

不同海拔地区球-板间隙先导放电通道发展特性

方雅琪, 毛苏涵, 杨炳森, 方俊康, 曾 浩, 田双双

(湖北工业大学新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心, 武汉 430068)

摘 要: 气压及电场等因素导致的空气间隙放电特性变化是输变电设备外绝缘必须考虑的问题, 研究不同海拔球-板间隙放电通道发展特性可为极端环境下输变电设备外绝缘设计提供依据。在武汉(海拔 20 m)和昆明(海拔 2100 m)地区开展了直径 30~110 cm 的球-板间隙操作冲击试验, 研究了放电通道先导发展速度、发展形态特性与球电极尺寸及气压的关系。研究结果表明: 放电通道先导发展速度随球直径增加而增加并出现饱和趋势, 随海拔高度增加而降低, 当海拔高度由 20 m 上升至 2 100 m 时, 不同直径球电极的先导速度降低约 12.4%~15.4%; 放电通道先导头部流注长度随球直径和海拔高度的增加而增加; 对于先导通道形态及发展特征, 随着球电极直径的增加, 先导通道发生偏转的位置逐渐靠近电极底部; 随着海拔高度的增加, 靠近电极底部的先导通道偏转角度减小, 且随着海拔高度增加, 先导通道弯折频次明显降低; 先导分支数量随球电极直径增加而增加, 随海拔高度的增加而降低, 高海拔先导分支数量比低海拔降低约 26.7%~47.2%。最后基于放电通道分形模型分析得到, 球电极直径增加使得空间电场更为均匀, 放电通道分形维数增加, 而当气压降低时, 气体密度变小, 放电通道分形维数降低。

关键词: 低气压; 球-板间隙; 先导发展特性; 放电分支; 分形理论

Development Characteristics of Sphere-plane Gap Leader Discharge Channels at Different Altitudes

FANG Yaqi, MAO Suhan, YANG Bingsen, FANG Junkang, ZENG Hao, TIAN Shuangshuang

(Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment,

Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Change of air gap discharge characteristics caused by factors such as air pressure and electric field is a problem that must be considered in the external insulation of power transmission and transformation equipment. Studying the development characteristics of sphere-plane gap discharge channels at different altitudes can provide a basis for the external insulation design of power transmission and transformation equipment in extreme environments. In this paper, a sphere-plane gap switching impulse test with a diameter of 30~110 cm was carried out in Wuhan (altitude 20 m) and Kunming (altitude 2 100 m), and the relationship between the leader development speed and development characteristics of the discharge channel and the size and pressure of the spherical electrode was studied. The results show that the leader velocity of the discharge channel increases and becomes saturated with the increase of the sphere diameter, and decreases with the increase of the altitude. When the altitude increases from 20 m to 2100 m, the leader velocity of the spherical electrode with different diameters decreases by about 12.4%~15.4%. The streamer length of the leader head of the discharge channel increases with the increase of sphere diameter and altitude. As for the morphology and development characteristics of the leader channel, with the increase of the diameter of the spherical electrode, the deflection position of the leader channel is gradually closer to the bottom of the electrode. The deflection angle of the leader channel near the bottom of the electrode decreases with the increase of altitude, and the bending frequency of the leader channel decreases obviously with the increase of altitude. The number of leader branches increases with the increase of spherical electrode diameter and decreases with the increase of altitude. The number of leader branches at high altitude is decreased by 26.7%~47.2% compared with that at low altitude. Finally, based on the fractal model analysis of discharge channel, the increase of spherical electrode diameter makes the spatial electric field more uniform and the fractal dimension of discharge channel increases, while the decrease of gas pressure leads to the decrease of gas density and the fractal dimension of discharge channel.

Key words: low air pressure; sphere-plane gap; characteristics of leading development; discharge branch; fractal theory

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的积极推进,我国大力发展“西电东送”工程,积极建设特高压输电工程^[1-2]。但我国西部地区海拔相对较高,地理环境与气候条件相对复杂^[3-4]。不同于使用 SF₆ 等气体作为绝缘灭弧介质的高压绝缘器件^[5-6],空气密度降低的影响,使得输变电设备的绝缘性能需要重新进行评估。输变电工程换流站阀厅的建设中,屏蔽金具大多采用均压屏蔽球,球电极与墙壁、地面形成的球-板间隙之间的电场比现有大量研究的棒-板、棒-棒间隙要更加均匀,使得其放电电压、流注-先导起始特性等宏观放电特性有较大差异^[7-8]。因此,有必要研究不同海拔下球-板间隙电极的宏观先导发展特性,为高海拔地区换流站绝缘设计提供理论指导。

针对电场均匀程度对长间隙放电特性的影响,近年来,大量国内外学者开展了不同类型的长间隙放电试验,针对放电宏观特性进行了不同程度的分析。清华大学团队针对棒-板和大尺寸球-板电极开展了放电观测,发现流注放电过程会随着电极曲率半径增加而在放电过程中逐渐占据优势^[9]。并考虑了间隙尺寸和电极结构的影响,提出了改进的空气间隙净距计算方法^[10]。华北电力大学团队开展了长间隙含表面尖端球-板间隙操作冲击试验,研究表明尖端的存在显著降低了放电电压^[11-12]。同时针对球-板间隙,开展了组合式光电观测平台,分析了球-板间隙放电过程中的瞬时光功率、空间电场强度变化,并搭建了球-板长间隙流注-先导转化模型^[13-14]。学者 Sklyarenko R. V. 等人通过平面介电屏障改变球-板间隙之间的电场分布,研究了其对放电电压的影响^[15]。针对气压变化对长间隙放电过程的影响,华北电力大学团队等人开展了海拔 2 500 m 和 4 300 m 的棒-板间隙冲击放电试验,得到了棒-板间隙放电特性曲线,提出了一种改进的高海拔电压校正方法^[16]。并在海拔 4 300 m 开展了含毛刺的球-板间隙放电特性试验,得到了不同长度和位置毛刺作用下的放电特性,发现由气压变化使得放电电压 U_{50} 的饱和特性发生改变^[17]。目前针对不同气压下球-板间隙放电试验的研究大多针对放电电压等参量,以此对实际工程提供指导,针对放电通道发展过程的研究较少。

同时,国内外学者针对长间隙放电发展过程建立了许多仿真模型。外国学者基于分形理论首次提

出 NPW 模型,考虑放电发展过程中的电场分布和随机因素,对放电通道分支发展进行了仿真^[18]。在此基础上,学者们通过引入放电发展过程中的放电阈值 E_c 和通道内部的电压降 E_s ,这使得放电发展模拟结果更加接近实际^[19]。国内学者通过电介质击穿模型(DBM)模型创建了流注-先导发展的 3 维仿真物理模型,在此基础上计算了先导平均轴向速度、空间电荷电位畸变系数等放电参数并与试验值相符^[20]。国内学者基于分形模型,针对各种实际工况如输电线路^[21-22]、船舶^[23]等搭建了放电模型,预测了放电通道的击穿点。目前的放电模型通过补充放电参数对放电过程的影响,以期使得放电模型更接近实际,更能够模拟实际工况放电过程^[24]。但是目前存在的放电发展模型往往无法准确地针对实际运行工况进行预测,需要更多的真型试验数据来完善仿真模型的建立。

