白皮书

关于高压设备局部放电声学成像的初步经验

Greg C. Stone
Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Canada
gstone@qualitrolcorp.com

Mladen Sasic
Iris Power-Qualitrol
Mississauga, Canada
msasic@qualitrolcorp.com

Christoph Wendel
Verkehrsbetriebe Zurich
Zurich, Switzerland
christoph.wendel@vbz.ch

A. Shaikh
Kinectrics
Toronto, Canada
ashfak.shaikh@kinectrics.com

关键词

电晕
局部放电
声学成像

摘要

数十年来，定向超声波麦克风一直被用来定位高电压设备中的表面局部放电和电晕点。但是，由于反射干扰和探测器视野限制，放电点的确切位置总是存在一些不确定性。此外，扫描整个绕组也需要一些时间。最近，随着声学成像仪的商业开发，这项技术取得了重大进展，声学成像仪可以显示声音相对于测试对象正常可见光图像的出现位置。也就是说，成像仪在测试对象上生成局部放电的声音图像，很像 UV 摄像机在测试对象的图像上定位来自局部放电的紫外光。声学成像仪利用大型宽带麦克风阵列，能够在声波和超声波范围内以可选频率范围显示声学信号。在点面电晕测试对象以及具有已知局部放电的定子线圈和定子上，评估了这款新工具的效果。表面放电最佳检测频带似乎介于 30-50 kHz 之间。也可以检测到内部空隙中的局部强放电，尽管其检测频率低于表面局部放电。在不同的测试对象中，可以快速确定多个放电点的精确位置。

简介

自上世纪 40 年代以来，人们一直在使用高压电容器或高频变流器对局部放电 (PD) 和电晕进行直接电气检测，以发现新设备中的绝缘缺陷，并对已运行的高电压设备进行绝缘状况评估。此类测试无法确定高电压设备中局部放电的确切位置。在过去，局部放电位置是使用射频、光学和声学探头 [1、2] 定位的。

射频探头（有时称为 TVA 或电晕探头）可检测局部放电和电晕信号发射的无线电信号。它可以检测表面局部放电和电晕，以及测试对象绝缘系统内的局部放电。表面局部放电和电晕的光学检测最初是通过人眼感应放电产生的光线来进行的。通过关闭照明灯（“黑视”或“关灯”测试）或在夜间（如果是在室外）进行测试，可以提高对局部放电的敏感度。在黑暗的房间中，可以使用光电倍增器来实现更高的敏感度。上世纪 70 年代，有时会在黑暗的房间和夜晚的室外使用可见光图像增强器。上世纪 90 年代末，发明了一种新装置，可以在紫外光范围内产生表面局部放电的快照或视频图像 [3]。这是一个显著的进步，因为它允许在有照明的室内或室外的日光下，通过测试对象的正常可见光图像作为背景，看到表面局部放电光学信号。这大大提高了以安全方式定位测试对象局部放电和电晕的能力，并可生成永久记录。这种 UV 相机现在广泛用于输电线路和变电站电晕检测，在本世纪前十年，该技术得到迅速改进。

类似地，局部放电和电晕的声学定位首先借助人耳及其有限的三角测量来进行，然后在听觉范围内应用定向麦克风来更好地定位局部放电点。上世纪 60 年代，随着定向超声波麦克风的发展，局部放电信噪比得到了改善。局部放电和电晕在超声波频率下产生更强的输出，尤其是在 35-50 kHz 的范围内（图 1）[4]。但是，由于视野随着距离的增大而扩大，以及来自坚硬平坦表面的反射，精确定位总是存在问题。

过去一年中，产生了一种新的声学技术。这是一种声像仪，包含几十个微型麦克风，这些麦克风组合在一起产生声源图像，叠加在测试对象的传统可见光图像上 [5]。该声像仪最初用于气体泄漏检测，但也可以用于定位表面放电。所评估的声像仪 Fluke ii910 含有 64 个麦克风，工作频率为 2 – 50 kHz 或 2 – 100 kHz。操作员可以通过触摸屏选择 5 至 20 kHz 的带宽以及此范围内的任何中心频率。名义上，它可以检测 0.5 m 到 100 m 处物体的声像，这意味着它可以安全地检测高电压下的局部放电和电晕。声级测量以 dB 为单位，并使用彩色声级标度。此类声像仪具有一种可测量声级与 50/60 Hz 交流周期（推断值）关系的模式，能够生成声学 PRPD 谱图。快照和视频均可采用标准行业格式录制。

