

[输电线路]

架空输电线路隐患预警方法研究

文/杨鹏宇

武汉三相电力科技有限公司

树木超高生长一直是造成输电线路隐患放电及故障跳闸的主要因素，阳光、土壤肥沃程度都是影响树木超高的主要因素。输电线路应对于树木超高生长的主要办法为定期巡检以及定期砍伐树木，这对于保障线路的稳定运行极为不利。对树木超高生长进行研究，基于Ansys仿真树木超高生长特性进行研究，设计树木超高生长试验，结合生长过程中高电位导线侧采集装置信号特征设计一套树木超高生长预警逻辑。该系统利用终端采集高电位导线数据，利用后台分析计算数据，可实现超高生长自动预警，为输电线路树木超高生长提供了隐患排查新思路。

树木超高生长近年来成为输电线路发生隐患乃至故障跳闸的主要因素之一，尤其是华南地区森林茂密，阳光充足区域，雷雨季节受到雷击的影响，极易发生雷击诱发山火导致大面积的停电事故，造成无法估量的经济损失。因此，树木超高生长严重威胁了输电线路安全运行。现有的树木超高生长排查方法为输电线路运维人员定期沿线排查，定期砍伐树木。该方法能从一定程度上缓解线路运维压力，但没办法做到科学有效的早期监测。为此，我国大量学者针对树木超高生长进行相应的研究。

一部分学者利用可视化原理对输电线路走廊的树木进行监测，在对输电线路有威胁的区域进行图像视频监控终端安装，通过远程监测树木生长情况进行定期远程巡检，当出现威胁输电线路正常运行的情况时，进行树木砍伐；另一部分学者通过对树木生长快慢以及生长结构着手，通过吊绳改变树木生长方向，减少其跳闸的可能性，上述两种方法可从一定程度上减小运维压力。

本文基于广泛应用于输电线路故障测距的行波角度着手，基于220 kV架空输电线路特性进行仿真，设计放电实验。基于监测终端采集的数据进行特征量提取，依据特征量变化设计树木超高预警

标准。

树木超高仿真

本文从行波特征角度着手，建立输电线路树木超高放电仿真模型，首先搭建基于Ansys的仿真模型，仿真树木超高生长。影响树木对导线放电原因由以下几种情况：①树木的形状可能造成影响；②树木对导线的距离也可能造成影响；③树木的形状对导线放电可能造成影响。因此建立两类不同情况下树木形状对导线放电情况：一类为尖型树冠模型（枝叶较小且密集）；另一类为弧型树冠模型（枝叶较大且稀疏）对导线的放电情况。同时，仿真建模时，对导线施加不同的电压等级用于研究放电距离，从而建立仿真模型，图1所示为建立的两类树木模型。

依据本仿真将研究获取不同电压等级、不同净空距离下的电场分布特性。不同电压等级下的树-线距离取值范围将结合历史树木放电研究情况进行设置，见表1。仿真过程中的电压、电场强度和电荷密度的分布情况，将按照不同净空距离长度作出变化曲线，并最终拟合出不同净空距离下的离导线最近枝叶表面电场变化曲线。

