第 49 卷 第 2 期：525-535 高电压技术 Vol.49, No.2: 525-535
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221055

强暴雨条件下 110 kV 硅橡胶绝缘子雷电冲击电弧发展过程与闪络特性

董冰冰[1]，宋家乐[1]，李　特[2]，李建生[3]，蒋兴良[4]
（1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院，合肥 230009；2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，杭州 310014；3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211103；4. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆 400030）

摘　要：强暴雨常伴随雷电天气会导致输电线路、变电站和换流站绝缘子表面干、湿部位电场分布不均，易引发电场畸变，同时雷暴引起的雨柱会快速短接绝缘子伞间距，显著缩短电弧发展路径，致使线路跳闸并引起停电事故。为研究强暴雨条件下线路绝缘子雷电冲击放电特性和电弧发展过程，针对 3 种 110 kV 线路常用硅橡胶复合绝缘子开展了雷电冲击放电特性测试。结果表明：复合绝缘子雷电冲击电弧发展过程主要分为起弧、局部电弧发展、完全闪络，其放电发展时间及其持续时间均随降雨强度、雨水电导率的增大而降低；电弧平均发展速度随雨水电导率的增加呈幂指数关系上升，最大上升率高达 43.8%，并随降雨强度增加呈指数式增大，且与绝缘子伞裙结构参数有关。复合绝缘子雷电冲击闪络电压随降雨强度增加呈负幂指数关系降低，伞间距较大的绝缘子闪络电压受降雨强度的影响愈加明显；雨闪电压随雨水电导率的增加而呈负幂指数下降。基于此，提出了降雨强度、雨水电导率综合影响的复合绝缘子雷电冲击闪络电压计算式，计算结果与试验结果一致性良好，偏差小于 7%。研究结果为雷电活动频繁的强暴雨地区输电线路外绝缘设计、选择及防护提供了参考。

关键词：强暴雨；硅橡胶绝缘子；雷电冲击；放电特性；动态过程

Lightning Impulse Arc Development Process and Flashover Characteristics of 110 kV SIR Insulators Under Heavy Rainstorms

DONG Bingbing[1], SONG Jiale[1], LI Te[2], LI Jiansheng[3], JIANG Xingliang[4]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract：Heavy rainstorms, which are usually accompanied by lightning, can lead to an uneven distribution of the electric field in the dry and wet parts of the insulators of transmission lines, transformer substations, and converter stations, resulting in electric field distortion. Meanwhile, the rain streams caused by thunderstorms can quickly cause short-circuit between the insulator skirts and greatly shorten the flashover paths, resulting in line tripping and power failure accident. In order to study the lightning impulse discharge characteristics and arc development process of line insulators under heavy rainstorms, lightning impulse discharge characteristics of three types of silicone rubber composite insulators commonly used in 110 kV lines were tested in this paper. The results show that the development process of lightning impulse arc of composite insulator mainly includes arcing, local arc development, and complete flashover. The arc development time and the total flashover duration decrease with the increase of the rainfall intensity and rainwater conductivity. The average speed of the arc increases exponentially with the increase of rainwater conductivity, and the growth rate is as high as 43.8%. In addition, the average speed increases exponentially with the increase of rainfall intensity and depends on the structural parameters of the umbrella skirt. The lightning impulse flashover voltage exhibits a negative exponential corre-

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(J2022047)；高等学校人才引智计划项目(BP0719039)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (J2022047), Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (BP0719039).

lation with the rainfall intensity. The flashover voltage of insulators with a large umbrella skirt spacing is more severely affected by the rainfall intensity. Furthermore, the flashover voltage decreases in a negative power exponential correlation with the increase of rainwater conductivity. Based on these results, fitting expressions for the lightning impulse flashover voltage with the combined effect of rainfall intensity and rain conductivity were proposed in this paper. The calculation results are in good agreement with the experimental results, and the errors are less than 7%. The results can serve as a reference for the design, selection, and protection of the external insulation of transmission lines in areas with frequent lightning activities and heavy rainstorms.

Key words：heavy rain; SIR composite insulators; lighting impulse; discharge characteristics; dynamic process

0 引言

随着全球气候变暖，雷暴天气频繁发生，雷击故障率高居不下，雷电伴随强降雨易引起输电线路、变电站和换流站的外绝缘发生雨闪事故[1-3]。相关统计表明，雷击引发的输电线路跳闸次数占跳闸总数的 60%~80%[4-6]，已成为影响电网正常运行的首要因素。据报道，2020 年梅雨季节我国某省出现 40 余次在强暴雨天气下因雷击引起的 110 kV 及以上输电线路跳闸事故[7]。分析原因主要是降雨淋湿了绝缘子表面后，造成表面干、湿部位的电场分布不均，易引发电场畸变；同时暴雨产生的雨柱会迅速短接绝缘子伞裙间隙，导致放电电弧发展路径明显缩短，这两方面共同作用导致了输电线路外绝缘闪络电压降低。相较于玻璃和瓷绝缘子串，复合绝缘子具有较小的伞裙间隙、较密的伞裙数，强暴雨条件下伞裙爬电距离利用率较低，绝缘性能更易受影响。因此，雷暴天气下复合绝缘子的放电问题突出，研究强暴雨条件下复合绝缘子雷电冲击放电特性和电弧发展过程具有重要工程意义和学术价值。

目前，国内外学者对人工模拟降雨条件下绝缘子放电特性开展了相关研究，通过施加交流或者直流电压，利用人工降雨试验方法研究了绝缘子伞裙结构、降雨强度及雨水电导率等因素下的放电特性和闪络规律。文献[8]进行了降雨条件下支柱绝缘子闪络特性研究，结果发现：伞间距对绝缘子直流雨闪电压影响较大，增大伞间距可以有效抑制伞裙间雨柱桥接，提高绝缘子爬电距离利用率。文献[9]认为，变电站支柱绝缘子的直流闪络电压随降雨强度的增加而下降且具有饱和趋势，随雨水电导率的增加而下降。文献[10]利用有限元软件分析得到降雨状态下伞伸出差、伞间距和大伞伸出等伞裙结构参数对绝缘子串电场分布的影响规律，为伞裙结构优化提供了参考。文献[11]进行了降雨强度 5 mm/min、雨水电导率 100 μS/cm 条件下复合绝缘子的雨闪试验，研究认为电弧闪络过程并不是沿绝缘子的干弧距离延伸，而是在空气中发展至贯穿整个绝缘子串。文献[12]运用神经网络原理模拟了降雨时单个及多个环境因素对空气间隙击穿电压的影响，研究表明随着降雨强度、雨水电导率的增加，空气间隙的击穿电压随之减小。此外，文献[13]基于棒–板、导线–杆塔空气间隙进行正极性 1000 μs 长波前操作冲击放电试验，研究表明：在降雨条件下放电电压 U_{50} 与降雨强度、雨水电导率呈负幂函数关系。

