第 50 卷 第 2 期：825-831 高电压技术 Vol.50, No.2: 825-831
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20222110

1 m 级间隙正极性雷电冲击闪络判据海拔校正方法的适用性

刘柏炫[1]，韩永霞[1]，何少敏[1]，蔡汉生[2]，刘　刚[2]，冯瑞发[2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 南方电网科学研究院，广州 510080）

摘　要：绝缘子及空气间隙的雷电冲击闪络判据是评估输电线路耐雷性能的重要仿真模型之一，同一间隙的闪络判据在不同海拔地区应用需要进行海拔校正。绝缘子及空气间隙的雷电冲击 $U_{50\%}$闪络判据可以采用 g 参数进行海拔校正，但是更加精确的闪络判据如伏秒特性及先导发展模型法尚缺乏有效的海拔校正方法。该文针对 110 kV 线路用复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙，分别在平原和高海拔地区开展了正极性标准雷电冲击试验，对比了海拔对冲击闪络特性的影响，分析了现有海拔校正方法在 $U_{50\%}$及伏秒特性散点校正中存在的问题。然后，拟合了适用于不同海拔的 110 kV 单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙的正极性标准雷电波先导发展模型，并将该模型计算得到的 *U-t* 曲线与试验所得的伏秒特性散点进行对比分析，验证了先导发展模型通过改变相对空气密度开展闪络判据海拔校正的适用性。最后，通过对比分析不同先导发展模型对计算 110 kV 输电线路耐雷水平的影响，证明了先导发展模型闪络判据海拔校正的精确性。

关键词：长间隙；海拔校正；闪络判据；先导发展模型；耐雷水平

Applicability of Altitude Correction of 1 m Level Gap Positive Lightning Impulse Flashover Criterion

LIU Boxuan[1], HAN Yongxia[1], HE Shaomin[1], CAI Hansheng[2], LIU Gang[2], FENG Ruifa[2]
(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Electric Power Research Institute of CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The flashover criterion of insulator and air gap is an important simulation model to evaluate the lightning resistance performance of transmission lines. The flashover criterion at different altitudes needs altitude correction. The $U_{50\%}$ flashover criterion can be corrected by the g parameter, however, the more accurate flashover criterion, namely, using the volt second characteristic and leader propagation model method, still lacks effective altitude correction. Aiming at the composite insulator used in 110 kV line and 1m rod-plate gap, we carried out the positive polarity standard lightning impulse tests in plain and high altitude areas, respectively, compared the influence of altitude on impulse flashover characteristics, and analyzed the problems of existing altitude correction methods in $U_{50\%}$ and volt-second characteristic scatter correction. Then, a positive standard lightning wave leader propagation model suitable for 110 kV single composite insulator and 1m rod-plate gap at different altitudes was fitted, and the *U-t* curve calculated by the model was compared with the test volt-second characteristic, verifying the applicability of the leader propagation model to carry out the altitude correction of flashover criterion by changing the relative air density. Finally, by comparing and analyzing the effects of different leader propagation models on calculating the lightning withstand level of 110 kV transmission lines, the accuracy of altitude correction of flashover criterion of leader propagation model is verified.

Key words: long air gap; altitudes correction; flashover criterion; leader propagation model; lightning withstand level

0　引言

雷击跳闸是线路跳闸的主要原因之一[1-3]，而线路绝缘子及空气间隙的雷击闪络判据是精确开展输电线路耐雷性能评估的重要仿真模型之一。间隙及绝缘子的雷电冲击闪络判据主要有 50%击穿电压($U_{50\%}$)法、伏秒特性法、先导发展模型法等[4-6]。

我国地域辽阔，不同地区的海拔跨度大，而不同海拔的长间隙闪络特性存在较大差异，在一定海拔试验获得的闪络判据难以直接适用于其他海拔地

基金资助项目：特高压工程技术(昆明、广州)国家工程实验室”开放基金(NEL202003)。
Project supported by National Engineering Laboratory for Ultra High-Voltage Engineering Technology(Kunming/Guangzhou) Foundation (NEL202003).

区，因此有必要开展长间隙闪络判据的海拔校正方法研究。当前长间隙闪络判据的海拔校正均针对$U_{50\%}$，众多学者改进了海拔校正因数，提高了$U_{50\%}$海拔校正的准确性[7-12]。但$U_{50\%}$法过于简单，仅仅以电压超过$U_{50\%}$作为击穿条件，未考虑电压作用时间，因此作为闪络判据时计算雷电侵入波的波形与实际波形误差较大。伏秒特性法同时考虑了击穿电压和击穿时间，因此伏秒特性定义法和相交法在工程上被广泛应用。但伏秒特性电压散点的海拔校正存在击穿时间无法校正的问题。CIGRE 提出的先导发展法较好地体现了长间隙放电的物理过程，且能考虑不同的电压波形作用下的闪络特性差异，准确性相对较高，受到了国内外的广泛认可[13-14]，但其模型是来源于标准雷电波冲击，且经验证在高海拔下应用时误差较大[15-16]。为此国内外机构和学者开展了大量不同海拔和不同电压等级下的绝缘子/空气间隙的标准雷电波和短尾波冲击下的先导发展闪络判据研究。

