

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.028

GIS局部放电智能巡检定位技术及应用

牛 勃, 马飞越, 丁 培, 陈 磊, 魏 莹, 伍 弘, 马 波

(国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750001)

摘要: 为及时诊断出GIS运行过程中的绝缘缺陷,文中依据变电站巡检机器人与带电检测设备设计了一套变电站GIS局部放电智能巡检定位系统。其中GIS局部放电巡检系统通过特高频智能检测系统对内置式特高频传感器所检测局部放电信号进行采集;之后以无线通信的方式与搭载采集终端的巡检机器人通信,并将相应的数据上传至云端,实现局部放电信号的一次定位和长期跟踪。GIS局部放电定位系统基于GIS的筒型结构、声电信号的频带差、速度差以及定位示波器无线通信功能,采用Labview与MATLAB软件完成局部放电缺陷的声电联合二次高精度定位。试验证明:文中所设计的GIS局部放电智能巡检定位系统具有较高的检测灵活性与定位精度,可以应用于带电检测过程中GIS内部局部放电缺陷的跟踪定位。

关键词: GIS; 声电联合定位; 巡检机器人; 内置式特高频传感器; 无线通信

Intelligent Inspection and Location Technology of GIS Partial Discharge and Its Application

NIU Bo, MA Feiyue, DING Pei, CHEN Lei, WEI Ying, WU Hong, MA Bo

(Power Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: To detect the insulation defects existing in the GIS operation process in time, this paper designs a substation GIS partial discharge intelligent inspection and location system based on the substation inspection robot and the live detection equipment. The GIS partial discharge inspection system acquires the partial discharge signal detected by the internal UHF sensor through the UHF intelligent detection system, and then communicates with the inspection robot equipped with the collection terminal by wireless communication. Upload to the cloud to achieve long-term tracking of partial discharge signals. The GIS partial discharge location system designs a set of high-precision fast sound and electric joint positioning system through Labview and Matlab, which is based on the GIS cylinder structure, the frequency and speed difference of the acoustoelectric signals, and the wireless communication function of the positioning oscilloscope. The experiment demonstrates that the GIS partial discharge inspection and location system has high detection flexibility and location accuracy, the technique can be applied to the tracking and location of PD defects inside the electrical equipment during live detection.

Key words: GIS; acoustoelectric position; inspection robot; internal UHF sensor; wireless communication

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的巡检维护是其安全可靠运行的基本保障,依据中电联对2016—2018年GIS非计划停运事件的统计分析,导致GIS非计划停电的主要原因是其内部各种绝缘缺陷引起的局部放电(partial

discharge, PD)^[1-3]。为了及时检测GIS运行过程中的绝缘缺陷,避免单相接地、相间短路等事故发生给电力设备安全稳定运行带来巨大威胁,目前主要通过超声波局部放电、特高频局部放电等带电检测的手段对其进行检测,其中由于特高频局部放电信号频带高、抗干扰能力强,在GIS设备中衰减较超声波小。同时,国家电网公司十八项反措规定,220 kV

及以上电压等级GIS设备均应装内置式特高频传感器与对应的在线监测装置。由于在线监测系统的不稳定性、运行维护成本高以及取能不变导致其没有在现场得到广泛应用,相应的内置式特高频传感器基本处于闲置状态,仅用于带电检测过程与外置式特高频局部放电信号进行比对分析^[4-6]。

随着GIS设备快速发展,状态检测成本逐渐增加,智能巡检技术得到了快速发展。目前,330 kV及以上电压等级基本配置了智能巡检机器人,主要用以完成输变电设备的红外热像检测、可见光检测、气体成分检测等,没有对GIS设备内部的局部放电信号进行巡检。从而,基于目前广泛应用的变电站巡检机器人对与闲置的内置式UHF传感器进行GIS设备运行状态监测,完成GIS设备的局部放电巡检,并且配合不同的局部放电定位手段完成GIS缺陷的定性具有一定实际应用价值。

在GIS内局部放电定位方面目前主要研究方向包括新型传感器研制与定位算法的研究两方面。文[7-8]提出在不影响GIS内部电场和内置UHF传感器的性能的基础上,采用嵌入光纤传感器的方法完成局部放电检测。该方法相比于传统内置式UHF传感器检测方法具有较高的检测灵敏度与检测精度,但GIS结构较长、传感器接入位置受限,且光信号检测精度随检测距离增加呈现非线性衰减,同时老旧变电站改造难度大,不易加装该种光电复合传感器进行在线监测^[9-11]。在定位算法方面主要通过特高频的平分面法与超声波的幅值法进行声电组合式定位,该种定位手段操作方便且具有较高的定位精度,但其主要应用于GIS壳体与或内部导电杆的定位,盆式绝缘子上缺陷该种定位方法定位精度较低。目前的主要研究方向为对到达时间差法时延误差的消除,相关减小误差算法包括粒子群优化算法、插值相关法、神经网络法、多样本能力搜索法以及概率估计法等^[12-17]。

在局部放电巡检方面目前针对AIS设备,在GIS局部放电巡检方面研究较少。山东电科院提出采用巡检机器人对变电站敞开设备进行检测,巡检项目主要红外热像检测、开关状态检测、外观检测、声音异常检测等^[18-19]。文[20-21]提出了移动式UHF天线阵列的变电站站域放电源检测与定位方法,该种定位方法主要应用AIS设备。国网宁夏电科院提出基于云平台带电检测车的射频定位方法,通过带电检测车的变化提升了局部放电的巡检效率。