目前高海拔条件下球-板间隙放电过程具体参数获取相对较少,利用人工气候室开展试验难以实现对实际现场复杂气象条件的精确模拟,且现有放电模型部分参数还需要依托真型试验数据的帮助。因此针对现有研究的局限性,在武汉(海拔 20 m)和昆明(海拔 2 100 m)两地区分别开展了正极性操作冲击球-板间隙放电试验,采集了放电电压、放电电流和放电光学图像,分析了放电通道发展速度、发展形态特性与球电极尺寸以及气压的关系,在此基础上采用放电分形模型对试验规律进行了分析和验证。该研究结果可以为高海拔条件下空气间隙放电机理研究、高海拔输变电工程中均压屏蔽球尺寸选取及外绝缘优化设计提供参考和依据,研究内容可为放电通道预测提供数据支持,并完善现有流注-先导模型理论模型的搭建。

1 试验布置

本试验在分别在武汉(海拔 20 m)以及昆明(海拔 2 100 m)展开。其中武汉试验地区的环境温度为 17.9~23.8 °C,相对湿度为 52.2%~76.7%,气压为 99.1~100.2 kPa。昆明试验地区的环境温度介于 24.3~31.0 °C 之间,相对湿度为 26.1%~43.3%,试验中气压为 78.9~79.8 kPa。试验设置的间隙距离均为 1 m,低海拔地区球电极直径为 30、40、60 cm,高海拔地区额外增加直径 90 和 110 cm 球电极。试验电压选用 250/2 500 μ s 的正极性标准操作冲击电压。在试验过程中,每组工况开展 30 次试验,每次试验

开始和结束均记录气压、温度、湿度等环境参数。针对采集的放电参数, 将误差允许范围内的数据通过计算平均值作为其最终数据。针对放电路径和轨迹, 多次试验中路径和轨迹基本呈现相似的规律。

为观测球-板间隙放电的先导发展过程, 搭建了如图 1 所示的电学和光学同步观测平台。同步观测平台由高速相机和高电位电流采集装置组成^[25-26]。高速相机型号为 Photron Fastcam SA-Z, 拍摄速度设置为 300 千帧/s, 单帧曝光时间为 $3.33\ \mu\text{s}$, 分辨率为 384×160 。高电位电流采集装置由采样电阻和光电转换系统构成。采样电阻由 10 只无感厚膜电阻并联组成, 阻值为 $1\ \Omega$, 电感为 $30\ \text{nH}$, 满足试验要求。光电转换系统带宽为 $200\ \text{MHz}$, 最大采样频率为 $1\ \text{GHz}$ 。为避免电磁干扰, 将高电位电流测量装置放置于屏蔽桶内。为实现光学图像和电压电流波形的同步采集, 使用示波器发出 TTL 触发信号并通过光纤传输到达电流测量装置和高速相机, 从而实现电流测量装置以及高速相机同步测量。信号经过光纤、光电转换系统时会产生时延^[27-28], 处理数据时需要电压、电流波形以及高速图像的时间进行修正, 各部分时延测量结果如图 2 所示。试验使用标准正极性操作冲击电压实际波形图如图 3 所示。其中, 波前时间为 $222.04\ \mu\text{s}$, 误差为 11.2% ; 半峰值时间为 $2\ 113.2\ \mu\text{s}$, 误差为 15.5% , 满足国家标准 GB/T 16927.1—2011 中标准操作冲击偏差允许范围。

2 先导发展速度特性

通过相邻两幅高速图像中先导头部前进距离 ΔL 与相邻两幅高速图像之间的间隔时间 Δt 之比, 可以得到先导发展速度 v_L 。文献[29]的试验结果表明, 当电极直径小于临界直径时, 电极直径的改变对先导速度的影响很小。但是, 当电极直径超过临界直径, 其先导发展速度会随着电极直径增加而大幅度提高。根据式(1)^[7], 得到 $1\ \text{m}$ 间隙距离下, 球电极临界直径约为 $29.3\ \text{cm}$ 。本次试验中选择的球电极直径均大于临界直径, 随着电极直径的改变, 其先导发展速度有较大的差别。

$$D_{\text{cr}} = 257.5e^{0.13d} \quad (1)$$

式中: d 为间隙距离, m ; D_{cr} 为球电极的临界直径, mm 。

不同海拔下的先导速度统计结果如图 4 所示。由图 4 可知, 常压下 30 、 40 和 $60\ \text{cm}$ 直径球电极先导发展速度分别为 7.59 、 10.77 、 $11.37\ \text{cm}/\mu\text{s}$, 低气

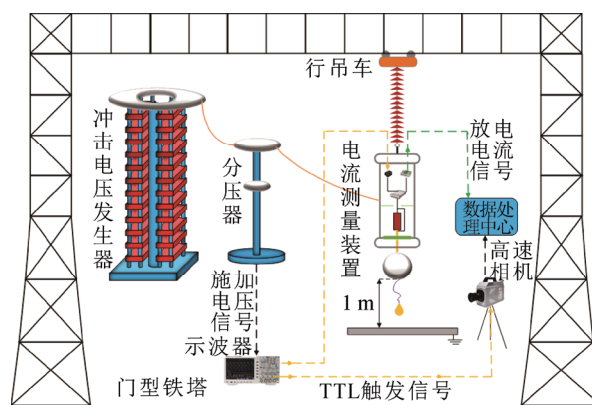


图 1 试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment

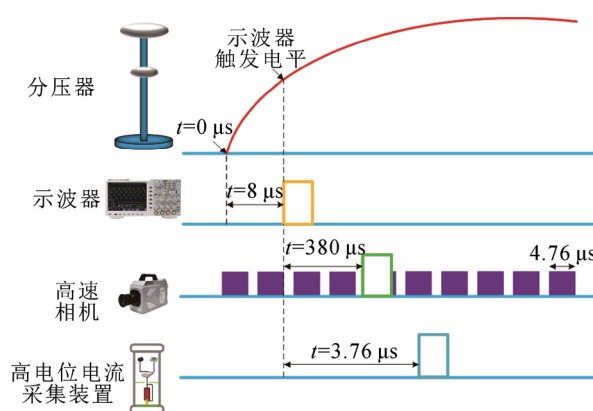


图 2 时延测量结果图

Fig.2 Time delay measurement result graph

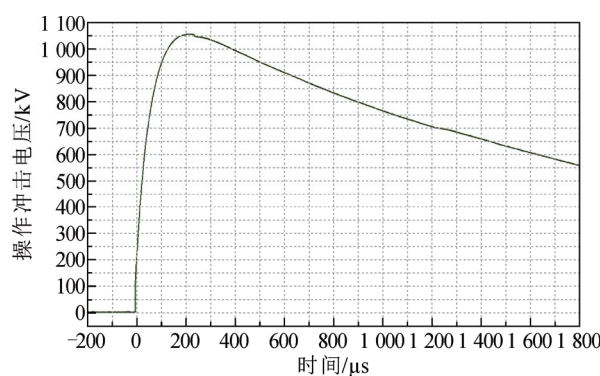


图 3 正极性标准操作冲击电压实际波形图

Fig.3 Actual waveform diagram of the positive switching impulse voltage

压下 30 、 40 、 60 、 90 和 $110\ \text{cm}$ 直径球电极先导发展速度分别为 6.42 、 9.42 、 10.52 、 12.02 、 $12.75\ \text{cm}/\mu\text{s}$ 。从图 4 中可以看出, 当球电极直径增加时, 先导发展速度增加并逐渐出现饱和趋势。

