

基于超声波信号的 10 kV 架空线路下山火预警监测研究

蒋卓峰¹, 辜弘¹, 蔡乐辉¹, 陈天翔¹, 吴驰²

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610072)

摘要: 架空导线下方山火灾害导致电力线路跳闸事故时有发生。目前山火防治监测主要依靠全天候卫星和视频监测, 受天气等因素影响较大, 实时性差, 研究一种不受天气因素干扰的早期山火检测预警方法具有重要价值。通过搭建 10 kV 线路山火放电超声波监测平台, 以稻草、竹子和松树三类西南地区常见植被为 10 kV 线路下方山火火源, 利用超声波探头采集放电超声波信号与燃烧超声波信号并进行时频域分析。研究结果表明: 频域下稻草与竹子火焰下放电超声波信号波峰集中在 40 kHz 附近, 主峰幅值分别为 -86.54、-99.81 dB, 且在时域下与电压具有强相关性; 松树火焰受油脂影响, 其超声波信号为多波峰型, 主峰幅值为 -74.02 dB, 在时域下与电压无相关性。研究成果可为 10 kV 线路下方山火预警提供新的思路与方法。

关键词: 山火; 架空线路; 植被火焰; 超声波; 故障识别

Research on Downhill Fire Warning and Monitoring of 10 kV Overhead Lines Based on Ultrasonic Signals

JIANG Zhuofeng¹, GU Hong¹, CAI Lehui¹, CHEN Tianxiang¹, WU Chi²

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Sichuan Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Wildfires beneath overhead power lines frequently cause power outages. Currently, wildfire prevention and monitoring primarily rely on all-weather satellites and video surveillance, which are significantly influenced by weather conditions and lack real-time accuracy. Developing an early wildfire detection and warning method unaffected by weather conditions holds significant value. By establishing a 10 kV power line wildfire discharge ultrasonic monitoring platform, using common vegetation in the southwestern region such as straw, bamboo, and pine trees as wildfire sources beneath 10 kV power lines, ultrasonic probes were employed to collect discharge ultrasonic signals and combustion ultrasonic signals, followed by time-frequency domain analysis. The research results indicate: In the frequency domain, the peak values of discharge ultrasonic signals under straw and bamboo flames are concentrated around 40 kHz, with main peak amplitudes of -86.54 dB and -99.81 dB, respectively, and show strong correlation with voltage in the time domain; Pine tree flames, influenced by oils, exhibit multi-peak ultrasonic signals with a main peak amplitude of -74.02 dB, and show no correlation with voltage in the time domain. These findings provide new insights and methods for wildfire early warning systems beneath 10kV power lines.

Key words: wildfire; overhead line; vegetation burning; ultrasonic; fault identification

0 引言

架空线路往往需要跨越农田、耕地和林场等易发生山火区域^[1-4], 山火频发对林区架空线路安全运行带来极大威胁, 易造成线路跳闸停运等风险^[5-7]。传统检测山火方法为无人机巡飞、全天候卫星及视频监控^[8], 无人机巡飞成本过高, 单次巡逻区域面积小且信号传输半径过短导致效率不

高; 全天候卫星及视频监控的实时性和智能化水平不高。依托人工智能中视觉神经网络发展, 通过卫星检测林区火场是当前热门发展方向^[9-11], 由于卫星图像分辨率低, 通过图像颜色识别山火准确率不足, 易导致误判与漏判^[12]。文[13]提出使用 PSO 算法与神经网络相结合的多波段光电复合探测山火识别方法, 由于受遥感卫星及地形的影

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目(U19A2080); 四川省电力公司科技项目(521903230001)。

Project Supported by National Natural Science Regional Innovation Development Joint Fund(U19A2080); Sichuan Electric Power Company Science and Technology(521903230001)。

响, 仅在洼地与平原有效, 不适宜西南丘陵地带。文[14]采用自适应阈值法和深度学习方法结合 Rothermel 蔓延模型模拟山火行进轨迹, 实现山火监测与火势蔓延监测, 具有较高准确性和实时性, 但由于缺乏实验条件仅采用假设值, 可靠性还需进一步研究。文[15]设计了一种三光集成型山火定位监测仪, 基于深度学习探测可见光、红外摄像、激光 3 个方面, 该集成监测仪能够实现全天候全方位监测。文[16]基于 YOLOv5 提出融合多尺度特征与位置信息的检测算法, 通过 SPPCSPC 模块替换 SPPF 解决了多尺度目标问题, 但其提升效果需要依靠大量数据进行训练, 不适用小样本数据处理。

超声波检测凭借其经济高效、探测灵敏和隔绝电气信号干扰等优势, 被大量运用于设备探伤、高频放电检测等方面^[17-21]。由于山火燃烧时会随着植被燃烧物中所含成分的不同而产生不同幅值及频段的声波信号^[22], 其中包含有超声波信号, 可以通过超声探头识别高频放电信号和火焰燃烧信号^[23]。鉴于此, 本研究搭建了 10 kV 架空线路山火试验平台, 利用超声波探头检测常见植被稻草、竹子和松树火焰桥接架空导线引起空气间隙绝缘水平下降而产生的高频放电信号, 利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对信号进行频域分析, 利用放大故障波形进行时域分析。

