

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.013

交流光纤复合绝缘子盐雾闪络过程光热特性研究

吴潇翔¹, 郝艳捧¹, 毕继凯², 吴海鑫³, 黄磊¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 郑州大学电气信息工程学院, 郑州 450001; 3. 广州南网科研技术有限责任公司, 广州 510663)

摘要: 面对沿海地区外绝缘污闪威胁, 目前红外、可见光图像等电弧监测技术多为人工巡检手段, 不具备实时监测和预警功能, 外绝缘盐雾闪络过程研究对保障电网安全运行有重要意义。因此, 文中建立了交流复合绝缘子盐雾闪络试验平台, 在盐雾箱中进行植入光栅的10 kV交流复合绝缘子盐雾闪络试验, 研究交流光纤复合绝缘子盐雾闪络过程光热特性。试验结果表明: 交流复合绝缘子盐雾闪络过程可分为起弧、发展、闪络3个阶段; 交流电弧可见光图像特征均呈二倍工频周期性变化, 消失时红外热像滞后于可见光图像; 起弧阶段电弧易发生熄灭、重燃, 闪络电弧不熄灭且沿原放电通道周期性增强直至击穿; 闪络过程绝缘子高温区由高压端向中心区域转移; 界面温度在燃弧前先下降后上升的现象, 电弧越剧烈界面温度变化越明显, 该现象可实现电弧位置预测。文中研究为沿海地区复合绝缘子闪络预警提供了一种新方法。

关键词: 光纤复合绝缘子; 盐雾交流闪络; 电弧可见光图像; 红外热像; 界面温度

Research on the Photothermal Characteristics of Alternating Current Optical Fiber Composite Insulator During Salt Fog Flashover

WU Xiaoxiang¹, HAO Yanpeng¹, BI Jikai², WU Haixin³, HUANG Lei¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. China Southern Power Grid Research Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Facing the threat of external insulation pollution-induced flashovers in costal areas, the current arc monitoring techniques such as infrared and visible-light imaging primarily rely on manual inspections and lack real-time monitoring and early-warning functions. Research on the salt fog flashover process of external insulation is of great significance for ensuring safe operation of the power grid. Therefore, an AC composite insulator salt fog flashover test platform is set up in this paper. A 10 kV AC composite insulator which embedded with fiber bragg grating (FBG) inside a salt fog chamber is subjected to salt fog flashover tests to study the optical-thermal characteristics of the AC optical fiber composite insulator during the salt fog flashover process. The test results reveal that the salt fog flashover process of the AC composite insulator is divided into the following three stages: arc initiation, development, and final flashover. The visible light image features of AC arc exhibit a periodical variation at twice the power frequency. The infrared thermal image lags behind visible light image when the arc disappears. During the arc ignition stage, the arc is prone to extinction and reignition. The flashover arc does not extinguish and periodically intensifies along the original discharge channel until breakdown occurs. During the flashover process, the high temperature zone of the insulator shifts from the high voltage end toward the central region. The interface temperature exhibits a phenomenon of first decreasing and then increasing before arcing, the more intense the arc, the more pronounced the interface temperature variation, which enables the prediction of arc location. The research presented in this paper provides a novel

收稿日期:2026-02-18; 修回日期:2026-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177142)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177142).

method for flashover early warning of composite insulator flashover in costal areas.

Key words: optical fiber composite insulator; salt fog AC flashover; visible light image of arc; infrared thermography; interface temperature

0 引言

随着中国经济快速发展,电力系统输电线路等级不断提高,这对输电线路外绝缘提出了更高的要求。近年来,海上风电发展迅速,硅橡胶绝缘子因其优异的疏水性和抗污闪性能等独特优势,在沿海输电线路中得到了广泛的应用^[1-6]。与内陆地区相比沿海地区的特点是雾湿度高、含盐量高,具有高电导率的离散水滴倾向于在憎水复合绝缘子表面形成^[7]。沿海地区的特殊气象环境是影响输电线路绝缘子安全的关键问题,海雾产生的海盐颗粒是盐雾的主要来源。在大气作用下,这些含盐水滴被带入大气并分散到内陆,不断分裂、重组和蒸发,最终形成盐雾。城市现代化和工业发展导致了日益严重的环境问题,大规模雾霾天气频繁发生,盐雾水滴电导率增加,绝缘子染污、电气强度降低,绝缘子闪络导致大规模长期停电事故频繁发生,这些对电网安全运行构成了威胁。掌握憎水绝缘表面盐雾交流电弧的演变特征和发展规律,防止绝缘表面放电和闪络具有重大价值和意义^[8-15]。

放电过程采集到的光学与热学数据中包含很多值得研究的信息。电晕活动与230~405 nm紫外光谱范围内的光发射有关,肉眼无法观察到电晕现象,文[16]通过对比相机获得的电晕可见光图像与传统局部放电设备测量的放电幅度,发现两者呈线性相关。绝缘表面放电通常伴随着光辐射信号的产生,对于放电产生的光信号,可以用紫外成像仪检测绝缘表面运行状态^[17]。Maadjoudj用相机抓拍平板电弧可见光图像来表征绝缘表面是否存在电弧^[18]。袁哲等提出了一种基于可见光图像和机器学习的表面放电智能诊断方法,为了实现放电诊断,提取电弧可见光图像的色度、灰度和形态特征,并使用人工神经网络降低图像特征的维数以提出分类精度^[19]。Prasad等提出了一种从放电图像中提取颜色信息并将其转换为亮度指标的方法,研究电弧可见光图像与放电功率之间的关系^[20]。Reddy等介绍了提取放电照片中的RGB(red, green, blue)信息并换算成亮度,研究放电图像与放电功率之间的关系^[21]。李顺元等用高速摄像机拍摄交流电弧沿染污绝缘表面发展的全过程,同时记录闪络过程中外施电压和泄漏电流的变化^[22]。随着无人机(unmanned aerial

vehicle, UAV)探测和塔式摄像机在电网中的应用,现已不难获得绝缘子的实时放电可见光图像^[23-25]。综上所述,放电可见光图像和红外热像中包含丰富放电信息,这些信息可用于研究交流复合绝缘子盐雾闪络过程光热特性。

