

考虑人体放电附着点的带电作业组合间隙击穿电压预测研究

刘 凯^{1,2}, 张雨秋^{1,3}, 邱中华⁴, 彭 勇², 刘 庭², 肖 宾²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国电力科学研究院有限公司电网环境保护国家重点实验室, 武汉 430072; 3. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 国网四川省电力公司超高压分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 空气间隙的击穿电压是超/特高压输电线路带电作业安全防护的关键因素。针对等电位作业间隙放电路径受等电位作业人员的站位与姿势影响而影响击穿电压问题, 文中聚焦复合横担带电作业提出了一种考虑人员站位姿态及放电附着点的击穿电压预测方法。基于先导放电模型, 建立了考虑等电位人体的带电作业间隙放电附着点模型, 并分析了不同姿态下人体体表的放电附着概率; 将间隙结构和电场分布等特征量作为支持向量机 (support vector machine, SVM) 的输入量, 以间隙是否击穿作为输出量, 建立了击穿电压预测模型。通过该模型对复合横担等电位作业间隙的正极性操作冲击 50% 放电电压进行了预测, 预测值与试验值相吻合。文中方法可准确地表征作业人员的姿态与站位对组合间隙绝缘强度的影响, 为等电位人体一杆塔间隙击穿电压的获取提供了一种新途径, 有望在实际应用中提高带电作业的安全性。

关键词: 带电作业; 组合间隙; 放电附着点; 击穿电压; 人体姿势; 支持向量机; 电压预测; 机器学习

Study on Predicting Breakdown Voltage of Combination Gap in Live Working Considering Human Body Discharge Attachment Points

LIU Kai^{1,2}, ZHANG Yuqiu^{1,3}, QIU Zhonghua⁴, PENG Yong², LIU Ting², XIAO Bin²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430000, China; 3. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 4. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Sichuan 610041, China)

Abstract: the breakdown voltage of air gap plays a crucial role in the safety protection of live working on uhv/ehv transmission lines. regarding the issue that the discharge path of the equipotential operation gap is affected by the position and posture of the equipotential operation personnel, and thus influences the breakdown voltage, this paper focuses on the composite cross-arm live working and proposes a breakdown voltage prediction method that takes into account the personnel's position and posture as well as the discharge attachment point. based on the leader discharge theory, the model of discharge attachment points of live working gap considering equipotential human body is established, and the probability of discharge attachment on human body surface under different postures is analyzed. the characteristic quantities, such as gap structure and electric field distribution are input for the support vector machine (svm), and whether the breakdown of the gap is considered as the output, and the breakdown voltage prediction model is established. the model predicted the 50% discharge voltage of the positive switching impulse of the equipotential working gap of the composite cross arm, and the prediction matched the experimental value. the method in this paper accurately characterizes the insulation strength of the combined gap, offering a new approach to determine the breakdown voltage of the human-tower equipotential gap.

key words: live working; combination gap; discharge attachment; breakdown voltage; human body posture; svm; voltage prediction; machine learning

0 引言

带电作业是电网设备检修维护的关键技术手段, 对确保输电线路的稳定运行发挥了重要作用^[1]。

实施带电作业时, 通常采用等电位作业方式^[2], 然而在进出等电位时, 人员侵入杆塔间隙后的体位姿态和空间位置会改变带电作业组合间隙结构, 从而

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51807110)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51807110).

影响作业间隙的绝缘性能,增加了击穿放电的风险,可能引发严重的安全问题^[3]。因此,确定满足输电线路带电作业的最小安全距离,对于保障作业人员生命安全以及保证带电作业顺利进行至关重要。

目前最小安全距离主要采用通过 1:1 真型塔放电试验获得间隙的击穿电压,结合过电压水平来确定^[4-6]。近年来,为了压缩线路廊道和提升特殊场景下的性能,输电线路的结构和布置呈现多样化,出现了各种电压等级的同塔多回、紧凑型、复合横担等输电线路,针对这些新型线路的带电作业间隙,国内开展了大量真型试验研究^[7-9]。然而真型试验存在着成本高、周期长、布置不灵活等局限性,且忽略了放电发展过程,缺乏有效的理论支撑。

针对试验的不足,国内外学者对放电机理和仿真模型进行了探索研究,在试验前预测空气间隙的击穿电压以减少试验工作量^[10-15]。目前,空气间隙击穿电压的预测方法主要有经验公式法、物理模型法和机器学习法。经验公式法在对放电机理进行简化假设的基础上,对放电电压的解析公式展开推导。Lemke 等人提出了流注—先导压降法,推导了由流注压降和先导压降构成的放电电压计算公式^[11]。这类方法仅适用于实验室条件,实际工程中的计算值误差较大;物理模型法通过分阶段划分放电发展过程,于试验和理论计算中获取各阶段的关键物理参数,进而分析完整的放电发展过程。Gallimberti 等人研究了放电发展过程中产生的空间电荷对间隙电位分布的影响,建立了从电晕起始到间隙击穿的先导传播物理模型^[12-13]。此类方法受放电过程随机性影响,且目前长间隙放电的物理机制尚不完善,难以得到准确结果;机器学习法通过合理选取放电前与放电电压相关联的特征集对击穿电压进行预测。Ruiz 等人通过测量棒—板间隙在负极性冲击电压下的极间电流等参数,基于神经网络分析了这些物理

