文章编号: 1672-8785(2016)09-0042-07

基于红外、超声和紫外技术的局部 放电联合检测方法研究

徐 鹏¹ 陆启宇¹ 马 奥^{2*} 董 明² 任 明² 李腾飞¹ 许 侃¹ (1. 国网上海电力科学研究院, 上海 200000;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘 要:利用图像配准与融合技术实现了一种超声、红外、紫外联合的便携式局部放 电在线检测系统。分别提出了这三种技术的检测原理和模块化结构,然后利用计算机 对三种局部放电检测信号进行了融合处理,并将该信号置入了由摄像头获取的设备图 像之中,从而建立了与设备图像的位置对应关系。本文系统不仅可以分别显示超声、 红外、紫外三种信号的定位成像视频,而且还可以将这三种信号融合到一个视频界面 中,从而直观地显示出三种检测方法中的局部放电位置及其变化情况。结果表明,该 系统具有携带方便、检测快速等优点,能够及时发现电力设备的故障,因此具有比较 广泛的应用价值。

关键词:局部放电;超声定位;红外检测;紫外检测;图像配准;图像融合

中图分类号: TM855 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.09.008

Synthetic Partial Discharge Measurement System Based on Infrared, Ultrasonic and Ultraviolet

XU Peng ¹, LU Qiyu ¹, MA Ao ², DONG Ming ², LI Teng-fei ¹, XU Kan ¹

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200000, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A portable on-line infrared, ultrasonic and ultraviolet synthetic partial discharge measurement system is realized by using image registration and fusion technologies. Firstly, the measurement principles and modular structures of infrared, ultrasonic and ultraviolet technologies are presented respectively. Then, a computer is used to fuse the three kinds of partial discharge measurement signals. The fused signals are put into the equipment image acquired by a camera. Thus, their corresponding relations with the equipment image are established. The proposed system not only can display the location imaging videos of infrared, ultrasonic and ultraviolet signals respectively, but also can fuse the above three kinds of signals into one video interface, so as to display the partial discharge location and its variation in three measurement methods directly. The results show that the system has the advantages of portability and fast measurement. It can find the faults in power equipment in time. Therefore, it has wide applications.

Key words: partial discharge; ultrasonic location; infrared detection; ultraviolet detection; image rectification; image fusion

收稿日期: 2016-04-19

作者简介:徐鹏(1977-),男,上海人,硕士,高级工程师,主要从事状态检测研究。

^{*}通讯作者:马奥(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为局部放电检测技术。E-mail: 444927391@qq.com

0 引言

由于局部放电是电力设备绝缘老化的主要 原因,对电力系统中的局部放电进行检测已是 在线智能监测的主要组成部分。在电力设备的 制造、运输以及安装过程中形成的一些绝缘缺陷 会长期威胁电力设备的安全运行和加速设备绝 缘的老化,因此对局部放电进行快速、有效检测 变得十分重要。由于局部放电检测现场存在较 多的干扰信号,对局部放电进行精准定位的难 度较大。但通过确定局部放电源的准确位置,可 以更精确地掌握设备的绝缘状况并制定相应的 维修策略。因此,局部放电的检测和定位对于保 证电力设备的安全运行非常关键^[1]。

目前,基于声测法、光测法和红外热测法等 新型非接触式局部放电带电测量方法已被人们 广泛使用。这些方法因其各自优势而被用于局 部放电的定位及可视化检测^[2-6]。

超声检测法能够避免复杂的电磁干扰,从 而较为准确地判定局部放电源。而且, 声音信号 的传播时间具有较大的差异性,有助于实现较 为精确的局部放电定位。超声阵列传感器检测 方法^[7-10] 是近年来针对局部放电的快速定位发 展而来的一种新技术。该方法对多个压电阵元 传感器进行有序组合,并将其阵元间距作为超 声波信号中心频率所对应的半波长,以实现动态 的局部放电定位。局部放电的紫外成像检测是 一种基于局部放电在紫外盲区中的光辐射特性 而建立的局部放电可视化技术。该方法因其较 好的灵敏性、实时性及便捷性在电力设备的带电 检测中得到了推广。基于紫外成像原理,陈书汉 等人[11] 研制出了一种双波段图像实时融合实验 系统。他们以美国 TI 公司生产的 TMS320DM642 芯片作为图像处理系统的核心完成了紫外/可见 光图像融合,并通过调整机械结构完成了对定 焦相机的图像信息配准。马立新等人 [12] 设计了 一种单通道双谱紫外电晕放电检测设备。其设 计结构简单,图像处理成本较低,但由于以PC 机作为主要的硬件架构,其便携性大大降低,