复合绝缘子结构和形状的复杂性导致其表面热功率分布变化很大,热量从高温区域传导到低温区域并通过辐射和对流传递到外部环境,盐雾环境交流复合绝缘子放电过程不仅是电的过程,也是热的过程^[26]。关志成等利用红外热像仪得到干区形成过程中绝缘子表面温度分布变化,结合泄漏电流的变化深入分析了绝缘子表面干区形成过程,指出高温区首先出现干区,完整干区形成后污层总体温度下降,稳定后污层温度分布呈现较强规律性^[27]。郝艳捧等在复合绝缘子护套—芯棒界面植入光纤布拉格光栅(fiber bragg grating, FBG)研究了出现局部电弧时界面温度特性^[28-30]。毕继凯等对嵌入FBG的硅橡胶环氧树脂试样进行了试验,提出了一种基于界面温度监测水滴形态和闪络的方法^[31]。紫外检测结果受仪器、检测距离和天气等多种因素影响,且放电类型多、随机性大。贾志东等采用光子数、光斑面积、光斑数量3个参数量化评估了绝缘子放电强度,通过绝缘子放电状态实现闪络预警^[32];Zhang^[33]等采用红外热像仪和紫外成像仪分别测量绝缘子表面温度分布和放电现象,研究了湿污绝缘子污秽成分和环境相对湿度对污层吸湿的影响。吴海鑫等采用图像处理技术研究复合绝缘子交流盐雾闪络过程中不同阶段的电弧演化特性,提出复合绝缘子表面放电和电弧发展成闪络的可见光判据^[34]。红外成像可以快速发现复合绝缘子异常温升,从而实现缺陷检测,黄新宇^[35]等提出基于Mask-RCNN的温升绝缘子法,用于绝缘子异常发热故障诊断。方春华^[36]等利用高速摄影仪对瓷绝缘子表面局部电弧的发生发展过程进行拍摄并存储,并提取了电弧面积,为绝缘子放电电弧定量化研究提供基础。刘辉等^[37]针对复合绝缘子运行现状,提出基于多光谱法的联合检测技术,将可见光检测、红外检测、紫外检测技术有效结合,并应用于500 kV交流输电线路和±660 kV直流输电线路^[37]。

绝缘材料表面放电过程会产生多物理场耦合效应,具体表现为电学、声学、光学及热学等特征信

号。现有研究已发展出多种检测方法:除前文所述的紫外成像法、红外热像法和可见光图像法外,还包括基于电学特性的泄漏电流法^[31-32]、基于声学特征的超声波法^[33-34]等。上述检测方法在电网不同场景均有应用。其中,泄漏电流法多用于在线监测,可靠性高,但前期安装和后期维护工作量大;超声波法检测灵敏度高,因易受环境因素影响应用场景受限;紫外成像研究放电特性直观但目前的紫外相机普遍分辨率不高、拍摄图像清晰度较低;红外成像法对放电温升检测效果稳定,可见光图像中电弧特征包含大量放电信息,但两者价格昂贵,难以大规模推广^[35]。鉴于现有检测方法的局限性,开发基于新型传感原理的在线监测技术已成为实现盐雾环境下绝缘表面闪络高精度、高可靠性检测的迫切需求。

本研究在10 kV复合绝缘子芯棒—护套界面植入FBG,开展交流盐雾闪络试验,分别采集电弧可见光图像、红外热像与光栅中心波长数据,通过分析闪络过程中电弧位置、表面和界面温度分布特性,实现基于FBG的绝缘表面放电监测。本研究通过系统实验揭示了交流复合绝缘子在盐雾环境下的闪络发展机制及其光热特性演化规律,为沿海地区复合绝缘子闪络预警提供了一种新方法。

1 光纤复合绝缘子盐雾闪络试验系统

1.1 试验平台

本试验采用10 kV复合绝缘子试样在盐雾室中进行盐雾闪络试验,复合绝缘子护套—芯棒界面植入了FBG,表面涂覆含有NaCl和硅藻土的湿污。通过多组盐雾闪络试验采集复合绝缘子表面电弧可见光图像、红外热像和界面温度数据。试验平台包括电源、盐雾箱、高速摄像机、红外热像仪、光纤光栅解调仪和FXBW-10/70光纤复合绝缘子试样等,见图1。

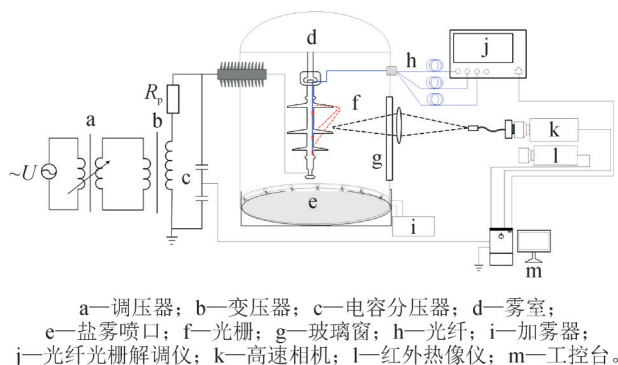


图1 10 kV交流复合绝缘子盐雾闪络试验系统

Fig. 1 Salt fog AC flashover test system of 10 kV composite insulator

试验变压器最高输出电压50 kV,电源频率为

工频50 Hz。高速相机采集电弧可见光图像,型号为Photron FASTCAM MiniAX100,拍摄速度调整为4 000 FPS,最大有效像素1 024×1 024,机身缓存32 G在最低帧率可拍摄全画幅视频5.46 s,试验时快门速度设置为1/50 000 s。红外热像仪测量表面温度,型号为海康威视TP96,量程-20~650 ℃,像素640×480。光纤光栅解调仪检测界面温度,型号为JEME-iFBG-S08,波长灵敏度0.1 pm,扫描频率选取10 Hz。