量和间隙击穿特性之间的关联性,并对击穿电压进行了预测^[14]。近年来,支持向量机(SVM)算法凭借其低样本数据量要求的特点,在间隙击穿电压预测方面的研究中应用较多,舒胜文等人提出了通过电场特征表征间隙结构的方法,并基于 SVM 实现了球隙及棒—板等典型间隙结构的工频击穿电压预测^[15-16]。邱志斌等人在充分考虑间隙结构、电压波形和大气参数的基础上,以电场储能和电极结构特征为输入,基于 SVM 对包括输电线路间隙在内的多种空气间隙击穿电压进行了预测^[17]。上述基于机器学习算法的研究通过建立放电前电场特征与击穿电压的灰色关联,对典型间隙结构击穿电压的预测具有较高准确度,但不能直接应用于等电位作业间隙。由于开展作业时,人体的介入改变了原有导线—杆塔构架的间隙长度和电极结构,导致对间隙结构和电场特征的表征更加困难。因此,亟需建立一种适用于等电位作业间隙击穿电压的预测方法。

等电位工况下,作业人员与带电体一同形成了高压电极,使得从常规的几何角度出发将难以对间隙结构进行合理的表征。相较于球隙、棒—板等典型间隙结构,等电位作业间隙下的放电容易发生在人体表面,可能出现在头、手、膝盖以及脚等不同尖端部位^[18-19],放电附着点与人体在间隙中的位置姿态有关,与空气间隙的击穿电压密切相关。为此,文中提出了一种考虑放电附着点的间隙击穿电压预测方法。基于先导放电理论计算了人体各部位稳定先导所需的背景电场 E_{stab} ,背景电场 E_{stab} 是指在输电线路带电作业中,由线路运行电压、作业间距、塔型结构等条件共同决定的空间电场,并分析了不同姿态下人体各部位放电附着的概率;采用 E_{stab} 、结构系数 T_g 、曲率半径 R 来表征间隙的几何结构,将间隙结构和电场分布等特征量作为 SVM 的输入,以间隙是否击穿作为输出,建立了击穿电压预测模

型；使用该模型对等电位工况下人体各部位与塔身间隙的正极性操作冲击 50%放电电压进行了预测，并根据放电附着概率分布对击穿电压值加权平均，最后引入试验数据对准确性进行了验证，预测值与试验值相符。文中为等电位作业人体一杆塔构架间隙击穿电压的获取提供了一种新途径，可准确表征组合间隙的实际绝缘强度，为后续试验提供良好的依据。

1 考虑附着点的组合间隙放电电压预测模型

1.1 放电附着点相关理论

1.1.1 先导发展理论

进出等电位时，在强电场作用下，作业人员体表的尖端部位将聚集大量自由电荷，使这些部位附近的空气产生强烈畸变。局部空气介质在畸变电场作用下电离过程加剧，产生由人体始发的先导，当外电场持续增强，先导头部流注区域在空气间隙内部不断延伸发展，最终在导线与人体间建立贯通的电离通道，产生激烈的放电现象^[20]，而人员体表的放电附着点主要取决于稳定先导的始发位置。

文中参考 Cooray-Becerra 先导模型^[21]，模拟人体尖端部位始发的先导发展过程，其中涉及的求解公式和变量可参见文献^[22]。先导发展模型及先导发展计算流程分别见图 1、2。图 1、2 中 U 代表电位， l 表示先导通道的长度(即先导发展的距离)。图 1 中实线是“近似为直线的 $U-l$ ”是先导放电的核心，先导头部电位 U 随通道长度 l 近似线性上升。

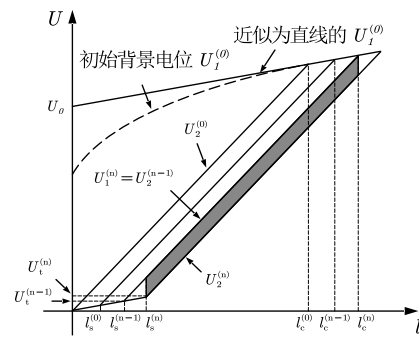


图 1 先导发展模型

Fig. 1 Leader progression model

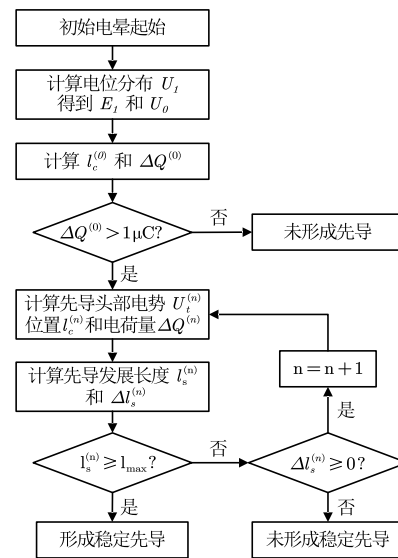


图 2 计算流程图

Fig. 2 Calculation flowchart

若迭代过程中先导发展长度出现了负增长，则视为未形成稳定先导；若不稳定先导发展距离 l_s 达到临界长度 l_{max} ，则视为稳定的先导起始。为确保稳定先导的形成足以建立起放电通道，文中取先导在人体部位与导线间的最大传播距离作为稳定先导临界长度。

1.1.2 放电附着点计算方法

复合横担杆塔中开展带电作业与常规塔型存在较大不同，组合间隙的放电特性尚不明确，为突出本研究的先进性，以复合横担带电作业工况为例，选取沿复合横担表面进入等电位时，常见的站立和跨坐姿态建立人体计算模型，如图 3 中的工况 a 和工况 b。