基于此,基于声电信号的频带差、速度差以及变电站巡检机器人、内置式特高频传感器、云平台、

粒子群优化算法设计了一套GIS局部放电智能巡检定位系统,完成GIS内局部放电的快速、高精度定位。

1 GIS局部放电智能巡检定位

基于GIS设备的特殊结构,文中所设计GIS局部放电智能巡检定位系统主要包括局部放电的智能巡检与智能定位两部分。智能巡检由巡检机器人、内置式特高频传感器以及云平台等组成,智能定位基于传统带电检测传感器以及人工智能算法。相应的巡检定位流程见图1。

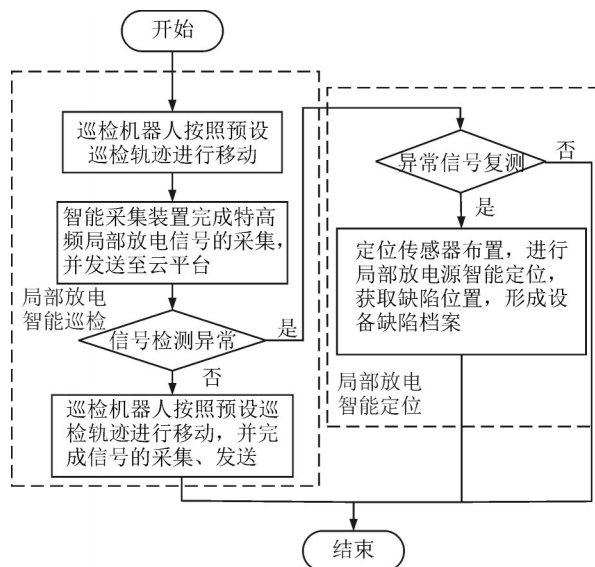


图1 GIS局部放电智能巡检定位流程图

Fig. 1 Flow chart of GIS PD intelligent inspection

由图1知,该系统由基于内置式UHF传感器的局部放电智能巡检系统与声电联合定位系统两部分组成,其中GIS局部放电智能巡检系统通过巡检机器人对内置式UHF局部放电信号进行周期性的采集、上传,定位系统通过局部放电过程中声电信号的频带差与传播速度差完成局部放电的高精度定位。

2 UHF局部放电巡检系统

2.1 智能检测模块设计

智能检测模块用以对GIS某一时段的UHF局部放电信号进行采集,其主要由三频滤波模块、信号调理模块、通讯模块、电源模块等组成。相应的设计结构与实物见图2。由图2知,智能采集模块将GIS内置式UHF传感器采集到UHF局部放电信号进行滤波、放大、A/D转换、信号分析计算等处理,之后将处理信号通过内部通讯模块发送至数据采集设备。同时,该智能检测模块与传统带电检测特高频传感器相结合,可以对GIS盆式绝缘子浇注口处

的特高频进行检测,最终实现变电站全站GIS设备的特高频巡检。

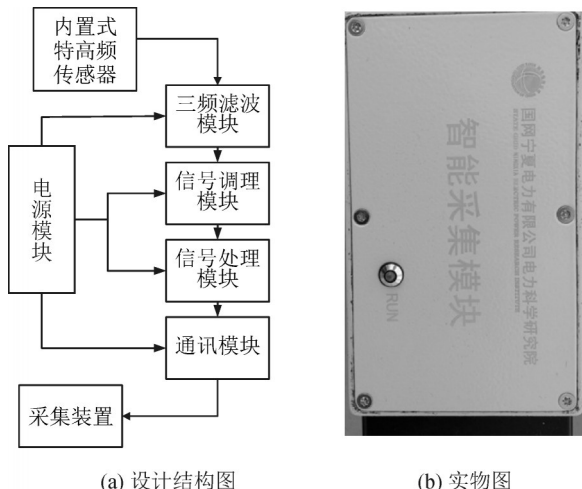


图2 局部放电信号智能采集模块设计

Fig. 2 Design of intelligent acquisition module for

PD signal

2.2 信号接收模块设计

巡检机器人巡检过程中的巡检位置满足智能检测模块与信号接收终端的通信距离后,采集装置通过4G无线网络的方式接收智能采集模块发送的数据,并实现数据的分析、存储、显示和上传等,其主要组成见图3。