1.2 试验步骤

本试验步骤如下:试验前按盐密0.1 mg/cm²、灰密1.0 mg/cm²称取所需质量的氯化钠和高岭土,加水搅拌至污秽成糊状,然后将污秽均匀涂抹于复合绝缘子硅橡胶表面。试验时使用的盐雾溶液电导率为3 mS/cm。在试验开始前按下计时器,从零开始升高电压,在第一次出现电弧时停止加压并通过高速相机记录绝缘表面起始阶段电弧可见光视频,完成数据存储后继续加压直至再次观察到电弧,保存电弧视频数据后保持升压直至闪络击穿,分析电弧起始、电弧发展、闪络3个阶段可见光图像,同步记录各阶段红外热像及复合绝缘子芯棒—硅橡胶界面温度。本试验加压流程见图2。

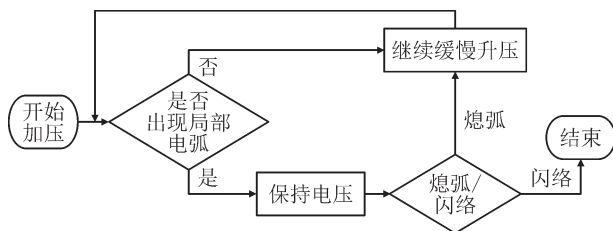


图2 盐雾闪络试验加压方法流程

Fig. 2 Flow chart of applied voltage method for salt fog flashover test

1.3 试样光栅分布

盐雾箱中光纤光栅复合绝缘子芯棒表面间隔120°布置了4根各级联3个光栅,其轴向和周向分布见图3。

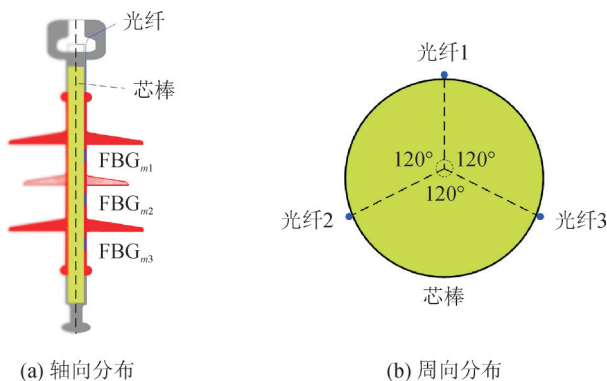


图3 10 kV复合绝缘子界面FBG位置分布

Fig. 3 Distribution of FBG positions at the interface of 10 kV composite insulator

图3中: FBG_{mn} 中 m 为光纤编号; n 为光栅编号, 其中光纤4与光纤1摆放位置完全一致, 仅作为参照和验证。光纤1、2、3、4的光栅 FBG_{m1} 、 FBG_{m2} 、 FBG_{m3} ($m=1, 2, 3$ 或 4) 均位于伞裙间的护套下表面。对光纤复合绝缘子的芯棒—护套界面FBG温度标定, 各光栅中心波长漂移量与温度变化量呈线性关系, 线性可决系数见表1。

表1 芯棒—护套界面FBG温度系数

Table 1 FBG temperature coefficient at the core rod-sheath interface

光栅	温度系数 $k/(pm \cdot ^\circ C^{-1})$	拟合优度 R^2
FBG_{11}	16.59	0.998 6
FBG_{12}	15.82	0.999 9
FBG_{13}	13.13	0.999 9
FBG_{21}	16.29	0.998 5
FBG_{22}	15.79	0.994 3
FBG_{23}	13.21	0.999 5
FBG_{31}	16.37	0.998 9
FBG_{32}	15.92	0.998 6
FBG_{33}	12.89	0.999 3
FBG_{41}	16.56	0.998 7
FBG_{42}	16.27	0.999 8
FBG_{43}	12.80	0.998 3

2 试验数据与处理方法

2.1 可见光图像

本试验共采集 863 张电弧可见光图像, 其中起弧阶段 255 张、电弧发展阶段 286 张、闪络阶段 322 张, 相邻图片时间间隔 0.25 ms。各阶段盐雾交流放电电弧可见光图像见图4。

图4(a)、(b)、(c)分别为试验第 139 s 起弧阶段、第 187 s 发展阶段、第 460 s 闪络阶段, 分别持续 60、70、80 ms。起弧阶段为电弧首次出现在绝缘子表面; 电弧发展阶段为绝缘子放电强度随电压升高的放电过程; 闪络阶段对应绝缘子闪络到击穿的过程。对交流复合绝缘子盐雾放电电弧可见光图像进行处理, 见图5。

为更好分析绝缘表面电弧图像特征, 将原图进行批量裁剪见图5(II)。本试验所用相机拍摄得到的图像是黑白图像, 因此可以不用进行灰度化处理直接提取每张电弧图像的灰度值。灰度图像的明暗程度用灰度级表示, 灰度级越高图像颜色强度和亮度越大。每个像素点灰度值在 0~255 之间, 遍历

