高压电缆接头局部放电声光联合检测系统设计与实现

唐 波 邱浩宇 吴慧娟

(电子科技大学信息与通信工程学院，光纤传感与通信教育部重点实验室，四川 成都 611731)

摘要：针对传统局部放电检测系统成本高、易受电磁干扰、检测距离和准确性有限等缺点，基于超声与紫外两种非电气局部放电检测技术，利用超声传感技术实现近端局部放电信号的高灵敏、动态和精确捕获，利用空气中紫外光比超声信号衰减慢弥补超声的检测距离极限，综合实现复杂电磁干扰环境下远距离、非接触、信息可靠和低成本的高压电缆接头处局部放电状态的实时动态检测。经实验验证，该系统设计具有较强的实用性，并可以达到 10 m 的有效检测距离。

关键词：电缆局部放电检测；声光检测；非接触检测

Design and implementation of partial discharge acousto-optic joint detection system for high voltage cable connector

TANG Bo, QIU Haoyu, WU Huijuan

(Key Lab of Optical Fiber Sensing and Communication (Ministry of Education), School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China(UESTC), Chengdu 611731, China)

Abstract: In view of the shortcomings of traditional partial discharge detection system, such as high cost, easy to be affected by electromagnetic interference, limited detection distance and accuracy, ultrasonic sensing technology is used to achieve high sensitivity, dynamic and accurate acquisition of near end partial discharge signal based on ultrasonic and ultraviolet non electrical partial discharge detection technology, and ultraviolet light in the air is used to make up for the detection distance limit of ultrasonic to realize the real-time dynamic detection of partial discharge at the connector of high-voltage cable with long-distance, non-contact, reliable information and low cost under complex electromagnetic interference environment. The experimental results show that the system design has strong practicability, and can achieve an effective detection distance of 10 m.

Key words: cable partial discharge detection; acousto-optic detection; non-contact detection

0 引言

高压电缆故障直接关系到整个电力系统的安全与稳定。在高压电缆及其终端、中间接头处，由于各部分电场强度往往是不相等的，容易发生局部放电，会对绝缘介质造成损坏[1-3]，且损坏程度与放电量的大小、放电时间相关。如果此类故障得不到及时处理，有可能会导致绝缘的最终击穿与失效，甚至造成电力设备的损坏[4]。为了预防此类事故的发生，在不影响正常输变电的情况下，

国家自然基金重大项目(61290312)；国家自然基金重大仪器专项(41527805)；国家自然基金青年基金项目(61301275)；国家电网项目(5455HT160014)；教育部创新团队(PCSIRT, IRT1218)和 111 创新引智项目(B14039)

高压电缆局部放电在线检测十分重要。

高压电缆局部放电时，会伴有电脉冲、电磁辐射、超声波和紫外光等物理现象及各种化学生成物，这些放电信息包含丰富的绝缘状况信息[5]。针对以上物理、化学现象，目前局部放电有多种检测方法，主要分为电气测量法和非电气测量法两大类，常用检测技术对比分析如表 1 所示。电气测量法主要有有脉冲电流法和特高频法等[6,7]。国内普遍采用这类方法，但实际应用效果往往不够理想，主要原因是现场电气噪声干扰大，局部放电信号提取困难，目前抑制干扰的方法还需在理论和应用方面作进一步的研究和完善。非电气测量法主要包括超声波检测法[8-9]、紫外光测法、红外检测法和化学检测法等[10-12]，优点是测量中不受电气信号的干扰，抗干扰能力强。相应的检测设备有：超声波探测仪、紫外成像仪、红外热像仪和变压器油分析仪等[13-16]。此外，最近出现了研究基于新型电磁传感器[17]的局部放电检测技术，但易受电磁干扰。目前检测方法主要是基于单一的技术类型进行检测。在复杂电磁干扰环境下，超声波、紫外线和化学检测方法比较占优势。超声检测距离较近，传统的紫外线光谱检测成本高，化学检测方法(如 SF_6 气体分解)灵敏度很差，难以用于在线检测[18]。目前局部放电的多参量检测方法以脉冲电流法与超声检测法、特高频法与脉冲电流法、特高频法和超声检测法结合等为主[19-21]。这些联合检测方法均以电气检测法为主，检测结果仍然受电磁环境干扰影响较大。

表 1　局部放电常用检测技术对比

Tab. 1 Comparison of common detection techniques for partial discharge

检测方法	脉冲电流法	特高频检测法	超声波检测法	紫外光检测法	化学检测法
优点	方法简单，灵敏度高	灵敏度高，在线检测	不受电磁干扰	不受电磁干扰	不受电磁干扰
缺点	不能在线检测	造价高	信号衰减大,测距有限	成本高	灵敏度差，不能在线检测
技术类别	电气测量	电气测量	非电气测量	非电气测量	非电气测量
应用	早期应用较多	应用多	应用多	较少应用	极少应用

因此，为了实现复杂强电磁干扰环境下高压电缆接头处局部放电状态的实时动态检测，避免单一技术的缺点，本文融合超声与紫外传感两种非电气检测技术，设计并实现了一种抗强电磁干扰的低成本、高性能和便携式高压电缆接头局部放电声光联合检测系统。

