

DOI: 10.7652/xjtuxb201810012

基于可听声波的 GIS 击穿点定位方法

孙泽明, 庞培川, 张芊, 孙善源, 侯志强, 张轩瑞, 李军浩
(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高气体绝缘组合开关(GIS)击穿点定位的效率和有效性,基于空间可听声波提出了一种实施简单、定位准确的 GIS 击穿点二维定位方法。通过分析 GIS 击穿可听声波的特点,提出了确定声波信号到达不同传感器时延的峰值-阈值法。采用 3 个声波传感器的一形布置方式,结合空间算法搭建了无接触式的 GIS 击穿点数字化定位系统,并应用于 330 kV GIS 现场试验。研究表明,GIS 内部发生击穿时会向外辐射可听声波,声波的时域波形具有明显的高幅值脉冲,频域波形主要分布在 2~8 kHz,明显区别于背景噪声并为 GIS 击穿点的定位提供可用信息。330 kV GIS 的应用结果表明,定位系统的定位误差小于 5%,与超声波、特高频等接触式定位方法相比降低了 GIS 击穿点定位的难度和成本,为 GIS 击穿点的现场定位提供了一种新的思路。GIS 击穿点的定位结果受到声波传播衰减、传感器系统位置和遮挡物的影响,实际应用中需合理布置定位系统以提高定位结果的有效性和准确性。

关键词: 可听声波;气体绝缘组合开关;击穿;定位方法;峰值-阈值法
中图分类号: TM83 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)10-0088-07

Location Method of Breakdown Points in GIS Based on Audible Sound Waves

SUN Zeming, PANG Peichuan, ZHANG Qian, SUN Shanyuan,
HOU Zhiqiang, ZHANG Xuanrui, LI Junhao
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Traditional contacted GIS breakdown point location methods require a large number of sensors and have poor anti-interference ability. In the withstand voltage test for a GIS, especially in the impulse voltage test, these methods cannot locate the breakdown point in most cases. In order to improve the efficiency and effectiveness of the positioning, this paper puts forward a simple and accurate two-dimensional location method of breakdown points in GIS based on the theory of spatial audible sound waves. By analyzing the characteristics of acoustic waves from the breakdown of GIS, a peak-threshold method to determine the time delay of a GIS breakdown sound wave arriving at different sensors is presented. The digital positioning system is set up by using the horizontal arrangement of three acoustic sensors, and the sensors have no physical contact with the detected GIS. Results show that the acoustic waveform caused by GIS breakdown has an obvious high amplitude impulse in time domain, and mainly distributes from 2 kHz to 8 kHz in frequency domain, which can be clearly distinguished from the background

noise and provide useful information for localization. Experimental results of 330 kV GIS show that the location error of the proposed system is under 5%, and compared with the ultrasonic and UHF location methods, the audible sound method reduces the difficulty and cost in positioning of breakdown points in GIS. The attenuation of waveform, the position of the sensor system and the barrier between GIS and the positioning system may influence the positioning result, so the positioning system should be reasonably arranged in practical application.

Keywords: audible sound waves; GIS; breakdown; location method; peak-threshold method

由于气体绝缘组合开关(GIS)具有占地面积小、不受大气环境影响、安装方便以及安全性高等优点,因此被广泛应用于电力系统中^[1-2]。随着 GIS 安装数量的增加,由 GIS 故障引起的电力事故随之增多。对投运的 GIS 设备进行现场耐压试验,可以有效地诊断其绝缘状态,保证安全运行^[3-6]。在耐压试验过程中,对 GIS 击穿点的有效定位可以快速判断故障气室,为后续维修提供依据^[7-8]。

目前,对于 GIS 故障点的定位主要采用超声波法、特高频法或二者结合的方法^[9-12]。此类定位方法是在 GIS 各个气室的外壳上布置传感器,通过检测比较 GIS 故障时各传感器接收到信号的幅值或时延来确定放电点的位置。但是,随着电压等级的提升,GIS 设备的长度增加至几十米甚至上百米,现场使用超声波或特高频法进行定位时,需要布置大量的传感器,费时费力^[7]。此外,与 GIS 外壳紧密接触的传感器容易受到现场干扰信号的影响,实际应用中常出现定位失败^[13-15]。所以,急需一种实施简单、定位准确的 GIS 击穿点现场定位方法。

