

基于局部放电图谱和X射线图像的GIS缺陷识别技术

将GIS内局部放电信号经过去噪处理、特征提取后得到的局部放电图谱进行特征信号识别，初步得出GIS缺陷类型、位置等有效信息，再利用X射线透照缺陷对应位置从而对缺陷的类型、位置进一步识别。该技术融合了基于神经网络的局部放电图谱识别和基于匹配的X射线图像缺陷位置检测两种检测方法的优点，有效地提高了GIS缺陷检测效率和检测准确度，对于确保电力系统经济、可靠的运行具有重要意义。

徐成龙^{1,2} 于 虹³ 杜必强¹ 刘泽坤¹ 董良太¹ / 1. 华北电力大学机械工程系
2. 华北电力大学云南电网公司研究生工作站 3. 云南电网公司电力试验研究院



徐成龙/硕士研究生

关键词/Keywords

BP神经网络 ·
局部放电图谱 ·
X射线图像 ·
GIS ·
现场数据试验 ·

气体绝缘开关设备（GIS）以其可靠性高、占地面积小等优点，在电力系统中得到广泛的应用^[1]。而GIS结构复杂、造价高，地电极尖端、悬浮电位、金属颗粒和金属尖端等缺陷难以发现，故障发生后修复时间长^[2]。传统的GIS缺陷检测方法主要是利用超声波、超高频和脉冲电流法等测量其内部局部放电特征图谱，不同的图谱对应了不同的放电故障类型，利用图谱可以区分出不同的放电类型^[3]。但这些图谱无法直观给出GIS内部缺陷的具体形态等信息。同时，现有的局部放电仪所提供的图谱缺陷识别仅能对设备内部单一缺陷的典型特征图谱进行识别。而在生产实际中，往往会采集到特征不明显的图谱。应用神经网络的识别方法，一方面可以识别一些特征不明显的图谱，另一方面，经过不断扩充样本集可以有效提高识别效率。

X射线检测技术是一种应用广泛的无损检测技术，这项技术可以直观地辨别GIS缺陷类型^[4]。但在不知道缺陷位置的

前提下，需要多次利用X射线透照检测，具有盲目性，同时，X射线检测方法需要的检测时间耗时长，长时间作业会给检测人员的健康带来一定影响。目前常用的缺陷检测方法包括人工法、图像分割法等。人工检测一则成本较高，二则人工长时间检测后会带来疲劳误差，一些细小的缺陷不易被察觉；分割法则适用于一些断裂型缺陷，对异物检测困难^[5]。而应用匹配法则可以有效解决这些问题，可以做到不受噪声干扰、快速定位异物及其他缺陷^[6]。将基于神经网络的局部放电图谱识别和基于匹配的X射线图像缺陷检测两种检测方法的优点融合，一方面可以及时、准确地发现外观表征不明显的早期绝缘故障、预防发生绝缘事故并预测绝缘寿命，又能采集到缺陷的准确形态信息，有效提高GIS缺陷检测效率和检测准确度。而且X射线检测结果可以作为补充，修正局部放电图谱识别结果，大幅度提高图谱识别准确程度。因此该技术对于确保电力系统经济、可靠运行具有重要意义。

基于神经网络的局部放电图谱识别技术

基于神经网络的局部放电图谱识别技术主要包括以下三个步骤。

- 1) 对局部放电图信号行去噪。
- 2) 对局部放电信号进行特征提取。
- 3) 对局放图谱进行特征识别。

为了抑制局部放电信号中的干扰信号，该技术首先采用了联合时频分析及

小波变换去噪方法对局部放电信号进行去噪；接着利用相位分布和灰度图的分形特征等方法对局部放电信号进行特征提取；最后采用BP神经网络算法对局部放电缺陷类型进行训练识别。通过该方法可以预判出GIS缺陷的基本类型和大致位置等信息，为进行基于匹配的X射线图像缺陷位置检测提供了信息基础。