1　高压电缆接头局部放电声光联合检测系统总体设计

1.1　高压电缆接头局部放电声光联合检测系统理论依据

伴随局部放电会产生声、光和电磁波等现象，基于这些物理、化学现象出现了多种局部放电检测技术。结合本文便携式、非接触和抗电磁干扰局部放电检测的需求，同时为了提升检测的准确性，本系统采用超声波和紫外线联合检测的方法，因此分别从超声传感检测原理、紫外传感检测原理进行理论分析。

高压电缆正常运行时，电缆内部介质应力、电场应力和粒子力处于动态平衡的状态，不会引起振动。当电缆内部出现局部放电时，放电源附近电荷快速释放、中和和迁移，其周围介质应力、电场应力和粒子力的平衡状态被打破，产生陡峭的电流脉冲。电流脉冲导致放电源周围区域瞬间受热膨胀，局部放电结束之后，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周围介质出现振动，从而产生 20 kHz 以上的超声波[8]。信号以放电源为球心，通过球面波的方式传播至四周。超声波法一般是在电缆外部放置超声传感器来检测局部放电的声信号。超声传感器可以将声信号转化为电信号，且电信号能量与声信号能量间存在一定比例关系[8]，因此可实现局部放电的放电强度有效测量。该方法的特点是现场检测完全避开电气方面的干扰，操作简单方便，成本低、灵敏度高以及易于携带，但由于声信号传播随距离的增加衰减较快[9]，对长电缆的检测效果不佳，超声波检测法多应用于电缆接头的检测。

高压电缆发生局部放电时，空气中的电子在电离过程中释放能量会辐射出光谱，包括了紫外线、可见光和红外线 3 个谱段，如图 1 所示[11]。随着外加电压的增加，电晕放电光谱的紫外区辐射也增加；当气隙变长时，则紫外辐射减弱[22]。红外光谱则相反，外加电压低、气隙较长时红外光谱更强；可见光区域对外加电压和气隙长度较不敏感。交流高压放电的光谱主要在紫外区，可见光和红外光区都很微弱。由此可知，紫外光作为特高压设备的气体放电检测信号比可见光和红外线更加灵敏。高压电缆放电产生的紫外线大部分在 280～400 nm 的波长区域内，也有小部分波长在 230～280 nm[23]。采用特定的紫外光传感器如紫外光敏管，可利用这一段太阳盲区，使仪器在紫外波长 190～280 nm 之间工作，对其他频谱不敏感，可去除可见光源的干扰。检测系统避开了太阳造成的复杂背景，因而“日盲光谱区”的紫外检测就成为了高压电缆电晕放电极其有效的方法。因此，紫外光检测系统的信号检测日盲紫外波段的电晕放电，可达到理想的效果[22]。对这部分波长的紫外线检测，可以用来确定高压电缆局部放电的放电量大小。紫外光检测最大的优势是非接触测量，具有较高的抗干扰能力，不影响被测设备的正常运行。另外，紫外光检测又主要分为紫外成像法和紫外脉冲法[11]。由于紫外成像仪价格昂贵，难以构建在线检测系统，而紫外脉冲法使用紫外光敏管，具有成本低、在线检测和灵敏度较高等优点，因此搭建便携式局部放电在线检测系统一般采用紫外脉冲法。

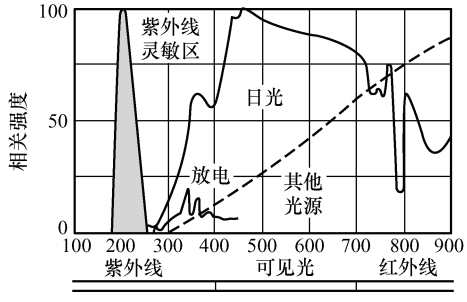

图 1　典型局部放电的紫外光谱

Fig. 1 UV spectrum of typical partial discharge

基于以上检测机理，本文融合超声传感和紫外传感两种非电气检测方法，设计并实现了一种抗强电磁干扰的非接触、低成本和便携式高压电缆接头局部放电声光联合检测系统。

1.2　高压电缆接头局部放电声光联合检测系统设计方案

高压电缆接头局部放电声光联合检测系统总体方案设计如图 2 所示。本系统主要由传感器模块、声光信号驱动模块、STM32 主控模块和电源模块四个部分组成。超声、紫外传感器用于搜集局部放电过程伴随的声光信号，由声光信号联合驱动模块对声光信号进行信号调理和转换。其中超声信号经过驱动电路转换为电压信号，经模数转换后通过 SPI 通信方式传输到 STM32 主控模块。紫外光信号经过紫外驱动电路转换为脉冲信号，由 STM32 通过脉冲捕获方式进行采集。 最后，STM32 主控模块对局部放电声光信号进行实时存储、波形显示、分析处理及预警提示。

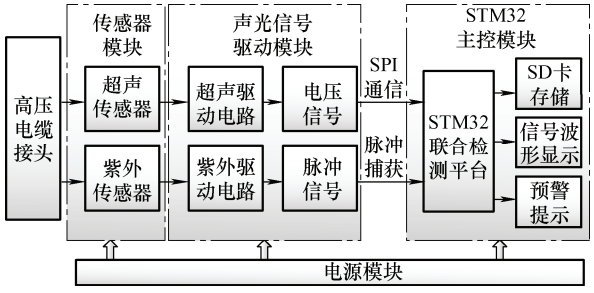

图 2　高压电缆接头局部放电声光联合检测系统总体方案设计

Fig. 2 Overall design of partial discharge acousto-optic joint detection system for high voltage cable connector