在本文中，声像仪定位表面局部放电和电晕的效果通过点面电晕测试对象以及各种定子线圈和定子绕组测试对象进行评估。具体而言，确定了以下各项：

- 最佳检测频率
- 测试对象距离的影响
- 与使用声像仪和 UV 相机测得的 PDIV 进行比较。

测试对象和设备

电晕测试对象 (T1) 具有点面几何形状。点半径约为 250 µm，点与地面之间的间距为 25 mm。PDIV 约为 6 kV 交流有效值。这类似于 IEEE 1799 [6] 中描述的电晕测试对象。

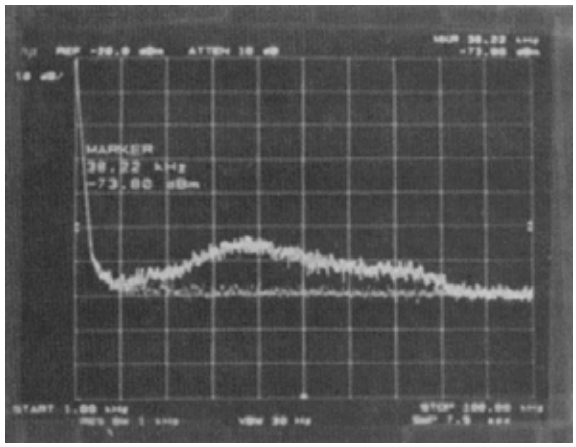


图 1. 表面局部放电的声学响应与频率之间的关系（较弱的线是断电时的背景噪声）。垂直刻度为 10 dBm/div，水平刻度为 1 kHz – 100 kHz。使用了平坦响应高达 100 kHz 的 B&K 4135 麦克风。[4].

还使用了各种定子线圈测试对象。T2 是一个 13.8 kV 的线圈，已进行过电压耐受性测试。局部放电的插槽半导体 (OCP) 涂层经历了严重的退化，由于表面局部放电，有许多部位上的半导体已经消失。线圈的碳化硅涂层与半导体涂层之间的界面也发生了退化。线圈安装在接地的虚拟插槽中。

测试对象 T3 是一组三个线圈，相间额定电压为 2.4 kV，在插槽中的一个线圈支脚上专门涂有半导体涂层，插槽可接地或浮动。这三个线圈连接到三相交流电源。线圈在插槽区域内存在自然的内部空隙局部放电。通过相对移动线圈，还会在端部绕组区域中形成相间局部放电。

测试对象 T4 来自完成了热循环测试的线圈，在该线圈中，铜导线与接地壁绝缘层分离。这会产生内部分层局部放电。线棒还因为局部放电抑制而导致涂层有一些轻微退化。该线棒的额定电压为 11 kV。

测试对象 T5 是一个电机定子绕组，额定电压为 6 kV。在测试之前，插槽出口处的局部放电源未知，可以使用声像仪定位。

使用在低频 (IEC 60270) 范围内工作的 PDTech DeltaMaxx 测量电气局部放电。除声像仪外，还使用 OFIL DayCor Superb 相机测量了来自放电源的紫外光图像。

检测频率

测试对象 T1 和 T2 都被用来从噪声中查找局部放电的最佳检测频率。对于 T1，测试对象与相机之间的距离为 1-8 m。对于 T2，距离为 2-4 m。图 2 所示是与 T2 线圈测试对象一起使用的声像仪。在所有情况下，测试对象会在成像前在稳定电压下工作 5 分钟，以确保局部放电/电晕源稳定。选择了 10 kHz 至 90 kHz 的中心频率，步长为 10 kHz，带宽为 +/-5 kHz。

图 3 所示是在距离点面测试对象 2 m 和 8 m 处以远高于 PDIV 的 10 kV rms 电压记录的声像图。彩虹色圆圈位于电晕的中心。图像右上角显示了最大声级（以 dB 为单位）。在 35-45 kHz 频率下施加相同电压时，测得 2 m 处的最大声级为 24 dB，8 m 处的最大声级为 12 dB。声像仪具有在选定频率范围内自动定位声源的功能，并能确定局部放电源与声像仪之间的距离。但是，如图 3b 所示，对于此特定设置，在 8 m 处未自动找到电晕源（该源被自动定位在最远 6 m 距离处）。