在不同工况中施加相应放电起始电压得到的

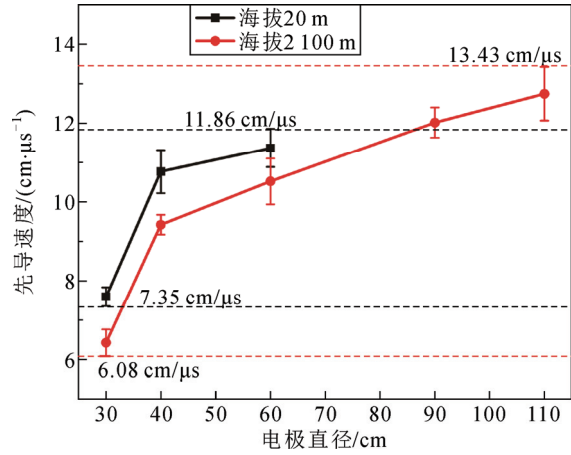


图4 不同海拔下的先导速度对比图

Fig.4 Comparison chart of leader speeds at different altitudes

间隙轴向电场分布和电场不均匀系数如图5和表1所示,在相同间隙距离下,随着球电极直径增加,球电极端部电场明显下降,电场不均匀程度减小,电场越来越均匀,更有利于放电通道发展,通道“末跃”长度占间隙长度比例更大。随着海拔高度上升,先导发展速度逐渐减小。当海拔高度由20 m上升至2 100 m时,30、40和60 cm直径球电极的先导速度分别降低约15.4%、12.5%和12.4%。这是因为随着海拔高度的增加,环境空气密度逐渐减小。环境空气密度的减小使得先导通道径向膨胀速率增加,从而减缓先导通道气体加热速率,这将延长先导通道形成时间。因此,随着海拔高度增加,先导速度逐渐减小。

先导速度和先导电流的关系可以使用幂函数 $v_L = \alpha i^\beta$ 来表示,式中 α 和 β 均为常数^[30]。不同工况下先导速度和电流关系曲线如图6所示。本文试验结果和文献^[31]中的结果类似,其中实心点与实线部分为本文测量的数据,虚线部分为参考文献^[31]中类似工况在不同海拔下的拟合公式。首先,在高海拔处拟合得到的曲线均低于低海拔处的曲线。其次,当先导电流较小时,先导速度差别不大。本次试验在高海拔处和平原地区得到的先导速度电流关系曲线分别为 $v_L = 3.36i^{0.74}$ 和 $v_L = 1.16i^{0.77}$ 。从图6中可以看出,球电极的先导速度电流曲线均高于棒电极先导速度电流曲线。可以看出,除气压外,电极尺寸也是影响先导速度的关键参量。

先导头部的流注茎为先导通道的发展提供了能量,因此有必要进一步研究先导前方的流注特性。由于先导头部的流注区域光强较弱,使用高速相机

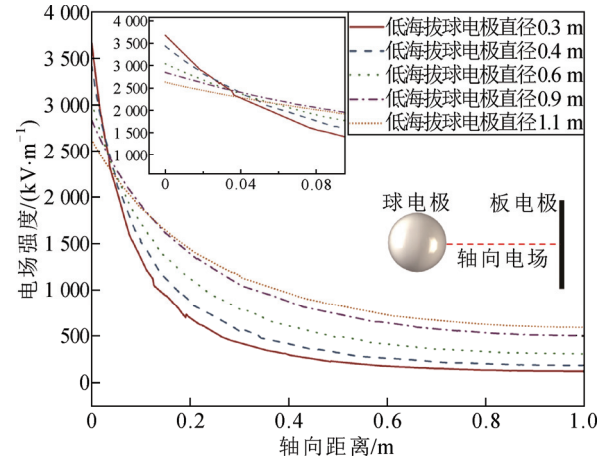


图5 流柱起始电压下不同工况的轴向电场分布

Fig.5 Axial electric field distribution under different conditions at the inception voltage of the streamer

表1 不同工况电场不均匀系数

Table 1 Unevenness coefficient of electric field under different conditions

球电极直径/m	电场不均匀系数 <i>f</i>
0.3	7.211
0.4	5.602
0.6	3.956
0.9	2.891
1.1	2.513

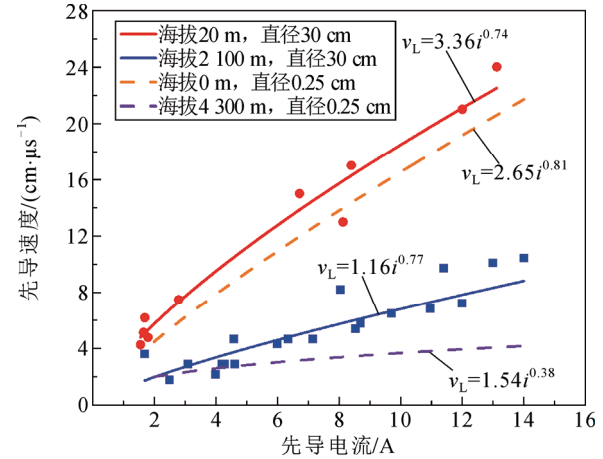


图6 不同海拔下的先导电流速度关系曲线图

Fig.6 Relationship curves of leader current velocity at different altitudes

难以很好地记录流注特性,但是可以认为先导发展最后跃变开始时,先导头部距离板电极的距离为放电过程中的流注发展最大长度,近似地估计正极性先导发展过程中的流注发展特性。不同工况下的最长流注长度统计结果如图7所示。

