始所得 P 、 G 数值相同,完成初始迭代路径数据后,按照迭代规则更新),同时更新 $\omega(1)=0.9-(0.9-0.4) \times (1/600)^2=0.899\ 998\ 61$, $k=2$ 。

若此时迭代次数 k 小于设定值 T_{max} ,即 $k<600$,则再次更新粒子的速度和位置,重复进行适应度值计算;否则迭代结束,算法输出最优解,及本次运动粒子所形成的路径为使得带电作业路径上平均场强值最小的路线。

3.3 仿真结果及分析

试验过程以前期建立栅格环境模型数据为基础展开,通过粒子运动路径等效带电作业路径,在计算过程中随着迭代次数 k 的不断加,动态惯性权重呈非线性减小趋势,由 0.9 减小至 0.4。将数据导出,PSO 算法收敛情况的示意图见图 7。在 $T=600$ 次

迭代计算过程中,当 $k=450$ 时,迭代搜索到第一个最优路径,随后不断跳出局部最优解;在 $k=500$ 时,再次搜索到最优路径,其后适应度值保持不变,因此判定本次输出结果为最优,其最优目标函数值为 47.2 kV/m,最优解对应的路径长度为 16.02 m。

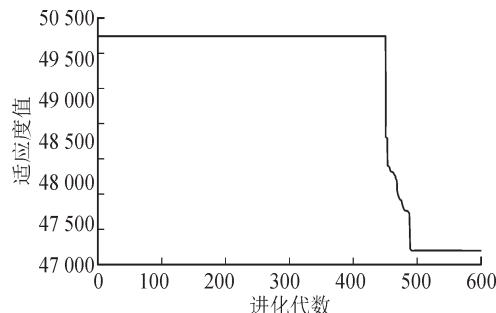


图7 PSO算法收敛示意图

Fig. 7 Schematic diagram of PSO algorithm convergence

采用 PSO 算法求得的最优路径见图 8。当带电作业人员按照图上所示路径进入等电位时,人体体表平均场强最小,即安全性最高。所设计路径寻优模型不仅考虑到空间各计算点场强大小,还考虑了带电作业路径的长度,利用粒子群优化算法合理设置求解参数,在局部搜索寻找最佳位置点的同时,兼顾全局优化找到最优路径。

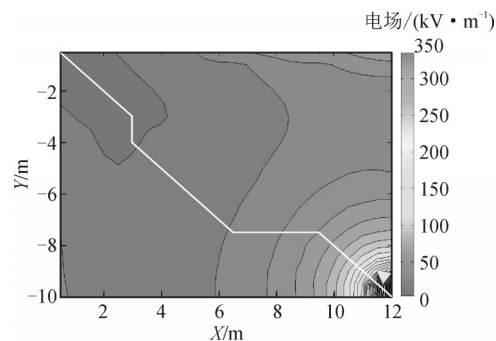


图8 进入等电位最优路径图

Fig. 8 Enter the equipotential optimal path map

4 现场实验

4.1 冲击放电试验

为验证前文求解路径的安全性,文中对带电作业进入等电位优化路径典型位置点进行操作冲击校验。试验在某特高压户外试验场进行,模拟试验塔根据 SK301 下横担实际尺寸按 1:1 搭建而成,见图 9。绝缘子串型和模拟分裂导线与实际参数相同;模拟人全身套上屏蔽服,从横担出发,采用塔上吊篮法按图 8 所示轨迹进入等电位,选取轨迹 4 个典型位置点,进行操作冲击放电试验得到 50% 放电电压 U_{50} ,计算各位置点绝缘损坏危险率 R_0 ,并比较分析是否满足 GB/T 18037—2000 中带电作业危险率应

