

## 山区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究

郑家松<sup>1</sup>, 李广福<sup>1</sup>, 季征南<sup>1</sup>, 廖福旺<sup>1</sup>, 蓝磊<sup>2</sup>,  
胡京<sup>2</sup>, 黄文武<sup>2</sup>, 文习山<sup>2</sup>

(1. 福建省电力公司, 福建 福州 350003; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 雷害是影响 500 kV 输电线路安全稳定运行的主要因素之一, 其中雷电屏蔽失效引起的跳闸占很大比例。特别在山区, 雷电屏蔽失效引起的线路跳闸问题显得更为突出。为了深入研究超高压输电线路的雷电屏蔽性能, 此次进行的山区输电线路绕击模型试验, 考虑了斜山坡坡度、跨越山涧杆塔、非垂直落雷等因素的影响。试验结果表明, 由于山区地形的影响, 绕击率远高于平原地区。

**关键词:** 500 kV 输电线路; 雷电屏蔽; 绕击; 模型试验

**中图分类号:** TM743

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2009)05-0119-04

## Small-scale Model Experimental Study on Lightning Shielding Performance of 500 kV Transmission Lines in Mountain Area

ZHENG Jia-song<sup>1</sup>, LI Guang-fu<sup>1</sup>, JI Zheng-nan<sup>1</sup>, LIAO Fu-wang<sup>1</sup>,  
LAN Lei<sup>2</sup>, HU Jing<sup>2</sup>, HUANG Wen-wu<sup>2</sup>, WEN Xi-shan<sup>2</sup>(1. Fujian Electric Power Co., Fuzhou 350003, China; 2. School of  
Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Lightning is one of the main reasons that threaten the safety and stability of 500 kV transmission lines, where the line trip due to lightning shielding failure occurs very frequently. This problem is especially serious in mountain areas. This paper presents the small-scale model experimental results of lightning shielding performance of transmission lines in mountain areas, for further study of the lightning shielding performance of UHV transmission lines. The experiments in this paper are carried out with such factors as the gradient of the hillside, the depth of the valley, and the non-vertical leader. The experimental results show that the risk of shielding failure of UHV transmission lines is much higher in mountain areas than in plain areas.

**Key words:** 500 kV transmission line; lightning shielding; shielding failure; model test

## 0 引言

500 kV 输电线路是我国电网的主干网, 在远距离输电中起着极为重要的作用, 因此, 500 kV 输电线路的线路走廊可能经过开阔的平原, 也可能经过崎岖的山区, 必要时还要跨越江河, 特别是在山区, 输电线路的防雷工作更为艰巨。山区输电线路如果架设在山坡的坡面, 则线路外侧暴露较大的部分容易发生绕击。跨越山谷的线路, 杆塔架设在山头, 形成大档距和大弧垂, 一方面杆塔的海拔高度相对较高, 引雷能力强, 另一方面线路与山谷的垂直距离

大, 地面的屏蔽效果几乎丧失, 使绕击发生的概率大大增加。以福建省为例, 超高压输电线路雷害大部分都是边相闪络, 说明线路外侧的屏蔽失效很可能是导致超高压线路雷害频发的主要原因, 据统计, 绕击雷害占福建省 500 kV 输电线路雷害的 80% 左右<sup>[1]</sup>。

地面坡度对绕击率的影响, 人们基于电气几何模型<sup>[2-5]</sup>, 利用坐标变换推导了计及地面坡度的绕击计算公式<sup>[6,7]</sup>。尽管这种计算方式并不能完全模拟地面坡度的影响, 但也给山区的输电线路防雷提供了一定的参考。在我国的规程中<sup>[8]</sup>, 山区和平原的绕击率计算的区别仅在于改变其中一个系数, 相当粗略, 所有山区的情况都一概而论, 这与实际情况

收稿日期: 2009-06-01; 修回日期: 2009-08-21

作者简介: 郑家松(1962), 男, 高级工程师, 主要从事输电线路的研究与技术管理工作。

是有出入的。

超高压输电线路的防雷工作任重而道远。平原地区输电线路屏蔽性能的模型试验得到了有意义的数据<sup>[9]</sup>,为了进一步深入研究山区雷害特征,对山区架设的输电线路的雷电屏蔽性能进行了模拟试验,主要考虑了山坡坡度的影响,跨越山涧时的大跨越形成的大弧垂、山涧深度的影响等。试验结果表明,由于山区地形的影响,绕击率远高于平原地区。