清华大学先后在平原地区开展了 0.5~1.4 m 长棒-板空气间隙及 110~500 kV 复合/瓷绝缘子的标准波/短尾波冲击闪络试验，并拟合了对应先导模型参数[17-18]，研究结果可用于平原地区线路的反击和绕击耐雷水平的计算，但在其他海拔的适用性未知。华中科技大学改进了先导发展速度公式，考虑了先导发展时其通道内的压降，并拟合了模型中的对应参数，应用模型开展 500 kV 及 1000 kV 绝缘子的仿真验证，但其先导发展速度公式中也未考虑海拔的影响[19]。

华南理工大学曾在 2100 m 海拔地区先后进行了±800 kV 线路用 7.1 m 长 I 串和 V 串复合绝缘子、110 kV 及 220 kV 真型塔中不同材质的绝缘子、110 kV 单支绝缘子及 1 m 棒-板间隙在不同电压波形冲击下的闪络试验研究[13-16,19-23]，分析了不同材质和长度绝缘子、真型塔绝缘子与单支绝缘子、空气间隙等的闪络特性差异。该团队在 CIGRE 推荐先导速度公式的基础上考虑了海拔修正因数、先导通道的压降和先导的末跃过程，改进了先导发展速度公式，针对绝缘子/空气间隙的各种工况分别拟合了适用于 2100 m 海拔地区的先导发展模型。同时，提出了一种通过改变大气相对密度实现先导发展模型对海拔校正的方法，但因缺少直接在平原地区开展对应的相似工况的试验结果的验证，该方法的适用范围及准确性有待开展深入研究。

因此，本文针对 110 kV 单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙开展 2100 m 高海拔及平原地区的正极性雷电标准波冲击试验，对比分析$U_{50\%}$和伏秒特性的差异。同时，分析现有海拔校正方法对于不同闪络判据的适用性及局限性，通过试验数据对比验证在先导发展模型中改变相对空气密度实现该闪络判据的海拔校正的可行性。应用不同先导发展模型开展 110 kV 输电线路反击及绕击耐雷水平计算，验证先导发展模型闪络判据海拔校正的适用性。

1 1 m 级间隙标准雷电冲击试验

1.1 试验装置及试品

本次平原地区试验在特高压工程技术国家工程实验室(广州)开展，其冲击电压发生器参数为 6000 kV/720 kJ。2100 m 高海拔地区试验地点为特高压工程技术国家工程实验室(昆明)，冲击电压发生器参数为 7200 kV/720 kJ，两者试验原理相似，如图 1 所示。通过调整回路中冲击电压发生器级数、波头电阻R_f、波尾电阻R_t及电容参数，平原地区和 2100 m 高海拔的试验回路分别可以输出符合 1.2(1±30%) μs/50(1±20%) μs 标准的正极性标准雷电波电压波形，试品干弧距离及施加电压波形如表 1 所示，典型的试验波形如图 2 所示。由图 2 可知，虽然平原和高海拔地区的正极性标准雷电冲击电压波形都符合标准要求，但很难完全一致，这也是闪络特性存在差异的原因之一。

1.2 试验内容

试验内容主要包括正极性标准雷电波冲击下测量 110 kV 复合绝缘子/1 m 棒-板间隙的 50%击穿电压$U_{50\%}$和伏秒特性散点。$U_{50\%}$试验采用升降法，GB/T16927.1—2011《高电压试验技术第一部分：一般试验要求》说明了操作步骤及方法[24]。伏秒特性散点试验内容如下：首先通过向绝缘子试品重复施加正极性标准雷电冲击电压下$U_{50\%}$值，使试品击穿 5 次，测量击穿电压及击穿时间；然后从$U_{50\%}$开始将设置的冲击电压值升高至$U_{50\%}$的 1.05、1.10、1.20、1.30、1.40、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4 倍(具体放电次数及施加电压值视设备耐压能力及安全要求而定)，每个电压下均放电 5 次，按照伏秒特性绘制方法记录击穿/峰值电压及击穿时间。试验同时记录了放电时现场气象参数包括温度、湿度及大气压强，如表 2 所示。

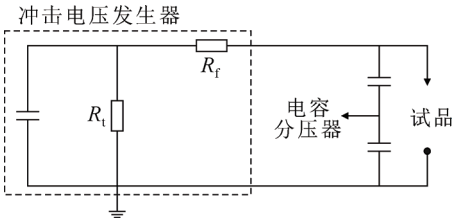


图 1　试验原理图

Fig.1　Test schematic diagram

表 1　试验工况

Table 1　Test conditions

试品	平原(10 m)		高海拔(2100 m)	
	干弧距离/m	波形/μs	干弧距离/m	波形/μs
复合绝缘子	1.33	1.27/43.7	1.12	0.85/45.12
棒-板间隙	1	1.15/46.8	1	1.07/48.92

