第 49 卷 第 2 期：515-524 高电压技术 Vol.49, No.2: 515-524
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221100

覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型

胡玉耀[1]，孙建亮[1]，蒋兴良[2]，王鹏浩[3]，咸日常[1]，迟明辰[1]
（1. 山东理工大学山东省智能电网及装备工程实验室，淄博 255000;
2. 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 400040;
3. 电力规划设计总院，北京 100120）

摘　要：绝缘子覆冰对输电线路的正常运行造成重大隐患，研究覆冰绝缘子闪络模型有利于指导运行在冰雪地区输电线路的绝缘状态评估。鉴于现有闪络模型电弧电阻表征不明确，充分考虑实际覆冰绝缘子闪络时电弧由冰面电弧和空气间隙电弧组成，将电弧电阻区分为空气间隙与冰面时变电弧电阻之和，修正了电弧发展判据。通过观测现场覆冰绝缘子直流闪络路径得知，整条闪络通道由高压端及低压端 2 段相向发展的电弧组成。基于该闪络路径，建立了覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型。研究结果表明，动态电路模型计算获得的闪络电压及临界闪络电流与试验结果相近，两者之间的误差分别为 11.9%与 8.9%，试验值与模型计算值吻合较好。而且，模型计算得到的泄漏电流波形和电弧发展速度与实测临近闪络前的泄漏电流和电弧发展速度基本一致。
关键词：覆冰绝缘子；动态电路模型；电弧方程；闪络电压；泄漏电流

Double-arc Dynamic Circuit Model of DC Flashover of Ice-covered Insulator

HU Yuyao[1], SUN Jianliang[1], JIANG Xingliang[2], WANG Penghao[3], XIAN Richang[1], CHI Mingchen[1]
(1. Shandong Engineering Laboratory of Smart Grid and Equipment, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400040, China; 3. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract：Ice accretion on the insulator causes serious hidden hazards, which is danger to the normal operation of transmission lines. The study on the flashover model of ice-covered insulator is helpful to guide the insulation state assessment of power system operating in ice and snow areas. Given that the arc resistance represented by the existing model is not clear, it is fully considered that the arc during the flashover of ice-accreted insulator is composed of ice surface arc and gap arc. Thus, the arc resistance is regarded as the sum of two kinds of time-varying arc resistance, and the criterion of arc development is modified. By observing the DC flashover process of iced insulator on site, the flashover channel consists of two opposite arcs at the high-voltage and low-voltage ends. Based on the above flashover path, double-arc dynamic circuit model of DC flashover on ice-covered insulator is elaborated. The results indicate that the flashover voltage and critical flashover current calculated by the model are close to the experimental results, and the errors between them are 11.9% and 8.9%, respectively. Moreover, the leakage current waveform and arc speed calculated by the model are basically consistent with the measured results. Consequently, the experimental values are in good agreement with the calculated results.
Key words：ice-covered insulator; dynamic circuit model; arc equation; flashover voltage; leakage current

0　引言

目前，越来越多的特高压直流输电线路在国内建设运行，由于横跨多地区，其不可避免地受到覆冰积雪的影响，严重威胁电网的安全运行[1-2]。针对绝缘子覆冰，国内外学者开展了大量的试验研究，并在电气特性[3-4]、放电机理[5-6]及闪络模型[7-8]等方面取得了众多实质性成果。

覆冰绝缘子的静态闪络模型，起源于 Obenaus 的经典平板电路模型[9]，通过数学解析法获得临界闪络条件下的各种物理量数值解。而随着对覆冰闪络机理的深入研究，使得动态模型得以发展[10-11]。虽然静态模型和动态模型均可预测临界闪络电压，但动态模型可同时预测闪络过程中泄漏电流的实时

基金资助项目：国家自然科学基金(51907109)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51907109).

变化。S. Taheri 等人基于 Obenaus 模型的原理，构建了覆冰闪络的动态双电弧模型[12]。舒立春等人对电弧方程进行改进，基于冰面时变电弧方程建立了单电弧动态电路模型[13]。Fan 等人考虑绝缘子冰闪过程中与绝缘子接触的冰层内表面存在融冰水膜，基于覆冰绝缘子剩余冰层电阻的并联电路方程建立了交流电弧放电数学模型[14]。然而，在覆冰绝缘子的实际闪络过程中电弧可分为 2 类，即冰层表面电弧和空气间隙电弧[6]。电弧在发展过程中所处物理介质不同，其耗散功率存在差异，导致 2 类电弧的电阻也不尽相同，但在已有的覆冰动态闪络模型中并未考虑。而且，实际覆冰绝缘子电弧发展并非由单电弧延伸发展至闪络，其闪络通道可能由多段电弧组成。

因此，本文针对现有覆冰动态模型中电弧电阻表征不明确的问题，考虑空气间隙电弧与冰面电弧参数的差异，将电弧电阻等效为间隙时变电弧电阻与冰面时变电弧电阻之和，并修正了电弧发展判据。此外，在自然环境下搭建了闪络试验平台，分别利用高速摄像机及示波器记录了加压过程中 3 片串 LXY−160 覆冰绝缘子的电弧发展及泄漏电流变化。依据试验所观测到的实际覆冰绝缘子闪络路径，建立了改进的双电弧动态电路模型，并通过试验验证了模型的有效性和准确性。

1 试品、试验装置及试验程序

1.1 试品

本文选用三片串 LXY−160 玻璃绝缘子作为试验对象。其中，该型号绝缘子的几何参数及结构配置见图 1。其中，S 为绝缘子表面积，L 表示沿绝缘表面最短泄漏距离，D 与 H 分别表征绝缘子的径向与轴向的结构尺寸。

1.2 试验装置

本文在现场搭建了研究平台以开展覆冰绝缘子闪络试验，如图 2 所示。其中，试验电源由 150 kV/150 kVA 试验变压器提供，其技术参数满足覆冰绝缘子放电试验的要求。

1.3 试验流程

绝缘子现场覆冰试验的主要参数如表 1 所示。

绝缘子覆冰闪络试验程序如下：

1）清洗绝缘子以去除表面污秽，并晾干待用。与固体涂层法相比，覆冰水电导率法获得的试验结果分散性小，且具有方便控制等优点。因此，本文采用覆冰水电导率法模拟试品覆冰过程中的染污情况[15]。

