

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416111

高压电缆局部放电检测及识别系统研究*

刘秀婷^{1,2} 李 焯^{1,2} 高 峰^{1,2} 马味敏¹

(1. 无锡学院 无锡 214105; 2. 东北大学无锡研究院 无锡 214153)

摘要: 为了提高电气设备安全性,保证电力系统稳定运行,有必要对高压电缆局部放电进行有效检测与识别。本研究开发一套基于异源传感器数据融合的高压电缆局部放电检测与识别系统。该系统利用电场传感器检测电缆电场分布情况,发现电缆接头绝缘隐患区域,利用压力波传感器检测电缆隐患区域是否出现局部放电及其程度,利用改进的自适应阈值离散小波变换进行信号去噪处理,利用改进的格拉姆角场特征变换增强数据分类特征,利用高效信道注意力机制改进的残差卷积神经网络进行局部放电模式识别。本研究以电缆尖刺放电、气隙放电及沿面放电为对象开展测试,结果发现该系统能准确检测电缆局部放电特性,能够有效识别高压电缆缺陷的放电模式,实验室的局部放电检测率达100%,放电模式识别率达96.0%,且在工程应用环境表现优异,这对电缆使用安全及电网运行稳定具有重要意义。

关键词: 高压电缆;局部放电;特性检测;模式识别;数据融合

中图分类号: TM247;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on partial discharge detection and identification system for high voltage cables

Liu Xiuting^{1,2} Li Ye^{1,2} Gao Feng^{1,2} Ma Weimin¹

(1. Wuxi University, Wuxi 214105, China; 2. Wuxi Research Institute of Northeastern University, Wuxi 214153, China)

Abstract: To improve the safety of electrical equipment and ensure the stable operation of the power system, it was necessary to effectively detect and identify partial discharges in high-voltage cables. This study develops a high-voltage cable partial discharge detection and recognition system based on the heterogeneous sensor data fusion. In this system, the distribution of cable electric fields were detected by using the electric field sensors, and identified insulation hazards in cable joints, the occurrence and degree of partial discharge in hazard areas were detected by using the pressure wave sensors, the improved adaptive threshold discrete wavelet transform was employed for signal denoising, the data classification features was enhanced by using the improved Gram angle field feature transform to, and the partial discharge pattern recognition was realized by using the residual convolutional neural network with improvement of the efficient channel attention. The sharp discharge, internal discharge, and surface discharge were selected as the objective to conduct experimental test, the results shows that the system can accurately detect the partial discharge characteristics of cables and effectively identify the discharge mode of high-voltage cable defects. The partial discharge detection rate in the laboratory reached 100%, and the discharge mode recognition rate reached 96.0%. It also performed well in engineering application environments, which is of great significance for the safety of cable use and the stability of power grid operation.

Keywords: high voltage cable; partial discharge; characteristic detection; pattern recognition; data fusion

0 引 言

电力电缆是用于传输和分配电能的主要方式,还是基础的电力设施,常被用于发电厂、变电站以及各类大型工厂

的电力引入和引出线。随着城市电网迅速发展,电力电缆线路迎来升级改造。电力电缆的优势在于输送容量大、输送的距离远,成为配电网系统中重要组成部分之一。电力电缆的使用率高,但由于其隐蔽性,发生故障的几率也较

收稿日期:2024-05-25

* 基金项目:无锡市“太湖之光”科技攻关(基础研究)项目(K20231019)项目资助

高。文献[1-2]提出,电缆在加工制造过程中会不可避免地引入各种杂质,如气泡或接头毛刺等,杂质的其介电常数较低,当外部施加电压时,容易发生局部放电现象;文献[3-4]提出,不规范的运输方式(如高空抛掷)及安装方式会导致电缆绝缘损伤,在使用过程中容易发生局部放电现象;同时,由于电缆常采用管道或者沟道方式敷设于地下,长期受到局部过大的机械应力会导致其绝缘介质内部出现裂缝,周围土壤、水分等会诱发绝缘介质内部产生水树枝,长期引起局部放电现象。高压电缆局部放电具有非常大的危害,会导致电缆绝缘材料的热分解、氧化和击穿等,从而降低电缆的绝缘性能,甚至导致电缆短路、火灾等事故;还会引起电力系统中的电压和电流失真,增加电力系统的能量损耗,降低系统使用效率,甚至导致电力系统的崩溃;此外,局部放电产生的电弧和电晕会产生电磁干扰,直接影响周围的电力设备和通信设备,降低供电质量和电能传输稳定性;同时,局部放电产生的高能量电弧会产生臭氧和一氧化碳等有害气体,对大气环境造成污染。因此,为提高电气设备安全性,保证电力系统稳定运行,需要有效监测电缆局部放电现象,并根据放电特性识别高压电缆缺陷。

文献[5]提出,高压电缆局部放电检测有电气测量法和非电气测量法两大类。电气测量法有电磁耦合法、电感耦合法、高频电流法、方向耦合法以及超高频法等。电磁耦合法使用罗哥夫斯基线圈感应测量流过接地线的放电脉冲,具备明显的高频性、较强的抗干扰能力和较小的耦合损耗,但信号常包含外界电磁干扰,且难以消除,因此准确度不高。电容耦合法使用金属箔作为电容传感器测量局部放电信号,需安装在电缆外半导电层,具有灵敏度高的优点,但测量的频带较低且安装不便。电感耦合法是将电感线圈绕接至电缆外部用以检测局部放电信号的一种方法,该方法的原理是通过线圈耦合测量局部放电信号向四周辐射的能量,但是电缆外屏蔽层与电缆型带状互感器的互感较小,灵敏度较低。文献[6]指出,高频电流法旨在通过分析局部放电产生的脉冲电流信号判断局部放电现象,具体包括窄带电流法和宽带电流法两种,窄带电流法围绕特定窄带频率范围进行放电特性分析,能有效降低噪声信号对测量结果的影响;宽带电流法在收集局部放电信号方面表现更为全面,从而大幅提升测量的精确度。但是,电流法的测试结果易受到环境电磁干扰,同时需要注意泄漏电流可能导致测试结果偏差。方向耦合法具有较宽的测量频带,较高的检测灵敏度和很好的抗干扰能力,但是要将传感器植入电缆绝缘上,破坏电缆的金属密封防水,实际应用比较少。超高频法利用超宽频带天线测量局部放电向外辐射的超高频电磁波信号,测量频率范围宽且极高能更为全面地反映局部放电信号的各项特征,但是高频电磁波衰减速度较快,不适用于长距离检测。综上所述,采用电气测量法检测电缆局部放电容易收到电缆自身及外部工作环境因素的干扰,性能受限明显。