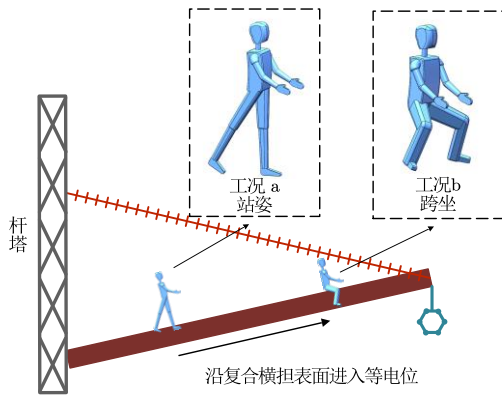


图3 沿复合横担表面进入等电位示意图

Fig. 3 Enter equipotential along composite crossarm surface

当作业人员靠近导线时, 人体尖端部位会引起空间电场的强烈畸变^[23], 易产生放电附着, 因此选取人体的头部、手部、膝关节、脚部作为计算点。

以人体各部位附近的初始电位分布作为放电附着点计算的输入变量。为确定导线附近区域满足先导放电起始条件的空间电场范围, 采用平均电场判据: 计算导线与人体之间的平均电位梯度 E_{av} , 当人体周围的 E_{av} 达到稳定流注起始所需的电位梯度均值 E_{str} 时, 则判定该区域内满足稳定先导放电起始条件。

$$E_{av} = \frac{U_{con} - U_1}{l} \quad (1)$$

式(1)中: U_{con} 为导线电位; U_1 为人体电位; l 为人体与导线的距离。

对导线施加电压, 从人体尖端部位始发的正极性先导在传播过程不断延伸, 当其头部流注区与带电体相连时, 将在空气间隙中建立完整的放电通道, 可认为人体表面的放电附着点形成, 正极性先导起始的位置即为放电附着位置^[24]。以工况 a 为例, 将人体置于距离横担端部带电体 1 m 的位置, 设定导线端电压, 开始迭代计算, 每次迭代判断先导传播距离能否达到当前计算点到导线间的最大传播距离, 即临界长度 l_{max} , 若未达到, 则下一次迭代时提高导线电位, 直到计算出人体表面各计算点稳定

先导起始所需的最小背景电场 E_{stab} 。

人体体表放电附着概率的计算采用相对数值法^[25]: 假设稳定先导起始所需背景电场 E_{stab} 的最小部位发生放电附着的概率为 100%, 则其他部位发生放电附着的概率为该部位 E_{stab} 与体表最小 E_{stab} 的比值。

经计算得到两种工况下人体表面各计算点初始放电附着概率, 见图 4。对比两种姿态的初始放电附着概率可以看出, 作业人员采取跨坐姿态体表各部位放电附着概率相对较大。表明在相同的背景电场下, 采取跨坐姿态更易发生放电现象。这是由于人体采取跨坐姿态整体表现出更小的等效曲率半径, 加剧了附近空间电场的畸变, 更易发生放电附着。曲率半径 R 的通用公式见式(2), 简化计算方法见式(3)。式(3)为球形物体、圆柱形物体的曲率半径计算方法。

$$R = \frac{1}{k} \quad (2)$$

$$R = r \quad (3)$$

式(2)、(3)中: k 为曲率; r 为球体、圆柱半径 (如人体模型的头部、手臂)。

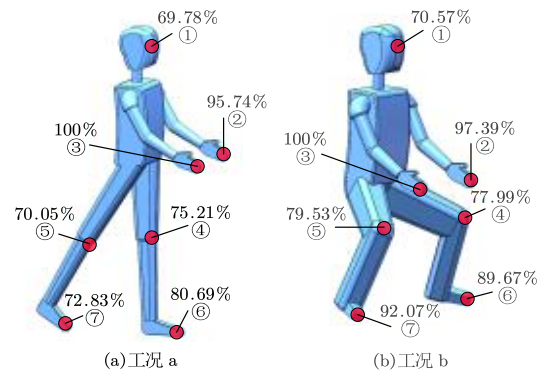


图4 放电附着点计算结果

Fig. 4 Computation of discharge attachment point

1.2 特征选取

根据前文所述, 等电位作业过程中人体改变了带电体附近的电场分布, 组合间隙中初始放电易附

着于人体尖端部位，击穿电压与人员体表的初始放电附着点密切相关。为此，文中使用几何结构和电场分布两方面的参数共同构建特征集。

组合间隙的几何结构是与放电表现强相关联的参数，包括间隙长度和电极结构。典型的球型、棒型、板型等空气间隙电极结构可以用长度或曲率半径等参数表示，但由于人体与导线构成的高压电极结构较为复杂，使用简单的几何等效参数将难以得到准确的计算结果。根据先导发展模型以及人体放电附着点的计算结果，人体表面的稳定先导起始背景电场 E_{stab} 准确反映了放电附着的难易程度。因此可以引入稳定先导起始电场 E_{stab} 、曲率半径 R 、放电附着点到塔身之间的最短放电路径 l 共同作为高压电极几何结构的表征。对于接地杆塔构架的表征则引入结构系数 $T_g^{[19]}$ 。

$$T_g = \frac{U_{ib}}{U_{ibo}} \quad (4)$$

式(4)中： U_{ibo} 是棒—板间隙结构稳定先导临界电荷在先导头部的感应电压绝对值； U_{ib} 是不同杆塔构架感应电荷在先导头部感应电压的绝对值。

$$U_{ibo} = \frac{q_{cr} \times L}{2\varepsilon_0 \times d^2} \times \left(\ln \frac{2d}{r_0} - 1 \right) \quad (5)$$

式(5)中： q_{cr} 为棒—板间隙稳定先导临界电荷； L 为先导通道长度； ε_0 为真空介电常数； d 为棒—板间隙距离； r_0 为先导通道半径。

$$U_{ib} = \sum_{i=1}^n \frac{q_{gi} \times L_i}{4\pi\varepsilon_0 \times D_{i-h}} \quad (6)$$

式(6)中： q_{gi} 为第 i 个杆塔构件的感应电荷； L_i 为第 i 个杆塔构件的有效长度； D_{i-h} 为第 i 个杆塔构件到先导头部的直线距离； n 为参与感应杆塔构件数量。

组合间隙的电场分布特征对放电发展过程有着显著影响，也是空气间隙击穿电压的强相关量^[15]。以复合横担等电位作业为例，作业人员与塔身间的空气间隙见图 5。放电起始后，受电晕电荷和先导通道电荷对空间电场的畸变影响，不同放电过程中的电场分布均存在差异，电场特征参数难以提取。因此需要建立放电发生之前的组合间隙空间电场特征参数与击穿电压之间的灰关联性。

