

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514355

电缆接头局部放电高频柔性传感器技术研究*

张伟超¹, 张鹏宇¹, 王 暄¹, 张 涛²

(1. 哈尔滨理工大学高效能特种电缆技术全国重点实验室 哈尔滨 150080; 2. 青岛汉河电缆股份有限公司 青岛 266000)

摘要: 电缆接头是电力电缆最薄弱的环节, 检测电缆接头局部放电是预防电缆系统故障发展的最有效方法, 但电缆接头结构特殊, 常规局部放电传感器用于电缆接头内部绝缘进行局部放电检测极为困难。基于柔性传感单元提出了适用于电缆接头外屏蔽层和护层狭小空间内布置的局部放电信号传感方法。首先, 利用有限元仿真软件设计并分析柔性传感单元在交联聚乙烯介质中的有效工作频段, 通过对其辐射面进行调整与测试使其工作频段覆盖电缆接头故障时产生的典型局部放电信号, 实现柔性传感单元在弯曲状态下的检测能力不丢失; 其次, 计算局部放电高频电磁辐射信号在电缆接头中狭长多层介质空间的传播特性, 明确柔性传感单元安装位置为电缆接头应力堆附近; 最后, 搭建电缆接头局部放电实验平台对柔性传感单元性能进行分析。仿真和实验表明, 柔性传感单元在交联聚乙烯介质中有效工作频段为 50~640 MHz, 在不影响检测性能的前提下弯曲半径可达 6~10 cm; 局部放电高频电磁辐射信号在电缆接头应力堆附近幅值明显增强; 柔性传感单元可有效检测距电缆接头局部放电点 12~24 cm 范围的复合缺陷; 柔性传感单元在 35 kV 电缆上的实际应用检测性能良好, 能够实现在电缆接头狭小空间内的局部放电测量。

关键词: 电缆接头; 局部放电; 有限元分析; 柔性传感单元; 传播路径

中图分类号: TM866 TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4017

Research on high-frequency flexible sensor technology for partial discharge in cable joints

Zhang Weichao¹, Zhang Pengyu¹, Wang Xuan¹, Zhang Tao²

(1. State Key Laboratory of High-Efficiency Special Cable Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Qingdao Hanhe Cable Co., Ltd., Qingdao 266102, China)

Abstract: Cable joints represent the most vulnerable component in power cable systems. Detecting partial discharge (PD) in cable joints is the most effective method for preventing cable system failures. However, the unique structure of cable joints makes it extremely challenging to apply conventional sensors for PD detection within the insulation of cable joints. Building upon the flexible sensor unit, this paper proposes a PD signal sensing method designed for deployment in the confined spaces between the outer shielding layer and the protective sheath of the joint. Firstly, finite element simulation software was employed to design and analyze the effective operating frequency band of the flexible sensor unit within the cross-linked polyethylene (XLPE) medium. Through adjustments and testing of its radiation pattern, the operational bandwidth was optimized to cover typical partial discharge signals generated during cable joint failures, thereby ensuring that its detection capability is maintained when the sensor is in a bent state. Secondly, the propagation characteristics of high-frequency electromagnetic radiation from PD signals through the elongated multi-layer dielectric space of a cable joint were calculated to determine the optimal installation position for the flexible sensor unit. This analysis confirmed that this position for the flexible sensor unit to be near the stress cone of the cable joint. Finally, an experimental platform for cable joint PD was established to analyze the performance of the flexible sensor unit. Simulation and experimental results demonstrate that the flexible sensor unit operates effectively within a frequency band of 50 to 640 MHz in the XLPE medium, with a bending radius of 6~10 cm without compromising detection performance. The amplitude of high-frequency electromagnetic radiation from PD signals is significantly enhanced near the

收稿日期: 2025-08-06 Received Date: 2025-08-06

* 基金项目: 龙江科技英才春雁支持计划(CYQN24002)项目资助

stress cone of the cable joint. The flexible sensor unit can effectively detect composite defects located 12~24 cm from the PD source within the cable joint. The flexible sensor unit exhibits satisfactory detection performance in practical applications on 35 kV cables. It enables successful detection of PD signals within the confined spaces of cable joints.

Keywords: cable joint; partial discharge; finite element analysis, flexible sensing unit; propagation path

0 引 言

自 2020 年国家提出“碳达峰、碳中和”目标以来,我国大规模开发新能源发电,建设新型电力系统^[1]。高比例的新能源的并网使得新型电力系统对电力装备的高稳定性提出了更高的要求^[2]。高压直流柔性输电技术作为大规模新能源汇集的重要技术手段,在新型电力系统有着重要地位^[3]。高压电缆作为柔性输电技术的关键装备,可实现长距离、大容量、低损耗电力传输^[4]。电缆长距离输电必须经电缆接头连接,接头制作工艺要求高,内部电场分布复杂,使其成为电缆系统的薄弱环节,一直是电缆中的故障高发部件,据不完全统计,电缆接头绝缘故障占比达 70% 以上^[5]。局部放电 (partial discharge, PD) 是评估电缆接头绝缘健康状况的关键指标^[6],通过检测 PD 信号,可以及时发现和预防潜在的故障,从而避免电力供应中断及相关的经济损失^[7]。

随着高频和超高频测量技术的发展,PD 信号检测技术得到了显著提升^[8]。研究者们积极探索将其应用于电缆接头 PD 信号的在线检测^[9]。根据传感器安装位置可将 PD 信号检测方法分为外置式和内置式两种:外置式传感器主要包括电容耦合器^[10]、goubau 天线^[11]、蝶形天线^[12]等,外置式的优点为检测地点灵活、不受内部结构影响等,缺点为在结构紧凑的空间内难以安装、抗干扰能力弱、检测频带较窄等。特别对于电缆接头设备这种金属壳完全包裹的电磁封闭环境,其内部绝缘发生 PD 后,电缆接头外部根本无法获取电磁辐射信号。

内置式检测的优点是安装于被测对象内部,能够有效避免外部环境的干扰,灵敏度高,但针对电缆接头的内置式传感器研究较少,主要是由于电缆接头金属外护套内部的空间狭小、结构紧凑,且绝缘要求较高,常规传感器内置可行性较小。特别是电缆绝缘外表面的导电屏蔽材料,对绝缘内部 PD 的电磁波传播影响也不明确,内置电磁波传感器的位置也需要设计才具备成功检测 PD 的可能。矩形微带天线^[13]、柔性单极子天线^[14]、阿基米德螺旋天线^[15]等传感器具有发展为电缆接头内置式检测手段的潜力。文献[13]提出了矩形微带天线在发生形变时其工作频带会受到较大的影响,此特性限制了其在电缆接头中的应用。文献[14]提出了一种柔性单极子天线,文献[15]提出了一种阿基米德螺旋天线,两种天线均可用于共形检测,但其低频信号检测性能难以

满足电缆接头 PD 信号检测。为实现电缆接头内置式检测,急需一种可以适应狭窄空间的检测方法。

在众多检测方法中,以共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 天线作为内置传感器是一种新型的检测技术,因其结构简单、易于集成和高灵敏度等优点,受到了广泛关注^[16]。本研究旨在通过对普通 CPW 天线进行优化设计以解决前述检测手段在狭窄空间的检测适应性差、尺寸过大、带宽宽度较小以及测量时的共形等问题。从传感器的设计、优化以及调试等方面展开研究:设计一种适应狭窄空间、小尺寸、较宽频带、能够共形检测的柔性传感单元。通过搭建的电缆接头 PD 信号检测实验平台对柔性传感单元进行性能测试。