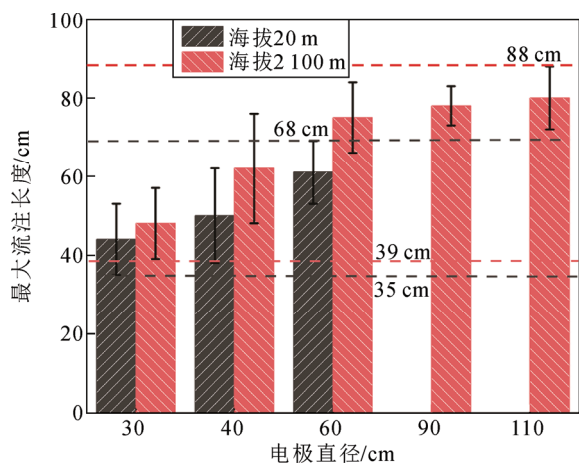


图7 不同海拔下流注长度统计图

Fig.7 Statistical chart of streamer length at different altitudes

试验结果表明, 球电极直径改变会影响先导头部流注长度。如图7所示, 随着电极直径的增加, 先导头部流注长度也逐渐增加。海拔20 m条件下, 当电极直径由30 cm增长至60 cm时, 先导头部流注长度增加约38.6%。海拔2100 m条件下, 当电极直径由30 cm增长至60 cm时, 先导头部流注长度增长约56.3%, 当电极直径进一步增加, 先导头部流注长度小幅度增加。这是因为, 随着电极曲率的增加, 末跃时刻的电压幅值随之上升, 先导通道电导率随之增加。先导头部流注发展随电导率增加而更容易发展, 因此随着电极曲率的增加, 先导头部流注长度随之增加。先导头部流注长度随着海拔高度的上升而增加, 由图7可知, 随着海拔高度的增加, 先导头部流注长度增加约9.2%~24.4%。这是因为, 随着海拔高度的增加, 气压逐渐减小, 维持流注稳定发展所需电场强度越低, 因此流注稳定发展的长度更长。

3 先导发展形态特性

利用MATLAB提取先导通道的二维形态, 以球电极底部到板电极的垂直距离为轴线, 定义先导通道偏移球-板间隙中心轴线的角度为先导放电通道轴向偏转角度 δ , 如图8所示, 并进行统计。统计结果表明, 不同工况下先导通道轴向偏转角度的平均值差别不大。但是, 通过对比不同工况下的放电图像, 发现放电通道在间隙不同位置处表现出不同的偏转程度, 先导通道轴向偏转角度的平均值难以表征先导通道弯折程度。因此, 本文将电极底部到板电极之间的距离平均划分为区间1—4, 如图9所示,

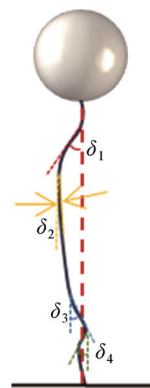


图8 先导放电通道轴向偏转角度示意图

Fig.8 Schematic diagram of the axial deflection angle of the leader discharge channel

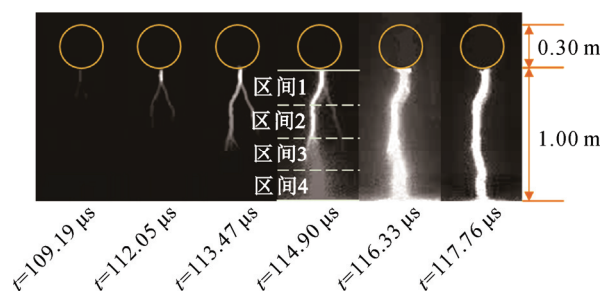


图9 放电通道区间划分示意图

Fig.9 Schematic diagram of discharge channel interval division

并统计每个区间内先导通道轴向偏转角度, 统计结果如图10和图11所示。

统计结果表明, 随着球电极直径的增加, 先导通道发生偏转的位置逐渐靠近电极底部; 换言之, 随着电极直径增加, 先导放电通道在接近板电极时几乎不发生偏转。以海拔20 m地区的试验结果为例, 随着电极直径的增加, 先导通道偏转区间从4个减少为只有区间1和2。当电极直径不变时, 随着先导通道逐渐靠近板电极, 先导通道偏转程度随之减小。本试验中, 随着先导通道逐渐向板电极发展, 30、40和60 cm直径球电极的先导通道偏转角度分别减小26°、44°和45°。

图12和13分别为海拔20 m和海拔2100 m的放电通道高速图像, 对比图10—图13可知, 随着海拔高度的增加, 区间1内的先导通道偏转角度有较为明显的降低, 即靠近电极底部的先导通道偏转角度随海拔高度增加而减小。区间1内, 30、40和60 cm直径电极的先导偏转角度随海拔高度上升, 分别减小33.3%、25.0%和34.2%。这是因为, 随着

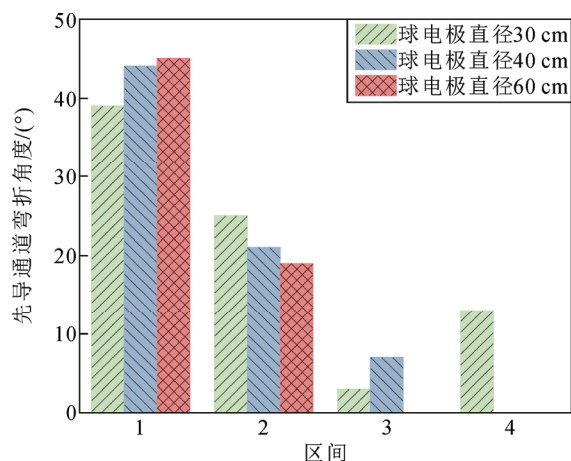


图10 海拔20 m下先导弯折角度大小以及分布情况

Fig.10 Size and distribution of the bending angle of the leader channel at an altitude of 20 meters

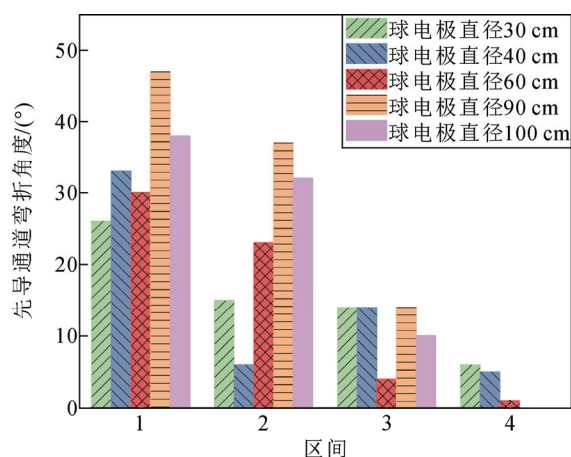


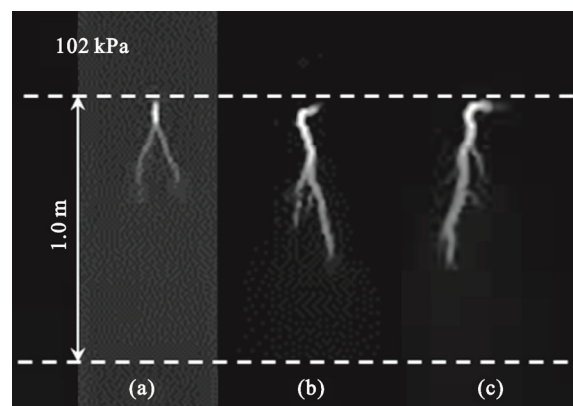
图11 海拔2100 m下先导弯折角度大小以及分布情况

Fig.11 Size and distribution of the bending angle of the leader channel at an altitude of 2100 meters