非电气测量法的基本原理是通过测量电缆缺陷带来的其他物理现象来采集局部放电信号,具有能够排除电场、电磁对采集信号的干扰的优点,通常使用超声波法、温度测法和X光检测法3种。文献[7]指出,超声波法通过监听局部放电引起的气体中声纳波信号进行局部放电诊断与分析,其基本原理在于局部放电时产生的高压微弧会在介质中形成气流压力波动,触发空气中的声压脉冲波。超声波法具有检测距离远、抗干扰能力突出及诊断精度高等优点,但实际应用中环境参数(如气温、湿度等)和良性声波信号干扰可能对其检测结果造成影响。温度检测方法可分为点式温度监测法、线式温度监测法、红外测温法3类;点式温度监测法凭借其测得温度精度高、安装方便、成本低廉的优点,但其测量范围有局限性;线性温度监测法的原理是将传感器沿电缆线路分布铺设,但该方法工程量大、成本较为高昂;文献[8]指出,红外测温法的原理是基于红外热成像技术,用以监测电缆外表面温度,设备安装不与电缆接触,有隔离性好、测量速度快的优点,但其测量结果易受环境影响,准确度较低。文献[9]指出,X光检测法利用放射线的穿透特性检测局部放电所产生的电子束激发的射线能量,并将其与预设阈值进行比较,从而对局部放电的强度进行定性和定量描述,具有较高的空间分辨率、较短的曝光时间等优点,但在射线强度较低的局部放电信号检测方面表现较差,很难准确确定放电信号的来源。同时,射线源与探测器的选择以及辐射防护措施的处理也为实际应用带来了挑战。

压力波的形成是由于介质被迅速压缩或拉伸,形成的压力变化引起的。压力波检测方法被广泛应用于泄漏检测、缺陷定位等领域。例如,李志昌^[10]提出了基于压力波法的管道漏失检测方法,并对管道泄漏原因和压力波的产生机理、传播特性、衰减规律、影响因素、处理办法及漏点定位原理等方面的深入研究。张玮玮^[11]提出了基于压力波法的清管器在线跟踪定位技术,实现了对管道压力数据的实时监控、清管器的实时跟踪及管道泄漏的实施定位。李春宇等^[12]设计了一种基于无位置检测的压力波测试方法,可以实时检测到发动机动子的位置,进而实现发电系统的控制。

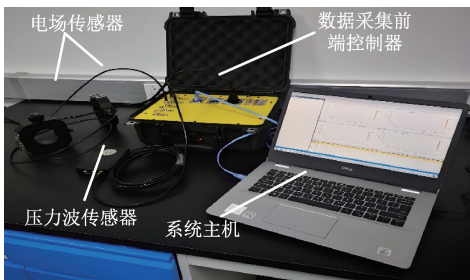
电缆局部放电将产生电气信号与非电气信号,压力波是其产生的力学信号的体现。文献[13]指出,电缆局部放电时,放电源附近的电荷快速释放、中和及迁移,产生陡峭的电流脉冲,进而导致周围区域瞬间受热膨胀,放电结束后,电缆膨胀区域迅速恢复至原来的体积,这种规律的体积张缩变化使电缆介质产生周期性振动,振动以纵向或横向的方式沿电缆向外扩散,形成压力波。综上所述,将压力波法应用于高压电缆局部放电检测是可行的,并具有如下优点:1)作为非电气测量法,该方法受到现场电磁干扰的影响小;2)作为非侵入式检测法,该方法不会影响电力设备工作与电力系统运行;3)压力波信号具有方向性,结合各方法可

实现空间定位;4)压力波信号具有一定特征,可提升系统的局部放电模式识别性能。但是,电缆局部放电是一种典型的电气击穿现象,若仅利用压力波法检测电缆非电信号,很难保障电缆局部放电的检测的准确性及可靠性。

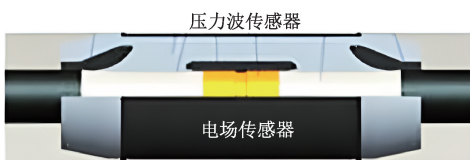
基于此,本研究将电气测量法与非电气测量法进行有机集成,开发了一套基于异源传感器数据融合的高压电缆局部放电检测及识别系统,该系统主要通过高速光感电场传感器检测电缆内部电场分布情况,发现电缆绝缘隐患区域,然后通过压力波传感器检测电缆是否产生压力波,验证该隐患区域是否出现局部放电,并根据信号特征判断局部放电类型。本研究利用改进的自适应阈值离散小波变换进行信号去噪,利用改进的格拉姆角场特征变换增强数据分类特征,利用改进的残差卷积神经网络进行放电模式识别。通过实验和工程应用发现,该检测系统能够实时监测电缆的工作状态,具有较强的可操作性、较高的局部放电检测率及其模式识别率,有助于提高电缆的使用安全性和电力系统的运行稳定性。

1 系统总体设计

图 1 所示为本研究开发的高压电缆局部放电检测及识别系统,主要分为 3 层物理结构:第 1 层主要由高速光感电场传感器及压力波传感器组成,利用非接触式手段完成电缆电场分布及局部放电信号采集;第 2 层为数据采集前端控制器,由低功耗主控模块、内部储能模块、外部电源模块、数据转换模块和数据存储模块组成,主要负责局部放电信号的传输与转换;第 3 层为预先安装自研软件的系统主机,主要由人机交互操作软件、内嵌的放电信号特征数据库、电缆识别系统、数据存储模块及功能管理系统组成,主要负责局部放电信号后处理、识别存储与管理,同时具有对前端控制器及传感器的管理功能。



(a) 系统总体组成
(a) Overall composition of the system



(b) 异源传感器布局
(b) Layout of heterologous sensors

图 1 系统总体组成及布局

Fig. 1 Overall composition and layout of the system

图 2 所示为系统各主要功能模块对应的基本工作流程:首先,系统主机控制异源传感器检测电缆局部放电产生的电场与压力波原始信号,并利用同轴通信导线和信号接口将采集的原始信号传输到数据采集前端控制器;然后,由数据采集前端控制器对采集的原始信号进行转换与存储;其次,通过 RJ45 网络接口将转换后的信号传输至系统主机;最后,由系统主机对转换信号进行分析、存储与管理,并结合放电数据(电缆故障)特征数据库进行电缆缺陷识别。