1 柔性传感单元仿真设计

1.1 共面波导天线理论分析

1) 共面波导天线关键参数设计

通过计算 CPW 天线的有效介电常数 (ϵ_{re}) 和特征阻抗 (Z_0), 可以获取设计所需的关键参数^[17]。

CPW 天线的有效介电常数与特征阻抗由其信号带宽度 (w)、信号带与接地板之间的缝隙 (g)、介质板厚度 (h) 以及介电常数 (ϵ_r) 决定, 多层介电常数的共面波导天线如图 1 所示。

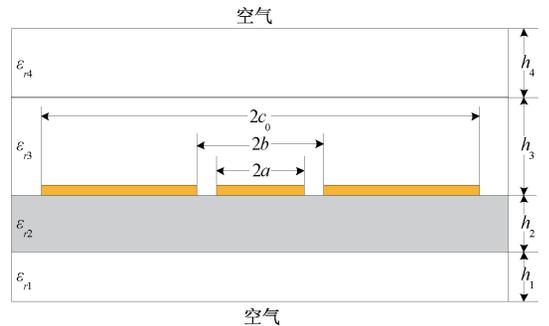


图 1 天线结构

Fig. 1 Antenna structure

其阻抗及工作频带可通过式(1)~(7)得出,即:

$$k_1 = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{1 - b^2/c_0^2}{1 - a^2/c_0^2}} \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{\sinh(\pi a/2h_2)}{\sinh(\pi b/2h_2)} \sqrt{\frac{1 - \sinh^2(\pi b/2h_2)/\sinh^2(\pi c/2h_2)}{1 - \sinh^2(\pi a/2h_2)/\sinh^2(\pi c/2h_2)}} \quad (2)$$

$$k_3 = \frac{\sinh(\pi a/2h_3) \sqrt{1 - \sinh^2(\pi b/2h_3)/\sinh^2(\pi c/2h_3)}}{\sinh(\pi b/2h_3) \sqrt{1 - \sinh^2(\pi a/2h_3)/\sinh^2(\pi c/2h_3)}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{re} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right) \epsilon_{r_1} + \frac{1}{2} \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \epsilon_{r_2} + \frac{1}{2} \frac{K(k_0)}{K'(k_0)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \epsilon_{r_3} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{K(k_0)}{K'(k_0)} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \right) \epsilon_{r_4} \quad (4)$$

式中: $K(k_1)$ 和 $K'(k_1)$ 为第 1 类完全椭圆积分函数及其补函数。

$$C^a = 4\epsilon_0 \frac{K(k_1)}{K'(k_1)}, \quad k_1 = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{1 - b^2/c_0^2}{1 - a^2/c_0^2}} \quad (5)$$

$$Z_0 = \frac{1}{cC^a \sqrt{\epsilon_{re}}} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \quad (6)$$

$$f = \frac{c}{4L\sqrt{\epsilon_n}} \quad (7)$$

式中: L 为天线的长度。

由以上推导可知, CPW 天线的特性阻抗主要由信号线的宽度及信号线与接地面间的缝隙主导。信号线的宽度越宽, 其特性阻抗越低; 缝隙宽度越宽, 其特性阻抗越高。同时, 天线的接地面越宽, 有效介电常数越高, 特性阻抗越低。当接地面的宽度超过一定长度后, 天线的特性阻抗不在随着宽度的变化而变化。综上所述, CPW 天线的有效介电常数由缝隙宽度、信号线宽度、接地面宽度共同决定。但在实际设计过程中, CPW 天线的性能受辐射面形状的影响同样明显^[18], 基于此, 在天线设计过程中, 需要借助有限元仿真软件评估天线性能。

2) 天线的性能参数

天线的性能参数通常由回波损耗(return loss, RL)、天线方向图以及驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR)^[19]描述。回波损耗和驻波比表达式为:

$$RL = S_{11} = -10 \lg | \Gamma |^2 = -20 \lg | \Gamma | \quad (8)$$

$$VSWR = \frac{1 + | \Gamma |}{1 - | \Gamma |} \quad (9)$$

式中: Γ 为反射系数。

回波损耗的值在 0 dB 的到无穷大范围, 回波损耗越大表示匹配越好。0 表示全反射, 无穷大表示完全匹配。由式(8)~(9)可以得到回波损耗是反射系数的倒数换算成分贝表示, 即 $20 \lg(1/|\Gamma|)$ 。电压驻波比定义为传输线上最大电压振幅与最小电压振幅之比。变化范围为 $1 \sim \infty$ 。匹配状态为 1, 全反射为 ∞ 。

采用驻波比作为衡量柔性传感单元的关键指标, 认为柔性传感单元信号的驻波比若低于 2, 则认为该信号是可行的。驻波比是衡量柔性传感单元传输效率和匹配质量的重要参数。

电缆接头不同的缺陷类型通常有着不同的放电频率。在超高频段, 杂质缺陷和刀痕缺陷的信号集中出现在 300~450 MHz 和 500~600 MHz 频率范围, 而刀痕缺陷的频谱信号在 300~450 MHz 频段信号更丰富; 尖端缺陷模型在超高频段信号集中在 400~500 MHz 频段范围^[20]。在高频段, 针尖缺陷放电信号主要集中在 150 MHz 以下; 气隙缺陷放电信号主要集中在 50~100 MHz^[21]。

根据上述分析, 电缆接头的缺陷信号主要集中在 50~600 MHz 的频率范围。基于此结论, 在设计柔性传感单元时, 应确保天线的工作频段能够覆盖该频率范围且接近此范围, 保证其他频率的信号对天线性能影响较小。对柔性传感单元进行仿真设计确保天线在设计频段内能够有效地接收电缆接头 PD 信号。

1.2 柔性传感单元结构设计及优化

1) 柔性基底选择

聚酰亚胺(polyimide, PI)是一种被广泛应用的特种工程材料, 具有良好的介电性能, 介电常数 ϵ_r 为 3.4 左右, 介电损耗 $\tan \delta$ 为 10^{-3} , 介电强度为 100~300 kV/mm^[22]。这些特性使其在较大的温度和频率范围内其性能仍能保持在较高的水平, 并且其良好的共形能力是电缆接头检测的优势。所以本研究选择 PI 作为柔性传感单元的基底。

2) 柔性传感单元基本结构设计

利用有限元全波仿真软件对所提出的柔性传感单元进行建模仿真。如图 2 所示为柔性传感单元结构, 其中, A_0 为接地面, A_1 为导带, A_2 为辐射面, W_0 为基底宽度, L_0 为基底长度, L_1 为接地面 A_0 长度, W_1 为接地面 A_0 宽度, h_0 为导带 A_1 长度, W_3 为导带 A_1 宽度, L_2 、 W_2 分别为椭圆形辐射面 A_2 短轴、长轴, R 为圆形镂空区域半径, g 为导带与接地面之间的宽度, L_{pg} 为辐射面 A_0 与 A_2 之间的距离, h 为基底厚度。

