

变压器局放超声检测应用

汪文有, 董卫平, 许凤旌

(美国物理声学公司 (PAC) 北京代表处, 北京 100029)

摘要: 本文主要介绍超声技术在变压器局放检测过程的特点, 并采用人工放电源模拟变压器不同位置的放电, 利用局放检测系统对该放电源进行模式识别分析与定位, 讨论了超声局放检测技术在变压器检测的使用前景。

关键词: 超声技术; 局放监测; 模式识别

中图分类号: TM403.3

文献标识码: A

Monitoring of AE during tunnel excavation

WU Wei Cheng¹, WEN You Wang², FAN Xing Meng¹

(1. East China Investigation and Design Institute Hangzhou, 310014, 2. Beijing University of Chemical Technology Chemical Process Equipment, Beijing 100029)

Abstract: Introduced for the technique of acoustic emission monitoring during tunnel excavation in the results, according to AE signal waveform, frequency spectrum characteristics determine the location of the excavation of tunnel face using three-dimensional positioning method determination of the depth of the loose rock, has been the process of TBM, different stages of the signal differences are used to describe the integrity of TBM, the state of rock mass.

Key words: Acoustic emission, monitoring, tunnel, relaxation depth

1 引言

变压器作为电力系统的重要组成部分, 其运行状态的安全可靠尤为重要。由于变压器制造、安装、使用过程中, 人为或自然原因会使得变压器在长期使用过程中内部出现绝缘击穿 (局放) 现象, 轻微时使得变压器产生异响, 降低输电效率, 严重时会导致变压器爆炸损毁, 带来巨大的经济损失和严重的负面连带效应。

变压器内部的复杂结构使得现有的检测方法显现出局限性, 本文基于超声技术对变压器检测提供一些成功的案例和思路, 现有的监测技术如果结合超声技术共同实时在线监测变压器的运行状态, 无疑可以及早发现被监测变压器的运行状态和完整性程度, 既能有效避免恶性事故的发生, 同时科学的监测-维护策略在避免资源浪费的同时, 更将带来巨大的安全效益。

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为超声, 也称为应力波发射。超声是指局域源快速释放能量产生机械震荡, 并通过传播介质以波动的形式向外传播。变压器内部能够形成电压差

的部位都可视为两个电极, 不同的压力差会使得电极间的介质处于不同状态, 当达到介质的电离强度, 便会形成电离击穿, 极间电流 (离子的运动) 会与介质粒子发生快速碰撞, 产生声、光、电、磁等物理现象, 其中的声现象就是介质的机械震荡, 通过超声传感器对震荡信号的接收, 并根据到达的时差关系, 便可以对信号进行定位分析。

2 变压器监测方法

现有变压器检测包括溶解气体分析 (DGA) 和超高频 (UHF)。DGA 的方法往往在变压器运行一定时间后, 且放电现象达到一定程度, 其内部绝缘介质击穿气化溶解在变压器油中, 经过一段时间扩散被检测发现。接收到局放溶解气体往往与接收点距离局放源的远近, 和局放强度以及溶解的时间长短相关联, 需要长时间的后端油液采样分析, 其实时性和可靠性有待进一步提高, 且无法判断局放产生位置以及局放源的严重程度。UHF 方法在判断局放过程具有一定的优势, 但易受变压器周围交变电磁场的干扰, 其无法准确识别电晕和局放, 两者的现象容易混淆在一起, 无法实现局放源的位置识别

以及真正局放源的变化情况。DGA 与 UHF 都无法实现三维定位,且分析手段单一,无法提供丰富的分析数据进行结果的互相验证。DGA 和 UHF 仍然是变压器检测不可或缺的常规检测方法,针对其具有的局限性,考虑采用超声方法进行实时、在线、定位、特征识别分析等功能,对变压器的整体监测具有重要的现实意义,利用各种检测方法的互补优势就可以不断提高检测的准确程度。