## 1 试验方案

### 1.1 上电极的选用

用来模拟雷电的下行先导,用长 70 cm,直径为 10 mm 的钢棒,其头部已改为顶角为 30°的圆锥体。在没有特别说明的情况下,电极都垂直放置。

### 1.2 模拟雷电的冲击电压的选取

冲击电压发生器的最大输出电压为 2 400 kV。本次试验中电压选取标准雷电冲击波冲击电压(-1.2/50  $\mu$ s),其幅值为每次试验的空间间隙的 90%~100%的击穿电压。

### 1.3 高速摄影仪

用以记录放电现象的 10 000 fps 高速摄影仪是高精度仪器,通过计算机控制。置于屏蔽室中由 UPS 供电,以保证冲击放电所产生的强大的电磁干扰不会损坏设备。

### 1.4 试验对象的设计

试验中模拟输电线路的布置尽可能按照实际输电线路相应的比例缩小来完成。

本次试验中,试验对象分别为按照几何尺寸缩小的两档距或单档距的输电线路模型,其中在单回路试验中,选用的铁塔模型为常见的 500 kV 用 ZB6T 杆塔,按 1:40 的比例缩小,见图 1 及表 1。

试验中线路用绝缘子是用环氧树脂板来模拟

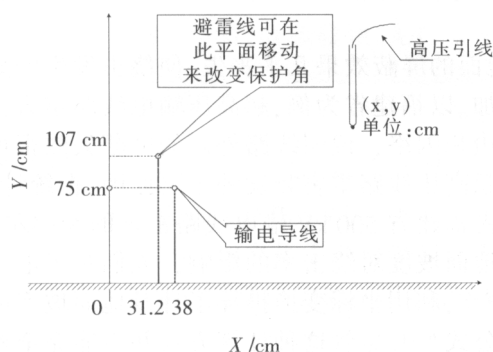


图 1 导线及避雷线位置示意图

表 1 ZB6T 杆塔及 1:40 模型尺寸

	避雷线高度	避雷线间距/2(保护角 $-5^{\circ}\sim 12^{\circ}$ )	导线高度	导线间距
实际尺寸/m	42.8	16.32~12.48	30	15.2
模型尺寸/cm	107.0	40.8~31.2	75	38.0

的,其长度按实际中的 4.5 m 根据相应比例缩小。避雷线选用直径 1 mm 的裸铁丝,导线选用直径 2 mm 的铜丝。

试验中,两模型杆塔间的距离为 6 m,放电电极位置位于杆塔中部,以避免杆塔对放电随机性的影响。在试验中,导线与避雷线均被拉直,无弧垂,以防止试验过程中线路保护角发生变化。高压线从试验大厅上部垂直引下,中间穿过一钻孔过的环氧树脂板以防止试验过程中引线及电极摆动。

### 1.5 试验中某落雷点概率的确定方法

一般情况下,在电极尖端的每一个位置,都施加此状态下最小的冲击击穿电压值,放电 50 次,然后分别记录击中避雷线、输电导线及大地的次数,然后折算成百分数,在非常明显全击中某一物体的情况下,可能只要放电 10 次即可。

试验中,人为布置山坡及山谷地形。山坡布置见图 2。

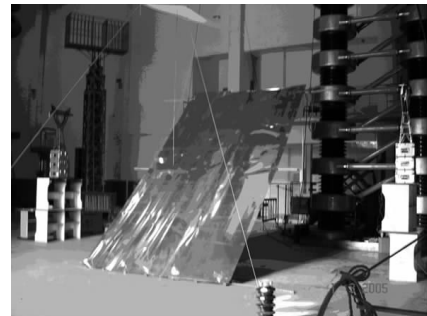


图 2 模拟斜山坡试验的实物照片

## 2 试验结果

### 2.1 斜山坡对输电线路绕击概率的影响

在此次试验中,分别对输电线路架设在与水平面角度成 15°、30°及 45°斜山坡上时的绕击情况进行了模拟试验研究,试验的实物照片见图 2。

在此试验中需要利用支撑物将杆塔升高,其升高的原则是相当于把杆塔安装在斜坡上,因此具体的杆塔升高高度在每个斜坡度时都不一样。在试验中,15°坡度垫高 52 cm,30°坡度垫高 108 cm,15°坡度垫高 214 cm,斜山坡使用 3 m×5 m 的铁板来模拟。此次试验中,仅仅针对斜坡外侧进行试验。