本文利用声波传感器,与 GIS 无接触式测量可听声波,通过空间定位算法,实现了 GIS 冲击耐压试验时击穿点的有效定位。本文方法大大降低了现场定位难度和定位成本,为 GIS 的现场击穿定位提供了一种新的思路。

1 击穿点定位方法

1.1 定位系统

GIS 内部绝缘缺陷发生击穿时,会引起缺陷周围介质的剧烈振动,产生高幅值的声波信号^[7,16],该声波信号包含人耳可听的频段范围(0.01~20 kHz)。可听声波相比于超声波(>20 kHz)在传播中信号衰减较小^[17],所以可利用传感器与待测设备无接触地进行信号测量,使声波传感器免受 GIS 击穿时的强电磁信号干扰。

基于可听声波的 GIS 击穿点定位系统如图 1 所示。利用驻极体电容式声波传感器,测量 GIS 击

穿时产生的可听声波信号,然后通过 A/D 采集器将传感器输出的电压信号转换为数字信号,传输至上位机进行分析,基于空间定位算法得到击穿点的位置。本文所使用传感器的测量范围为 0.01~20 kHz,灵敏度为 45.96 mV/Pa,动态测量范围可达 140 dB。传感器的工作温度为-20~70℃,空气湿度小于 90%。

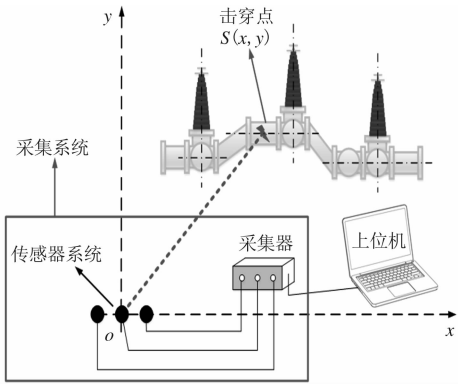


图 1 击穿点定位系统示意图

1.2 定位算法

当定位系统与 GIS 击穿点位于同一水平平面、或二者之间的距离远大于水平高度差时,在误差允许的范围内仅需要确定 GIS 击穿点相对于定位系统某点的两个维度的坐标,即可确定击穿点的准确位置,实现 GIS 击穿点的二维定位。

在平面直角坐标系中,设第 k 个声波传感器的坐标为 (x_k, y_k) ,声源点 S 的坐标为 (x, y) 。令声速为 v ,GIS 击穿时声波信号的发出时间为 t_0 ,声波信号到达第 k 个声波传感器的时间为 t_k ,则有如下方程成立

$$(v(t_k - t_0))^2 = (x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 \quad (1)$$

将式(1)改写为极坐标方程,有

$$(v(t_k - t_0))^2 = (r\cos\theta - x_k)^2 + (r\sin\theta - y_k)^2 \quad (2)$$

由于在实际测量过程中,很难得到声波信号的发出时间 t_0 ,只能得到声波信号到达两个声波传感器的时间差(或称时延),因此式(2)可以改写成基于时延的公式,以图 2 中的声波传感器 A_1 和 A_2 为

例,有

$$(v(t_1 - t_0))^2 = (r \cos \theta - x_1)^2 + (r \sin \theta - y_1)^2 \quad (3)$$

$$(v(t_2 - t_0))^2 = (r \cos \theta - x_2)^2 + (r \sin \theta - y_2)^2 \quad (4)$$

设 $\Delta_{1,2}$ 为声波信号到达两个传感器的时间差,则有

$$\Delta_{1,2} = t_1 - t_2 = \frac{\sqrt{(r \cos \theta - x_1)^2 + (r \sin \theta - y_1)^2}}{v} - \frac{\sqrt{(r \cos \theta - x_2)^2 + (r \sin \theta - y_2)^2}}{v} \quad (5)$$