通过提取特征向量为架空线路走廊发生山火提供预警技术, 并为山火事故类型确认提供理论依据。

1 实验平台搭建

为模拟实际 10 kV 架空配电线路, 文中搭建的模拟植被火焰桥接线路试验和超声波与电气数据采集平台见图 1。试验平台由三部分组成: 模拟实际架空配电线路部分、故障模拟部分以及信号数据采集部分。其中架空配电线路部分包括: 实验用 400 V 动力电源、型号为 SY11-0.4/10 三相油浸式升压变压器、可遥控投切电容器柜和型号为 LGJ-120 的三相钢芯铝绞线, 其中可遥控投切电容器柜产生不同大小对地电容电流以模拟实际配电线路。故障模拟装置包括: 远程遥控升降平台、金属导电板、植被垛火焰和架空导线, 其中升降平台可远程遥控调整金属导电板与导线距离(精度为 1 mm), 植被垛火焰分别为西南林区常见植被: 稻草、竹子和松树, 金属导电板通过无感电阻与录波装置连接以采集流经火焰的泄漏电流。数据采集部分包括: 故障录波器(采样速率 499.2 Hz/s)、无感电阻、电压互感器、超声波探头及高速摄像机, 其中通过电压互感器测量故障相电压, 超声波探头中心频率为 40 kHz, 测量无感电阻两端电压来获取流经火焰的泄漏电流, 高速摄像机用于记录实验过程和实验现象。

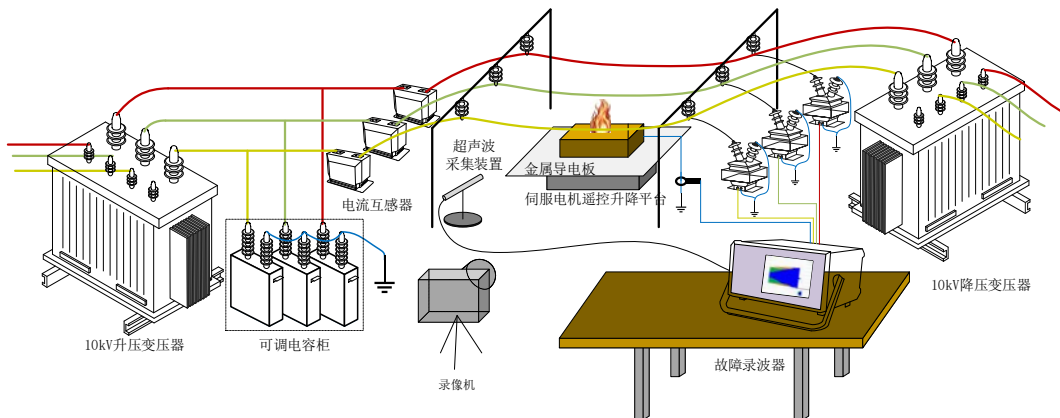


图 1 模拟植被火焰桥接线路试验和超声波与电气数据采集平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated vegetation fire bridge circuit test and ultrasonic and electrical data acquisition platform

当配电线路下方发生山火时, 架空线路对地距离较高很难造成直接击穿。架空线路杆塔绝缘子为对地绝缘最薄弱部分, 见图 2。目前 10 kV

线路下绝缘子对地高度分别为 12.5 cm 与 17.5 cm, 为了模拟火焰包络绝缘子造成单相接地, 故通过升降平台控制线路与地距离分别为 12.5 cm

与 17.5 cm，并投切不同大小电容电流模拟系统不同运行状态。



图 2 火焰包络绝缘子示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flame envelope insulator

实验开始前先将稻草条、竹子条及松树枝按 12 cm×12 cm×8 cm 规格摆放成植被垛放置在金属导电板中央 B 相线路下方，见图 3。实验过程中，超声波传感器采用环绕式架设于火焰与导线接触点 35 cm 处，通过控制传感器不同架设位置验证其对信号采集的影响。观察发现在固定探测距离条件下，各位置采集的超声波信号特征无显著差异。

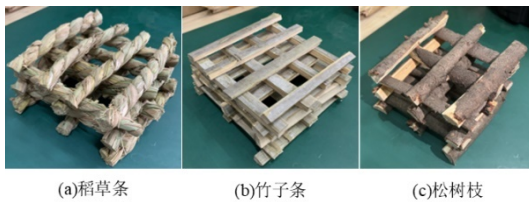


图 3 植被垛摆放实物图

Fig. 3 Physical picture of vegetation stack placement

为了区分雨雾天气绝缘子产生的超声波信号，将绝缘子上端用铜线连接高压导线，下端连接金属导电板，见图 4。在其表面均匀喷洒水分后施加电压并记录故障波形，最终得到绝缘子湿闪超声波形与电气信号。