试验数据坐标系见图 3。图 5 与图 7 采用的坐标系为 XOY,其他各图采用的坐标系均为 X'O'Y。

线路绕击的概率随着斜山坡角度的变化规律可以用保护角为 12°时  $x=170$  cm 处的数据为例来分析,见图 4。

从图 4 中可看出,在  $x=170$  cm 的线上,随着斜坡陡度的增加,输电线路外侧发生绕击的区间迅速扩大,在平原无绕击的区域变为有绕击区,且绕击区随着陡度的增加而扩大。在斜坡角度为 15°时,在  $y=$

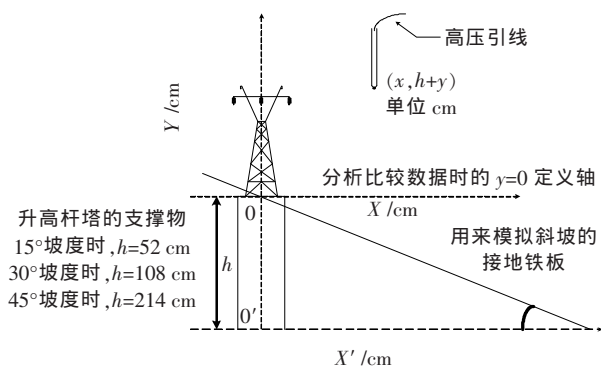


图3 试验数据坐标系

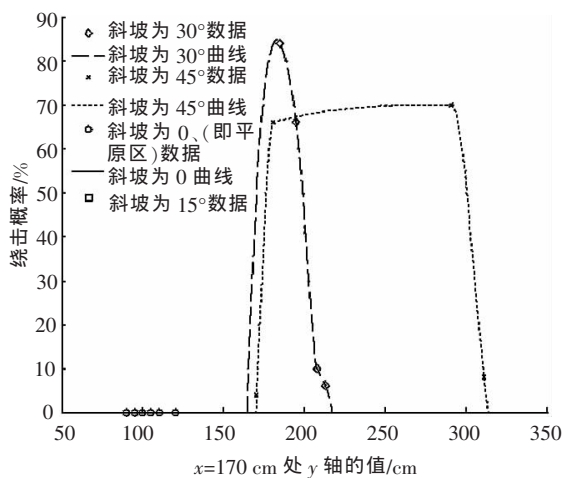


图4 斜山坡角度对绕击率影响的典型分析示例

52+77=129 cm 处,绕击率为 48%。而平原地区  $y=77$  cm 时,绕击率为 0。

由于地面的下倾斜而改变整个输电线路电场分布也会引起空间具体某点的落雷绕击率发生改变,从数据中选用具有代表性的点 ( $x=170$  cm,  $y=77$  cm) 当保护角为  $12^\circ$  时,来分析斜山坡对具体某落雷点绕击率的影响规律,见图 5。

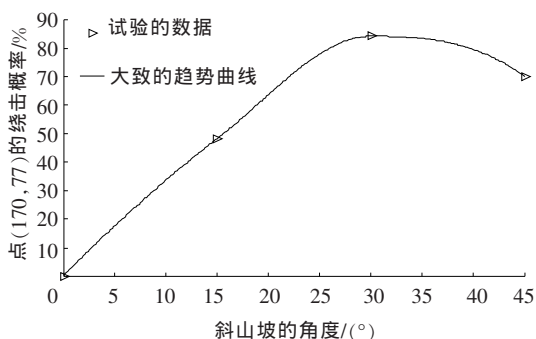


图5 斜山坡对具体某落雷点绕击率的影响规律

## 2.2 跨越山涧的影响

跨越山涧的输电线路,其主要特点是:架空线路离地面很远,有些山涧深达百米或数百米,这时地面对雷电的屏蔽性能其实基本不存在,输电导线主要只是靠避雷线来屏蔽,其绕击概率有增大的趋势;再者是大跨距显然带来大弧垂,一般情况下,避雷线的