对于工程安全监、检测而言,具有一定误差的超声源定位,可以为现场工作人员提供直观的监、检测结果,便于专家们有针对性的分析损伤位置产生超声现象的初步原因,基于不同位置损伤源具有的危害性程度的大小选择相应的维护策略。超声技术的优势是:告知是否存在局放现象;局放发生的位置;发生局放的位置有几处;产生局放的地方局放强度大小;各处局放的活动性如何;局放具有何种发展趋势。

目前存在超声研究的几个问题需要说明:针对定位精度问题,由于现实放电源并不是一个点,而是具有一定尺寸的空间域,放电是需要正负电极对绝缘介质的击穿,所以其放电电弧有时不具有单一性和重复性,并随着放电损伤程度的增加而发生变化,即放电源位置会在一定空间域内产生,而不是某一个点。其次变压器内部的复杂结构(铁心、绕组、加强筋板、机械结构等)与声源的相对位置不同,对声波的传播路径产生一定的阻隔,使得声波传播路径在一定方向上产生变径,对于基于时差定位的三维算法,其定位显示也会产生一定的误差,但同一声源的信号会被集中的定位出来,具有一定集中的趋势和方向性,该方法对损伤位置具有很好的指导性。

采用局放特征分析系统判断是否产生局放,由于局放现象往往发生在正负最大电压载荷的条件下,因此其出现的规律与变压器的输变电工频具有一定的关联特征,且其出现的相位关系具有一定的统计规律,采用局放分析系统可以有效识别局放信号与噪音信号的特征差别。

综上所述,超声技术无疑是对现有技术的有效补充,并在现场应用中得到了大规模的应用,其应用结果的验证性也使我们理由相信声技术在变压器安全状态检测方面会得到更进一步的发展。

2.1 变压器超声检测关注的问题和常见干扰

变压器超声检测常常关注什么时候适合超声测

试?其中包括电力设备在线正常运行期间,现场断电后用各种方法离线确认故障源,电力设备制造厂家对设备;离线进行质量控制检验时,在维修单位对设备进行维修后在线或离线检验维修效果,新设备现场安装调试进行在线试运行,其它特殊情况包括大负载-太阳风暴等在线监测过程均可应用超声检测方法。

常见噪声干扰源包括:气泡的紊乱流动,下雨时雨滴对设备表面的撞击,风扇及油泵的开启,电磁噪音,刮风及沙粒对设备表面的撞击,负载分接开关动作时产生的瞬时冲击等。

与故障有关的超声信号来源包括:由局放产生的脉冲信号,由电弧产生的脉冲信号,由过热产生的热脉冲信号,由气泡破裂产生的脉冲信号,纸介质碳化过程产生的脉冲信号,松动部件或连接产生的冲击信号,气体泄漏产生的紊流信号等。

2.2 超声监测的目的和意义

超声监测的主要目的是:确定超声源的部位;分析超声源的活动情况从而进行破坏分析或预报;确定超声发生的时间或载荷;评定超声源的严重性等。

本次超声监测目的为了解人工局放源的局放信号的参数特征,确定局放源的位置,根据局方分析系统判断是否存在局放以及局放信号出现的规律性特征。

2.3 变压器故障原因

变压器在长期使用过程中,接头处的振松、灰尘的堆积、产品的老化等,产生绝缘不良,形成高压击穿。

常见的现象包括母线烧蚀,线圈过热变形,铁心接地不良烧毁,高压套管过热。这些现象的发生使得损伤处的动态平衡发生变化,在工作状态下释放能量。

该能量在变压器油中以应力波的形式周向传播,被贴于外壁的传感器接收到,通过超声参数分析、特征分析找到局放源位置,分析局放的严重程度。

变压器的局放是一种结果,结果的大小会有不同,其产生是由无到有,具有一个从完好状态到局放状态的变化过程,局放现象也是具有能量的累积-释过程。超声是指局域源快速释放能量产生机械震荡,并通过传播介质以波动的形式向外传播。变