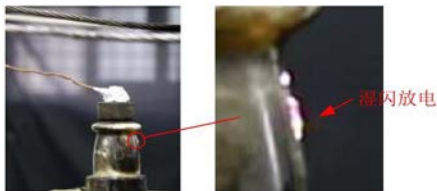


图 4 绝缘子湿闪实物图

Fig. 4 Physical picture of insulator wet flashover

2 超声波信号时频域分析

研究表明，火焰是一种弱等离子体，植被火焰电导率与植被灰分含量以及火焰温度等多因素相关，其中灰分含量是主要因素^[23]。由于稻草中灰分含量高于松树和竹子，通过稻草、松树与竹

子燃烧火焰下桥接导线时采集到的超声波信号、泄漏电流信号以及故障相电压波形来区分火焰类别。将绝缘子湿闪作为对照来区分火焰燃烧放电故障和绝缘子放电故障，避免造成误判。植被可燃物成分见表 1。

表 1 植被可燃物成分

Table 1 Composition of vegetation combustibles %				
植被	棕钎纤维素	木质素	灰分	油脂
稻草	66.15	13.75	13.25	1.38
竹子	51.49	24.72	2.56	0.70
松树	62.51	36.64	0.61	18.28

2.1 频域分析

2.1.1 稻草火焰超声波信号频域分析

对稻草火焰桥接线路引起放电超声波信号进行 FFT 频域分析得出：稻草火焰引起放电超声波信号频率集中在 36.1~42.8 kHz。投入电容电流为 1 A、导线对接地导电板的距离为 12.5 cm 时，超声波信号峰值为 -88.75 dB，保持电容电流不变，增大导线对地距离为 17.5 cm 时，超声波信号峰值下降到 -92.66 dB，见图 5。当投切电容电流在 3 A、间隙距离为 12.5 cm 时超声波信号峰值在 -86.54 dB，17.5 cm 间隙距离下超声波信号峰值在 -91.30 dB，见图 6。说明火焰桥接线路引起放电所采集的超声波信号幅值与间隙距离呈负相关，与电容电流大小呈正相关。电容电流增大会提高电压，受温度和灰分影响，导线周围空气绝缘性能进一步下降，加剧放电倾向；电容电流增大还会降低系统等效阻抗，促进放电通道释放更多声波能量，导致采集到的超声波信号幅值增大。增大间隙距离会增加空气绝缘距离、降低电导，削弱放电强度，使超声波信号幅值降低。

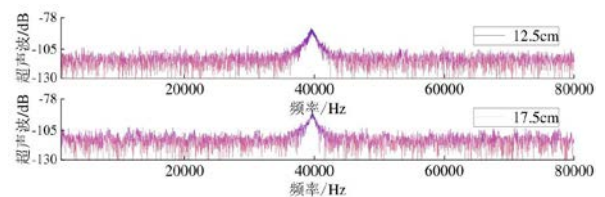


图 5 1 A 电容电流稻草火焰超声波频域

Fig. 5 1 A capacitor current straw flame ultrasonic frequency domain

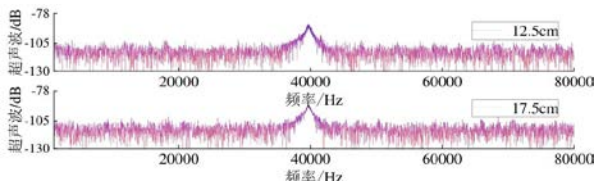


图 6 3 A 电容电流稻草火焰超声波频域

Fig. 6 3 A capacitor current straw flame ultrasonic frequency domain

2.1.2 松树火焰超声波信号频域

实验数据及高速摄像机画面显示：松树火焰桥接导线后，导线表面未产生电晕放电，增大电容电流仍未检测到导线放电的超声波信号；但超声波探头捕捉到较稻草火焰更明显的信号，此信号为松树受高温加热后内部松脂膨胀炸开产生的爆鸣声(现场可闻“啪啪”声)，可作为松树林区山火防治判别依据。松树燃烧产生超声波信号 FFT 见图 7。信号呈现多峰分布，但主峰频段聚集在 27.9~46.8 kHz，其幅值为-74.02 dB，远高于稻草火焰放电时的超声波幅值。在 3~13.2 kHz 范围内也出现幅值为-89.72 dB 的次波峰，即现场听见的爆鸣声在非超声频段，但低频段剧烈程度低于主频段信号。低频段产生次波峰是由于松树在燃烧过程中，松树火焰热释放速率较大导致焰体温度迅速上升，瞬时压力变化使气体快速膨胀与收缩产生的。主频段信号是由于松木垛中含有丰富的松脂，在高温下爆燃与挥发导致瞬间气体膨胀而产生 27.9~46.8 kHz 频段的超声波信号。