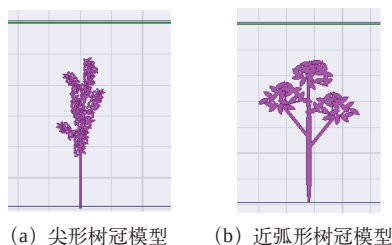


图1 树木仿真模型搭建

表 1 仿真过程中树-线距离取值对照

电压等级/ kV	树-线距离取值范围/cm	净空距离选点/cm
220	70~30	70、65、60、56、50、45、40、39、38、37、35、33、30

开始两类不同树木超高生长仿真实验,在仿真过程中依次调整不同树木形状对放电导线的高度,完成一组实验后开始调整导线的电压等级,从而获取试验结果。

对表1中的数据,作出同电压等级下尖形和近弧形树冠在不同净空距离下的场强和电密拟合曲线,如图2所示。

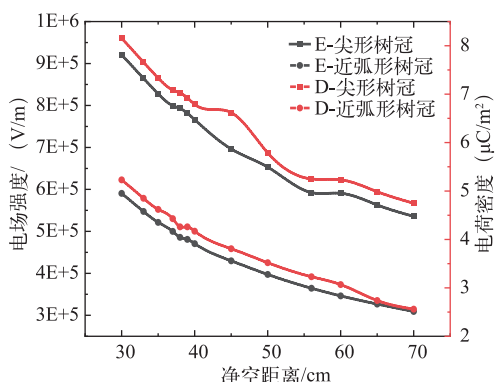


图2 220 kV电压等级下叶片表面电场分布与净空距离关系曲线

从仿真过程中的趋势变化曲线以图3分析中可知:随着净空距离不断缩小,尖形树冠与近弧形树冠叶片表面的场强大小近呈指数型增长,说明其净空距离越小,场强增长越快,越容易发生树木隐患放电。对于220 kV电压等级,尖形树冠叶片周围的场强主要集中在离叶片表面约50 cm范围内,而近弧形树冠叶片周围的场强主要集中在离叶片表面约40 cm范围内,范围之内容易发生树木隐患放电。

树木超高试验

前述对220 kV架空输电线路进行了Ansys仿真,得出两类不同形状树木对架空输电线路导线放电的影响,以及不同树木对架空导线放电距离。依照树木类型以及树木对导线放电距离开展真型试验,同时利用监测终端对高电位导线上树木超高生长隐患放电行波数据进行采集,结合仿真净空距离进行不同距离段的数据分析。本次试验主要器材参数见表2。本次试验的等效原理图如图3所示。

表 2 主要器材参数

序号	名称	型号/参数
1	调压器	KDYD-30 kVA全自动控制台
2	试验变压器	YDQ,容量30 kV·A
3	交直流分压器	KDFcR-300 kV
4	模拟导线	直径: 3.1 cm, 长: 3 m, 均质钢管
5	放电行波采集装置	采样率: 10 MHz
6	超声测量仪	FLUKE-ii910
7	紫外成像仪	OFIL UVolle-VX
8	可见光摄像机	HUAWEI P60Pro
9	树木	橡胶树盆栽高: 160 cm; 桉树盆栽高: 1.8 cm
10	其他	复合绝缘子、绝缘绳、编制铜带等

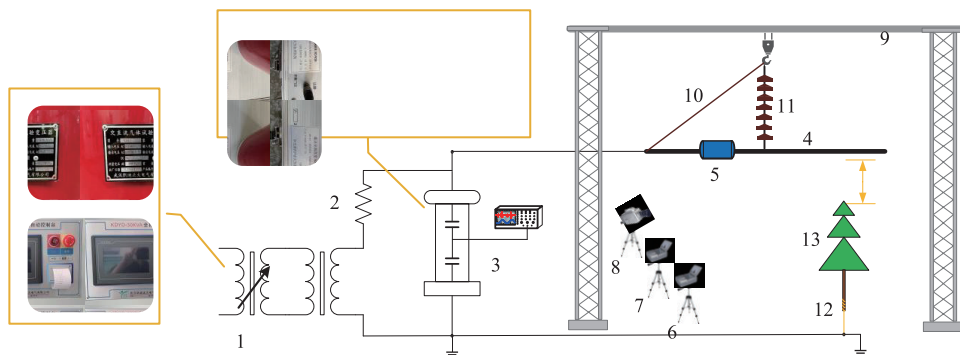


图3 树木超高放电隐患试验布置原理图

1—调压器及变压器 2—保护电阻 3—交直流分压器 4—模拟导线 5—放电行波采集装置 6—超声测量仪 7—可见光摄像机
8—紫外成像仪 9—航吊 10—绝缘绳 11—绝缘子 12—编制铜带 13—桉树/橡胶树盆栽