基于匹配的X射线图像缺陷位置检测技术

X射线图像缺陷位置检测可进一步准确定位故障类型，确定缺陷的可能位置。基于匹配的X射线图像缺陷位置检测技术首先对X射线图像进行去噪处理，然后采用图像配准的方法来实现图像缺陷位置的检测。

1. 便携式高频X射线机

X射线数字成像技术（Digital Radiography，DR）是一种先进的数字成像技术，它具有成像质量高、速度快，可以做到实时成像显示并能实现在线检测等优点^[7]。项目中采用的便携式高频式X射线机如图1所示。该种X射线机是由德国通用电气公司生产的，中文型号为Eresco 65MF4。其主要参数有管电压、管电流、曝光时间和焦距。其中管电压是根据物体被透射的容易程度来进行选择的，管电压越高，X射线穿透力越强，管电流的大小直接影响着摄片时胶片的感光量。本技术中采用的X射线机管电压最高可达300 kV，管电流范围为0~3 mA；曝光时间和管电流的乘积即曝光量决定着照相影像的黑度和对比度。焦距是X射线发射管到平板探测器上表面的距离，它对曝光量和几何不清晰度具有一定的影响。



图1 便携式高频X射线机

2. X射线数字图像去噪

研究表明，X射线成像系统图像降质的主要原因是系统随机噪声。X射线的产生以及与物质的相互作用，在时间上和空间上都满足泊松随机过程。对于快速X射线成像系统，由于曝光时间短，X射线所产生的量子噪声更为突出，严重影响了图像的质量。项目在去噪时采用了NL-means算法，该算法起源于邻域滤波算法，是对邻域滤波算法的一种推广，其权值根据像素周围整个区域灰度分布的相似性得到，在降低图像噪声的同时具有很强的保持图像空间分辨率的能力^[8]。

对于数字化图像来说， $v = v(i)$ ， $i \in I$ ， I 为像素的集合，则此时NL算法的表达式为

$$NL(i) = \sum_{j \in I} w(i, j) v(j)$$

其中权重

$$w(i, j) = \frac{1}{Z(i)} e^{-\frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_{2a}^2}{h^2}}$$

$$Z(i) = \sum_j e^{-\frac{\|v(N_i) - v(N_j)\|_{2a}^2}{2h^2}}$$

式中， $\|v(N_i) - v(N_j)\|_{2a}^2$ 为像素 i 和 j 所在两个邻域的灰度级的高斯加权距离。Buades近年进行的理论分析和试验结果表明，NL-Means算法在主客观性能上都优于常见的图像去噪算法，如高斯滤波、各向异性滤波、总误差最小化和邻域滤波等，其权值根据像素周围整个区域灰度分布的相似性得到，在降低图像噪声的同时具有很强的保持图像空间分辨率的能力。去噪前、后的图像对比如图2所示。

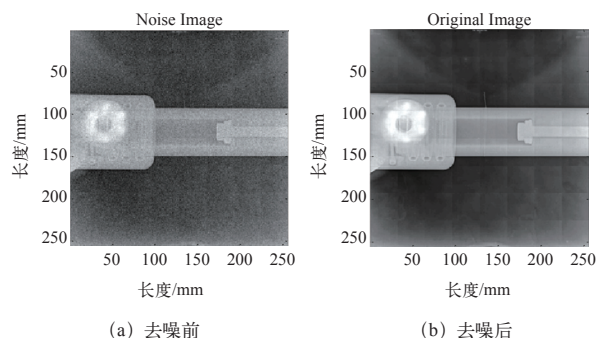


图2 去噪前、后的图像对比

3. X射线图像的配准

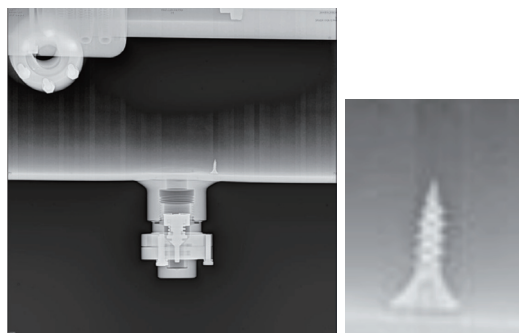
图像配准方法主要有基于特征的配准方法和基于灰度的配准方法^[9]，基于灰度的配准方法包括相关法和基于互信息配准法，也是最常用的两种配准方法。基于灰度信息的图像配准方法一般不需要对图像进行复杂的预先处理，而是利用图像本身具有的一些统计信息来度量图像的相似程度，其主要特点是实现简单，但应用范围较窄，不能直接用于校正图像的非线性形变，而且在最优变换的搜索过程中往往需要巨大的运算量^[10]。