2）在去离子水中添加一定量的 NaCl，配制形成所需电导率的覆冰水。当室外温度降低至–6 ℃以

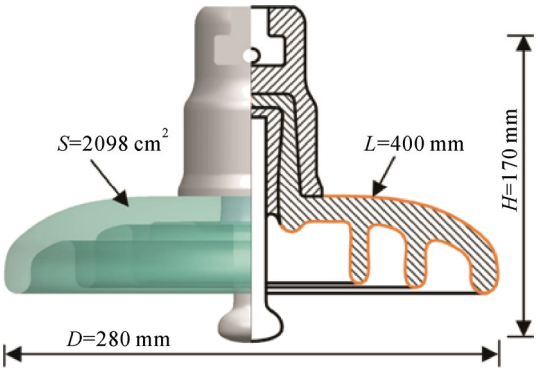


图 1 LXP−160 型绝缘子结构示意图

Fig.1 Structural diagram of LXP−160

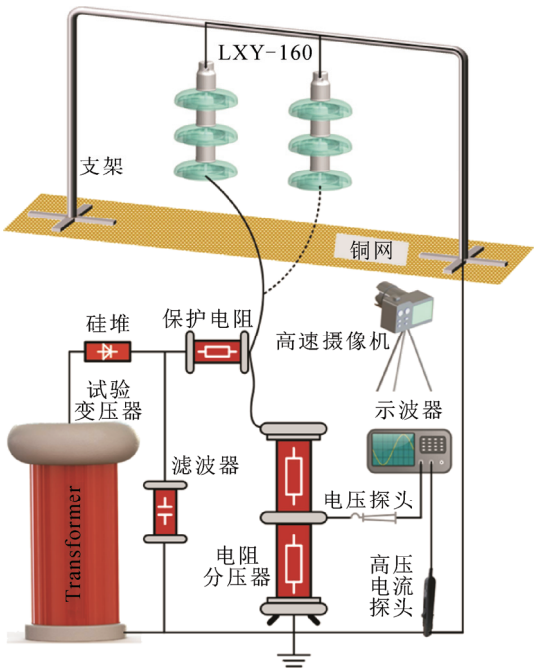


图 2 自然环境绝缘子覆冰闪络试验平台

Fig.2 Schematic diagram of the flashover test of ice-covered insulator in the natural environment

表 1 试验参数

Table 1 Test parameters

参数	数值
温度/℃	–8~–6
风速/(m·s^{-1})	1.8~2.5
覆冰水电导率/(μS·cm^{-1})	80~300
液态水含量/(g·m^{-3})	6
水滴直径/μm	80

下，开启如图 3 所示喷淋系统进行绝缘子覆冰。

3）待冰凌桥接相邻伞裙时停止覆冰，并记录绝缘子覆冰情况。

4）由于室外温度不可控，为了考验融冰期覆冰绝缘子的电气性能，通过在冰层表面喷洒一定量、一定电导率的覆冰水模拟冰层融化。采用 U 形曲线法进行加压[16]，同时利用高速摄像机及示波器分别记录升压过程中电弧发展以及泄漏电流的变化。经多次试验计算可得 50%闪络电压 $U_{50\%}$和标准偏差σ分别为

$$\begin{cases} U_{50\%}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N}U_{\mathrm{fmin}(i)}}{N} \\ \sigma=\sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{N}\left(U_{\mathrm{fmin}(i)}-U_{50\%}\right)^2}{N-1}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$U_{\mathrm{fmin}(i)}$ 表示对覆冰绝缘子进行第 i 次闪络试验所获得的最低闪络电压，kV；N 为试验的总次数，N≥10。

2 动态电路模型

2.1 单电弧等效电路模型

覆冰绝缘子闪络过程中，由于水膜的电导率较高，外施电压大部分降落在空气间隙处，使得间隙首先起弧。随着外施电压的升高，足够的能量提供给电弧使之向前发展，直至电弧贯穿两极则闪络发生。该电弧发展至闪络的过程可近似等效为如图 4 所示的电路模型。在图 4 中，$U_{\mathrm{ap}}(t)$为外施电压；U_{e} 表示电极压降；I 为电弧电流；L_{f} 为实际绝缘子泄漏总长度；x_0 为空间电弧长度；x_{a} 为冰面电弧长度；x 为电弧总长度，则x=x_0+x_{a}；$R_{\mathrm{airarc}}(x,t)$和$R_{\mathrm{icearc}}(x,t)$分别表示空气间隙电弧和冰面电弧的单位长度电阻；$R_{\mathrm{ice}}(x,t)$为剩余冰面电阻；$L(x,t)$代表电弧的单位长度电感；$C(x,t)$表示弧足与电极间的等值电容。

由图 4 可知，动态电路模型中电压、电流的拓扑约束满足如下关系：

$$U_{\mathrm{ap}}(t)=U_{\mathrm{e}}+(R_{\mathrm{airarc}}x_0+R_{\mathrm{icearc}}x_{\mathrm{a}})I(t)+xL\frac{\mathrm{d}I(t)}{\mathrm{d}t}+U_{\mathrm{c}}(t) \tag{2}$$

$$I(t)=C\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{c}}(t)}{\mathrm{d}t}+\frac{U_{\mathrm{c}}(t)}{R_{\mathrm{ice}}} \tag{3}$$

式中 $U_{\mathrm{c}}(t)$表示电弧电容电压。

2.2 动态电路元件

在动态电路模型中，各元件参数的准确与否是决定模型数值计算结果精度的关键。用于计算电弧参数的电路元件包括电弧电阻、等效剩余冰层电阻、电弧电感和电容。

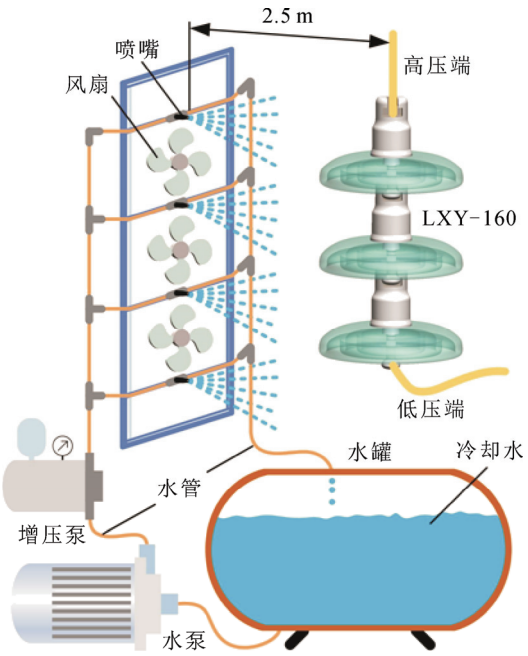


图 3 绝缘子覆冰喷淋系统

Fig.3 Spraying system for insulator icing

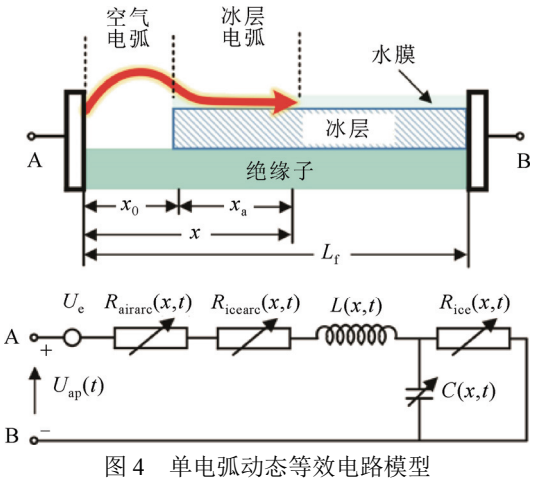


图 4 单电弧动态等效电路模型

Fig.4 Dynamic equivalent circuit model of single arc

基于能量平衡方程，Mayr 提出的电弧通道电阻[17]为

$$\frac{1}{R_{\mathrm{arc}}}\frac{\mathrm{d}R_{\mathrm{arc}}}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau}\left(1-\frac{R_{\mathrm{arc}}I^2}{P_0}\right) \tag{4}$$

