

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.013

基于雷电分形模型的架空线路绕击特性分析试验

占金涛, 杨天翼, 郭俊

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:近年来,一类在电气几何模型、先导发展模型等基础上提出的可以体现雷电曲折性和分散性的分形模型逐步被用于架空线路雷电屏蔽性能研究。文中基于模拟试验和自然雷电的等效性,搭建1:40缩比试验平台,以常见500 kV输电线路用ZB6T型杆塔为研究对象,施加160/2 500 μ s 负极性操作冲击波,分别研究绕击率与空间分布和保护角的关系。基于WZ模型和有限差分法建立雷电分形模型,在缩比试验间隙配置下进行线路绕击特性仿真分析。模拟试验和仿真结果均表明:输电线路绕击率高的点集中在靠近传输线处,绕击空间整体呈现倒抛物线型,符合绕击规律。保护角减小,则绕击率相应降低,同时绕击空间略有减小。仿真结果与试验数据对比表明,文中构建的雷电分形模型在线路绕击率预测上具有较高可靠性。

关键词:雷电分形模型;等效性;缩比试验;架空线路;绕击率;雷电屏蔽分析

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)01-0126-10

0 引言

随着我国电网等级的提升和运行范围的扩大,线路稳定运行的安全问题越发重要。国内外运行经验显示:雷闪是造成输电线路故障的原因之一,其中绕击是引发特高压输电线路跳闸的首要原因^[1-2]。

近年来,一类在电气几何模型、先导流注模型等^[3]基础上提出的可以体现雷电曲折性和分散性的分形模型开始被用于雷电屏蔽性能研究。20世纪60年代末,Armstrong和Whitehead提出了早期的电气几何模型^[4]。Lee于1977年提出了电气几何模型的简化屏蔽模型——滚球法^[5]。1990年,Rizk提出了一种能够描述正负极性先导发展的模型^[6]。同年,Dellera和Garbagnati提出了先导发展模型^[7],与Rizk的模型不同,此模型认为下行先导和迎面先导始终沿其头部流注区最大场强方向发展。1984年,Niemeyer将分形理论用于描述气体绝缘介质中流注放电,提出介质击穿模型(dielectric breakdown model, DBM)^[8]。1986年,Wiesmann和Zeller在DBM的基础上提出WZ模型,引入放电通道发展的阈值场强。2000年,Kawasaki Z和Matsuura K以分形维数为指标成功复现了自然雷电的分形特性^[9]。

雷击与架空线路的相互作用一直是研究热点^[10-16]。国内关于输电线路雷电屏蔽性能的模式试验已开展多年。2008年,王羽等对ZBS型酒杯杆塔线路模型进行1:63的模拟放电试验研究,使用更

能逼近自然雷电的操作波进行了大量的冲击放电试验^[17]。2009年,郑家松等对ZB6T杆塔进行1:40模拟试验研究,试验结果表明,山区地形的绕击率远高于平原地区^[18]。2009年,贺恒鑫进行了1:40缩比的 ± 500 kV直流输电线路雷电模拟放电试验,得出了G4-40型杆塔绕击空间分布的结论^[19]。2014年,王羽等建立了缩比分别为1:80、1:40、1:25的500 kV输电线路模型,研究了输电线路缩比模型试验的影响因素^[20]。2020年,蓝磊等对 ± 1100 kV输电线路的雷电屏蔽性能进行了模型试验研究^[21]。

然而,上述屏蔽分析模型的仿真研究和架空线路的试验研究相对独立,现阶段尚缺乏将雷电屏蔽仿真同模拟试验相结合的研究,雷电分形模型在架空输电线路雷电屏蔽分析预测上的可靠性有待验证。对此,文中首先对500 kV输电线路的雷电屏蔽性能进行缩比试验研究,采用负极性160/2 500 μ s操作冲击电压波,开展模型缩比比例为1:40的雷电屏蔽模拟试验,结合静态相机拍摄的绕击放电过程,分析500 kV线路绕击率分布以及保护角影响绕击率的规律和特征。同时,基于雷电三维分形模型,在实际试验配置下开展先导发展过程仿真,对比绕击特性仿真结果与试验结果,验证所建立模型预测的结果。

1 雷电附着试验

试验选用1:40的缩比模型降低放电分散性的影响^[22],对典型500 kV输电线路的雷电绕击特性展开模拟试验,分别研究绕击特性在空间上的分布特征以及杆塔保护角对输电线路绕击特性的影响。

收稿日期:2024-06-12;修回日期:2024-08-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFE0115700)

地表结构的雷击附着点与自然雷下行先导的近地段关系密切,可忽略远地段,仅对末跃阶段进行模拟。在雷电模拟试验中,采用棒-板间隙模拟自然雷电现象,棒极尖端施加负极性电压。对比自然雷电与长间隙模拟试验^[23-25]得到的特征参数,具体见表1,可以看到二者的间隙尺寸、电荷量、放电电压、放电能量等都存在较大区别。但是自然雷电和长间隙模拟试验的间隙时间、各阶段先导的平均发展速度、回击过程的参量具有相同量级。基于自然雷电和长间隙试验在放电过程的相似性和物理参数上的相似性,可以认为自然雷电在接近地面时产生的电场能够由长间隙模拟试验等效。

表1 负极性地闪与负极性长间隙模拟试验放电参数

Table 1 The parameters of negative polarity ground flash and negative polarity long gap simulation test

放电参数	负极性地闪	负极性长间隙模拟试验
间隙尺寸/m	$2 \times 10^3 \sim 1.4 \times 10^4$	1~4
电荷量/C	10	10^{-2}
放电电压/V	10^8	$10^5 \sim 10^6$
间隙时间/s	$3 \times 10^{-5} \sim 1.25 \times 10^{-4}$	10^{-5}
放电能量/J	10^5	$10^2 \sim 10^3$
下行先导平均发展速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$1 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^6$	$10^5 \sim 10^6$
梯级先导平均发展速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	10^5	10^5
上行先导平均发展速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$10^4 \sim 10^5$	10^4
上行先导临界场强/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	$3 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$	5×10^5
回击电流速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$2 \times 10^7 \sim 1.4 \times 10^8$	$> 10^7$
回击电流大小/kA	1~ 10^2	1~10