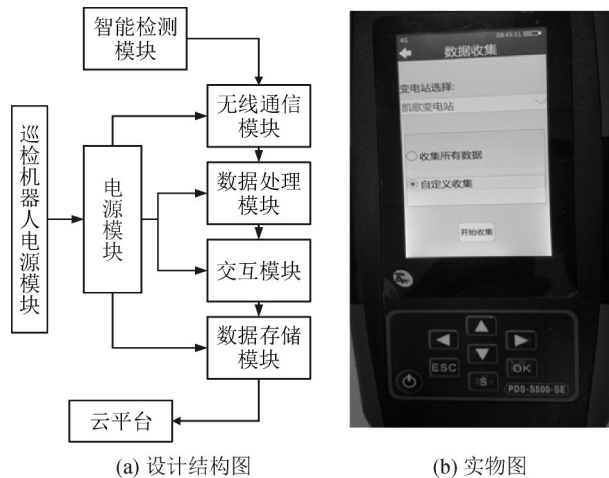


图3 信号接收装置设计

Fig. 3 Design of signal receiving device module

由图3知,智能检测模块采集到UHF局部放电信号分别通过无线通信、数据处理、交互、数据存储之后,最终将信号发送至云平台,进行局部放电的跟踪、分析。

2.3 云平台设计

云平台用以对信号接收终端所接收的局部放电信号进行分析,便于实时跟踪分析缺陷的发展趋势^[22]。相应的云平台设计方案见图4。



图4 云平台模块设计方案

Fig. 4 Design of cloud platform module

依据图4云平台设计方案知其主要由区域I—区域VI等模块组成,完成变电站通信状态检测、变电站数据接收、历史报警信息与局放图谱信息检测、局部放电信号发展趋势分析以及局部类型统计,最终形成站内GIS缺陷数据库。

2.4 巡检方案设计

基于变电站巡检机器人以及所设计的内置式UHF传感器智能检测模块,GISUHF局部放电信号巡检流程见图5。

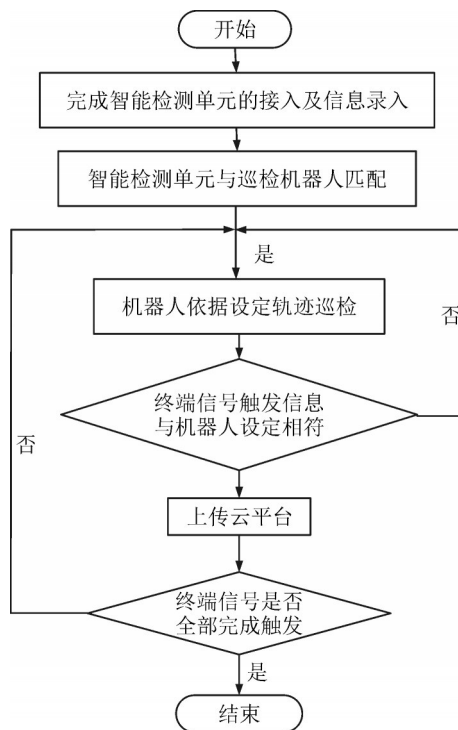


图5 GISUHF局部放电巡检流程图

Fig. 5 Flow chart of GIS UHF PD inspection

由图5 GIS巡检流程图知,在文2.1、2.2节基础上,还需将智能检测单元的位置信息与巡检机器人进行匹配,之后按照其巡检路径以及搭载的信号接收装置完成数据的采集上传,便于对GIS的运行状态进行实时监测。相应的智能巡检模式应用见图6。

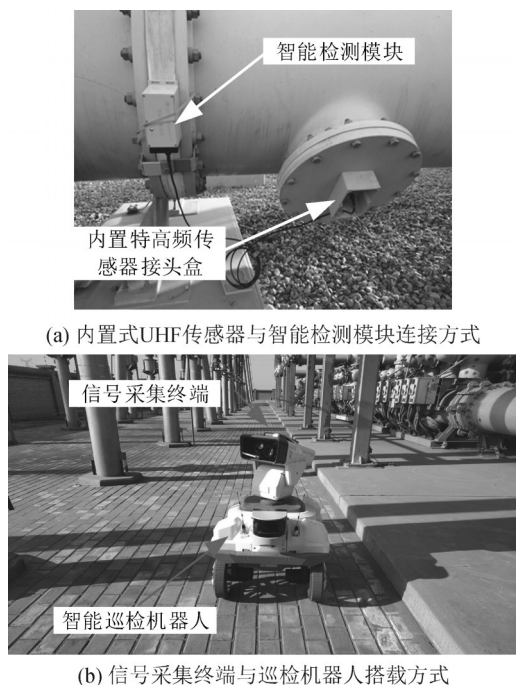


图6 内置式UHF传感器局放信号巡检模式设计

Fig. 6 Design of UHF sensor PD signal inspection mode

3 声电联合定位系统

文中所设计GIS声电联合定位系统以UHF作为触发源,通过声信号与电信号之间的频带差异与传播速度差异完成定位[23-25]。依据GIS机械结构、传统带电检测仪器,将分别从声电联合定位建模、声电联合定位结果优化以及声电联合定位系统设计3个方面进行介绍。

3.1 声电联合定位建模

同变压器、开关柜等局部放电声电组合式定位方法不同,GIS声电联合定位法以UHF作为触发信号,通过AE传感器阵列对局部放电源进行定位。文中以GIS隔离刀闸盆式绝缘子为例进行建模,相应的声电联合定位模型见图7。