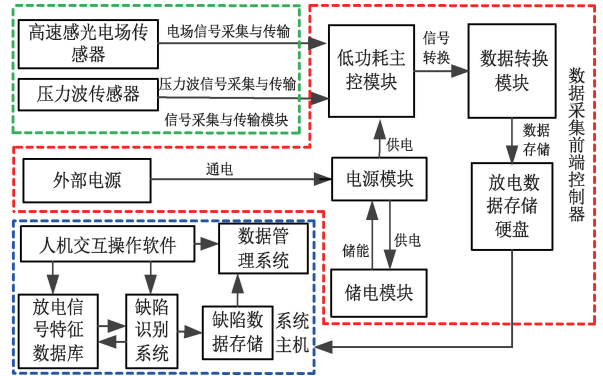


图 2 系统各功能模块及工作流程

Fig. 2 System functional modules and workflow

2 系统硬件方案

2.1 异源传感器

图 3 所示为电场传感器,能够在不改变原本场强的情况下测试电缆的电场分布情况,发现电缆绝缘的隐患区域。文献[14]指出,电场传感器基于电场强度与电荷之间的关系进行工作,当电荷在电场中移动时,其所受力与电场强度成正比,通过测量电荷移动所受力的大小,可以间接测量电场强度。该传感器具有较高的检测精度,能够准确测量电场变化;具有较强的抗电磁干扰能力;具有非侵入性,能够实现在线监测;具有较快的响应速度,能够及时捕捉局部放电事件的发生。电场传感器主要技术参数如表 1 所示。



图 3 电场传感器

Fig. 3 Electric field sensor

图 4 所示为压力波传感器,主要验证电缆绝缘隐患区域是否发生局部放电。文献[15]指出其原理,大致如下:首先将脉冲注入被测单元的金属屏蔽盒,产生的电压通过限

表 1 传感器主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of sensors

参数	指标
电压测量范围/kV	200~40
场强测量范围/kV/cm	2~10
输入电阻/MΩ	>10 000
入口电容/PF	<10
频率响应/kHz	7~100
测量精度/%	±1.5

流电阻作用于电缆,电缆的导体视作高压电极,对传感器施加驱动电压,使得屏蔽电极产生周期振动,振动与被测电流成正比,进而得出被测电缆压力波。文献[16]提到,在采用压力波传感器检测前,需要将电缆导电层与压电传感器紧贴电极板,实现阻抗匹配。

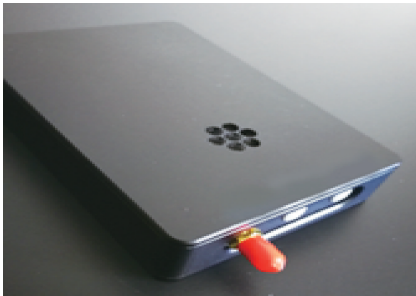


图 4 压力波传感器

Fig. 4 Pressure wave sensor

2.2 数据采集控制器

图 5 所示为自主研发的数据采集前端控制器,包括主控模块、内部存储模块(64 GB)、电场测试通道、压力波测试通道、RJ45 网线数据接口、电源接口(支持 220 V 交流电供电和自带电池供电)、电源开关及状态指示灯。异源传感器通过同轴通讯线缆及测试通道物理连接数据信号采集前端控制器,实现信号转换与存储,转换后的信号通过网线通道与系统主机物理连接。数据采集控制器具有传感器管理中介功能,究其原因,作为通用计算机的系统主机只能识别 USB、HDMI 等标准数字通信接口,而系统传感器使用的数字总线通信协议属于特殊数字接口类型,两者的通信协议不兼容,不能实现直接通讯。

2.3 系统主机

图 6 所示为安装局部放电信号分析与识别系统的系统主机,具有信号降噪、关键特征提取、推理机制与专家诊断功能。其中,推理机制功能可判别放电信号关键特征参数,如果特征参数超出了预设范围,则推理规则被激活,实现电缆缺陷的初步预警,即判断是否存在缺陷。专家诊断功能利用自适应阈值小波变换将被测电缆缺陷特征分解到不同时域和频域中,可在任意细节找到有效的畸变点,利用改进的残差卷积神经网络与系统内嵌的局部放电特征数据库进

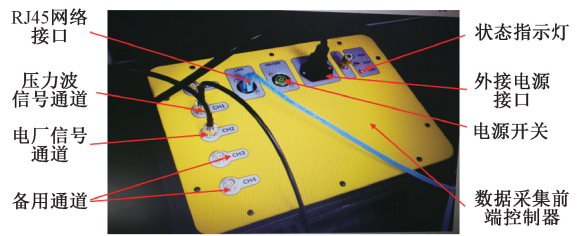


图 5 数据采集前端控制器

Fig. 5 Data acquisition front-end controller

行数据比对,进而识别电缆局部放电类型。此外,系统主机还具有数据存储及回放、数据库及传感器管理等功能。



图 6 安装信号分析与识别系统的系统主机

Fig. 6 Host for installing signal analysis and recognition system

3 系统检测机理及方法

根据电缆局部放电的电场与压力波检测原理,在异源传感器获取电缆局部放电的原始信号后传输至主机,系统将对输入信号进行处理分析,主要包括原始信号降噪、信号特征变换及放电模式(或电缆缺陷)识别 3 个重要流程,如图 7 所示。

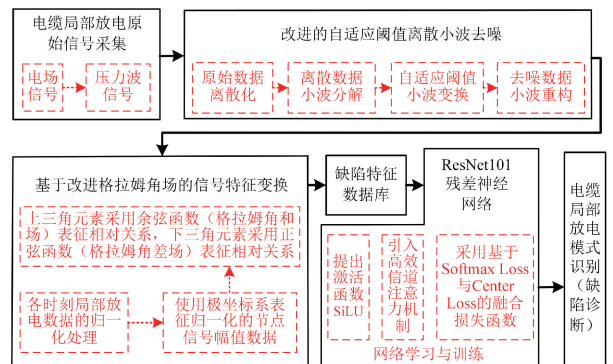


图 7 电缆局部放电模式识别流程

Fig. 7 Process of cable partial discharge pattern recognition

3.1 检测机理

为了保证检测的可靠性,该系统利用电场传感器与压力波传感器融合检测电缆局部放电现象。该检测系统利用电场传感器实施检测电缆内部电场分布情况,能够发现电

缆绝缘隐患区域,并记录局部放电产生的电气信号,实现第 1 次放电检测;随后利用压力波传感器检测电缆是否产生压力波,验证电缆隐患区域是否局部放电,并记录局部放电产生的非电气信号,实现第 2 次放电检测。系统检测机理如图 8 所示。其中,黄元雪^[17]以实际电缆结构为研究对象,建立了电缆正常状态及缺陷状态下的结构模型,运用 ANSYS 仿真软件计算了电缆在不同状态下的电场分布,分析了电缆的电场分布规律,在此基础上总结了电缆局部放电的电场检测机理,因此不再赘述。

