

声发射技术在变压器内部局放检测与定位的研究

柔刚（美国物理声学公司北京代表处）

摘要：介绍了声发射技术进行变压器内部局部放电检测与定位的方法，判断局放的时机，严重程度以及噪声的去除。验证了超声波对变压器局放检测的可靠性，有效性，也为今后声发射对变压器进行长期在线监测提供了有力的依据。

关键词：声发射，声发射定位，局部放电

引言：

变压器是变电站内最重要设备的设备之一，运行安全对供电可靠性有举足轻重的作用，它的状况直接关系到电力系统的安全经济运行。通过局部放电检测技术的应用及时发现变压器早期的缺陷，避免潜伏性和突发性事故，保证安全供电，这无疑具有重要的经济和社会效益。声发射（AE）技术是电力变压器局部放电故障诊断的有效技术，可以发现、定位和诊断变压器的局部放电问题，提前预判变压器的健康状况，对于避免电网重大设备事故的发生，保证变压器的安全运行、提高设备检修和维护效率发挥着巨大的作用。

变压器在局部放电过程中，总是伴随着脉冲电流、电磁辐射以及声、光、热等现象。近年来利用局部放电过程中产生的声发射（Acoustic Emission，简称 AE）信号来对其进行判断和定位的方法越来越引起人们的重视。这是因为当介质内发生局部放电时，由于分子的激烈撞击，气泡的形成和发展，液体的流动以及固体材料的微小开裂，会产生一定的声发射信号。通过研究发现，局部放电产生的这些声信号与局部放电的程度和类型有着一定的对应关系。

与其它检测方法相比，声发射检测的优点是：1. 可以对变压器进行在役实时和连续监测。2. 可以免受电磁干扰的影响，因此可用于电磁干扰非常严重的场合。3. 利用声波在变压器油等介质中的传播特性可以对局部放电源进行定位，但由于受到声发射仪器、现场测试条件以及信号在变压器内部传递途径等因素的影响，这种测试方法目前还不成熟。本文主要从测试原理和定位方法的进展方面进行综述。

1. 检测原理

声发射（AE）是指物体在受到外界作用时，因迅速释放能量而产生瞬态应力波的一种物理现象。当物体中有声发射现象发生时，由声源发射出的每一个 AE 信号都包含了物体内部结构、缺陷性质和状态变化等丰富信息。在电力变压器内部结构中，局部的绝缘薄弱在电场的作用下产生高频脉冲放电，放电电弧对油介质产生瞬态冲击，产生爆裂状的超声波信号，即 AE 现象。AE 信号以球面波的方式向四周传播，通过油介质于不同时间传到安装于变压器外壁不同位置的 AE 传感器，声发射检测系统接收和处理这些 AE 信号，根据其波形和频谱特征进行定性和定量分析，并利用各传感器接收到 AE 信号的时间差对 PD 源进行定位，推断出变压器内部 PD 的位置、状态变化程度和发展趋势。

现场进行变压器局部放电声发射检测时难免会遇到外界噪声干扰，声发射检测系统通过设置局部放电检测阈值，分析信号的关键特性，如幅值、持续时间、三维定位、特征指数、原始波形等，可确认 AE 信号是由局部放电还是噪声干扰产生的。变压器发生局部放电时，上述特征一般会集中于变压器某一特定的空间（经三维定位），显示出特定的模式。

2. 定位原理

每一突发性的局部放电脉冲信号定义为一个局部放电事件，每一传感器收到的由一个局部放电事件产生的超声脉冲信号定义为一个撞击，对每一撞击可提取出一组特征参数如超声脉冲到达时间、幅度、能量等，超声系统可对撞击的特征进行自动识别并利用各通道撞击的到达时间差进行定位，实时三维局部放电源自动定位及其二维投影显示。