2　系统硬件设计

2.1　传感器模块

根据局部放电所产生的超声波频段主要集中在 20～100 kHz，超声传感探头选型方面，采用灵敏度为-63 dB，中心频率为 40 kHz 空气耦合式超声传感器，检测频带(37～45 kHz)在局部放电超声信号频带范围，且相较于其他中心频率(如 100 kHz，200 kHz)的空气耦合式超声传感器，其有效检测距离最大。此外，37～45 kHz 的检测频带可以有效排除现场噪声的干扰。该空气耦合式

超声传感器相比于接触式传感器，最大优点是以空气为超声的传导介质，避免直接接触危险的高压设备，安全可靠。

紫外传感器采用低成本且体积小的脉冲型紫外传感器，一方面避免紫外光谱检测成本偏高、不便于携带的问题，同时又弥补了超声传感器远端检测灵敏度不高的问题。本系统选用 R2868 日盲型紫外光敏管，其灵敏度为 5 000 cmp。

2.2 声光信号驱动模块

2.2.1 超声信号驱动电路设计与实现

局部放电产生的超声波信号极为微弱且随着空间距离增加衰减很快，因此在接收端需要进行放大。同时为了提高检测准确度，需要滤除噪声频段以排除干扰，因此在模数转换前需要进行信号的放大和滤波，具体的超声信号驱动电路设计流程如图 3 所示。

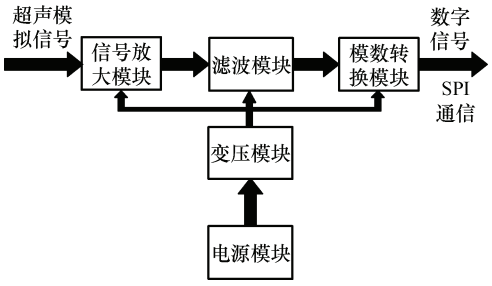

图 3 超声信号驱动电路设计流程

Fig. 3 Design flow of ultrasonic signal driving circuit

针对实际检测中放电信号大小不确定，检测距离远近不统一影响接收信号的强弱，放大模块采用交流动态增益可调的放大方法。超声模数转换模块的 ADC 为 AD7988-5，其只能对正电压进行转化，因此电路先对超声信号加上一个 1.65 V 的偏置电压信号。再经过两级运放进行信号放大，通过调节电位器 R_5，可对偏置的超声信号进行 1～20 倍不同增益的动态放大。假设输入的原始超声信号电压值为 V_i，增益后的超声信号电压值为 V_o，那么根据运算放大器的放大关系，计算公式为

$$V_o = \frac{R_4 + R_5 + R_6}{R_4 + R_5} \times V_i \tag{1}$$

滤波则通过引入一阶 RC 低通滤波器，滤除 500 kHz 以上的噪声。模数转换模块，采用 16 位低功耗 AD7988-5 芯片，将放大后的超声电压信号转为数字信号，通过 SPI 方式与 STM32 主控模块通信。

具体实现的超声驱动电路如图 4 所示。

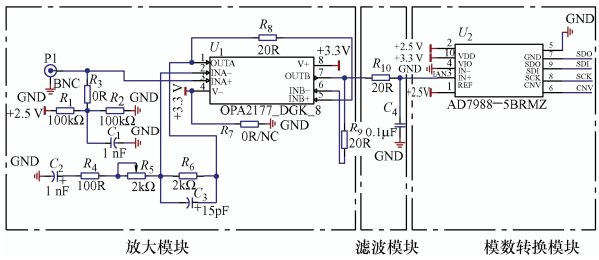

图 4 超声驱动电路实现

Fig. 4 Implementation of ultrasonic driving circuit

经过增益的超声信号更便于判断局部放电的有无以及后期数据分析处理，为了检测超声信号增益设计的作用，分别以单独接探头(不加增益)，3 倍增益(低增益)，6 倍增益(中增益)，14 倍增益(高增益)四种情况为例，使用电火花发生器作为信号源，让超声传感探头探测不同位置的信号源所发出的信号，并记录对应的波形。以峰峰值为标准，得到增益前后超声信号变化对比如图 5 所示。

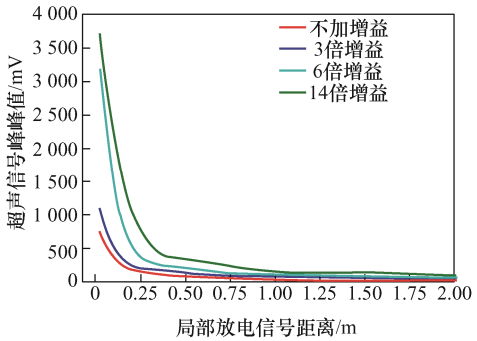

图 5 超声信号峰峰值增益前后变化对比

Fig. 5 Comparison of peak to peak amplitudes of ultrasonic signal with/without gain

经过实测，在信号不加增益的情况下，距离超声传感探头 0.7 m 以外已经很难检测到稳定信号，1 m 以外则根本不能触发；但是采用了增益以后，以 6 倍为例，在 2 m 以内都能稳定触发，2～3 m 也能触发但是不稳定，3 m 以外则完全不能触发。由此，通过采用增益可以将检测范围提升 3 倍。