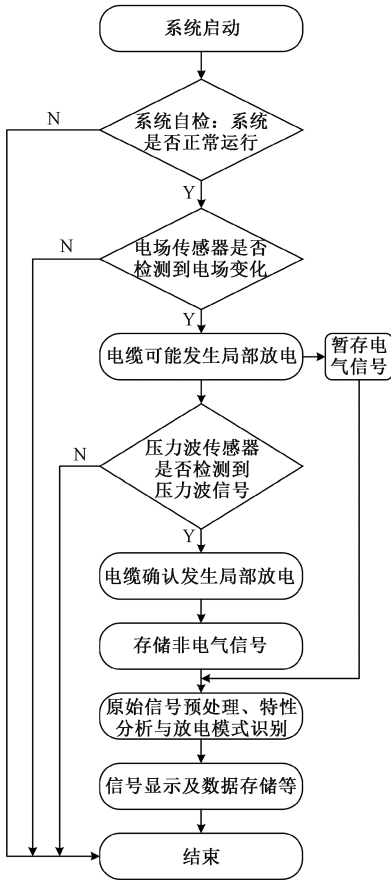


图 8 系统检测机理

Fig. 8 Detection and recognition mechanism

针对电缆局部放电的压力波检测原理,这里以电缆气隙放电为例进行阐述,大致如下:当电缆局部放电时,气隙周期性的膨胀和压缩对电缆介质形成往复的挤压和拉伸,因此形成一个周期的振动信号,这种周期性振动产生的压力波频率通常较高,其波长远大于气隙尺寸。因此,根据文献^[18]可将局部放电发生时气隙处产生的振荡力学过程与二阶电路零输入响应相类比,得到:

$$M_m C_m \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_m C_m \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (1)$$

式中: M_m, C_m, R_m 分别为质量、柔度及力阻; t 为放电时间; u_c 为气隙壁的对外作用力。

气隙周期性的膨胀和压缩对电缆介质形成挤压和拉

伸,引起压力变化形成了压力波。气隙壁的对外作用力(即压力) u_c 除以气隙的表面积就可以得到局部放电产生压力波的压强,即局部放电产生的压力波压强数值与气隙壁的对外作用力 u_c 成正比,局部放电产生的压力波变化频率与气隙壁的对外作用力 u_c 的变化频率相同。因此,必须求解气隙壁的对外作用力 u_c 。由式(1)推导气隙壁的对外作用力 u_c 为:

$$u_c = \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\frac{R_m t}{2M_m}} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{2M_m \omega}{R_m}\right) \quad (2)$$

式中: ω 为压力波信号角频率, U_0 表示气隙表面的初始作用力,分别表示为:

$$\begin{cases} \omega = \sqrt{\frac{1}{M_m C_m} - \left(\frac{R_m}{2M_m}\right)^2} \\ \omega_0 = \sqrt{\left(\frac{R_m}{2M_m}\right)^2 + \omega^2} \\ U_0 = QE \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q 为气隙的放电电量, E 为击穿场强。

3.2 信号去噪方法

由于电缆工程应用场景复杂等原因,系统采集的原始局部放电信号中必定存在噪声。为了快速准确判断电缆局部放电故障,本研究利用改进的自适应阈值离散小波变换对原始信号进行去噪预处理,其基本流程如图 9 所示,分为原始数据离散化、离散数据的小波分解、基于自适应阈值的小波变换及去噪数据的小波重构 4 项流程。

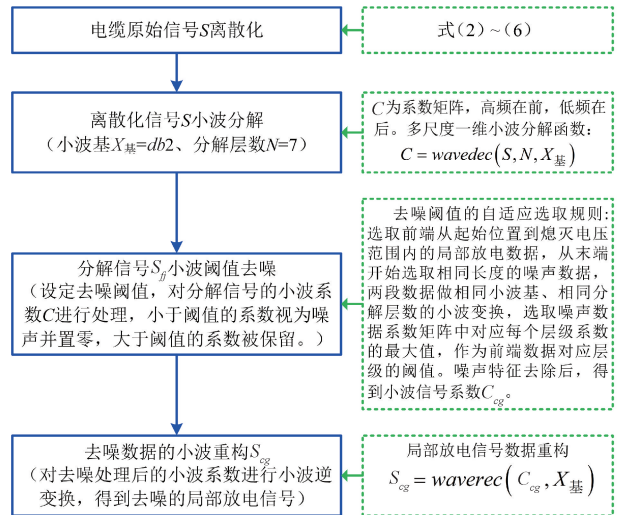


图 9 基于自适应阈值的离散化小波去噪

Fig. 9 Discrete wavelet denoising based on adaptive threshold

假设在实数空间 $L^2(R)$ 中有母小波信号 $\varphi(t)$, Fourier 变换得到 $\Psi(\omega)$, 满足小波容许条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (4)$$

随后得到小波基函数 $\varphi_{a,b}(t)$, 表示为:

$$\varphi_{a,b}(t) = \frac{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)}{\sqrt{a}} \quad (5)$$

其中, a 为伸缩因子且 $a > 0$, b 为平移因子。

将伸缩因子 a 、平移因子 b 离散化, 如下:

$$\begin{cases} a = a_0^m, a_0 > 0, m \in \mathbb{Z} \\ b = nb_0 a_0^m, b_0 > 0, n \in \mathbb{Z} \end{cases} \quad (6)$$

将式(4)代入式(3), 可得到离散小波基函数 $\varphi_{m,n}(t)$, 表示为:

$$\varphi_{m,n}(t) = \varphi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) / a_0^m \quad (7)$$

定义 $\bar{\varphi}(t)$ 为 $\varphi(t)$ 的共轭, 对于电缆局部放电的原始信号 $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 进行离散小波变换后得到 $WT_x(m, n)$, 表示为:

$$WT_x(m, n) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right)}{\sqrt{a_0^m}} = \langle x(t), \varphi'_{m,n} \rangle \quad (8)$$

3.3 特征变换方法

为了增强数据分类特征, 便于后续的图片识别训练, 在文献[19]的研究基础上提出改进的格拉姆角场特征变换方法, 将电缆局部放电的一维时序信号转换为二维拓扑特征图像, 具体如下:

首先, 对每个时刻的局部放电数据进行归一化处理, 表达式为:

$$\bar{v}_i(t) = \frac{v_i(t) - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \quad (9)$$

式中: $\bar{v}_i(t)$ 为归一化后 t 时刻节点 i 的信号幅值; $v_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 信号的幅值; v_{\max} 与 v_{\min} 分别为节点信号的最大值和最小值。

然后, 使用极坐标系表征归一化后节点信号幅值数据, 表达式为:

$$\begin{cases} \phi_i(t) = \arccos[\bar{v}_i(t)] \\ \phi_i(t) \in [0, \pi/2] \\ r_i = i/N, i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\phi_i(t)$ 和 r_i 分别表示 $\bar{v}_i(t)$ 在极坐标系下对应的角度和半径, N 为节点数量。

其次, 对极坐标系下不同节点幅值数据进行三角变换, 表达式为:

$$G = [\bar{v}_i(t) \oplus \bar{v}_j(t)]_{i,j=1}^N \quad (11)$$

文献[20]指出, 采用两角和的余弦函数计算节点内积, 即为格拉姆角和场; 采用两角和的正弦函数计算节点内积, 即为格拉姆角差场。为了更好地表征局部放电时序信号中的拓扑信息, 增强不同缺陷的可区分性, 考虑格拉姆角和场与差场在不同区间的单调特性, 提出一种改进的格拉姆角场特征变换, 同时采用余弦函数与正弦函数表征上三角与