表 1 显示了在 10 kV rms 下，点面测试对象 (T1) 在三个距离处的检测频带与局部放电声级 (dB) 之间的关系。传统局部放电探测器记录的局部放电幅度为 10 nC。第二列显示了点面对象未经过通电（因此也没有电晕）时记录的声级。这种“本底噪声”取决于噪声环境，与测试对象的距离无关。高于 75 kHz 时，无论是否通电，声级均相同。在 5-15 kHz 范围内，声像图上有许多较大的“斑点”，这可能是由背景噪声造成的，因此无法识别电晕源。表 1 中的“净值”列显示

图 2. 用于检测线圈 T2 上局部放电的声像仪的照片。

(3a)

(3b)

图 3. 点面电晕的声像图，以 35-45 kHz 的频率在距 T1 测试对象 2m (a) 和 8 m (b) 处记录

中心频率* (kHz)	本底噪声** (dB)	与测试对象的距离 (m)					
		2 m		4 m		8 m	
		dB	净值	dB	净值	dB	净值
90	40	40	0	40	0	40	0
80	39	40	1	40	1	40	1
70	33	37	4	34	1	34	1
60	27	35	8	27	0	27	0
50	20	32	12	24	4	20	0
40	10	30	10	20	10	12	2
30	9	26	17	19	10	12	3
20	7	25	18	18	11	11	4
10	3-11	20	-	15	-	7	-

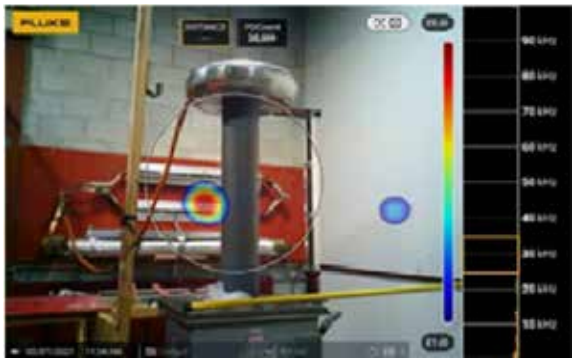
* 带宽 +/- 5 kHz

** 没有施加电压时

表 1. 点面测试对象在不同距离时声像仪声级与频率之间的关系

了通电和断电时的声级差值。一般而言，随着检测频率范围的减小，测量的声级净值变高，但会发现更多与电晕无关的“斑点”。如 [4] 中所见，30–50 kHz 的频率似乎最适合进行电晕检测。随着距离的增加，声级的原始值和净值会降低。这是可以预期的，因为一般而言，高频比低频衰减得更厉害。此外，对于固定距离，随着频率的降低，声像图的面积会增加，这可能是因为在更低的频率下，声波波长变大所致。

表 2 显示了声像仪和定子线圈 (T2) 相距 2 m 和 4 m 时，线圈的局部放电声级与检测频率之间的关系。线圈严重损坏了半导体涂层，当通电至 8 kV rms 线对地电压时，这些缺陷位置的局部放电明显可见。同样，用于检测局部放电的最佳频率似乎在 30–50 kHz 的范围内。较高的频率范围在本底噪声之上产生很少的超声波信号，而在较低的频率下，环境噪声会掩盖局部放电源。图 4a 所示是一幅表面局部放电的线圈声像图。在这张照片中，还可以看到原始线圈局部放电源在墙壁上的反射。这种反射随着电压的降低而消失，就像局部放电源那样。在过去，这种反射会给定向超声波麦克风的使用带来许多问题。图 4b 所示是同一局部放电源的 UV 图像。



(4a)

(4b)

图 4. 在距离声像仪 4 m 的模拟插槽中，8 kV rms 线圈上的半导体发生严重损坏而产生的局部放电。(a) 显示的是 25–35 kHz 频率的声像图。彩虹色圆圈是真正的局部放电源。注意墙壁上的蓝色（较低声级）反射。(b) 显示的是从 UV 相机记录的图像，其中小白点表示放电。

中心频率 (kHz)	本底噪声 (dB)	与测试对象的距离 (m)			
		2 m		4 m	
		dB	净值	dB	净值
90	40	43	3	41	1
80	39	42	3	40	1
70	33	41	8	34	1
60	27	39	12	32	5
50	22	37	15	30	16
40	11	32	21	27	16
30	7	29	22	25	18
20	7	27	20	24	14
10	-	26	-	26	-