式中：R_{arc} 表示电弧单位长度的电阻值；τ 为电弧时间常数，其值为 100 μs；P_0 为电弧耗散功率，数值为 P_0=204.7 VA/cm。

但在实际的电弧发展过程中，电弧耗散功率并非一成不变。由于电弧电流 I 为时变量，且 P_0 可由电弧的电压梯度 E_{arc} 与电流 I 两者乘积表示[18]，故

将电弧耗散功率 P_0 与时变电流量相关联，可表示为

$$P_0 = E_{\text{arc}} I = AI^{-n+1} \tag{5}$$

式中，A 和 n 均为与电弧类型相关的参数。

将式(5)代入式(4)可得耗散功率为时变的电弧电阻方程

$$\frac{1}{R_{\text{arc}}}\frac{\mathrm{d}R_{\text{arc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau}\left(1 - \frac{R_{\text{arc}} I^{1+n}}{A}\right) \tag{6}$$

由于电弧发展过程中所处物理介质的不同，导致冰面电弧与空气间隙电弧耗散功率不同，进而影响两类电弧的参数 A 和 n。因此，应用冰面电弧参数与空气间隙电弧参数来区分空气间隙电弧电阻 R_{airarc} 与冰面电弧电阻 R_{icearc}，如式(7)和(8)所示：

$$\frac{1}{R_{\text{airarc}}}\frac{\mathrm{d}R_{\text{airarc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau}\left(1 - \frac{R_{\text{airarc}} I^{1+n_{\text{a}}}}{A_{\text{a}}}\right) \tag{7}$$

$$\frac{1}{R_{\text{icearc}}}\frac{\mathrm{d}R_{\text{icearc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau}\left(1 - \frac{R_{\text{icearc}} I^{1+n_{\text{i}}}}{A_{\text{i}}}\right) \tag{8}$$

式中：A_{a} 与 n_{a} 为空气间隙电弧特性的参数，DC+：A_{a}=63，n_{a}=0.5；DC−：A_{a}=60，n_{a}=0.8[10]；A_{i} 与 n_{i} 为冰面电弧特性的参数，DC+：A_{i}=181.133，n_{i}=0.499；DC−：A_{i}=93.647，n_{i}=0.712[19]。

单位长度电弧电感 L[20]可表示为

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(0.25 + \ln\left(\frac{D_{\text{f}}}{r_{\text{arc}}}\right)\right) \tag{9}$$

式中：μ_0 为真空磁导率，μ_0=4π×10^{-9} H/cm；D_{f}=10 000 cm，表示无限远处到电弧的距离；r_{arc} 为电弧半径，其计算公式[8]为

$$r_{\text{arc}} = \sqrt{\frac{I}{k\pi}} \tag{10}$$

式中：k 表示与电弧极性相关的参数，DC+：k=1.75；DC−：k=1.67[13]。

弧足与电极间的等值电容[21]为

$$C = 2\pi\varepsilon\delta\left(1 + \frac{r_{\text{arc}}}{L_{\text{f}} - x}\right) \tag{11}$$

其中

$$\delta = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{1}{2}\dfrac{\phi}{L_{\text{f}} - x}\right)^2}} \tag{12}$$

式中：δ 表示为形状参数；ϕ为电极长度；ε为空气中的介电常数。

Wilkins 模型充分考虑了电弧弧根处电流线汇聚导致剩余污层电阻增加，使得剩余电阻模型计算更加精确。此外，该模型同样适用于覆冰平板模型及覆冰绝缘子等效圆柱体模型[22]。其中，对于窄带冰层(L_{f}>w)的等效剩余电阻方程可表示为

$$R_{\text{ice}} = \frac{1}{2\pi\gamma_{\text{e}}}\left(\frac{\pi(L_{\text{f}} - x)}{w} + \ln\frac{w}{2\pi r_{\text{arc}}}\right) \tag{13}$$

式中：w 为覆冰绝缘子等效宽度；γ_{e} 为剩余冰层等效表面电导率[13]，其可表示为

$$\begin{cases} \text{DC}+: \ \gamma_{\text{e}} = 0.0348\sigma_{\text{ice}} + 1.3133 \\ \text{DC}-: \ \gamma_{\text{e}} = 0.0376\sigma_{\text{ice}} + 1.4446 \end{cases} \tag{14}$$

式中，σ_{ice} 为 20 ℃时的覆冰水电导率。

2.3 电弧发展判据及速度

在动态电路模型中，局部电弧的发展与否取决于电弧发展判据，如电位梯度[23]、阻抗[24]和功率判据[25]。其中，Hampton 建立的电位梯度判据用于该模型中。根据 Hampton 的研究，如果电弧电压梯度小于剩余冰层电压梯度，电弧向前推进[23]，即

$$E_{\text{arc}} < E_{\text{ice}} \tag{15}$$

式中：E_{ice} 表示剩余冰层电压梯度；E_{arc} 表示电弧电压梯度，其公式为

$$E_{\text{arc}} = AI^{-n} \tag{16}$$

本文中电弧区分为空气间隙电弧与冰面电弧，因此需要对式(16)进行修正。将电弧电压表示为空气间隙电弧电压与冰面电弧电压两者之和，而总的电弧长度为空气间隙电弧长度与冰面电弧长度两者之和，并由于电弧电压梯度为电弧电压与电弧长度之比，基于此可得到修正的电弧电压梯度，如式(17)，进而电弧发展判据被修正。

$$E_{\text{arc}} = \frac{A_{\text{a}} x_0 I^{-n_{\text{a}}} + A_{\text{i}} x_{\text{a}} I^{-n_{\text{i}}}}{x} \tag{17}$$

当局部电弧满足修正的发展判据时，则向前延伸发展，其电弧发展速度 $v(t)$与时变电弧电流 I 呈正相关[26]，即

$$v(t) = \frac{I}{q_{\text{L}}} \tag{18}$$

式中：q_{L} 表示单位电弧长度的平均电荷量，在实际应用中可认为是一个常数。

2.4 双电弧等效电路模型

实际覆冰以后，绝缘子迎风侧的整体电场分布呈现 U 型曲线[27]。高压端与低压端的高电位梯度使得此处易产生电弧，此时双端电弧相向发展，并与剩余冰层串联构成导通路径。在这种情况下，覆冰绝缘子电弧发展至闪络的过程应采用双电弧等效电路模型，如图 5 所示。

图 5 所示的模型可以等效地分为 2 部分，即 2 个单电弧模型的串联。基于上述单电弧模型的参数，双电弧模型的各电路参数表示如下：

$$r_{\text{arc}i} = \sqrt{I_i / k\pi} \tag{19}$$

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi}\left(0.25 + \ln\left(\frac{D_f}{r_{arci}}\right)\right) \tag{20}$$

$$C_i = 2\pi\varepsilon\delta_i\left(1 + \frac{r_{arci}}{L_f - x_i}\right) \tag{21}$$

$$\delta_i = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{2}\frac{\phi}{L_f - x_i}\right)^2}} \tag{22}$$

$$R_{icei} = \frac{1}{2\pi\gamma_e}\left(\frac{\pi(L_{fi} - x_i)}{w} + \ln\frac{w}{2\pi r_{arci}}\right) \tag{23}$$