试验时,依次将调压器、试验变压器、保护电阻和交直流分压器按照试验布置原理图,通过高压导线进行串/并联,并将分压器接入同比显示仪中,用于电压数值观测。将满足220 kV电压等级的复合绝缘子高压侧固定于模拟导线上,绝缘子低压侧连接航吊,利用航吊将模拟导线悬离地面约1.5 m左右停滞,将模拟导线一端通过高压导线连接到分压器,并将采集装置固定于模拟导线上,利用绝缘绳连接模拟导线和绝缘子低压侧,使导线保持水平。装置外壳、采集电路接地端与模拟导线等电位连接,用于消除其他异常放电干扰。

完成上述操作后,操作航吊升高模拟导线至安全距离,在导线正下方放置3 m×3 m的铝制薄板以模拟大地,将桉树/橡胶树盆栽放置在模拟导线正下方。使用编制铜带将树木盆栽与接地端可靠连接,当放电击穿时,确保能构成完整回路,泄放击穿电流。对试验过程中的试验数据进行记录。

放电数据分析

项目在进行树木隐患放电试验中,研究桉树类的尖形树冠和橡胶树类的圆形树冠在220 kV输电电压等级下的放电情况,获取到的部分放电电流波形及对应的可视化现象如图4所示。

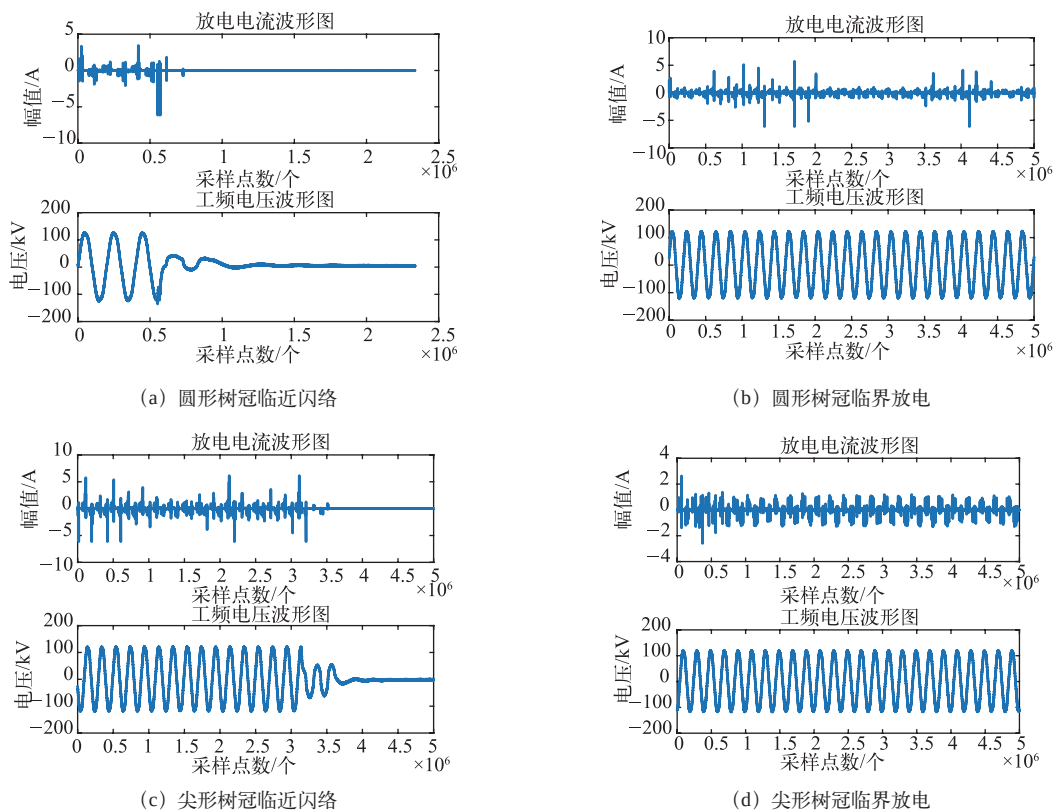


图4 放电数据记录

对放电实验进行多组重复性试验,为保证试验数据的真实有效性,每组试验进行多次复现,从而还原试验,对试验数据数据进行分析,其具体结论见表3。

通过开展树木超高放电模拟试验研究,如下结论:

1) 从试验数据可知,尖形树冠的闪络距离与临界距离均要比弧形树冠的要高,说明尖形树冠类的

树木更容易发生放电。尖形树冠的临界放电距离为60 cm。闪络放电距离为33 cm;弧形树冠的临界放电距离为58 cm。闪络放电距离为25 cm;

2) 同一电压等级下,随着树木逐渐临近导线,超声分贝数只在靠近闪络距离时才呈现出较高的变化趋势;紫外光子近似呈现指数型变化趋势;放电电流幅值与放电次数近似正比于净空距离。

表3 两种树冠仿真结论

	近弧形树冠仿真	尖形树冠仿真
58 cm	① 超声无现象；② 无光子数；③ 60~80 mA；④ 1/2周期性：放电密集低	① 超声无现象；② 无光子数；③ 40~50 mA；④ 1/2周期性：放电密集低
55 cm	① 超声无现象；② 无光子数；③ 60~80 mA；④ 1/2周期性：放电密集低	① 超声无现象；② 无光子数；③ 40~60 mA；④ 1/2周期性：放电密集低
50 cm	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 70~90 mA；④ 1/2周期性：放电密集中下	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 40~70 mA；④ 1/2周期性：放电密集低
45 cm	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 80~90 mA；④ 1/2周期性：放电密集中下	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 50~70 mA；④ 1/2周期性：放电密集中下
40 cm	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 100~110 mA；④ 1/2周期性：放电密集中	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 60~80 mA；④ 1/2周期性：放电密集中下
35 cm	① 超声无现象；② 光子数明显；③ 100~120 mA；④ 1/2周期性：放电密集中上	① 超声无现象；② 少量光子数；③ 60~80 mA；④ 1/2周期性：放电密集中下
30 cm	① 超声无现象；② 光子数明显；③ 120~140 mA；④ 1/2周期性：放电密集高	① 超声无现象；② 光子数明显；③ 80~100 mA；④ 1/2周期性：放电密集中
25 cm	① 超声37db；② 光子数明显；③ 140~160 mA；④ 1/2周期性：放电密集高	① 超声无现象；② 光子数明显；③ 80~100 mA；④ 1/2周期性：放电密集中

预警逻辑及方法

树木超高逐步诱发线路跳闸的过程较直观，如图6所示。当树木高度达到 h_1 时（树木尖端电晕放电的形成主要受线路电压等级、线路结构、树木种类和空气湿度等影响），此时线路与树木之间会发生电晕放电，并伴随有轻微的滋滋声；当树木生长到 h_2 时，树线之间会发生电弧放电，树木表面会形成明显的刷状电弧；当树木达到 h_3 左右的高度后，树线距离达到了闪络故障的极限值，线路会发生闪络故障，导致线路跳闸。对于图5中所示情况，当树木高度达到 h_2 附近时，已经产生了强烈放电特征信号，即为树木放电特征。

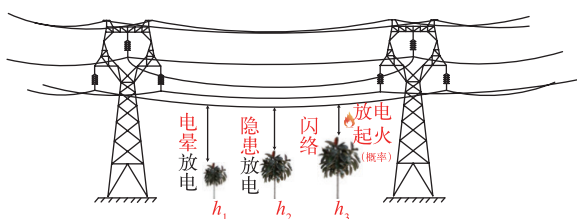


图5 树木诱发线路跳闸发展趋势图

树木故障的形成是一个渐进过程，随着树木逐渐临近高电位导线，树木顶部场强逐渐增大，树木与导线之间空气间隙出现了由弱变强的放电，直至完全击穿。因此，本研究基于前期对树木不同发展阶段下的放电波形特征参量分布情况，提出一种可实现树木隐患分级预警方法。具体是按一条线路的监测区间为背景，先筛选出重点放电杆塔，再对该杆塔进行历史数据比对，并将该放电杆塔的历史行