由式(5)可知,通过该定位算法确定声源点的二维坐标时,未知量为声源点到极坐标原点的距离 r (下文简称方位距离)和声源点偏离极坐标轴的角度 θ (下文简称方位角),即得到两个未知量的一个,就可以解得另一个未知量。

近似求解声波信号到达两个传感器连线中点角度的计算方法如图2所示^[18]。图中 o 点为传感器 A_1 、 A_2 的中点,直线 A_1M 、 A_2N 与直线 So 垂直, $\theta_{1,2}$ 即为图中 $\angle SoA_2$ 。当 $A_2P/A_1A_2 \geq 10$ 且 $SP/A_2P \geq 2$ 时, $\angle A_1SA_2$ 将小于 2.3° ,即 A_1S 与 MS 的误差小于 0.1% ,此时可以认为 $\overline{MN}$ 为击穿点 S 到达传感器 A_1 、 A_2 的路程差。满足以上条件时,在全等三角形 $\triangle A_1oM$ 和 $\triangle A_2oN$ 中由数学计算,可得

$$\theta_{1,2} = \arccos(v\Delta_{1,2}/A_1A_2) \quad (6)$$

利用该方法求得脉冲信号到达两个传感器连线中点的角度 θ 后,将 θ 带入式(5),即可得到声源点相对于两传感器连线中点 o 的极坐标。为便于理解,本文定位结果以平面直角坐标系下 GIS 击穿点相对于定位系统中心的二维坐标表示。

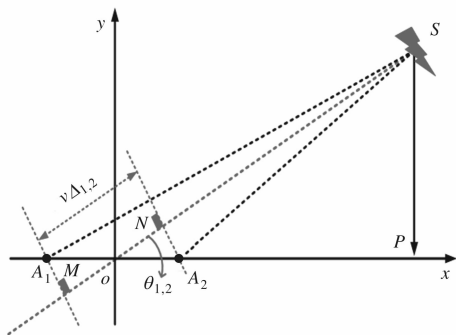


图2 方位角的确定方法示意图

1.3 基于峰值-阈值法的时延计算

在冲击电压试验中,GIS 击穿时发出的可听声波(下文简称 GIS 击穿可听声波)具有明显的、区别于背景声波的高幅值脉冲,如图3所示,其频域波形主要集中在 $2 \sim 8$ kHz,区别于变电站中无大型设备

工作时的背景声波(< 2 kHz)。该信号能够作为 GIS 击穿点定位的有效信息。试验结果表明,现场 GIS 击穿可听声波信号的幅值在 85 dB 以上,为了避免背景噪声对定位结果的影响,应控制试验现场的背景噪音幅值在 83 dB 以下。

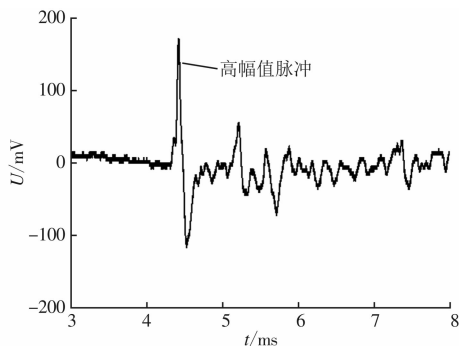


图3 冲击电压下的 GIS 击穿可听声波时域波形

在确定 GIS 击穿声波信号到达各传感器的时延后,为了提高定位效率、减少计算参考点选取时引入的误差,本文先使用能量谱和窗口法对声波信号进行预处理,最后采用峰值-阈值法来选择声波信号的时延计算参考点。

由费马最短光程原理可知,信号的起始点是沿最短光程、历经最小传播时间最先到达的子波的波前反映^[8-9]。该点被认为是声波到达声波传感器的有效信号点,并且在数据处理和分析中具有最高的可信度。所以在确定时延 $\Delta_{1,2}$ 时,一般在各传感器采集到的第一个高幅值脉冲上选取计算参考点。

为获得准确的时延 $\Delta_{1,2}$,需要选择两个声波传感器采集到的相同的波形片段,但是由于传感器的自身误差和人工选择误差,最终导致所选的波形片段不可能完全一致。因此,为了提高工作效率,一般选择两个声波传感器采集到的相似波形上达到某阈值(如峰值)的信号点作为时延计算的参考点。