1.1 试验平台搭建

图1为负极性长间隙雷电模拟试验平台,主要分为上位机冲击发生器加压部分、试验间隙部分和测控装置。图1中, C 为冲击发生器等效电容; g 为等效球隙; R_1 、 R_2 、 R_3 分别为等效波头电阻、等效阻尼电阻和等效波尾电阻; C_h 、 C_l 分别为分压器高、低压臂电容; CRO 为示波器; CAM 为蓝牙控制的静态相机; COM 为冲击发生器上位机,与电脑连接控制冲击发生器充放电。

1.1.1 主要试验设备

(1) 冲击发生器及其分压器。文中小尺寸缩比试验采用幅值1 800 kV/80 kJ冲击发生器及其测量系统。该冲击发生器采用恒压充电方式,共9级,可产生1.2/50 μs 标准雷电波至250/2 500 μs 标准操作波,通过调整每级充电电压可改变冲击电压幅值,标准操作冲击下最大幅值可达1.2 MV,满足文

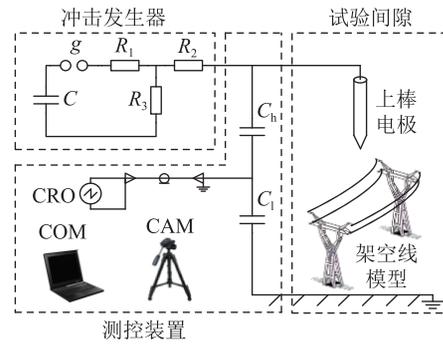


图1 试验平台示意

Fig.1 Schematic diagram of the test platform

中试验要求。冲击发生器及分压器实物如图2所示,等效电路如图3所示。图3中, T 为调压器; D 为二极管; r 为保护电阻; r_f 为波头电阻; r_t 为波尾电阻; R 为充电电阻; $g_1 \sim g_9$ 为球隙; $C_1 \sim C_{18}$ 为主电容; C_0 为被试电容。

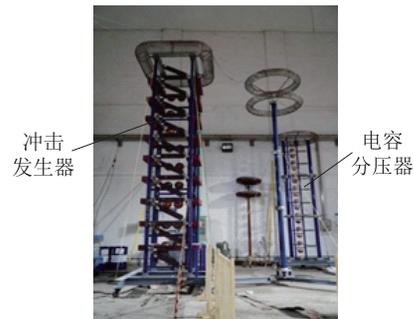


图2 冲击发生器及电容分压器实物

Fig.2 Impact generator and capacitor voltage divider

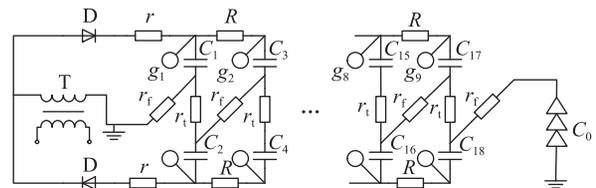


图3 冲击发生器等效电路

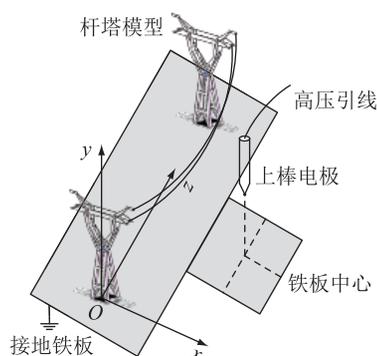
Fig.3 Impact generator equivalent circuit

(2) 示波器及二次分压器。试验所用示波器型号为DPO3054,带宽500 MHz,置于屏蔽箱中,用以记录试验电压波形。而实测电压达兆伏,因此须考虑示波器的最大接受电压。经图2中分压比为1 140的电容分压器分压后,电压仍在千伏级,故采用自制分压比为102.7的二次电阻分压器进一步降低输入示波器的电压。

1.1.2 试验间隙布置

文中采用常见500 kV输电线路模型,以ZB6T型杆塔为研究对象,以1:40缩比比例模拟间隙,图4(a)为间隙示意,图4(b)为模型实物。采用单档距输电线路模型,档距长度约为5 m,以一侧杆塔中心

为几何原点,平行架设两形状相同的杆塔模型, x 轴、 z 轴在地平面上,其中 z 轴与杆塔中相导线平行,杆塔的中轴线记为 y 轴。杆塔中间位置一定距离处垂直悬挂棒状电极,将上棒电极尖端在 xy 平面的位置定义为 (x,y) ,定义方法如图4(a)所示。



(a) 试验间隙示意图



(b) 试验间隙实物

图4 试验间隙布置

Fig.4 Test gap arrangement

ZB6T型500 kV输电线路杆塔模型经1:40缩比后的尺寸见表2。模型中,分别选用直径1 mm的裸铁丝和直径2 mm的裸铜丝模拟避雷线和输电导线,避雷线和导线的高度和分布情况见图5,避雷线端部与各个杆塔直接接地。为了体现避雷线和输电导线上先导起始时间的区别,输电导线端部经过300 Ω 的电阻接地。绝缘子用尼龙绳模拟,长度根据实际4.5 m长绝缘子按相应比例缩小,并忽略线路弧垂影响。在未说明情况下,线路保护角为12°。

表2 ZB6T型杆塔及模型尺寸

Table 2 Size of ZB6T tower and model

参数	实际尺寸/m	模型尺寸/cm
避雷线高度	42.8	107.0
避雷线间距/2 (保护角-5°~12°)	16.32~12.48	40.8~31.2
导线高度	30	75
导线间距	15.2	38.0

1.2 试验参数选择

1.2.1 棒电极参数

雷电模拟试验与长间隙放电存在局部等效,未跃阶段时下行先导接近地面,产生的电场与棒-板间

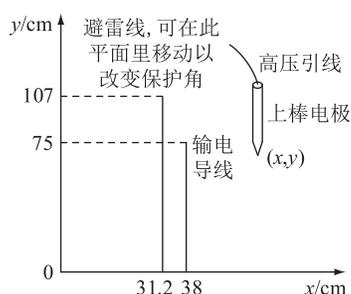


图5 线路及电极布置方式

Fig.5 Transmission lines and electrode layout

隙产生的电场存在相似性。自然雷电先导直径约为0.4~40 cm,参考相关模拟试验并考虑到文中的缩比比例,则直径尺寸约为0.1~10 mm。文中选用直径10 mm、长约4 m、头部为顶角30°的圆锥型铜棒模拟雷电下行先导的末端,上棒电极垂直放置,可伸缩。