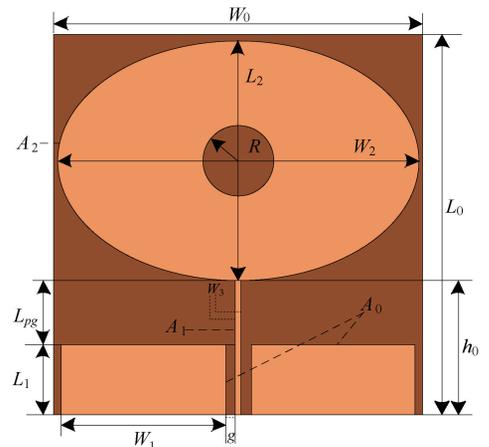


图2 柔性传感单元结构设计

Fig. 2 Structural design of flexible sensing unit

在高频状态下,电磁场会引发趋肤效应现象^[23]。电流主要集中于导体的表面,表明电流密度在导体表面附近的薄层中最大,而随着深入导体内部,电流密度逐渐减小。同时在辐射面开槽有助于改善性能^[24],基于此理论通过对在辐射面 A_2 中心进行镂空处理,去除中间部分一个半径为 R 的圆形辐射区域以改善柔性传感单元阻抗特性。

本研究以交联聚乙烯为介质,研究柔性传感单元内置于交联聚乙烯后的性能变化。仿真过程中将辐射环境的 ϵ_r 及 $\tan\delta$ 分别设置为 2.25 和 0.001。柔性传感单元具体几何参数如表 1 所示,实物图如图 3 所示,本研究所设计的柔性传感单元与相同工作频率下的普通矩形微带贴片天线尺寸(320 mm×377 mm×0.45 mm)相比减小了 84.79%。

表 1 柔性传感单元的几何参数

Table 1 Geometric parameters of flexible sensing unit (mm)

参数	数值	参数	数值
L_0	54.00	W_0	52.0
L_1	10.00	W_1	23.3
L_2	40.00	W_2	50.0
R	10.00	W_3	0.7
h_0	13.00	g	1.3
h	0.45	L_{ps}	3.0

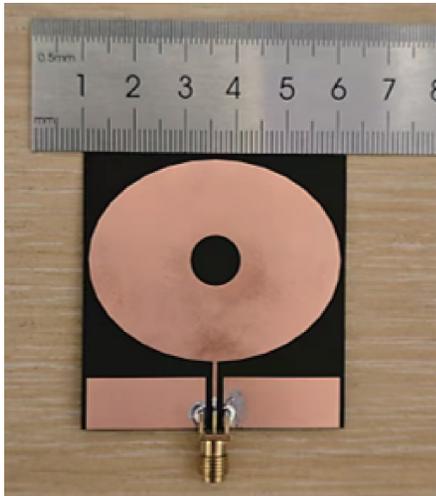


图 3 柔性传感单元实物

Fig. 3 Physical picture of flexible sensing unit

2 柔性传感单元性能参数测试及分析

2.1 基本性能分析

当柔性传感单元内置于电缆接头检测中使用时,其工作环境中的介质由空气转变为聚乙烯介质,根据

式(6)和(7)可知,在聚乙烯环境下,柔性传感单元拥有更高的有效介电常数,因此其工作频率会有所降低。聚乙烯介质边界采用吸收边界,聚乙烯介质大小在设置时至少为最低工作频率的 1/4 波长,为保证仿真的准确性,可将介质体积适量增加,其长宽高分别为 L_4 、 W_4 、 h_4 。激励源采用波端口激励,其长宽分别为 L_5 、 W_5 。具体数据如表 2 所示。

表 2 仿真条件设计参数

Table 2 Design parameters of simulation conditions (mm)

参数	数值
L_4	3 452.00
W_4	1 754.00
h_4	1 700.45
L_5	8.00
W_5	3.60

基于前述数据,在仿真软件中对柔性传感单元在聚乙烯介质中的 VSWR 进行分析,仿真结果如图 4 所示。工作于聚乙烯介质中的柔性传感单元工作频率范围为 0.05~0.64 GHz,其工作频段能够有效覆盖电缆接头缺陷产生的 PD 信号。

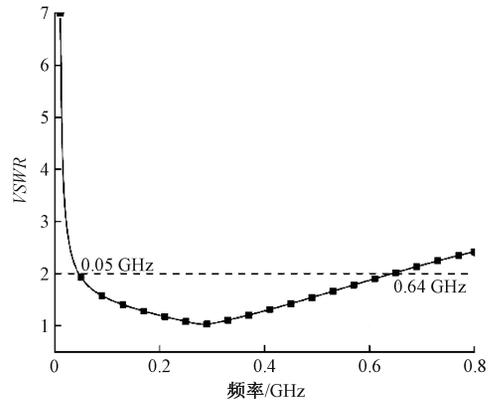


图 4 柔性传感单元在聚乙烯介质中的 VSWR

Fig. 4 VSWR of flexible sensing unit in polyethylene medium

图 5 为柔性传感单元在 0.34 GHz 下的聚乙烯介质 E 面与 H 面的方向图。根据图 5 所示数据,可以得出的结论为:在 E 面方向上,柔性传感单元在聚乙烯介质中的最大增益为 -46.05 dB。对于 H 面方向,柔性传感单元在聚乙烯介质中的增益为 -18 dB 左右。通过对 E 面的方向图分析可知,其 E 面呈现“8”字形结构,符合基本 E 面分布。通过方向图可知,柔性传感单元方向性明显,在柔性传感单元正面接收信号效果最好,符合电缆接头放电检测的要求。

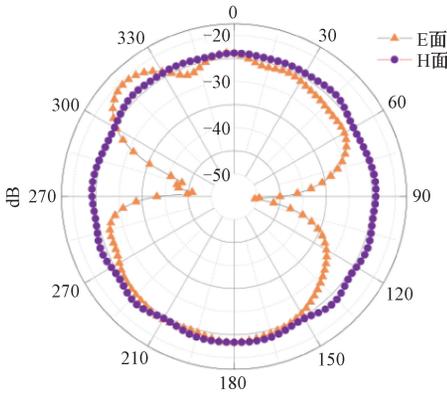


图5 在0.34 GHz下聚乙烯介质中柔性传感单元的E面与H面方向图

Fig. 5 E-plane and H-plane directional patterns of flexible sensing unit in polyethylene medium at 0.34 GHz

2.2 弯曲状态下柔性传感单元性能分析

柔性传感单元在安装于电缆接头设备时需贴合被测对象形状,会导致其产生弧形形变。针对这一实际应用场景,本研究开展了柔性传感单元弯曲后性能的仿真分析,以评估形变对其性能的具体影响。仿真中柔性传感单元的弯曲形状如图6所示。

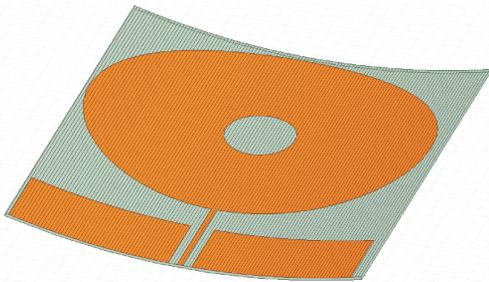


图6 柔性传感单元弯曲状态

Fig. 6 Diagram of bending states of flexible sensing unit

在仿真软件中,本研究模拟了柔性传感单元在聚乙烯介质中的弯曲性能,考虑实际装配的因素,因此主要研究其沿y轴方向的弯曲情况。其中弯曲半径分别设定为6和10 cm。柔性传感单元在此仿真条件下性能变化如图7所示。