综上所述,在选择时延计算的参考点时,可以在信号的第一个高幅值脉冲波形的峰值附近设置阈值,选择最先到达阈值的信号点作为计算参考点。这样的选择既利用了费马最短光程原理中起始信号最准确的理论,又利用了高幅值脉冲信号在峰值附近容易选取参考点的特点,从而简单有效地筛选出可信的计算参考点。结合这种筛选方法的特点,本文将该方法称为峰值-阈值法。

例如,在确定如图4所示的信号时延时,在声波信号起始的第一个波峰附近选择计算参考点,设置阈值为峰值的 75%,即 -1.5 V,最终获得计算参考点 a 、 b ,并计算得出信号时延 $\Delta_{a,b}$ 。

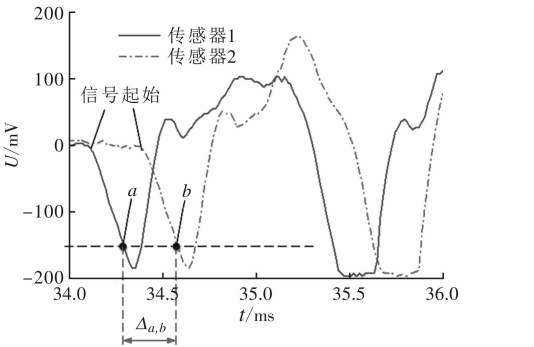


图 4 利用峰值-阈值法确定时延示意图

1.4 传感器布置方式的选择

利用两个声波传感器计算方位角 θ 时,常出现误差较大的定位结果。所以为了提高定位精度,本文增加传感器数量,选择了如图 5 所示的 4 种传感器布置方式。根据传感器布置方式的特点,将 4 种布置方式分别称为矩形布置、L 形布置、I 形布置、一形布置。

按照图 5 所示的布置方式,将传感器布置在 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的区域内,即设置传感器间距为 0.2 m ;设置定位装置的定位中心为坐标系的原点,即图中的 o 点;在平面直角坐标系下设置击穿点的坐标为 $(2.5\text{ m}, 6.0\text{ m})$,满足式(6)的近似要求;选择冲击电压下的 GIS 尖-板类型击穿声波作为声源;时延计算参考点的选取使用峰值-阈值法。

试验结果表明,4 种布置方式对于方位距离的定位结果很不理想,平均定位误差均大于 40% ,但是对于方位角的定位结果却很准确,这在一些研究中也有所体现^[18-20]。因此,本文对于 GIS 击穿点的二维定位围绕其方位角的定位结果进行。

当使用 4 个声波传感器,传感器 $A_1A_2A_3$ 、 $A_2A_3A_4$ 可以组成双重一形布置方式,如图 6 所示,此时方位角的平均定位误差增大至 20.1% ,方位距离的平均定位误差为 94.1% 。经分析,两个一形布置系统的定位误差在运算中累积最终增大了定位结果总误差,所以不能在同一个定位系统中利用两个方位角求解方位距离。

为了更加清晰地分析和比较图 5 所示的各布置方式的方位角定位误差,本文对各种布置方式下的多组定位结果做归一化分析。即将各种布置方式下最小的定位误差定义为误差等级 0,把各自最大的定位误差定义为误差等级 10,并以误差等级为自变量、方位角的定位误差为应变量绘制关系曲线,最终对该曲线进行线性拟合,得到各种布置方式下的方位角定位误差曲线。