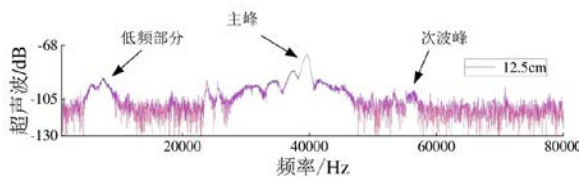


图 7 松树燃烧超声波频域

Fig. 7 Pine burning ultrasonic frequency domain

2.1.3 竹片火焰超声波信号频域

竹子灰分含量低于稻草但高于松树，当间隙距离为 17.5 cm 时未检测到燃烧超声波信号；缩短至 12.5 cm 后，1 A 和 3 A 电容电流下仍无导线放电信号，仅 5 A 电流时录波器捕捉到放电超声波信号见图 8。FFT 分析显示其频谱主峰集中于 38.3~42.1 kHz，幅值-99.81 dB，且无次波峰特征。

表明竹子燃烧缺乏植被升温引发的空气振动信号。与松树和稻草火焰放电相比，竹子放电信号幅值最低，仅有-99.81 dB，表明其燃烧过程因灰分与油脂含量较低导致超声波能量较弱。

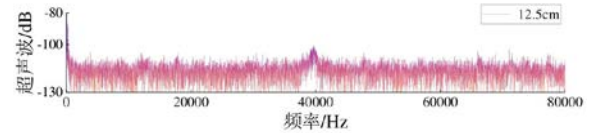


图 8 竹子火焰放电超声波频域

Fig. 8 Bamboo flame discharge ultrasonic frequency domain

2.1.4 绝缘子闪络超声波信号频域

为了区分绝缘子由于天气因素或自身绝缘缺陷而发生沿面闪络对超声波信号造成干扰，将配电线路常见 10 kV 支柱绝缘子上端连接高压导线下端置于金属导电板，并将表面喷水湿润后加压以模拟系统正常运行时“湿闪”场景，采集表面由于放电而产生的超声波信号，将信号进行 FFT 后绝缘子放电超声波频域见图 9。

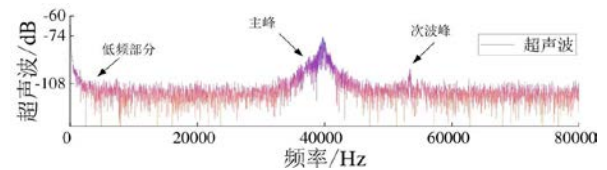


图 9 绝缘子放电超声波频域

Fig. 9 Ultrasonic frequency domain of insulator discharge

绝缘子放电超声波信号主峰频段集中在 31.92~47.08 kHz 范围，幅值达到-74.73 dB，观察到 52.84~54.26 kHz 范围内出现明显次波峰，幅值为-97.49 dB；在 2.3 kHz 以下具有低频部分，且随着频率降低幅值逐渐增大。绝缘子表面放电超声波信号存在 3 个频段，分析其原因为：绝缘子表面水膜构成导电通路，离子电导在绝缘子表面移动，发生碰撞电离，能量以声波的形式向外扩散，构成频域图中主峰频段分量；随着放电地进行，绝缘子表面水膜被烤干，水分蒸发过程中水分子剧烈碰撞，产生 2.3 kHz 以下低频声波；放电过程产生的高温使绝缘子表面空气热运动加剧，促进电离发展并产生 52~54 kHz 超声波信号。

2.2 时域分析

2.2.1 稻草火焰超声波信号频域

间隙距离 12.5 cm、电容电流 1、3 A 稻草火焰下导线表面电晕放电超声波—B 相电压—泄漏电流时域图分别见图 10、11。稻草火焰下电晕放电都发生在电压波形的负半周峰值处，故障相电压相位于 $250^{\circ}\sim 280^{\circ}$ 之间，随着电容电流增大放电时刻电压相位略微减小。