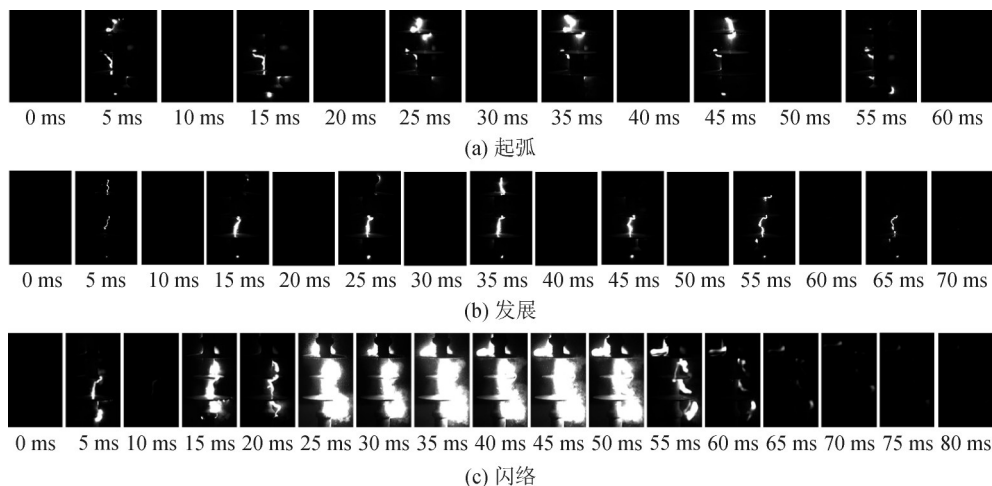


图4 各阶段盐雾交流放电电弧可见光图像

Fig. 4 Visible light images of salt fog AC discharge arcs at each stage

每一张灰度图单通道每一个像素点灰度值, 统计每张灰度图像的灰度均值用 S 表示, 计算公式为

$$S = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}{M \cdot N} \quad (1)$$

式(1)中: M 、 N 分别为图像 x 、 y 轴尺寸; $f(x, y)$ 为像素点灰度值。

电弧图像在数字化和传输过程中受成像设备和外部环境噪声干扰等影响会产生噪声。这些噪

声是干扰图像的重要因素, 图像预处理需先去除这些噪声。由于线性滤波的低通性, 在去噪过程中会模糊边缘值, 为保留电弧图像的边缘信息, 文中采用了具有非线性的中值滤波器。选取图像像素点 3×3 领域内的像素值进行排序, 用排序后序列中心位置的值得替代原像素值, 从而达到不模糊边缘的同时平滑椒盐噪声的目的。图5(III)是经中值滤波处理后电弧图像。

最大类间方差法是目前图像分割中阈值选取

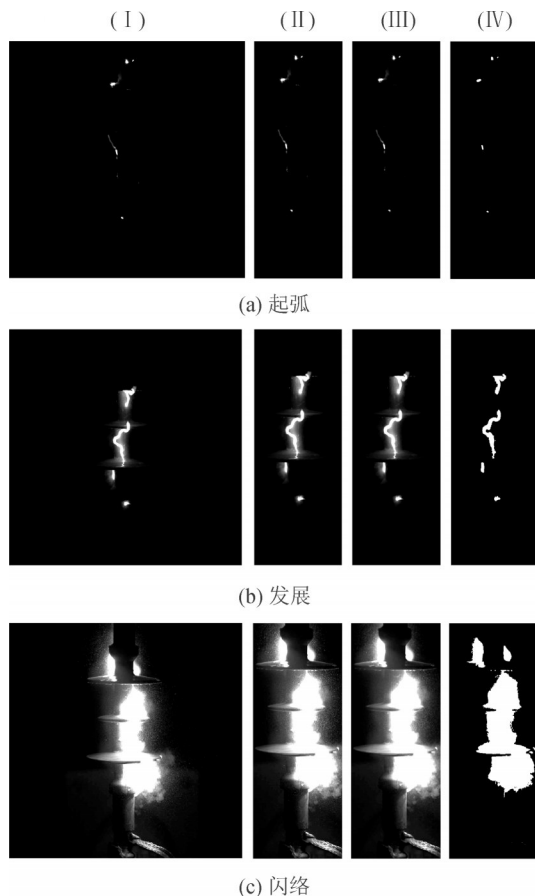


图5 盐雾交流闪络电弧可见光图像处理

Fig. 5 Visible light image processing of salt fog AC flashover arc

的最佳算法,具有计算简单和不受图像亮度、对比度影响的优势。本试验图像处理算法采用最大类间方差法,计算每张中值滤波后的电弧可见光图像阈值并根据图像自适应阈值进行二值化分割,所得图像见图5(IV),像素值为0的像素点所在区域为背景非电弧区域,像素值为255的像素点所在区域即为电弧区域。依次遍历图像每行每列统计电弧区域像素点总个数,将电弧区域总个数除以图像像素点个数可得电弧面积占比数据。

提取高速摄像机拍摄的各阶段电弧可见光视频每一帧图像,电弧可见光图像间隔0.25 ms,对图像批量裁剪、中值滤波和分割处理可得灰度均值、电弧面积特征,交流复合绝缘子盐雾放电各阶段可见光图像灰度均值、电弧面积占比见图6。

2.2 红外热像

盐雾箱中复合绝缘子红外热像与电弧可见光图像对比见图7。提取红外热像视频、可见光视频中的每一帧图像,将出现电弧时的前一张图像与可见光图像进行对比,与可见光图像同步时间误差为0.01 s。升压过程中首次出现电弧时的电弧图像与

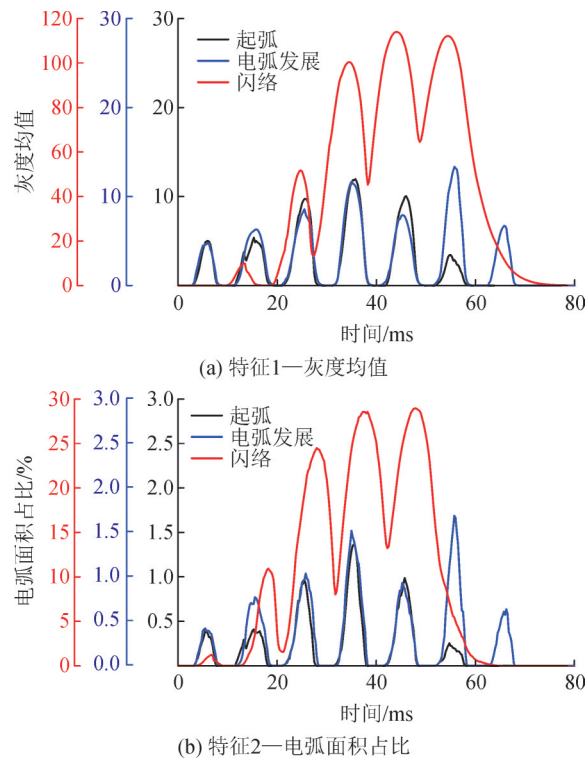


图6 各阶段电弧可见光图像特征

Fig. 6 Arc visible light image characteristics at each stage

红外热像见图7(a);电弧发展阶段电弧图像与红外热像见图7(b);闪络阶段发生击穿时的电弧图像与红外热像图见图7(c)。

红外热像仪摄像帧率为50 Hz,电弧变化是一个瞬态过程,其持续时间为几十ms。由图7可知,可见光图像显示电弧消失,红外热像仍显示电弧热残留,其中持续849 ms的起弧阶段滞后472 ms,持续889 ms的发展阶段滞后610 ms,持续1 325 ms的闪络阶段滞后1 047 ms。