式中：I_i表示电弧 i 电弧电流；r_{arci}为电弧 i 电弧半径；L_i表示电弧 i 单位长度电感；C_i表示电弧 i 等值电容；δ_i表示电弧 i 对应的形状参数；x_i为电弧 i 对应的总长度；R_{icei}为电弧 i 对应的剩余冰面电阻；L_{fi}表示电弧 i 对应的绝缘子泄漏总长度；i=1，2。

此外，根据图 5 双电弧动态等效电路，电流、电压的拓扑约束方程满足：

$$I_1 = C_1\frac{du_{c1}}{dt} + \frac{u_{c1} - u_{c2}}{R_{ice1} + R_{ice2}} \tag{24}$$

$$\frac{u_{c1} - u_{c2}}{R_{ice1} + R_{ice2}} = C_2\frac{du_{c2}}{dt} + I_2 \tag{25}$$

$$U_{ap} = U_e + (R_{airarc1}x_{01} + R_{icearc1}x_{a1})I_1 + x_1L_1\frac{dI_1}{dt} + u_{c1} \tag{26}$$

$$u_{c2} = (R_{airarc2}x_{02} + R_{icearc2}x_{a2})I_2 + x_2L_2\frac{dI_2}{dt} \tag{27}$$

式中：u_{ci}表示电弧 i 所对应的电容电压；i=1，2。

基于上述双电弧的拓扑约束方程，通过数值分析迭代求解微分方程组（式(24)—(27)）的数值解。图 6 给出了双电弧动态电路模型计算流程图。该模型考虑了电弧参数的瞬时变化、电弧发展判据、电弧传播速度和覆冰水电导率。在每一个时间步长中，判断各分段电弧发展延伸的临界条件，如果满足条件，则各分段电弧继续发展直到两电弧长度之和达到总的泄漏长度，发生闪络。否则电弧熄灭，不会发生闪络。此时，提高外施电压，并从初始电弧长度重新开始计算，直到发生闪络。闪络以后，再改变覆冰水电导率，并重复上述的步骤。当所设定的不同覆冰水电导率下的闪络电压值都计算完成后，程序停止，输出不同覆冰水电导率下的闪络电压。此外，在图 6 中，t_0记为 t=0 时的初始时刻；x_0表示初始电弧长度，依据文献[10]设置为总泄漏距离 L_f的 1%；U_{ap0}表示初始时刻的外施电压。初始时刻 t_0的初始电流通过设定的初始电压 U_{ap0}及伏安关系来计算得出，并基于此开始循环迭代求解。仿真计算步长通过综合权衡计算准确度和时间将其设置为 0.01 ms。