假设原采集图像为 R ，数字减影获取的缺陷图像为 S ， R 的大小为 $m \times n$ ， S 大小为 $M \times N$ ，基于灰度信息的图像配准方法的基本流程是：以参考图像 R 叠放在待配准图像 S 上平移，参考图像覆盖被搜索的那块区域叫子图 S_{ij} 。 i 和 j 为子图左上角待配准图像 S 上的坐标。搜索范围为

$$\begin{cases} 1 \leq i \leq M - n \\ 1 \leq j \leq N - n \end{cases}$$

通过比较 R 和 S_{ij} 的相似性，完成配准过程。

基于匹配的X射线图像缺陷检测技术依据缺陷确定基准图像，在基准图像中寻找一个 $M \times N$ 的特征块。该技术通过灰度差异最大原则，即使用一个滑动窗在待拼接区域滑动，每次都计算窗内像素平均值。求出用每一像素值减去平均值的绝对值，最后将这些灰度差异相加便是这个位置的灰度差异值。因为灰度差异大的区域图像较为复杂，特征较为明显，所以取灰度差异最大值的特征块为缺陷位置区域。以地电极尖端缺陷为例，其互信息配准结果如图3所示。



(a) 具有地电极尖端缺陷图像 (b) 异物图像

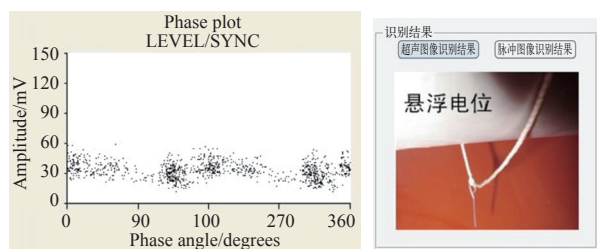
图3 地电极尖端缺陷试验结果

基于局部放电图谱和X射线图像的GIS缺陷识别技术

基于局部放电图谱和X射线图像的GIS缺陷识别技术融合了基于神经网络的局部放电图谱识别和基于匹配的X射线图像缺陷检测两种检测方法的优点。其首先是将GIS内局部放电信号经过去噪处理、特征提取后得到的局部放电图谱进行特征信号识别，并结合局部放电定位技术初步得出GIS缺陷类型、位置等有效信息，然后在对应位置采集一幅X射线图像数据进行检测，再利用图像配准技术快速定位图像中的缺陷类型和位置，从而实现缺陷的进一步识别。

现场试验

2011年10月25日，云南怒江供电公司110 kV六库中心变电站GIS室发出间歇性的、声响较大的异响。2011年10月26日下午，云南电力研究院派技术人员到达现场，并利用基于局部放电图谱和X射线图像的GIS缺陷识别技术对该110 kV GIS进行诊断。图4为利用基于神经网络的局部放电图谱识别技术的识别结果。



(a) 超声测试数据

(b) 识别结果

图4 超声测试试验结果

1. 超声局部放电测试

首先使用挪威TransiNor As公司生产的AIA-1超声波局部放电测试仪对110 kV GIS室进行了局部放电检测、识别和定位。通过在连续测量方式下沿着壳体逐渐地移动传感器并监视超声波信号幅值，直到找到信号幅值最高的位置，对局部放电位置进行了定位。定位结果为，放电源位置在110 kV古六老线间隔母线侧1521隔离开关位置下方气室内。