2.2.2 紫外脉冲信号驱动电路设计与实现

紫外信号驱动电路的主要功能是为紫外传感器供电、对紫外脉冲波形进行整型和降低脉冲频率，从而将局部放电伴随的紫外光信号转化为TTL 电平的脉冲信号。紫外信号驱动电路原理如图 6 所示，其主要包括脉冲信号产生电路和脉冲信号调理电路两个部分。脉冲信号产生电路将紫外光信号转化为锯齿状的脉冲信号，脉冲频率约1 MHz。由于该频率对采样率及 STM32 主控模块的主频要求高，难以直接进行采集处理，因此通过脉冲信号调理电路对脉冲信号进行降频。脉冲信号调理电路主要包括了过电压保护电路、比较器和单稳态触发电路。脉冲信号调理电路将锯齿状的脉冲信号转化为标准 10 ms 高电平脉冲输出，即脉冲信号频率降为 100 Hz 左右。

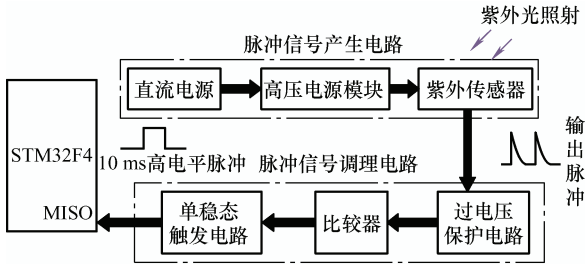

图 6 紫外脉冲信号驱动电路原理

Fig. 6 Principle of UV pulse signal driving circuit

2.3 STM32 主控模块

本系统采用 STM32F407ZGT6 作为主控芯片，其具有高性能、低成本和低功耗的特点[24]。该款 STM32F4 系列芯片包含高速的通信接口(USART、SPI 和 SDIO 等)和丰富的外设资源(TIMER、DMA 等)，可实现与显示屏、外置 ADC 和 SD 卡等设备的实时通信。并且相比 STM32F1 系列新增了硬件 FPU 单元以及 DSP 指令，同时，STM32F4 的主频也提高了很多，最高工作频率达到 168 MHz，这使得 STM32F4 尤其适用于需要浮点运算或 DSP 处理的应用[25]，能够满足本声光联合检测系统高速实时处理数据的需求。

2.4 电源模块

电源模块是高压电缆接头局部放电声光联合检测系统的供能来源，具有便携式、低功耗的特点。它由电池组和变压模块组成，电池组由五个18650 锂电池混联再加上一个控制电路组成，能够稳定输出声光联合检测装置所需的 12 V 电压，容量为 2 600 mA·h，总体积约为 70 cm³，质量约为 100 g，实现了系统的便携式；变压模块采用多个低压差线性稳压器、开关电容反相器(主要包括 TI 公司的 LM1117、LM2776 等芯片)，通过电压的转换以满足声光联合信号驱动模块中各芯片的供电需求。该电源模块直接为 STM32 主控模块中的嵌入式主板和显示屏供电，同时通过变压模块间接为传感探头上的声光联合信号调理电路供电。经实测整套系统功耗在 6 W 左右，电池容量能够满足整个系统连续工作 5～6 h，实现了系统低功耗设计。

3 系统软件设计

系统总体软件设计如图 7 所示。系统开机上电以后，先对各个模块进行初始化，然后实时采集超声波、紫外线信号，再对声光信号进行数据融合，并完成声光信号的实时存储、波形显示以及预警提示。

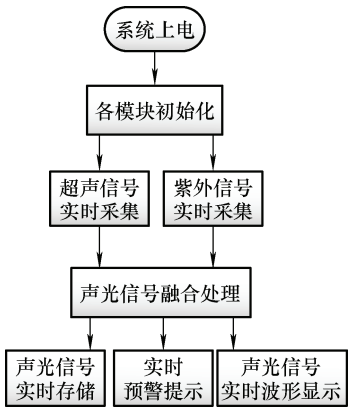

图 7 高压电缆接头局部放电声光联合检测系统软件设计

Fig. 7 Software design of partial discharge acousto-optic joint detection system for high voltage cable connector

3.1 超声信号高速采集

超声信号由模数转换模块 AD7988-5 转为数字信号，该数字信号由 STM32 主控模块通过 SPI 通信的模式进行接收。为提高主控芯片的处理速度，满足高速实时采集的需求，采用 SPI 硬件读

取的方式对 AD7988-5 转换后的数据进行实时读取，并同时使用直接访问寄存器(DMA)的方式将读取到的超声信号数据传输到指定寄存器。在主程序中，通过直接读取寄存器完成超声信号的实时高速采集。

3.2 基于脉冲捕获的紫外信号采集

紫外传感器 UV-R2868 接收到的紫外线信号经过脉冲信号调理模块后输出为脉冲信号，若采用常规的 AD 采集模式，数据读取将会耗费比较多的时间，同时存储也会占用一定的空间。考虑到方波信号的数字特性，采用定时器的输入捕获方式对脉冲信号的脉冲宽度、脉冲个数进行测量，即定时器通道捕捉到紫外驱动模块输出的脉冲信号，触发捕获中断，经中断函数处理返回脉冲上升沿、下降沿等信息，再通过主程序计算处理后得到脉冲个数、脉冲平均间隔和脉冲持续间隔。脉冲捕获方式比常规模数转换方式处理时间短，有效减少嵌入式 CPU 资源和紫外脉冲信号的存储空间的占用。