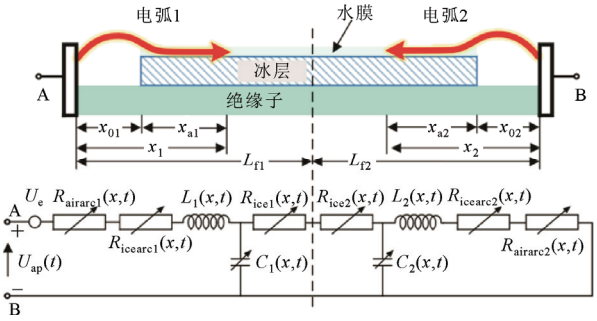


图 5　双电弧动态等效电路模型

Fig.5　Dynamic equivalent circuit model of double arc

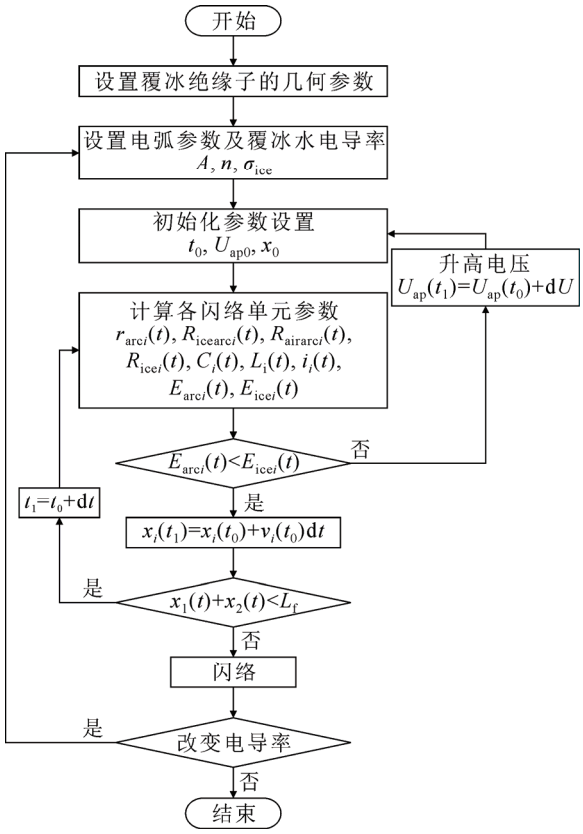


图 6　双电弧动态电路模型仿真计算流程

Fig.6　Simulation calculation flowchart of double arc dynamic circuit model

3　仿真与试验结果对比

在试验过程中，通过高速摄像机拍摄记录了电弧起始、发展至闪络的演变过程，并分析其闪络机理，为准确建立覆冰绝缘子的动态电路模型提供试验依据。

3.1　动态电路模型对比

以直流负极性、电导率为 100 μS/cm 为例，双电弧计算出的 2 个电弧电流 I_1与 I_2之间的数值差如图 7 所示。可以看出，两者之间的最大差值为

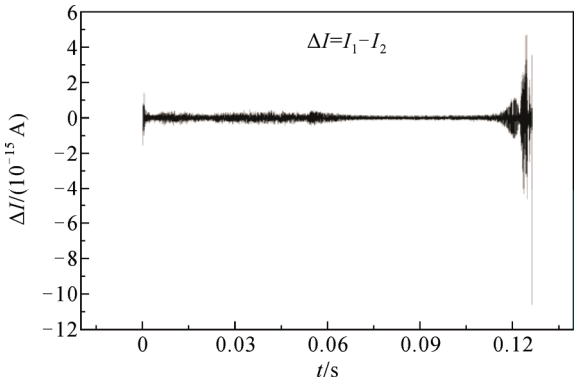


图 7 双电弧模拟电流数值差

Fig.7 Numerical difference of simulated current of double arc

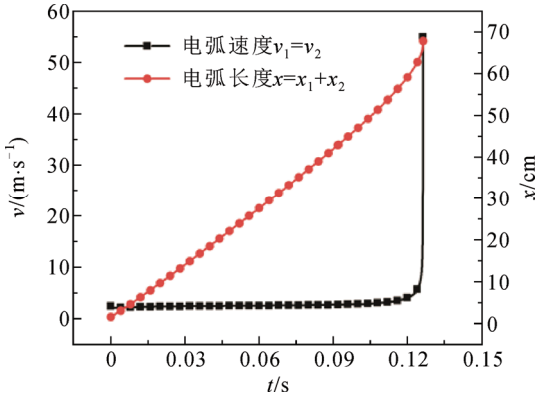


图 8 电弧长度及电弧速度随时间变化图

Fig.8 Diagram of arc length and arc velocity changing with time

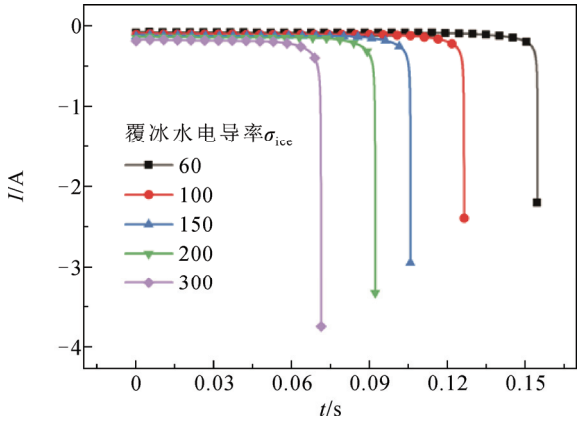


图 9 不同电导率下泄漏电流随时间变化图

Fig.9 Diagram of leakage current changing with time at different conductivity

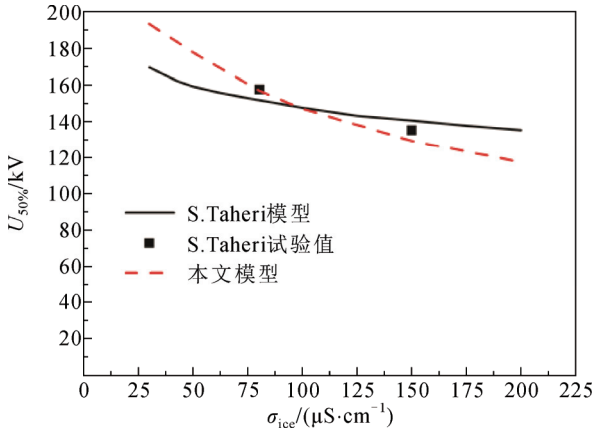


图 10 正极性电压下不同双电弧模型的闪络电压对比

Fig.10 Comparison of flashover voltages of different double arc models under DC+

1.066×10^{-14} A，数量级在 10^{-14}，则可认为两电弧相向发展过程中电流相同，与实际的闪络过程相符。根据式(18)，可进一步得出两类电弧发展速度相同，即 $v_1=v_2$。

图 8 为数值计算得到的电弧发展速度与电弧长度随时间的变化关系。从图 8 可以看出，电弧发展前期速度稳定在 2.3 m/s，并且电弧长度呈线性增长趋势沿冰面发展。一旦达到临界闪络长度，电弧呈阶跃式快速发展，其速度瞬间增加大到 55 m/s。该动态模型所计算出的结果符合试验所测得的电弧发展速度，近似模拟了实际覆冰绝缘子白弧放电阶段和闪络阶段[11]。

此外，通过改变不同电导率值，双电弧动态模型所计算出的泄漏电流随时间的变化如图 9 所示。由图 9 可知，随着电导率的增大，闪络时长缩短，而泄漏电流幅值与电导率呈正相关。这是由于剩余冰层电阻与覆冰水电导率成反比，而泄漏电流又与剩余冰层电阻呈反比。电导率越大，电弧发展阻力越小，更有利于电弧向前发展。因此，同等泄漏距离下，电导率值越大闪络越容易在较短时间内发生。

为验证本文双电弧动态模型的先进性，将模型应用于文献[12]中所示的研究对象，其计算结果与文献中的结果进行对比，如图 10 和 11 所示。

由图 10 和图 11 可知，在正、负极性电压作用下，本文模型与 S. Taheri 模型所计算出的冰闪电压均随覆冰水电导率的增加呈下降趋势。然而，相比 S. Taheri 模型，本文模型计算结果更加接近试验值。其原因在于双电弧动态模型相较于 S. Taheri 模型有 3 处改进：① 将模型中电弧细分为空气间隙电弧和冰层表面电弧；② 考虑电弧耗散功率与时变电流的关系，将两类电弧电阻改进为时变的函数；③ 在上述改进的基础上，优化了电弧发展判据。

3.2 试验结果与模型仿真结果对比

图 12 记录了 LXY-160 型覆冰绝缘子从起弧到

闪络的全过程。从图 12 可以看出，覆冰绝缘子的高压端首先起弧。这是由于冰水相变过程中存在晶释效应[28]，导致冰面融化产生的水膜电导率高于覆冰水电导率数倍，致使绝缘子电场畸变，其中高压端场强畸变最为严重，使得此处成为极不均匀电场。在一定外施电压的作用下，高压端的空气间隙率先被击穿，产生自持的局部放电，如图 12(a)。高压端局部电弧的产生使绝缘子沿面电位重新分布，低压端及冰凌尖端也随之起弧，如图 12(b)。在多处局部电弧产生后，电源提供的能量一部分消耗在冰层的融化和融冰水的蒸发过程中，剩余的部分能量不足以维持多处局部电弧自身电离，使得电弧出现交替“熄灭−重燃”现象，如图 12(c)。随着电压持续升高，高压端电弧趋于稳定，电弧表现为由白色变成红黄色，并剧烈燃烧，如图 12(d)—(e)。当电压进一步增大时，低压端电弧也同样出现类似的情况，并且高压端与低压端的电弧相向发展，如图 12(f)—(g)。直至两电弧在第 2 片玻璃绝缘子上相遇时发生闪络。此时，由于其他电弧相当于被短路，均熄灭，如图 12(h)。可以看出，整条闪络通道由高压端及低压端 2 段电弧组成，且每段电弧又可分为空气间隙电弧与冰层表面电弧。基于该覆冰绝缘子闪络路径，建立了 2.4 节所述的双电弧动态电路模型。

冰凌桥接绝缘子串后，电弧基本沿着湿冰层发展。而且，在覆冰绝缘子闪络过程中，飘弧的根本原因在于电弧发展过程中受到热浮力的作用。然而，在标准大气压下，电弧受到的热浮力远小于低气压地区[29]。由于本文试验在低海拔地区进行，因此，未考虑飘弧对双电弧动态模型的影响。依据文献[30]的方式进行实测，得到覆冰绝缘子几何参数为 L_{f1}=L_{f2}=34 cm，w=22 cm。