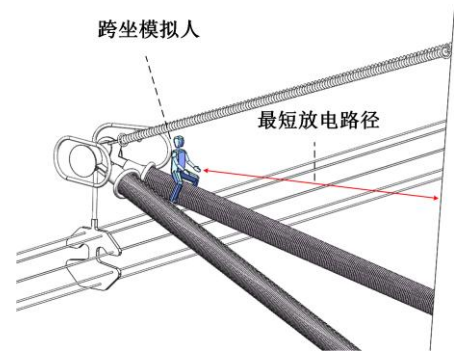


图 5 最短放电路径示意图

Fig. 5 The shortest discharge path diagram

当电极结构一定时，多次放电通道基本出现在最短放电路径上。文中为简化样本特征结构，使用放电发生前最短放电路径的电场强度和均匀度对电场分布进行表征，定义参数如下。

1)最短放电路径上场强最大值 E_m 和平均值 E_a ：

$$E_m = \max(E_i), i = 1, 2, L, m \quad (7)$$

$$E_a = \sum_i^m E_i / m, i = 1, 2, L, m \quad (8)$$

2)最短放电路径上场强超过 $75\%E_m$ 和 $25\%E_a$ 所占的长度比例

$$E'_{75} = \frac{L_{75\%E_m}}{L} \quad (9)$$

$$E'_{25} = \frac{L_{25\%E_a}}{L} \quad (10)$$

综上，特征样本的构成为

$$(l, E_{stab}, R, T_g, E_m, E_a, E'_{75}, E'_{25}, U_b) \quad (11)$$

1.3 击穿电压预测流程

文中选用 SVM 这一针对小样本高维度数据具有较好泛化性能的机器学习算法^[26]，来预测间隙击

穿电压。采用网格搜索算法(grid search, GS)对 SVM 参数进行寻优。

为了验证 SVM 模型的性能,使用了 3 个标准误差指标来分析预测的准确性:均方根误差(RMSE)、平均绝对百分误差(MAPE)以及均方百分误差(MSPE)。这些指标的计算公式在文献^[15]中有具体说明,文中将着重考虑人体站位姿态及放电附着点的电压预测。

文中提出的考虑放电附着点的等电位作业间隙击穿电压预测方法的流程见图 6。

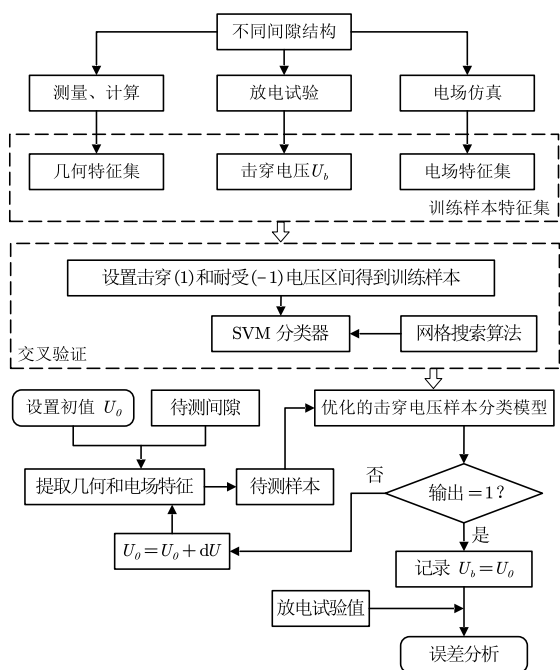


图 6 击穿电压预测流程图

Fig. 6 Breakdown voltage prediction flow chart

2 等电位作业空气间隙击穿电压预测

2.1 训练样本构建

训练样本数据引用文[5-8, 19]中不同类型杆塔带电作业的放电试验及计算结果,间隙结构数据见表 1。不考虑电压波形特征和大气参数特征的影响,采用标准大气条件下的操作冲击电压波形预测击穿电压,最后根据实际环境条件进行系数修正。文中选用的训练样本数据均已修正至标准条件。

表 1 训练样本数据来源

Table 1 Training sample data sources

试验间隙结构	间隙长度/m
750 kV 六分裂导线+人体—酒杯塔窗	3.5~5.6
750 kV 六分裂导线+人体—边相塔身	3.1~4.5
1 000 kV 八分裂导线+人体—猫头塔窗	5.0~7.0
1 000 kV 八分裂导线+人体—边相塔身	4.6~6.5
1 000 kV 十二分裂导线+人体—猫头塔窗	6.5~8.5
1 000 kV 十二分裂导线+人体—导线	6.5~8.5

按照训练样本中的试验结构建立了三维仿真模型,用于计算样本电场数据集。仿真计算中通过调整人体和导线相对于构架的位置来模拟试验中的工况。如图 7(a)、(b)所示,将人体以坐姿固定于酒杯塔窗的导线附近,分别模拟人体头部和脚部与塔窗形成的最短放电路径;图 7(c)为人体脚部与边相塔身最短放电路径仿真模型;图 7(d)为人体位于紧凑型猫头塔窗内部的三种最短放电路径。