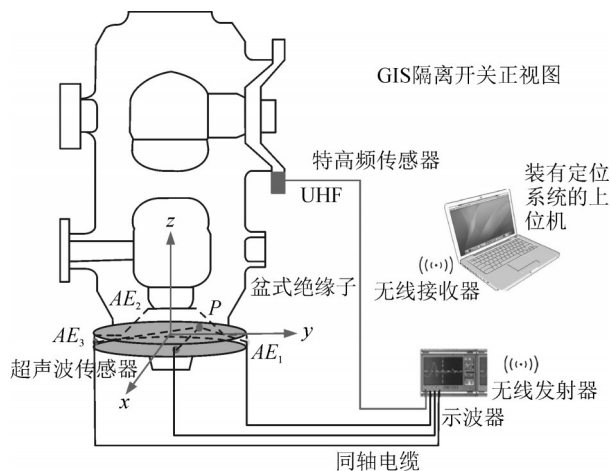


图7 GIS声电联合定位模型

Fig. 7 Model of acoustoelectric position in GIS

设图7中超声波传感器阵列 AE_i 坐标为 (x_i, y_i, z_i) ; D_{t_i} 为声信号与电信号时延差; t_i 为超声波阵列检测信号与基准UHF局部放电信号时间差; l_i 为GIS筒壁厚度, l 为直达波在不同材料中对应的衰减系数,取值范围为 $0 \sim 1$; (x, y, z) 为局部放电源坐标; c 为超声波信号在介质中的速度。图5所示定位模型局部放电源求解方程见式(1)、(2)。

$$\Delta t_i = (t_i - \lambda l_i) \quad (1)$$

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} = c \Delta t_i \quad (2)$$

考虑现场定位过程中定位与计算方便,超声波传感器阵列之间角度相差 120° 或者 90° 。受传感器坐标与外界干扰信号等影响使式(2)不存在有效解时,文中采用PSO法寻找最优解。

设 P 为GIS内部缺陷存在位置, $\|\cdot\|_2$ 表示欧式范数, $\|AE_i - P\|_2$ 为真实局部放电源至超声波传感器之间的实际距离。相应的GIS内局部放电源坐标寻优函数见式(3)。

$$f(P)_{\min} = \sum_{i=1}^L |c \Delta t_i - \|AE_i - P\|_2| \quad (3)$$

式(3)中, L 为超声波传感器阵列的数量,通过全局搜索 $f(P)_{\min}$ 可得局部放电源 P 的空间坐标。

3.2 声电联合定位结果优化

声电联合定位过程中超声波局放电信号易受外界振动、传感器滑动以及外界噪声等影响,导致超声波信号起始沿畸变严重。目前减小时延偏差的方法有小波变换法、小波包络法、神经网络法、粒子群优化法以及能量累积法等,其中能量累积法主要用于初步定位判断信号畸变时刻,而粒子群优化主要应用于定位坐标的优化与求解,从而文中将通过PSO使定位结果进一步收敛,提升局部放电源的定位精度。

根据解析几何知,基准AE传感器 $AE_0(x_0, y_0, z_0)$ 与PD源初使定位坐标点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 之间的直线方程见式(4)。

$$\frac{x - x_1}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_0} = \frac{z - z_1}{z_1 - z_0} \quad (4)$$

同理得其余超声波传感器 AE_i 至PD源初使定位坐标的空间直线方程,由于各初始定位坐标不同,从而上述空间直线均为异面直线组,仅当PD源初始定位坐标与实际PD源位置相同时各异面直线组重合,相应局部放电源至各异面直线之间的距离见式(5)。

$$d = \sum_{k,l=1}^{N,3} d_{kl} \quad (5)$$

式(5)中, $k=1, 2, \dots, N$ 为定位初值点样本个数; l 为传感器个数; d_{kl} 为局部放电源到第 k 个定位初值与第 l 个传感器确定直线之间的距离, 相应的 PSO 寻优为根据初始样本值寻找式(5)最小值。根据空间几何知识可得定位距离 d_{kl} 。

$$d_{kl} = \frac{|PP_k \times P_k AE_l|}{|PAE_l|} \quad (6)$$

式(6)中: 向量 $PP_k = (x - x_k, y - y_k, z - z_k)$; $P_k AE_l = (x_k - x_l, y_k - y_l, z_k - z_l)$; 点 $P(x, y, z)$ 、 $P_k(x_k, y_k, z_k)$ 、 $P_l(x_l, y_l, z_l)$ 。从而式(6)可等价表示为式(7)。

$$d = \sum_{k,l=1}^{N,4} \frac{|PP_k \times P_k AE_l|}{|PAE_l|} \quad (7)$$

从而, 仅需寻找式(7)最小值及其对应的坐标参数, 即可得局部放电源的空间位置坐标。

3.3 声电联合定位硬件系统设计

目前, 电气设备局部放电定位仪器主要通过高速采样示波器获取局部放电信号时延, 之后采用平分面法进行定位。基于此, 文中所设计声电联合定位硬件系统依靠 DPO 4104 示波器作为声电信号采集装置, 之后采用无线路由器将采集的局部放电信号上传至上位机进行分析。相应的声电联合定位硬件系统见图 8。

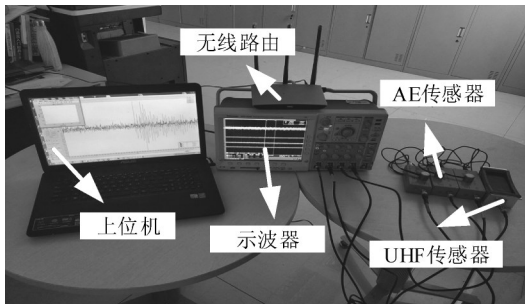


图 8 声电联合定位系统

Fig. 8 Acoustoelectric position system

图 8 所搭建的定位系统均基于常规带电检测仪器, 相比常规带电检测具有现场安装方便, 定位精度高, 能够直接用于大多数 GIS 变电站局部放电的定位检测。

3.4 声电联合定位软件系统设计

文中所设计声电联合定位软件系统基于 MATLAB 与 Labview, 其中 Labview 主要完成信号的采集与局部放电信号初始时延的获取, MATLAB 用于定位坐标的求解与优化。相应的软件系统设计流程图见图 9。