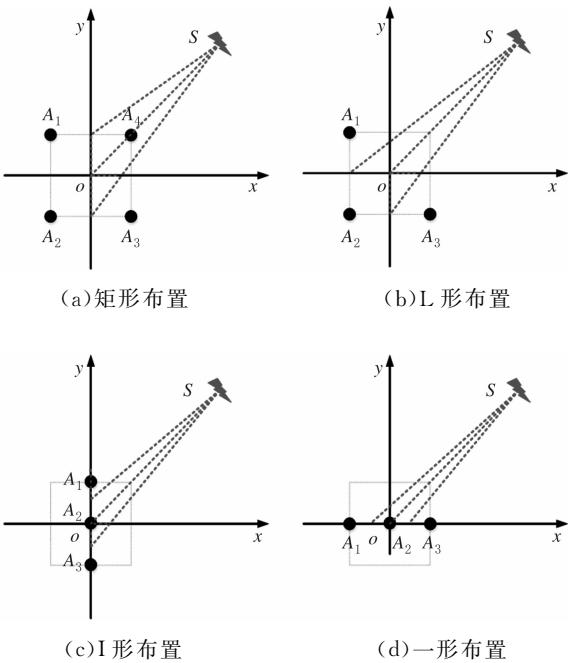


图 5 声波传感器四种布置方式示意图

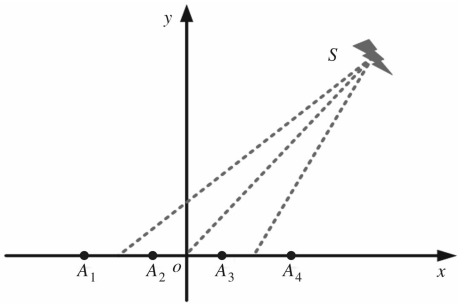


图 6 传感器双重一形布置方式示意图

归一化分析后的结果如图 7 所示,4 种布置方式中除了 L 形布置方式外的其他 3 种布置方式的方位角定位误差均能控制在 7% 以下,即利用矩形布置、I 形布置、一形布置方式能够较为准确地得到 GIS 击穿点 S 相对于传感器矩阵中心 o 的方位角。

由于传感器一形布置方式的方位角定位误差最小,并且只需要使用 3 个声波传感器,所以本文选择该方式应用于现场试验。在获得声源点相对与定位系统中心的准确方位角后,测量得到 GIS 和定位系统的相对距离,最终通过软件分析可得 GIS 击穿点的准确二维坐标。例如,在获得图 2 中的 $\theta_{1,2}$ 后,通过测量得到 SP 的长度,即可通过计算得到 GIS 击穿点 S 相对于 o 点的二维坐标为 $(SP, SP/\tan\theta_{1,2})$ 。

2 定位案例

2.1 单定位系统

为验证定位系统的有效性,本文对如图 8 所示

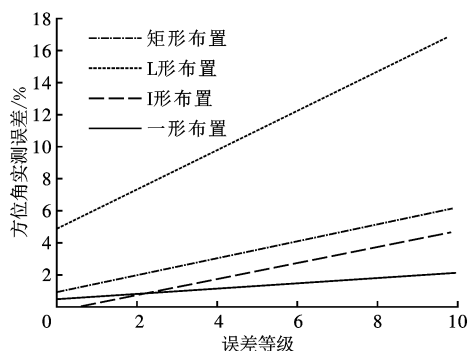


图7 归一化分析后的方位角定位误差曲线图

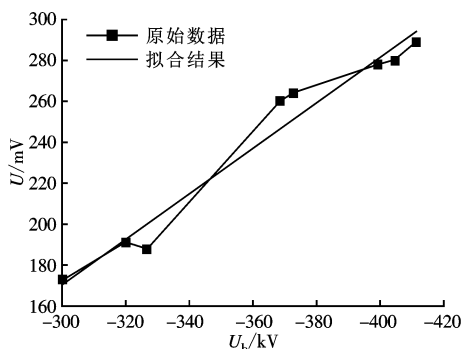


图9 330 kV GIS 击穿电压与声波信号幅值关系

的 330 kV 电压等级的 GIS 进行击穿点定位测试。设置 GIS 和定位系统的相对距离为 6 m, 定位系统使用 3 个声波传感器的一形布置方式确定击穿点的方位角。试验时, GIS 内充有 0.4 MPa 的 SF_6 气体, 对该 GIS 进行正常的负极性冲击电压耐压试验, 当冲击电压峰值设置为 -600 kV 时, GIS 发生击穿。为获得该定位系统的定位精度, 在 GIS 击穿后间隔 10 min 对 GIS 施加负极性冲击电压使之击穿, 从而得到定位系统的定位误差分布。