2　标准波冲击试验结果分析

为分析海拔对冲击闪络特性的影响，将平原 110 kV 复合绝缘子干弧距离线性折算至 1.12 m，试验电压数据进行气象校正时采用 g 参数法[24]。

2.1　$U_{50\%}$对比

不同海拔下的 110 kV 单支复合绝缘子以及 1 m 棒-板间隙的 $U_{50\%}$对比如表 3 所示。由表 3 可知，未进行海拔校正时，绝缘子在高海拔下的 $U_{50\%}$比平原地区低 23%。而经 g 参数法进行气象校正后的 $U_{50\%}$差距不大，仅为 1%。对于 1 m 棒-板间隙的 $U_{50\%}$，校正前平原地区的 $U_{50\%}$比 2100 m 高海拔地区的试验数据高 13%，g 参数法校正后两者差距仍较大为 9%。对比分析表明，间隙与复合绝缘子、海拔、冲击电压波形等差异都可能对 $U_{50\%}$产生影响，相关文献也证明了这一点[25-27]。g 参数气象校正法对于 $U_{50\%}$的海拔校正有一定的适用性，但也存在偏差。此外，$U_{50\%}$作为绝缘子及空气间隙的闪络判据时没有考虑放电时间，计算站内雷电侵入波时会产生较大误差。因此需要探索更精确闪络判据的海拔校正方法。

2.2　伏秒特性对比

图 3 和图 4 分别为 110 kV 单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙在 2100 m 海拔和平原地区校正前后的伏秒特性曲线对比。

由图 3 可知，对于 110 kV 复合绝缘子，未进行海拔校正时，平原地区绝缘子的伏秒特性明显高于高海拔地区。采用 g 参数法对电压散点进行海拔校正以后，2 μs 时间以前两条伏秒特性曲线较为接近，但随着击穿时间的增加，整体上高海拔曲线高于平原地区，曲线间相对误差最高达 10%，比 $U_{50\%}$校正后的相对误差高出较多。而对于图 4 中的 1 m 棒-板间隙，进行气象校正后，两条曲线仍存在一定差距。

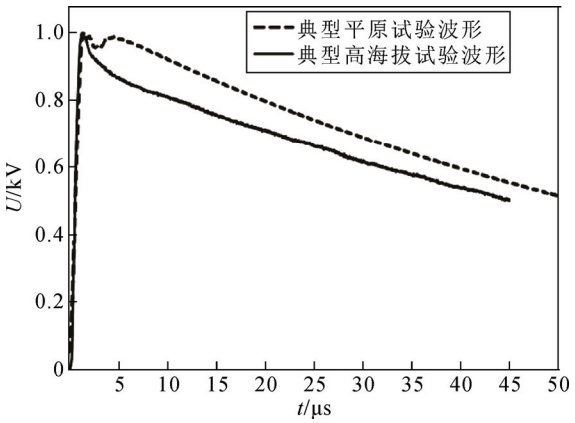


图 2　典型试验电压波形

Fig.2　Typical test voltage waveform

表 2　试验气象参数

Table 2　Test meteorological parameters

试品	平原(10 m)			高海拔(2100 m)		
	温度/℃	相对湿度/%	气压/kPa	温度/℃	相对湿度/%	气压/kPa
复合绝缘子	24.8	62	101.0	22.5	76	79.2
棒-板间隙	16.6	66	102.1	22	70	79.0

表 3　$U_{50\%}$试验结果

Table 3　$U_{50\%}$ test results

kV

条件	110 kV 复合绝缘子 $U_{50\%}$		1 m 棒-板间隙 $U_{50\%}$	
	高海拔(2100 m)	平原(10 m)	高海拔(2100 m)	平原(10 m)
未校正	617	760	541	612
气象校正后	747	755	666	612

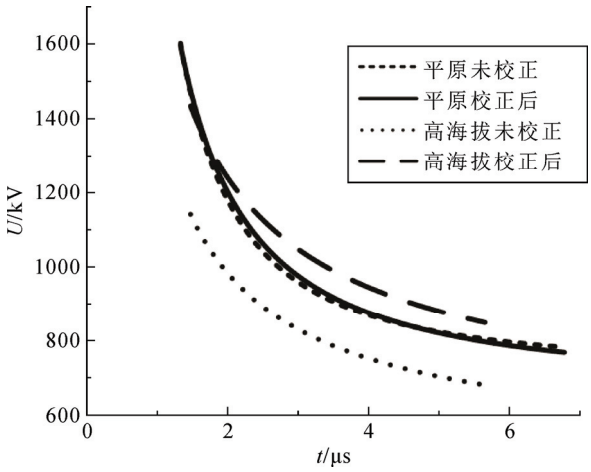


图 3　110 kV 复合绝缘子高海拔与平原伏秒特性对比

Fig.3　Comparison of volt-second characteristics between high altitude areas and plains of 110 kV composite insulator