1.2.2 板电极参数

板电极主要考虑杆塔模型宽度和试验场地的大小,档距约5 m,上棒电极距离导线结构约1 m,试验场地呈T字形,最终板电极选为6块3 m×2 m×1.5 mm的铝合金板,两侧经地线接地。棒电极的头部与板电极中轴线平行,以避免板电极边缘效应对试验的影响。

1.2.3 附着点概率的计算方法

试验过程中随着上棒电极位置的移动,间隙距离改变,在电极尖端每个位置施加该间隙条件下,“避雷线-电极”“导线-电极”与“大地-电极”中最大的50%冲击击穿电压值 $U_{50\%}$, $U_{50\%}$ 在试验前测定。每个电极尖端位置进行20~35次放电,分别记录下行先导击中避雷线、导线和地面的次数,并转换为百分数,在非常明显全击中某一物体的情况下,可以适当减少放电次数。

1.2.4 试验电压波形选择

近距离的负地闪电场分布观测结果显示,自然雷电在近地面引起电场显著变化的作用时间与操作冲击波波前时间相似,同时产生的电场分布与操作波产生电场较为接近,参考GJB 3567-99以及前学者进行雷电模拟采用的电压波形^[26],160 μ s的波前时间能有效模拟下行先导逼近时空间电场的分布。因此文中试验模拟雷电的冲击电压选160/2 500 μ s的负极性操作冲击电压。此时,冲击发生器等效电路如图6(a)所示,实测典型波形如图6(b)所示,波头时间 $T_r = 192 \mu$ s,波尾时间 $T_f = 2 105 \mu$ s,波头、波尾误差均在 $\pm 20\%$ 范围之内,效率稳定在77.68%左右,可满足文中试验要求。

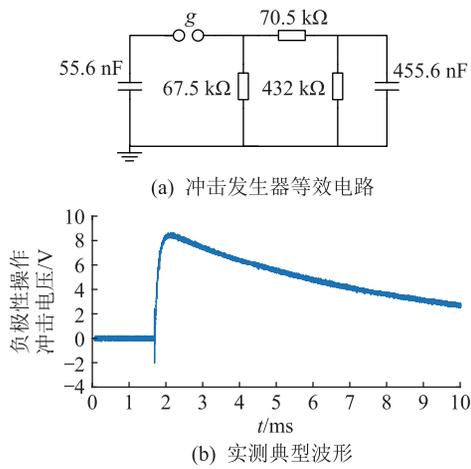


图6 160/2 500 μs冲击发生器等效电路及典型波形

Fig.6 Equivalent circuit and typical waveform of 160/2 500 μs impact generator

1.3 试验方法

1.3.1 50%冲击击穿电压求取方法

根据 GB/T 16927.1—2011, 采用升降法, 求取间隙的 50% 冲击击穿电压。根据棒-板间隙击穿电压曲线估计间隙放电电压 U_0 , 并考虑高压发生器的使用效率, 取 U_0 的 2%~3% 作为级差 ΔU , 第一次施加电压为 U_0 , 若发生击穿, 则第二次施加电压为 $U_0 - \Delta U$, 若没有发生击穿, 则第二次施加电压为 $U_0 + \Delta U$, 如此多次加压, 发生击穿时对应电压记为 U_i , 分别记录到达 U_i 的加压次数 n_i , 则 50% 击穿电压的表达式为:

$$U_{50\%} = \frac{\sum_i U_i n_i}{\sum_i n_i} \quad (1)$$

1.3.2 大气校正方法

文中试验持续时间长, 而且缩比模型易受环境条件影响, 为减少大气条件对试验结果的影响, 基于 GB/T 16927.1—2011, 将试验得到的 $U_{50\%}$ (温度 $T_1 = 22.9$ °C, 压强 $p_1 = 96.4$ kPa, 湿度 $h_1 = 11.8$ g/m³) 转换到标准大气参考条件下 (温度 $T_0 = 20$ °C, 压强 $p_0 = 101.3$ kPa, 湿度 $h_0 = 11$ g/m³)。外绝缘击穿电压值正比于大气修正因数 K_1 , K_1 为空气密度校正因数 K_1 和湿度校正因数 K_2 的乘积。

$$K_1 = K_1 K_2 \quad (2)$$

K_1 取决于相对空气密度 δ :

$$K_1 = \delta^m \quad (3)$$

$$\delta = \frac{p_1}{p_0} \times \frac{273 + T_0}{273 + T_1} \quad (4)$$

式中: m 为指数, 与修正因数 ω 、 g' 有关, 具体见表 3。

表3 指数 m 和 ω 与参数 g' 的关系Table 3 The relationship of exponents m and ω to the parameter g'

g'	m	ω
<0.2	0	0
0.2~1.0	$g'(g'-0.2)/0.8$	$g'(g'-0.2)/0.8$
1.0~1.2	1.0	1.0
1.2~2.0	1.0	$(2-g')(2.2-g')/0.8$
>2.0	1.0	0

湿度校正因数 K_2 计算如下:

$$K_2 = K^\omega \quad (5)$$

式中: K 为一个与试验电压类型有关的参数, 与绝对湿度 h 和相对空气密度 δ 的比率有关, 在冲击电压条件下可由式(6)求得。

$$K = 1 + 0.01(h/\delta - 11) \quad (6)$$

修正因数 ω 依赖于预放电型式, 需要引入与实际大气条件下的 50% 放电电压 $U_{50\%}$ 、最小放电路径 l 、 δ 和 K 有关的参数 g' 确定。

$$g' = \frac{U_{50\%}}{500l\delta K} \quad (7)$$

计算得到参数 g' 后, 由表 3 得到指数 m 和 ω , 通过式(3)、式(5)求得 K_1 和 K_2 , 则标准参考大气条件下的 50% 放电电压 $U_{50\%,0}$ 为:

$$U_{50\%,0} = U_{50\%}/K_1 \quad (8)$$

1.4 绕击率随空间分布

1.4.1 试验方案

试验时电极尖端的 z 坐标固定, 通过改变地面结构的位置, 改变电极尖端的相对位置。选择空间内各点, 尖端高度从 70 cm 增大至 110 cm, 尖端距原点距离从 60 cm 增加至 100 cm, 步长不固定。对每种间隙布置均施加电压幅值为该试验间隙下“棒-避雷线”“棒-导线”和“棒-大地”的 50% 击穿电压, 表 4 为各间隙条件下测得的 50% 击穿电压。