表 2. T2 线圈测试对象的局部放电声级与频率和距离之间的关系

UV 相机和声像仪在测量 PDIV 方面的比较

T1 电晕和 T2 线圈局部放电测试对象在声像仪和紫外光 (UV) 相机以及传统局部放电探测器中，用于比较局部放电起始电压 (PDIV) 和局部放电熄灭电压 (PDEV)。声像仪设置为在 35-45 kHz 频带中测量 PDEV 和 PDIV，因为在之前的测试中，发现这是最佳检测频率。几乎所有情况下，起始电压和熄灭电压之间的差值均在 100 V 以内。对于该线圈，在 2.5 m 和 4 m 距离处，起始电压和熄灭电压没有差异（表 3）。

T1 上的传统局部放电测试显示，对于点面电晕，正局部放电（负半周期）和尖峰高压负局部放电（正交流周期）具有不同的 PRPD 谱图。负局部放电约为 10 nC，而正局部放电约为 2 nC。接近起始电压时，负尖峰电晕是间歇性的，而正电晕更稳定。

UV 相机的一个优点是可以放大放电位置，而声像仪具有固定的视野（图 4a 与 4b 对比）。

不同测试对象的快照

声像仪能够记录局部放电活动的快照，并可录制长达 5 分钟的视频，这有助于实施调查以及测量 PDIV/PDEV。视频图像的示例可在 [7] 中查看。本节介绍不同测试对象的声像图快照示例。

图 5 显示了当相间电压为 6.9 kV 或 4.1 kV（线对地）时，端部绕组中 A 相和 C 相线圈之间测试对象 T3 的相间局部放电。调整 A 相线圈位置，使 A 相和 C 相线圈在连接导线附近几乎接触。线圈的插槽部分未接地，以防止相对地局部放电。

T4 是一个定子线棒，在铜导线和接地壁之间存在分层。将声像仪设置为 13-23 kHz 范围时，沿着存在电应力的整个线棒可以看到声学活动（图 6a）。利用声像仪下载声级与时间的关系数据，生成了声级与交流相角的关系图（图 6b）。这显示了没有极性主导的典型局部放电分相响应，表明声像仪对分层局部放电很敏感，尽管频率较低（更容易受到噪声影响）、声级也较低。

测试对象/距离 (m)	传统方式		UV 相机		声像仪	
	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV	PDIV	PDEV
2 m 处的 T1	6.2	6.2	6.3	6.2	6.2	6.2
2.5 m 处的 T2	-	-	3.5	3.2	3.5	3.2
4 m 处的 T2	-	-	3.5	3.5	3.5	3.5

表 3. 不同探测器的 PDIV 和 PDEV (kV) 比较

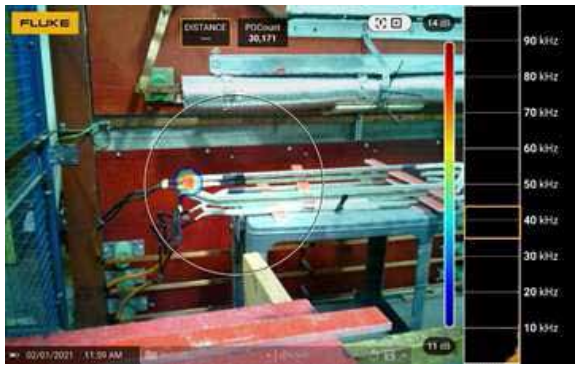
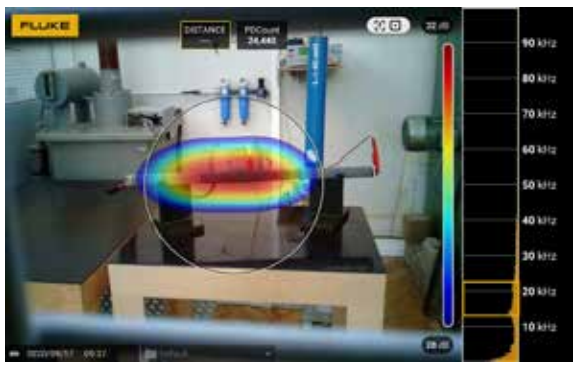
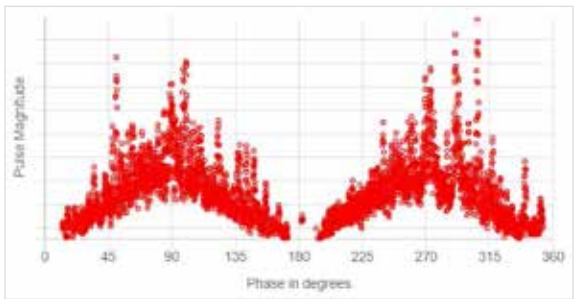