并且无法实时监测电晕放电状况。然而,基于红 外图像的检测方法不但能够快速查明设备本体 表面上的异常温度点信息,而且还能获得由于 电晕放电造成的局部过热信息。为了更好地将 红外图像检测应用于故障识别和定位, 红外图 像与可见光图像之间的配准则成为了主要的技 术问题。目前,图像配准技术主要分为以下两种 [13]:(1) 一种是利用图像灰度进行配准。该方法 直接利用图像的灰度信息来建立两幅图像之间 的相似性度量, 然后通过某种搜索方法找出可 使相似性度量值达到最大值或最小值的变换模 型参数值。但这类算法对图像的灰度信息具有 较强的依赖性,因此对于灰度差异较大的红外 和可见光图像来说通常难以实现精确配准。(2) 另一种是利用图像特征进行配准。该方法先找 出各类图像中共同的图像特征,如边缘点、闭区 域中心等参考信息,然后利用这些信息对两幅 图像进行配准,并获得图像之间的特征对应关 系,最后再对其进行匹配。

目前,国内外利用超声、紫外和红外信号 对局部放电进行检测的系统仅仅实现了超声定 位、紫外成像和红外检测这三个独立方面的检测 技术。而本文将这三种检测技术融为一体,即在 分别实现对局部放电的超声成像、紫外成像和 红外成像的基础上,满足了对三种信号进行融 合成像的要求。本文系统体积小、携带方便,并 具有超声、紫外和红外成像检测方法的优点。结 果表明,该系统在局部放电检测上的准确性和 可靠性均得到了提升;通过对比三种信号也达 到了从多方面同时检测局部放电的目的。

1 检测系统的原理

本文提出的基于超声、紫外和红外技术的 局部放电联合检测系统的原理可以分为四个部 分来简要阐述:超声成像模块的原理、紫外成像 模块的原理、红外成像模块的原理以及三种信 号融合配准的原理^[14-15]。

1.1 超声成像检测的原理

超声波是指频率大于 20 kHz 的声波。它具 有方向性好、穿透能力强、易于获得较集中声 能等特点。因此,通过将超声波应用于局部放 电检测,有利于在较远距离上对局部放电进行 检测,从而更好满足工程应用对设备在线监测 的要求。目前,超声测试技术主要采用单通道 和多通道两种方法。其中,单通道技术主要用 于超声信号测距和信号强度测量;多通道技术 可以利用多个传感器所接收信号的时延对超声 信号源进行定位,因此主要应用于超声定位。 本文基于超声测试的多通道技术,使用了 32 个 SPU0410LR5H-QB型超声传感器。图 1 和图 2 所 示分别为超声传感器的频率响应曲线和阵列示 意图。



1.2 红外成像检测的原理

在靠近介质表面的 5×10⁻¹⁷ m 局部体积中, 由于发生了一次局部放电,介质温度在 10⁻¹⁷ s 内升至 170 ℃,有时因放电作用甚至达到 1000 ℃ 的高温。通过热像仪原有的 SDK 工具包获取由 局部放电引起的实时温度数据和视频数据,然 后利用计算机对温度数据中符合局部放电温度 范围的数据进行提取和记录,最终将其与视频 信号进行配准融合,从而形成红外成像系统模 块。

1.3 紫外成像检测的原理

由局部放电产生的光主要集中在紫外波 段。紫外成像模块由日盲滤光镜、紫外镜头以 及紫外增强型电荷耦合器件等几部分组成。该 模块可以在全天内对局部放电所产生的紫外信 号进行检测。其中,日盲滤光镜可以实现对太 阳光的滤光作用,以达到在白天对局部放电进 行检测的目的;紫外滤光镜在日盲波段的光子 通过率约为 20%,但其带外截止深度则可达到 OD13,几乎不存在噪点,因此可保证该系统具 有良好的响应特性;紫外增强型电荷耦合器件 可以增强通过紫外镜头的光信号,同时还可以 利用电荷耦合器件将光信号转换成一定比例的 电信号。最后,本模块将紫外和可见视频数据传 送至计算机进行图像融合与配准,从而实现利 用紫外成像检测局部放电的目的。