国内外诸多学者通过大量覆冰绝缘子闪络试验分析得出，$U_{50\%}$与σ_{ice}两者之间呈负幂函数关系[6]

$$U_{50\%} = C(\sigma_{ice})^{-m} \tag{28}$$

式中：C 是与绝缘子材料和结构相关的系数；m 为特征指数。

临界闪络电流是表征闪络过程的重要参数，定义为泄漏电流最终跃变前的泄漏电流强度[31]。覆冰绝缘子直流临界闪络电流与覆冰水电导率呈幂函数关系为

$$I_c = Y(\sigma_{ice})^{e} \tag{29}$$

式中：Y 为系数，与绝缘子型式、覆冰状态等有关；e 表示特征指数。

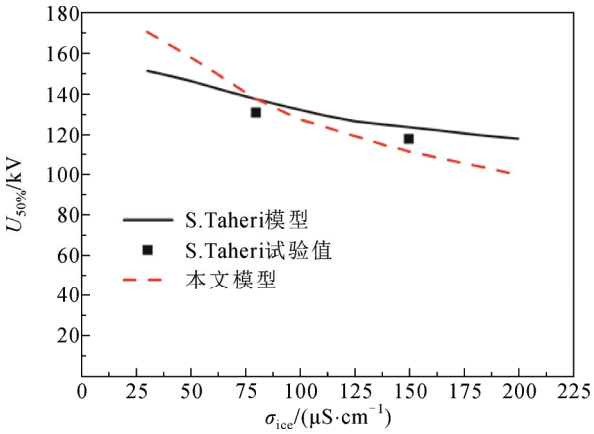


图 11　负极性电压下不同双电弧模型的闪络电压对比

Fig.11　Comparison of flashover voltages of different double arc models under DC−

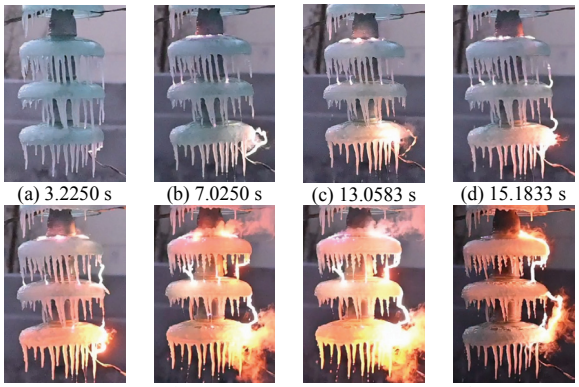


图 12　覆冰绝缘子放电发展过程

Fig.12　The discharge development process of ice-coated insulator

根据式(28)与式(29)对覆冰绝缘子的闪络试验数据进行拟合，结果如图 13 所示，式(30)与式(31)为对应的拟合公式及拟合系数 R^2。

$$\begin{cases} U'_{50\%} = 335.8\sigma_{ice}^{-0.3493} \\ R^2 = 0.991 \end{cases} \tag{30}$$

$$\begin{cases} I'_c = 0.0137\sigma_{ice}^{0.6722} \\ R^2 = 0.986 \end{cases} \tag{31}$$

式中：$U'_{50\%}$表示拟合所得闪络电压；I'_c为拟合所得临界闪络电流。

由图 13 以及式(30)和(31)可知，随着覆冰水电导率的升高，闪络电压呈幂函数规律下降，而临界泄漏电流呈幂函数规律上升，且均有饱和趋势。这可解释为，覆冰水电导率σ_{ice}越高，由泄漏电流焦耳热所产生的融冰水膜中存在的导电离子浓度越高，主要为 Na^+、Cl^-，在起弧后水膜中有更多的导电离子参与电离，导致临界闪络电流 I_c 随电导率增大，而闪络电压 $U_{50\%}$随之减小，其中覆冰水电导率

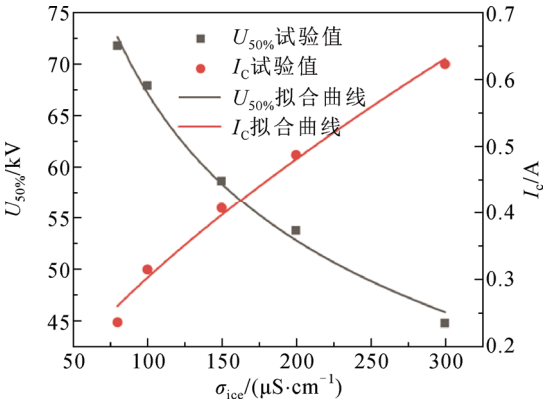


图 13 覆冰绝缘子 $U_{50\%}$和 I_c 与σ_{ice}的拟合关系

Fig.13 Fitting relationship between $U_{50\%}$, I_c and σ_{ice}

从 80 μS/cm 增大到 300 μS/cm 时，覆冰绝缘子闪络电压下降了 37.7%。但随着覆冰水电导率σ_{ice}的继续增大，冰层的加剧融化使得水膜中的导电离子流失，从而融冰水膜中的导电粒子浓度逐渐趋于饱和，导致 $U_{50\%}$和 I_c 均随σ_{ice}增大呈现饱和趋势。

直流负极性电压作用下冰闪电压试验值及双电弧动态电路模型计算结果见表 2。由表 2 可知，LXY−160 覆冰绝缘子直流冰闪电压的试验结果分散性小。而且，试验值与仿真值有相同的趋势，均随覆冰水电导率的增大而减小。双电弧动态电路模型的计算值与试验值的相对误差范围在 7.6%~11.9%，具有较好的一致性。

图 14 表示绝缘子串覆以 100 μS/cm 的冰层且施加负极性电压至临近闪络时，泄漏电流的试验结果和双电弧动态电路模型的计算结果。由图 14 可知，当外施电压作用于覆冰绝缘子时，电源供给电弧足够的能量使电流波浪式稳定发展，并在临界闪络时刻突增，模型获得的泄漏电流变化趋势与之相符。通过试验和仿真得到的临界闪络电流分别为 314 mA 和 295 mA，相对误差为 6.4%。而且，以闪络电压施加在覆冰绝缘子为计时起点，到完全闪络试验用时 0.1428 s，模型计算值为 0.1266 s，两者相差 12.8%。双电弧动态模型预测的电流曲线波动趋势大体吻合试验值。误差存在的原因可解释如下。由于晶释效应及泄漏电流焦耳热的作用，在闪络过程中水膜电导率与冰层外观结构均发生变化，而且试验是在–6—8 ℃的室外进行，电弧与周围低温空气的热交换速度较快，减缓了电弧电离。此外，放电产生的带电粒子会扩散到冰层表面水膜中，导致水膜电导率发生改变。因此，模型计算结果和试验值存在误差。

表 2 闪络试验结果及双电弧模型闪络电压模拟值

Table 2 Flashover test results and simulation values of flashover voltage of double arc model

σ_{ice}/(μS·cm^{-1})	$U_{50\%}$/kV	σ/%	U_c/kV	ΔU/%
80	71.8	3.73	66.7	7.6
100	67.9	4.83	62.0	9.5
150	58.6	3.71	53.6	9.3
200	53.7	4.22	48.0	11.9
300	44.7	4.11	41.2	8.5