图 9 中, UHF 传感器采集到的波形信号畸变时刻及超声波传感器采集到的波形信号畸变时刻分别采用能量累计法与周期窗最大峰值法获取, 最终

得到精确的 UHF 波形畸变时刻 t_0 , 超声波畸变时刻 t_1 、 t_2 、 t_3 。

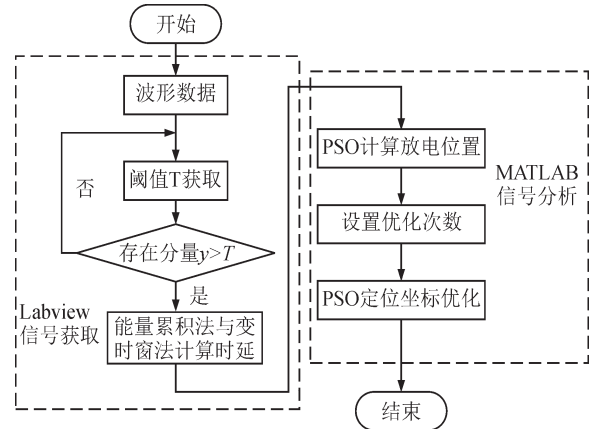


图 9 声电联合定位软件设计流程图

Fig. 9 Acoustoelectric position software design flow chart

3.4.1 能量累积法确定畸变发生时间

设示波器一个采样时间段内采集到的波形信号为 Y , 每个采样点信号的幅值为 y_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, 时间间隔为 D_i , 每个时刻的累积能量 e_i 为

$$e_i = \sum_0^i y_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

由式(8)知, 若无畸变信号, 累积能量应线性增长, 否则能量将发生突变, 相应的累积能量变化梯度见式(9)。

$$\begin{cases} d_i = 0 & i = 1 \\ d_i = e_i - e_{i-1} & i = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

设 T_1 为预设阈值, 取使得梯度大于阈值的最小时间 i , 此时 i 为初始畸变发生时间点, 则

$$t = \min_i \{d_i > T_1\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

即 $t=i$ 为最小的梯度大于阈值的时间点, 由于超声波在同一介质中的频率固定, 此时定位的畸变时间点一般为峰值处, 定位误差较大。为了防止 T_1 阈值过大, 导致初步定位时间偏后, 即定位到畸变发生后的第 2 个峰值处, 从而需通过周期窗时间法对定位时间进行进一步优化。

3.4.2 周期窗最大峰值法

设采集到的信号点总数为 n , 对累积能量法中得到的畸变时间点 t , 取 $t-n/10$ 之前的所有能量累计变化梯度 d_i , $i = 1, 2, \dots, t-n/10$, 找到值最大的梯度 $\max\{d_i\}$, 计算新的阈值 T_2 。

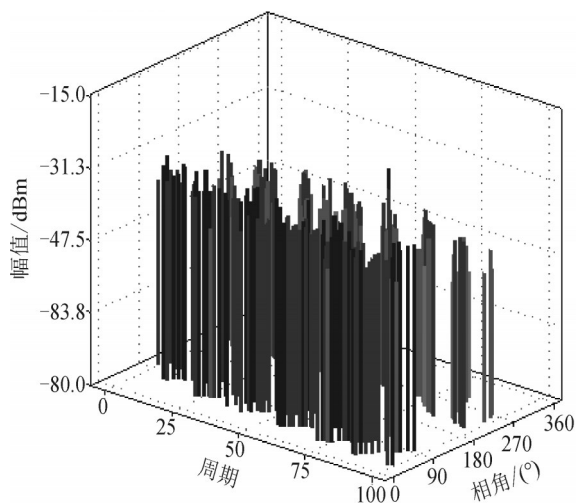
$$t = \max_i \{y_i\} \quad i = t - p/2, \dots, t + p/2 \quad (11)$$

式(11)中, p 超声波在介质中的传播周期, 在畸变时间点 t 附近一个周期内搜索波形的峰值时间点, 将其设为信号时延起始点。

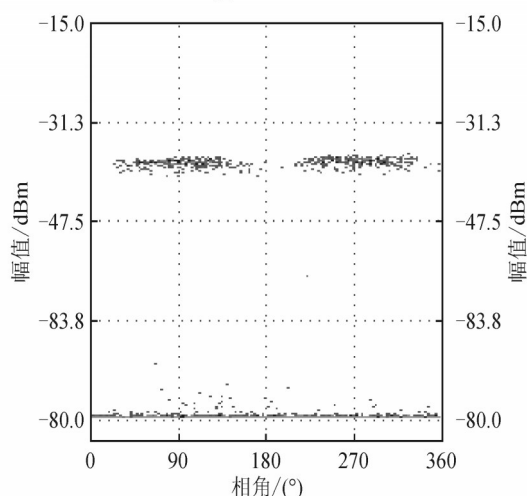
4 实例分析

4.1 试验背景

某 220 kV 变电站巡检过程中检测到编号为 XXX 的 GIS 隔离刀闸附近存在异常 UHF 信号, 之后试验人员采用多功能局部放电测试仪进行 UHF 局部放电信号复测, 相应的特高频局部放电检测图谱见图 10。