1.4 图像配准的原理

在本文系统中,多路信号之间在拍摄角度 和距离等方面存在差异。为了将多路信号准确 地显示在一个视频中,必须对图像进行配准和 融合。本文采用了一种较早用于图像配准的方 法—— 区域相关法。对于参考图像 V 和模板图 像 I (通常要求模板图像 I 对应于参考图像 V 中 的某个局部区域) 来说,在图像 V 的位置 (x,y) 处,两者的互相关 (Cross Correlation, CC) 测度被 定义为^[16]

$$CC(u,v) = \frac{\sum_{x} \sum_{y} I(x,y)V(x-u,y-v)}{\sqrt{\sum_{x} \sum_{y} V^{2}(x-u,y-v)}}$$
(1)

当模板 I 经过一系列的坐标转换、缩放和位移之后, I 与图像 V 中的对应区域重叠;当互相关测度达到最大值时,即可完成对图像的配准。最终,利用信号融合技术将已经配准的两路视频流显示在一个视频中。

2 成像系统的构成

2.1 硬件实现

图 3 为红外镜头的实物图。其中, RJ45 网口 为由镜头采集的红外温度数据的输出接口, 与计 算机相连。通过计算机对传输数据进行筛选, 即 将局部放电温度范围内的温度数据及其坐标采 集出来, 并将其与其他路信号配准和融合。



图 3 红外成像模块

图 4 为超声定位成像模块的示意图。可以看 出,本文系统需要通过 USB 接口将超声定位模 块所获得的超声定位信号传输至计算机并将其 采集出来。利用超声定位系统的算法得到了定 位坐标,然后将它与其他路信号配准和融合。

图 5 为紫外成像模块的示意图。通过 BNC



图 4 超声成像模块

接头将采集获得的紫外信号输出,然后接至 BNC-AV转换头上,接着再将 AV 信号接入转 换器内,最终由 USB 接头接入计算机。其中, 传输过来的信号为黑底白斑的视频流信号。计 算机对该信号与可见视频信号进行配准,然后 再进行像素的叠加合成。

图 6 所示为本文系统的整体集成模块硬件 的总体方案。

2.2 软件实现

本文系统将红外、紫外、超声三路图像的坐标传入一个集成控制台。通过控制台对三路信号的坐标进行处理,最终在显示台上分别表示出红外、紫外、超声成像以及三路信号的合成视频。图7为系统软件集成的示意图。

3 多路信号联合检测的配准融合技术

本文系统中的红外、紫外、超声三路信号的



图5 紫外成像模块



图 6 总体方案



图 7 系统软件集成的示意图

传感器由于设置位置不同,所以在对同一局部 放电进行检测时存在定位坐标的差异。为了将 三路信号分别与可见光视频融合以及将三路信 号合成到一个视频框图中,本文对三路信号及 可见光视频进行了配准和融合处理(流程图见图 8)。

图 8 中,首先将红外、紫外、超声三路定位 装置固定在本文设计的系统中,分别利用红外、 紫外、超声三种传感器对局部放电进行检测,并 记录下这三种定位装置所检测到的局部放电坐 标;在不同的测量距离下,分别计算三者与可见 光视频的互相关测度 CC,然后通过坐标变换使 三者的 CC 值满足要求,并记录下此时的坐标变 换方法,即配准算法;最后,实现三路视频信号 的配准和融合。

4 实验室测试的实例分析

我们在实验室中分别对三种定位信号进行 了测试。实验放电源为局部放电发生器,置于一 个透明的玻璃杯中。本文系统在距放电源 3 m 处 对局部放电进行了检测。图 9、图 10 和图 11 分 别为红外、超声和紫外测试结果的定位图像。图 12 所示为这三种定位图像的最终合成结果。