现有研究主要是针对降雨条件下绝缘子交流或直流闪络特性分析，对雷电叠加强暴雨引起的绝缘子放电过程研究尚少；棒–板间隙雷击放电规律无法直接等效不同伞间距绝缘子的雷击放电特性及其作用规律。当雷击杆塔时，冲击电流使塔顶的电位迅速上升，导致塔顶与导线电位差急剧增大，可能引起绝缘子闪络；同时雷电流会通过闪络相绝缘子向导线两侧传播。若雷电流幅值较高时，会造成相邻杆塔的绝缘子闪络，导致线路故障[14]。因此，本文对强暴雨条件下的 110 kV 线路复合绝缘子雷电冲击特性进行研究，分析了降雨强度、雨水电导率、伞裙结构对其雷电冲击放电特性和电弧发展过程的影响规律，研究结果可为雷电活动频繁的强暴雨地区输电线路外绝缘设计、选择及防护提供参考。

1 试验装置与研究平台

本文采用某省 110 kV 线路中 3 种常用硅橡胶绝缘子进行模拟降雨条件下的雷电冲击放电试验，其主要技术参数如表 1 所示[7]。

表 1 试品绝缘子主要技术参数

Table 1 Technical parameters of insulator samples

类型	结构高度/mm	大伞间距/mm	大伞直径/mm	小伞直径/mm	大小伞裙数量
Ⅰ	1480	95	152	108	11/22
Ⅱ	1500	75	142	108	15/15
Ⅲ	1380	35	152		28

试验电源由 2400 kV/120 kJ 冲击电压发生器提供，可产生标准雷电冲击电压波形 1.2(1±30%) μs/50(1±20%) μs，符合 IEC 国际标准，标称电压 2400 kV，幅值±3%。试验原理如图 1 所示。

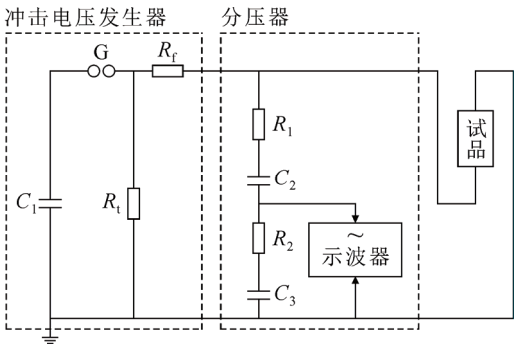
由文献[15]可知，某一瞬时强暴雨的降雨强度很大，很有可能导致绝缘子发生雨闪进而引起线路跳闸。因此，实验室通过模拟强暴雨环境中的最大瞬时降雨强度，使得绝缘子伞裙雨帘桥接效果与闪络时刻相同。本试验所采用的复合绝缘子，结构高度达 1.5 m，若采用喷嘴式雨排装置无法达到强暴雨条件下绝缘子伞裙桥接甚至形成完全雨帘，增大了试验过程中降雨强度的调节难度，多次调节对试验结果的可比性和重复性均造成影响。此外，采用调节风扇风速模拟自然风环境方法无法保证长串复合绝缘子伞裙及其周围受风均匀度，难以实现暴雨过程中的风偏模拟。因此，本文自制集中式淋雨器，试验时将淋雨器置于绝缘子串正上方，将绝缘子分为淋雨侧和非淋雨侧，能够时刻满足强暴雨中的最大瞬时强度，且降雨量控制更为简单、精确、稳定。

实验室模拟降雨强度为 3~12 mm/min 时，复合绝缘子伞裙桥接形态如图 2 所示。为了保证试验数据的有效性，每隔 3~5 min 测量降雨强度，保证降雨强度偏差在 10%之内。试验过程中采用 DDS–11A 型电导率仪测量雨水电导率 γ，试验环境温度为 27~30 ℃。采用 Fastcam SAZ 型高速摄像机拍摄从绝缘子起弧到完全闪络的发展过程，拍摄时高速相机设置的速度为 700 000 帧/s，相机曝光时间为 1/900 000 s，分辨率为 256×56。

本文采用升降法[16]对绝缘子 50%雷击放电电压进行测试。加压实验时，首先预估 50%放电电压 U_m，以 U_m 作为初始电压施加于试品上，并以 U_m 的 3%作为电压级差 ΔU，如若击穿，应降低 ΔU 加压；若未击穿，则升高 ΔU 加压。保证每个试验点的有效试验次数大于 30 次，两次试验之间间隔 3~5 min。每次试验均记录环境温度值。

试品绝缘子的 50%雷击雨闪电压 U_{50} 由 GB/T16927.1—2011[17]推荐方法求取，在试验中舍弃标准偏差大于 5%的结果。U_{50} 和 σ 的计算式为

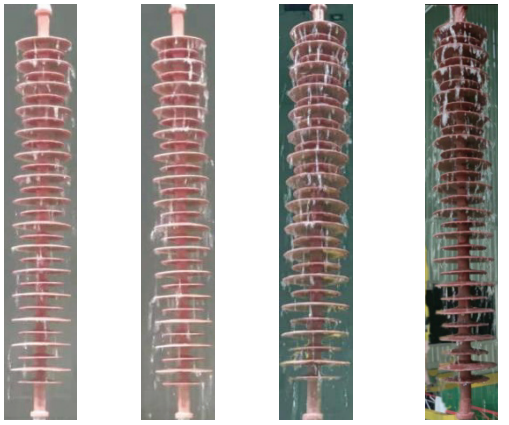
$$\begin{cases} U_{50}=\dfrac{\sum(n_iU_i)}{n} \\ \sigma=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n-1}(U_i-U_{50})^2}{n-1}} \end{cases} \tag{1}$$



C_1—冲击发生器主电容；G—放电球隙；R_t—波前电阻；R_f—波尾电阻；R_1、R_2—阻尼电阻；C_2—冲击分压器高压臂电容；C_3—冲击分压器低压臂电容

图 1　复合绝缘子雨闪雷电冲击试验原理图

Fig.1　Schematic diagram of rainfall flashover test



3 mm/min　6 mm/min　9 mm/min　12 mm/min

图 2　绝缘子淋雨示意图

Fig.2　Insulator falling uniformly in rain

式中：U_i 为第 i 次施加的电压，kV；n_i 为相同的施加电压 U_i 下试验的次数；n 为有效试验的总次数。

2　结果与分析

2.1　复合绝缘子雷击雨闪电弧发展过程

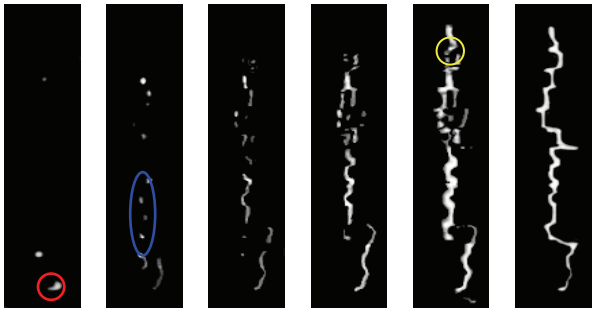
2.1.1　复合绝缘子雷击雨闪电弧发展过程

为了研究强暴雨条件下绝缘子雷击雨闪电弧的发展过程，本部分在进行雷击电弧发展过程分析时，通过示波器采集电压波形起始时上升脉冲并产生 Trigger-out 信号，同步触发高速相机，设每张放电照片的时刻分别为 t_1、t_2、…、t_n，其中 Δt=1.43 μs，Ⅰ、Ⅱ、III 号绝缘子雷击雨闪电弧发展过程如图 3 所示。根据试品绝缘子高、低压端及伞裙间局部电弧形态变化及发展情况，将复合绝缘子雷击雨闪过程划分为起弧阶段、局部电弧发展和闪络 3 个阶段：