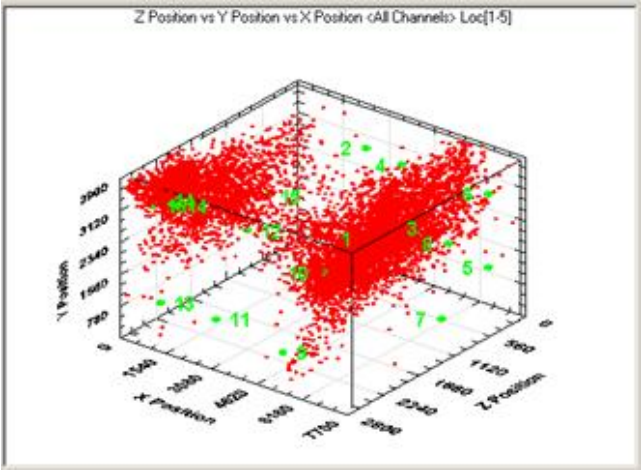


图 1. 局放源位置三维显示

3. 数据处理

利用声发射检测系统的局部放电检测软件(AEwin for Sensor Highway III)，即撞击谱(Hit Spectrum)及特征指数(Character Index)图示化分析方法，检测人员可不对 AE 信号进行复杂的处理，而直接从对 AE 信号处理的图示中观察到与局部放电信号或与工频信号有关的特征模式，以便对整个变压器的局部放电状态进行判断。该方法尤其适用于 PD 较严重的情况。