3.3 声光信号融合处理

通过声光信号融合处理进行局部放电检测，需要对声光信号进行可分辨性特征提取。超声信号可提取的可分辨性特征包括信号峰峰值和中心频率。其中峰峰值反映局部放电源的距离，通过 STM32 主控模块读取的数字信号幅值统计获得；中心频率反映局部放电信号的频率分布，通过对数字信号进行 FFT 获得。紫外脉冲信号可提取的可分辨性特征主要有脉冲个数、脉冲平均间隔和脉冲持续间隔。脉冲个数是指一次局部放电统计的脉冲信号个数，脉冲持续间隔是指一次局部放电捕获到的最后一个脉冲与第一个脉冲之间的间隔，脉冲平均间隔等于脉冲持续间隔除以脉冲个数。其中脉冲个数表示局部放电发生的频次，脉冲平均间隔表示局部放电源的距离，脉冲持续间隔表示局部放电持续的时间，这三个特征均通过分析脉冲信号的上升沿、下降沿信息获得。

信息融合能够将声光信号中各自包含的局部放电信息有机地结合起来，融合之后的信息具有更高的准确性。在得到两路信号之后，采用前面描述的可分辨特征提取方式，得到超声信号的峰峰值、中心频率值，以及紫外信号的脉冲个数、脉冲平均间隔和脉冲持续间隔，融合形成一个包含 5 个特征值的特征向量。再基于 K 最近邻算法 KNN 判断高压电缆接头处是否发生了局部放电。

KNN 是一种简单高效的机器学习算法，即给定一个训练数据集，对新的输入实例，在训练数据集中找到与该实例最邻近的 K 个实例，这 K 个实例的多数属于某个类，就把该输入实例分类到这个类[26-27]。本系统中训练数据集通过离线构建局部放电识别库，即预先对一定量的样本数据打上是否发生局部放电的标签，1 表示发生了局部放电，0 表示没有发生局部放电，样本数量取 1 000 个(局部放电信号和非局部放电信号各 500 个)。KNN 算法的 3 个基本要素是 K 值的选择、距离度量和分类决策规则。在本系统中 K 值取 3，距离度量选择欧氏距离，分类决策规则为对于系统实时采集到的超声、紫外信号融合形成的特征向量，从训练数据集中挑出与其距离最近的 K 个样本，然后看这 K 个样本多数属于哪一类(即局部放电信号或非局部放电信号)，则把声光融合信号归为该类标签下的信号。

3.4 实时存储、显示及预警

数据存储是为了方便后期开展局部放电离线数据分析的工作。本系统采集的声光数据使用 SD 卡进行实时存储。SD 卡驱动有 SPI 和 SDIO 两种模式，同等情况下 SDIO 模式读写速度要快于 SPI 模式。由于本系统需要实时存储大量声光传感数据，因此采用 SDIO 模式，同时结合 DMA 方式进一步加快数据的传输。为了方便 SD 卡文件的管理，移植了 FATFS 文件系统。为实现存储资源的高效利用，本系统只对有效的局部放电信号进行存储。当系统根据采集的声光信号实时判断为局部放电状态后，再启动存储操作。即先将数据转换为指定格式，再通过 FATFS 方式创建保存数据的文件，然后将声光传感数据用 DMA 的方式传输到 SD 卡，并写入创建的文件当中，从而完成 SD 卡实时保存声光数据。

声光信号实时动态显示主要是为了帮助维护

人员快速地掌握高压电缆接头局部放电状态信息，从而及时有效地作出决策判断。信号波形显示的数据通过串口通信进行传输，首先初始化配置好 STM32 主机端与显示屏端之间的通信参数，其中串口波特率均设置为 460 800 bit/s。当系统根据采集到的声光信号融合处理判断为局部放电信号后，将声光数据发送到显示屏端，以完成超声、紫外信号波形及分析数据的实时显示，并且显示屏界面的曲线根据局部放电状态的改变实时刷新，从而实现声光信号的实时动态显示。

为了提醒维护人员电力设备局部放电情况的发生，在局部放电检测分析中判断为局部放电信号后，显示屏状态指示图标由正常的绿色切换为红色预警状态，同时蜂鸣器“滴答”预警提示，否则处理为正常状态。

4 系统测试结果与分析

4.1 局部放电信号采集测试

搭建电力设备接头局部放电模拟实验平台，利用电火花模拟局部放电源进行局部放电信号采集测试。应用本文设计的局部放电声光联合检测系统对模拟信号源进行实时检测，得到超声信号时域波形、超声信号频谱和紫外脉冲信号分别如图 8、图 9 和图 10 所示。

三幅图中运行状态图标为红色表示当前判断为局部放电发生状态，当处于正常状态时图标为绿色。由图 8、图 10 可知，本系统成功捕捉并通过迪文串口屏显示了超声波时间信号、紫外脉冲信号波形，且均与示波器上显示的信号波形保持一致，另外超声波信号的持续时间 1 ms 也与理论值基本一致。由图 9 可知，本系统计算出的超声信号中心频率为 39 kHz 左右，符合超声传感器的频率响应范围 37～45 kHz。另外，经过实际测试，本系统中超声信号采样率为 162 kHz，根据奈奎斯特采样定理，满足了超声时间信号恢复的要求，也进一步说明了图 8 结果的准确性与可靠性。图 8 中超声波信号峰峰值为 2 V，表明局部放电强度较大，局部放电源在近端；图 10 中紫外脉冲个数为 5，脉冲平均间隔为 96 ms，脉冲持续间隔为 480 ms，表明局部放电频次、强度较大，并且持续时间长，局部放电源位置可通过进一步的数据分析获得。