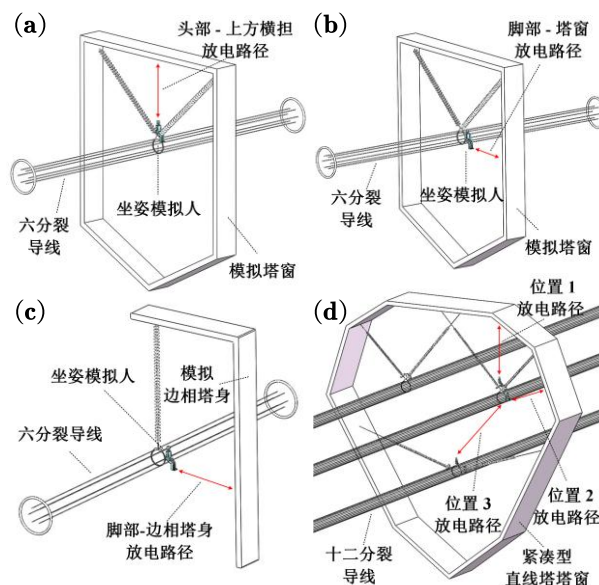


图 7 仿真模型示意图

Fig. 7 Simulation model diagram

计算并整理得到训练样本的结构特征数据集,见表 2。表 2 中: E_{stab} 和 R 分别通过文中物理模型和实际测量得到,用于表征高压电极结构(人体+导线); T_g 与构架宽度、构架布置方式、间隙长度等因素有关,用于表征塔身类型的影响。采用文[17]中的方法对每一个样本进行分类和扩充,得到最终的训练样本,见表 3。

表 2 部分间隙结构特征数据集

Table 2 Partial gap structure characteristics data set

编号	放电部位	l/m	$E_{stab}/(kV\ m^{-1})$	R/m	T_g	U_b/kV
1	头部	4.4	410.3	0.24	1.32	1 348
2	头部	4.8	410.3	0.24	1.30	1 430
3	头部	5.2	410.3	0.24	1.28	1 543
4	头部	5.6	410.3	0.24	1.27	1 638
5	脚部	3.5	329.5	0.19	1.38	1 352
6	脚部	4.2	329.5	0.19	1.33	1 496
7	脚部	4.5	329.5	0.19	1.32	1 575
8	脚部	5.0	329.5	0.19	1.29	1 636
9	手部	3.0	276.4	0.18	1.41	1 219
10	手部	4.0	276.4	0.18	1.34	1 424
...

表3 部分电场特征扩充数据集

Table 3 Part of the electric field characteristics expand the data set

编号	αU_b	$E_m/(kV\ m^{-1})$	$E_d/(kV\ m^{-1})$	$E_{75}/\%$	$E_{25}/\%$	耐受/击穿
1	944	3 052.8	645.5	0.64	4.62	耐受
	1 078	3 486.2	737.1	0.64	4.62	耐受
	1 213	3 922.7	829.4	0.64	4.62	耐受
	1 483	4 792.9	1 014.1	0.64	4.62	击穿
	1 618	5 232.5	1 106.4	0.64	4.62	击穿
	1 752	5 665.8	1 198.0	0.64	4.62	击穿
5	946	3 397.1	702.3	0.39	3.91	耐受
	1 082	3 885.4	803.2	0.39	3.91	耐受
	1 217	4 370.2	903.4	0.39	3.91	耐受
	1 487	5 340.8	1 103.9	0.39	3.91	击穿
	1 622	5 824.6	1 204.1	0.39	3.91	击穿
	1 757	6 309.3	1 304.3	0.39	3.91	击穿
...

2.2 预测结果

对复合横担等电位作业中不同的人体姿势分别进行了击穿电压预测，依次选取作业人员的手部、脚部、头部作为放电附着点。为表征空气间隙绝缘强度，引入了间隙系数，即给定空气间隙与正极性棒—板间隙 50%放电电压的比值，其数值主要取决于给定的间隙几何结构。文中间隙系数的计算采用了 IEC60071-2: 2023 推荐的空气间隙缓波前过电压绝缘特性经验公式

$$U_{50} = 500Kd^{0.6} \quad (12)$$

式(12)中， U_{50} 为操作冲击 50%放电电压； K 为组合间隙系数； d 为组合间隙距离。

2.2.1 等电位人员手部—塔身间隙

人员面向塔身，手部作为初始放电附着点，位于横担表面分别保持站立、坐姿以及骑跨坐姿，改变人体于塔身的距离，通过间隙击穿电压预测模型得到的计算结果见表 4。3 种姿态构成的间隙系数预测值分别为 1.18、1.21、1.23。

表4 手部作为放电附着点时的击穿电压 U_{50} 预测值

Table 4 The predicted breakdown voltage U_{50} when the hand is used as the discharge attachment point

间隙长度/m	站姿/kV	坐姿/kV	骑跨坐姿/kV
5.5	1 638.77	1 702.49	1 737.78
6.5	1 756.29	1 831.05	1 866.47
7.5	1 940.98	1 989.26	2 015.80
8.5	2 163.96	2 208.29	2 229.98
9.5	2 322.14	2 356.15	2 373.31
10.5	2 462.68	2 491.16	2 511.53

对比可知，等电位作业过程中人体姿态的改变对空气间隙击穿电压有显著影响。在间隙长度一定时，不同姿态击穿电压按照从高到低顺序为：骑跨坐姿>坐姿>站姿。当作业人员姿态一定时，随间隙长度的升高，击穿电压均匀增加，并且人体姿态对击穿电压的影响逐渐减小。

2.2.2 等电位人员脚部—塔身间隙

人员面向塔身，脚部作为初始放电附着点，改变人体与塔身距离，3 种姿态下的等电位作业间隙击穿电压预测结果见表 5。3 种姿态构成的间隙系数预测值分别为 1.20、1.19、1.28。

表5 脚部作为放电附着点时的击穿电压 U_{50} 预测值

Table 5 The predicted breakdown voltage U_{50} when the foot is used as the discharge attachment point

间隙长度/m	站姿/kV	坐姿/kV	骑跨坐姿/kV
5.5	1 723.66	1 683.48	1 832.44
6.5	1 885.48	1 853.96	2 004.20
7.5	1 997.20	1 994.52	2 159.81
8.5	2 211.68	2 161.90	2 328.08
9.5	2 241.57	2 224.41	2 402.87
10.5	2 376.22	2 367.98	2 557.01