交流复合绝缘子盐雾闪络过程红外热像见图8。在139 s第一次出现电弧前绝缘子高温区在高压端和接地端。试验的第139~187 s电弧发展阶段,高温区随闪络电弧出现由绝缘子两端逐渐转移至中间伞裙下方。187~447 s绝缘子中心温度随电压提升缓慢升高,在447 s闪络至击穿时达到最大,由红外和可见光图像可见,绝缘子中间电弧最多,因此闪络过程高温区由两端向中间转移。

2.3 界面温度

10 kV交流复合绝缘子盐雾闪络过程界面光栅温度见图9。开始加压后各光栅界面温度均呈缓慢下降趋势,靠近接地端的 FBG_{m1} 温度降低最为明显,其次是 FBG_{m2} ,靠近高压端的 FBG_{m3} 温度下降较缓慢。139~187 s为绝缘子表面起弧阶段,由于绝缘子中心位置电弧出现最频繁, FBG_{m2} 温度最先开始上升。在187 s后保持电压不变, FBG_{m2} 温度又呈现缓

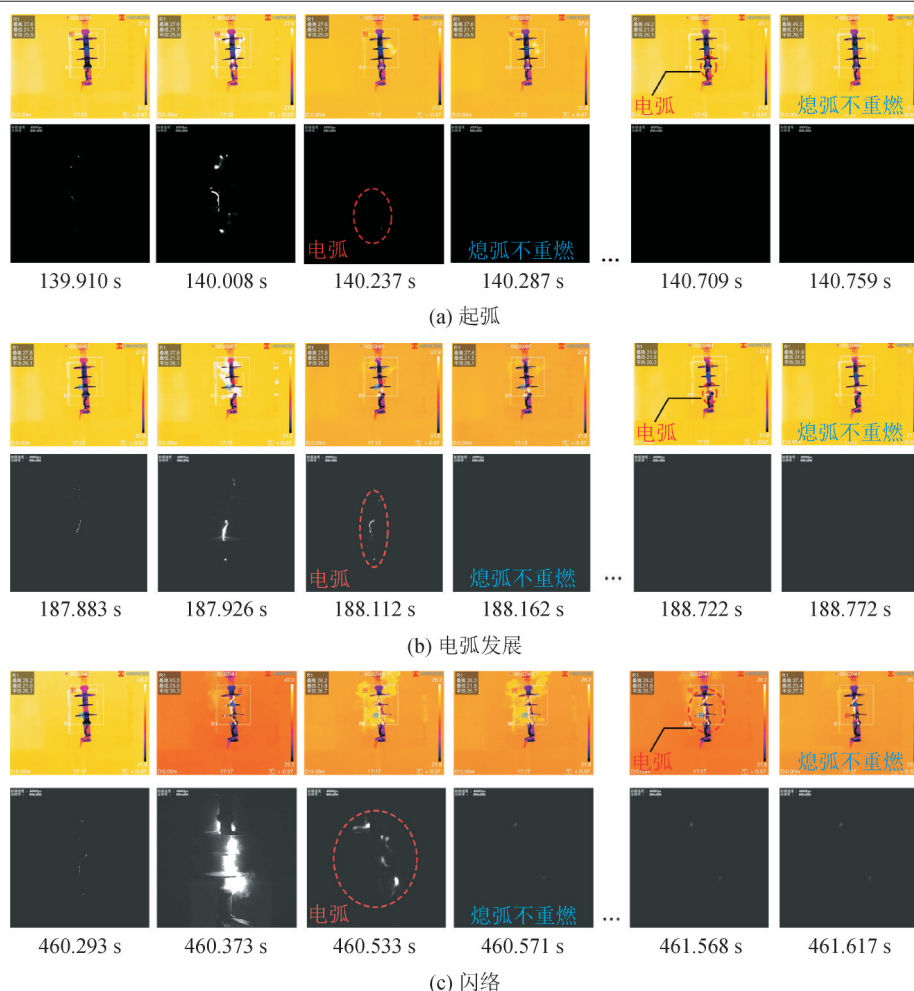


图7 各阶段电弧红外热像和可见光图像随时间演化对比

Fig. 7 Comparison of temporal evolution of infrared thermography and visible light images of arc at each stage

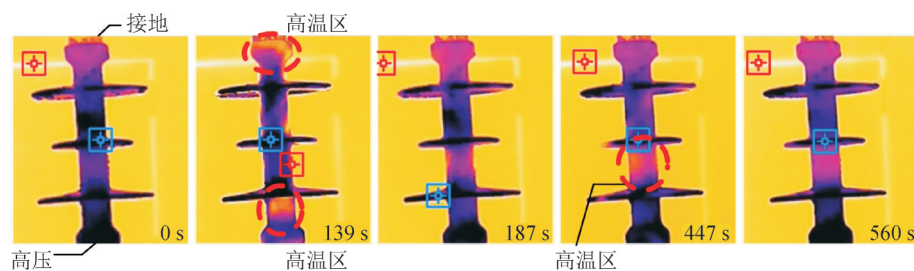


图8 交流复合绝缘子盐雾闪络过程红外热像

Fig. 8 Infrared thermal images of salt fog flashover process on AC composite insulator