弧垂要比输电导线小,由此拉开了两者之间的垂直距离,而其水平距离不变,这样一来跨越山涧的输电线路中部线路保护角减小有降低绕击率的趋势,但是相同保护角条件下,如果导地线垂直距离增大,绕击率也有可能变化。

### 2.2.1 山涧深度对绕击率的影响

通过垫高杆塔的高度来模拟输电线路所跨越山谷的深度,用平时地和垫高 214 cm 的实验数据来进行对比分析。

(1)山谷深度对发生绕击的空间长度的影响。以保护角为  $12^\circ$ ,  $x=170$  cm 处的数据为例,对比曲线见图 6。

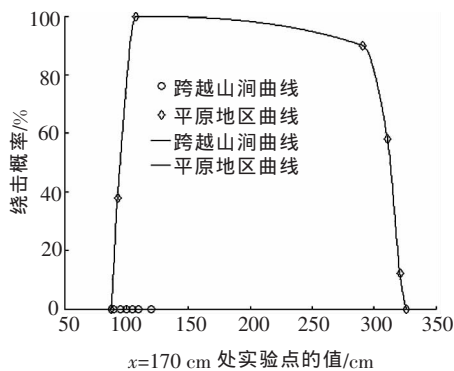


图6 杆塔垫高 214 cm 模拟跨山涧线路与平原地区的绕击区间对比

从图 6 中可以非常明显地看出,在  $x=170$  cm 的垂直空间上,线路在跨越山谷的时候,由于谷底地面的降低,其对输电导线的屏蔽性能也降低,其发生绕击的空间区域大大增加:在平地时,  $x=170$  cm 的垂直区域没有绕击落雷点,然而在跨越 214 cm 的山谷时候,区域  $y=88\sim 321$  cm 全为绕击发生区域。

(2)由于地面下降导致整个空间电场分布的变化,具体到某一个空间落雷点来讲,其绕击的概率也发生了变化。

分析这个问题时,我们要以杆塔的底部为 0 来定位  $y$  的值,这样才有可比较性(参考图 7),现在以  $x=130$  cm 的空间上的点来加以分析,其曲线见图 7。从图 7 中可知,在跨越山涧时,由于地面对输电导线几乎没有屏蔽性能,在  $x=130$  cm 处的垂直区域里,离塔底不同距离的落雷点的绕击概率远远大于平原地区相应点的绕击概率。

### 2.2.2 大跨距时输电导线与避雷线垂直距离对绕击率的影响

以同一保护角下的数据为例来分析,取保护角为  $12^\circ$ ,  $x=170$  cm 的点来进行,见图 8。

可以看出,输电导线与避雷线的垂直距离其实对整体上的绕击概率影响不大,只是在扩大其垂直距离一倍以后,相当于输电导线高度下降了一点,所以其发生绕击的上空间极限点要相应低一点,那么

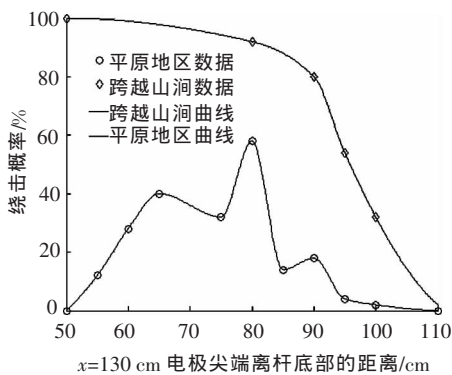


图7 山涧对空间某点绕击概率的影响(保护角 12°, 杆塔升高 214 cm)