相较于手部作为放电附着点，脚部作为放电附

着点时的间隙击穿电压预测值出现了升高，其原因是脚部的稳定先导背景电场 E_{stab} 高于手部，并且 E_{stab} 与组合间隙击穿电压表现为正相关。将不同人体姿态下的预测值进行对比得到，组合间隙击穿电压顺序为：骑跨姿态>站姿>坐姿。同时由于脚部所处空间位置随人体姿态变化幅度较大，3种姿态的击穿电压预测值呈现出较大的分散性。

2.2.3 等电位人员头部一塔身间隙

作业人员头部作为放电附着点时，改变人体一塔身间隙距离，3种姿态下带电作业间隙击穿电压预测结果见表6。3种姿态构成的等电位组合间隙系数预测值分别为1.31、1.23、1.26。

表6 头部作为放电附着点时的击穿电压 U_{50} 预测值
Table 6 The predicted breakdown voltage U_{50} when the head is used as the discharge attachment point

间隙长度/m	站姿/kV	坐姿/kV	骑跨坐姿/kV
5.5	1 865.21	1 739.68	1 792.44
6.5	1 995.01	1 857.10	1 919.94
7.5	2 160.43	2 015.39	2 076.42
8.5	2 389.01	2 229.30	2 297.84
9.5	2 502.24	2 348.73	2 404.95
10.5	2 668.67	2 536.31	2 603.53

相较于手部和脚部，头部作为初始放电附着点时组合间隙的击穿电压预测值出现了明显的升高，表明头部一塔身间隙不易发生击穿。这是由于头部具有较大的曲率半径以及较高的 E_{stab} 值，同时手部对头部形成了电场屏蔽。通过姿态之间对比得到，当距离一定时，3种姿态构成的组合间隙击穿电压排列顺序为：站姿>骑跨坐姿>坐姿。结合前文对放电附着概率的分析可以认为，手部对头部的电场屏蔽作用是姿态顺序改变的主要原因。作业人员手部抬起方向和角度一致的情况下，站姿相比坐姿放电更易集中于手部，降低了头部形成放电通道的概率。

2.2.4 各放电附着点击穿电压加权平均值

根据上述分析，当姿态一定时，放电附着点的

产生具有概率性，并且不同放电附着点的等电位作业间隙击穿电压有较大差异。因此计算组合间隙的击穿电压需要考虑放电初始附着的概率分布。文中根据前述人体各部位击穿预测结果，利用加权平均值计算了等电位作业间隙的击穿电压为

$$\overline{U}_{50} = \frac{\sum_{i=1}^n U_{50}(i) \cdot P_{at}(i)}{\sum_{i=1}^n P_{at}(i)} \quad (13)$$

式(13)中，权重为相应路径和姿态的人体各部位放电附着概率 P_{at} 。

通过加权平均值计算得到3种姿态击穿电压从高到低为：骑跨坐姿>站姿>坐姿，计算结果见图8。站姿、坐姿和骑跨坐姿的间隙系数分别为1.22、1.21、1.25。

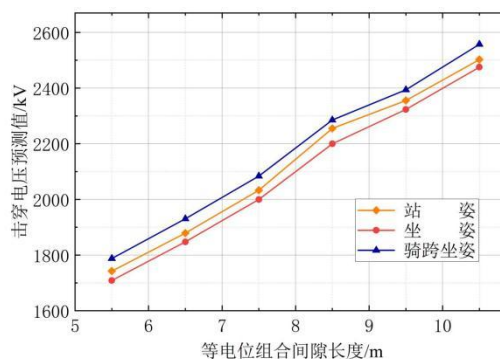


图8 击穿电压加权平均值

Fig. 8 The breakdown voltage after weighted average

2.3 人体姿态对最小安全距离的影响特性分析

不同电压等级的最高电压基本固定，因此可以根据求得的各放电附点击穿电压预测值结合带电作业最大操作过电压水平计算不同人体姿势下的最小安全距离。

以1000 kV特高压复合横担等电位作业为例，线路的最大运行电压为1100 kV，带电作业最大相地过电压为1.70 p.u.。根据经验公式(12)以及站姿、坐姿和骑跨坐姿的间隙系数计算得到的等电位人员与塔身的最小间隙距离见表7。

表 7 不同姿势下的最小安全距离

Table 7 The minimum safe distance under different postures

人体姿态	最小安全距离/m
站姿	6.5
坐姿	6.6
骑跨坐姿	6.2

由表 7 可知，在相同的背景电场条件下，等电位作业人员与塔身间的最小安全距离受人体姿态影响。对比 3 种姿态发现，骑坐于复合横担上的最小安全距离要求明显低于其他两种姿态。因此在开展特高压复合横担等电位作业时，作业人员在实际操作中应尽量选择骑跨坐姿，以提高安全性。

2.4 试验验证

为了验证 SVM 模型对特高压复合横担等电位作业间隙击穿电压预测的准确性，引入试验结果进行对比分析。中国电力科学院以 1 000 kV 特高压复合横担为研究对象，通过试验研究了其带电作业放电特性，试验现场见图 9。

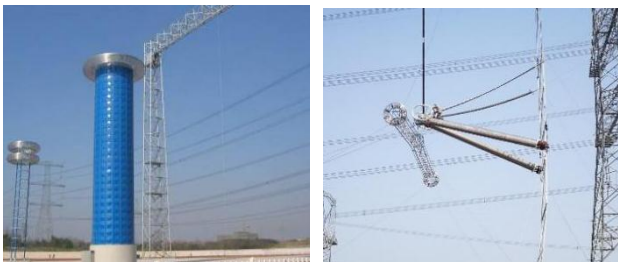


图 9 复合横担带电作业放电试验

Fig. 9 Discharge test of composite cross arm live working

2.4.1 试验条件

试验在特高压交流试验基地冲击户外场进行。试验设备有：7 500 kV 冲击电压发生器，7 500 kV 低阻尼串联阻容分压器；4 800 kV、527 kJ 冲击电压发生器；4 800 kV 低阻尼串联阻容分压器；64M 型峰值电压表；Tek TDS340 示波器。经校正，整个测量系统的总不确定度小于 3%。

