

基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位研究

张 强 郭 斌 刁文正

(山东电工电气日立高压开关有限公司)

摘要：由于现行方法在 GIS 局部放电定位中应用效果不佳，定位坐标与实际放电源坐标误差较大，无法达到预期的定位效果，为此提出基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位研究。采用链式方式在 GIS 上布设特高频信号传感器，采集特高频信号，利用高斯平滑滤波方法提取特高频信号特征，根据信号特征确定 GIS 局部放电所在测区及位置坐标，实现基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位。经实验证明，设计方法定位误差不超过 0.3m，贴近实际局部放电位置，在 GIS 局部放电定位领域具有良好的应用前景。

关键词：特高频信号；GIS；局部放电；定位；高斯平滑滤波方法

0 引言

气体绝缘组合电器（GIS）作为一种先进的高压电器配电装置，自 20 世纪 60 年代问世以来，以其占地面积小、技术性能优良、运行安全可靠等优点，在电力系统中占据了重要地位。GIS 设备将断路器、避雷器、隔离开关、电压互感器、电流互感器等大量电气元件封闭在一个接地的圆柱形金属外壳中，并充入 SF₆ 气体作为绝缘介质，取代了传统的以裸导线作为连接、用空气作为绝缘的做法。这种设计不仅提高了设备的绝缘性能，还显著减少了外界环境对设备的影响，延长了设备的使用寿命，降低了维护成本。然而，随着 GIS 设备的广泛应用，其局部放电问题也逐渐凸显出来。局部放电是 GIS 中绝缘老化的一个重要因素，如果不及时发现和处理，可能会引发设备故障，甚至导致整段或整个间隔停电，严重影响电力系统的稳定性和供电可靠性。因此，GIS 局部放电定位

研究具有重要的现实意义。目前，国内外学者和工程师在 GIS 局部放电定位领域进行了大量研究，并取得了一系列重要成果。

文献 [1] 提出了基于宽频等值电路的定位方法，通过测量局部放电脉冲在绕组中的传播特性，利用宽频等值电路模型分析，确定放电位置。文献 [2] 提出了基于改进 K-means 聚类的定位方法，通过多传感器获取放电信号，利用改进 K-means 聚类算法对信号进行聚类分析，确定放电位置。尽管 GIS 局部放电定位技术取得了显著进展，但仍存在一些不足之处，GIS 放电信号采集受到电磁干扰，影响到定位精度，导致存在定位偏差，为此提出基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位研究。

1 GIS 局部放电特高频信号感知及特高频信号特征提取

1.1 特高频信号传感器布置

此次利用特高频信号传感器感知 GIS 局部放电信号，通过提取采集的局部放电特高频信号特征，确定局部放电源位置。在定位局放源的过程中，一个至关重要的前提为明确局放源所处的具体区间范围。为达成这一目标，筛选出区域内最具代表性的 2~4 个关键测点，为了简化计算难度和复杂度，此次在 GIS 上布设两个测点，即安装两个特高频传感器，传感器排布方式分为链式与星形两种，不同的排布方式将直接影响后续定位精度，考虑到链式排布信号传递路径明确，便于追踪，星形排布则展现出一种发散状的布局特征，各测点围绕一个或多个中心点分布，无明确中心点传感器，测点间通过间接方式相互关联，星形排布方式结构复杂，会导致信号传递受到干扰，因此此次采用链式方式布设特高频信号传感器。根据需求选择型号为 GHUFA-SA4G7 特高频信号传感器，根据实际情况对传感器参数设置，将两个特高频信号传感器安装在局部放电敏感位置上。

1.2 特高频信号特征提取

为了方便后续局部放电定位，提取特高频信号特征，当某一区间内呈现出较为显著的衰减特征值增长，且该区间两端测点的信号幅值明显偏高时，可以初步推断，局部放电点落在该特定区间的可能性会显著增加。然而，这一判断并非绝对，还需要考虑更为细致的波形特征来验证其准确性^[3]。特别是，如果两个端点测得的波形显示出高度的相似性，这往往意味着它们共同指向了同一信号源，即局部放电源。相反，若两者波形形态大相径庭，那么很可能至少有一侧受到外界其他信号源的干扰，这时即便幅值指示强烈，对于局部放电的置信度也应当审慎评估，因为信号的真实性和来源可能已受到混淆。为了更加科学、准确地量化这一关系，高斯平滑滤波方法提取特高频信号特征，通过对采样点的电压值进行平方运算，得到单极性的能量波形，其用公式表示为：

$$F = V_{\text{er}}^2 \quad (1)$$

式中， F 为采样点在某一时刻采集的特高频信号能量值； V_{er} 为采样点在某一时刻的电压值^[4]。通过将能量波形与高斯函数进行卷积操作，提取特高频信号包络线，高斯函数用公式表示为：