下三角元素的相对关系, 表达式为:

$$\bar{v}_i(t) \oplus \bar{v}_j(t) = \begin{cases} \cos[\phi_i(t) + \phi_j(t)], i \leq j \\ \cos[\phi_i(t) - \phi_j(t)], i > j \end{cases} \quad (12)$$

利用改进的格拉姆角场特征变换方法将尖刺放电、气隙放电及沿面放电的一维时序信号转换为二维拓扑特征图像, 结果如图 10 所示。

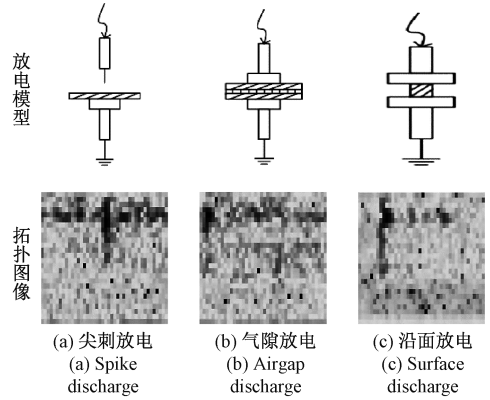


图 10 局部放电模型及拓扑图像

Fig. 10 Partial discharge model and topological image

3.4 放电模式识别方法

李斌等[21]指出, 残差神经网络通过增加捷径连接, 以及引入残差和恒等映射, 使得神经网络更容易训练, 而且避免了传统 CNN 网络的梯度消失或梯度爆炸的问题, 具有更好的模式识别效果。文献[22]提出, ResNet101 网络能够从输入数据中学习更复杂的特征, 特别适合于对识别结果准确性至关重要的图像识别任务。综合考虑网络复杂度、计算量及特征提取能力, 本研究采用 ResNet101 模型进行局部放电模式识别, 并从激活函数、残差模块及损失函数 3 方面进行改进, 如图 11 所示。

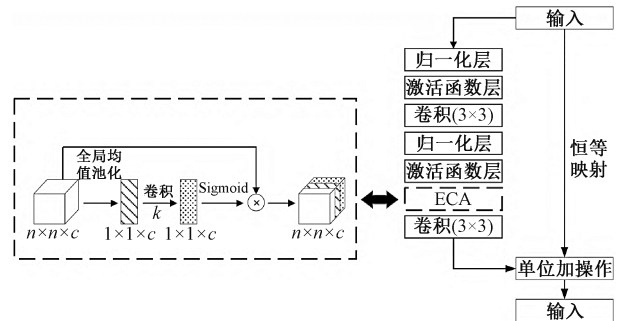


图 11 融合高效信道注意力机制的残差单元

Fig. 11 Residual unit integrating efficient channel attention mechanism

1) 激活函数改进

基于传统激活函数 ReLU, 提出激活函数 SiLU 作为基础网络模型中的激活函数。SiLU 函数 f_{SiLU} 及其一阶导数 f'_{SiLU} 的计算公式为:

$$\begin{cases} f_{\text{SiLU}} = x \cdot \sigma(x) \\ f'_{\text{SiLU}} = f_{\text{SiLU}} + \sigma(1 - f_{\text{SiLU}}) \\ \sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 为上层节点输入; $\sigma(x)$ 为 Sigmoid 函数。

激活函数 f_{SiLU} 的曲线具有平滑、非单调的特性,能提高整个神经网络的性能;在一阶导数 f'_{SiLU} 曲线中,导数为 0 的全局最小值在权重上起到一定的调节作用,能够抑制大权值的更新,从而有效避免梯度爆炸或梯度消失的现象。

2) 残差模块改进

文献[23]指出,残差块的引入能够较好地解决梯度弥散的问题,但是特征提取过程中仍受到拓扑图像对比度低、纹理复杂等因素的影响。为此,本研究在残差单元的最后一个卷积之前引入高效信道注意力机制,其基本原理是通过自适应校准不同通道之间的响应,学习每个特征通道的重要程度,并增强有利于缺陷分类的特征权重值。首先,利用全局均值池化压缩输入特征图的尺寸;然后,使用大小为 3 的卷积核进行一维卷积操作,实现局部特征的跨通道交互;最后,采用 Sigmoid 激活函数获取各通道的权重,并与原特征图运算。其中,局部特征跨通道交互的范围由卷积核 k 决定,大小由式(14)确定。

$$k = \left\lfloor \frac{\log_2(C)}{\gamma} + \frac{1}{2} \right\rfloor_{\text{odd}} \quad (14)$$

式中: $\lfloor z \rfloor_{\text{odd}}$ 表示距离 z 最近的奇数; C 为特征图的通道数量。

在改进残差单元的最后,采用一个卷积充分学习高效信道注意力模块捕捉到的二维拓扑图像特征,最大限度发挥高效信道注意力模块的作用,提升网络模型对电缆终端缺陷的分类能力。

3) 损失函数改进

不同缺陷的电缆局部放电信号比较相似,残差神经网络 ResNet101 自身的 Softmax 损失函数 L_s 对电缆局部放电所对应的缺陷类别识别能力不足。为此,考虑到 Center 辅助损失函数 L_c 具有增大类特征间距的特点,将网络的损失层将损失函数 L_c 融入损失函数 L_s 中,增强训练模型对不同缺陷的分类能力。融合损失函数 L_r 计算公式为:

$$L_r = L_s + \lambda L_c = - \sum_{h=1}^H \log \frac{e^{\mathbf{w}_{q_h}^T \mathbf{p}_h + z_{q_h}}}{\sum_{u=1}^U e^{\mathbf{w}_{q_u}^T \mathbf{p}_h + z_{q_u}}} + \frac{\lambda}{2} \sum_{h=1}^H \|\mathbf{p}_h - \mathbf{l}_{q_h}\|_2^2 \quad (15)$$

式中: λ 表示两个损失函数的分配权重,取 0.2; \mathbf{p}_h 为全连接层前学习到的分类特征; \log 函数的自变量为 \mathbf{p}_h 属于类别 q_h 的概率; \mathbf{w} 为全连接层的映射输出; H 为训练批次的尺寸; U 为缺陷类别数; \mathbf{l}_{q_h} 为第 q_h 个缺陷的特征中心; T 为转置。

4 实验研究与分析

为了验证该自研系统的工作性能,分别在实验室环境

及工程环境进行了性能测试。这里选取常见的电缆尖刺放电、气隙放电及沿面放电作为研究对象,利用自研系统获取电缆局部放电时产生的时域波形、放电率图谱、相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱、局部放电脉冲信号(phase resolved pluse sequence, PRPS)图谱及椭圆图谱,进而分析电局部放电信号特性,随后结合信号特征数据库识别电缆的放电模式。图 12 所示为自主搭建实验室测试平台。