注：$\Delta U=(U_{50\%}-U_c)/U_c\times100\%$

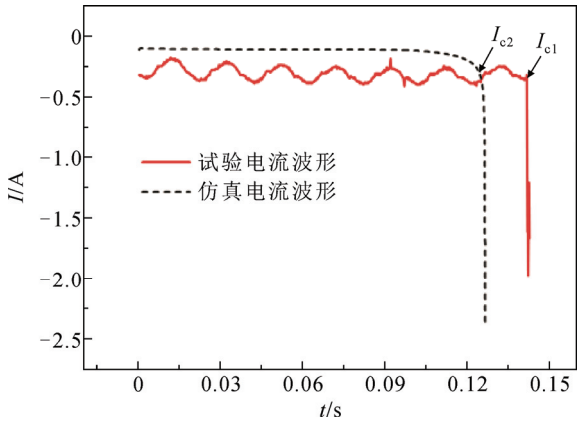


图 14 双电弧电流模拟值与试验电流波形对比

Fig.14 Comparison of simulated double arc current and test current waveform

临界闪络电流试验值和模型计算结果在不同电导率下的对比如图 15 所示。由图可知，各个试验点与模型计算值的最大相对误差为 8.9%。此外，依据文献[32]中方法，对临近闪络时高压端电弧发展速度进行测量计算，并与仿真计算结果对比，如图 16 所示。从图 16 可以看出，电弧稳定发展阶段速度在 0.7~2.6 m/s 范围内波动，与仿真计算值差异较小。然而，在闪络瞬间，其速度达到 63 m/s，高于模型仿真计算出的 55 m/s。这是由于，在实际的闪络过程中，临近闪络时的电弧通道温度极高，超过 5000 ℃[29]，导致空气发生强烈的热电离现象，为电弧的快速发展奠定了基础。此外，电弧弧头部分处的高浓度等离子体使得该处附近的场强发生了严重畸变，在达到临界击穿场强时，剩余间隙瞬间被击穿，其速度高于理论计算值。

通过以上理论分析及试验研究表明：本文所建立的覆冰绝缘子直流闪络双电弧动态电路模型与现有模型相比，考虑了电弧耗散功率与所处介质以及时变电流的关系，在电弧分类、电弧电阻和电弧发展判据等方面进行了优化与改进。因此，双电弧动

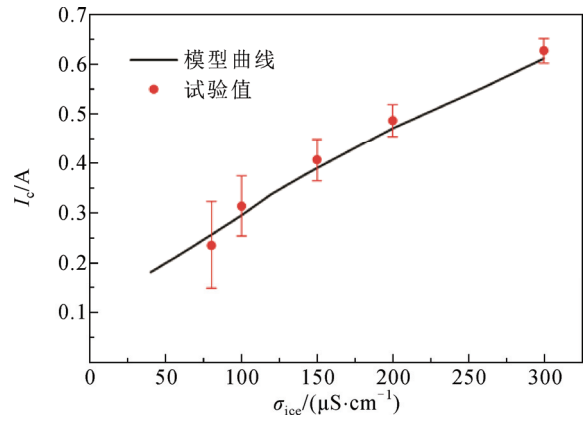


图 15 临界闪络电流试验值与双电弧模型计算值对比

Fig.15 Comparison of the critical flashover current between the test value and the calculated value of the double arc model

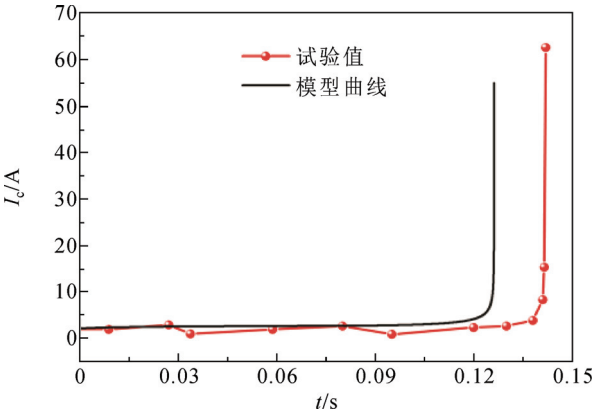


图 16 电弧发展速度模拟值与试验值对比

Fig.16 Comparison of simulation value and test value of arc development velocity

态电路模型计算结果更加接近试验值，这将为运行在冰雪地区的输电线路绝缘状态评估提供更准确的依据，同时为输电线路覆冰预警机制的建立提供理论基础。

4 结论

1）考虑电弧在发展过程中所处物理介质的不同，其耗散功率存在差异，将电弧电阻等效为间隙时变电弧电阻与冰面时变电弧电阻之和，并进一步修正了电弧发展判据。

2）覆冰绝缘子闪络过程中，由于晶释效应的存在，冰层表面融化产生的高电导率水膜造成绝缘子两极电场严重畸变，整条闪络通道由高压端及低压端两段相向发展的电弧组成。基于此，建立了覆冰绝缘子直流双电弧动态电路模型。

3）当覆冰水电导率从 80 μS/cm 增大到 300 μS/cm 时，覆冰绝缘子闪络电压下降了 37.7%。拟合试验数据可知，直流冰闪电压与覆冰水电导率之间满足负指数幂函数关系，而临界闪络电流与覆冰水电导率之间呈正指数幂函数关系。

4）双电弧动态电路模型计算得到的闪络时长随着电导率的增大而减小，而泄漏电流幅值随之呈增大趋势。绝缘子冰闪电压的模型计算值与实测值的误差不大于 11.9%。而且，模型计算的泄漏电流曲线和电弧发展速度与实际电流波形和电弧发展速度较为吻合，临界闪络电流的模型计算值与试验值误差在 8.9%以内，验证了模型的有效性。

参考文献 References

[1] 胡建林，刘 杰，蒋兴良，等. 基于弧垂测量的综合荷载下导线等值覆冰厚度监测方法[J]. 高电压技术，2022，48(2)：584-593.
HU Jianlin, LIU Jie, JIANG Xingliang, et al. Monitoring method for equivalent icing thickness of conductor under complex load based on sag measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 584-593.

[2] 李大雨，张贵新，王天宇. 交流电压下绝缘子表面电荷对闪络电压影响的主导因素[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4199-4206.
LI Dayu, ZHANG Guixin, WANG Tianyu. Dominant factors affecting flashover by the presence of surface charge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4199-4206.

[3] ZONG C Y, HU Y Y, JIANG X L, et al. AC flashover characteristics and arc development process of glaze ice-covered insulators in natural environment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107559.

[4] 何昱燊，张志劲，傅海涛，等. 自然环境下覆冰绝缘子长串交流闪络电压及电弧发展现象[J]. 电网技术，2021，45(7)：2904-2912.
HE Yushen, ZHANG Zhijin, FU Haitao, et al. AC flashover voltage and arc development of long insulators strings in natural icing environment[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2904-2912.

[5] 舒立春，刘延庆，蒋兴良，等. 盘型悬式绝缘子串自然覆冰直流放电发展路径特点及影响因素分析[J]. 电工技术学报，2021，36(8)：1726-1733.
SHU Lichun, LIU Yanqing, JIANG Xingliang, et al. Analysis on the DC discharge path of ice-covered disc type suspension insulators under natural conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1726-1733.

[6] 蒋兴良，邹佳玉，韩兴波，等. 自然环境绝缘子长串覆冰直流闪络特性[J]. 电工技术学报，2020，35(12)：2662-2671.
JIANG Xingliang, ZOU Jiayu, HAN Xingbo, et al. DC flashover characteristics of natural environment insulators covered with ice[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2662-2671.

[7] FARZANEH M, ZHANG J. A multi-arc model for predicting AC critical flashover voltage of ice-covered insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1401-1409.