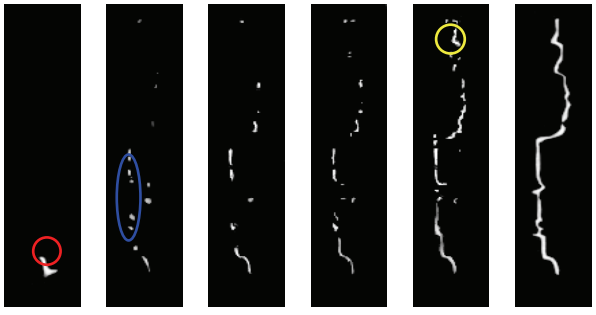
1）起弧阶段(阶段特征如 t_1 图中圆圈所示)：当

强暴雨环境下的绝缘子高压端承受的场强大于空气的击穿场强时，气体和高压端的电子获得了足够能量，足以克服原子核的吸引力，发生游离，产生了电晕放电，表现为团状的电晕放电现象。随着能量的继续累积提升，电晕放电逐渐强烈，转化为局部电弧，绝缘子完成起弧[18]。

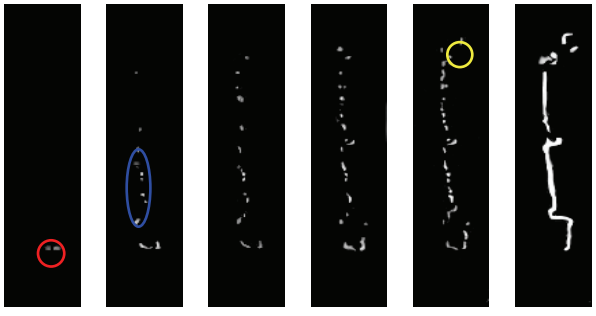
2）局部电弧发展阶段(阶段特征如 t_4 图中圆圈所示)：绝缘子中间伞裙边缘由于电场畸变，出现了多处局部放电，引起伞裙表面以及伞裙间隙雨柱中出现了局部电弧，降低了伞裙间隙的绝缘强度，促进了新的局部电弧的产生，使得放电通道迅速发展，形成紫色、明亮的电弧。沿面放电电弧被电场法向分量紧紧压在水柱和绝缘子伞裙表面上，在切向分量作用下，电弧与介质表面摩擦，并向绝缘子接地端和高压端延伸。



(a) Ⅰ号绝缘子



(b) II 号绝缘子



(c) III 号绝缘子

图 3 Ⅰ、Ⅱ、III 号绝缘子雨闪冲击闪络过程

Fig.3 Impulse discharge development on Ⅰ、Ⅱ、III insulator

3）闪络阶段(阶段特征如 t_{14} 图中圆圈所示)：当电源供给的电弧能量足够大，电场畸变到一定程度后，试品接地端出现放电痕迹，与迅速发展沿面放电电弧连通，在此过程中电弧直径变粗，亮度提升，形成连续、凝实的放电通道，绝缘子完成闪络。

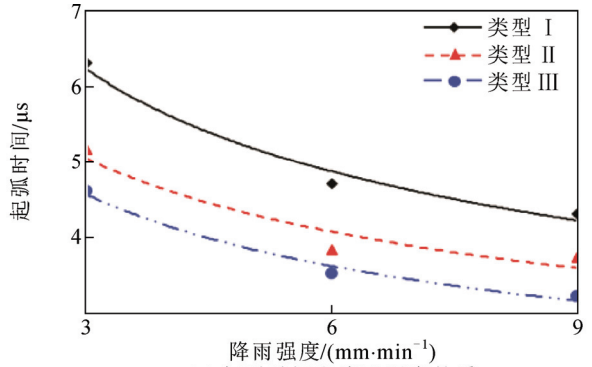
2.1.2 复合绝缘子雷击雨闪电弧特征参数变化规律

提取 3 种试品绝缘子在不同降雨参数条件下的高压端平均起弧时间(见图 4)，分析可得：

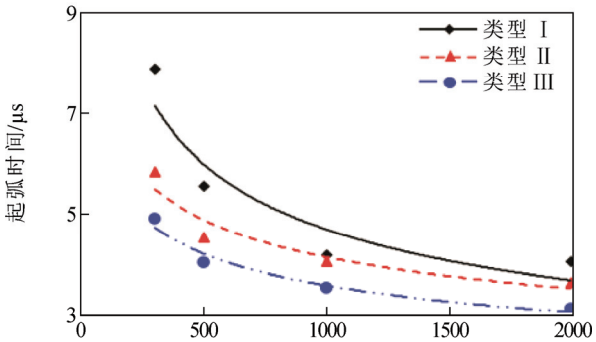
1）平均起弧时间

① 3 种绝缘子起弧时间均随降雨强度增大而呈负幂指数式降低。其中Ⅰ号绝缘子起弧时间受降雨强度的影响最大，从降雨强度为 3 mm/min 时的 6.3 μs 降低至降雨强度为 9 mm/min 时的 4.3 μs，下降幅度达到 31.7%。

② 起弧时间与雨水电导率呈负相关，且具有饱和趋势。当雨水电导率在 300~500 μS/cm 时，Ⅰ、Ⅱ号绝缘子起弧时间变化明显，分别降低了 52.2%、46.4%，III 号绝缘子起弧时间仅降低 18%；500~2000 μS/cm 时，3 种绝缘子起弧时间分别降低 19.1%、15.4%、19.8%。分析可知，随着雨水电导率的增加，高压端侧的雨柱尖端表面附着了更多的带电粒子，表面场强畸变更为严重；雨水电导率增加使得绝缘



(a) 起弧时间和降雨强度关系



(b) 起弧时间和雨水电导率关系

图 4 起弧时间与雨水条件参数的关系

Fig.4 Relationship between arcing time and rainwater parameters

子表面水膜及伞裙间雨柱之间近似形成等势体，高低压端场强增加，有利于起弧。

基于上述试验结果，本文利用 COMSOL 软件建立了 3 维绝缘子雨闪模型，研究了不同降雨强度下绝缘子伞裙的电场分布。仿真计算中采用的各介质物理参数如表 2 所示，采用双指数函数近似模拟标准雷电冲击电压的波形。雨闪模型如图 5 所示，不同长度雨柱设在绝缘子淋雨侧，雨柱长度由中间向两端递减，并在绝缘子伞裙表面覆有水膜。随着降雨强度的增大，绝缘子伞裙边缘的雨柱长度随之增加[19]，因此本文通过更改雨柱长度模拟不同降雨强度下伞裙桥接情况。仿真计算得到不同降雨强度下高压端—高压端侧第一个大伞裙之间空气间隙平均场强与降雨强度的关系如图 6 所示。