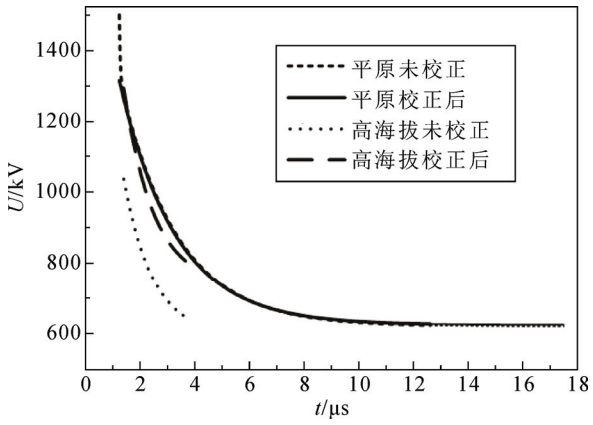


图 4 1 m 棒-板间隙高海拔与平原伏秒特性对比

Fig.4 Comparison of volt-second characteristics between high altitude areas and plains of 1 m rod to plate gap

分析原因是对伏秒特性散点进行海拔校正时仅校正电压值而未对击穿时间进行校正，因此 g 参数法用于伏秒特性的海拔校正时仅使曲线上下平移，产生的误差相对较大，影响输电线路耐雷水平计算的准确性。

3 先导发展模型海拔校正的适用性验证

3.1 模型参数计算方法

华南理工大学[13]基于 CIGRE 推荐先导发展模型即式(1)提出了改进后的先导发展速度公式，该公式考虑了间隙击穿中的海拔修正系数δ及先导通道压降 $E_l l$，并考虑采用试验真实冲击电压波形从伏秒特性曲线拟合先导公式系数，如式(2)所示。

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=k(U(t))\left(\frac{U(t)}{d-l}-E_0\right) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=k(U(t)-E_l l)\cdot\left(\frac{U(t)-E_l l}{d-l}-\delta E_0\right) \tag{2}$$

式中：$U(t)$为冲击电压；l 为先导长度；d 为干弧距离，闪络判断条件为 $l\geq 2/3d$；E_l 为先导通道平均场强，其为经验数据，当前尚未有文献提出 1 m 的复合绝缘子或棒-板间隙的先导通道场强数据。相关学者曾通过对试验数据的分析，得到了 1.5、5、10、13.5 m 间隙的先导通道平均场强分别为 500、160、100 及 80 kV/m[28-29]。可以看出，间隙越短，先导通道内部场强越大，对先导头部电压影响也更大，故对于不同结构材质的 1 m 级棒-板间隙及绝缘子的先导通道场强取值在 300~600 kV/m 范围内；E_0 为维持流注发展的最低场强，E_0 的大小将决定伏秒特性 U-t 曲线尾部即 $U_{50\%}$击穿散点的高低，对于 1 m 级的长间隙此值可取 400~800 kV/m；k 为先导发展速度系数，可取 0.5×10^{-6}~2.0×10^{-6}/m^{2}v^{-2}s^{-1}；δ 为海拔修正系数，在不同海拔地区用相对空气密度的大小表示。

上式中提出改变 δ 的大小可以实现先导发展闪络判据的海拔校正，但其并未开展平原地区对应试验验证。

因此，本文基于 2.1 及 2.2 节中的不同海拔下的 $U_{50\%}$及伏秒特性的试验结果，拟合得到的适用于不同海拔的 110 kV 单支复合绝缘子及 1m 棒-板间隙的先导发展速度公式分别如式(3)及式(4)所示。其中 110 kV 单支复合绝缘子的先导发展模型的参数 E_0=500 kV/m，k=1.2×10^{-6}/m^{2}v^{-2}s^{-1}，E_l=370 kV/m；1 m 棒-板间隙的先导发展模型的参数 E_0=410 kV/m，k=1×10^{-6}/m^{2}v^{-2}s^{-1}，E_l=400 kV/m。

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=1.2\times10^{-6}(U(t)-370l)\left(\frac{U(t)-370l}{d-l}-500\delta\right) \tag{3}$$

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=1\times10^{-6}(U(t)-400l)\left(\frac{U(t)-400l}{d-l}-410\delta\right) \tag{4}$$

3.2 模型验证

本文在平原及 2100 m 海拔地区的相对空气密度即对应式(3)和(4)中的δ分别为 1 和 0.78。应用式(3)和式(4)，以及 CIGRE 推荐模型式(1)分别对 110 kV 复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙在平原和高海拔地区计算真实试验波形冲击下的 U-t 曲线，并与试验所得的伏秒特性散点进行对比分析，如图 5 和图 6 所示，模型的拟合优度如表 4 所示。