表4 各间隙条件下测得的 50% 击穿电压

Table 4 $U_{50\%}$ measured at each gap configuration 单位: kV

x/cm	y/cm					
	70	80	90	95	100	110
60	73.5	75.0	76.0	77.0	78.0	—
70	82.0	83.0	84.0	—	85.0	86.0
80	88.6	89.0	90.0	—	92.0	—
90	100.8	101.0	103.0	—	106.0	—
100	—	95.6	—	108.0	—	—

对于每种间隙布置, 施加幅值略高于 $U_{50\%}$, 波形为 160/2 500 μs 的负极性操作冲击, 进行 25~30 次放电, 统计击中点情况并转换为百分数。通过空

间多点的绕击模拟试验,研究绕击率在导线附近空间的分布情况,并将空间分布按绕击率分成5组,即0%~10%、10%~30%、30%~60%、60%~80%、80%~95%。

1.4.2 试验结果及分析

试验得到的绕击率空间分布如图7所示,整体上,绕击空间分布近似为抛物线,垂直方向上基本呈现出距离地面越高,绕击率越小的变化趋势。

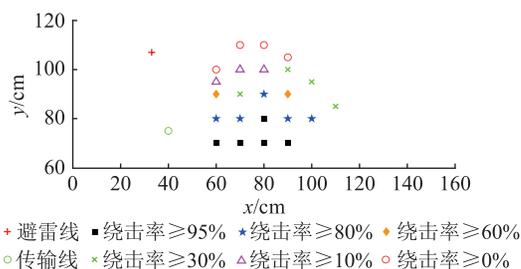


图7 试验结果统计

Fig.7 Statistics of test results

绕击率高的点主要集中在水平方向离输电线较近,并且略高于输电线的空间内。当上棒电极在 $y=100\text{ cm}$ 左右时,绕击率快速下降,整体呈现U型。上棒电极较高时,棒电极末端处于避雷线的吸引半径,基本不发生绕击;当上棒电极高度降低时,模拟先导进入导线吸引半径,绕击率相应增加,部分点绕击率可能会增加到100%;在水平方向较远处,由于此时棒电极位于地面的吸引半径内,因此绕击率会相应降低。

与电气几何模型不同的是当棒电极低于导线,位于 $(70,60)$ 处时绕击率较高,这可能与接近导线地区电场较不均匀有关,单位距离内绕击率变化幅度较大。同时,在电气几何模型中将下行先导视为一个理想点,而实际试验中,下行先导是一电位处处相等的棒电极。

为了更直观地研究平面各点的绕击率分布,将试验结果按照区间划分并将各个区间的绕击变化趋势合并对比,得到绕击率随高度变化的趋势,如图8、图9所示。

图8为拟合得到的竖直方向绕击分布情况,可见绕击率最高的点在靠近输电线的部分,并且在水平方向上越接近输电线,垂直方向上随高度增加后绕击率降低越慢,距输电线较远的点随高度增加绕击空间快速缩小。

图9为拟合得到的水平方向绕击分布情况,平面 $y=60\text{ cm}$ 时,绕击率都接近100%,随着平面 y 的下降,绕击率减小;同样平面 y 都是减小10 cm,当平面 y 接近于导线高度时,绕击率降低的幅度会显

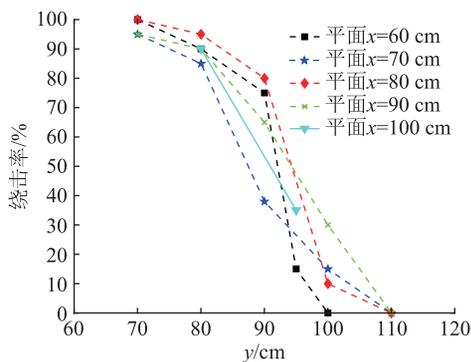


图8 拟合得到的竖直方向绕击分布情况

Fig.8 The fitted vertical flashover distribution

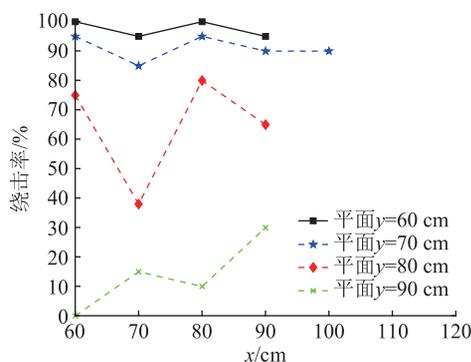


图9 拟合得到的水平方向绕击分布情况

Fig.9 The fitted horizontal flashover distribution

著增加,绕击率随着电极尖端高度的降低而显著增加。当电极高度固定时,改变电极与导线的水平距离时,发现绕击率基本处于某个稳定值的附近。

综上,试验发现传输线附近绕击率呈抛物线型随空间变化,绕击率高的上电棒空间布置位置主要集中于离导线较近的且高于导线的中间位置。

1.5 保护角变化对绕击率的影响

1.5.1 试验方案

为研究ZB6T型杆塔保护角对绕击率的影响,选择保护角为 12° 、 5° 和 0° 时的绕击情况进行对比分析。通过固定传输线位置,调整避雷线在水平方向上的安装位置改变保护角,如图10所示。在绕击空间分布试验时发现 $x=90\text{ cm}$ 时绕击率分布变化陡度较慢,故试验时电极尖端的 x 和 z 坐标固定,改变电极尖端的高度 y 。选择空间内各点,对每种间隙布置均施加电压幅值略高于该试验间隙“棒-避雷线”“棒-导线”“棒-大地”的 $U_{50\%}$,波形为 $160/2\ 500\ \mu\text{s}$ 的负极性操作冲击,进行25~30次放电,统计击中点情况并转换为百分数。通过空间多点的绕击模拟试验,研究保护角的变化对绕击率的影响。