试验中采用特高压交流复合横担样品的结构高度为 1.13 m，模拟导线长 20 m，两端装有 1.5 m 的

均压环，以改善端部电场分布。试验用模拟人由铝合金制成，与实际人体的形态及结构一致。模拟人站姿高 1.8 m，身宽 0.5 m。

2.4.2 试验结果与分析

等电位放电试验中，将模拟人置于复合横担高压端并使用金属导线与端部均压环连接，使人体始终保持等电位。为了避免试验中均压环等金具先于人体对塔身放电，将人体置于相比金具更靠近塔身的位置，此时构成的空气间隙为“等电位人体—塔身”间隙。然后对导线施加 250/2 500 μ s 标准操作冲击波进行放电试验，多次改变人体与塔身的距离，采用升降压法对每一个长度的空气间隙重复进行放电击穿，得到组合间隙 50% 击穿电压 U_{50} 见图 10。

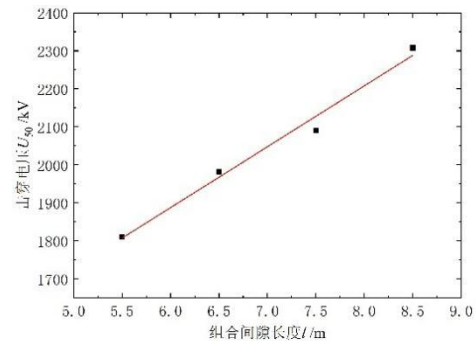


图 10 等电位作业组合间隙操作冲击放电特性曲线

Fig. 10 Operating impulse discharge characteristic curve of combined gap in equipotential operation

将等电位试验数据与 SVM 模型预测结果进行对比，采用 MSE、MAPE、MSPE 误差指标对每一工况下的击穿电压预测值进行分析，计算结果见表 8。从表 8 可以得到，当手部作为放电电极时，预测结果误差较大，MAPE 指标最大达到了 0.085。当头顶部作为放电电极时，预测结果的最大误差较小。从击穿电压各项误差指标的分散性可以看出，根据放电初始附着点的不同，预测结果会产生不同程度的偏差。如前文所述，由于放电初始附着位置和空气间隙的击穿电压具有一定的分散性，而预测模型在每次计算时假设放电附着点一定，击穿电压会根据

初始放电附着点条件的不同产生偏移, 从而使得单一放电附着位置的击穿电压预测结果难以表征组合间隙的实际绝缘强度。

表 8 不同组合间隙的击穿电压误差指标

Table 8 Breakdown voltage error index of different combination gap

间隙长度	人体姿态	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}
手部一塔身	站姿	87.76	0.085	0.044
手部一塔身	坐姿	58.33	0.057	0.029
手部一塔身	骑跨坐姿	43.41	0.042	0.021
脚部一塔身	站姿	47.20	0.046	0.023
脚部一塔身	坐姿	67.26	0.066	0.031
脚部一塔身	骑跨坐姿	10.58	0.010	0.001
头部一塔身	站姿	30.35	0.026	0.014
头部一塔身	坐姿	44.93	0.043	0.022
头部一塔身	骑跨坐姿	16.67	0.013	0.008

为此, 文中按照放电附着概率计算了击穿电压加权平均值, 得到的误差结果见表 9。通过对比得到, 击穿电压加权平均值有效降低了各放电附着点预测结果误差的分散性, 相比之下能够更准确的表征组合间隙的击穿难度。

表 9 击穿电压加权平均值误差指标

Table 9 The error index of breakdown voltage after weighted average

计算工况	e_{MSE}	e_{MAPE}	e_{MSPE}
站姿	46.88	0.045	0.019
坐姿	57.91	0.057	0.027
骑跨坐姿	17.11	0.016	0.008

综上所述, 考虑人体放电附着点概率分布特征的 SVM 模型对于等电位作业空气间隙击穿电压具有较高的预测精度, 根据放电附着点概率分布对击穿电压进行加权平均, 降低了预测误差的分散性, 能够准确表征组合间隙的实际绝缘强度。

3 结语

文中提出了一种考虑人员站位姿态及放电附着点的等电位作业间隙击穿电压预测方法。该方法依据先导放电理论求解了等电位作业工况下的人体放

电附着点, 采用 SVM 模型表征了放电附着点在内的间隙结构电场特征量和击穿电压间的多维非线性关系。对特高压复合横担等电位作业间隙击穿电压进行了预测, 结果表明初始放电附着点对组合间隙放电特性具有显著影响。开展 1 000 kV 特高压复合横担放电试验, 对比预测值与试验值相吻合。由于初始放电附着点的形成具有一定分散性, 文中采用均值计算击穿电压的方法能够更准确的表征组合间隙的实际绝缘强度。误差分析表明, 按照放电附着点概率分布对击穿电压进行加权平均, 能够降低误差分散性。

参考文献:

- [1] 翁志伟. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施探究[J]. 百科论坛电子杂志, 2024(21): 58-60.
WENG Zhiwei. Analysis of factors affecting the safety of transmission line operation and exploration of preventive measures[J]. Encyclopedic Forum, 2024(21): 58-60.
- [2] 邵开山, 张瑞博. 带电作业关键技术的应用与发展趋势[J]. 设备管理与维修, 2021(20): 77-79.
SHAO Kaishan, ZHANG Ruibo. Application and development trend of key technologies in live working[J]. Plant Maintenance Engineering, 2021(20): 77-79.
- [3] 陶留海, 孙超, 李雪奎, 等. ± 1 100 kV 特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(s1): 134-139.
TAO Lihai, SUN Chao, LI Xuekui, et al. Study on the practical technology for ± 1 100 kV UHVDC transmission line live working[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(s1): 134-139.
- [4] 胡毅, 王力农, 邵瑰玮, 等. 1 000 kV 级交流输电线路带电作业的试验研究[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 8-13.
HU Yi, WANG Linong, SHAO Guiwei, et al. Experimental investigation on live working for 1 000 kV AC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 8-13.
- [5] 王力农, 胡毅, 邵瑰玮, 等. 1 000 kV 输电线路带电作业安全距离研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 78-82.
WANG Linong, HU Yi, SHAO Guiwei, et al. Research on