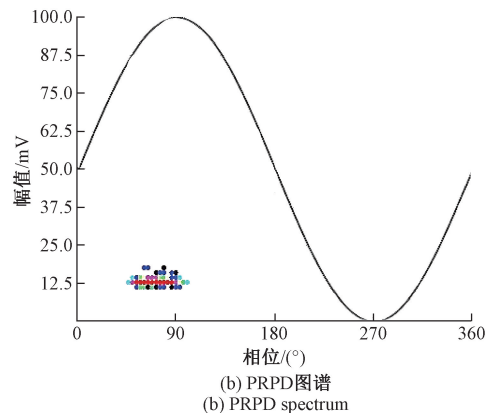
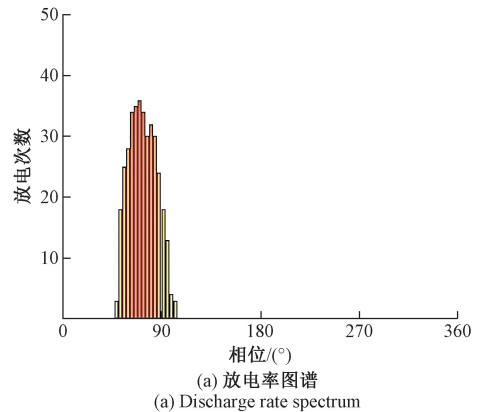


图 12 实验室测试平台

Fig. 12 Laboratory testing platform

4.1 局部放电检测及特性分析

图 13 所示为自研系统采集的电缆壳体尖刺放电的放电率图谱、PRPD 图谱、PRPS 图谱及椭圆图谱。可以发现,电缆尖刺放电次数集中区域主要在相位 $60^\circ \sim 90^\circ$ 区间,呈现中间放电次数密集且两边放电次数较少的特征,并且放



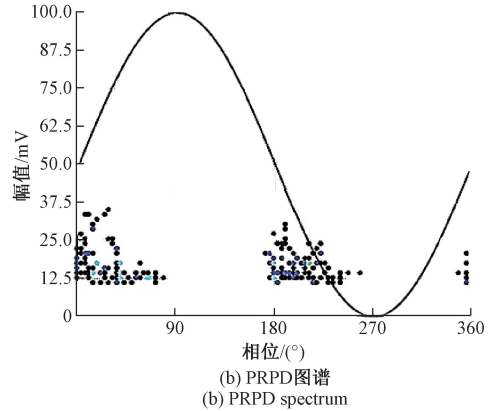
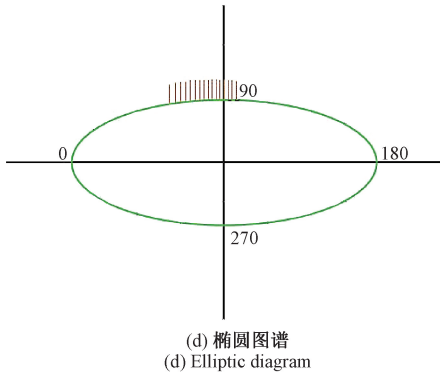
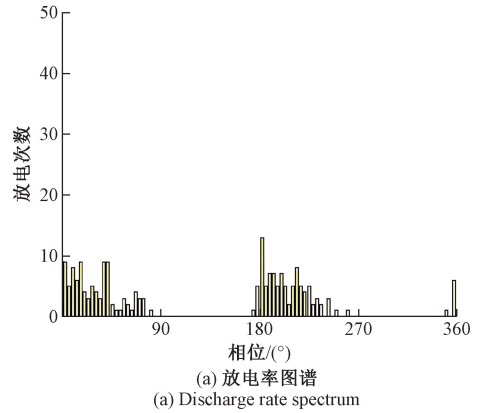
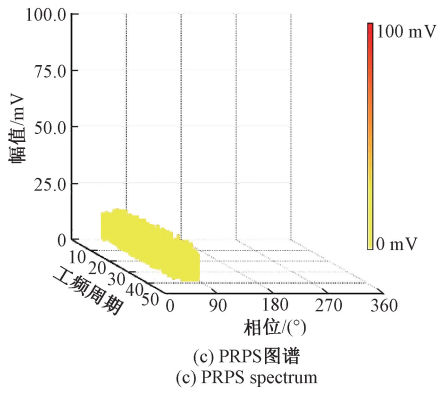


图 13 尖刺放电特性多视图表征

Fig. 13 Multi view characterization of spike discharge characteristics

电幅值大致在 15 mV 左右。经过分析发现,电缆壳体表面的较大毛刺会引起电缆电场分布不均匀,大量电荷聚集在毛刺周围,不断冲击绝缘电缆,最终导致电缆局部放电。因而,加工电缆时需要在材料选取与工艺上进行有效改善,而且要尽量按规程打磨毛刺,避免因毛刺引起电缆局部放电。

气隙放电主要是电缆绝缘层中的气隙产生的局部放电。图 14 所示为自研系统采集的电缆气隙放电的放电率图谱、PRPD 图谱、PRPS 图谱及椭圆图谱。从图中可以发现,电缆气隙放电次数集中区域主要在相位 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间和 $180^\circ \sim 270^\circ$ 之间,气隙放电幅值在 20 mV 左右。由此可知,在高压电的影响下,电缆缺陷造成的局部放电情况比较严重,极易发生局部放电击穿现象;此外,电缆绝缘层中气隙的不同形态大小和气体性质皆会影响电缆局部放电击穿效果。

沿面放电主要是电缆的表面发生的气体放电现象。图 15 为自研系统采集的电缆沿面放电的放电率图谱、沿面放电 PRPD 图谱、沿面放电 PRPS 图谱及椭圆图谱。从图中可以发现,电缆沿面放电次数集中区域主要在相位 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间,放电幅值在 40 mV 上下浮动。经过分析发现,第哪里呢沿面放电主要产生原因是由于电缆处于不均匀的强电场,导致电缆内部电场强度低于电极边缘气隙电场强度。而且击穿电压相对较低,当电场强度达到击穿临界值时,电缆表面会出现放电现象。