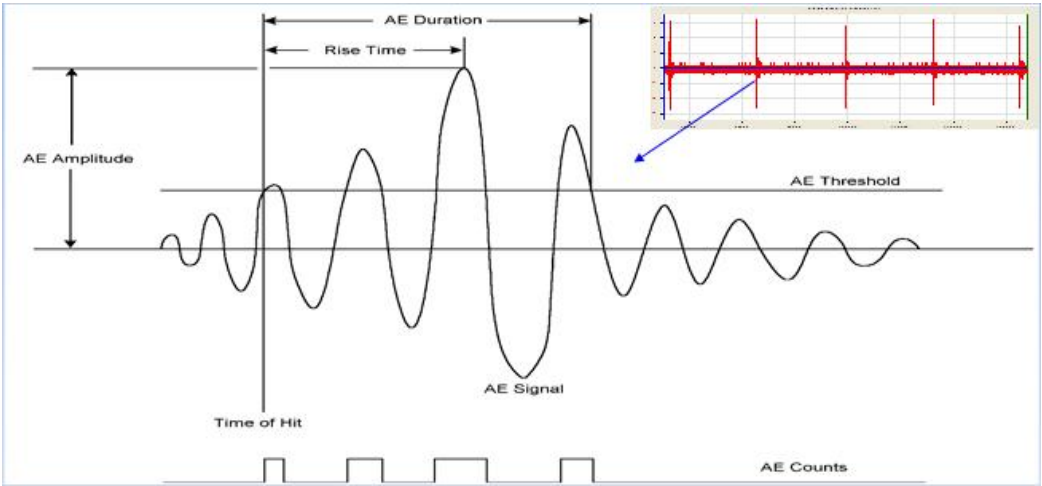


图 2. 局放波形

4. 检测设备

本次检测使用的是美国 PAC 公司声发射检测、监测定位系统系列产品，此系统采用声发射检测原理，具有现场检测、分析、定位以及远程监护功能，图片如下：

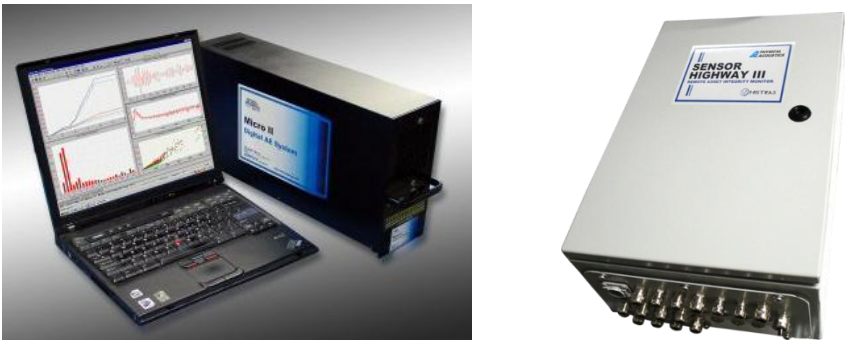


图 3. 检测设备

5. 检测流程

第 1 步、拍摄照片

进变电站之前需要对变电站的铭牌进行整体拍摄。

第 2 步、记录被测变压器的相关信息

开始检测之前需要记录被测变压器或换流变的相关信息，包括：生产厂家、型号、出厂日期、额定容量等，可采用现场拍摄的形式进行记录。

第 3 步、现场勘查

现场勘查找出所有可能出现的噪声源，如电磁干扰、振动、摩擦和液体流动等，并设法对这些噪声源予以排除。

第 4 步 处理器校准

检测前按说明书要求对信号处理器进行校准，确保声发射检测系统的每个通道都处于正常工作状态。

第 5 步、通道灵敏度校准

在局部放电检测之前和结束之后对每一个通道进行模拟源超声脉冲幅值响应校准。采用 $\Phi 0.5\text{mm}$ ，硬度为 HB 的铅笔芯折断信号作为模拟源。模拟源距换能器 100mm 内，每个通道响应的幅度值与所有通道的平均幅度值之差要求不大于 5dB。

第 6 步、定位校准

在被检测区的任何部位，超声脉冲模拟源产生的信号至少能被该时差定位阵列收到，并得到唯一定位结果，区域定位时至少能被该区域的超声脉冲换能器接收到。

第 7 步、检测频率的确定

超声脉冲局部放电的检测，应避开低频率干扰而以高频率为主。但频率越高，声波在传播过程中的衰减越大，因此超声脉冲局部放电检测的频率一般在数十到数百 kHz，本次检测选用 150kHz。

第 8 步、传感器布置

将 16 个超声波传感器安装于变压器的前后两个面，将分别编上 1-16 编号，软件进行 16 个传感器坐标的设置，及其他参数设置。

第 9 步、软件开始测试

设置好软件各参数后，开始测试，并观察各个通道的数据和图谱的变化趋势，记录相关数据及图谱。

第 10 步、背景噪声检查

背景噪声检查试验在正式试验前 10 min 进行。检测阈值设置高于背景噪声 3-5 个 dB，以测试时没有背景噪声或仅有少量噪声（如 1 min 有几十个或上百个撞击）为准。

第 11 步、异常点进行诊断、定位

若检测到变压器某个面存在疑似异常信号，将其他 3 个面传感器取下，存在异常信号面重新设置各个传感器坐标，多次复测，并采用软件区域定位和三维定位，确定异常信号源位置。

第 12 步、测试结束

测试结束，记录好相关数据，收拾好仪器及电源，离开现场。

6. 检测数据分析

本次测试总共进行了 2 次完整的加压过程，2 次加压在变压器中部都有个别通道检测到有明显的局放特征的信号，但第一次测试为了大体确定放电位置传感器布置的比较疏松，第二次测试前将传感器位置进行了调整，所以第二次测试定位点比较集中，着重分析第二次加压过程：