由图7可知,柔性传感单元在沿y轴弯曲后,与未弯曲状态相比,弯曲后柔性传感单元的带宽在高频段略有上升,在低频段,柔性传感单元与未弯曲状态基本一致;在高频段,上升幅度为50 MHz左右。由此可知柔性传感单元在弯曲处理后仍然能够保持较好的测量性能。

图8为柔性传感单元在0.34 GHz下弯曲半径为6和10 cm时的方向图。根据图8的分析结果,可以观察到柔性传感单元在E面方向图呈现出典型的“8”字形模式,显示出良好的指向性。在弯折半径为6 cm时,其

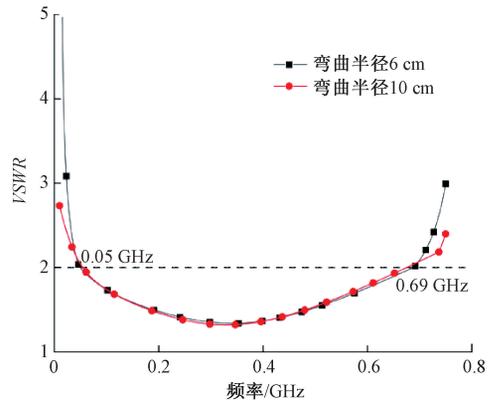


图7 柔性传感单元沿y轴不同半径弯曲VSWR曲线
Fig. 7 VSWR curve of flexible sensing unit bent along the y-axis with different rad

E面最大增益为-45.24 dB,在弯折半径为10 cm时,其E面最大增益为-43.90 dB。在H面的方向图则接近理想的圆形,两者增益均为-18 dB左右。这表明了柔性传感单元在弯折后E面仍然具有指向性的辐射特性,H面上具有均匀的辐射特性。

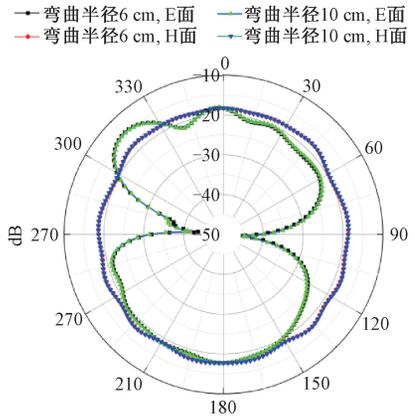


图8 0.34 GHz下不同弯曲半径柔性传感单元方向图
Fig. 8 Direction diagram of different bent half flexible sensing unit at 0.34 GHz

对比弯曲半径为6和10 cm的柔性传感单元性能,发现与未弯曲状态相比,其指向性与增益并未发生明显改变,这一结果说明了柔性传感单元在弯曲状态下仍然拥有良好的检测效果。

本研究设计的柔性传感单元与电容耦合式传感器以及外置式天线传感器性能对比如表3所示。通过对比表格可知,本研究设计的柔性传感单元在检测带宽方面仍然小于外置式天线传感器,但本研究的核心创新和价值在于在保证足够检测灵敏度的前提下,实现了传感器尺寸的突破性减小和电缆接头狭小空间下安装便利性的极大提升。

表 3 柔性传感单元其他传感器性能对比
Table 3 Design parameters of simulation conditions

对比维度	柔性传感单元	电容耦合式传感器	外置式天线传感器
尺寸	显著缩小	大,需额外辅助装置	结构复杂
灵敏度	高	高,但依赖耦合电容	低
频带响应	0.05~0.64 GHz(特定频带)	窄频带,谐振式	超宽频(数百 MHz~数 GHz)
安装适应性	适应于狭窄空间	需断开接地线,安装复杂	需要额外安装空间
成本与复杂度	低	高	中等

3 柔性传感单元检测电缆接头放电实验

3.1 电缆接头 PD 信号传输仿真模型

本研究依据实际电缆接头的结构特点,构建了接头的仿真模型^[25]。该模型从内到外依次包含以下主要模块:导体连接模块、主绝缘层模块、半导体屏蔽层模块、应力控制层模块以及金属屏蔽层模块。接头结构的示意图如图 9 所示。其中,1 为金属屏蔽层,2 为外半导体层,3 为应力堆,4 为硅橡胶绝缘,5 为导电硅胶,6 为导线及导体压接管,7 为导线防水层,8 为交联聚乙烯绝缘,9 为内半导体层。

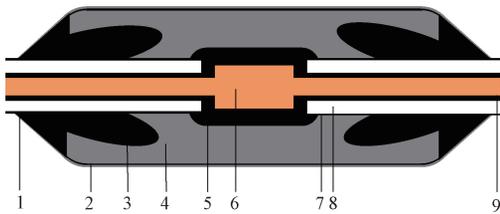


图 9 电缆接头示意图
Fig. 9 Diagram of cable joint

在上述实际电缆接头的基础上,本研究进行了仿真模型的设计,并借助有限元仿真软件建立了相应的仿真模型,如图 10 所示。在仿真模型中,通过在 A 点施加高斯函数脉冲激励源来模拟放电信号。为了检测信号的传播特性,在 A 点水平方向至应力堆 B 点设置路径检测工具,位置为金属屏蔽层与外半导体层。

激励源的具体函数形式如图 11 所示。

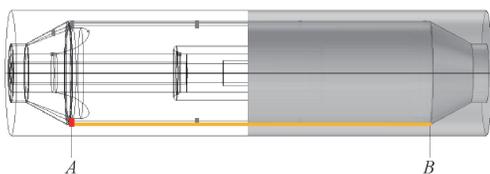


图 10 电缆接头仿真模型
Fig. 10 Simulation model of cable joint

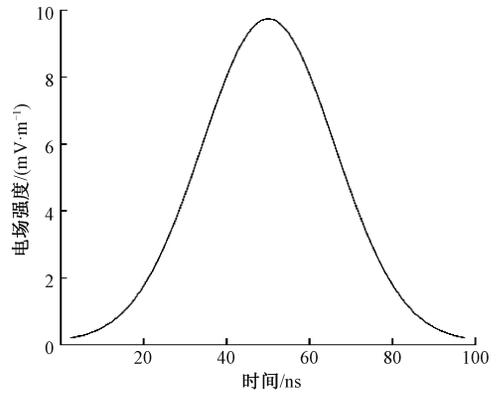


图 11 高斯脉冲函数
Fig. 11 Gaussian pulse function

检测结果如图 12 所示。根据仿真模型的计算结果,当施加高斯脉冲激励后,在激励源信号传播过程中,电场强度呈现出逐渐减小的趋势。然而,在 30 ns 后,应力堆附近的电场强度重新升高。这一现象表明,信号在应力堆和金属屏蔽层之间发生了多次折反射,导致高斯脉冲信号的增强。