随着降雨强度的增加，高压端侧伞裙下方形成的雨柱更长，更靠近高压端，和雨柱断裂产生的悬浮液滴共同作用提高了间隙的平均场强，使得电离生成的电子数增多，促进流注的产生[20]，其中 III 号绝缘子间隙平均场强从 3 mm/min 时的 30 kV/cm 增加至 9 mm/min 时的 43 kV/cm，增加了 43%。同时降雨强度的增强使得伞裙间空气间隙缩短，导致高压端和低压端电场畸变更强，有利于起弧。III 号绝缘子由于高压端、接地端与伞裙距离最近，空气间隙平均场强最高，更易产生电晕，起弧速度相较于 Ⅰ、Ⅱ 号绝缘子更快。

2）电弧发展时间和持续时间

设绝缘子起弧为 T_0 时刻，完全闪络为 T_1 时刻，闪络截止为 T_2 时刻，则电弧发展时间为 $\Delta T_1=T_1-T_0$，持续时间为 $\Delta T_2=T_2-T_1$。图 7 为 T_0、T_1 和 T_2 时刻下的电弧形态和放电电压波形，3 种复合绝缘子在不同降雨参数下的 ΔT_1 和 ΔT_2 如图 8 所示。

分析图 8 中可以得到：

① 3 种绝缘子电弧发展时间和持续时间均随降雨强度的增大呈负幂指数式降低。降雨强度较小时，相较于 Ⅰ、Ⅱ 号，III 号绝缘子电弧发展时间最短、持续时间最长。分析可知，降雨强度的增加使得伞裙间雨柱及雨滴的表面电场畸变程度增强，引起电场的不均匀度提高，有利于初始电子崩的产生，同时水滴的电离能仅为 6.1 eV[21]，小于水分子的(12.59 eV)和氧分子(12.5 eV)的电离能，更易发生电离，促进了流注的产生。小降雨强度下，III 号绝缘子伞间距最小，雨柱桥接较为严重，电弧沿绝缘子表面和雨柱发展过程中，路径较为笔直，如图 3(c)

表 2　材料参数

Table 2　Material parameters

材料	空气	雨水	铝	硅橡胶
电导率/(μS·cm^{-1})	1×10^{-14}	300	3.7×10^{11}	1×10^{-12}
相对介电常数	1	81	1000	6

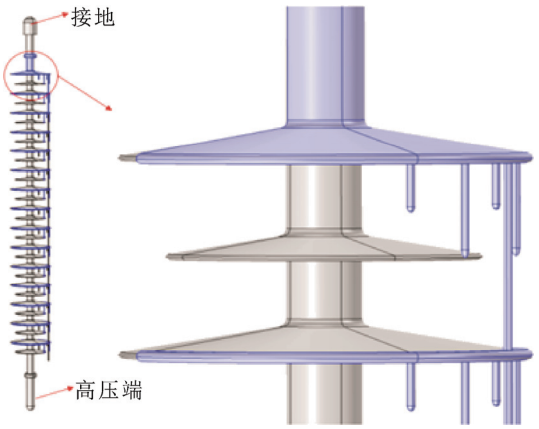


图 5　仿真模型

Fig.5　Simulation model

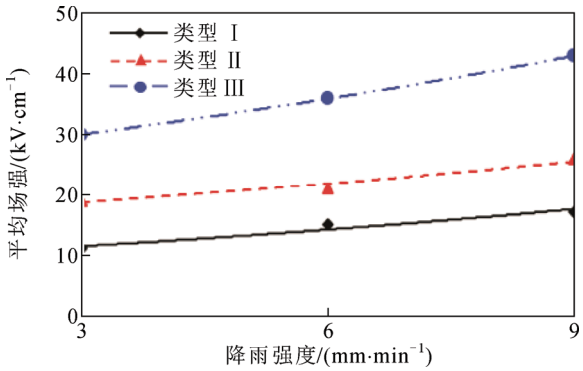


图 6　间隙平均场强与降雨强度关系

Fig.6　Relationship between mean field intensity and F

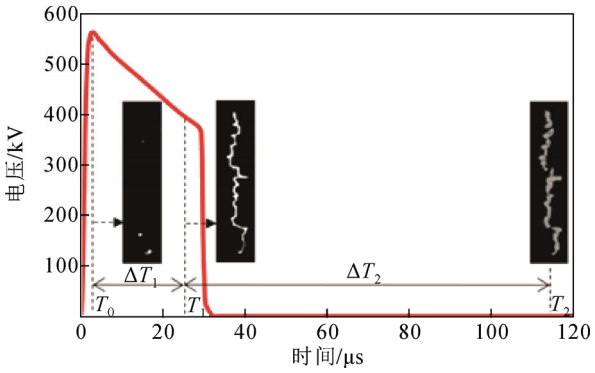


图 7　T_0、T_1 和 T_2 时刻下的电弧发展和波形

Fig.7　Arc development at T_0, T_1 and T_2 and flashover voltage waveform

所示；而Ⅰ、Ⅱ号绝缘子的放电路径受雨柱桥接效果影响明显，曲折度较大，电弧发展时间较长。此外，降雨强度的增加使得水柱与绝缘子伞裙碰撞增强，在绝缘子周围产生更多的水汽分子，吸附空气中放电产生的电子，促进带电粒子的复合及电弧的消散，相较于水柱，空气间隙需要更大的场强才能维持击穿，因此Ⅰ、Ⅱ号绝缘子放电持续时间降低。

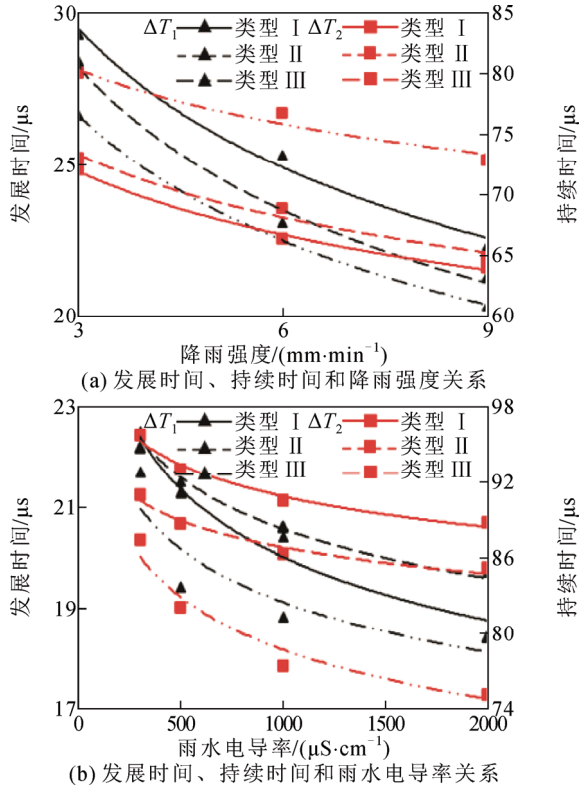
② 3 种绝缘子电弧发展时间和持续时间均随雨水电导率的增加呈下降趋势，最大降幅分别达到(3.8 μs、7 μs)，(2.8 μs、5.8 μs)和(4.1 μs、14.3 μs)。一方面，雨水电导率增加会提高水中 Na^+、Cl^-数量，在雨柱、伞裙边缘表面积聚更多的带电粒子，加剧电场的畸变程度，增加了注入弧柱的能量，粒子电离度提高，电子密度增加，促进了电子从高浓度向低浓度扩散，电弧发展速度加快，同时一个伞裙间会出现多个放电通道(见图 3(a))，增加了放电通道路径选择性。另一方面，雨水电导率的提高会使得绝缘子表面雨膜以及雨柱中粒子数增加，电子与水中粒子碰撞几率增加，当外部能量停止输入后，电子能量损失更快，持续时间也会降低。