6.1 检测参数设置

阈值 35dB，模拟滤波器 100kHz-400kHz。

6.2 传感器布置

换流变压器检测时传感器被均匀地布置在变压器的四周外壁上，安装传感器位置坐标如下图所示。

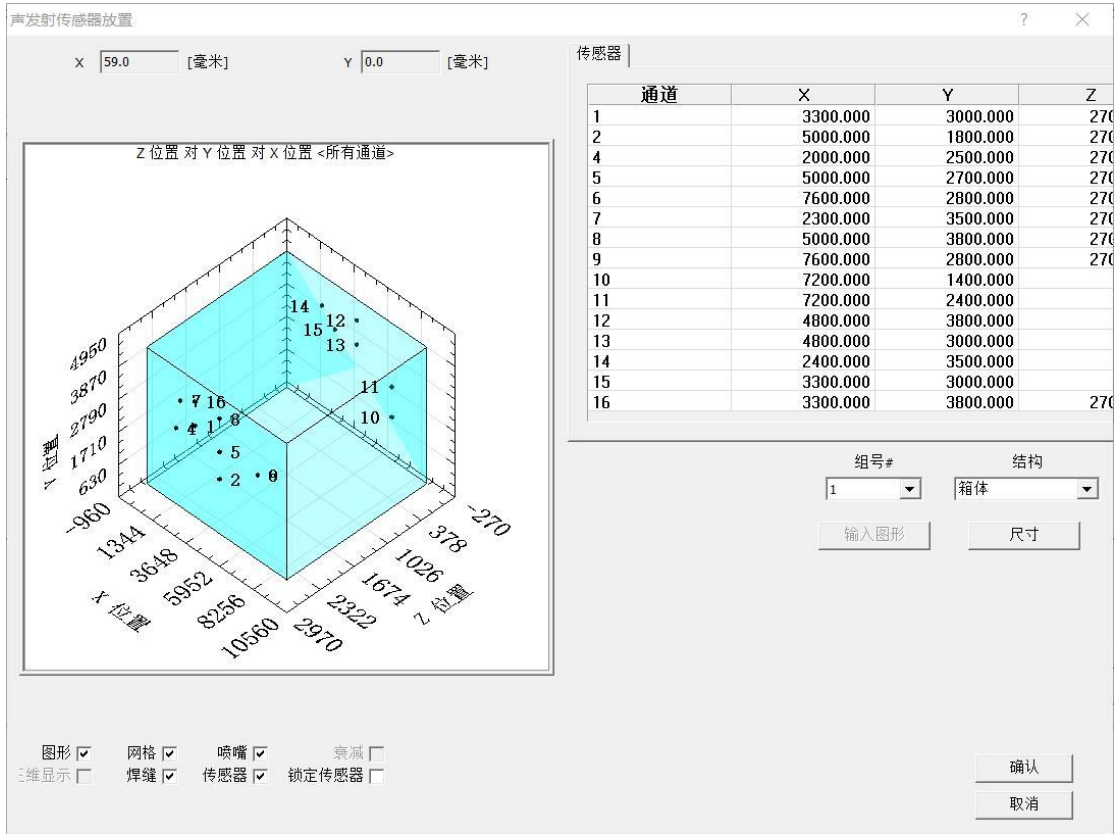


图 4. 传感器坐标

6.3 检测图谱分析

1) 幅值图谱：幅值主要集中在 35~50dB 之间，幅值相对较小，数据如下图所示：

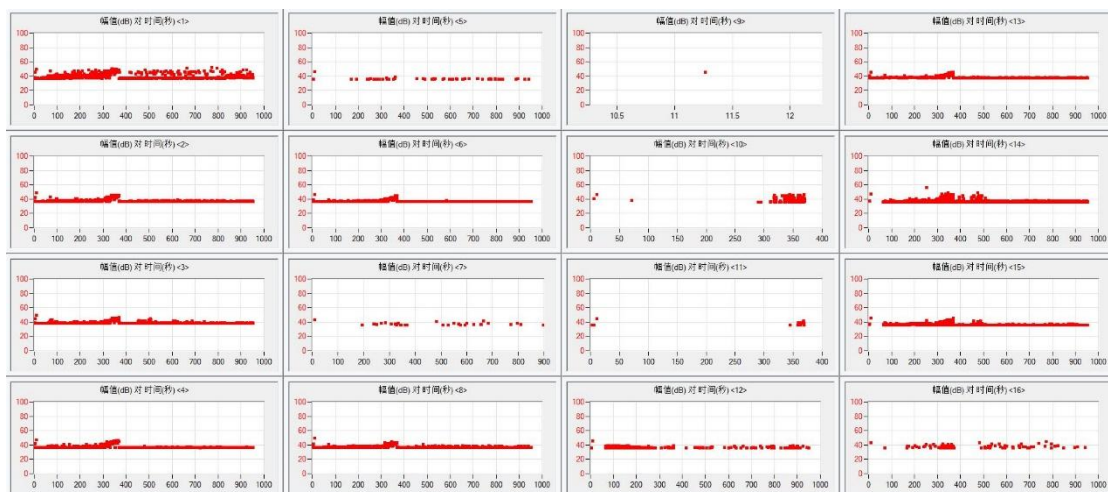


图 5. 各通道幅值图

TAFI 特征指数图谱：加压频率为 177.5Hz，12、14、15 通道的 X 轴 TAFI 指数在 3，4 位置特别集中，代表 1.5 个周期和 2 个周期出现一次的放电信号。