波数据提取其特征。

在利用极值间隔法判定出线路出现隐患后，按照特征处理算法对树木放电隐患放电波形数据进行时域特征、频域特征的分析、计算，对比计算结果与设定的风险等级范围，设定的风险等级范围可根据幅值、脉冲数、能量和相位，将临界一闪络放电过程分成几个发展阶段。参考随发展阶段变化的、明显的特征参量，根据不同树线间距下的特征表现，分为以下一级、二级等几个阶段，设定风险阈值，从而对应出此次放电的风险等级（发展阶段），实现树木放电分级预警的目的。其分级预警处理流程如图6所示。

图6中， I_m 为监测到树木隐患放电平均幅值； I_{m1} 为监测到电晕放电最大幅值的 X （电晕放电为微弱放电，220 kV电压等级其幅值一般不超过20 mA，建议 X 为1.5~2倍）； I_{m2} 为监测到树木放电最小幅值； I_{m3} 为监测到树木放电最大幅值；则 $I_{m1} < I_{m2} < I_{m3}$ ， f_m 为监测到树木隐患的中心频率值； f_1 为监测到的电晕放电最低频率的 $1/Y$ （一般建议 Y 为6）倍； f_2 为监测到树木放电的频率最大值； f_3 为监测到树木放电频率的最小值， $f_1 > f_2 > f_m > f_3$ 。将上式定义变量进行赋值，如 $(I_{m1}=50 \text{ mA}) < (I_{m2}=100 \text{ mA}) < (I_m=150 \text{ mA}) < (I_{m3}=250 \text{ mA})$ ，那么可按照设定值按照以下算式计算出每一级风险等级的幅值权重和频率权重。