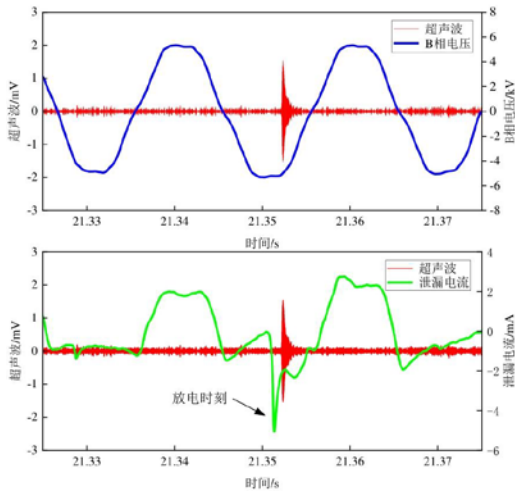


图 10 电容电流 1 A 稻草火焰时域波形

Fig. 10 Capacitive current 1 A straw flame time-domain waveform

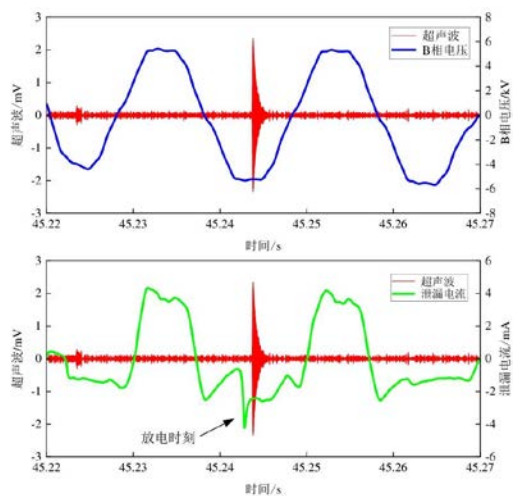


图 11 电容电流 3 A 稻草火焰时域波形

Fig. 11 Capacitive current 3 A straw flame time-domain waveform

这是不均匀电场下极性效应的典型表现：将导线与下方极板等效为棒—板电极结构，当导线为负极性时，其附近空气电离产生正负离子。若导线下方存在稻草火焰，其灰分含量在高温下加速电离，使火焰内部形成高浓度电子与离子通道。热浮力驱动下，电子快速逃逸至周围空间，正离子则滞留导线附近形成空间电荷。该空间电荷畸

变原电场，进而促进电晕放电。由图 11 可看出放电时刻泄漏电流分别突增至 5.1、4.6 mA。电容电流 1 A 时超声波信号幅值为 1.6 mV，而电容电流增大至 3 A 时超声波幅值增加到 2.4 mV，增大电容电流将增大放电通道所释放的能量，增大时域下超声波信号幅值。由于声波传递速率远慢于电信号传递速率，超声波信号滞后于泄漏电流信号 $814 \mu\text{s}$ 。

电容电流 1 A 时稻草火焰下超声波信号时域波形见图 12。微观分析可发现其上升沿时间 t_{ri} 为 $165 \mu\text{s}$ ，下降沿时间 t_{de} 为 $878 \mu\text{s}$ ， $t_{de}/t_{ri}=5.3$ 。当电容电流升至 3 A 时，超声波信号变化曲线更加平滑，见图 13。其上升沿时间 t_{ri} 为 $152 \mu\text{s}$ ，下降沿时间 t_{de} 为 $933 \mu\text{s}$ ， $t_{de}/t_{ri}=6.1$ 。稻草火焰放电超声波信号整体呈现“银杏状”，其上升沿与下降沿比值介于 5 与 6.5 之间，上升沿与下降沿比值可作为特征向量之一来区分不同条件下的超声波信号。

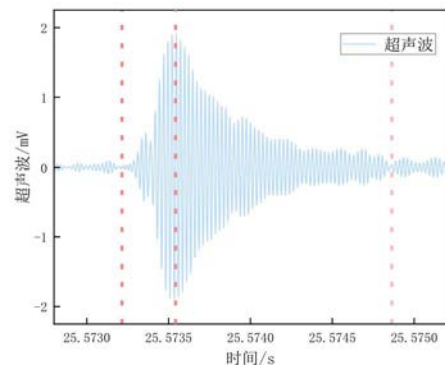


图 12 电容电流 1 A 稻草火焰放电超声波信号

Fig. 12 Ultrasonic signal of straw flame discharge with a capacitance current of 1 A

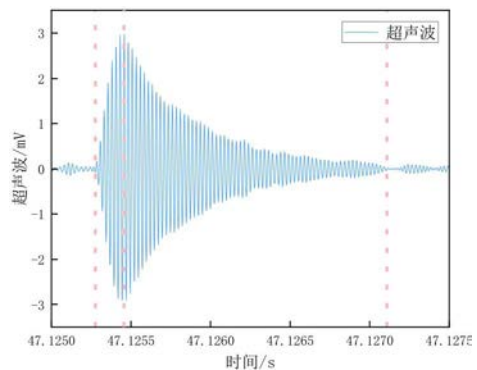


图 13 电容电流 3 A 稻草火焰放电超声波信号

Fig. 13 Ultrasonic signal of 3 A capacitor current rice straw flame discharge

2.2.2 松树火焰超声波信号频域

采集到松树火焰条件下超声波—B 相电压—泄漏电流时域图见图 14。

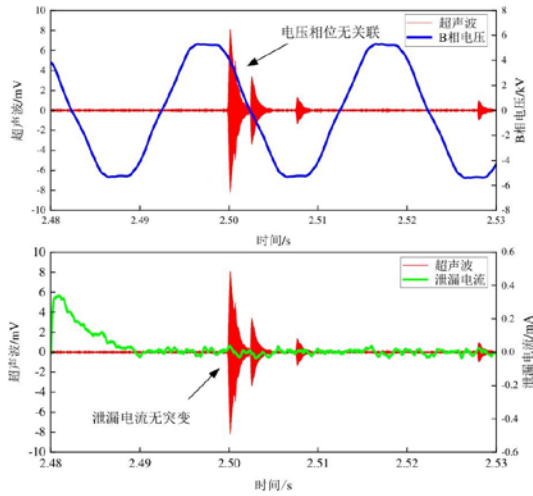


图 14 松树燃烧时域波形

Fig. 14 Time domain waveform of pine burning

较低的灰分含量导致松树火焰电导显著降低，泄漏电流远低于稻草火焰与竹子火焰，最大处仅有 0.38 mA，导致松树火焰条件下不易引起导线产生放电。松树内部油脂含量丰富，在燃烧时松脂体积膨胀后发出可听见的“啪啪”声且超声波采集设备能采集到超声波信号。通过时域分析可得出松树火焰下采集到的超声波信号与放电的高频信号无关，采集到超声波信号时泄漏电流无突变，仅反映松树燃烧时的物理特性，超声波信号波形与泄漏电流、故障相电压相位在时域上并无相关性。