压器内部能够形成压差的部位都可视为两个电极，不同的压力差会使得电极间的介质处于不同状态，当达到介质的电离强度，便会形成电离击穿，极间电流（离子的运动）会与介质粒子发生快速碰撞，产生声、光、电、磁等物理现象其中的声现象就是介质的机械震荡，通过超声传感器对震荡信号的接收，并根据到达的时差关系，便可以对信号进行定位分析。

2.4 变压器、局放源结构与超声传感器布置

变压器尺寸为 $X*Y*Z=5300*2100*1820\text{mm}$ ，人工局放源位置如图 1 所示。变压器长度、宽度、高度分别为 5300mm、1820mm、2100mm，放电源采用通过支架固定在变压器顶部，并通过人孔放入变压器内部，浸入油液液面下一定的距离，局放源的位置坐标约为 $X*Y*Z=1200*1000*1620\text{mm}$ ，利用人工高压使得局放源产生局放现象。

放电源本身的放电空间域尺寸较大，分布在直径 130mm 的半球范围内，高度 90mm 左右，放电源外部为 3mm 厚度的高分子材料筒壁，并在筒壁上部均布有三个直径为 38mm 的圆孔，使得放电结构内充满变压器油，并通过该三个孔将放电震荡传出去，放电源的特殊结构对于局放信号声波的传播路径将会产生影响，改变传播路径或者使得波形特征发生变化，但信号的主要时频特征仍然具有有效性。

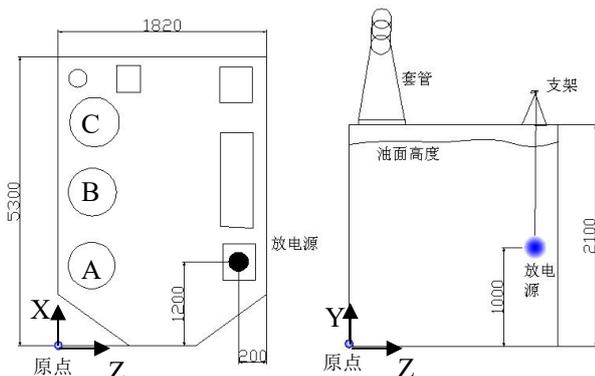
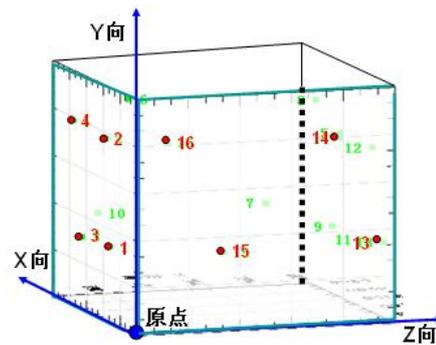