1.5.2 试验结果及分析

改变保护角的大小,所得绕击率如图11所示。可见,随着保护角变小,绕击空间略微减小,保护角

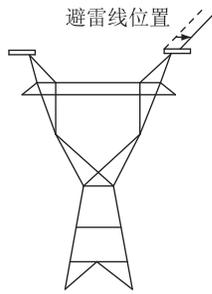


图 10 试验方案示意

Fig.10 Schematic diagram of the test scheme

为 0° 时,随着上棒电极尖端高度增大,绕击率为 0% 的情况更先出现。随着保护角变小,绕击率变化幅度变小,相较于保护角为 0° ,当保护角为 12° 时,绕击率更快速地降低到 0% 。同样可见,随着保护角的变小,在 $x=90\text{ cm}$ 处绕击率总体上有很大的降低。受试验条件限制,上棒电极无法完全低于避雷线高度,故未能获得更多试验数据点。

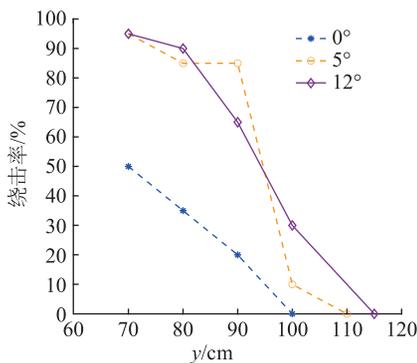


图 11 保护角变化对绕击率的影响

Fig.11 The effect of the change of protection angle on the flashover probability

由试验结果可见,在 $x=90\text{ cm}$ 空间内,减小保护角,绕击率明显降低。保护角较大时,棒电极距避雷线的距离大于到传输线的距离,传输线的暴露空间较大。

在 $x=90\text{ cm}$ 空间内,电极高度为 90 cm 时,发现保护角为 12° 时所得的绕击率反而低于保护角为 5° 时所得的绕击率,对此情况出现的可能原因进行分析:考虑到雷电放电的分散性,每次试验的结果都会具有不确定性,为了降低放电的分散性,需要进行多次放电试验以尽可能地降低其对结果的影响,且放电次数越多,所得的试验结果越好。而由于试验条件的限制,文中放电次数为 $25\sim 30$ 次,试验次数较少,导致出现保护角为 12° 时所得的绕击率反而低于保护角为 5° 时所得的绕击率的情况。但从图 11 整体来看,仍可得出绕击率会随着保护角的降低而减小的结论。

1.6 放电图像分析

1.4 节、1.5 节中的典型放电通道图像以及局部特性如图 12 所示。

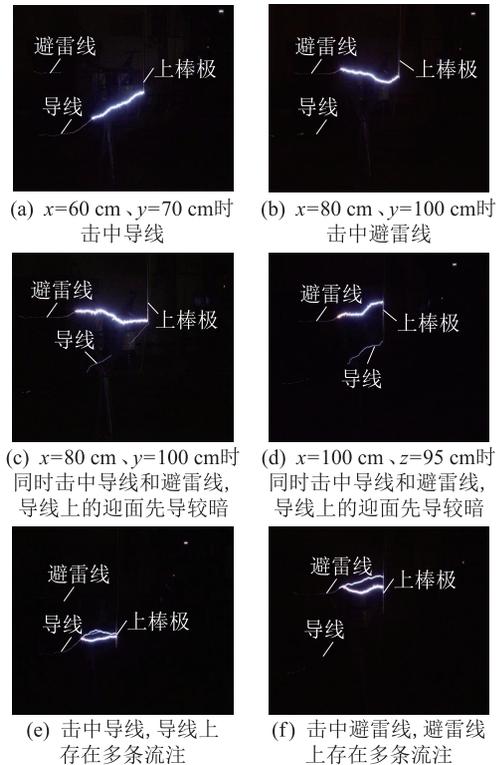


图 12 典型放电通道图像

Fig.12 Image of typical discharge channels

图 12(a)、(b) 分别为负极性操作冲击下,保护角为 12° 时,击中导线和避雷线的情况;图 12(c)、(d) 为施加负极性操作冲击电压时,同时击中导线和避雷线的情况;图 12(e)、(f) 分别为施加负极性操作冲击电压时,导线和避雷线出现多条流注的情况。

施加负极性操作冲击电压时,试验间隙内放电通道外形与自然雷电先导通道相似,有明显的随机性和曲折性,间隙的击穿主要为上棒电极和地面结构的流注贯穿过程。由图 12(c)、(d) 可以推断,在下行先导发展过程中,导线和避雷线可能都产生了迎面流注,下行先导选择性地击中导线和避雷线,可以认为导线和避雷线并非相互独立的 2 个结构,雷电的先导最终附着结果是由传输线、避雷线和大地共同竞争的结果决定。

2 雷电先导三维分形模型仿真

雷电分形模型基于 WZ 模型思想,能够复现雷电先导的曲折、分岔、随机性。文中基于三维雷电分形模型,在实际试验配置下开展先导发展过程仿真,将绕击特性仿真结果与试验结果对比,以验证

所构建模型在绕击率预测方面的可靠性。

2.1 模型概述

模型以有限差分法计算空间电场,将求解空间划分为三维的矩阵,相邻格点间距 $L=1\text{ cm}$,将地面模型坐标化并进行适当的简化。图 13 为地面模型示意,基于现场试验环境搭建了 $5\text{ m}\times 3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的仿真空间模拟雷电先导发展,其中杆塔简化为干字型杆塔,杆塔的尺寸、避雷线以及导线的高度均根据试验中所使用的模型确定,如表 2 所示。仿真域上棒电极电位为 V_{c1} ,认为先导发展点与上棒电极等电位。避雷线、杆塔接地,电位为 0,传输线上电位为 V_{c2} 。由于文中未施加直流偏置电压,传输线上电位 $V_{c2}=0$,其余边界为悬浮边界。空间电位 U 满足拉普拉斯方程,即式(9)。