- minimum approach distance for live working on 1 000 kV AC transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(12): 78-82.
- [6] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 750 kV 输电线路带电作业安全距离的研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(11): 150-154.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research of minimum approach distance for live working on 750 kV AC transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(11): 150-154.
- [7] 胡毅, 王力农, 刘凯, 等. 750 kV 同塔双回输电线路带电作业技术研究[J]. *高电压技术*, 2009, 35(2): 373-378.
HU Yi, WANG Linong, LIU Kai, et al. Research of live working on 750 kV double circuit AC transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(2): 373-378.
- [8] 刘凯, 胡毅, 肖宾, 等. 1 000 kV 交流紧凑型输电线路带电作业安全距离试验分析[J]. *高电压技术*, 2011, 37(8): 1857-1861.
LIU Kai, HU Yi, XIAO Bin, et al. Experimental analysis of live working safety distance on 1 000 kV AC compact transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(8): 1857-1861.
- [9] 雷兴列, 彭勇, 肖宾, 等. 交流特高压复合横担对带电作业安全影响[J]. *中国电力*, 2019, 52(12): 54-61.
LEI Xinglie, PENG Yong, XIAO Bin, et al. Study on the impact of UHV AC composite cross-arms on live working safety[J]. *Electric Power*, 2019, 52(12): 54-61.
- [10] 高嘉辰, 丁同殊, 方雅琪, 等. 正极性操作冲击电压下含悬浮导体长空气间隙放电发展过程[J]. *高电压技术*, 2024, 50(4): 1664-1672.
GAO Jiachen, DING Tongshu, FANG Yaqi, et al. Development process of discharges in long air gaps containing a floating conductor under positive switching impulses[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4): 1664-1672.
- [11] MOSCH W, LEMKE E, LARIONOV V P. An estimation of the voltage-time characteristic of long rod plane gaps in air at positive switching impulse voltages[C]//13th International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Berlin, Germany: [s.n.], 1977: 427-430.
- [12] GALLIMBERTI I. The mechanism of the long spark formation[J]. *Le Journal de Physique Colloques*, 1972, 40(C7): 193-250.
- [13] BONDIOU A, GALLIMBERTI I. Theoretical modelling of the development of the positive spark in long gaps[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 27(6): 1252.
- [14] RUIZ D, LLOVERA-SEGOVIA P, POMAR V, et al. Analysis of breakdown process at U50 voltage for plane rod discharges by means of neural networks[J]. *Journal of Electrostatics*, 2013, 71(3): 336-340.
- [15] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 基于电场特征量和 SVM 的空气间隙击穿电压预测[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 742-750.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Predication for breakdown voltage of air gap based on electric field features and SVM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 742-750.
- [16] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 稍不均匀电场空气间隙击穿电压计算的新方法[J]. *高电压技术*, 2015, 41(2): 662-668.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. A new calculation method for the breakdown voltage of air gap in slightly uneven electric field[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(2): 662-668.
- [17] 邱志斌, 阮江军, 唐烈峥, 等. 空气间隙的储能特征与放电电压预测[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(1): 185-194.
QIU Zhibin, RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, et al. Energy storage features and discharge voltage prediction of air gaps[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(1): 185-194.
- [18] GAO Jiachen, WANG Linong, WU Shaocheng, et al. Prediction of breakdown voltage of equipotential live-line work air gaps in transmission lines: A computational discharge model[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(6): 1932-1940.
- [19] 张秋实, 王力农, 方雅琪, 等. 等电位人员-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.
- [20] 方雅琪, 毛苏涵, 杨炳森, 等. 不同海拔地区球-板间隙先导放电通道发展特性[J]. *高电压技术*, 2025, 51(6):

-
- 3089-3099.
- FANG Yaqi, MAO Suhan, YANG Bingsen, et al. Development characteristics of sphere-plane gap leader discharge channels at different altitudes[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 3089-3099.
- [21]BECERRA M, COORAY V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 897-908.
- [22]吴 田, 刘仕奇, 曹探深, 等. 基于先导放电理论的等电位作业人员初始放电附着点位置模拟[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 85-91.
- WU Tian, LIU Shiqi, CAO Tanshen, et al. Simulation of the initial discharge attachment point position of equal potential worker based on leader discharge theory[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 85-91.
- [23]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.
- [24]韩轲明, 彭 勇, 吴 田, 等. 特高压复合横担带电作业工况下人体放电附着点计算研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 189-196.
- HAN Keming, PENG Yong, WU Tian, et al. A novel method of discharge attachment point prediction for Live-Line worker in UHV composite cross arm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 189-196.
- [25]彭长青, 许 超, 尚荣艳, 等. 高压开关柜尖端放电的电场计算与分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 244-249.
- PENG Changqing, XU Chao, SHANG Rongyan, et al. Electric field calculation and analysis of tip discharge in high voltage switchgear[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2020, 41(2): 244-249.
- [26]VAPNIK V N. The Nature of statistical learning theory[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1995: 138-146.
- 刘 凯(1979—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事输电线路运行维护、带电作业技术研究(E-mail: liukai3@epri.sgcc.com.cn)。
- 张雨秋(2001—), 男, 硕士, 从事高电压与绝缘技术、带电作业技术研究(通信作者)(E-mail: 1160151600@qq.com)。