1) k_1 为一级风险等级幅值权重，其值为一个范围，即 $I_{m1}/I_m < k_1 < I_{m2}/I_m$ 。

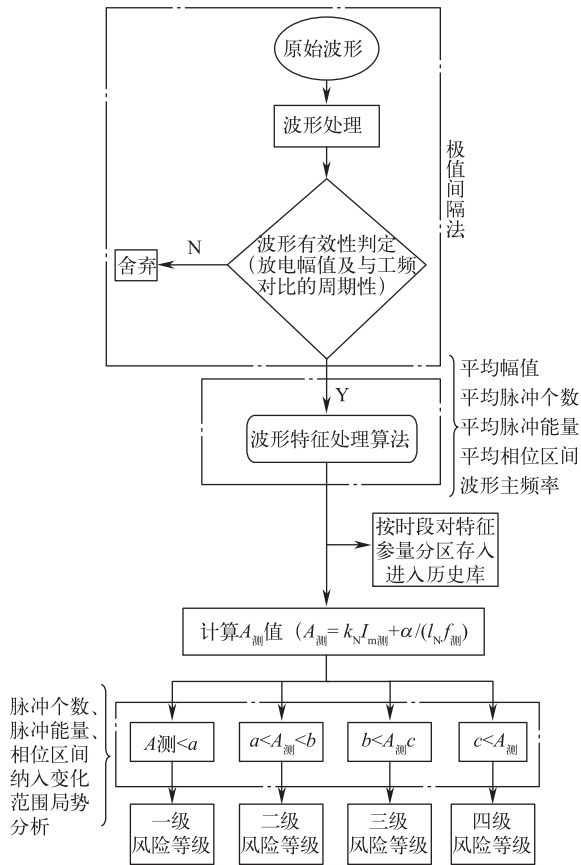


图6 树木风险等级评估

2) l_1 为一级风险等级频率权重,其值为一个范围,即 $f_1/f_m > l_1 > f_2/f_m$ 。

3) k_2 为二级风险等级幅值权重,其值为一个范围,即 $I_{m2}/I_m < k_2 < I_{m3}/I_m$ 。

4) l_2 为二级风险等级频率权重,其值为一个范围,即 $f_2/f_m > l_2 > f_3/f_m$ 。

以树木隐患的门槛幅值 I_{mi} 及门槛频率 f_i 为基准,然后通过上面 k_1 、 l_1 、 k_2 、 l_2 的范围值对公式 $a_1 = k_1 I_{mi} + \alpha / (l_1 f_i)$, $a_1 = k_2 I_{mi} + \alpha / (l_2 f_i)$ 进行计算,可以得到 a 、 b 为两个范围值。取 a_1 的下限值 a , a_2 的上限值 c 。若最终计算结果 a_1 与 a_2 两个范围有交叉,则取 a_1 与 a_2 交叉范围的中间值为 b ;若 a_1 、 a_2 无交叉,则取 a_2 的下限值与 a_1 的上限值的差值的中间值为 b ,进而可得出三个范围界限值 a 、 b 、 c 。因 a_1 、 a_2 加号前后部分数值量纲及取值范围不同,故取修正系数 α ,其值根据 $k_1 I_{mi}$ 及 $k_2 I_{mi}$ 来适当选取,作用是将 $1/(l_1 f_i)$ 进行放大或缩小,以使 a_1 、 a_2 中的频率部分与幅值部分数值相当,避免幅值或频率中某一方对 a_1 、 a_2 值的贡献过大。

1) 波形处理。得出放电脉冲的幅值 $I_{测}$ 及频率 $f_{测}$ 。

2) 波形有效性判断。当监测波形幅值 $I_{测}$ 超过 I_{mi} 且该段放电波形与工频对比具有周期重复性即判断为有效波形,判断为有效波形的 $I_{测}$ 及 $f_{测}$ 进入历史库。

3) 计算。取中间频率权重 $k_N = I_{m2}/I_m$,中间幅值权重 $l_N = f_2/f_m$,根据公式 $a_{测} = k_N I_{m_{测}} + 1/(l_N f_{测})$ 对有效脉冲的幅值 $I_{测}$ 及频率 $f_{测}$ 进行计算得出计算结果 $a_{测}$ 。

4) 范围判定。计算结果 $a_{测}$ 值小于 a 即判定为一级风险等级,在 a 、 b 范围内即判定为二级风险等级;在 b 、 c 范围内,即判定为三级风险等级;超过 c 范围,即判定为四级风险等级。

判定为有效波形的树木隐患波形幅值、频率值存入历史库,可进一步增加数据库基数,使得风险等级计算涉及到的各幅值及频率值更加丰富,平均幅值、中心频率值等渐趋于合理、稳定,进而各风险等级范围界限值 a 、 b 、 c 也更加合理、稳定。

结束语

本文通过Ansys仿真结合真型试验的形式设计树木超高隐患放电实验,获取两类不同数据对架空导线放电距离。基于行波原理设计一种树木超高生长预警方法,结合试验现象以及监测终端采集的数据特征量设计一套后台预警重要参量,保证预警的有效性以及科学性,为架空输电线路树木超高提供新思路。EA

(收稿日期:2024-12-09)

参考文献

- [1] 张艳梅,刘长树,王永勤.输电线路绝缘子污秽在线监测系统的应用[J].高电压技术,2006,32(3):112-114.
- [2] 王喜,银秦伟,等.关于绝缘子污闪形成原因的探讨与分析[J].中国科技信息,2011,(17):108.
- [3] 贺博.高压污秽绝缘子闪络机理及在线监测和风险预警中关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [4] 何为,陈涛.基于紫外脉冲法的绝缘子污秽状态监测[J].高电压技术,2006,32(10):39-42.