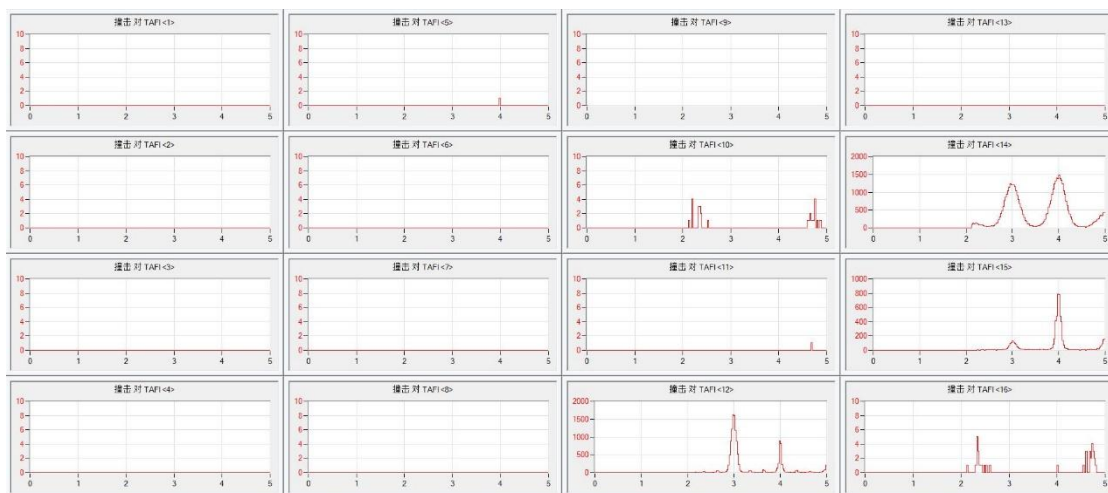


图 6. 各通道 TAFI 特征图谱

波形流：第 14 通道以 1M 采样率采集 1 秒的原始波形流数据如下图，将其中一个脉冲波形放大后可以看到信号特征，持续时间大概 5ms，是典型的局放波形。

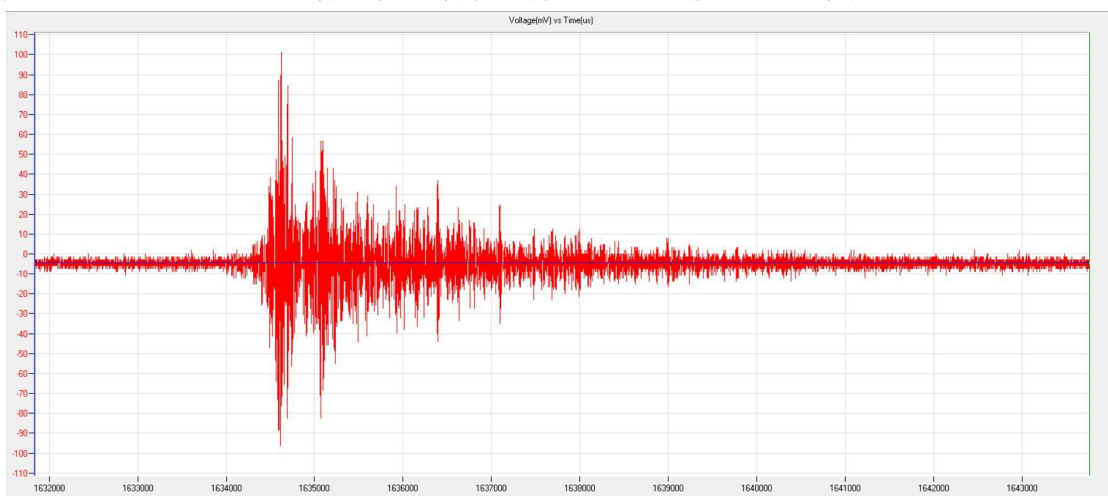


图 7. 局放波形

三维定位图：X-Y-Z 三维定位图、X-Z 俯视图及现场定位换流变实物图如下，

共检测到 6 次定位事件，且位置不具有聚集效应，事件的位置呈分散状态，即没有固定位置定位特征，大致区域如下实物图所示：

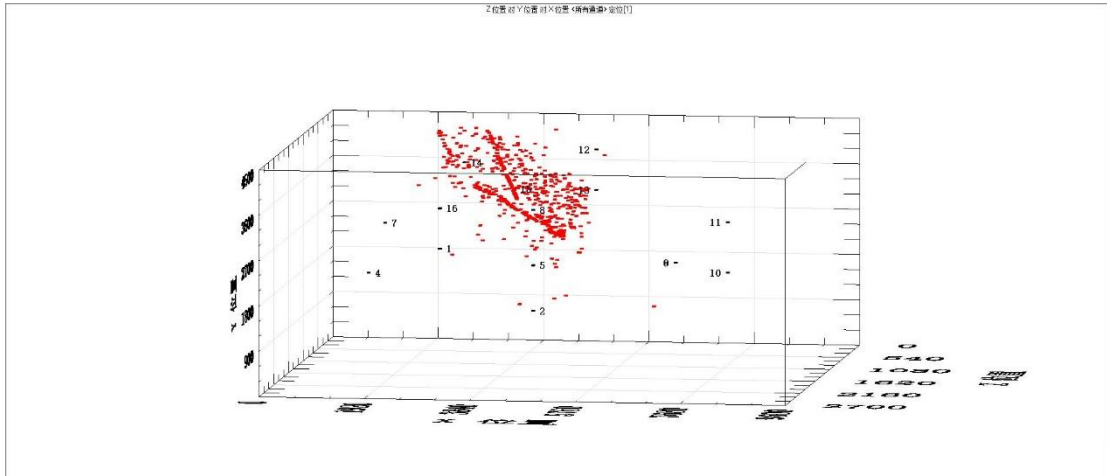


图 8. 三维定位图

7. 结论

本次检测时间较短，在电压加到 1.1 倍电压下信号很小，并且没有集中的定位点，在电压加到 1.3 倍电压下并持续一个小时的过程中，一些通道开始的出现 TAFI 整数位集中的现象，体现比较明显的局放特征，但此局放特征并非持续性的信号，而是间隙性的放电信号，从 X-Y-Z 三维定位图、X-Z 俯视图及现场定位换流变实物可知，在换流变网侧套管出线位置附近区域出现比较集中的定位点，由于信号幅值较小，即此区域存在轻微局放信号，信号源大致区域详见 X-Y-Z 三维定位图和定位区域现场实物图。

8. 总结

(1) 多通道变压器局放超声波定位系统可以有效的检测到局放信号，区分放电与噪声干扰。

(2) 该系统可以较为准确的显示放电区域，为故障判断提供依据。

(3) 当发现有可疑放电的变压器或换流变时，使用该系统进行长期的连续监测可以有效观察局放的发展趋势，为避免事故发生提前预报。

(4) 但是声发射测量变压器局部放电具有一些电气方法所没有的优点，近年来计算机技术、声发射设备和电子技术的快速发，为声发射检测方法的广泛应用提供了坚实的物质基础。但如前面所述，在现场应用中，由于受到各种因素的干扰，检测灵敏度和定位的精确度都受到一定影响。在以后的发展中，不仅要检测系统硬件进行完善，还要从定位理论、识别算法等方面作进一步研究，另外还应更加深入地探讨局部放电的理论基础，寻找在不同的绝缘系统中，放电情况下绝缘老化的性质、形式和程度与检测信号之间的关系，从而提高诊断结论的科学性。

参考文献：