2.1.3 复合绝缘子雷击雨闪电弧 3 维重构

本文利用 2 台高速摄像机正交拍摄，确定放电通道轴线，获得电弧通道上各点的 3 维空间坐标，顺次连接得到电弧通道的 3 维空间结构。对得到的 3 维模型进行微分化处理，得到放电通道路径长度为 L，利用计算式 $v=L/\Delta T_1$，可获得电弧的平均发展速度，结果如图 9 所示。分析可知：

1）电弧平均发展速度随雨水电导率的增加呈幂指数增加，其中Ⅰ号绝缘子的平均发展速度从 300 μS/cm 时的 117.5 mm/μs 上升至 2000 μS/cm 时的 169 mm/μs，提高了 43.8%。随着雨水电导率的增加，伞裙表面及边缘电场畸变点增多，畸变程度增强，放电电弧沿伞裙表面、边缘发展，电弧通道的曲折度增大，引起发展路径增长；此外，雨水电导率的增加降低了绝缘子起弧时间和电弧发展时间。综合两方面共同影响，电弧发展速度明显增大。

2）电弧平均发展速度均随降雨强度增大呈指数式上升，3~9 mm/min 时，平均发展速度分别上升了 13.7%、16.7%、19.7%。一方面，随着降雨强度的增加，水柱流速越快，动能越大，Na^+、Cl^-越活跃，更易受到电场扰动从基态转变成激发态并发生电离。另一方面，绝缘子各伞裙间的电场极值以及畸变率随之增大，并且绝缘子处于极不均匀电场中，

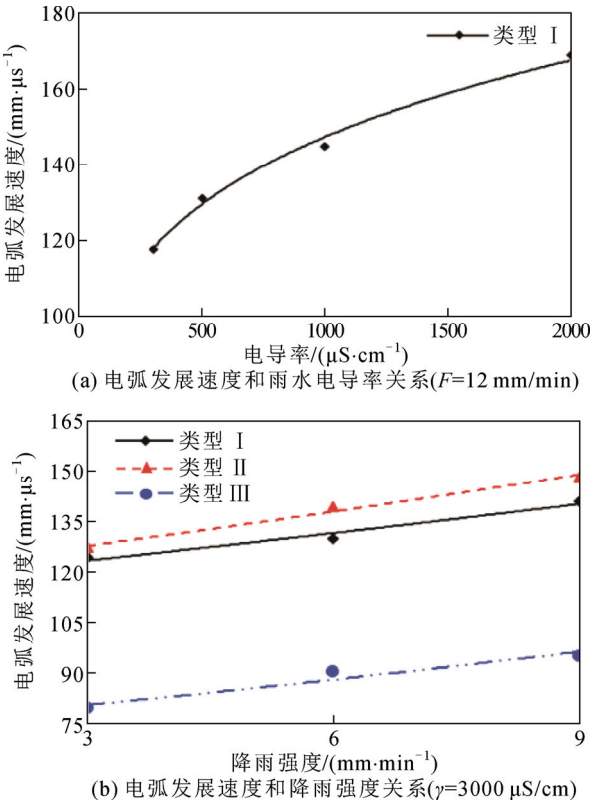


(a) 发展时间、持续时间和降雨强度关系

(b) 发展时间、持续时间和雨水电导率关系

图 8 发展时间、持续时间与雨水条件参数的关系

Fig.8 Relationship between the development of time, duration and rainwater parameters



(a) 电弧发展速度和雨水电导率关系(F=12 mm/min)

(b) 电弧发展速度和降雨强度关系(γ=3000 μS/cm)

图 9 电弧发展速度与雨水条件参数关系

Fig.9 Arc development rate and rainwater parameters

具有较强的电场强度垂直分量，放电模型如图 10 所示，其中红线为电弧发展路径，蓝线为电场线。在水柱通道以及绝缘子上表面，沿面电弧运动方向与电场强度切向方向相同，有利于放电的发展，但在下表面，电场切向分量方向与放电前进方向相反，阻止放电的发展。在伞裙对电弧发展的阻碍作用下，III 号绝缘子电弧发展速度明显低于 I、II 号绝缘子。

2.2　降雨强度 F 对 U_{50} 的影响

3 种试品绝缘子在干燥和潮湿条件下的雷电闪络电压如表 3 所示。

暴雨、大暴雨和特大暴雨时的降雨强度瞬时值范围约为 2.68~4.24、4.24~6.26、6.26~12.38 mm/min[22]。鉴于此，本文试验模拟选取降雨强度为 3，6，9、12 mm/min 分别模拟暴雨、大暴雨和特大暴雨，本文将 3~12 mm/min 降雨强度统称为强暴雨。不同降雨强度下绝缘子雷击雨闪电压(γ=300 μS/cm)如图 11 所示。

根据现有研究结果，绝缘子的雷击雨闪 U_{50} 和降雨强度 F 之间符合负幂指数函数关系。

$$U_{50} = A \times F^{-a} \tag{2}$$

式中：A 为系数，与绝缘子结构有关；F 为降雨强度，mm/min；a 为 F 对绝缘子 U_{50} 的影响指数，数值越大则 F 变化对 U_{50} 的影响越明显。

对图 11 数据按照式(2)拟合得到试品 I、II、III的 U_{50} 和 F 的拟合系数如表 4 所示。

分析图 11 和表 4 可知：

1）随着降雨强度的增大，3 种绝缘子的雷击雨闪电压均会下降，但降雨强度变化对其影响程度存在明显差异。0~12 mm/min 时，3 种绝缘子雨闪电压分别降低 168.5、123 和 74.2 kV，分别下降了 20.7%、16.1%和 10%。

2）I、II、III号绝缘子的降雨强度影响特征指数分别为 0.105、0.091、0.053，I、II 号绝缘子雨闪电压受到降雨强度的影响程度明显大于III号绝缘子。这是由于当降雨强度较小时，III号绝缘子的等伞径伞裙易被桥接形成雨帘/柱，使得伞裙之间的电场产生畸变，缩短了空气间隙长度，使其雨闪电压显著降低；而 I、II 号绝缘子由于大小伞交错布置造成大伞间距较大，在不同降雨强度下雨柱的桥接效果存在明显差异。在小降雨强度下伞裙间仍有较长的空气间隙，爬电距离利用率大，降雨强度继续增大对伞裙桥接效果影响明显。因此，I、II 号绝缘子雷击雨闪电压受降雨强度的影响更为明显，适用于降雨强度较小的地区；而III号绝缘子更适用于特大暴雨频发的地区。