2. X射线图像数据分析

在基于局放图谱识别技术分析后,现场根据超声局部放电信息在110 kV古六老线间隔母线侧1521隔离开关位置下方气室内的A、B、C三相上下的出线导杆和支撑绝缘子共采集6次X射线图像。结果表明,A相出线导杆发生倾斜,B相支撑中心导体的绝缘子发生断裂。经过基于匹配的X射线图像缺陷位置检测后分析结果如图5、图6所示。照射时X射线机的参数设置如下表所示。

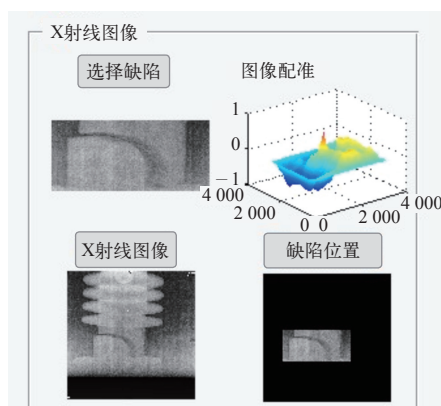
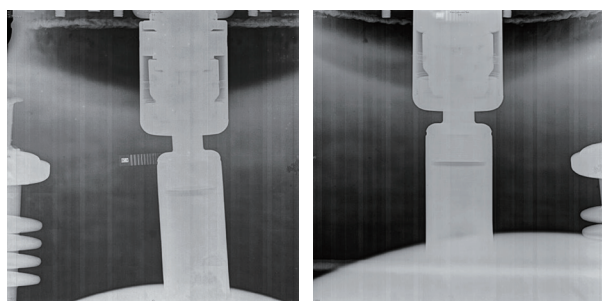


图5 绝缘子断裂X射线数据分析结果



(a) 歪斜的出线导杆 (b) 正常的出线导杆

图6 出线导杆倾斜X射线数据分析结果

表 X射线机参数设置

序号	电压/kV	电流/mA	曝光时间/s	采集次数	焦距/mm
1	300	2.8	2	6	2 015

通过对应测试结果分析可以看出,造成故障的原因是GIS装配工艺存在问题致使出线导杆产生倾斜,长期运行振动导致硬性安装的导电杆拉断支撑绝缘子,从而在绝缘子上产生了沿面放电。由于绝缘子被拉断后处于悬浮状态,所以属于悬浮缺陷,局部放电图谱识别方法分析正确。从检

测人员到现场开始检测到检测结束得出结论,整个检测过程仅用时1 h左右,充分体现了该技术的优越性和高效性。

结束语

基于局部放电图谱和X射线图像的GIS缺陷识别技术实现了对GIS内部缺陷的智能化诊断。该技术不仅检测速度较快,可提高抢修效率,而且可以减少检测过程中对工人健康的影响,降低了运行成本。两种方法识别结果相互补充,进一步提高了GIS缺陷检测效率。

参考文献

- [1] 闫斌,何喜梅,吴童生,等. GIS设备X射线可视化检测技术[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 44-47.
- [2] 李继胜,赵学风,杨景刚,等. GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2440-2445.
- [3] 王卫东,赵现平,王达达,等. GIS局部放电检测方法的分析研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 13-23.
- [4] 闫斌,何喜梅,王志惠,等. X射线数字成像检测系统在GIS设备中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(11): 89-91.
- [5] 李昭月. 基于X射线实时成像系统图像处理与缺陷识别的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [6] 王红梅,张科,李言俊. 图像匹配研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2004(19): 42-44.
- [7] 李衍. 承压设备焊缝 CR 和 DR 技术应用最新国际动态[J]. 无损探伤, 2009, 33(4): 1-6.
- [8] 李保磊,杨民,李俊江. 基于改进NL-means算法的显微CT图像降噪[J]. 北京航空航天大学学报, 2009(7): 22-26.
- [9] 刘松涛,杨绍清. 图像配准技术研究进展[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 99-104.
- [10] 洪明坚,吕建斌,杨丹,等. 一种新的基于互信息的图像配准方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(6): 697-700.

(收稿日期: 2014-03-10) EA