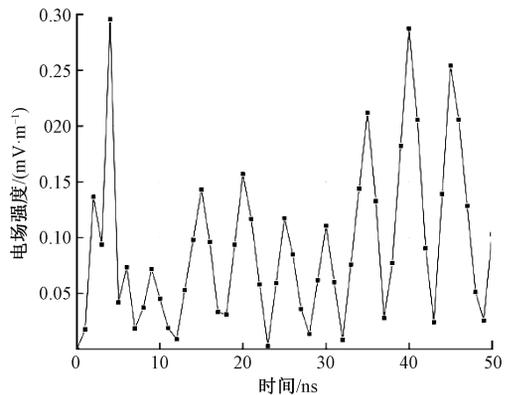


图 12 检测结果
Fig. 12 Detection results

综上所述,在局部放电发生时,电缆接头的电磁信号沿径向传播并且幅值呈现出先减小后增大的趋势。由仿

真分析可知,电磁信号在沿着径向传播后的应力堆和金属屏蔽层发生了折反射使得信号幅值得到了增强。这一现象为检测柔性传感单元的安装位置提供了重要的参考依据,可以提高柔性传感单元对局部放电信号检测灵敏度和准确性。

根据仿真分析可知,电缆接头 PD 信号能够在内半导电层及金属屏蔽层之间的复杂介质结构中传播,并且在电缆接头应力堆附近增强,基于上述分析,柔性传感单元可安置于应力堆附近的金属屏蔽层与外半导电层狭小空隙之间。

3.2 电缆接头 PD 信号传输实验

根据 3.1 节所述的仿真设计验证实验,电缆接头附件的放电实验如图 13 所示。在电缆接头应力堆处设置压电陶瓷脉冲发生器模拟局部放电,保证实验过程中局部放电信号的一致性。将柔性传感单元设置于电缆接头轴线上中部与对侧应力堆附近,验证电缆接头 PD 信号传输特点。

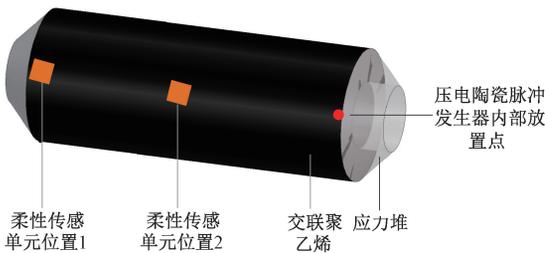


图 13 脉冲放电柔性传感单元检测

Fig. 13 Experimental diagram of pulse discharge flexible sensing unit detection

检测脉冲信号实验结果对比情况如图 14 所示。由实验结果可知,柔性传感单元检测电缆接头 PD 信号时,位置 2 处的电压幅值明显低于位置 1 处的电压幅值。波形在开始时基本相同,在峰值之前由于折反射发生了部分畸变,在峰值及之后波形基本相同。检测结果与 3.1 节仿真设计中电缆接头 PD 信号传播特性的仿真研究结果一致。

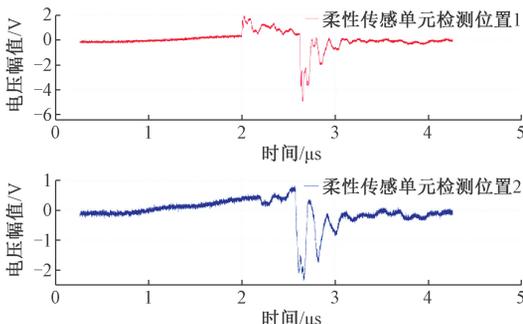


图 14 脉冲放电柔性传感单元检测结果

Fig. 14 Pulse discharge flexible sensing unit detection results

3.3 电缆接头针-板模型放电实验

为验证本研究设计的柔性传感单元对电缆接头内部 PD 信号检测的灵敏性及准确性,在电缆接头内部设计针-板模型模拟内部缺陷产生的 PD 信号。实验系统如图 15 所示,由工频高压发生装置、针-板模型及信号采集单元组成。针-板模型中的针电极插入电缆接头 3 cm,电缆接头下方敷设铜箔并接地。将柔性传感单元轴向布置于放电点 6 cm 处并通过射频同轴线传输检测信号。信号采集设备为泰克高性能数字示波器 (Tektronix * TDS3052C,采样频率为 5 GHz,双通道)。

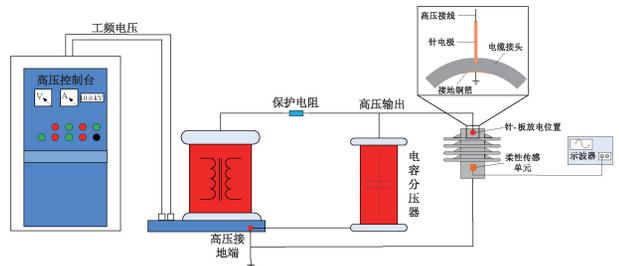


图 15 针-板模型放电实验平台

Fig. 15 Needle-board model discharge experimental platform

实验前针-板之间无气隙、环境温度、湿度等均保持恒定。实验时通过高压控制台对工频电压进行线性升压,升压后的电压通过电容分压器施加于高压针脚上,针-板模型的接地端与高压端共地,施加超出阈值的电压后 (4 kV),针-板模型会产生放电现象,记录柔性传感单元检测数据,在此电压等级下重复 5 次实验。提高电压至下一电压等级后重复上述步骤。放电信号峰值统计如图 16 所示。

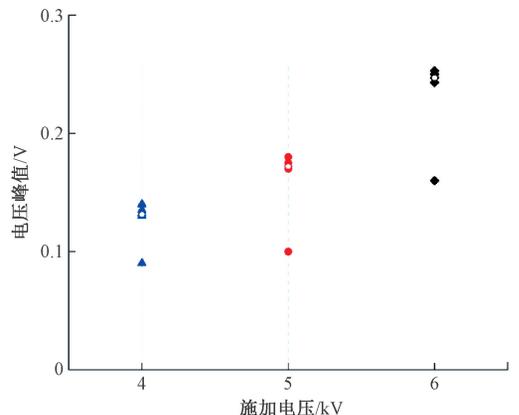


图 16 放电信号电压幅值统计

Fig. 16 Statistics of discharge signal voltage amplitude

对 4 kV 电压下的 PD 信号 (0.09、0.13、0.132、0.135 和 0.14) 峰值进行分析,数据点 0.09 明显偏离其他 4 个数据的集中分布。为客观识别异常值,采用基于中位数

和绝对偏差中位数 (median absolute deviation, MAD) 的稳健统计方法。分析表明, 数据点 0.09 与中位数 (0.132) 的绝对偏差为 0.042, 是 MAD 值 (0.003) 的 14 倍, 远高于其他数据点的偏差水平 (最大为 MAD 的 2.67 倍)。该点具有显著的统计偏离, 在后续的数据处理中不进行分析, 剩余 4 个数据表现出良好的一致性, 确保了结果的可靠性。其他电压等级下的 PD 信号峰值采用同样的误差分析方式。