由图 5、图 6 及表 4 可知，对于 110 kV 单支复合绝缘子及 1m 棒-板间隙，本文提出的先导模型算

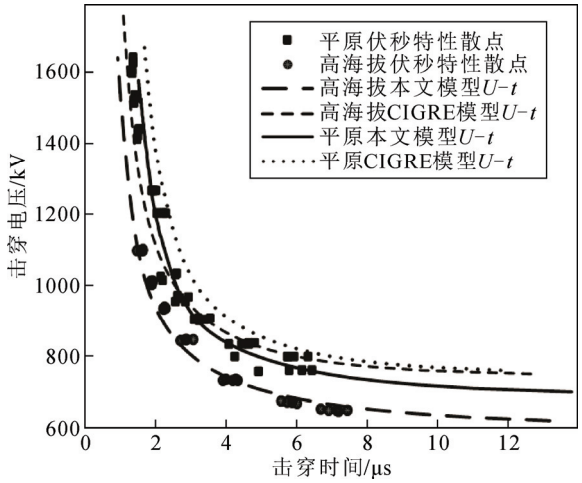


图 5 110 kV 单支绝缘子标准波先导发展模型验证

Fig.5 Standard wave leader propagation model verification of 110 kV non-equalizing ring insulator

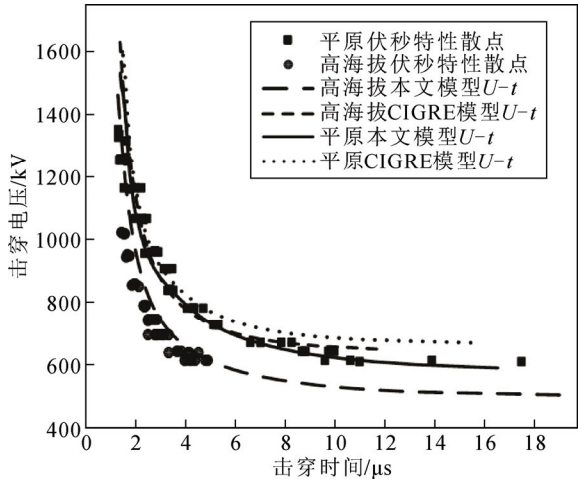


图 6　1 m 棒-板间隙标准波先导发展模型验证

Fig.6　Standard wave leader propagation model verification of 1 m rod to plate gap

式(3)和式(4)计算出的 *U-t* 曲线与高低海拔试验伏秒特性散点均具有较好的拟合优度，即式(3)和式(4)的先导发展模型公式可以实现较精确的海拔校正。

同时由图 5 和图 6 可知，由于 CIGRE 推荐模型无法反映海拔的影响，其在间隙和绝缘子在高海拔计算的 *U-t* 曲线与试验得到的伏秒特性散点均存在较大差异，因此在高海拔直接应用 CIGRE 模型会影响输电线路耐雷水平计算的精确度。其次，由于计算时输入的电压波形均为真实试验波形，因此 CIGRE 模型在两个海拔下计算得到的 *U-t* 曲线也存在一定差异。

此外，工程中的输电线路在遭受反击时，杆塔绝缘子两端承受的电压为正极性的短尾波，因此对于遭受反击的线路绝缘子应采用正短尾波先导发展模型。课题组前期在高海拔 2100 m 地区开展了真型塔中相 110 kV 复合绝缘子正极性短尾波冲击试验[13]，本次 110 kV 单支复合绝缘子的平原地区试验也另外补充开展了正极性短尾波冲击试验，试验工况如表 5 所示。

基于上述的先导发展模型的海拔校正思路，对这两次不同海拔的试验结果开展正短尾波先导模型海拔校正适用性研究，拟合的先导速度计算式如式(5)所示，模型验证结果如图 7 所示。

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}=0.6\times10^{-6}(U(t)-200l)\left(\frac{U(t)-200l}{d-l}-400\delta\right) \quad (5)$$

由图 7 可知，根据先导发展模型(5)计算出的 *U-t* 曲线与试验伏秒特性散点拟合度较好，高海拔为 0.926，平原地区为 0.981。说明本文提出的先导

表 4　本文正标准波先导模型拟合优度

Table 4　Goodness of fit of the positive standard wave leader propagation in this paper

试品	110 kV 复合绝缘子		1 m 棒-板间隙	
	高海拔 (2100 m)	平原 (10 m)	高海拔 (2100 m)	平原 (10 m)
拟合优度	0.986	0.992	0.987	0.968

表 5　短尾波试验工况

Table 5　Short-tail wave test condition

试品	平原(10 m)(单支)		高海拔(2100 m)(真型塔中)	
	干弧距离/m	波形/μs	干弧距离/m	波形/μs
110 kV 绝缘子	1.33	1.11/9.36	1.12	0.75/9.65