小于 1.0×10^{-5} 的要求。

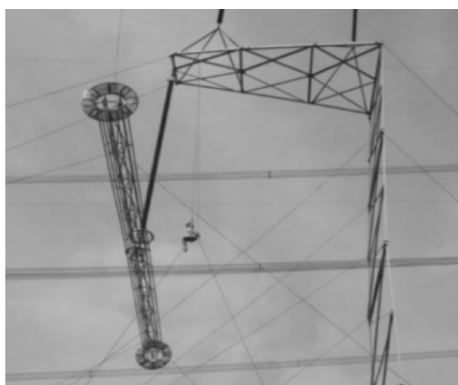


图9 现场试验环境

Fig. 9 Field test environment

4.2 数据分析

试验中放电路径为带电体—模拟人—塔身,操作冲击电压波形为 $250/2\ 500\ \mu\text{s}$ 。试验位置点根据图8路径轨迹选取4个典型位置,其坐标分别为位置1(11, -9)、位置2(9.5, -7.5)、位置3(6.5, -7.5)、位置4(4, -5)。试验结果见表2。从表2可以看出,优化路径中典型位置点均满足绝缘损坏危险率的要求,能够保证带电作业人员的人身安全。

表2 带电作业进入等电位路径安全性校验结果

Table 2 Test results of electrification work entering equipotential path safety

试验点	位置1	位置2	位置3	位置4
间隙距离/m	10.05	9.60	10.47	11.67
U_{50}/kV	2 051	2 006	2 091	2 199
危险率	9.24×10^{-8}	2.96×10^{-7}	3.16×10^{-8}	1.63×10^{-9}

5 结论

针对淮—上线 $1\ 000\ \text{kV}$ 特高压交流输电线路带电作业进入等电位路径进行研究,利用有限元数值计算方法得到作业人员进出等电位过程中的体表场强动态分布,并结合粒子群优化算法设计得到吊篮法进出等电位的最优路径,得出以下结论:

1)特高压交流直线塔带电作业处于站姿等电位状态时人体表面场强最大场强约为 $2\ 468\ \text{kV/m}$,坐姿等电位电工体表场强要低于站立前伸式,建议等电位作业时作业人员控制头部不超过导线侧均压环高度,尽量降低重心进行作业检修。