在误差分析后选取典型值, 不同电压等级下针-板 PD 信号时域、频域图谱如图 17 所示。

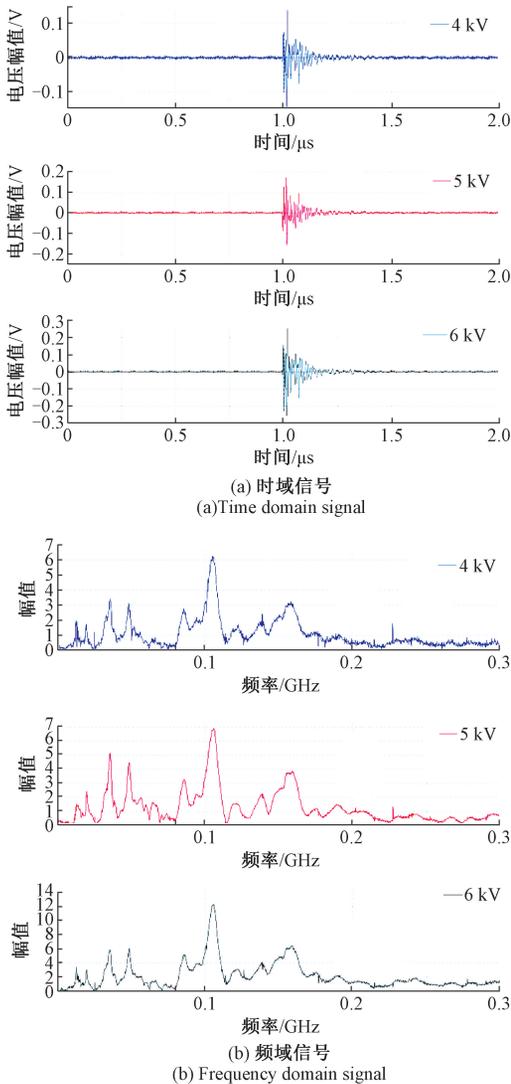


图 17 不同电压等级下针-板放电信号

Fig. 17 Discharge signals of needle-board at different voltage levels

在 4~6 kV 工频电压下, 柔性传感单元所捕获的电压信号时域波形特征保持高度一致性, 其脉冲峰值随外加电压呈增长趋势。该实验数据证实柔性传感单元在不

同电压下具有稳定的 PD 信号响应灵敏度, 对时域电压信号进行傅里叶变换分析可知, 不同电压等级下的 PD 信号频域峰值均出现在 100 MHz 附近, 这与 1.1 节中所述针-板放电检测结果具有良好的一致性, 说明了柔性传感单元检测 PD 信号的准确性。

3.4 针-板-气隙模型放电实验

1) 最低放电电压下针-板-气隙模型放电实验

本研究采取控制变量法对柔性传感单元检测性能进行评估。通过控制高压探针与接地板间距离出 1 mm 距离设置针-板-气隙模型, 以评估柔性传感单元对复合放电模型检测的准确性。针-板-气隙模型如图 18 所示。柔性传感单元沿电缆轴向布置与距放电点 6 cm 处, 在最低放电电压 (4 kV), 其他条件不变的情况下进行实验。

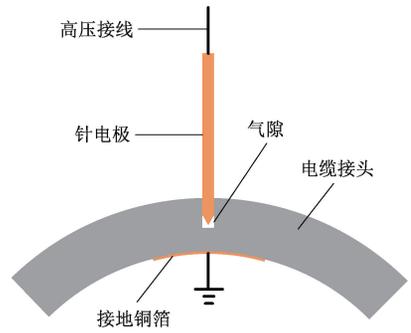
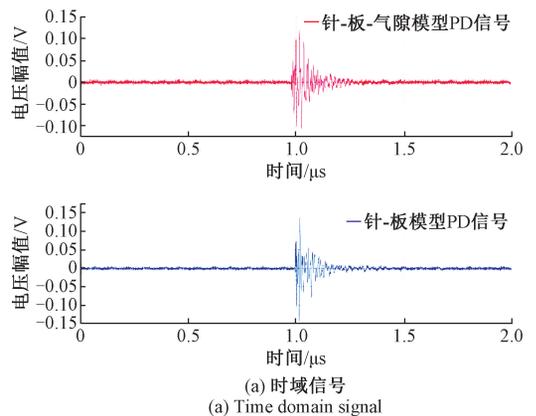


图 18 针-板-气隙模型

Fig. 18 Needle-plate-air gap model

对针-板-气隙模型进行放电实验, 实验步骤及误差分析与 3.3 节中一致。实验结果如图 19 所示。在针-板和针-板-气隙两种放电模型下, 柔性传感单元对时域电压信号有着基本相同的检测灵敏度。对时域电压信号进行傅里叶变换分析可知, 柔性传感单元对不同的放电类型均有着有效的检测, 针-板放电模型峰值在 100 MHz, 针-板-气隙放电模型峰值分布在 50 MHz 及 150 MHz 附近, 这表明柔性传感单元在最低放电电压下对复合缺陷下仍然能够进行有效的检测。



(a) 时域信号
(a) Time domain signal

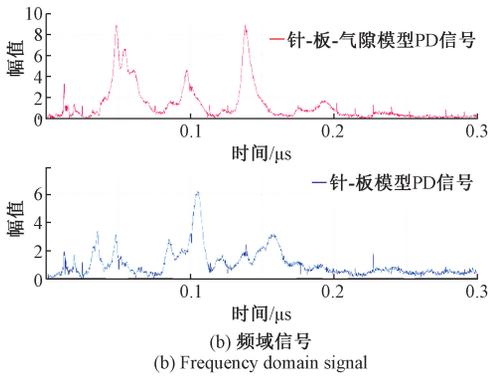


图 19 不同模型下的放电信号

Fig. 19 Discharge signals under different models

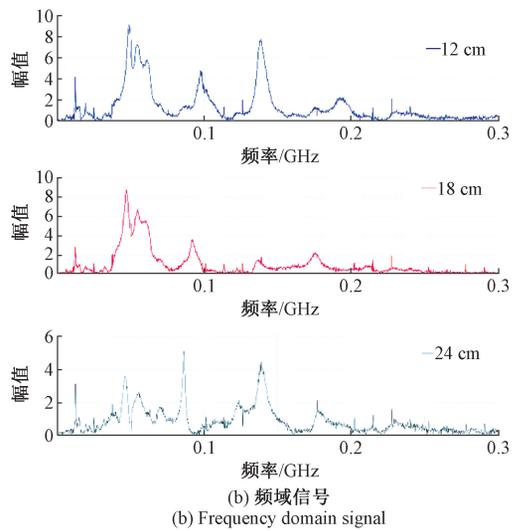


图 20 柔性传感单元在针-板-气隙复合放电模型下不同距离检测的 PD 信号

Fig. 20 PD signals detected at different distances by the flexible sensing unit under the needle-plate air gap composite discharge model

2) 最低放电电压下、不同距离针-板-气隙模型放电实验

将柔性传感单元沿电缆轴向布置,与放电点间隔距离分别为 12、18、24 cm,其他条件不变的情况下进行实验,检测结果如图 20 所示。

通过对图 20 的分析可知,柔性传感单元在不同距离下对针-板-气隙模型仍具有良好的检测效果。在时域电压信号中,随着距离的增加,其信号峰值逐渐减小。进一步对时域电压信号进行傅里叶变换分析发现,在 50~100 MHz 范围出现两个信号峰值,而在 150 MHz 附近出现第 3 个信号峰值。这一结果与 1.1 节中所描述的不同缺陷信号峰值分布相一致,从而验证了柔性传感单元在不同距离下检测的灵敏性和准确性。