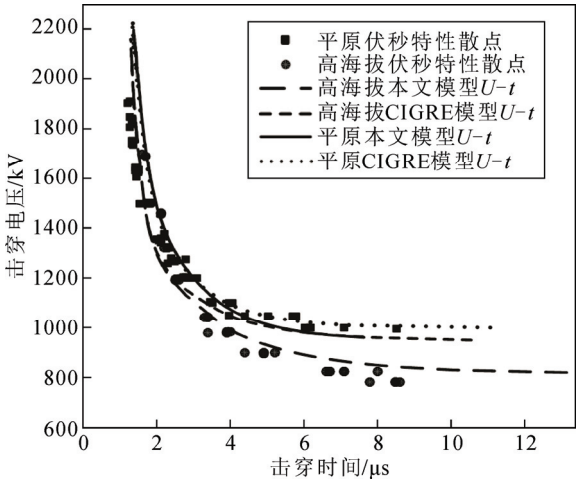


图 7　110 kV 复合绝缘子短尾波先导发展模型验证

Fig.7　Short tail wave leader propagation model verification of 110 kV composite insulator

模型中引入相对空气密度进行海拔校正的方法也可应用于短尾波冲击下的 110 kV 线路绝缘子。但由于真型塔、相别等对绝缘子表面的电场分布均有一定的影响，模型的拟合优度较前文的单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙的模型拟合结果略差。此外，CIGRE 推荐先导模型在 2100 m 海拔地区计算结果与试验伏秒特性散点存在较大差异，除了海拔，短尾波与标准波差异带来的影响不可忽略。

4　闪络判据对线路耐雷水平计算的影响

为了对比分析不同海拔下本文提出的具有海拔校正作用的先导发展模型，以及 CIGRE 推荐的先导发展模型在输电线路反击及绕击耐雷水平计算中的差异，建立了 110 kV 同塔双回输电线路的耐雷水平仿真模型[13,15]，反击及绕击耐雷水平计算结果如表 7 所示。

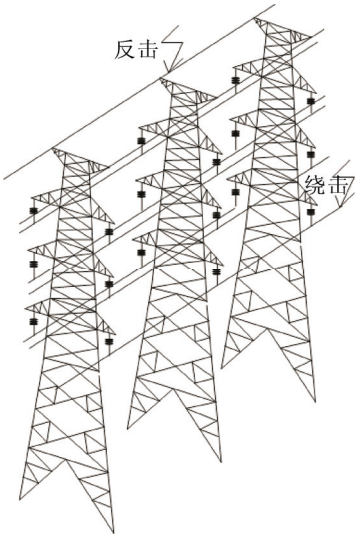


图 8　110 kV 输电线路结构

Fig.8　110 kV transmission line structure

表 7　线路耐雷水平

Table 7　Lightning resistance level of the line

海拔	闪络判据	反击耐雷水平/kA	绕击耐雷水平/kA
平原	本文先导模型	77	4.2
	CIGRE 判据	78	5.0
高海拔	本文先导模型	71	4.0
	CIGRE 判据	78	5.0

由表 7 可知，在平原 110 kV 线路反击耐雷水平计算方面，CIGRE 先导发展模型计算的耐雷水平为 78 kA，与本文模型的 77 kA 计算结果差异较小，说明 CIGRE 模型在平原对于反击耐雷水平计算有一定的适用性。但在 2100 m 高海拔地区，采用 CIGRE 模型计算的线路反击耐雷水平将高出 10%，证明了先导发展模型海拔校正的重要性。

而在 110 kV 线路绕击耐雷水平方面，因绕击耐雷水平较低，计算结果的绝对值差异不大，在 0.2~1 kA 之间，但不同模型及海拔校正引起的相对值差异达 20%。

5　结论

1）g 参数法用于 110 kV 绝缘子/1 m 棒-板间隙 $U_{50\%}$判据的海拔校正有一定的适用性，误差分别为在 1%和 9%，但 g 参数法不适用于伏秒特性的海拔校正。

2）提出了分别适用于 110 kV 单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙的具有海拔校正作用的先导发展模型，并通过对 110 kV 单支复合绝缘子及 1 m 棒-板间隙的雷电冲击试验，验证了引入相对空气密度 δ 的先导发展模型的海拔校正方法的适用性。

3）110 kV 输电线路耐雷水平仿真计算结果对比分析表明，用作绝缘子雷电冲击闪络判据的先导发展模型，需要考虑海拔校正，否则其耐雷水平计算结果会高出实际值 10%~20%。

本文仅在 1 m 左右的复合绝缘子和间隙上对先导发展模型的海拔校正作用进行了验证，更长距离绝缘上需要更多实验来验证。此外，对于间隙和绝缘子，其雷电冲击闪络特性受绝缘结构、尺寸、冲击波形特征、气象参数等众多因素影响，多种因素存在较大差异的时候不适合仅开展海拔的校正。在长间隙放电尚不能精确数值计算的条件下，基于精确试验条件和详尽试验结果的数据库的建立及人工智能算法的应用，可以弥补长间隙雷电冲击闪络特性预测的不足。

参考文献　References

[1] 晏　威，肖　纯，吴细秀，等. 基于雷电活动特征的 10 kV 配电线路雷击跳闸率计算[J]. 高电压技术，2021，47(3)：1118-1127.
YAN Wei, XIAO Chun, WU Xixiu, et al. Calculation of lightning trip out rate of 10 kV distribution lines based on lightning activity characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1118-1127.