图8 330 kV GIS 现场试验示意图

GIS 的解体结果表明, 击穿点相对于定位器系统中心的方位角为 80.86° , 二维坐标为 (0.97 m, 6 m)。定位系统的平均定位误差为 5.1%, 最好定位结果为 (0.93 m, 6 m), 定位误差为 0.3%。

GIS 击穿声波幅值与负极性击穿电压的关系曲线如图 9 所示, 二者近似呈线性关系。设可听声波信号的幅值为 U 、GIS 的击穿电压值为 U_b , 拟合结果为 $U = -161 - 1.1U_b$ 。所以, 在利用本文的传感器系统进行高电压等级 GIS 的击穿点定位时, 应根据 GIS 的电压等级将传感器系统合理地远离 GIS 本体, 以保证传感器采集到信号合适且易于处理的声波波形。由于 GIS 击穿时会向外辐射高频电磁干扰, 将传感器系统远离 GIS 能够减少电磁干扰对传感器的影响。

2.2 双定位系统

利用单个传感器一形布置的定位系统, 能够获得 GIS 击穿点准确的方位角, 如图 10 所示, 在 GIS 两侧同一水平线上布置两个一形布置定位系统, 组成双定位系统。两个定位系统的定位中心分别为 O_1 和 O_2 , SO_1O_2 中与边 O_1O_2 相连的夹角 $\angle SO_1O_2$ 和 $\angle SO_2O_1$ 即 θ_1 和 θ_2 , 其中 θ_1 和 θ_2 可以通过定位系统准确得到, O_1O_2 的长度可以人为设置, 最终求解 SO_1O_2 , 即可得到准确的方位角 θ 和方位距离 r 。

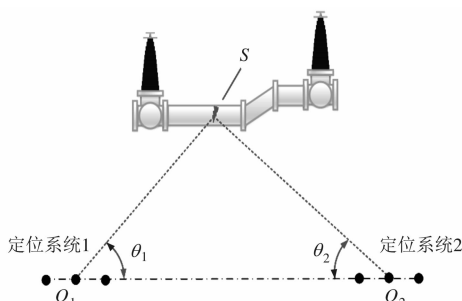


图10 双定位系统定位方法示意图

在 330 kV 和 500 kV 电压等级 GIS 进行冲击耐压试验时, 使用双定位系统进行 GIS 击穿点的定位。试验结果表明, 该定位方法对方位角的平均定位误差为 3.2%, 对方位距离的平均定位误差为 4.5%, 满足实际应用的要求。

为了方便对比双定位系统与单定位系统的二维定位结果, 选取各定位系统具有代表性的定位结果, 以各定位系统方位角的定位误差为横坐标、方位距离的定位误差为纵坐标, 绘制各定位系统的定位误差分布。如图 11 所示, 通过对比可得, 双定位系统的二维定位误差范围比单定位系统要小得多, 并且双定位系统对于方位距离 r 和方位角 θ 的定位误差都控制在了 5.0% 以下。综上所述, 使用两个一形布置定位系统能够实现 GIS 击穿点准确的二维定位。