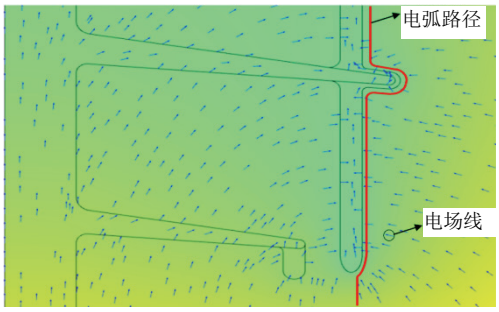


图 10　沿面放电沿绝缘子伞裙表面发展

Fig.10　Development of surface discharge along the surface of the insulator umbrella skirt

表 3　干燥和潮湿条件下的雷击雨闪电压

Table 3　U_{50} under dry and wet conditions

类型	F	γ	U_{50}	类型	F	γ	U_{50}
I	0	0	813.5	I	1	300	768.7
II	0	0	763	II	1	300	740
III	0	0	740.5	III	1	300	725

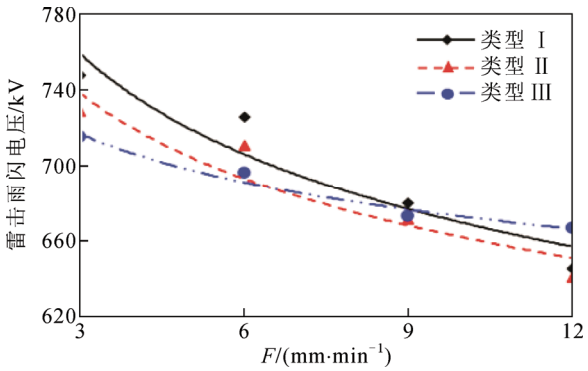


图 11　复合绝缘子雷击雨闪电压和降雨强度关系

Fig.11　Lightning flashover voltage and rainfall intensity

表 4　复合绝缘子雷击雨闪电压与降雨强度拟合参数

Table 4　Fitting parameters of U_{50} and rainfall intensity

绝缘子类型	A	a	R^2
I	851.8	0.105	0.90
II	816.1	0.091	0.89
III	759.8	0.053	0.97

在试验研究的基础上，获得了 t=2 μs 时不同降雨强度条件下、雨水电导率为 3000 μS/cm 的淋雨侧伞裙雨柱中心(图 5 所示)电场分布如图 12 所示。随着降雨强度的增加，伞裙边缘的雨柱长度渐进增大，缩短了伞裙间的空气间隙，引起伞裙间的最大场强和电场的畸变程度逐渐增加，特别是伞裙间雨柱尖

端处畸变最为严重。其中最大场强位于最后一个完全桥接伞裙下的雨柱尖端，从 3 mm/min 时的 24 kV/cm 增加至 12 mm/min 下的 40.02 kV/cm，提高了 67%。因此，强暴雨环境将显著增大绝缘子电弧的发生几率，为电弧闪络发展提供了有利条件。

2.3 雨水电导率 γ 对 U_{50} 的影响

根据文献[23]统计，我国环境污染严重地区雨水电导率可达 2680 μS/cm，且在强暴雨情况下，伞裙表面污秽会在降雨初期被雨水冲洗，提高了雨水电导率。因此本文选取雨水参数的范围为 300~3000 μS/cm、降雨强度 12 mm/min，研究强暴雨环境中不同雨水电导率下绝缘子雷电冲击闪络特性，不同雨水电导率下绝缘子雷击放电电压如图 13 所示。

根据现有研究结果，绝缘子雷击雨闪 U_{50} 和雨水电导率 γ 之间符合负幂指数函数关系。

$$U_{50} = B \times \gamma^{-b} \tag{3}$$

式中：B 为系数，与绝缘子结构有关；γ 为 25 ℃时的雨水电导率，μS/cm；b 为 γ 对 U_{50} 的影响指数，数值越大则 γ 对 U_{50} 的影响效果越明显。

对图 13 数据进行拟合得到绝缘子雷击雨闪电压与雨水电导率拟合系数如表 5 所示。分析图 13 和表 5 可知：

1）绝缘子雷击雨闪电压随雨水电导率的增加而降低；300~2000 μS/cm 时，绝缘子雨闪电压下降幅度较大，2000~3000 μS/cm 时，雷击雨闪电压下降幅度较小，具有饱和趋势。

2）3 种绝缘子雨水电导率影响特征指数分别为 0.129、0.135、0.14。可以看出，这些指数之间的差异并不明显，即在强暴雨环境下，3 种绝缘子受雨水电导率的影响特征较为一致。

3）强暴雨条件下，$U_{50\text{III}}>U_{50\text{II}}>U_{50\text{I}}$。3 种绝缘子伞裙已完全被雨柱桥接，电弧受电场力切向分量的影响明显。由于III号绝缘子具有 28 片大伞裙，远超过 I、II 号绝缘子，沿面放电在绝缘子下表面发展过程中，受到的抑制效果更强，因此需要更高的外施电压才能使绝缘子发生闪络[24]。

2.4 降雨强度 F 和雨水电导率 γ 的综合影响

由前述分析可知，强暴雨下绝缘子串雷击雨闪电压 U_{50} 与雨水电导率 γ、降雨强度 F 均呈负幂指数关系，令 U_{50} 与 F、γ 之间具有以下关系式。

$$U_{50} = C \times F^{-c} \times \gamma^{-d} \tag{4}$$

式中：C 为系数，与绝缘子结构有关；c 为表征降雨强度对 U_{50} 影响的特征指数；d 为表征雨水电导率对 U_{50} 影响的特征指数。

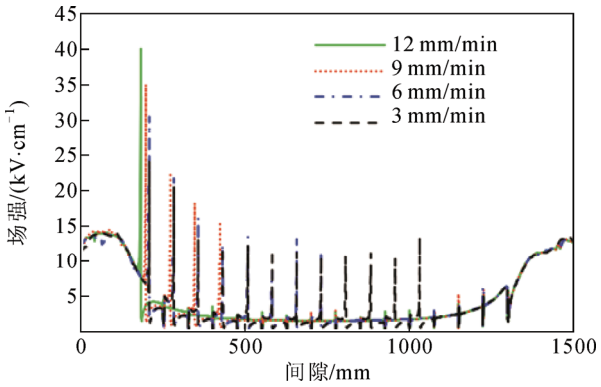


图 12 不同雨柱存在时的复合绝缘子雨柱中心电场分布

Fig.12 Electric field distribution at the centre of the rain streams

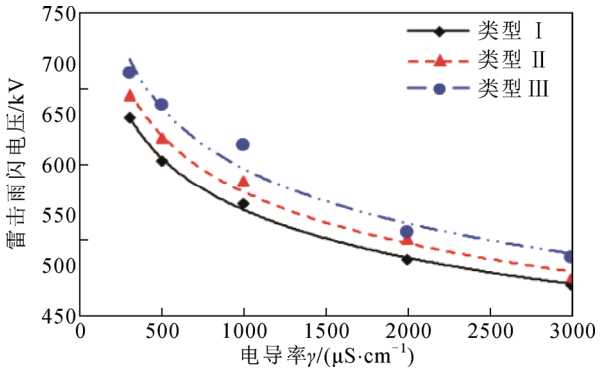


图 13 复合绝缘子雷击雨闪电压和雨水电导率 γ 关系

Fig.13 Lightning flashover voltage and γ

表 5 复合绝缘子雷击雨闪电压与雨水电导率拟合参数

Table 5 Fitting parameters of U_{50} and γ

绝缘子类型	B	b	R^2
I	1352.7	0.129	0.995
II	1457.9	0.135	0.9252
III	1563.0	0.140	0.9824