[2] 王巨丰，黄上师，王嫡蕾，等. 架空线路用气体灭弧防雷发展综述[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3189-3199.
WANG Jufeng, HUANG Shangshi, WANG Yanlei, et al. Development of gas arc-extinguishing lightning protection in overhead lines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3189-3199.

[3] 马义刚，刘　磊，王　卫，等. 正极性雷电冲击电压下 5 m 棒-板空气间隙放电特性试验研究[J]. 南方电网技术，2019，13(6)：30-36.
MA Yigang, LIU Lei, WANG Wei, et al. Experimental study on the discharge characteristics of a 5 m rod-plane air gap under the positive lightning impulse[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 30-36.

[4] HAN Y X, TANG L, LI L C, et al. Influence of lightning flashover criterion on the calculated lightning withstand level of ±800 kV UHVDC transmission lines at high altitude[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 185-191.

[5] CIGRE Working Group 01 of SC 33. Guide to procedures for estimat-ing the lightning performance of transmission lines[J]. Electra, 1991(138): 138-171.

[6] 李恩文，李　斌，蒲金雨，等. 长空气间隙 50%放电电压的测量不确定度分析[J]. 南方电网技术，2022，16(7)：30-39.
LI Enwen, LI Bin, PU Jinyu, et al. Uncertainty in measurement analysis of 50% discharge voltage of long air gap[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(7): 30-39.

[7] 王生富，康　钧，曲全磊，等. ±400 kV 青藏直流输电线路外绝缘的高海拔地区运行适应性研究[J]. 高电压技术，2019，45(1)：152-158.
WANG Shengfu, KANG Jun, QU Quanlei, et al. Study on operation adaptability of external insulation in ±400 kV Qinghai-Tibet DC transmission lines in high altitude areas[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 152-158.

[8] 谷　琛，张文亮，范建斌，等. 棒-板间隙操作冲击放电电压的海拔校正[J]. 高电压技术，2012，38(1)：140-146.
GU Chen, ZHANG Wenliang, FAN Jianbin, et al. Altitude correction of switching impulse flashover voltage of rod-plane air gap[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 140-146.