3.5 柔性传感单元检测电缆接头 PD 信号实验

为了验证本研究设计的柔性传感单元在 35 kV 电缆接头 PD 信号检测中的性能,本研究搭建了 35 kV 电缆接头 PD 实验平台,如图 21 所示。

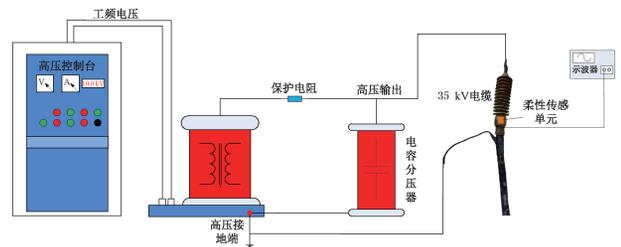
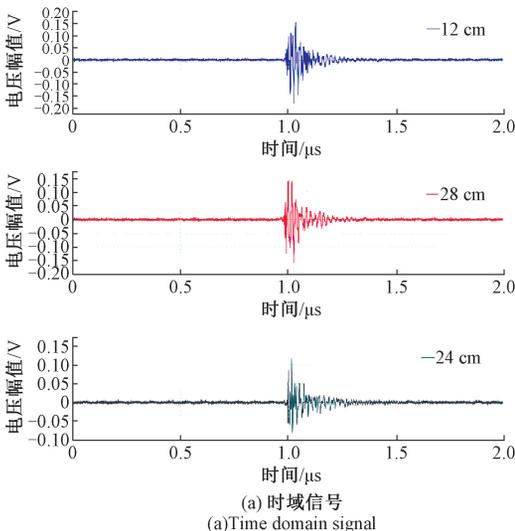


图 21 电缆接头缺陷检测平台

Fig. 21 Cable joint defect detection platform

该实验平台使用一条长度为 2 m 的老旧电缆,其附件内部因长时间使用存在多种缺陷,包括杂质缺、刀痕缺陷、尖端缺陷、气隙缺陷。通过在该实验平台上进行测试,可以全面评估柔性传感单元在不同缺陷情况下的 PD 信号检测能力,进而验证其在实际 35 kV 电缆接头 PD 信号检测中的应用潜力。柔性传感单元被共形放置于电缆接头附件应力堆附近的外屏蔽及护层空间(弯曲半径为 6 cm),通过射频同轴线将电压信号传输至示波器,用于检测放电情况。

在实验过程中,通过高压控制台对工频电压进行线性升压至 15 kV,在施加电压一段时间后,等待电缆内部 PD 现象的产生。由于电缆接头内部缺陷的多样性,一次放电过程中会产生多种原因的 PD 信号。使用柔性传感单元对内部存在不同缺陷的电缆进行 PD 信号检测其结果如图 22 所示。



(a) 时域信号 (a) Time domain signal

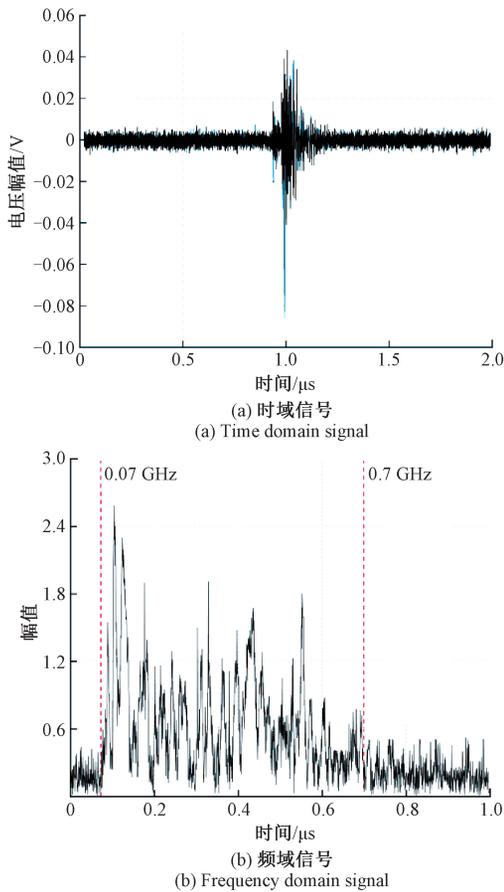


图 22 电缆内置缺陷检测分析

Fig. 22 Analysis of cable built in defect detection

与针-板放电和针-板-气隙 PD 信号相比,电缆接头 PD 信号更为复杂。对时域信号进行傅里叶变换并分析可知,较高的频率幅值出现在 70~700 MHz 范围,与 1.1 节中所述的缺陷频率分布一致。这表明,柔性传感单元与电缆接头共形的检测状态下,其可对多原因 PD 信号进行有效检测。

4 结 论

针对现有电缆接头 PD 信号检测传感器的不足,本研究引入 PI 柔性材料,设计了一种针对电缆接头内部狭小空间 PD 信号检测的柔性传感单元。通过有限元仿真软件对柔性传感单元的工作频带进行仿真分析,研究了该柔性传感单元在不同状态下的性能表现。利用搭建的电缆接头 PD 实验平台对柔性传感单元的 PD 信号检测性能进行了实测,得出的结论为:

1) 采用 PI 柔性材料设计了尺寸 54 mm×52 mm×0.45 mm,弯曲半径 6~10 cm 柔性传感单元用于电缆接头附件 PD 信号检测。仿真及实验表明,柔性传感单

元工作介质为电缆接头绝缘材料时工作频段为 50~640 MHz,能够有效覆盖电缆接头 PD 信号的特高频频段。

2) 通过仿真及实验,分析了高频脉冲电流信号在电缆接头中的传播路径。结果显示,高频信号主要沿圆柱形电缆接头半导体层传播并在传播过程中产生折反射,在应力堆与半导体层连接处折反射现象明显增强,此时高频信号可穿透半导体层,这为柔性传感单元检测位置提供了参考。

3) 利用搭建的针-板、针-板-气隙实验平台对柔性传感单元的 PD 信号检测性能进行了测试。实验结果表明,该柔性传感单元可对 4 kV 最低放电电压下的针-板 PD 信号灵敏检测,升高至 6 kV 放电电压后对针-板 PD 信号仍能不失真的检测。在 4 kV 最低放电电压下柔性传感单元可在 12~24 cm 范围对针-板-气隙 PD 信号进行准确检测。

4) 利用 35 kV 内置缺陷电缆实验平台对柔性传感单元进行实验测试,将其设置于电缆接头应力堆附近外屏蔽及护层狭小空间且在共形条件下,柔性传感单元能够准确检测电缆接头中不同类型的 PD 信号,具有较高的灵敏度和准确性。

本研究设计的柔性传感单元在弯曲状态和在电缆接头内部狭小空间内均表现出良好的 PD 信号检测性能,为电缆接头 PD 信号检测提供了一种新的技术方案。

参考文献

- [1] TAN X G, ZHANG G M. Research on surface defect detection technology of wind turbine blade based on UAV image[J]. Instrumentation, 2022,9(1):41-48.
- [2] ZHANG G M, TAN X G. Several factors affecting the inspection of wind turbines by UAV [J]. Instrumentation, 2022,9(2):47-55.
- [3] 邹强,姜崇学,徐莹,等. 特高压柔性直流双阀组功率自循环策略[J]. 高电压技术,2025,51(2):530-537.
- ZOU Q, JIANG CH X, XU Y, et al. Power self-circulation strategy for ultrahigh voltage flexible DC dual valve group [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2):530-537.
- [4] 李忠磊,吴优,郑重,等. 高压直流海缆 XLPE 绝缘空间电荷与电场分布特性研究进展及展望[J]. 高电压技术,2024,50(7):3128-3144.
- LI ZH L, WU Y, ZHENG ZH, et al. Advances and prospects of space charge and electric field distribution characterization of XLPE insulation for HVDC submarine