慢下降趋势,推测是因为中间位置表面附着的水滴蒸发吸收了热量。187~460 s 电弧发展阶段,FBG_{m3} 温度开始缓慢上升,在 460 s 复合绝缘子闪络击穿,所有位置光栅温度同步急剧上升,不同光纤的光栅温度上升速度不同,其中 FBG₁₃ 温升快于 FBG₁₁、FBG₁₂, FBG₂ 的 3 个光栅温升速度接近但处于中间位置的 FBG₂₂ 温度变化量最大,FBG₃₁ 温升快于 FBG₃₂ 和 FBG₃₃。

3 结果与分析

由图 6 可知,交流复合绝缘子盐雾闪络过程的

起弧阶段,电弧图像灰度均值和面积占比呈周期性变化趋势,电弧特征参数峰值先增后减,而电弧发展阶段也有同样的变化趋势,但在第 5 个周期电弧特征参数峰值突变,其原因是电弧位置变化,用高速相机无法拍摄到的绝缘子背面。各阶段可见光图像灰度均值和电弧面积占比周期性变化频率为 100 Hz,为工频电压 50 Hz 的二倍。起弧和电弧发展阶段存在明显熄弧—重燃现象,电弧发生位置具有随机性。临闪电弧不熄灭,可见光图像显示电弧会沿着原放电通道周期性增强直至击穿。

图 7 中红外热像电弧消失滞后可见光图像的现

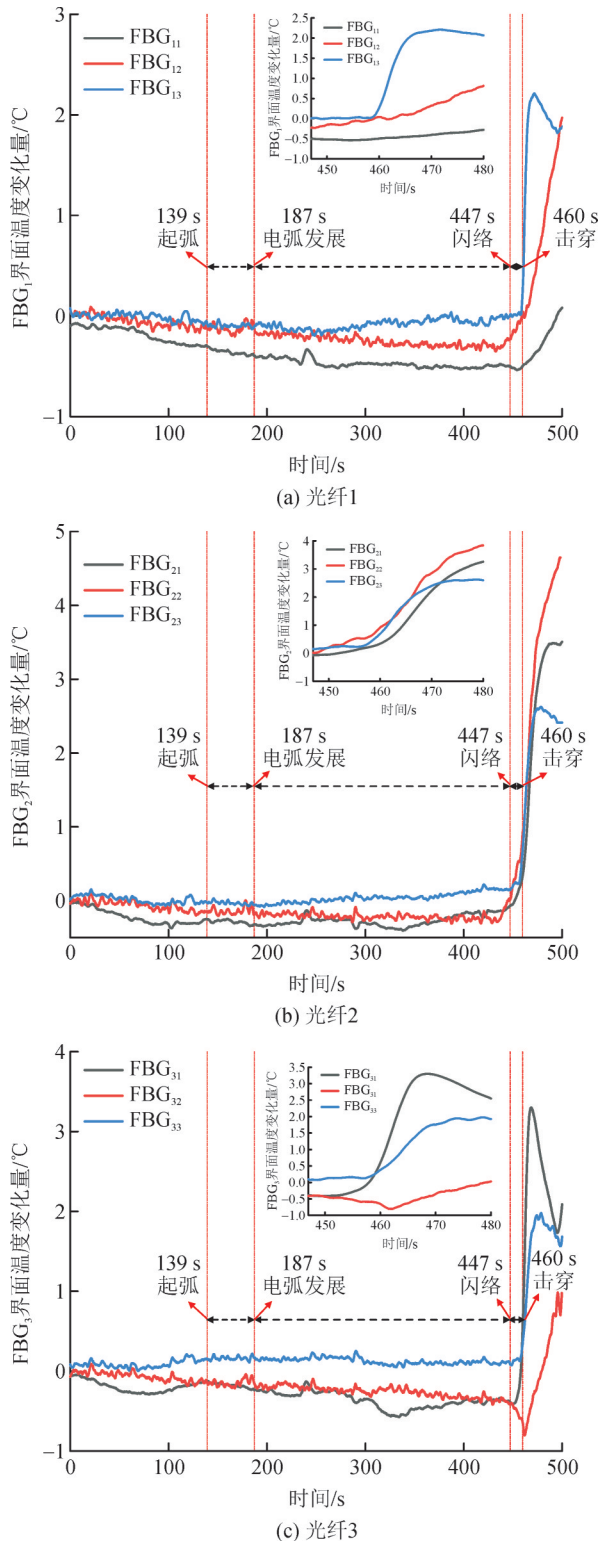


图9 盐雾交流闪络过程界面温度

Fig. 9 Interface temperature of salt fog AC flashover process

象呈现了电弧燃烧的热效应。在前两个阶段未发生击穿时电弧红外热像图呈光簇状,而电弧可见光图像呈细长条状。在闪络直至击穿阶段电弧红外热像图呈现了电弧燃烧过程热形态,电弧可见光图像也从前两个阶段的细长条状变为光簇状。从热

学角度分析,电弧是一种高温电离气体,红外热像仪拍摄到的电弧表面红外热像表示该气体温度会向四周扩散;从光学角度分析,高速摄像机以宏观角度呈现了电弧完整燃烧过程光形态、不同阶段的电弧特征量与光学形态特点。加压起始阶段绝缘子表面温度基本保持不变,在起弧时,通过红外观测到绝缘子表面最高温度点出现在伞裙之间电弧出现的位置。在电弧发展阶段,交流电弧每次出现都伴随着熄灭—燃弧—熄灭过程,190 s停止升压,绝缘子表面最高温度和平均温度在电弧熄灭后与出现电弧前保持一致,由于绝缘表面水分蒸发吸收的热量大于在电压作用下产生的热量,表面温度下降。340 s继续升压后绝缘子产生热量急剧上升,界面温度升高0.7℃左右,最终在460 s闪络击穿。图8揭示了交流光纤复合绝缘子盐雾闪络过程高温区位置的变化。