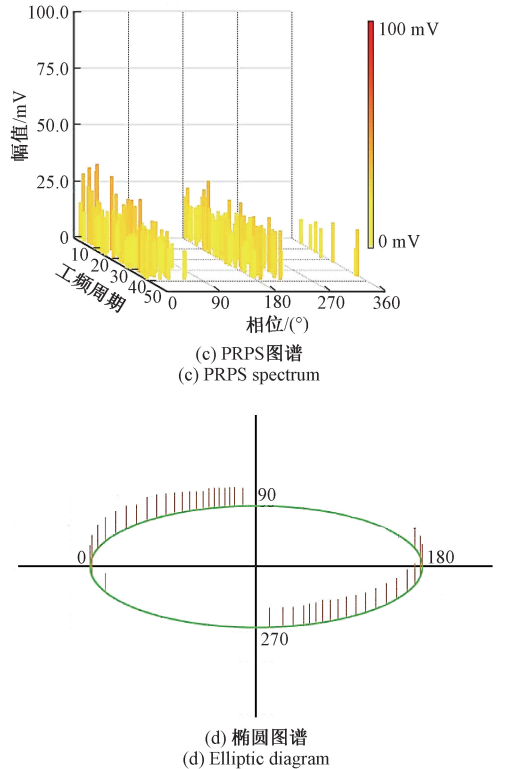


图 14 气隙放电特性多视图表征

Fig. 14 Multi view characterization of air gap discharge characteristics

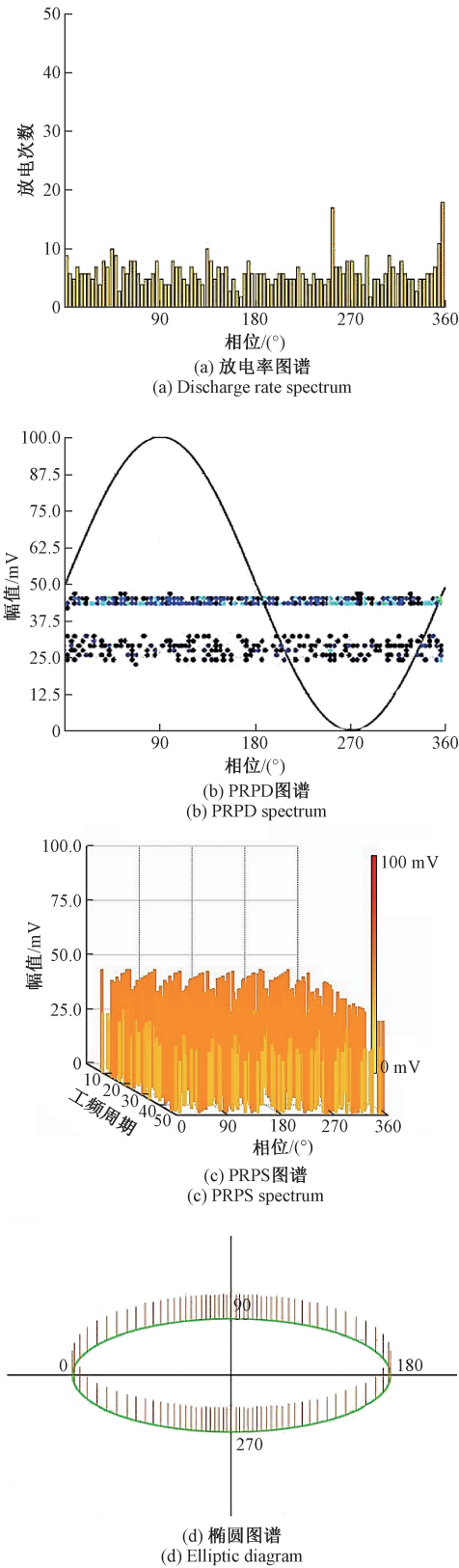


图15 沿面放电特性多视图表征

Fig. 15 Multi view characterization of surface discharge characteristics

综上所述,该检测系统能准确获取不同缺陷状态下的电缆局部放电信号,这为后续的电缆放电模式识别(或电缆缺陷诊断)提供了可靠的技术保障;同时,检测系统将获得的电缆局部放电信号进行分析存储,能够丰富完善电缆缺陷特征数据库,也为后续的电缆放电模式(或电缆缺陷)识别提供了有效的数据保障,是后续研究的基础。

4.2 局部放电检测与识别性能分析

本研究的最终目标是面向带电场景的高压电缆实现状态在线监测,为此有必要对自研系统开展电缆放电识别性能研究。为了检验自研系统的电缆放电识别性能,在相同测试参数及实验环境下引入市场化的第三方检测系统(修改其故障特征数据库容量与自研系统相同)作为对比。实验过程中随机开展局部放电测试60次,表2所示为任意选取的25次测试数据。由表2发现,自研系统的放电检测率(发现的局部放电数量与实际局部放电数量之比)为100%,要高于第三方系统的放电检测率96.0%;电缆缺陷识别率(定义为准确识别的放电类型数量与实际局部放电数量之比)为96.0%,同样高于第三方系统的电缆缺陷识别率92.0%,这说明自研系统的放电模式识别性能较强,同时验证了自研系统良好的检测性能。

表2 实验测试中模式识别测试数据
Table 2 Testing data of pattern recognition

次数	实际放电	自研识别	自研准确性	第三方识别	第三方准确性
1	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
2	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
3	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
4	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
5	气隙放电	尖刺放电	否	漏检	否
6	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
7	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
8	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
9	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
10	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
11	气隙放电	尖刺放电	否	气隙放电	是
12	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
13	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
14	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
15	尖刺放电	尖刺放电	是	气隙放电	否
16	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
17	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
18	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
19	沿面放电	沿面放电	是	沿面放电	是
20	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
21	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
22	尖刺放电	尖刺放电	是	尖刺放电	是
23	沿面放电	沿面放电	是	气隙放电	否
24	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
25	气隙放电	气隙放电	是	气隙放电	是
性能分析		检测率: (25/25)	识别率: (24/25)	检测率: (24/25)	识别率: (23/25)
		100%	96.0%	96.0%	92.0%

4.3 工程应用验证

为了进一步验证自研系统在工程场景的实际性能,委托某直辖市电科院将自研的高压电缆局部放电检测及识别系统应用于 220 kV 隧道电缆巡检工作。在巡检过程中,现场测试人员将电科院目前使用的第三方检测系统与自研系统(其缺陷特征数据库容量与第三方检测系统相同,较其自身实验室测试时完善)在相同检测环境中同时执行检测 122 次,部分结果如表 3 所示。可以发现,第三方系统的放电检测率为 97.54%,模式识别率为 95.90%,而自研系统没有发现电缆出现局部放电现象,表明隧道电缆线路没有出现局部放电,这与现场情况完全一致,放电检测率与模式识别率均为 100%。同时,对比实验与工程测试情况发现,随着故障特征数据的逐渐完善,自研系统的性能提升(或自我学习能力)优于第三方系统。目前,该自研系统已通过 CNAS 认证的第三方资质机构检测,并交付电科院完成技术验收。

表 3 工程应用中电缆放电模式识别结果对比分析

Table 3 Comparative analysis of cable discharge pattern recognition results in engineering applications

识别次数	实际情况	自研系统识别结果	第三方系统识别结果
16	无放电	无放电	尖刺放电
41	无放电	无放电	漏检/无数据
43	无放电	无放电	气隙放电
77	无放电	无放电	漏检/无数据
121	无放电	无放电	漏检/无数据