海拔高度的增加,流注放电产生的注入电荷逐渐减小,电极附件的空间电场畸变逐渐减小。空间电场畸变越小,先导通道偏转角度越小。因此,随着海拔高度增加,区间1内的先导偏转角度逐渐减小。

如图12和图13所示,不同海拔下的先导放电通道形态存在一些差异,因此本文统计了整个放电发展过程中,先导放电通道的分支数以及分支角度。图13(a)给出了先导分支角度的统计方法,即先导分支与主放电通道的夹角,先导分支角度 θ 的范围为 $[0, \pi]$ 。图13(b)中先导分支为3。图13(c)中空心圆处为先导分支节点,箭头所指为先导分支,统计先导分支时主放电通道不考虑在内。

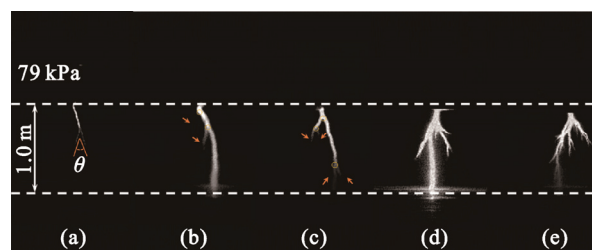
定义球电极底部垂直到板电极的方向为轴向



(a)球电极直径30 cm; (b)球电极直径40 cm; (c)球电极直径60 cm

图12 海拔20 m下不同直径球电极先导放电通道

Fig.12 Leader discharge channels of spherical electrodes with different diameters at an altitude of 20 meters



(a)球电极直径30 cm; (b)球电极直径40 cm; (c)球电极直径60 cm;

(d)球电极直径90 cm; (e)球电极直径110 cm

图13 海拔2100 m下不同直径球电极先导放电通道

Fig.13 Leader discharge channels of spherical electrodes with different diameters at an altitude of 2100 meters

方向,当先导通道发展方向与轴向方向产生偏差时认为放电通道发生一次弯折。不同海拔下先导通道弯折频次统计结果如图14所示,分析可知电极直径改变对先导弯折频次的影响很小。不同海拔下,3种直径球电极的先导通道弯折频次基本一致。海拔20 m下,先导通道平均弯折频次差异最大为0.5次。海拔2100 m下,不同直径球电极的先导通道弯折频次变化最大仅为1.8次。但是,随着海拔高度增加,先导通道弯折频次明显降低。以直径为60 cm的球电极为例,当海拔高度从20 m上升到2100 m时,其先导通道弯折频次下降了约3次。其余直径球电极的先导弯折频次也随着海拔升高而大幅度减小。

采用上述方法,对不同海拔下的球-板间隙放电的先导分支数量进行统计分析。图15为不同海拔下球-板间隙放电的先导分支数量对比图。结果表明,平原地区与高海拔地区下不同直径球电极的先导分

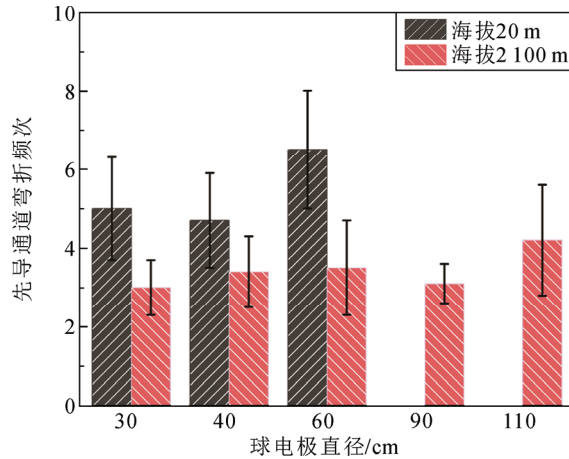


图 14 不同海拔下先导通道弯折频次统计结果

Fig.14 Statistical results of the frequency of bendings of the leader channel at different altitudes

支数量平均值分别为 3.6、4.2、4.5 和 1.9、2.3、3.3、5.0、8.1, 随着海拔增加先导分支数量降低约 26.7%~47.2%。可以看出, 随着海拔高度的增加, 球-板间隙放电的先导分支数量明显降低。这是因为随着海拔降低, 气压随之增加, 自由电子碰撞概率逐渐提高, 这导致先导头部的电晕流注区域电离更加剧烈, 因此更容易产生先导分支。

从图 15 中可以发现, 先导分支数量随球电极直径增加呈现增长趋势。在低海拔和高海拔地区, 随着球电极直径增加, 先导分支数量分别增加约 25.0%和 38.8%。间隙距离固定时, 随着球电极直径增加, 背景电场不均匀程度变小, 放电产生的空间电荷分布更加均匀, 先导分支更容易产生, 先导通道发展的分散性更大。

不同工况下的先导分支角度统计结果如表 2 所示。海拔高度为 2100 m 时, 不同直径球电极先导分支角度变化幅度为 4.4%~2.2%。海拔高度为 20 m 时, 不同直径球电极先导分支角度变化幅度为 4%~2%。结果表明, 球电极直径的改变对先导分支角度的影响较小。随着海拔高度的降低, 先导分支角度呈减小趋势。随着海拔高度的降低, 不同直径球电极的先导分支角度分别下降 10%、8.3%和 12.2%。随着海拔高度下降, 气压随之升高, 空间电荷的扩散作用逐渐减弱, 因此先导分支角度 θ 随之减小。

4 放电通道分形维数计算

在不同介质中, 放电通道的发展受到电场分

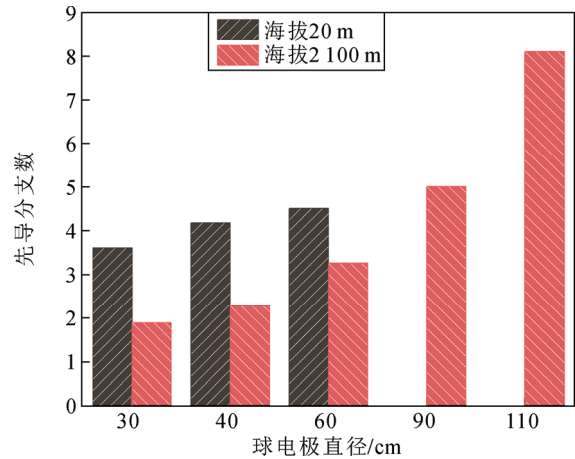


图 15 不同海拔下先导分支数量对比图

Fig.15 Comparison chart of the number of leader branches at different altitudes

表 2 不同海拔下先导分支角度统计结果

Table 2 Statistical results of leader branch angles at different altitudes

altitudes				
海拔高度/m	电极直径/cm	分支角度最大值 $\theta_{\max}/(^{\circ})$	分支角度最小值 $\theta_{\min}/(^{\circ})$	分支角度平均值 $\theta_{\text{av}}/(^{\circ})$
2100	30	88	19	50±13
	40	77	29	48±14
	60	74	22	49±13
	90	79	14	40±17
	110	85	5	45±15
20	30	79	34	45±14
	40	68	27	44±14
	60	58	29	43±11