松树燃烧超声波信号幅值达 8.1 mV，显著高于稻草火焰放电信号，放电所产生的超声波信号较为微弱，这是由于电晕放电是电场强度超过气体击穿电压而导致气体电离现象，电离过程中气体分子碰撞激发出能量，形成高频声波，会受到电流强度大小的影响；松树燃烧过程产生的超声波主要来自高温下气体快速膨胀振动产生的，由于松树油脂燃烧热释放速率较快，导致气体膨胀产生较大能量，产生幅值较大的超声波信号。

将松树燃烧超声波信号进行微观分析见图 15。从图 15 可发现其上升沿时间 t_{ri} 为 198 μs ，下降沿时间 t_{de} 为 1 604 μs ， $t_{de}/t_{ri}=8.1$ ，其下降沿与上

升沿比值大于 8。超声波信号形态特征为先迅速上升至最大值后略有下降，经过 394 μs 平缓后再略微上升，最终缓慢降低为 0，外形整体呈现“天坛”状。

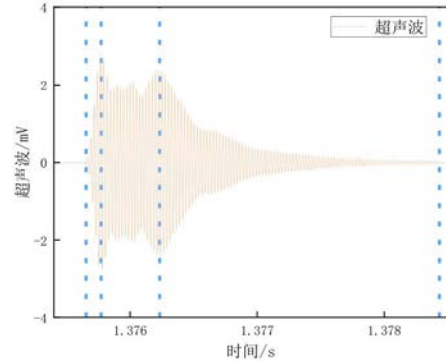


图 15 松树燃烧超声波信号时域

Fig. 15 Time domain ultrasonic signal of pine burning

2.2.3 竹子火焰超声波信号频域

采集到竹子火焰条件下超声波—B 相电压—泄漏电流时域图见图 16。当未发生电晕放电时，B 相电压在正极性下泄漏电流大于 3 mA，负极性电压下泄漏电流不超过 2.2 mA。当发生电晕放电时，泄漏电流突增至 5 mA，与稻草火焰下一样具有明显极性效应。由于竹子灰分含量较低，当竹子燃烧时火焰通道内部离子含量低于稻草火焰，火焰电导率与超声波信号幅值皆低于稻草火焰。竹子内部油脂含量低，燃烧时无爆鸣声，且未采集到由植被燃烧产生的超声波信号。

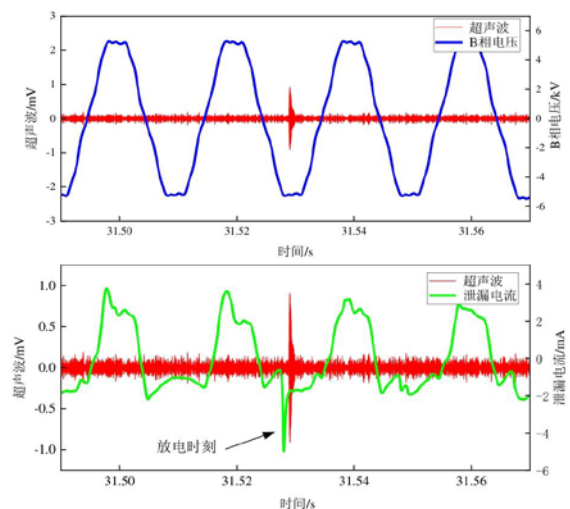


图 16 电容电流 5 A 竹子火焰时域波形

Fig. 16 Capacitive current 5 A bamboo flame time-domain waveform

将竹子燃烧致使放电超声波信号时域波形微观分析见图 17。从图 17 可发现其主波上升沿时间 t_{ri} 为 212 μs ，下降沿时间 t_{dc} 为 1 822 μs ， $t_{dc}/t_{ri}=8.6$ 。多段余波与主波整体呈现“冰锥状”。通过观察可发现其时域波形中主波下降后又略微上升再下降，多段余波形成锯齿状波形分布，最终降低到 0。

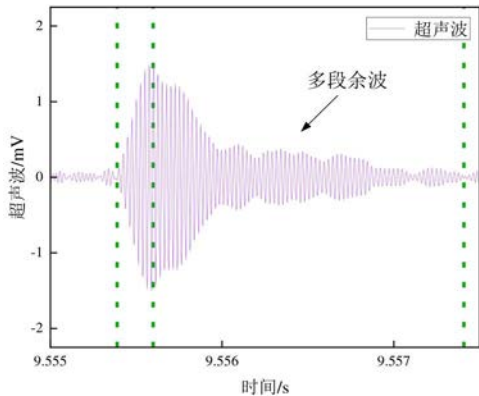


图 17 电容电流 5 A 竹子火焰放电超声波信号
Fig. 17 Capacitive current 5 A bamboo flame discharge ultrasonic signal