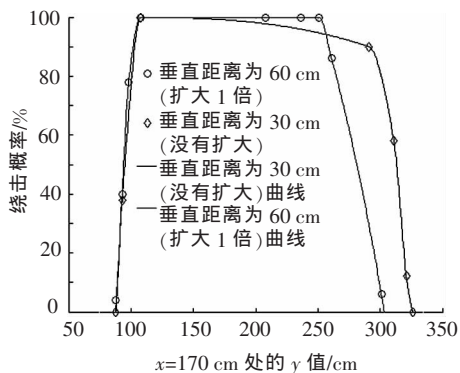


图8 保护角 12°, x=170 cm 时导线与避雷线垂直距离对绕击的影响

绕击空间相应也短一点。

### 2.2.3 跨越山谷时电极倾斜的影响

在跨越山谷时,仍取保护角为 5°时, x=90 cm 垂直空间的各点来分析。文中电极倾斜度是指电极与垂直方向形成的夹角。见图 9。

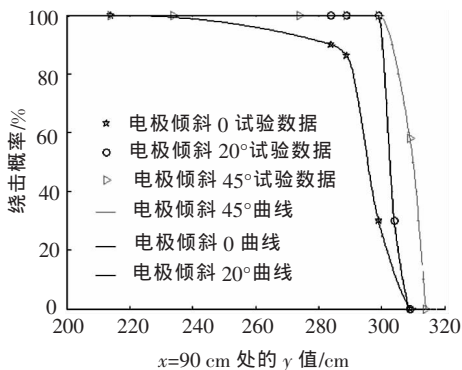


图9 保护角 5°, x=90 cm, 跨越深 214 cm 的山谷时电极倾斜度对绕击率的影响

从图 9 可见, 5°的条件下, 在跨越山谷时, 易绕击区域由于地面屏蔽性能的基本丧失, 其绕击概率本来就很大, 因而此时电极倾斜后, 虽然我们发现绕击概率还是随着电极倾斜度的增加而有所增加, 但是没有平原地区那么明显。

在-5°的情况下, 这种现象更为明显, 见图 10。在点(90, 289)上, 电极垂直放置时候, 其绕击概率为

0, 但是在电极倾斜角度为 20°时, 其绕击概率为 82%, 在电极倾斜角度为 45°时, 其绕击概率为 88%。

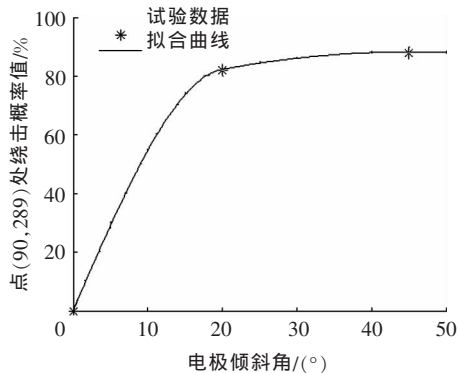


图10 跨越深 214 cm 的山谷时, 保护角-5°, 点(90, 289)处电极倾斜度对绕击率的影响

## 3 结论

(1) 山区的输电线路屏蔽失效的可能性比平原地区高得多。

(2) 斜山坡地形对输电线路绕击概率的影响研究表明: 无论是发生绕击的空间还是许多具体空间落雷点的绕击概率都随着地面的倾斜角度的增大而增大, 因此, 线路的绕击概率明显随之增加。

(3) 山区跨越深山涧线路绕击概率的变化规律: 无论是发生绕击的空间还是许多具体空间落雷点的绕击概率都随着山谷深度的增大而增大, 输电线路的绕击率明显增大。

(4) 与垂直方向成一定倾斜角度入射的雷电先导比垂直下落的雷电先导要容易发生绕击得多。在-5°的保护角情况下, 与垂直方向成一定倾斜角度入射的雷电先导也会使避雷线屏蔽失败而绕击导线。

## 参考文献:

- [1] 福建省 500 kV 输电线路雷害特性及其原因分析[R]. 福建: 福建省电力有限公司, 2005.
- [2] BROWN G W, WHITEHEAD E R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. Part [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1969, 88(5): 617-626.
- [3] 王晓瑜. 几种雷电屏蔽分析模型物理基础的研究[J]. 高电压技术, 1994, 20(1): 12-16.
- [4] 刘继. 电气装置的过电压及防护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [5] 王晓瑜. 雷电屏蔽性能的模拟试验和分析模型的研究[J]. 高电压技术, 1994, 20(2): 48-53.
- [6] 张志劲, 司马文霞, 蒋兴良. 超/特高压输电线路雷电绕击性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 1-6.
- [7] 陶元忠, 包建强. 输电线路绝缘子运行技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [8] DL/T 620-1997. 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].
- [9] 蓝磊, 邓维, 黄文武, 等. 平原地区 500 kV 输电线路雷电屏蔽性能模型试验研究[J]. 电网技术, 2006(5): 72-76.