本文利用 1stOpt5.0、Matlab 统计分析软件拟合试验数据，分别得到 3 种绝缘子雷击雨闪电压 U_{50} 与 F、γ 的关系如图 14 所示，拟合参数如表 6 所示。由表 6 及图 14 可知：

1）3 种绝缘子的雷击雨闪电压 U_{50} 与降雨强度 F 及雨水电导率 γ 近似呈式(4)变化关系(R^2>0.93)，随着降雨强度、雨水电导率的增加，U_{50} 逐渐降低；且在降雨强度、雨水电导率较大时，U_{50} 下降较快，随降雨强度、雨水电导率增加，U_{50} 下降呈饱和趋势。经分析，在低降雨强度、雨水电导率条件下，伞裙间隙被雨柱部分桥接，空气间隙缩短，电场畸

变效果明显，促进了碰撞电离，加快带电粒子运动速度，降低了 U_{50}。随着降雨强度的增大，空间中悬浮的雨滴数量增多、直径增大，伞裙边缘雨柱的直径、长度同样增大，表面积聚的带电粒子数量增加，由于雨柱、雨滴内部场强较低，外部场强较高，加剧了空间电场畸变效果，有利于放电的发生；当雨水电导率增大时，作为悬浮导体的雨滴其导电性更强，因此也能够在其表面积聚起更多的带电粒子，从而增强雨滴附近的电场强度，降低间隙的放电电压。其中，降雨强度 3~12 mm/min、雨水电导率 300~3000 μS/cm 时，U_{50} 最大下降幅度分别达到 35.8%、33.4%、29.4%。

2）拟合系数 C_{I} 和 C_{II} 的差异较小(<3%)，且大于 C_{III}，且 $c_{\mathrm{I}}>c_{\mathrm{II}}>c_{\mathrm{III}}$。分析原因，主要是因为Ⅰ、Ⅱ号绝缘子的结构高度、大伞间距接近，明显大于Ⅲ号绝缘子，大伞间的空气间隙在小降雨强度下桥接困难，抑制了电弧通道的发展，使得Ⅰ、Ⅱ号绝缘子在小降雨、低电导率条件下难以击穿，伞裙桥接形态受降雨强度的影响明显，U_{50} 随降雨强度变化较为显著，$U_{50\mathrm{I}}>U_{50\mathrm{II}}>U_{50\mathrm{III}}$；而 d_{I}、d_{II}、d_{III} 较为接近，即绝缘子结构参数对 d 的影响差异可以忽略，这与雨水电导率单独作用时一致。

为了验证拟合公式的准确性，本部分进一步开展了多种试验条件参数下 3 种绝缘子的雷电冲击放电试验验证，试验及计算结果如表 7 所示。

由表 7 可知，计算结果和试验结果的偏差均小于 7%，试验结果验证了计算公式的准确性，即采用表 6 中拟合式的计算结果与试验结果较为吻合，可以得到满意的结果。因此，建议采用本文提出的计算公式用来计算降雨强度与雨水电导率综合作用影响下的复合绝缘子串雷电冲击闪络电压，可为雷暴天气频发地区输电线路复合绝缘子的工程选择提供参考。

3　结论

1）复合绝缘子雷击雨闪电弧发展过程分为“起弧—局部电弧发展—完全闪络”，其中绝缘子起弧时间、放电发展时间和持续时间均随降雨强度、雨水电导率增大而降低。雷击雨闪电弧平均发展速度随雨水电导率的增加呈幂指数式增大，最大上升幅度达 43.8%；随降雨强度增加呈指数式增大，平均上升幅度为 16.7%，且与绝缘子伞裙结构有关。

表 6　雷击雨闪电压与雨水参数关系的拟合参数

Table 6　The fitting parameters of U_{50} and F with γ

绝缘子类型	C	c	d	R^2
Ⅰ	1732.6	0.145	0.108	0.934
Ⅱ	1684.4	0.109	0.116	0.934
Ⅲ	1459.8	0.060	0.112	0.979

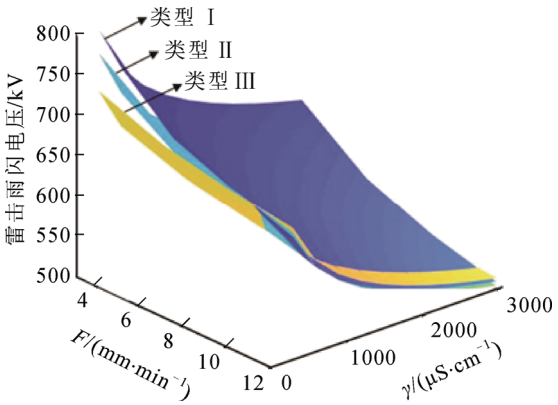


图 14　雨闪电压与降雨强度、雨水电导率的关系

Fig.14　Relationship of lightning flashover voltage and γ with F

表 7　绝缘子雷电冲击试验结果及预测

Table 7　Test and calculation results of U_{50}

绝缘子类型	F/(mm·min^{-1})	γ/(μS·cm^{-1})	试验结果/kV	计算结果/kV	偏差/%
Ⅰ	2	800	723.4	761.2	5.2
Ⅱ	2	800	684.1	719.2	5.1
Ⅲ	2	800	644.3	662.3	2.8
Ⅰ	2	1500	682.4	711.3	4.2
Ⅱ	2	1500	650.2	668.7	2.8
Ⅲ	2	1500	595.9	617.3	3.6
Ⅰ	2	2500	634.8	673.1	6.0
Ⅱ	2	2500	621.5	630.2	1.4
Ⅲ	2	2500	559.8	583	4.1
Ⅰ	7	800	623.7	634.8	1.8
Ⅱ	7	800	614.5	627.4	2.1
Ⅲ	7	800	606.3	614.4	1.3
Ⅰ	7	1500	602	596.0	−1.0
Ⅱ	7	1500	571.2	587.7	2.9
Ⅲ	7	1500	564.1	571.6	1.3
Ⅰ	7	2500	540.4	561.3	3.9
Ⅱ	7	2500	526.7	549.8	4.4
Ⅲ	7	2500	518.2	540.8	4.4

2）随着降雨强度的增大，110 kV 复合绝缘子雷击雨闪电压呈负幂指数关系下降，最大降幅为 20.7%，伞间距较大的绝缘子雷击雨闪电压受到降雨强度的影响更为显著。本文建议Ⅰ、Ⅱ号绝缘子适合于降雨强度较小的地区，Ⅲ号绝缘子适合特大暴雨频发地区；随雨水电导率的增加，复合绝缘子雷击雨闪电压呈负幂函数关系下降，最大降幅达

27.4%，且受雨水电导率的影响特征较为一致。

3）复合绝缘子雷击雨闪电压随降雨强度、雨水电导率的增加而逐渐降低，且具有饱和趋势；降雨强度影响特征指数 c_{I}> c_{II}> c_{III}，雨水电导率影响特征指数 d_{I}、d_{II}、d_{III} 接近，与雨水电导率单独作用时一致。提出了雨水电导率与降雨强度综合影响的复合绝缘子雷击雨闪电压计算式，计算结果与试验结果间的百分偏差均小于 7%，可为雷暴频发地区输电线路绝缘子的工程选择提供参考。

参考文献 References

[1] 陈宝辉，邓 捷，吴传平，等. 110~1900 μm 水雾对棒–板长间隙雷电冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2964-2970.
CHEN Baohui, DENG Jie, WU Chuanping, et al. Influence of water spray with a diameter of 110~1900 μm on lighting impulse discharge characteristics of long rod-plate gap[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2964-2970.