图 5. 在 A 相和 C 相线圈几乎彼此接触的端部绕组中发生相间局部放电。B 相线圈位于 3 个堆叠线圈的底部



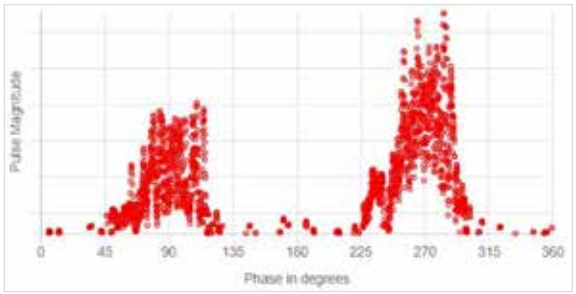
(6a)



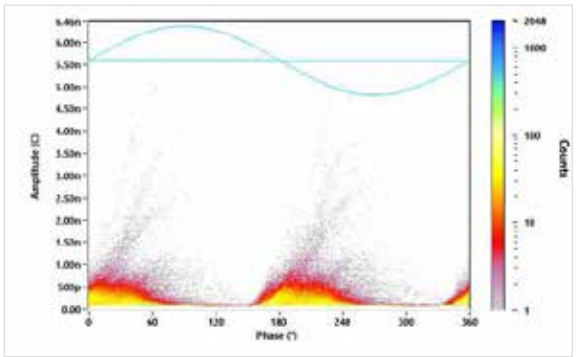
(6b)

图 6. 经过热循环的线棒可能出现内部分层局部放电 (a)。请注意 (a) 中使用的频率范围较低，并且声级也要低得多。(b) 显示声像仪生成的“PRPD”图，假设采用 50 Hz AC 周期

(7a)



(7b)



(7c)

图 7. 在离线局部放电测试中，使用声像仪和传统方法测量一个相上的局部放电。(a) 中清楚地显示了一个线圈的插槽出口处的局部放电，而 (b) 显示了正极主导的声学 PRPD。(b) 中的实际相角可能不正确。(c) 是传统的离线局部放电测试 PRPD。

图 7a 显示的是 6 kV 定子绕组 (T5) 在 35-45 kHz 时的声像图，其中一相通电至 3kV。表面局部放电在一个线圈的插槽出口处明显可见。通过目视检查插槽来验证这一点。

结论

局部放电声像仪似乎是一种非常有用的工具，可提高在与通电的测试对象保持安全距离的情况下定位表面局部放电的能力。该声像仪具有足够的空间分辨率，可识别大多数实用高电压设备上的实际局部放电点。由于能够记录局部放电幅度（假定与声级相关）与交流周期的关系，使人确信实际检测到了局部放电和电晕。传统局部放电探测器、声像仪和 UV 相机的局部放电起始电压和熄灭电压似乎与电晕和表面局部放电大致相同。与早期的超声波麦克风相比，声像仪的一个显著优势是它可以轻松区分实际的局部放电点与反射干扰。对于表面局部放电和电晕，最佳信噪比似乎在 30-50 kHz 的范围内。但是，与 UV 相机不同，有一些证据表明可以检测到显著的内部空隙局部放电，尽管其幅度较小。

致谢

感谢 Fluke Corporation 借给我们 ii910 声像仪。还要感谢瑞士 Von Roll 研究所 Christoph Herold 先生的鼎力相助。

参考文献

[1] IEEE 1434:2014，“交流电动机械中局部放电的测量指南”

[2] G.C.Stone 等人，“旋转机械的电气绝缘”，第 2 版，Wiley-IEEE 出版社，2014 年。

[3] K.W.Forsyth，“放电现象的光电式非接触测量”，美国专利 6476396B1，2002 年 11 月。

[4] R. Van Haeren 等人，“防止室外配电类金属铠装开关设备出现故障”，IEEE Trans PAS，1985 年 10 月，第 2701-2712 页。

[5] C.P.Suurmeijer 等人，“手持式声像仪”，美国专利 D907,097，2021 年 1 月。

[6] IEEE 1799:2012，IEEE 建议的定子线圈、线棒和绕组的外部放电质量控制测试规程。

[7] https://irispower.com/learning-centre/acoustic-camera-video-files/

Fluke. *让您的工作畅通无阻。*

福禄克测试仪器（上海）有限公司
电话：400-810-3435

北京福禄克世禄仪器维修和服务有限公司
电话：400-615-1563

福禄克测试仪器（上海）有限公司上海维修中心
电话：021-54402301，021-54401908 分机 269

福禄克测试仪器（上海）有限公司深圳第一特约维修点
电话：0755-86337229