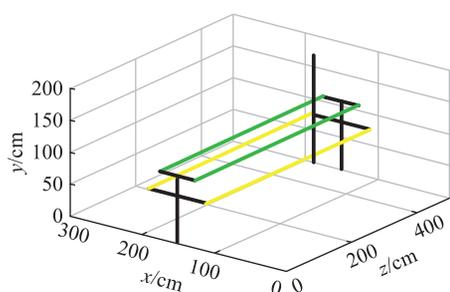


图 13 地面模型示意

Fig.13 Schematic diagram of the established model

$$\nabla^2 U = 0 \quad (9)$$

在上述边界条件下,用超松弛迭代法求解空间电场分布,则第 $i+1$ 次迭代后, (x,y) 处电位为:

$$U_{i+1,(x,y,z)} = U_{i,(x,y,z)} + \frac{\mu}{6} \left(\sum_i U_{i,(x\pm L,y\pm L,z\pm L)} - 6U_{i,(x,y,z)} \right) \quad (10)$$

$$\mu = 2 / \left(1 + \sin\left(\frac{\pi}{N-1}\right) \right) \quad (11)$$

式中: μ 为超松弛迭代因子,文中取 $\mu=2$ 。

仿真模型中已预设下行先导和迎面先导分别自上、下电极端部起始。每次迭代收敛后,先导由第 i 个已发展点向第 j 个待发展点发展的概率计算如下:

$$P_{i \rightarrow j} = \begin{cases} \frac{(E_{i \rightarrow j} - E_b)^\eta}{\sum_{p=1}^{N_d} \sum_{q=1}^{N_c} (E_{p \rightarrow q} - E_b)^\eta} & E_{i \rightarrow j} > E_b \\ 0 & E_{i \rightarrow j} < E_b \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_b 为下行先导发展的临界背景场强; $E_{i \rightarrow j}$ 为 i,j 两点之间的平均场强; N_d 、 N_c 分别为已发展点和待发展点的数量; η 为发展指数,表征先导发展方

向对电场强度的依赖程度,同时影响放电通道的分形维数。每产生一个新的先导发展点,都要重新计算空间电位矩阵。当误差小于设定值时,判断间隙是否发生击穿,当上下行先导头部距离达到临界击距 L_g 时,则认为间隙被击穿。流程如图 14 所示。

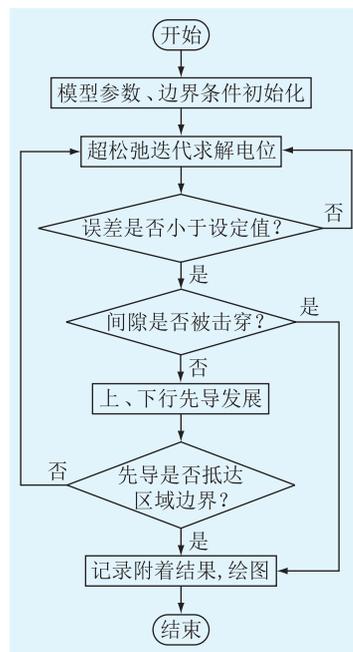


图 14 雷电分形模型流程

Fig.14 Flow chart of lightning fractal model

2.2 仿真参数选取

由上文可知,仿真模型主要参数有上棒电极电压 U_{up} 、迎面先导-流注发展背景电场 E_b ,临界击距 L_g 和发展指数 η ,其中各个仿真参数取值分别为 $U_{up}=-400\text{ kV}$, $E_b=150\text{ kV/m}^{[22]}$, $\eta=2$ 。

根据式(13)选择临界击距 L_g ,并按照缩比比例在各个上棒电极测试点分别计算。

$$L_g = \frac{h_d + h_b}{2(1 - \sin(\theta + \alpha))} \quad (13)$$

式中: h_d 为导线平均悬挂高度; h_b 为避雷线平均悬挂高度; θ 为地面倾斜度; α 为杆塔保护角。

2.3 仿真与试验对比分析

2.3.1 绕击率空间分布

在前文试验中,绕击率空间分布与仿真结果对比如图 15 所示,可见仿真结果中绕击空间基本呈现倒抛物线型,高度与传输线接近且水平距离靠近传输线的区域绕击率较高;离传输线越远,绕击率相应减小。绕击率为 0%~10% 的绕击空间分布基本为倒 U 型,符合电气几何模型。

仿真结果与试验结果在 $(70, 90)$ 、 $(90, 70)$ 、 $(90, 90)$ 、 $(90, 100)$ 处绕击率差值较大,具体如表 5 所示。

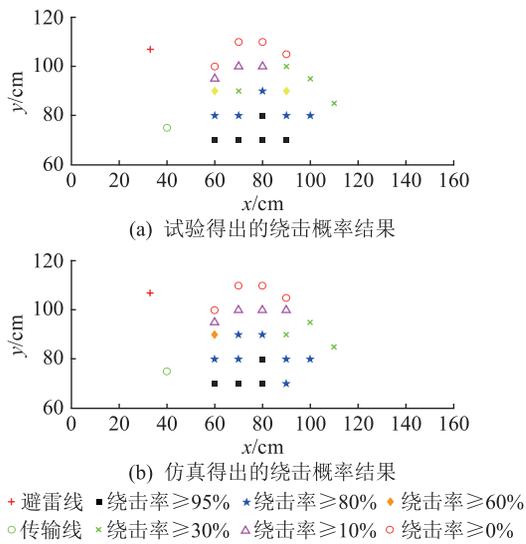


图 15 试验与仿真中绕击率空间分布对比
Fig.15 Comparison of flashover probability distribution in test and simulation

表 5 部分点绕击率

Table 5 The flashover probability at some points

结果	(70,90)	(90,70)	(90,90)	(90,100)
试验结果	≥30%	≥95%	≥60%	≥30%
仿真结果	≥80%	≥80%	≥30%	≥10%

对比发现相较于试验所得的结果,仿真结果的绕击空间略微减小,其可能原因如下:

(1) 模拟试验为 1:40 的小尺寸缩比试验,间隙尺寸较小时,对应的击距较小,相应的绕击空间分布更密集,电极的引雷能力会被放大,因此模拟试验无法完全等效于自然雷电。