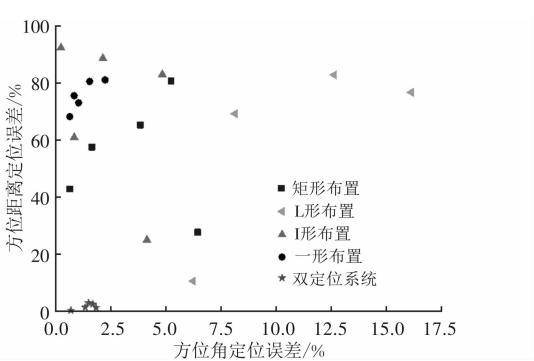


图 11 各定位系统的定位误差分布

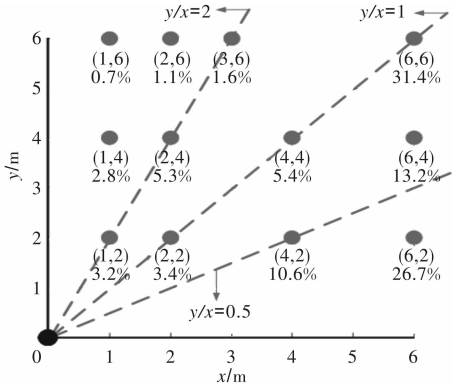


图 13 传感器系统不同布置位置的定位误差示意图

3 定位结果的影响因素

3.1 GIS 击穿声波信号的衰减

GIS 击穿声波的幅值随距离的衰减规律如图 12 所示,设击穿声波幅值为 U ,传感器距离击穿点的距离为 L ,拟合结果为 $U=159.3/L^{0.45}$ 。当声波传感器距离 GIS 击穿点 0.5 m 时,声波信号幅值接近传感器最大输出幅值而饱和;距离 3 m 时,声波信号幅值衰减至传感器量程的一半。本文所用传感器的最佳输出量程为 ± 200 mV,结合定位装置在 $1/3\sim 2/3$ 量程内的定位结果较为准确这一普遍规律,声波传感器与 GIS 本体的距离应控制在 1.4~6.9 m 之间,以保证采集到准确且易于处理的声波信号。

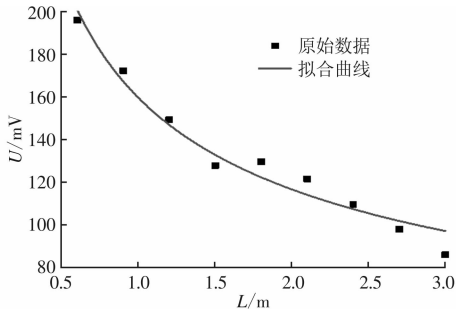


图 12 GIS 击穿声波幅值随距离的衰减规律

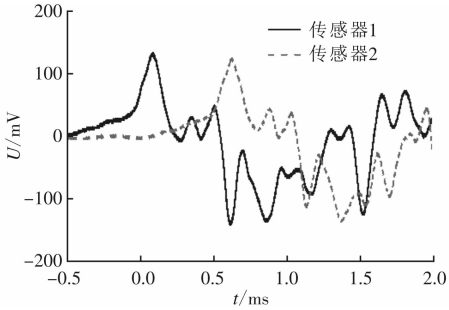
3.2 传感器系统的位置

传感器系统在不同位置对同一 GIS 击穿声波的定位结果如图 13 所示。以击穿点(1,6)为例,图 13 中击穿点下方的(1,6)为击穿点坐标,坐标下方的数字 0.7%为该击穿点的定位误差。

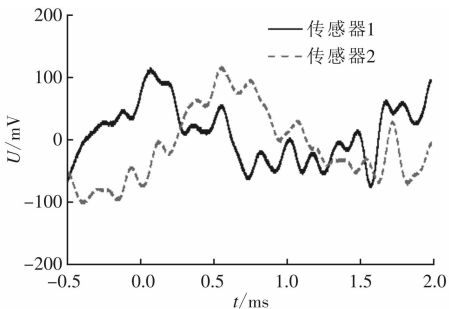
根据前文所述,传感器系统距离击穿点的纵向距离不小于横向距离的两倍时,即图 13 中 $(y/x) \geq 2$ 时,由算法引入的误差可以忽略不计。如图 13 所示,方位角的定位误差随着 y/x 的增大而减小,所以当待测 GIS 较长时,应适当增加传感器系统与 GIS 本体的距离。

3.3 遮挡物的影响

在 GIS 与传感器系统之间无遮挡物时,如图 14a 所示,采集到的声波波形较尖锐,具有明显的脉冲性质。在 GIS 与传感器之间设置木质遮挡物,遮挡物均匀分布有 $0.5\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 的孔洞,采集到的声波波形如图 14b 所示。跨越障碍物后,GIS 击穿声波波形变得平缓,幅值也相应降低。