布、空间电荷以及随机因素的影响, 呈现明显的分支趋势, 其发展具有随机性。分形生长随机模型根据放电的随机性和分形特性, 将求解区域划分为 100×100 的网格, 每个网格为 $h=1 \text{ cm}$, 考虑放电临界电场强度, 将介质理想化为规律分布的点, 高压电极和地电极为第一类边界条件, 其中高压电极电位为 φ_1 , 求解区域内与空气接触的区域为和电场方向一致的第二类边界条件。

当施加正极性操作冲击电压后, 初始电子在背景电场的作用下加速向高压电极运动并与空气分子碰撞产生电离。高压电极附近电离区内电子碰撞电离系数均大于电子附着系数, 电离区内的自由电子在电场作用下向高压电极运动, 和空气分子发生碰撞引起空气分子电离产生初始电子崩。在高压电极附近合适的区域内, 即临界体积内选取一个点作为放电发展点, 判断下一个发展点的电场强度是否大于临界电场强度 E_c , 发展概率函数简化方程如式(2)

所示,流注电位分布通过泊松方程求解,式(3)为泊松方程二维离散化形式^[32]。如图 16 所示,黑色实心点代表已发展的放电点,其周围 8 个方向的灰色实心点为所有待发展点,在实际计算过程中,需要考虑满足局部场强大于电子崩临界场强的点作为实际待发展点。

$$p_i = \frac{(|\varphi'_i - \varphi_i| - \varphi_c)^\eta}{\sum (|\varphi'_i - \varphi_i| - \varphi_c)^\eta} \quad (2)$$

$$\frac{\varphi_{i,j+1} + \varphi_{i,j-1} + \varphi_{i+1,j} + \varphi_{i-1,j} - 4\varphi_{i,j}}{h^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: φ'_i 和 φ_i 分别为可能待发展点与原发展点的电位; φ_c 为放电阈值电压; η 为放电发展的概率指数; ρ 为放电通道电荷密度; ε 为空气的介电常数。

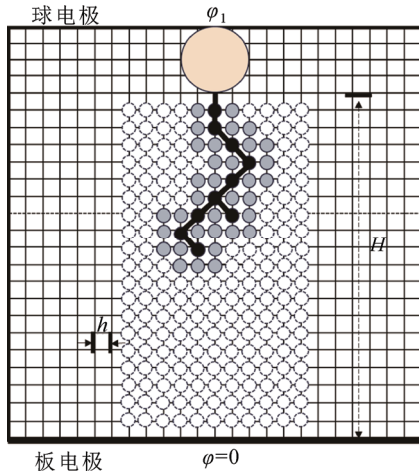


图 16 球-板间隙分形发展模型示意图

Fig.16 Schematic diagram of the fractal development model of sphere-plane gap

在本文常压和低气压试验的气象条件下,考虑气压、温度、相对湿度等因素,计算得到的流注稳态电场强度 E_s 分别约为 510 kV/m 和 370 kV/m。因此,即将发展的流注点电势计算式如式(4)所示。每计算一个发展点后,需要将新发展点的电位考虑到边界条件中,修改边界条件。

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i - E_s d \quad (4)$$

式中: φ_{i+1} 为待发展点电位; d 为包含待发展点的流注长度。

分别设置球电极直径为 30、40、60、90、110 cm,放电发展的概率指数 η 取 2,研究了常压下球电极直径与放电分形维数之间的关系,常压与低气压下分形模型仿真结果见图 17、18。由于放电的随机性,每组仿真均开展 10 次,取分形维数平均值为最终分形维数,通过计算得到 5 种放电工况平均分形维数分别为 1.415 6、1.430 6、1.450 2、1.458 7、1.460 8,放电通道分形维数随着球电极的增加而增加,这说明随着球电极直径增加,球-板间隙之间的电场更加均匀,分形维数越大,放电分支越多,这与实际试验结果一致。

为模拟高海拔低气压下的气体密度,通过修改网格步长来改变球-板电极间空气介质的网格密度,常压试验下气压为 99.1~100.2 kPa,单位体积内气体分子数约为 2.7×10^{25} ,高海拔试验气压为 78.9~79.8 kPa,单位体积内气体分子数约为 2.16×10^{25} ,通过对应单位体积气体分子数确定网格数为 90×90 。计算得到低压条件下 5 种放电工况平均分形维数分别为 1.360 2、1.374 2、1.405 8、1.416 5、1.420 1。由图 19 分析可知,放电通道的分形维数随