2)作业人员进入等电位过程中空间场强逐渐增大,人体体表场强也逐渐增大,且越靠近导线的位置场强增幅越大。

3)提出带电作业路径优化方法,并对优化路径进行现场试验,验证了 PSO 算法在选取带电作业最优路径问题上的可行性。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京:中国经济出版社,2005.
LIU Zhenya. Innovation on UHV AC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 567-574.
- [2] 舒印彪,胡毅. 特高压交流输电线路的运行维护与带电作业[J]. 高电压技术,2007,33(6):1-4.
SHU Yinbiao, HU Yi. Maintenance and live working technology for ultra high voltage transmission line high voltage engineering[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 1-4.
- [3] 胡毅,刘凯,刘庭,等. 超/特高压交直流输电线路带电作业[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1809-1820.
HU Yi, LIU Kai, LIU Ting, et al. Live working on EHV/UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1809-1820.
- [4] 苏梓铭,彭勇,刘凯,等. $1\ 000\ \text{kV}$ 与 $500\ \text{kV}$ 交流同塔四回线路带电作业电场防护仿真计算分析[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 78-83.
SU Ziming, PENG Yong, LIU Kai, et al. Simulation analysis of electric field protection for live-working on $1\ 000\ \text{kV}$ and $500\ \text{kV}$ AC four-circuit transmission lines on one tower [J]. Electric Power, 2014, 47(2): 78-83.
- [5] 胡毅,胡建勋,刘凯,等. 特高压交直流线路带电作业人员的体表场强[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):13-18.
HU Yi, HU Jianxun, LIU Kai, et al. Field strength of body surface during the live working on the UHV AC and DC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 13-18.
- [6] LOVRENCIC V, GOMISCEK B. Live working as an example of electrical installation maintenance with the zero accidents philosophy[C]//International Conference on Live Maintenance. [S.l.]:IEEE, 2014:1-8.
- [7] 李敏,毕斌,王大鹏,等. $1\ 000\ \text{kV}$ 河泉线输电线路带电作业安全防护研究[J]. 山东电力技术, 2017, 44(2): 7-10, 19.
LI Min, BI Bin, WANG Dapeng, et al. Research on safe protection of live working for $1\ 000\ \text{kV}$ hequan transmission line[J]. Electric Power Technology, 2017, 44(2): 7-10, 19.
- [8] LI H R. A summary of the live-line work on $500\ \text{kV}$ transmission lines in China[J]. Electricity, 1992(4): 50-56.
- [9] 肖勇,樊灵孟. 云广 $\pm 800\ \text{kV}$ 特高压直流线路带电作业分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2206-2211.
XIAO Yong, FAN Lingmeng, Analysis of live working on Yun-Guang $\pm 800\ \text{kV}$ DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2206-2211.
- [10] 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.
- [11] ZHANG C J, ZENG R, ZHANG B, et al. The optimization of entering route for live working on 750 kV transmission towers by space electric-field analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 783-792.
- [12] 范建斌, 廖蔚明, 李庆峰, 等. ± 800 kV 直流输电线路带电作业方式的试验研究[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 7-12. FAN Jianbin, LIAO Weiming, LI Qinfeng, Experimental research on live-line operation for ± 800 kV DC transmission line[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(7):7-12.
- [13] LIAO C B, RUAN J J, LIU C, et al. Helicopter live-line work on 1 000 kV UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):982-989.
- [14] 张亚迪, 车 彬, 邱中华, 等. 基于人员体表场强的 ± 800 kV 特高压直流线路带电作业进入等电位的途径研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1-6. ZHANG Yadi, CHE Bin, QIU Zhonghua, et al. Research of entering path for live work on ± 800 kV UHV DC transmission lines by body surface electric field strength[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1-6.
- [15] 1 000 kV 带电作业用屏蔽服装:GB/T 25726—2010[S]. 2010. Shielded clothing for 1 000 kV live working: GB/T 25726—2010[S]. 2010.
- [16] CHUANG L Y, YANG C H, LI J C. Chaotic maps based on binary particle swarm optimization for feature selection [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(1): 239-248.
- [17] 袁建生, 鞠 勇, 邹 军, 等. 特高压直流输电线路屏蔽环三维有限元电场计算方法与策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10):7-13. YUAN Jiansheng, JU Yong, ZOU Jun, et al. Methodology and strategy on the calculation of 3D electric field on shielding rings of UHV DC transmission lines[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10):7-13.
- [18] 李 庆. 1 000 kV 特高压交流输电线路绝缘子电位分布计算及均压环优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. LI Qing. Numerical computation of potential distribution and optimization design of grading ring of A 1 000 kV UHV AC line insulator string[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [19] 张宇娇, 徐彬昭, 徐天勇. 基于RBF—GA算法的特高压线路复合绝缘子均压环优化[J]. 高压电器, 2015, 51(12):19-24. ZHANG Yujiao, XU Binzhao, XU Tianyong, Optimization design for grading ring of composite insulators in UHV transmission lines based on RBF-GA[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 19-24.
- [20] 张宇娇, 秦威南, 刘文俊. 基于耦合场数值计算的电抗器通风结构改进[J]. 高压电器, 2014, 50(8):62-67. ZHANG Yujiao, QIN Weinan, LIU Wenjun, Ventilation structure improvement of reactor based on coupled field numerical analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 62-67.
- [21] 电力安全工作规程—电力线路部分: GB 26860—2011 [S]. 2011. Electrical safety work procedures—power line section: GB 26860—2011[S]. 2011.
- [22] 赵玉静. 改进的粒子群优化算法及其应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011. ZHAO Yujing. A modified particle swarm optimization algorithm and its application[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [23] 张万绪, 张向兰, 李 莹. 基于改进粒子群算法的智能机器人路径规划[J]. 计算机应用, 2014, 34(2): 510-513. ZHANG Wanxu, ZHANG Xianglan, LI Ying. Path planning for intelligent robots based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Applications, 2014, 34(2): 510-513.
- [24] 祖 伟, 李 刚, 齐正霞. 基于改进粒子群算法的路径规划方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(4): 68-70. ZU Wei, LI Gang, QI Zhengxia. Study on a path planning method based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(4): 68-70.
- [25] 王 伟. 湖南省绿色建筑适宜技术选用及星级预测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018. WANG Wei. Study on technology sections analysis and star level prediction of green building in hunan provence[D]. Changsha: Huan University, 2018.

张宇娇(1978—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为输电线路先进设计、施工与智能运维。

陈嫣冉(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路智能运输。

智 李(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为输电线路智能运维(通讯作者)。