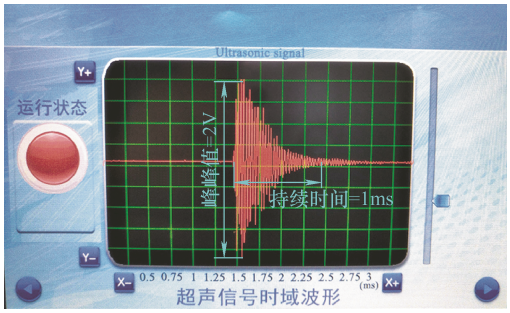

图 8 超声信号时域波形

Fig. 8 Time domain waveform of ultrasonic signal

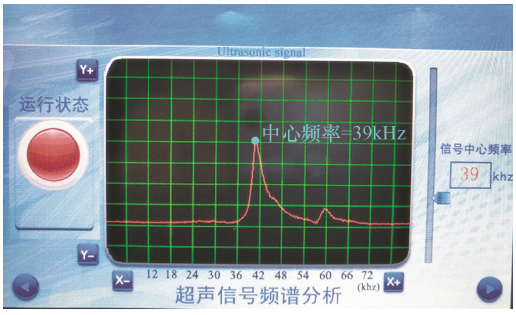

图 9 超声信号频谱分析

Fig. 9 Spectrum analysis of ultrasonic signal

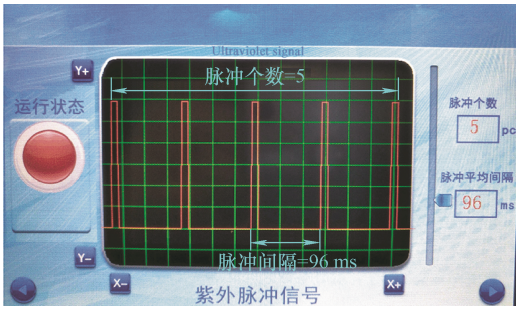

图 10 紫外脉冲信号

Fig. 10 Ultraviolet pulse signal

通过本检测系统超声信号和紫外信号波形的显示情况，若其中任意一路信号出现正常波形，则代表本系统在有效检测范围内，由此可以测定得到本系统的有效检测距离可达到 10 m。

4.2 局部放电源定位测试

根据超声信号和紫外脉冲信号特点，针对同

一局部放电强度的局部放电源，超声信号的峰峰值和紫外信号的脉冲平均间隔均可反映局部放电源到检测探头的距离，超声信号峰峰值越大，紫外脉冲平均间隔越小，局部放电源距离越近。

本系统测试中以电火花发生器作为局部放电源，分别在距离传感探头由近到远(0～10 m)各做100 组实验，考虑到较大的增益倍数，在近距离处会产生信号失真，较小的增益倍数又没有良好的增益效果。由图 4 的增益测试结果，6 倍增益是一个合适的超声信号放大倍数。将局部放电源放在不同距离处模拟局部放电，然后用探头检测超声信号的峰峰值和紫外信号的脉冲平均间隔，由此得到实验数据，再根据实验数据分析。本实验采用指数曲线拟合法，分别得到超声信号峰峰值、紫外信号脉冲平均间隔随局部放电源距离变化的曲线，具体结果如图 11 所示。在实际局部放电检测中，通过检测超声的信号的峰峰值和紫外信号的脉冲平均间隔就可以得到局部放电源的距离。

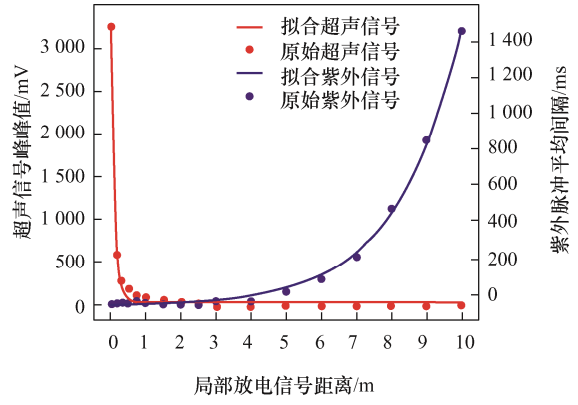

图 11 局部放电信号强度变化图

Fig. 11 Amplitude changes of partial discharge signal along with detection distances

曲线拟合的拟合度 R^2 计算如式(2)所示，其值越接近1 说明拟合效果越好，局部放电源定位越准确。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \tag{2}$$

式中，Y_i 为原始信号数据；y_i 为拟合值；$\bar{Y}$ 为原始信号数据的平均值。

计算得到超声信号曲线的拟合度为 93.97%，紫外信号曲线的拟合度为 96.54%。这两个指数曲线拟合结果说明，在局部放电源固定的情况下，超声信号的峰峰值、紫外信号的脉冲平均间隔均与局部放电源的距离成较好的指数对应关系。在实际检测过程中，可以利用该指数关系对不同距离检测到的超声和紫外信号进行校准，修正后得到对放电情况客观的检测结果。