- cables [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(7): 3128-3144.
- [5] BERGELIN P, JEROENSE M, QUIST T, et al. 640 kV extruded HVDC cable system[R]. Greater Copenhagen, Denmark; Brøndby, 2017:1-5.
- [6] 黄云志, 王蕾, 韩亮. 微带天线设计及在局部放电检测中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(8): 95-102.
- HUANG Y ZH, WANG L, HAN L. Design of microstrip antenna and its application in partial discharge detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(8): 95-102.
- [7] 陈研, 倪松, 马天宇, 等. 在役高压电缆缓冲层缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 82-90.
- CHEN Y, NI S, MA T Y, et al. Detection of buffer layer defects of in-service high-voltage cables [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 82-90.
- [8] 闫孝姮, 颜志鹏, 陈伟华, 等. 矿用井下电缆故障感应电场-磁耦合谐振综合检测方法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(2): 147-159.
- YAN X H, YAN ZH P, CHEN W H, et al. Research on comprehensive detection method of induced electromagnetic coupling resonance for fault of mining underground cable [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(2): 147-159.
- [9] 李天辉, 荣命哲, 王小华, 等. GIS 内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(18): 5483-5493, 5548.
- LI T H, RONG M ZH, WANG X H, et al. Design, optimization and experiment study of internal UHF sensor for partial discharge detection in GIS[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(18): 5483-5493, 5548.
- [10] WANG W, LIU CH, WANG Z, et al. Application of capacitor sensor in PD detection at the three-phase cross-bonding link-system of XLPE cable [J]. 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2010, 1-3.
- [11] 朱超杰, 王友臣, 朱琪, 等. 新型变压器局放监测特高频传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(4): 749-755.
- ZHU CH J, WANG Y CH, ZHU Q, et al. Study on new type of UHF sensor for partial discharge detection in transformer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 749-755.
- [12] 汪飒, 石倩, 刘焯, 等. 检测高压电缆附件局部放电用超高频蝶形天线的研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(1): 60-64.
- WANG F, SHI Q, LIU Y, et al. Study of the UHF bowtie antenna used for partial discharge in HV cable accessories [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(1): 60-64.
- [13] 王贤, 高尚, 杨尚可, 等. 基于开口谐振环的小型化无线无源应变传感器阵列设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(5): 40-50.
- WANG X, GAO SH, YANG SH K, et al. Design of miniaturized wireless passive strain sensor array based on split ring resonator [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(5): 40-50.
- [14] 张国治, 陈康, 田晗绿, 等. 超小型内置柔性宽频带 UHF 单极子天线传感技术[J]. *高电压技术*, 2023, 49(4): 1475-1485.
- ZHANG G ZH, CHEN K, TIAN H L, et al. Sensing technology for ultra-small built-in flexible wideband UHF monopole antenna [J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1475-1485.
- [15] 张国治, 韩景琦, 刘健彝, 等. GIS 局部放电检测天线本体和巴伦共面柔性小型化特高频天线传感器研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(4): 1064-1075.
- ZHANG G ZH, HAN J Q, LIU J B, et al. Research on GIS PD detection antenna body and balun coplanar flexible miniaturized ultra-high frequency antenna [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(4): 1064-1075.
- [16] 刘伟娜, 杨新伟. 共面波导馈电的电小缝隙天线的设计[J]. *电子器件*, 2019, 42(2): 300-303.
- LIU W N, YANG X W. Design of electrically small slot antenna fed by CPW [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2019, 42(2): 300-303.
- [17] 张范然, 杨福慧, 李运胜, 等. 基于 5G 与 WiFi 6E 应用的三频 MIMO 天线设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2025, 39(4): 114-121.
- ZHANG F R, YANG F H, LI Y SH, et al. Design of tri-band MIMO antenna based on 5G and WiFi 6E applications [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2025, 39(4): 114-121.
- [18] WANG B B, HUANG Y ZH. Design and application

study of flexible wearable microstrip antenna sensor[C]. 2021 36th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, 2021:821-825.

- [19] CUI ZH, PARK S, CHOO H, et al. Wideband UHF antenna for partial discharge detection [J]. Applied Sciences, 2020,10(5):1698.
- [20] 董一夫. 110 kV XLPE 电缆附件局部放电超高频检测及传输特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- DONG Y F. Partial discharge detection using ultra high frequency in 110 kV XLPE cable accessories and signal propagation properties[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [21] 葛振东. 高压 XLPE 电缆中间接头局部放电传感器的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2014.
- GE Z D. Study on sensors for partial discharge in XLPE cable joints [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2014.
- [22] BELOV D A, STEFANOVICH S Y, YABLOKOVA M Y. Dielectric relaxation in a thermosetting polyimide modified with a thermoplastic polyimide [J]. Polymer Science Series A, Chemistry Physics, 2011, 53(10): 963-967.
- [23] JARUMAN S, SAMAN N M, XIANG H C, et al. Ultrahigh frequency partial discharge sensors based on various microstrip patch antenna designs[C]. 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems, 2021:530-535.
- [24] DU B X, ZHAO Y Q, KONG X X, et al. A novel UHF antenna for partial discharge detection based on fractal theory[C]. 2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics, 2022:248-252.
- [25] 邓稼屹, 王星华, 聂一雄. 10 kV XLPE 电缆中间接头复合缺陷电场分布仿真研究 [J]. 电线电缆, 2023(5):47-53.
- DENG J Y, WANG X H, NIE Y X. Simulation research on electric field distribution of 10 kV XLPE cable

intermediate joint defect[J]. Wire & Cable, 2023(5): 47-53.

作者简介



张伟超, 2006 年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 2010 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 2015 年于哈尔滨理工大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 主要研究方向为电力设备绝缘检测、智能电力装备制造。

E-mail: weichaozhang@163.com

Zhang Weichao received his B. Sc., M. Sc., and Ph. D. degrees all from Harbin University of Science and Technology in 2006, 2010, and 2015, respectively. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include insulation testing of power equipment, and intelligent power equipment manufacturing.



王暄(通信作者), 1984 年于黑龙江大学获得学士学位, 1988 年于哈尔滨电工学院获得硕士学位, 1999 年于西安交通大学获得博士学位, 现为哈尔滨理工大学教授, 主要研究方向为功能材料与器件。

E-mail: wangxuan@hrbust.edu.cn

Wang Xuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Heilongjiang University in 1984, M. Sc. degree from Harbin Institute of Electrical Engineering in 1988, and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1999. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interest includes functional materials and devices.



张涛, 2016 年于哈尔滨理工大学获得硕士学位, 现为青岛汉缆股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为超高压电缆系统制作。

E-mail: qdhlzt@126.com

Zhang Tao received his M. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2016. He is currently a senior engineer at Qingdao Han Cable Co., Ltd. His main research interest is the fabrication of ultra-high voltage cable systems.