(2) 试验放电次数较少,每种试验配置下仅进行 20~30 次放电,而且试验周期较长,各时间段大气条件有变化,相同配置下测得的绕击率存在差异。同时由于棒电极较长,在试验过程中无法避免出现类似于单摆的振动现象,实际棒电极的位置与设定值存在偏差,此类随机误差在多次重复试验中可以忽略,而文中试验次数较少,可能导致绕击率存在偏差。

(3) 仿真无法完全体现雷电发展过程中的随机性,上棒电极在加压时,上棒电极末端流注可能多次起始,增加了实际放电下行流注先导体发展方向的随机性,导致在棒尖高度位于避雷线和传输线中部区域时,附着结果分散性更大,试验所得绕击率相较于仿真值更接近 50%。同时还需要注意到模拟试验中上行先导在避雷线、导线上自由起始,而在仿真试验中仅选择最有可能的档距中间 6 个上行先导预发展点,这对绕击空间分布结果有一定影响。

2.3.2 保护角变化对绕击率的影响

保护角变化对绕击率影响的仿真结果如图 16 所示。可见模拟试验和仿真所得的结果接近,绕击率变化规律相似,随着保护角变小,绕击率明显降低,绕击空间略微减小。总体而言,仿真与试验符合度良好。

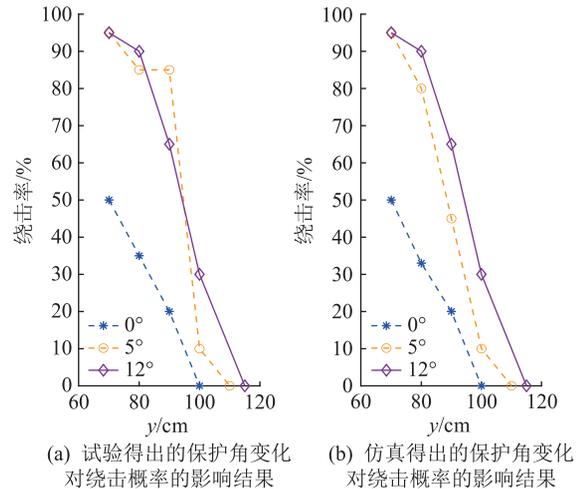


图 16 试验与仿真中保护角变化对绕击率的影响
Fig.16 The influence on flashover probability under different protection angle in test and simulation

对比图 16 中的模拟试验结果与仿真结果,保护角为 0°和 12°时,两者结果相似,绕击率大小在各个点位处基本相等;而保护角为 5°时,相较于模拟试验中出现的异常点,仿真得出的结果没有该异常点,所得的绕击率分布更符合规律。仿真所得的结果更遵循绕击率随着保护角的减小而减小的规律。

文献[20]对 500 kV 交流放电输电线路缩比模型进行了放电试验,对比该文献与文中对 1:40 缩比模型的模拟试验以及模型仿真结果,可知文中所得的操作冲击波下空间绕击率分布图与文献[20]中结果相似,绕击空间都近似为倾斜的抛物线。对比保护角的影响,文中与文献[20]都研究了保护角为 12°、5°、0°时对绕击率的影响,得出了保护角减小时,绕击率依次降低,绕击空间缩小的结论。

3 结论

文中以 ZB6T 型 500 kV 交流输电线路 1:40 缩比模型为研究对象开展试验研究,施加 160/2 500 μs 负极性操作冲击电压,通过多次重复放电考察上棒电极沿导线放置位置和杆塔保护角对绕击率的影响。构建雷电先导分形模型,验证了先导发展的随机性和分形模型在输电线路绕击率预测上的可靠性。结论如下:

(1) 线路绕击空间分布近似为抛物线形,水平

方向上距离传输线越近绕击率越大;竖直方向上绕击率随高度增加呈现降低趋势。绕击率高的点主要集中于水平方向靠近输电线、竖直方向略高于输电线的空间内。

(2) 绕击率随着线路保护角的减小而减小,绕击空间随着线路保护角的减小而略微减小。

(3) 基于 WZ 模型原理和有限差分法计算空间电场模拟雷电发展路径,建立雷电分形模型,与模拟试验结果进行对比,在绕击空间分布仿真中模拟试验存在一定误差;在保护角对绕击率影响的仿真中,仿真结果与模拟试验结果接近,验证了仿真模型可靠性。

参考文献:

[1] 王剑,谷山强,彭波,等. 国网辖区特高压直流线路防雷运行现状分析[J]. 全球能源互联网,2018,1(4):511-520.
WANG Jian, GU Shanqiang, PENG Bo, et al. Research on lightning protection operation status of UHVDC transmission lines in SGCC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4):511-520.

[2] 李彦锋,杨岩,杨延斌,等. 大理典型密集输电通道雷击特性分析[J]. 电瓷避雷器,2024(4):46-54.
LI Yanfeng, YANG Yan, YANG Yanbin, et al. Lightning strike characteristics of typical dense transmission lines in Dali [J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(4):46-54.

[3] 师伟,张丕沛,孙景文,等. 特高压输电线路雷电屏蔽分析方法研究综述[J]. 电瓷避雷器,2020(6):41-51.
SHI Wei, ZHANG Pipei, SUN Jingwen, et al. Review of lightning shielding analysis methods for UHV transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6):41-51.

[4] ARMSTRONG H R, WHITEHEAD E R. Field and analytical studies of transmission line shielding[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, PAS-87(1):270-281.

[5] LEE R H. Lightning protection of buildings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1979, IA-15(3):236-240.

[6] RIZK F A M. Critical switching impulse strength of long air gaps: modelling of air density effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3):1507-1515.

[7] DELLERA L, GARBAGNATI E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. I. Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4):2009-2022.

[8] NIEMEYER L, PIETRONERO L, WIESMANN H J. Fractal dimension of dielectric breakdown[J]. Physical Review Letters, 1984, 52(12):1033-1036.

[9] KATSUNO Y, KAWASAKI Z I, MATSUURA K. Does the lightning channel show the fractal[J]. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 1991, 111(5):496-497.