$$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\epsilon}} \quad (2)$$

式中， $G(t)$ 为高斯函数； ϵ 为高斯参数； t 为时间^[5]。不同取值会直接影响到包络线的平滑程度和细节保留程度。当 ϵ 取值较小时，高斯函数较为尖锐，卷积后的包络线可能会保留较多的高频成分，表现出较强的振荡特性，这在一定程度上可能掩盖了信号的真实包络特征。相反，若 ϵ 取值过大，高斯函数将变得过于平缓，虽然能够有效抑制高频噪声，但也可能导致包络线过于平滑，丢失了信号的重要细节，因此将 ϵ 值在几纳秒到几十纳秒的范围内取值^[6]。将能量波形与高斯函数进行卷积操作，得到特高频信号特征值，其用公式表示为：

$$b = \sum_{i=1} G(t) \circ F \quad (3)$$

式中， b 为特高频信号特征值，即信号包络值； i 为卷积核数量； $\circ$ 为卷积操作^[7]。通过以上提取到特高频信号特征，揭示信号强度的动态变化。

2 局部放电定位

根据以上提取的特高频信号特征，定位 GIS 局部放电，利用余弦相似度（Sims）这一度量标准，来衡量区间两端测点波形之间的相关程度。余弦相似度的计算基于公式如下：

$$\text{sim}_{AB} = \frac{b_A \cdot b_B}{\|b_A\| \cdot \|b_B\|} \quad (4)$$

式中， sim_{AB} 为两端测点波形相关程度； b_A 、 b_B 分别为两个测点特高频信号特征值^[8]。获得两个测

区的余弦相似度之后，计算放电相关测度 $Rela$ ，这一测度综合考虑波形相似度、幅值信息及可能的干扰因素，评估局放源位置置信度的量化指标，其用公式表示为：

$$Rela = \frac{\text{sim}_{AB}}{(b_{A,\max} + b_{B,\max} + H)} \quad (5)$$

式中， $Rela$ 为局部放电区间测度值； $b_{A,\max}$ 、 $b_{B,\max}$ 分别为两个测点特高频信号特征峰值； H 为测区的信号衰减系数^[9]。将具有最高 $Rela$ 值的区间判定为局放源所在区域，为了确定局部放电具体坐标，以确定区间的传感器为原点，建立三维坐标系，根据该区间传感器接收与发射特高频信号时间间隔，以及信号传播速度，确定放电源与传感器间距，其用公式表示为：

$$h = \frac{|t_1 - t_2|}{v} \quad (6)$$

式中， h 为放电源与传感器间距； t_1 、 t_2 分别为信号发射与接收的时间； v 为特高频信号传播速度^[10]。根据确定的间距，在三维坐标系中标定与传感器间距的点，该点坐标为放电源坐标点，因此实现基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位。

3 实验论证

3.1 实验对照组设置与环境设计

出于对本文提出的基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位方法性能检验的目的，开展对比实验，将其与文献 [1] 提出的基于宽频等值电路的定位方法和文献 [2] 提出的基于改进 K-means 聚类的定位方法对比，以凸显方法的性能。实验操作基于 Windows10XP 操作系统，搭配 Inter Core i8 处理器，4G 硬盘和 16GB 内存，方法采用 Python 编辑。

3.2 实验设备及参数设置

实验在 GIS 设备 PD 平台上进行，该装置长度为 6m，宽度为 3m，高度为 5m，GIS 局部放电定位以 GIS 设备左上角处为原点，在 GIS 设备安装 2 个

特高频传感器，安装位置分别为 (1.55m, 1.55m, 1.55m)、(3.55m, 3.55m, 3.55m)，将特高频传感器参数设置如下：

采样周期设置为 0.5s，采样频率设置为 0.53Hz，无线脉冲信号发射频率设置为 0.63Hz。采用 JKHFA-AF758 读卡器读取特高频信号，实验共采集到 32 个局部放电故障信号样本。

3.3 定位结果与指标设定

按照以上流程对特高频信号处理和特征提取，随机选取 1 个 GIS 局部放电，其特高频信号波形如图 1 所示。

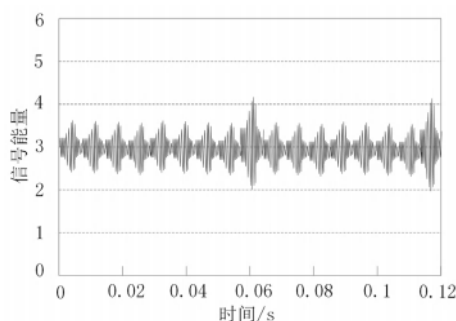


图 1 特高频信号波形图

实验记录所有样本定位结果，随机选取 8 个样本，其局部放电定位与实际故障源坐标如表 1 所示。

表 1 GIS 局部放电定位结果 (m)