(a) PRPS图谱



(b) PRPD图谱

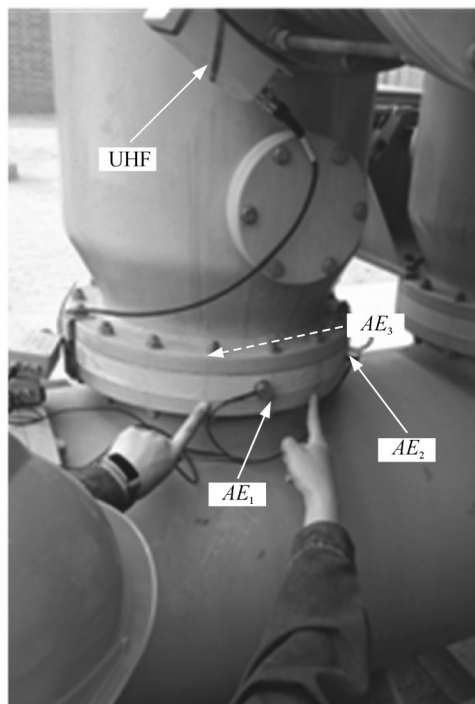
图 10 UHF 检测图谱

Fig. 10 Atlas of ultra high frequency testing

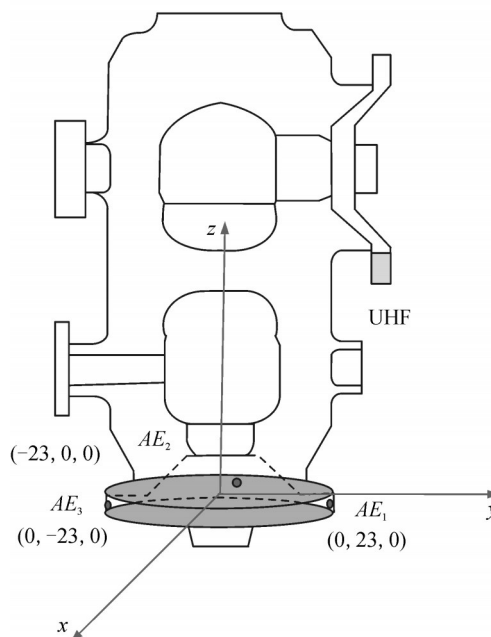
由图 10 PRPS 与 PRPD 检测图谱分析, 该隔离刀闸存在悬浮放电, 从而根据前述 GIS 声电定位系统对缺陷在 GIS 内部的具体位置进行定位、分析。

4.2 声电联合定位

根据异常间隔 GIS 布置方式以及浇注口位置, 相应的 UHF、AE 传感器布置位置见图 11。其中 AE 传感器采用间隔为 90° 的圆形阵列结构布置。



(a) 传感器布置阵列图



(b) 传感器布置三维模型

图 11 传感器布置阵列

Fig. 11 Sensor layout array

根据异常气室内部结构分析, 超声波信号将分别以直达波与复合波的形式传至 AE 传感器, 相应的声电联合定位图谱见图 12。

通过前述声电联合定位系统求解放电缺陷在盆式绝缘子上具体位置并进行 PSO 优化, 最终声电联合定位检测结果与 PSO 优化轨迹分别见表 1 与图 13。

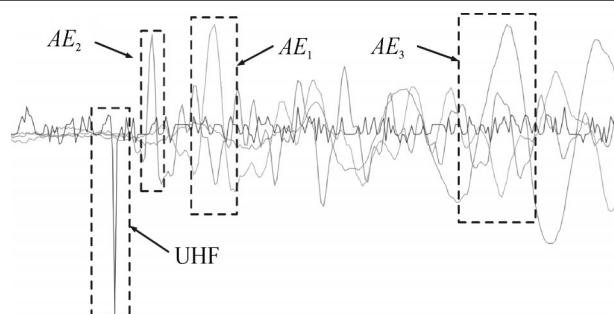


图12 声电联合定位系统检测图谱

Fig. 12 Atlas of acoustoelectric position system

表1 声电联合定位检测结果

Table 1 Acoustoelectric position test results

序号	时延/ 10^{-5} s	定位坐标/cm
1	(19.2,13.1,29.3)	(-11.63,6.44,6.07)
2	(17.4,12.1,32.3)	(-13.85,9.73,0.83)
3	(17.8,11.9,34.2)	(-15.83,11.21,2.38)
4	(17.4,12.7,29.3)	(-11.03,7.31,1.25)
5	(18.5,13.8,32.5)	(-13.38,9.39,7.06)
6	(18.3,13.9,31.8)	(-12.63,8.89,6.86)
7	(17.7,13.5,32.5)	(-13.22,9.77,5.42)
8	(19.7,11.7,28.7)	(-14.37,7.83,5.57)
9	(20.8,11.5,29.5)	(-13.65,5.76,6.32)
10	(18.7,12.4,35.7)	(-17.32,12.16,2.43)
PSO 优化结果		(-13.41,8.96,6.01)