[10] 刘举成,董新胜,何山,等. 基于 KL-VMD 的架空线路雷击故障识别[J]. 电瓷避雷器,2024(5):12-20.
LIU Jucheng, DONG Xinsheng, HE Shan, et al. Lightning fault

identification of overhead line based on KL-VMD[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(5):12-20.

[11] HE J L, ZHANG X W, DONG L, et al. Fractal model of lightning channel for simulating lightning strikes to transmission lines[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11):3135-3141.

[12] 吴琛,苏明昕,谢云云,等. 基于 BP 神经网络的输电线路雷击故障预测[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5):133-139.
WU Chen, SU Mingxin, XIE Yunyun, et al. BP neural network based lightning fault prediction of transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5):133-139.

[13] SIMA W X, LI Y F, RAKOV V A, et al. An analytical method for estimation of lightning performance of transmission lines based on a leader progression model[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6):1530-1539.

[14] 王毅,刘书铭,唐钰政,等. 雷电引起的电压暂降严重程度自学习评估方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2):188-196.
WANG Yi, LIU Shuming, TANG Yuzheng, et al. Self-learning estimation method for the severity of voltage sags caused by lightning[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2):188-196.

[15] 张军强,王选社,盛飞,等. 提高输电线路耐雷水平的关键因素影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(3):105-113.
ZHANG Junqiang, WANG Xuanshe, SHENG Fei, et al. Influence of key factors on improving the lightning resistance level of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3):105-113.

[16] 鲍进,段梅梅,卢树峰,等. 计及雷击浪涌传输效应的输电线路避雷器优化配置方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(1):9-18.
BAO Jin, DUAN Meimei, LU Shufeng, et al. Optimization of lightning arrester configuration for transmission lines considering transmission effect of lightning surge [J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(1):9-18.

[17] 王羽,文习山,胡京,等. 特高压交流输电线路中相绕击模拟试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(16):1-4, 8.
WANG Yu, WEN Xishan, HU Jing, et al. Simulation test of shielding failure of UHVAC transmission line's intermediate phase[J]. Power System Technology, 2008, 32(16):1-4, 8.

[18] 郑家松,李广福,季征南,等. 山区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5):119-122.
ZHENG Jiasong, LI Guangfu, JI Zhengnan, et al. Small-scale model experimental study on lightning shielding performance of 500 kV transmission lines in mountain area [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):119-122.

[19] 贺恒鑫,何俊佳,蒋正龙,等. ±500 kV 直流输电线路雷电屏蔽模拟试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7):20-26.
HE Hengxin, HE Junjia, JIANG Zhenglong, et al. Experimental study on lightning shielding performance of ±500 kV HVDC transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7):20-26.

[20] 王羽,陈昊,蓝磊,等. 输电线路雷电屏蔽模拟试验影响因

- 素[J]. 高电压技术,2014,40(3):763-771.
- WANG Yu, CHEN Hao, LAN Lei, et al. Affecting factors of lightning shielding simulation test of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):763-771.
- [21] 蓝磊,张韬,文习山,等. ± 1 100 kV 输电线路雷电屏蔽特性的模型试验及观测[J]. 电网技术,2020,44(1):105-113.
- LAN Lei, ZHANG Tao, WEN Xishan, et al. Model test study and observation on lightning shielding performance of ± 1 100 kV transmission lines [J]. Power System Technology, 2020, 44(1):105-113.
- [22] 王羽,文习山,蓝磊,等. 模型比例对架空输电线路雷电屏蔽模拟试验的影响[J]. 高电压技术,2013,39(2):443-449.
- WANG Yu, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Effects of model scale on lightning shielding simulation test of overhead transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):443-449.
- [23] 万启发,霍锋,谢梁,等. 长空气间隙放电特性研究综述[J]. 高电压技术,2012,38(10):2499-2505.
- WAN Qifa, HUO Feng, XIE Liang, et al. Summary of research on flashover characteristics of long air-gaps [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2499-2505.
- [24] AMARASINGHE D, SONNADARAU. Fractal characteristics of simulated electrical discharges [J]. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, 2008, 36(2):137.
- [25] 陈维江,曾嵘,贺恒鑫. 长空气间隙放电研究进展[J]. 高电压技术,2013,39(6):1281-1295.
- CHEN Weijiang, ZENG Rong, HE Hengxin. Research progress of long air gap discharges [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6):1281-1295.
- [26] 谢施君. 负极性地闪雷击点选择过程的模拟试验及仿真模型研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- XIE Shijun. Study on simulation test and simulation model of lightning point selection process of negative ground lightning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

作者简介:



占金涛

占金涛(1999),男,硕士在读,研究方向为输电线路雷电防护(E-mail: zjt@stu.xjtu.edu.cn);

杨天翼(1998),男,硕士在读,研究方向为输电线路雷电防护;

郭俊(1986),男,博士,副教授,博士生导师,研究方向为多导体传输线的瞬态分析和瞬态电磁场测量。

Experimental analysis of flashover characteristics for overhead power lines based on the lightning fractal model

ZHAN Jintao, YANG Tianyi, GUO Jun

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Shaanxi 710049, China)

Abstract: In recent years, a fractal model that can reflect the tortuosity and dispersion of lightning has been gradually used in the research of lightning shielding performance for overhead power lines, based on electrical geometric models and pioneering development models. In this paper, a 1:40 scaled experimental platform based on the equivalence between simulation experiments and natural lightning is constructed, with the ZB6T type tower commonly used in 500 kV transmission lines as the research object. A negative polarity impulse wave of 160/2 500 μ s is applied to investigate the relationship between flashover probability, spatial distribution, and protection angle. Based on the WZ model and finite difference method, a lightning fractal model is established, and the characteristics of line flashover are simulated and analyzed under the configuration of the scaled experimental gap. Both the simulation experiments and the simulation results indicate that the points with high flashover probability are concentrated near the transmission line, and the overall flashover space presents a parabolic shape, conforming to the flashover law. As the protection angle decreases, the flashover probability decreases correspondingly, and the flashover space slightly decreases. The simulation results verify the reliability of the simulation experiments and the correctness of the model. Comparing the simulation results with the experimental data, the model shows a high level of reliability.

Keywords: lightning fractal model; equivalence; reduced-scale test; overhead power lines; flashover probability; lightning shielding analysis

(编辑 方晶)