放电样本序号	放电源实际坐标	放电源定位坐标
1	(1.25, 1.62, 1.42)	(1.23, 1.61, 1.32)
2	(2.62, 0.52, 1.14)	(2.52, 0.42, 1.13)
3	(1.62, 0.58, 2.42)	(1.65, 0.55, 2.41)
4	(3.14, 1.62, 2.41)	(3.12, 1.65, 2.41)
5	(1.58, 1.26, 2.67)	(1.56, 1.22, 2.64)
6	(2.36, 3.01, 1.47)	(2.35, 3.01, 1.45)
7	(1.06, 0.84, 2.48)	(1.01, 0.84, 2.46)
8	(1.95, 3.06, 0.74)	(1.95, 3.05, 0.74)

根据记录的定位与实际坐标，以 4 个样本为一组实验，统计 8 组实验中三种方法对 GIS 局部放电定位误差，将其作为方法性能评价指标，误差值越大，则

表示定位精度越低。

3.4 定位误差分析

表 2 统计三种方法在八组 GIS 局部放电定位实验中误差值。

表 2 GIS 局部放电定位误差 (m)

实验组别	本文方法	文献[1]方法	文献[2]方法
第一组	0.06	1.25	3.62
第二组	0.11	1.36	3.42
第三组	0.25	1.54	3.14
第四组	0.31	1.26	3.29
第五组	0.09	1.35	3.03
第六组	0.11	1.42	3.11
第七组	0.03	1.62	3.24
第八组	0.08	1.58	3.39

从表 2 中数据可以看出，在 GIS 局部放电定位场景中，文献 [2] 方法定位误差最大，超过 3m，本文方法定位误差最小，不超过 0.3m，基本可以实现对 GIS 局部放电精准定位，具有良好的适用性与可行性。

4 结束语

本研究深入探讨了基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位技术，通过详尽的理论分析、实验验证和实际应用案例，展现了该技术在提高 GIS 设备运行安全性和可靠性方面的显著优势。特高频检测技术以其高灵敏度、强抗干扰能力和实时性强的特点，在 GIS 局部放电检测中展现出独特的优势，为电力系统的稳定运行提供了有力保障。展望未来，随着技术的不断进步和完善，基于特高频信号特征提取的 GIS 局部放电定位技术将在更多领域得到应用和推广。将继续深入研究该技术的原理和应用，不断优化算法和模型，提高定位的精度和效率。同时，也将积极探索与其他技术的融合应用，如与深度学习、大数据分析等技术的结合，以进一步提升 GIS 局部放电定位技术的智能化水平和应用价值。

参考文献

[1] 王帅，刘广军，张博文，等. 基于宽频等值电路的配电变压器局部放电电气定位研究 [J]. 电网与清洁能源，2023，39（3）：40-47.

[2] 邢雅，侯峰，樊博，等. 基于改进 K-means 聚类的变压器局部放电定位诊断方法 [J]. 智慧电力，2023，51（3）：53-58.

[3] 缪金，秦军，费彬，等. 基于辐照度分析的干式空心电抗器局部放电定位方法 [J]. 广东电力，2024，37（3）：98-108.

[4] 肖小龙，郭佳豪，郭茂森，等. 基于改进 GCC 算法的交流配电缆局部放电在线定位方法研究 [J]. 机械与电子，2024，42（3）：26-31，39.

[5] 王艳新，闫静，耿英三，等. 多任务元学习网络的气体绝缘组合电器局部放电同时诊断与定位 [J]. 西安交通大学学报，2024，58（7）：105-115.

[6] 冯晓泽，寇鹏，梁得亮，等. 基于压缩感知和指纹图谱的变压器局部放电空间定位方法 [J]. 高压电器，2023，59（12）：160-167.

[7] 苏志雄，于瑞冬，张周胜. 基于多重多项式结果-二重网格搜索的变压器局部放电定位 [J]. 高电压技术，2024，50（4）：1538-1547.

[8] 杨锡清，潘志城，张晋寅，等. 基于局放量传递比的直流穿墙套管局部放电定位方法研究 [J]. 变压器，2023，60（9）：61-64.

[9] 关宇，董明，席英杰，等. 基于频域阈值处理广义互相关和空间筛选的多源局部放电定位方法 [J]. 电网技术，2024，48（4）：1721-1734.

[10] 方子豪，陈潇一，孙佳伦. 基于指数目标函数优化的变压器局部放电故障最佳定位点估计方法 [J]. 智慧电力，2023，51（5）：51-56，118.

（收稿日期：2024-08-23）