[2] 徐文宝，周建华. 基于改进模糊层次综合评判法的输电线路舞动预警[J]. 电力工程技术，2021，40(5)：107-113.
XU Wenbao, ZHOU Jianhua. Early warning model of transmission line galloping based on improved fuzzy hierarchical comprehensive evaluation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5): 107-113.

[3] WU X H, CAO B, LI Z, et al. DC breakdown characteristic of air gap with water droplets[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(6): 1962-1968.

[4] 谢雄杰，罗晓庆，胡 伟，等. 不均匀淋雨条件下 SF_6 绝缘直流穿墙套管直流电压闪络特性[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2084-2090.
XIE Xiongjie, LUO Xiaoqing, HU Wei, et al. DC voltage flashover characteristics of SF_6 insulated DC wall bushing under uneven rain conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2084-2090.

[5] 韩 彬，陈维江，陈秀娟，等. 特高压可控避雷器参数配置及控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1055-1063.
HAN Bin, CHEN Weijiang, CHEN Xiujuan, et al. Parameter configuration and control strategy of UHV controllable metal oxide arrester[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1055-1063.

[6] 邓阿妹，魏 凤，牟乾辉，等. 基于专利分析的电网雷电防护技术发展研究[J]. 高压电器，2019，55(9)：78-85.
DENG Amei, WEI Feng, MOU Qianhui, et al. Research on development of lightning protection technology for power grid based on patent analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 78-85.

[7] 周象贤，刘 黎，王少华，等. 浙江电网自然灾害特征、趋势与预测技术概况[J]. 浙江电力，2021，40(5)：20-29.
ZHOU Xiangxian, LIU Li, WANG Shaohua, et al. An overview on characteristics, tendency and prediction technology of natural disasters in Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(5): 20-29.

[8] LIN Y, SHANG G F, KUANG Z Q, et al. Experimental investigation on flashover characteristics of hollow porcelain insulator under extreme rainfall[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 203: 107659.

[9] 张福增，赵 锋，王黎明，等. 高海拔地区复合支柱绝缘子的污雨闪特性[J]. 中国电机工程学报，2010，30(1)：14-19.
ZHANG Fuzeng, ZHAO Feng, WANG Liming, et al. Wet flashover characteristic of composite post insulators at high altitudes[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 14-19.

[10] SHANMUGAM G, KARAKKAD S. Influence of the insulator geometry on the streamer propagation characteristics in polymeric insulators under positive polarity lightning impulse voltages[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(8): 1082-1088.

[11] DE LA O A, GORUR R S. Flashover of contaminated nonceramic outdoor insulators in a wet atmosphere[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 814-823.

[12] 袁 耀，蒋兴良，杜 勇，等. 应用人工神经网络预测棒–板短空气间隙在淋雨条件下的交流放电电压[J]. 高电压技术，2012，38(1)：102-108.
YUAN Yao, JIANG Xingliang, DU Yong, et al. Predictions of the AC discharge voltage of short rod-plane air gap under rain conditions with the application of ANN[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 102-108.

[13] 胡建林，石 璧，杨晓辉，等. 强降雨条件下空气间隙长波前操作冲击放电特性[J]. 高电压技术，2018，44(12)：3888-3895.
HU Jianlin, SHI Bi, YANG Xiaohui, et al. Discharge characteristics of air gap subject to long wavefront switching impulse voltage under heavy rain condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3888-3895.

[14] 刘 浩，韩永霞，陈长富，等. 配电线路雷击跳闸率计算及差异化防雷方法研究[J]. 电瓷避雷器，2020(4)：7-13，20.
LIU Hao, HAN Yongxia, CHEN Changfu, et al. Research on lightning trip rate calculation and differentiated lightning protection of distribution line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(4): 7-13, 20.

[15] 蒋兴良，周龙武，胡建林，等. 强暴雨下瓷、玻璃绝缘子串交流闪络特性研究[J]. 高压电器，2014，50(7)：1-7.
JIANG Xingliang, ZHOU Longwu, HU Jianlin, et al. AC flashover performance of porcelain and glass insulator strings in heavy rainstorm[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 1-7.

[16] PINZAN D, BRANCO F, HADDAD M A, et al. Performance of composite outdoor insulator under superimposed direct and switching impulse voltages[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1193-1201.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 第一部分：一般定义及试验要求：GB/T 16927.1—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. High-voltage test techniques-part 1: general definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2011.

[18] 何嘉弘，董博文，何 康. 基于广义时域有限差分的复合绝缘子干区形成机理研究[J]. 电力工程技术，2022，41(1)：134-140.
HE Jiahong, DONG Bowen, HE Kang. Dry band formation mechanism of composite insulator with generalized finite difference-time domain[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 134-140.

[19] SUN Y J, YANG L, SHANG G F, et al. Effects of dynamic deformation of pendant water drops on the electric field between hollow porcelain insulator sheds under extreme rainfall[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 86-97.

[20] JIANG X L, XIE Y B, YUAN Y, et al. Positive switching impulse discharge performance of rod-plane short air gap under rain condi-

tions[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015, 9(6): 744-750.

[21] GRIGOR'EV A I, SHIRYAEVA S O. The possible physical mechanism of initiation and growth of lightning[J]. Physica Scripta, 2006, 54(6): 660-666.

[22] 胡　毅，王力农，邵瑰玮，等. 风雨对导线–杆塔空气间隙工频放电特性的影响[J]. 高电压技术，2008，34(5)：845-850.
HU Yi, WANG Linong, SHAO Guiwei, et al. Influence of rain and wind on power frequency discharge characteristic of conductor-to-tower air gap[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 845-850.

[23] OHBA M, SUGIMOTO S. Differences in climate change impacts between weather patterns: possible effects on spatial heterogeneous changes in future extreme rainfall[J]. Climate Dynamics, 2019, 52(7): 4177-4191.

[24] 黄哲恒，梅红伟，高　超，等. 变压器套管电场强垂直分量对操作冲击放电特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2838-2845.
HUANG Zheheng, MEI Hongwei, GAO Chao, et al. Effect of strong vertical components of electric field in transformer bushing on switching impulse discharge characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2838-2845.



董冰冰
1987—，男，博士(后)，副研究员
主要从事复杂环境下输电线路外绝缘放电理论与试验研究
E-mail: bndong@126.com

DONG Bingbing
Post-doctorate
Associate professor



李　特(通信作者)
1987—，男，硕士，高工
主要从事输电线路状态检修与故障诊断技术研究
E-mail: westtoback@163.com

LI Te
Senior engineer
Corresponding author

收稿日期　2022-06-28　修回日期　2022-09-02　　编辑　卫李静