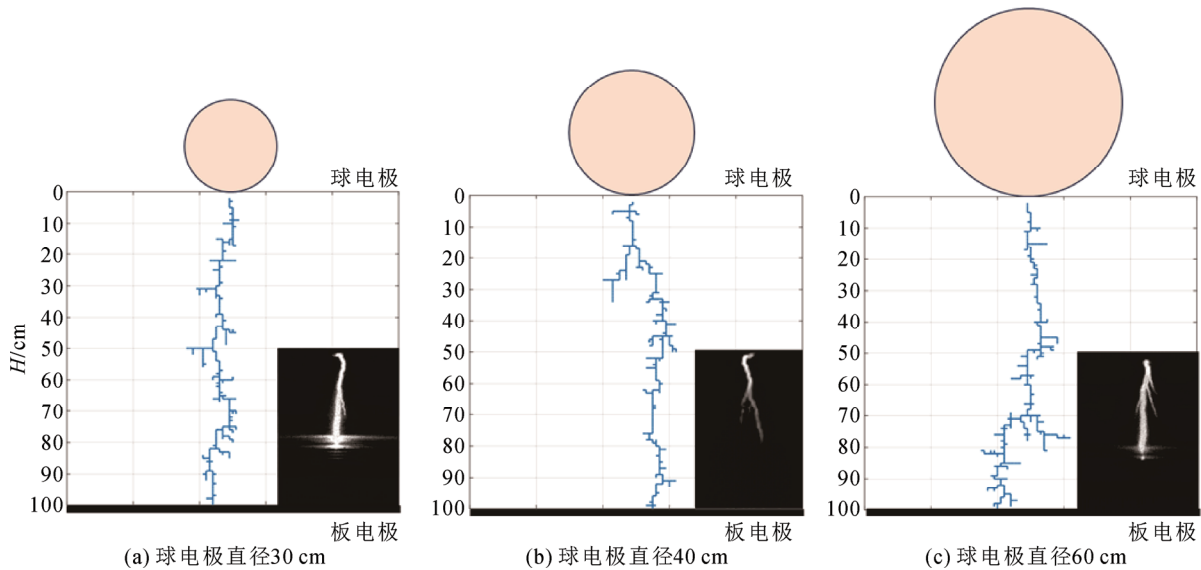


图 17 常压下分形模型仿真结果

Fig.17 Simulation results of the fractal model under normal pressure

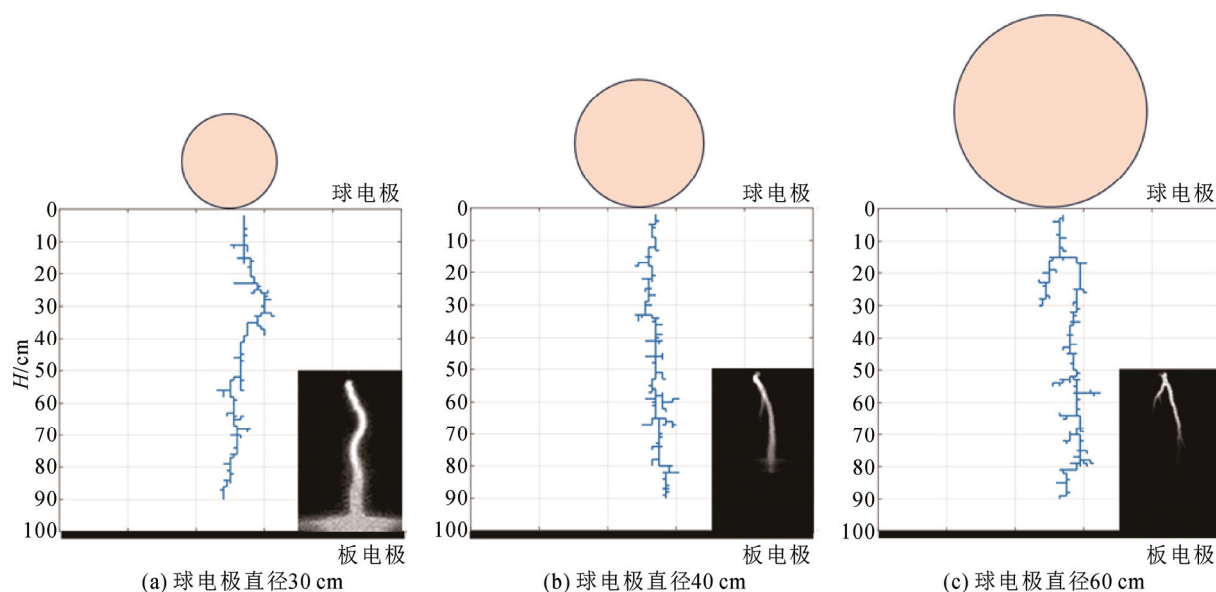


图 18 低气压下分形模型仿真结果

Fig.18 Simulation results of the fractal model under low pressures

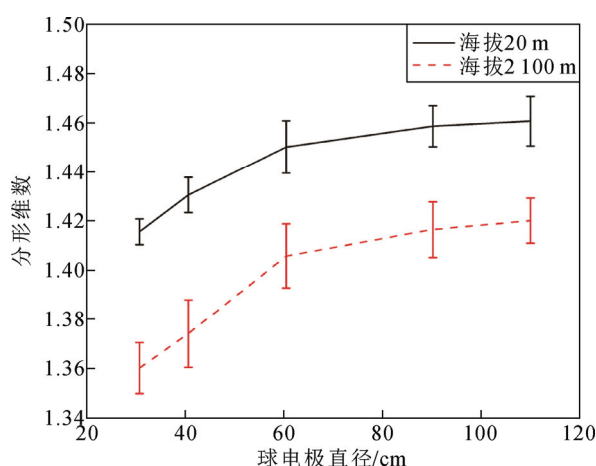


图 19 不同海拔分形维数对比示意图

Fig.19 Comparative diagram of fractal dimensions at different altitudes

着气压的降低而降低, 在低压条件下, 气体密度变小, 带电粒子的平均自由程变长, 与中性粒子的碰撞几率变小, 导致放电通道分形维数小。将仿真结果与试验获取的光学图像图 12 和图 13 进行对比, 可以发现, 随着气压的降低, 放电分支略有下降, 但在相同环境且间隙距离一致时, 当球电极直径增加, 放电分支显著增加, 这表明分形模型仿真结果与试验结果一致。

5 结论

1) 放电通道先导发展速度随球直径增加而增

加, 随海拔高度增加而降低。海拔由 20 m 上升至 2 100 m 时, 不同直径球电极先导速度降低约 12.4%~15.4%, 且高海拔条件下先导发展速度随球电极尺寸增加出现饱和趋势。

2) 放电通道先导头部流注长度随球直径和海拔高度的增加而增加。海拔由 20 m 上升至 2 100 m 时, 先导头部流注长度增加约 9.2%~24.4%。高海拔条件下, 当电极直径进一步增加, 先导头部流注长度增长速率降低。

3) 随着球电极直径增加, 先导通道发生偏转的位置逐渐靠近电极底部。随着海拔高度增加, 靠近电极底部的先导通道偏转角度减小。先导通道弯折频次主要受海拔影响, 海拔由 20 m 上升至 2 100 m 时, 先导通道平均弯折频次由 4~8 次下降至 2~5 次。

4) 先导分支数量随球电极直径的增加而增加。当球电极直径从 30 cm 增至 60 cm 时, 低海拔和高海拔的先导分支数量分别增加约 25.0%和 38.8%。先导分支数量随海拔高度的增加而降低, 高海拔先导分支数量比低海拔降低约 26.7%~47.2%。

参考文献 References

- [1] 周远翔, 陈健宁, 张 灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408. ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [2] 舒印彪, 赵 勇, 赵 良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳

- 转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
- SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [3] 黄道春, 范建斌, 王平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.
- HUANG Daochun, FAN Jianbin, WANG Ping, et al. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [4] HE W L, WEI H Y, ZHANG Y L, et al. The characteristics of negative corona discharge and radio interference at different altitudes based on coaxial wire-cylinder gap[J]. Plasma Science and Technology, 2024, 26(2): 025501.
- [5] CUI H, ZHANG X X, ZHANG J, et al. Nanomaterials-based gas sensors of SF₆ decomposed species for evaluating the operation status of high-voltage insulation devices[J]. High Voltage, 2019, 4(4): 242-258.
- [6] CHEN D C, ZHANG X X, XIONG H, et al. A first-principles study of the SF₆ decomposed products adsorbed over defective WS₂ monolayer as promising gas sensing device[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2019, 19(3): 473-483.
- [7] 郭贤珊, 丁玉剑, 姚修远, 等. ± 1100 kV 特高压直流换流站球-板间隙放电特性及取值研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3701-3709.
- GUO Xianshan, DING Yujian, YAO Xiuyuan, et al. Flashover characteristics of sphere-plane gap and distance selection for ± 1100 kV UHVDC converter stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3701-3709.
- [8] 刘鹏, 郭伊宇, 吴泽华, 等. 特高压换流站大尺寸典型电极起晕特性的仿真与试验[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3431-3440.
- LIU Peng, GUO Yiyu, WU Zehua, et al. Simulation and experimental study on corona characteristics of large size typical electrodes used in UHV converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3431-3440.
- [9] CHEN S, ZENG R, ZHUANG C J, et al. Switching impulse breakdown characteristics of large sphere-plane air gaps compared with rod-plane air gap[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 839-844.
- [10] 陈赦, 庄池杰, 曾嵘, 等. 大直径球-板结构改进间隙系数及其在特高压直流换流站空气间隙净距计算中的应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1360-1366.
- CHEN She, ZHUANG Chijie, ZENG Rong, et al. Improved gap factor of large sphere-plane and its application in calculating air gap clearance in UHVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1360-1366.
- [11] GENG J H, LV F C, DING Y J, et al. Influences of surface tips of a shield ball on the discharge characteristics of a long sphere-plane air gap under positive switching impulses[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(7): 902-906.
- [12] GENG J H, QIN Y C, LV F C, et al. Electric field distribution and switching impulse discharge under shield ball surface scratch defect in an UHVDC hall[J]. Energies, 2018, 11(6): 1408.
- [13] GENG J H, CHEN Y X, LV F C, et al. Photo electric properties during streamer-to-leader transition in a long positive sphere-plane gap[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27(8): 083509.
- [14] 耿江海, 陈雅茜, 王平, 等. 正极性操作冲击下球-板间隙流注-先导转化模型[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2919-2928.
- GENG Jianghai, CHEN Yaxi, WANG Ping, et al. Streamer-to-leader transition model of sphere-plane long air gap at positive switching impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2919-2928.
- [15] SKLYARENKO R V, SAMUSENKO A V, STISHKOV Y K. Streamer and leader processes in the air in the presence of dielectric barriers arranged perpendicularly to a grounded plane[J]. High Temperature, 2020, 58(1): 29-35.
- [16] YANG B X, YAO X Y, SU Y, et al. Influence of front time on long-airgap breakdown voltage in high-altitude areas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(3): 1474-1480.
- [17] LV F C, GENG J H, QIN Y C, et al. Influence of protrusions on the positive switching impulse breakdown voltage of sphere-plane air gaps in high-altitude areas[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(4): 499-504.
- [18] NIEMEYER L, PIETRONERO L, WIESMANN H J. Fractal dimension of dielectric breakdown[J]. Physical Review Letters, 1984, 52(12): 1033-1036.
- [19] WIESMANN H J, ZELLER H R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(5): 1770-1773.
- [20] 谷山强, 谢施君, 向念文, 等. 长间隙正极性放电流注-先导发展3维物理仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2903-2910.
- GU Shanqiang, XIE Shijun, XIANG Nianwen, et al. Research on simulation of three-dimensional streamer-leader propagation for positive long gap discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2903-2910.
- [21] 曹保江, 陈力生, 李瑞芳, 等. 基于分形理论的高速铁路高架桥接触网系统雷击率分布研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 77-84.
- CAO Baojiang, CHEN Lisheng, LI Ruifang, et al. Study on distribution of lightning stroke rate for lightning striking to catenary system with viaduct of high-speed railway based on fractal theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 77-84.
- [22] 袁涛, 王肖田, 司马文霞, 等. 山区输电线路雷击跳闸预警的融合算法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2528-2540.
- YUAN Tao, WANG Xiaotian, SIMA Wenxia, et al. Research on fusion algorithm of lightning strike trip warning for mountain transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2528-2540.
- [23] 庞宇, 郭俊, 陆佳骏, 等. 基于先导发展模型的船舶直击雷防护分析方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(7): 1346-1357.
- PANG Yu, GUO Jun, LU Jiajun, et al. Analysis method for direct lightning protection of ships based on the leader progression model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(7): 1346-1357.
- [24] 万浩江, 魏光辉, 陈强, 等. 雷电先导电的三维数值模拟与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 430-436.
- WAN Haojiang, WEI Guanghui, CHEN Qiang, et al. Three-dimensional numerical simulation of lightning discharge and its application[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 430-436.
- [25] FANG Y Q, MAO S H, YANG B S, et al. Experimental study on streamer-leader transition characteristics of sphere-plane gap in valve hall under positive switching impulse voltage[J]. Journal of Electrostatics, 2023, 125: 103829.
- [26] 方雅琪, 毛苏涵, 杨炳森, 等. 高海拔正极性操作冲击下球-板间隙流注起始发展特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6175-6186.
- FANG Yaqi, MAO Suhan, YANG Bingsen, et al. Initiation and development characteristics of streamer discharge of sphere-plane gaps under positive switching impulse in high altitude area[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6175-6186.
- [27] GAO J C, WANG L N, WU S C, et al. Experimental platform for

measuring electrical discharges in long air gaps with floating objects and its applications under lightning impulse[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 3103-3114.

[28] 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.

[29] 裴哲浩, 陈维江, 陈家宏, 等. 避雷针端部曲率半径对雷击接闪效能的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3636-3642. PEI Zhehao, CHEN Weijiang, CHEN Jiahong, et al. Lightning attractive efficiency analyses: effect from the curvature radius of lightning rod[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3636-3642.

[30] MA X Y, ZHUANG C J, WANG Z Z, et al. Positive leader velocity and discharge current considering leader branching under different air pressures[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(5): 1939-1943.

[31] HE H X, LIU L P, DING Y J, et al. Positive leaders propagate slower at higher altitudes: experimental evidence and theoretical explanation[J]. Geophysical Research Letters, 2022, 49(4): e2021GL095995

[32] 司马文霞, 李建标, 杨庆, 等. 雷电先导分形特性及其在特高压线路耐雷性能分析中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 86-91. SIMA Wenxia, LI Jianbiao, YANG Qing, et al. Fractal characteristics of lightning channels and its application to the analysis of the lightning

shielding performance of UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 86-91.



FANG Yaqi
Ph.D.

方雅琪
1990—, 女, 博士, 硕导
主要从事空气间隙放电、输变电设备运行维护相关研究工作
E-mail: fyyq@hbut.edu.cn



TIAN Shuangshuang
Ph.D.
Corresponding author

田双双(通信作者)
1989—, 女, 博士, 硕导
主要从事电气设备在线监测与故障诊断和 SF₆ 替代气体的研究工作
E-mail: tianss@hbut.edu.cn

收稿日期 2024-09-15 修回日期 2025-01-14 编辑 曹昭君