图9中各光纤只有中间位置的FBG_{m2}界面温度在临闪前20 s有显著变化,FBG₁₂、FBG₂₂光栅温度上升,FBG₃₂光栅温度下降,与同时刻的电弧可见光图像对比发现:发生闪络时FBG₁₂、FBG₂₂处未产生电弧,电弧发生位置集中在FBG₃₂附近。该发现可用于预测闪络时电弧出现的位置。

4 结论

文中搭建了交流复合绝缘子盐雾闪络试验系统,开展试验采集了盐雾交流闪络过程电弧可见光图像、红外热像和界面温度,主要结论如下:

1)提出交流复合绝缘子盐雾电弧可见光图像特征提取方法,发现图像特征呈二倍工频周期性变化,将闪络过程分起弧、发展、闪络3个阶段。起弧、发展阶段电弧不过零点熄灭、重燃。闪络电弧过零点不熄灭且沿原放电通道周期性增强。

2)交流复合绝缘子盐雾闪络电弧消失时红外热像滞后于可见光图像,放电越强,滞后时间越长。在电弧首次出现前绝缘子两端温度缓慢升高,起弧后高温区转移至中间,闪络过程绝缘子中心温度逐渐升高。

3)闪络电弧集中发生在中间小伞裙附近,对应位置FBG_{m2}温度在出现电弧前20 s有显著变化,FBG₁₂、FBG₂₂温度上升,而FBG₃₂温度先陡降后上升,对比可见光图像发现电弧集中在该光栅附近,该现象可用于预测电弧产生位置。

参考文献:

- [1] Aouabed F, Bayadi A, Boudissa R. Flashover voltage of silicone

- insulating surface covered by water droplets under AC voltage[J]. Electric Power Systems Research, 2017(143):66-72.
- [2] Mohammadnabi S, Rahmani K. Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230 kV composite insulator[J]. Electric Power Systems Research, 2021(194):107083.
- [3] 沈瑶, 刘兴杰, 梁英, 等. 基于硅橡胶分子链陷阱变化的复合绝缘子老化现象[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17):5545-5554. Shen Yao, Liu Xingjie, Liang Ying, et al. Aging phenomenon of composite insulators based on chemical traps' change of silicone rubber molecular chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17):5545-5554.
- [4] 缪金, 秦军, 陈峻宇, 等. 基于高光谱成像的复合绝缘子表面污秽成分识别方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(1):124-132. Miao Jin, Qin Jun, Chen Junyu, et al. A method for identifying surface contamination components of composite insulators based on hyperspectral imaging[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1):124-132.
- [5] 周立玮, 叶昊亮, 李特, 等. 可见光干扰下复合绝缘子红外测试温度分布特征研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(1):31-37. Zhou Liwei, Ye Haoliang, Li Te, et al. Temperature distribution characteristics of composite insulator infrared test under visible light interference[J]. Smart Power, 2025, 53(1):31-37.
- [6] 尹向雷, 解永芳, 屈少鹏, 等. 基于动态蛇形卷积和非跨步卷积的绝缘子缺陷检测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20):177-187. Yin Xianglei, Xie Yongfang, Qu Shaopeng, et al. Insulator defect detection based on dynamic snake convolution and space-to-depth convolution[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20):177-187.
- [7] Liu Yong, Kong Xianghuan, Wu Yafeng, et al. Dynamic behavior of droplets and flashover characteristics for CFD and experimental analysis on SiR composites[J]. IEEE Access, 2019(7):8095-8101.
- [8] Su Huafeng, Jia Zhidong, Gu Zhicheng. Mechanism of contaminant accumulation and flashover of insulator in heavily polluted coastal area[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5):1635-1641.
- [9] Zalhaf A S, Mansour D E A, Han Yang, et al. Numerical and experimental analysis of the transient behavior of wind turbines when two blades are simultaneously struck by lightning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71):1-12.
- [10] Cristancho C. J A, Pantoja J J, Rivera C, et al. Analysis of two nonfatal lightning accidents in Colombia[J]. Electric Power Systems Research, 2017(153):159-169.
- [11] Zhu Yongcan, Zhou Ruiwen, Zhang Ye, et al. Review on flashover risk prediction method of iced insulator based on icing monitoring technology[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021(185):103252.
- [12] Gouda O E, Dein A Z E, Omar S Y, et al. Studying direct lightning stroke impact on human safety near hvlt towers considering two layer soils and ionization influence[J]. IEEE Access, 2023(11), 5019-5030.
- [13] 刘悦, 黄新波, 刘天娇. 基于深度学习的架空输电线路绝缘子缺陷检测方法研究综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3):167-177.
- Liu Yue, Huang Xinbo, Liu Tianjiao. Overview on defect detection methods of insulator for overhead transmission lines based on deep learning[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3):167-177.
- [14] 唐捷, 黄志都, 朱登杰, 等. 交叉跨越段输电线路绝缘子发热检测方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(6):115-120. Tang Jie, Huang Zhidu, Zhu Dengjie, et al. A study on the heat detection method of insulators in the cross section of transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6):115-120.
- [15] 张东东, 常泽中, 万武艺, 等. 基于局部电场的零值绝缘子检测技术研究[J]. 电力工程技术, 2024, 43(4):193-201. Zhang Dongdong, Chang Zezhong, Wan Wuyi, et al. Zero-value insulator detection technology based on local electric field[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4):193-201.
- [16] Pinnangudi B, Gorur R S, Kroese A J. Quantification of corona discharges on nonceramic insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3):513-523.
- [17] 刘渝根, 柴艳莉. 两种紫外成像参数在绝缘子故障诊断中的比较[J]. 高压电器, 2012, 48(10):22-26. Liu Yugen, Chai Yanli. Comparison between two ultraviolet imaging parameters for insulator fault diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(10):22-26.
- [18] Maadjoudj D, Mekhaldi A, Teguier M. Flashover process and leakage current characteristics of insulator model under desert pollution[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6):2296-2304.
- [19] 袁哲, 叶齐政, 王玉伟, 等. 基于可见光图像的暗环境沿面放电智能诊断方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2):434-444. Yuan Zhe, Ye Qizheng, Wang Yuwei, et al. Intelligent diagnoses of surface discharges under dark environment based on visible images[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(2):434-444.
- [20] Prasad D S, Reddy B S. Study on corona activity using an image processing approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4):4008-4014.
- [21] Prasad D S, Reddy B S. Digital image processing techniques for estimating power released from the corona discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1):75-82.
- [22] 李顺元, 张仁豫, 谈克雄. 交流电弧沿染污绝缘表面发展过程的研究[J]. 中国电机工程学报, 1991(2):3-9. Li Shunyuan, Zhang Renyu, Tan Kexiong. The study of electric arc propagating along a polluted dielectric surface under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 1991(2):3-9.
- [23] Ahmed M F, Mohanta J C, Sanyal A. Inspection and identification of transmission line insulator breakdown based on deep learning using aerial images[J]. Electric Power Systems Research, 2022(211):108199.
- [24] Souza B J, Stefenon S F, Singh G, et al. Hybrid-YOLO for classification of insulators defects in transmission lines based on UAV[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(148):108982.
- [25] Sadykova D, Pernebayeva D, Bagheri M, et al. IN-YOLO: real-time detection of outdoor high voltage insulators using UAV imaging[J].

- IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1599-1601.
- [26] Xu Guoxiang, Mcgrath B P. Electrical and thermal analysis of polymer insulator under contaminated surface conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 289-298.
- [27] 梁 飞, Mark M, 关志成, 等. 基于红外热像分析的绝缘子污闪过程中干区形成过程分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(1): 138-146.
Liang Fei, Mark M, Guan Zhicheng, et al. Formation of dry-band in the process of pollution flashover based on infrared thermal image analysis[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 138-146.
- [28] Hao Yanpeng, Bi Jikai, Wang Quan, et al. Method of quasi-distributed interface fiber bragg gratings monitoring dry band arc on the moist pollution layer of composite insulators[J]. Electric Power Systems Research, 2022(209): 107956.
- [29] Hao Yanpeng, Bi Jikai, Wang Quan, et al. Interface temperature evolution exposed to arc discharges occurred on the uniform moist pollution layer of composite insulators based on interface fibre bragg gratings[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 763-770.
- [30] 郝艳捧, 王 泉, 毕继凯, 等. 复合绝缘子界面热源下的温度分布和暂态过程[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3497-3506.
Hao Yanpeng, Wang Quan, Bi Jikai, et al. Temperature distribution and transient process of interface heat in composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3497-3506.
- [31] Bi Jikai, Hao Yanpeng, Zheng Yashuang, et al. A method for detecting conductive droplet deformation and flashover using interface temperature based on electrothermal synergistic mechanism[J]. Electric Power Systems Research, 2023(218): 109212.
- [32] 贾志东, 王林军, 尚晓光, 等. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1467-1475.
Jia Zhidong, Wang Linjun, Shang Xiaoguang, et al. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1467-1475.
- [33] Zhang Da, Meng Fancui. Research on the interrelation between temperature distribution and dry band on wet contaminated insulators[J]. Energies, 2019, 12(22): 4298.
- [34] 吴海鑫, 郝艳捧, 吴潇翔, 等. 复合绝缘子交流盐雾闪络的可见光判据研究[J]. 广东电力, 2024, 37(5): 60-68.
Wu Haixin, Hao Yanpeng, Wu Xiaoxiang, et al. Research on visible light criterion for AC salt fog flashover of composite insulators[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5): 60-68.
- [35] 黄新宇, 张 洋, 王黎明, 等. 基于Mask-RCNN算法的复合绝缘子串红外图像分割与温度读取[J]. 高压电器, 2021, 57(9): 87-94.
Huang Xinyu, Zhang Yang, Wang Liming, et al. Infrared image segmentation and temperature reading of composite insulator strings based on Mask - RCNN algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 87-94.
- [36] 方春华, 周 毅, 王建国, 等. 基于图像处理技术的绝缘子放电电弧面积提取[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 35-39.
Fang Chunhua, Zhou Yi, Wang Jianguo, et al. Extraction of insulator discharge arc area based on the theory of image processing techniques[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(2): 35-39.
- [37] 刘 辉, 沈庆河, 雍 军, 等. 基于多光谱法的复合绝缘子检测技术的应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 69-75.
Liu Hui, Shen Qinghe, Yong Jun, et al. Research on application of composite insulator detection technology based on multispectral method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 69-75.
- [38] 王黎明, 李 旭, 曹 彬, 等. 局部电弧对绝缘子泄漏电流和表面电导率关系的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1624-1629.
Wang Liming, Li Xu, Cao Bin, et al. Influence of partial arc on leakage current and surface conductivity of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1624-1629.
- [39] 王黎明, 李 旭, 曹 彬, 等. 基于BP神经网络的线路绝缘子表面泄漏电流预测[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 69-76.
Wang Liming, Li Xu, Cao Bin, et al. Prediction of leakage current on insulator surface of transmission line based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 69-76.
- [40] Karami H, Aviat F Q, Azadifar M, et al. Partial discharge localization in power transformers using acoustic time reversal[J]. Electric Power Systems Research, 2022(206): 107801.
- [41] 牛 勃, 马飞越, 周 秀, 等. 基于PSO的局部放电源声电联合法定位的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 108-115.
Niu Bo, Ma Feiyue, Zhou Xiu, et al. Acoustoelectric positioning of partial discharge source based on PSO[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 108-115.
- [42] 刘 齐, 王茂军, 高 强, 等. 基于红外成像技术的电气设备故障检测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 122-126.
Liu Qi, Wang Maojun, Gao Qiang, et al. Fault detection of electrical equipment based on infrared imaging technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 122-126.

吴潇翔(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为输变电设备外绝缘(通信作者)(E-mail: epwuxiaoxiang@mail.scut.edu.cn)。

郝艳捧(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为输变电设备外绝缘、光纤和超声传感技术(E-mail: yphao@scut.edu.cn)。