图 11 紫外定位图像

信号分别与视频图像融合,而且还能将这三种

信号合成于同一视频背景之中。由于三路信号

的分辨率不同,我们选取分辨率较小的紫外信

本文系统不仅能够将超声、紫外、红外三种







图 8 图像配准的流程图



图 10 超声定位图像



图 12 合成效果图

号 (320×240) 作为基准,分别对三种信号和可见 光视频信号进行了像素的叠加融合。测试结果 表明,本文系统可以快速检测出局部放电,并可 对其进行准确定位。

5 结束语

本文系统具有综合利用多种方法对局部放 电进行检测的能力。通过三种检测方法的融合 对比,使局部放电检测变得更加准确和全面。通 过采集三种局部放电定位图像,可以全面地分 析和定位局部放电,使局部放电检测变得更加 准确。本文系统的抗干扰能力强,即通过结合多 种信号源的同步监测和对比,可以减少因单一 信号受干扰而产生的检测不准或者灵敏度丢失 的问题。此外,该系统还具有体积小、一体化以 及便携性强等优点,因此对于现场外绝缘的局 部放电在线检测具有重要意义。

参考文献

- [1] 辛晓虎.用于变压器中局部放电定位的十字形超 声阵列传感器研究 [J].中国电机工程学报, 2013, 33(21): 154–162.
- [2] 罗日成,李卫国,李成榕,等.基于改进 PSO 算法 的变压器局部放电超声定位方法 [J]. 电力系统自动 化, 2005, 29(18): 66-69.
- [3] 刘云鹏. 电力变压器局部放电的电气定位及诊断 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- [4] Fuhr J, Haessing M, Boss P, et al. Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1993, **28**(6): 1057–1067.

- [5] James R E. Discharge Detection in High-voltage Power Transformers [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(7): 1352– 1362.
- [6] Markalous S M, Tenbohlen S, Feser K. Detection and Location of Partial Discharge in Power Transformers Using Acoustic and Electromagnetic Signals [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical In*sulation, 2008, 15(6): 1576–1583.
- [7] 程述一. 局部放电超声阵列传感器的声学性能评价 及其稀疏设计 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [8] 吴张建. GIS 局部放电检测中特高频法与超声波 法灵敏度的对比研究 [J]. 现代电力, 2010, 27(3): 31-36.
- [9] 陈宏福. 超声波法检测 GIS 局部放电的研究 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 2008.
- [10] 谢庆. 基于空间谱估计的变压器局放超声阵列定位 方法研究 [D]. 北京:华北电力大学, 2010.
- [11] 陈书汉, 庞其昌, 靳贵平. 一种双波段图像实时融 合实验系统 [J]. 光学技术, 2006, 32(2): 277-279.
- [12] 马立新,徐如钧,胡博. 单通道双谱紫外电晕放电 检测方法 [J]. 测控技术, 2012, 31(3): 32–35.
- [13] 吴昊, 徐丹. 数字图像合成技术综述 [J]. 中国图像 图形学报, 2012, 17(11): 1333–1346.
- [14] 梁钊,杨晔闻,叶彦杰.电力变压器局部放电检测 方法探讨 [J].南方电网技术, 2011, 5(1): 85-89.
- [15] 刘嘉林, 董明, 安珊, 等. 电力变压器局部放电带 电检测及定位技术综述 [J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 1-7.
- [16] Rosenfeld A, Kak A C. Digital Picture Processing [M]. Orlando: Academic Press, 1982.

新闻动态 News

美国 Boston Micromachines 公司获得 NASA 研发空间成像变形反射镜合同

据 www.laserfocusworld.com 网站报道,

Boston Micromachines 公司宣布,它已通过 NASA 的小企业创新研究计划 (SBIR),获得一份为下 一代太空望远镜研发变形镜技术的合同。这项 为期2年价值75万美元的二期合同是在一期合 同中的概念实验论证完成后获得的。

该项目的目标是研发能提高执行器产率、 性能和可变形反射镜可靠性的新的生产方法, 以满足空间应用的严格要求。该项目的可交付成 果是100%可靠的2040驱动器变形反射镜。这镜 子与当前太空望远镜的概念需求相匹配,并将 作为最终生产10⁴面地基和空基望远镜变形镜的 垫脚石。SBIR项目制造过程中所用的先进技术 也将使 BMC 组合的器件性能得到提高。

"这项目的成功将有助于找到用可变形反 射镜进行太阳系外行星成像的解决方案。用我们 的 MEMS 技术制造的变形镜尺寸小、重量轻、 功耗低,将有助于减少未来太阳系外行星探索 任务的成本", Boston Micromachines 总裁 Paul Bierden 说。

口张小华