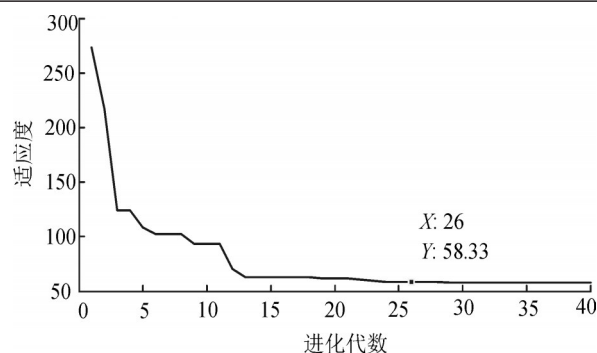
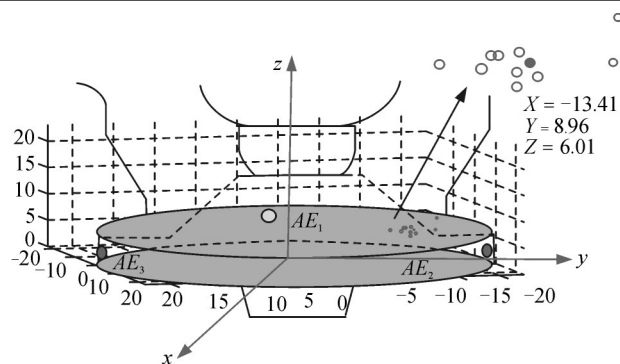


图13 PSO优化收敛轨迹

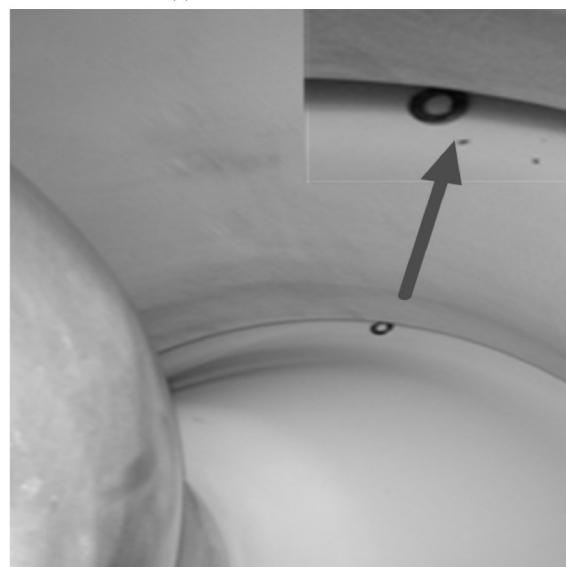
Fig. 13 Optimization convergence track of PSO

与表1声电联合定位检测结果相对应的缺陷位置见图14(a)。解体后在该气室盆式绝缘子表面相应位置发现异常放电体,相应放电缺陷位置以及放电体见图14(b)。

由表1声电联合定位结果与图14(a)、(b)异常GIS解体结果知,声电联合定位法定位结果与GIS内部缺陷位置相符,具有较高的缺陷定位精度,验证了文中所设计GIS设备局部放电智能巡检定位技术的可行性。



(a) 局部放电缺陷定位坐标



(b) 解体后放电缺陷位置

图14 异常局部放电位置

Fig. 14 Position of abnormal partial discharge

5 结论

基于目前变电站智能巡检机器人、GIS设备内置式特高频传感器及GIS定位方法的研究,文中设计了一套GIS局部放电智能巡检定位系统,通过现场应用可得如下结论:

1)该系统可以完成GIS运行过程中UHF传感器测点局部放电信号的长时间采集、跟踪,并且通过与变电站巡检机器人巡检路径的嵌入可以完成GIS设备内局部放电的初始定位。

2)在GIS巡检基础上,通过对局部放电产生声电信号之间的频带差异与速度差异分析,设计了一套针对GIS筒型结构的声电联合定位系统,并采用粒子群算法对定位结果进行二次优化,在定位精度与定位灵活性方面较传统平分面法与声电组合式定位方法高。

参考文献:

- [1] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review of partial discharge detection technology for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601
- [2] 孙曙光, 陆俭国, 俞慧忠, 等. 基于超高频法的典型GIS局部放电检测[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 7-12.
SUN Shuguang, LU Jianguo, YU Huizhong, et al. Detection of typical GIS partial discharge based on UHF method[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 7-12.
- [3] 唐志国, 唐铭泽, 李金忠, 等. 电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 173-187.
TANG Zhiguo, TANG Mingze, LI Jinzhong, et al. Review on partial discharge pattern recognition of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 173-187
- [4] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS结构尺寸对局部放电特高频信号的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2850-2854.
DING Dengwei, GAO Wenshen, LIU Wendong. Influence of structure dimension of GIS on UHF signal of partial discharge[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2850-2854.
- [5] 任重, 董明, 肖智刚, 等. 检测GIS局部放电的超高频微带贴片天线设计[J]. 绝缘材料, 2013, 46(5): 74-79.
REN Zhong, DONG Ming, XIAO Zhigang, et al. Design of ultra high frequency micro-strip patch antenna for detecting GIS partial discharge[J]. Insulating Materials, 2013, 46(5): 74-79.
- [6] 牛勃, 马飞越, 周秀, 等. ± 800 kV换流变压器在线监测信号的异常分析与处理[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 245-252.
NIU Bo, MA Feiyue, ZHOU Xiu, et al. Analysis and treatment of on-line monitoring abnormal signal in ± 800 kV converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 245-252.
- [7] 唐炬, 曾福平, 范庆涛, 等. 基于荧光光纤检测GIS局部放电的多重分形谱识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 465-473.
TANG Ju, ZENG Fupin, FAN Qintao, et al. Multifractal spectrum identification of partial discharge in GIS based on fluorescence optical fiber detection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 465-473.
- [8] 韩旭涛, 刘泽辉, 李军浩, 等. 基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6760-6768.
HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6760-6768.
- [9] 侯慧娟, 盛戈皞, 孙岳, 等. 基于电磁波信号传播衰减模型的变电站局部放电定位方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 326-332.
HOU Huijuan, SHENG Gehao, SUN Yue, et al. The localization method of partial discharge in substation based on propagation and attenuation model of electromagnetic signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 326-332.
- [10] 彭超, 雷清泉. 局部放电超高频信号时频特性与传播距离的关系[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 348-353.
PENG Chao, LEI Qinqun. Relationship between characteristic in time and frequency domain of partial discharge ultra-high frequency signals and the radiation distance[J]. High Voltage Engineering, 2013, 29(10): 348-353.
- [11] 朱明晓, 薛建议, 邵先军, 等. GIS局部放电特高频信号波形分析与特征参量提取[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 4079-4087.
ZHU Mingxiao, XUE Jianyi, SHAO Xianjun, et al. Waveform analysis and feature extraction of partial discharge UHF signals in GIS insulated switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4079-4087.
- [12] HE S, DONG X. High-accuracy localization platform using asynchronous time difference of arrival technology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2017(99): 1-15.
- [13] THOMAS R R, MAHARAJ B T, ZAYEN B, et al. Multi-band time-of-arrival positioning technique using an ultra-high-frequency bandwidth availability model for cognitive radio[J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2013, 7(5): 544-552.
- [14] 唐炬, 陈娇, 赵晓星. 用于局部放电信号定位的多样本能力相关搜索提取时间差算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 125-130.
TANG Ju, CHEN Jiao, ZHANG Xiaoxing. Multi-sample energy correlation search for extracting time difference algorithm for PD signal localization[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 125-130.
- [15] 汤林, 胡岳, 王红斌, 等. 基于插值相关法的局部放电特高频脉冲信号时延估计[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3320-3325.
TANG Lin, HU Yue, WANG Hongbin, et al. Time delay estimation of partial discharge UHF pulse signals based on interpolation correlation method[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3320-3325.
- [16] ZHU M X, XUE J Y, ZHANG J N, et al. Classification and separation of partial discharge ultra-high-frequency signals in a 252 kV gas insulated substation by using cumulative energy technique[J]. IET Science Measurement & Technology, 2016, 10(4): 316-326.
- [17] HARRIS R M, JUDD M D. Locating partial discharge using particle swarm optimisation[C]//Universities' Power

- Engineering Conference.[S.l.]:VDE, 2012:1-6.
- [18] 彭向阳, 金 亮, 王 柯, 等. 变电站机器人智能巡检系统设计及应用[J]. 中国电力, 2018, 51(2):82-89.
- PENG Xiangyang, JIN Liang, WANG Ke, et al. Design and application of robot inspection system in substation[J]. Electric Power, 2018, 51(2):82-89.
- [19] 鲁守银, 张 营, 李建祥, 等. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1):282-290.
- LU Shouyin, ZHANG Ying, LI Jianxiang, et al. Application of mobile robot in high voltage substation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):282-290.
- [20] 刘 青, 朱明晓, 王彦博, 等. 基于特高频相控阵原理的变电站站域局部放电测向方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20):6126-6135.
- LIU Qing, ZHU Mingxiao, WANG Yanbo, et al. Partial discharge direction finding method for substation stations based on UHF phased array[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6126-6135.
- [21] 张冠军, 朱明晓, 王彦博, 等. 基于可移动特高频天线阵列的变电站站域放电源检测与定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10):6-18.
- ZHANG Guanjun, ZHU Mingxiao, WANG Yebo, et al. Detection and localization of discharge sources in substation area using movable UHF antenna array[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 6-18.
- [22] 王有元, 蔡亚楠, 王 灿, 等. 基于云平台的变电站设备智能诊断系统[J]. 高电压技术, 2015, 41(12):3895-3901.
- WANG Youyuan, CAI Yanan, WANG Can, et al. Intelligent diagnosis system for substation equipment based on cloud platform[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3895-3901.
- [23] 张天辰, 胡 岳, 李 清, 等. 基于虚拟仪器的GIS局部放电声电联合检测系统[J]. 高压电器, 2012, 48(11):43-49.
- ZHANG Tianchen, HU Yue, LI Qing, et al. Combined ultrasonic and electrical detection system for GIS partial discharge based on virtual instrument[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11):43-49.
- [24] 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 Chenjun, et al. Experimental research on partial discharge localization in GIS using ultrasonic associated with electromagnetic wave method [J]. High Voltage Engineering, 2009, 29(10): 2458-2463.
- [25] WANG L, HON T K, REISS J D, et al. Self-localization of ad hoc arrays using time difference of arrivals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(4):1018-1033.
- 牛 勃(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为高压电气设备绝缘状态在线监测、带电检测与故障诊断技术。