根据拟合曲线，可以依据当前的超声信号峰峰值及紫外脉冲平均间隔两个量综合估计局部放电源的距离，从而可实现局部放电源的定位。具体地，可以将检测距离分为三部分，即近距离、中距离和远距离。在近距离(约 2 m 以内)处，紫外信号脉冲间距平稳，而超声信号峰峰值随距离增大而减小。因此在近距离处主要依靠超声信号的峰峰值来对局部放电距离作判断，紫外脉冲信号仅作为判断局部放电有无的依据。在中距离(约2～4 m)，在这一段距离范围内，超声波因衰减严重已影响正常检测，紫外脉冲信号主要作为局部放电距离检测的依据。在远距离处(4～10 m)，超声信号已经完全检测不到局部放电情况，这时主要由紫外脉冲信号检测局部放电的有无和局部放电发生的距离。

4.3 声光信号融合方法测试

局部放电产生、发展直至击穿需要一定的时间，因此局部放电检测应以破坏性放电检测为主[28]。针对局部放电处于的不同阶段，本文将局部放电类型事件状态分为三种：正常放电、小故障放电和大故障放电。其中正常放电对应于局部放电产生阶段，小故障放电对应于局部放电初期发展至中期阶段，大故障放电对应于局部放电中后期至濒临击穿阶段。应用本检测系统同步采集局部放电伴随的超声信号和紫外信号，通过特征提取与融合，结合 KNN 算法完成局部放电类型事件识别。

4.3.1 局部放电信号特征提取与融合

首先，对不同的局部放电类型建立局部放电类型事件数据库，如表 2 所示。

表 2 局部放电类型事件数据库

Tab. 2 Partial discharge event database

局部放电类型	样本数量	事件标签
正常放电信号	300	0
大故障放电信号	300	1
小故障放电信号	300	2

本系统针对局部放电超声信号提取 46 维特征，局部放电紫外信号提取 2 维特征，特征列表如表 3 所示。表 3 中 PSD 表示功率谱密度。对提取的局部放电信号特征共 48 维进行特征融合与选择。考虑特征维数、模型训练时间和对三类事件的总体识别率，本实验中采用递归特征消除法进行局部放电信号特征选择，最终得到 6 维高可分辨特征，包括了时域特征(方差、峰峰值、脉冲平均间隔)、频域特征(功率谱峰度)、变换域特征(MFCC-4)以及模型系数特征(AR5-5)。

表 3 局部放电信号特征列表

Tab. 3 Extracted feature list for partial discharge signals

特征类型	超声信号	紫外脉冲信号
时域特征	超声波峰峰值、首尾超声波时间差、超声波数量、冲击强度、短时平均能量和短时平均幅值	紫外脉冲个数、脉冲平均间隔
频域特征	超声波中心频率、中心频率强度、功率谱密度(PSD)幅度均值、PSD 形状均值、PSD 幅度标准差、PSD 形状标准差、PSD 幅度偏度、PSD 形状偏度、PSD 幅度峰度和 PSD 形状峰度	–
变换域特征	小波包能量谱(8 维)、梅尔倒谱系数(MFCC)(12 维)	–
模型参数特征	AR 系数(5 维)、线性预测(LPC)系数(5 维)	–

由于原特征矩阵维度较大，为了实现特征可视化，通过主成分分析(PCA)算法将特征空间降到低维度，得到局部放电类型事件特征空间分布如图 12 所示。可以看出，本文提取的特征能够有效地分辨三类局部放电类型事件。

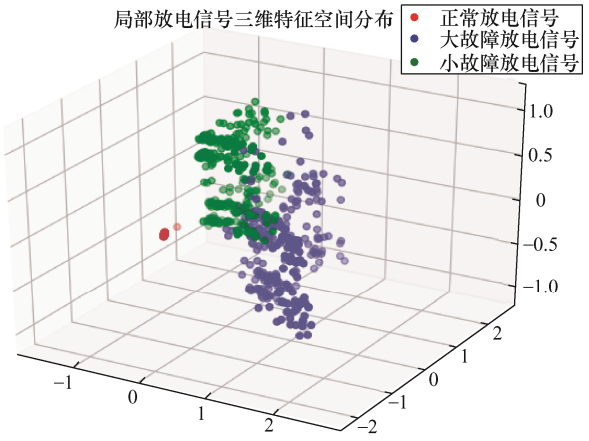

图 12 局部放电类型事件特征空间分布

Fig. 12 Characteristics distribution of partial discharge event in feature space

4.3.2 模型测试结果

本文以 KNN 模型为基础，欧氏距离作为距离度量指标、最近邻点设为 5，采取五折交叉验证，得到最终模型。

为验证特征融合后该模型的有效性，故将只选用超声信号特征的数据与只选用紫外信号特征的数据分别采用 KNN 分类模型训练，并将结果进行对比。这三个模型只有训练数据不同，其余模型参数均一致，对比结果如表 4 所示。

表 4 模型测试结果

Tab. 4 Test results for the proposed model

信号类型	平均准确率(%)	平均召回率(%)
超声信号	93.36	93.05
紫外信号	96.30	96.22
超声+紫外信号	98.78	98.80

由测试结果可知，经过超声、紫外信号特征融合后的模型，比使用单信号特征的模型，在平均准确率和平均召回率指标上均有显著的提升，系统对局部放电类型事件判断更加准确，从而为局部放电故障诊断与健康状态评估提供了良好的保证。