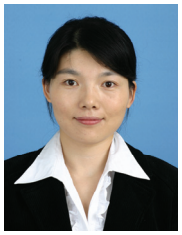
[9] 孙昭英，廖蔚明，宿志一，等. ±800 kV 直流输电工程空气间隙海

拔校正系数试验研究[J]. 电网技术，2008，32(22)：13-16.
SUN Zhaoying, LIAO Weiming, SU Zhiyi, et al. Test study on the altitude correction factors of air gaps of ±800 kV UHVDC projects[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 13-16.
[10] 方雅琪，王力农，李　瑞，等. 高海拔带电作业间隙操作冲击放电特性及放电电压校正[J]. 电工技术学报，2020，35(12)：2681-2688.
FANG Yaqi, WANG Linong, LI Rui, et al. Switching impulse flashover characteristics of live working air gaps in high altitude areas and discharge voltage correction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2681-2688.
[11] 丁玉剑，周松松，范建斌，等. 基于 g 参数法的棒－板长空气间隙操作冲击电压海拔校正分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(10)：2783-2789.
DING Yujian, ZHOU Songsong, FAN Jianbin, et al. Analysis on altitude correction of switching impulse discharge voltage for long rod-plate air gaps based on the g-method[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2783-2789.
[12] 丁玉剑，李庆峰，廖蔚明，等. 高海拔地区典型长空气间隙的操作冲击放电特性和海拔校正[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1441-1446.
DING Yujian, LI Qingfeng, LIAO Weiming, et al. Switching impulse discharge characteristics and altitude corrections for typical long air gaps at high altitude areas[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1441-1446.
[13] 阮耀萱. 高海拔地区 110 kV 绝缘子雷击闪络特性及闪络判据研究[D]. 广州：华南理工大学，2018.
RUAN Yaoxuan. The research on the lightning impulse flashover characteristics and lightning flashover criterion of 110 kV insulator[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.
[14] 张垭琦. 基于放电光强及光谱时空分布的 1 m 间隙雷电冲击放电机理及应用研究[D]. 广州：华南理工大学，2020.
ZHANG Yaqi, Study on the mechanism and application of 1-m air gap discharge under the lightning impulse based on the spatiotemporal distribution of discharge intensity and spectrum[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2018.
[15] 杨　杰，韩永霞，张垭琦，等. 高海拔酒杯塔中复合绝缘子短尾波冲击闪络特性[J]. 高电压技术，2019，45(3)：768-773.
YANG Jie, HAN Yongxia, ZHANG Yaqi, et al. Flashover performance of the composite insulators in cup-tower under the impact of short-wave in high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 768-773.
[16] 张垭琦，韩永霞，杨　杰，等. 高海拔真型塔 110 kV 绝缘子雷击闪络试验及判据研究[J]. 电网技术，2019，43(1)：340-348.
ZHANG Yaqi, HAN Yongxia, YANG Jie, et al. Lightning flashover performance test and flashover criterion study of insulators in a 110 kV true type tower at high altitude areas[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 340-348.
[17] 王小川，曾　嵘，何金良，等. 短尾波下空气间隙的放电特性实验及仿真[J]. 高电压技术，2008，34(5)：925-929.
WANG Xiaochuan, ZENG Rong, HE Jinliang, et al. Experiment and simulation of air gap breakdown characteristics under short-tail impulse waveform[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 925-929.
[18] WANG X, YU Z Q, HE J L. Breakdown process experiments of 110- to 500-kV insulator strings under short tail lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2394-2401.
[19] 崔　涛. 输电线路防雷计算中绝缘子串闪络判据研究[D]. 武汉：华中科技大学，2009.
CUI Tao. Study on insulation flashover criterion for lightning performance calculation[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
[20] 唐　力，韩永霞，郝艳捧，等. 高海拔地区特高压直流线路绝缘子的正极性先导发展法闪络判据[J]. 高电压技术，2016，42(6)：1900-1906.
TANG Li, HAN Yongxia, HAO Yanpeng, et al. Leader propagation model as positive flashover criterion of UHVDC line insulators at high altitude[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1900-1906.
[21] 杨　杰. 高海拔真型塔绝缘子和空气间隙闪络特性及电场分布研究[D]. 广州：华南理工大学，2019.
YANG Jie. Study on flashover characteristics and electric field distribution of insulators in high altitude true towers and air gap[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2019.
[22] 韩永霞，阮耀萱，张垭琦，等. 线路反击绝缘子短尾波分析及试验回路设计[J]. 高电压技术，2018，44(3)：772-778.
HAN Yongxia, RUAN Yaoxuan, ZHANG Yaqi, et al. Analysis on the characteristics of short-tail voltage wave of insulator on the double-circuit transmission line in back flashover and design of the experiment circuit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 772-778.
[23] HAO Y P, HAN Y X, TANG L, et al. Leader propagation models of ultrahigh-voltage insulator strings based on voltage/time curves under negative lightning impulses at high altitude[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1186-1192.
[24] 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 1 部分：一般定义及试验要求：GB/T 16927.1—2011[S]. 北京：中国电力出版社，2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, National Standardization Administration of China. High-voltage test techniques-part 1: general definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011.
[25] LUO B, LIU B X, WANG T T, et al. Lightning impulse characteristics of positive polarity of 110-500 kV composite insulator and comparative analysis of $U_{50\%}$[C]// 18th International Conference on AC and DC Power Transmission. Qingdao, China: IET, 2022: 1485-1491.
[26] 谢　梁，花广如，崔云骧，等. 湿度对棒-板间隙电晕特性的影响规律[J]. 南方电网技术，2021，15(7)：90-95.
XIE Liang, HUA Guangru, CUI Yunxiang, et al. Influence of humidity on the corona characteristics of the bar-plate gap[J]. Southern Power System Technology, 2021.15(7): 90-95.
[27] 韩永霞，唐　力，郝艳捧，等. 特高压直流线路复合绝缘子悬挂方式对其冲击闪络特性的影响[J]. 高电压技术，2015，41(4)：1272-1277.
HAN Yongxia, TANG Li, HAO Yanpeng, et al. Influence of suspension patterns of UHVDC line composite insulator on its impulse flashover characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1272-1277.
[28] LES Renardieres Group. Positive discharges in long air gaps at Les Renardieres-1975 results and conclusions[J]. Electra, 1977, 53: 31-152.
[29] GALLIMBERTI I, BACCHIEGA G, BONDIOU-CLERGERIE A, et al. Fundamental processes in long air gap discharges[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, 3(10): 1335-1359.



LIU Boxuan

刘柏炫
1999—，男，硕士
主要从事长间隙放电的研究工作
E-mail: liuboxuan99@163.com



HAN Yongxia
Ph.D., Professor
Corresponding author

韩永霞(通信作者)
1982—，女，博士，教授，博导
主要从事电力系统电磁暂态分析及防护、电力系统防雷、大数据分析及人工智能技术等的研究工作
E-mail: epyxhan@scut.edu.cn

收稿日期　2022-12-29　修回日期　2023-04-13　　编辑　曹昭君