综上所述，通过时域、频域对火焰燃烧条件下采集的超声波信号进行分析，由于受稻草灰分含量影响，稻草火焰通道内部含有大量离子致使架空线路在火焰桥接情况下易产生放电现象。采集到的超声波信号在频域下具有主波峰峰值较大，幅值达到-86.54 dB，峰值频段集中在 40 kHz 附近；其在时域下与电压具有相关性，当电压相位为 270°时易检测到放电信号。而竹子和松树两类木本植物由于其灰分含量较低，火焰通道内部离子含量均低于稻草火焰，放电难以发生。受松树内部油脂的影响，在燃烧时受到高温作用而产生爆鸣声，便于超声波信号的检测，且易与稻草火焰放电下超声波信号的检测识别。不同超声波信号上升沿与下降沿及比值见表 2，可作为故障类型判别特征之一。

表 2 不同超声波信号上升沿与下降沿
Table 2 Rising and falling edges of different ultrasound signals

超声波类型	$t_r/\mu\text{s}$	$t_d/\mu\text{s}$	t_d/t_r
稻草火焰 1 A	165	878	5.3

稻草火焰 3 A	152	933	6.1
松树火焰	198	1 604	8.1
竹子火焰	212	1 822	8.6

3 结论

文中通过搭建 10 kV 山火试验平台，模拟检测西南地区稻草、竹子、松树三类常见植被山火桥架空导线的超声波信号，通过时频域分析初步得出：

1) 植被灰分与油脂含量导致超声信号差异明显。稻草因灰分较高，火焰易引发导线放电，超声波信号幅值与电容电流呈正相关；松树虽难引发放电，但其高油脂含量导致燃烧产生强超声波信号。

2) 频域范围内：松树燃烧信号幅值最大且多频段，其中含可听低频；导线放电为单 40 kHz 附近波峰；湿闪绝缘子放电含低频、主频、高频三分量，可与火焰放电信号有效区分。

3) 超声与电气信号相关性显示：松树燃烧信号与电气量无相关性；导线放电信号与电气量强相关，放电发生于相电压 250°~280°，放电时刻伴随泄漏电流突增，且超声波滞后电气信号 814 μs 。从形态上三类超声信号可划分为“银杏型”“天坛型”“冰锥型”三类。

文中后续将对线路实际环境干扰对信号采集影响进一步研究。结合特征提取与机器学习模型，开展时频域特征分类训练，融合电气—声学信号时序关系对放电严重程度进行量化研究。

参考文献：

[1] 黎 鹏, 阮江军, 黄道春, 等. 模拟山火条件下导线-板间隙击穿特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 195-201.
LI Peng, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Influence factors analysis of the conductor-plane gap breakdown characteristic under simulation forest fire condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 195-201.

-
- [2] 黄道春, 范建斌, 王平, 等. 极端环境条件下输变电设备空气间隙绝缘特性研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1892-1906.
- HUANG Daochun, FAN Jianbin, WANG Ping, et al. Current status and future prospects of transmission and transformation equipment air gap insulation characteristics under extreme natural environmental conditions[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1892-1906.
- [3] 周恩泽, 樊灵孟, 黄勇, 等. 基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2778-2785.
- ZHOU Enze, FAN Lingmeng, HUANG Yong, et al. Risk distribution assessment of wildfire-induced trips in transmission line based on flame combustion model[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2778-2785.
- [4] 黄道春, 周硕伦, 王华清, 等. 植被火条件下架空线路相-地长空气间隙交流击穿特性 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2025, 45(15): 6129-6140.
- HUANG Daochun, ZHOU Shuo, WANG Huaqing, et al. AC breakdown characteristics of overhead transmission line phase-ground long air gap under vegetation fire conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(15): 6129-6140.
- [5] 王开正, 周顺珍, 王健, 等. 基于多尺度时空特征深度融合神经网络的输电线路火点辨识方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1145-1157.
- WANG Kaizheng, ZHOU Shunzhen, WANG Jian, et al. Wildfire identification method for transmission lines based on deep fusion neural network with multi-scale spatio-temporal features[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1145-1157.
- [6] 徐会凯, 黄小龙, 杨淳岚, 等. 10 kV 架空线路树线放电发展过程及其特征研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(4): 278-289.
- XU Huikai, HUANG Xiaolong, YANG Chunlan, et al. Development process and characteristics study of tree line discharge in 10 kV overhead power lines[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(4): 278-289.
- [7] 张可颖, 吴新桥, 赵继光, 等. 基于特征工程和集成学习与模型融合的输电走廊实时山火风险评估模型[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4727-4736.
- ZHANG Keying, WU Xinqiao, ZHAO Jiguang, et al. Real-time wildfire risk assessment model for transmission corridors based on feature engineering and boosting integrated learning model[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4727-4736.
- [8] 杨淳岚, 宁鑫, 徐会凯, 等. 电网山火监测及风险预警技术研究综述[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4765-4777.
- YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.
- [9] 周恩泽, 饶章权, 刘琦, 等. 典型高风险植被火条件下导线—板间隙击穿特性[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 179-185.
- ZHOU Enze, RAO Zhangquan, LIU Qi, et al. Breakdown characteristics of conductor-plane gap under typical high risk vegetation fire condition[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 179-185.
- [10] 张睿卓, 唐杰, 张思, 等. 激光雷达探测输电走廊安全风险研究现状[J]. 测绘通报, 2024(1): 51-57.
- ZHANG Ruizhuo, TANG Jie, ZHANG Si, et al. The progress of risk assessment of power transmission corridor using LiDAR[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(1): 51-57.
- [11] 罗昊, 杨琪, 王炜宇, 等. 基于 XGBoost 的输电线路火灾风险等级评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 132-141.
- LUO Hao, YANG Qi, WANG Weiyu, et al. XGBoost-based assessment method for fire risk levels of transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 132-141.
- [12] 陆佳政, 刘毓, 徐勋建, 等. 架空输电线路山火预测预警技术[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 314-320.