[8] ZHANG Z J, YANG S H, JIANG X L, et al. DC flashover dynamic model of post insulator under non-uniform pollution between windward and leeward sides[J]. Energies, 2019, 12(12): 2345.

[9] 苑吉河，孙才新，蒋兴良. 覆冰绝缘子闪络模型研究综述[J]. 高电压技术，2004，30(3)：9-11，25.
YUAN Jihe, SUN Caixin, JIANG Xingliang. Summary of study of flashover modeling on iced insulator[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(3): 9-11, 25.

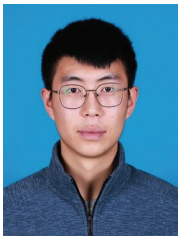
[10] SUNDARARAJAN R, GORUR R S. Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(2): 209-218.

[11] FARZANEH M, FOFANA I, TAVAKOLI C, et al. Dynamic modeling of DC arc discharge on ice surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 463-474.
[12] TAHERI S, FARZANEH M, FOFANA I. Improved dynamic model of DC arc discharge on ice-covered post insulator surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2): 729-739.
[13] 舒立春，王鹏浩，徐　宁，等. 基于改进时变电弧方程的直流覆冰闪络动态电路模型研究[J]. 电工技术学报，2018，33(19)：4603-4610.
SHU Lichun, WANG Penghao, XU Ning, et al. Study on dynamic circuit model of DC icing flashover based on improved time-varying arc equation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(19): 4603-4610.
[14] FAN C J, JIANG X L, XIE Y B, et al. Novel dc flashover model for predicting flashover voltage of the iced insulators[J]. High Voltage, 2021, 6(1): 149-159.
[15] 武利会，蒋兴良，熊启新，等. XZP–160 直流绝缘子低气压下覆冰闪络特性[J]. 高电压技术，2002，28(10)：5-7.
WU Lihui, JIANG Xingliang, XIONG Qixin, et al. DC flashover performance and voltage correction of iced XZP–160 insulator at low atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(10): 5-7.
[16] 郭裕钧，杨晨光，张血琴，等. 川藏铁路环境车顶绝缘子闪络特性研究综述[J/OL]. 高电压技术，2022：1-13[2022-11-04]. https://www.doc88.com/p-11973980680864.html.
GUO Yujun, YANG Chenguang, ZHANG Xueqin, et al. Review on flashover characteristics of train roof insulators under environment on Sichuan-Tibet railway[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-13[2022-11-04]. https://www. doc88.com/p-11973980680864.html.
[17] GHAYEDI M, SHARIATINASAB R, MIRZAIE M. AC flashover dynamic model suggestion and insulation level selection under fan-shaped pollution[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 134: 107438.
[18] JABBARI M, VOLAT C, FOFANA I. Development of a new bi-arc dynamic numerical model for modeling AC flashover processes of EHV ice-covered insulators[J]. Energies, 2018, 11(10): 2792.
[19] 王鹏浩. 覆冰绝缘子直流闪络动态电路模型及数值计算[D]. 重庆：重庆大学，2018.
WANG Penghao. Dynamic circuit model of DC flashover on ice-covered insulators and numerical calculation[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2018.
[20] ARSHAD, MUGHAL M A, NEKAHI A, et al. Influence of single and multiple dry bands on critical flashover voltage of silicone rubber outdoor insulators: simulation and experimental study[J]. Energies, 2018, 11(6): 1335.
[21] 刘延庆. 基于冰面长电弧特性的覆冰绝缘子长串直流闪络模型的研究[D]. 重庆：重庆大学，2021.
LIU Yanqing. Research on the DC flashover model of long ice-covered suspension insulator strings based on the characteristics of long arc on ice surface[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2021.
[22] 曹　雯，吴亚森，薛　豪，等. 计及水珠动态行为的硅橡胶表面直流闪络模型[J/OL]. 高电压技术，2022：1-10[2022-11-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220655.
CAO Wen, WU Yasen, XUE Hao, et al. DC flashover model of silicone rubber surface considering the dynamic behavior of water droplets[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-10[2022-11-04]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220655.
[23] OUCHEN L, BAYADI A, BOUDISSA R. Dynamic model to predict the characteristics of the electric arc around a polluted insulator[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(1): 83-90.
[24] SALEM A A, ABD RAHMAN R, AL-AMERI S. Pollution flashover characteristics of high-voltage outdoor insulators: analytical study[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(3): 2711-2729.
[25] 蒋兴良，董冰冰，张志劲，等. 绝缘子覆冰闪络研究进展[J]. 高电压技术，2014，40(2)：317-335.
JIANG Xingliang, DONG Bingbing, ZHANG Zhijin, et al. Research and development on flashover of ice-covered insulators[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 317-335.
[26] 张东东，倪喜军，王书征，等. 迎/背风侧不均匀污秽下绝缘子直流污闪建模[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2880-2889.
ZHANG Dongdong, NI Xijun, WANG Shuzheng, et al. Modeling of insulator DC pollution flashover under windward/leeward side non-uniform pollution[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2880-2889.
[27] 蒋兴良，吴海涛，王　涵，等. 覆冰表面的交流电弧发射光谱特性[J]. 高电压技术，2019，45(8)：2596-2602.
JIANG Xingliang, WU Haitao, WANG Han, et al. Spectral characteristics of AC arc plasma over an ice surface[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2596-2602.
[28] HU Y Y, JIANG X L, YANG Z Y, et al. Influence of crystallization effect during icing water phase transition on the flashover characteristics of ice-covered insulators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 176521-176529.
[29] HU Y Y, JIANG X L, GUO S H, et al. Comparison of AC flashover performance of snow-accreted insulators under natural and artificial simulation environments[J]. IEEE Access, 2020, 8: 178034-178043.
[30] FARZANEH M, ZHANG J, VOLAT C. Effect of insulator diameter on AC flashover voltage of an ice-covered insulator string[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 264-271.
[31] 杨　庆，汪　锐，司马文霞，等. 基于电路网络的绝缘子交流污闪动态模型研究[J]. 中国电机工程学报，2013，33(25)：204-212.
YANG Qing, WANG Rui, SIMA Wenxia, et al. Study on the dynamic model of polluted insulators under AC voltage based on the circuit network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 204-212.
[32] 范才进. 基于冰柱电弧特性的交流闪络模型与绝缘子交流冰闪特性研究[D]. 重庆：重庆大学，2020.
FAN Caijin. Study on AC flashover model based on arc performances of ice cylinder and AC ice flashover performances of insulators[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2020.



胡玉耀(通信作者)
1989—，男，博士，副教授，硕导
主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究
E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn

HU Yuyao
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



孙建亮
1997—，男，硕士
主要从事极端环境下输电线路外绝缘状态评估的研究
E-mail: 670910532@qq.com

SUN Jianliang



蒋兴良
1961—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压与外绝缘技术以及输电线路覆冰与防护工作的研究
E-mail: xljiang@cqu.edu.cn

JIANG Xingliang
Ph.D., Professor

收稿日期　2022-07-04　修回日期　2022-10-15　　编辑　冉沐晨