(a)无遮挡波形



(b)有遮挡波形

图 14 遮挡物对声波波形的影响

经分析,上述现象是由于在声波跨越障碍物时,跨过的声波是原始声波在障碍物附近新产生的球面波^[7,21],这使得声波波形畸变,变得更加平滑。这样的改变会对数据处理带来影响,造成定位不准确和定位失败。试验结果表明,遮挡前后的平均定位误差由 4.1% 增加到了 16.9%。所以,在利用声波进行 GIS 击穿点定位时,应该尽量保证 GIS 本体与传

传感器系统之间无遮挡物。

4 结 论

本文基于空间可听声波,研究了GIS击穿点的二维定位方法,提出了获取声波到达不同传感器时延的峰值-阈值法。本文所使用的定位系统与待测GIS无物理接触,避免了GIS击穿时对传感器系统的强电学干扰。该定位系统使用3或6个声波传感器,即可实现整台GIS的击穿点定位,降低了现场应用的定位难度和定位成本。

研究表明:GIS在冲击电压击穿时会向外辐射可听声波,该声波的时域波形具有明显的高幅值脉冲,频域波形主要分布在2~8 kHz,能够明显地区别于背景噪声,并且为GIS击穿点的定位提供可用信息。

本文选择传感器的一形布置方式搭建了GIS击穿点定位系统,应用结果表明:单定位系统的平均定位误差为5.1%,但需要额外测量定位系统与GIS的相对距离;双定位系统的二维定位误差小于5%,满足现场的实际需要。

GIS击穿点的定位结果受声波传播衰减、传感器系统位置和遮挡物的影响,所以在实际应用中应尽量保证试验场地空旷、减少背景噪音,布置传感器系统与GIS本体中心的距离在1.4~6.9 m,并且使二者的纵向距离不小于横向距离的两倍,从而提高定位精度,得到可信的定位结果。

参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006:252-281.
- [2] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京:中国电力出版社,2007:148-172.
- [3] International Electrotechnical Commission. High voltage test technique-partial discharge measurement: IEC 60270—2000[S]. Geneva, Swiss: International Electrotechnical Commission, 2000.
- [4] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 局部放电测量: GB/T 7354—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [5] 冯昌远. GIS的运行经验和现场试验[J]. 高压电器, 2000, 36(1): 49-53.
FENG Changyuan. Operation experience and field test of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(1): 49-53.
- [6] 史志侠. GIS现场试验的现状与发展[J]. 高压电器,

2001, 37(4): 42-45.

SHI Zhixia. Situation and development of on-site tests for gas insulated substation[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(4): 42-25.

- [7] 陈敏,白尧,汪涛,等. GIS设备击穿放电定位技术与现场应用[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 81-90.
CHEN Min, BAI Yao, WANG Tao, et al. Technology research and field applications of GIS equipment breakdown discharge location[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 81-90.
- [8] 陈敏,卢军,陈隽,等. GIS局部放电源的时差定位方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 46-50.
CHEN Min, LU Jun, CHEN Jun, et al. Research on localization method of partial discharge source in GIS based on time difference[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 46-50.
- [9] 高文胜,丁登伟,刘卫东,等. 采用特高频检测技术的局部放电源定位方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2680-2684.
GAO Wensheng, DING Dengwei, LIU Weidong, et al. Location of PD by searching in space using UHF method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2680-2684.
- [10] 曾雄杰,刘旭明,黄文武,等. 超声波局放监测在GIS耐压局放试验中的应用[J]. 中国电力, 2014, 47(8): 13-20.
ZENG Xiongjie, LIU Xuming, HUANG Wenwu, et al. Application of ultrasonic-based PD monitoring system in the test of withstanding voltage and PD[J]. Electric Power, 2014, 47(8): 13-20.
- [11] 郭洁. GIS绝缘故障诊断方法的应用研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013: 26-50.
- [12] 刘君华,姚明,黄成军,等. 采用声电联合法的GIS局部放电定位试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2458-2463.
LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2458-2463.
- [13] 孙强,董明,任重,等. 现场用GIS冲击耐压试验及局部放电检测装置设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 639-644.
SUN Qiang, DONG Ming, REN Chong, et al. Field test and analysis of partial discharge on GIS under impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 639-644.

(下转第109页)