-
- LU Jiazheng, LIU Yu, XU Xunjian, et al. Prediction and early warning technology of wildfire nearby overhead transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 314-320.
- [13]祝永坤, 尚鑫, 冯振华, 等. 山区输电线路高浓度烟雾环境火点定位技术[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(11): 235-241.
- ZHU Yongkun, SHANG Xin, FENG Zhenhua, et al. Fire point location technology in high concentration smoke environment of transmission line in mountainous area[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2024, 38(11): 235-241.
- [14]杨知, 刘宇舜, 李闯, 等. 基于遥感+GIS的山火检测及火势蔓延监控平台实现[J]. *灾害学*, 2024, 39(1): 51-56.
- YANG Zhi, LIU Yushun, LI Chuang, et al. Implementation of wildfire detection and fire spread monitoring platform based on remote sensing and GIS[J]. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(1): 51-56.
- [15]周恺, 张睿哲, 任志刚, 等. 三光集成型精确山火定位监测仪[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(3): 398-401.
- ZHOU Kai, ZHANG Ruizhe, REN Zhigang, et al. Three light integrated accurate wildfire positioning monitor[J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(3): 398-401.
- [16]陈冬, 周浩, 袁国武, 等. 融合多尺度特征与位置信息的输电线路山火检测算法[J]. *计算机科学*, 2024, 51(s2): 248-254.
- CHEN Dong, ZHOU Hao, YUAN Guowu, et al. Mountain fire detection algorithm of transmission line based on multi-scale features and coordinate information[J]. *Computer Science*, 2024, 51(s2): 248-254.
- [17]相晨萌, 高树国, 刘宏亮, 等. 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析[J]. *高压电器*, 2024, 60(4): 83-91.
- XIANG Chenmeng, GAO Shuguo, LIU Hongliang, et al. Feasibility analysis of power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(4): 83-91.
- [18]曾潮旭, 徐会凯, 杨淳岚, 等. 开关柜典型局部放电类型超声波信号特征量研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(2): 1-9.
- ZENG Chaoxu, XU Huikai, YANG Chunlan, et al. Study on characteristic quantities of ultrasonic signals of typical partial discharge types in switchgear cabinet[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(2): 1-9.
- [19]赵常威, 丁国成, 杨为, 等. 基于开关柜缺陷模型的局放检测方法对比研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(3): 220-225.
- ZHAO Changwei, DING Guocheng, YANG Wei, et al. Comparative study of partial discharge detection technologies based on the switchgear defect models[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(3): 220-225.
- [20]黄和燕, 吴德贯, 夏辉, 等. GIL设备超声波局放信号异常的诊断与分析[J]. *高压电器*, 2017, 53(12): 241-246.
- HUANG Heyan, WU Deguan, XIA Hui, et al. Diagnosis and analysis about ultrasonic PD signal abnormality of GIL equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(12): 241-246.
- [21]刘辉, 张洋, 李子岳, 等. 复合绝缘子内部缺陷微波致热检测方法[J]. *高压电器*, 2023, 59(3): 179-188.
- LIU Hui, ZHANG Yang, LI Ziyue, et al. Internal defect detection method of composite insulator based on microwave heating[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(3): 179-188.
- [22]PARK S H, LEE P J, LEE B K. Levels and sources of neighbour noise in heavyweight residential buildings in Korea[J]. *Applied Acoustics*, 2017(120): 148-157.
- [23]FABRO A T, FERGUSON N S, JAIN T, et al. Wave propagation in one-dimensional waveguides with slowly varying random spatially correlated variability[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015(343): 20-48.
- 蒋卓峰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 1398826492@qq.com)。