[1] MM de A Olivieri , Mannheimer WA , Ripper 2Neto AP. On the use of acoustic signals for detection and location of partial discharges in power transformers[A].Conference Record of the 2000IEEE International Symposium on Electrical Insulation[C].USA :2000.259-262.

[2] Deng Jiangdong , Xiao Hai , Huo Wei , et al. Optical fiber sensor — based detection of partial discharges in power transformers [J].Optics & Laser Technology , 2001, (33) :305-311.

[3] Cole PT. Location of partial discharges and diagnostics of power transformers using acoustic methods [A].The IEEE Conference “ Diagnostic methods for Power Transformers ” [C].London :1997.

[4] 王国利 , 郝艳捧 , 李彦明 . 电力变压器局部放电定位方法的现状和前景 [J].变压器 ,2001,38(11) :22-27. [5] 顾文业 , 王志敏 , 顾晓安 . 应用超声波测量法判断变压器内部局部放电的研究 [J].噪声与振动控制 ,2003, (2) :46-48.

[6] Gulski E , Krivda A. Neural networks as a tool for recognition of partial discharges [J].IEEE Trans on Electrical Insulation ,1993,28(6) :984-1001.

[7] 李燕青 , 陈志业 , 律方成 , 等 . 超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究 [J].中国电机工程学报 ,2003,23 (2) :108-111.