5 结 论

本研究研制出一套新型的高压电缆局部放电检测及识别系统,主要包括异源传感器、自研信号采集前端控制器及系统主机,能够对带电状态的高压电缆进行局部放电检测与识别。实验测试与工程应用结果表明,该系统采用基于电气信号和非电气信号的异源信号融合技术,以非侵入式的方式准确获得不同缺陷状态的电缆局部放电特性,可为电缆状态监测提供有效数据保障,能够大大提高电缆巡检效率。同时,该系统能自动识别电缆缺陷类型或局部放电模式,在实验测试中的放电检测率达到 100%,缺陷识别准确率达到 96.0%;在工程应用中,随着故障特征数据库的丰富,系统的局部放电检测与识别能力继续得到有效提升,放电检测率及缺陷识别准确率均达到 100%。

参考文献

[1] 韩启贺,解磊,张增智,等.提升配电网电缆附件隐患检测效率的综合检测方法[J].四川电力技术,2018,41(5):25-28,42.
HAN Q H, XIE L, ZHANG Z ZH, et al.

Comprehensive detection method for improving defect detection efficiency of cable accessories in distribution network [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(5):25-28,42.

- [2] 席傲然,莫岳平.电力电缆接头绝缘状态检测技术研究现状与趋势[J].科技创新与应用,2019(31):28-31.
XI AO R, MO Y P. Research status and trends of insulation state detection technology for power cable joints [J]. Technology Innovation and Application, 2019(31):28-31.
- [3] 崔岩,方春华,文中,等.基于 VMD-WOA-ELM 的电缆外力破坏振动信号在线识别[J].电子测量技术,2023,46(2):121-129.
CUI Y, FANG CH H, WEN ZH, et al. Online identification of cable external force damage vibration signal based on VMD-WOA-ELM [J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(2):121-129.
- [4] 薛阳,张舒翔,贾巍,等.基于改进 Faster RCNN 的电缆外护套破损检测[J].电子测量技术,2023,46(15):158-164.
XUE Y, ZHANG SH X, JIA W, et al. Damage detection of cable outer sheath based on improved Faster RCNN [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(15):158-164.
- [5] 龚馨.基于压力波的电缆接头缺陷局部放电检测技术研究[D].重庆:重庆大学,2021.
GONG X. Research on partial discharge detection technology of cable joint defects based on pressure wave[D]. Chongqing: Chongqing University,2021.
- [6] 肖旰,周莉,李敬兆,等.基于 EEMD 融合 BAS-CNN 的高压电缆故障诊断[J].电子测量技术,2022,45(4):160-167.
XIAO G, ZHOU L, LI J ZH, et al. High-voltage cable fault diagnosis based on EEMD and BASCNN [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(4):160-167.
- [7] 邓琨,温启良,张渊渊.基于超声红外热像的电缆终端局部放电缺陷检测方法[J].红外技术,2022,44(9):972-978.
DENG K, WEN Q L, ZHANG Y Y. Detection method of partial discharge defects in cable terminals based on ultrasonic infrared thermography[J]. Infrared Technology, 2022, 44(9):972-978.
- [8] 李瑞,周自强,刘珊,等.高压电力电缆终端局部放电在线监测方法仿真[J].计算机仿真,2024,41(4):80-84.
LI R, ZHOU Z Q, LIU SH, et al. Simulation of online monitoring method for partial discharge at high-

- voltage power cable terminals [J]. Computer Simulation, 2024, 41(4): 80-84.
- [9] 郑书生,孔举,戴敏婷,等. X射线激励XLPE电缆终端金属颗粒局部放电的研究[J]. 电工技术学报,2024: 1-15. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240192. ZHENG SH SH, KONG J, DAI M T, et al. Research on partial discharge of terminal metal particles of of XLPE cable based on X-ray excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024: 1-15. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240192.
- [10] 李志昌. 基于压力波法的供水管道漏失检测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022. LI ZH CH. Research on leak detection system of water supply pipeline based on pressure wave method[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022.
- [11] 张玮玮. 基于压力波法的清管器在线跟踪定位方法研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2022. ZHANG W W. Research and application of online tracking and positioning method for pipe inspection gauge based on pressure [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [12] 李春宇,黄玉平,郑再平,等. 基于自由活塞斯特林发电系统的位置检测方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 137-140. LI CH Y, HUANG Y P, ZHENG Z P, et al. Testing method design of based on free piston Stirling engine power generation system[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9): 137-140.
- [13] HE P L, LIU Y X, ZHANG B, et al. Determination of parameters for space charge simulation based on bipolar charge transport model under a divergent electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3):1376-1385.
- [14] 宋思陶. 基于BGO晶体的电场测量方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2024. SONG S T. Research on electric field measurement method based on BGO crystal [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2024.
- [15] 刘轩东,程章颖,马乐晨,等. 基于光纤消逝场的电场测量技术研究综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1984-1997. LIU X D, CHENG ZH Y, MA L CH, et al. Research review of electric field measurement technology based on the evanescent field of optical fiber [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1984-1997.
- [16] 张泽权. 电力电缆中间接头局部放电内置式检测方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023. ZHANG Z Q. Study on built-in partial discharge detection method of power cable intermediate joint [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [17] 黄元雪. 不同状态下电力电缆电磁场分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022. HUANG Y X. Study on built-in partial discharge detection method of power cable intermediate joint [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [18] 何维晟,吴照国,徐扬,等. 高压电缆终端局部放电超声信号传输特性仿真分析[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 48-55, 64. HE W SH, WU ZH G, XU Y, et al. Simulation analysis of propagation characteristics of partial discharge ultrasonic signals in HV cable terminals[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 48-55, 64.
- [19] 赵启,王建,林丰恺,等. 基于格拉姆角场与ResNet的输电线路故障辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 95-104. ZHAO Q, WANG J, LIN F K, et al. Transmission line fault identification method based on Gramian angular field and ResNet[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 95-104.
- [20] LI C Y, HU Y H, JIANG J W, et al. Fault diagnosis of a marine power-generation diesel engine based on the Gramian angular field and a convolutional neural network[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2024, 25(6): 470-482.
- [21] 李斌,阎君宇. 基于GAF-CNN的弓网电弧识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 188-195. LI B, YAN J Y. Research on recognition method of pantograph arc based on GAF-CNN [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 188-195.
- [22] HE K M, ZHANG X Y, REN SH Q, et al. Deep residual learning for image recognition [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770-778.
- [23] WANG Q L, WU B G, ZHU P F, et al. ECA-Net: Efficient channel attention for deep convolutional neural networks [C]. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 11534-11542.

作者简介

刘秀婷, 硕士, 实验师(中级), 主要研究方向为光电检测技术、系统信号分析与状态监测等。

E-mail: 880177@cwzu.edu.cn

高峰(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为机电设备故障检测。

E-mail: 961440166@qq.com