5 结束语

本文基于超声与紫外两种非电气局部放电检

测技术，设计并实现了一种抗强电磁干扰的低成本、高性能高压电缆接头局部放电声光联合检测系统。该系统通过同步采集局部放电伴随的超声和紫外光信号实现联合检测，利用超声传感技术实现近端局部放电信号的高灵敏、动态和精确捕获，利用空气中紫外光比超声信号衰减慢弥补超声的检测距离极限，综合实现了复杂电磁干扰环境下远距离、非接触、信息可靠和低成本的高压电缆接头处局部放电状态的实时动态检测。在实际测试中本系统具有良好的运行稳定性，能够准确实时地采集、显示信号波形，并对有效局部放电信号进行高速实时存储，在局部放电发生时进行实时预警，同时可以根据声光联合信号进行信号源定位，从而帮助维护人员实时了解高压电缆的运行状态并及时做好预防保护措施。**EA**

参考文献

[1] 曹俊平，王少华，任广振，等．高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J]．高电压技术，2018，44(11)：3720-3726．

[2] GULSKI E，SEITZ P P，BODEGA R， et al． On-site testing and PD diagnosis of HV power cables[C]. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Elactrical Isulation，IEEE，2008：650-653.

[3] BOGGS S，DENSLEY J．Fundamentals of partial discharge in the context of field cable testing[J]．IEEE Electrical Insulation Magazine，2000，16(5)：13-18．

[4] 胡建林，李洋洋，杨威，等．交流 110 kV 复合绝缘子高压端内部气隙尺寸对电场分布的影响[J]. 电网技术，2018，42(5)：1646-1653．

[5] 孙静．高压电力电缆局部放电检测技术研究[D]．上海：上海交通大学，2012．

[6] 张志东，宋建成．干式变压器局部放电在线监测脉冲电流传感器的开发[J]．电网技术，2011，35(2)：149-153．

[7] WANG G, KIL G S. Measurement and analysis of partial discharge using an ultra-high frequency sensor for gas insulated structures[J]. Metrology and Measurement Systems，2017，24(3)：515-524.

[8] 杨凯，钱勇，段玉兵，等．便携式电缆局部放电检测系统的研制[J]．电气自动化，2017，39(5)：78-80，108．

[9] TIAN Y，LEWIN P L，DAVIES A E. Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2002，9(4)：604-615.

[10] 辛晓虎，罗勇芬，杜非，等．用于油中局部放电定位的超声波接收阵列的定向算法比较[J]. 中国电机工程学报，2015，35(20)：5351-5359．

[11] 种俊龙. 电气设备紫外放电检测及其强度评估方法研究[D]．重庆：重庆大学，2016．

[12] 邹辉，黄福珍．基于改进 FAsT-Match 算法的电力设备红外图像多目标定位[J]. 中国电机工程学报，2017，37(2)：591-599．

[13] 张秀丽，骆平，莫逆，等．接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]．中国电机工程学报，2008(19)：152-156．

[14] 彭向阳，梁福逊，钱金菊，等．基于机载红外影像纹理特征的输电线路绝缘子自动定位[J]．高电压技术，2019，45(3)：922-928．

[15] 陈学军，杨永明，汪金刚，等．基于超声法的大电机局部放电监测系统及其仿真验证[J]．电力系统自动化，2010，34(20)：84-88．

[16] 刘云鹏，李岩松，黄世龙，等．基于光纤传输的气体绝缘开关设备局部放电超声波检测系统[J]. 高电压技术，2016，42(1)：186-191．

[17] HAN G R, JEON J C, PARK J M. Cast-resin transformers: development of health assessment technique based on electromagnetic partial discharge detection[J]. Electrical Engineering，2019，101(4)：1211-1220.

[18] CAO Z, TANG J, ZHOU Y, et al. SF_6 decomposition components under different metallic free-conducting wire-type particles in positive DC partial discharge[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering，2019，14(2)：214-220.

[19] 冯彩．基于声电联合的 GIS 局部放电检测与故障定位研究[D]．淄博：山东理工大学，2018.

[20] MARKALOUS S M，TENBOHLEN S，FESER K. Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals[J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2008，15(6)：1576-1583.

[21] 唐民富.开关柜局部放电特高频法与脉冲电流法联合检测分析[J]．湖南电力，2016，36(5)：73-76.

[22] 杨照光. 基于紫外脉冲法的绝缘子放电检测的研究[D]. 保定：华北电力大学，2010.

[23] 马立新，浦荣杰，陶鹏举，等. 局部放电紫外检测量化分析系统的设计及应用[J]. 电力科学与工程，2014，30(3)：35-38.

[24] 马俊淇，刘燕，佟宝同，等．无线便携式脉象检测系统设计[J]．传感器与微系统，2018，37(5)：87-90.

[25] 刘火良，杨森．STM32 库开发实战指南：基于 STM32F4[M]．北京：机械工业出版社，2017.

[26] 陈敬德，李峰，孙源文，等．基于 KNN 和 MSR 的局部放电模式识别研究[J]．电气技术，2018，19(1)：10-14.

[27] 付文龙，周建中，李超顺，等．基于模糊 K 近邻支持向量数据描述的水电机组振动故障诊断研究[J].中国电机工程学报，2014，34(32)：5788-5795.

[28] 郑华敏. 基于 TMS320F2812 的便携式局部放电在线监测仪研制[D]. 天津：天津大学，2009.

作者简介：

唐 波

唐波(1994—)，男，硕士研究生，主要研究方向为输变电高压电缆绝缘状态检测。

(收稿日期：2020-11-11)