图 1 变压器结构与局放源一次位置图

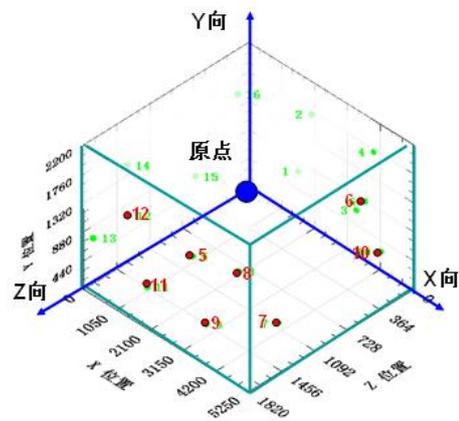


图 2 局放源结构图



(a)X-Y 平面正面：1、2、3、4 号传感器

(b)Y-Z 平面正面：13、14、15、16 号传感器



(c)X-Y 平面背面：8、9、5、11、12 号传感器

(d)Y-Z 平面背面：10、6、7 号传感器

图 3 传感器布置图

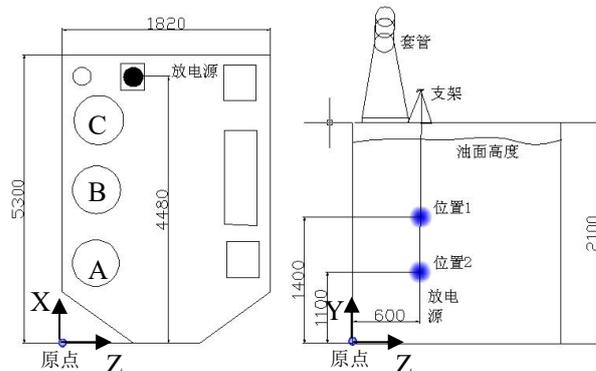


图 4 变压器结构与局放源二次位置图

图 3 为变压器整体监测过程中传感器的布置方向和位置图，图中通过原点的平面定位为正面，与其相对应的另一面为背面。由图可知 X-Y 平面正面布置有 1、2、3、4 号传感器，Y-Z 平面正面布置有 13、14、15、16 号传感器； X-Y 平面背面布置有 8、9、5、11、12 号传感器，Y-Z 平面背面布置有 10、6、7 号传感器。采用 16 个传感器并按照一定的方向进行安放。

图 4 为更换局放源位置后的图形显示，与图中

的局放源处于对角位置关系,该处人孔吊放局放源,由于人孔的位置相对固定,其 X 轴和 Z 轴的位置坐标无法进行大距离变动,因此在深度 Y 轴方向上进行高低的变化,两次局放源位置的先后坐标分别为 X1*Y1*Z1=4480*1400*600;X2*Y2*Z2=4480*1100*600。

2.5 本次超声监测设备与应用特点

本次超声局放监测设备为美国物理声学公司 (PAC) 的 MICRO-II 超声局放监测系统,通过布置 16 个通道对变压器实现整体监测,采用 R15I 一体化传感器,传感器的谐振响应频率为 150khz,响应频带为 100-400khz,搭配 PDDMATE 局放分析专家系统对监测数据进行分析。

由于电力系统的供电电压具有一定的工频特征,无论实际应用还是实验室研究,存在局放损伤的位置往往会在电压高峰期产生局放,因此局放的发生频率便可以工频具有相关关系。采用 PAC 设备的 PDDMATE 专家分析系统基于频域特征对局放信号进行周期特征的分析,很好的分开局放信号与噪声信号,其包括特征指数、相位角关系对周期性局放信号进行准确判断。

3 监测结果

本次监测非常成功的实现了局放源定位与局放特征判断。监测过程中选择了不同的人孔进行局放源的固定,同时在一处人孔采取不同的放置深度,产生局部放电,根据监测结果,定位集中度较好,实际局放源与软件系统显示位置误差范围在 (30-150mm) 之间。

根据局放识别软件对 50hz 的放电信号分析可知,12 通道处接收到明显的局放相关信号,因此考虑将传感器位置向 12 通道附近集中布置,重点监测该区域

由于实际检测过程中,内部放电源位置无法事先得知,因此需要在变压器整体进行全面布置,实现整体监测。根据声波的传播原理,距离局放源最近的传感器最先收到局放信号,且其接收到的信号量最大。通过局放分析系统对数据进行分析,找到接收具有局放特征信号的 1 个或多个传感器,该传感器阵列所能检测到的区域便成为重点监测区域,局放源位于该传感器阵列附近。同时可以强局放源会形成定位,根据该定位信息和局放信号分析综合

判断重点监测区域的位置。通过调整传感器的位置,将重点区域集中包络,实现更精确的局放检测和定位分析。

本次监测分为三个部分:

(1) 如图 1 所示在坐标是 (1200、1000、1620) 的变压器内部放置局放源。

(2) 如图 3 所示在坐标是 (4480、1100、600) 的变压器内部放置局放源

(3) 如图 3 所示在坐标是 (4480、1400、600) 的变压器内部放置局放源

3.1A 相局放源坐标为 (1200、1000、1620)

高压测试过程分段进行,从 0kv 开始,5kv 为一个阶段进行升压测试,升高至 50kv,并采用高压测试对电源处的局放进行监测,35kv 时开始间断性产生局部放电,并形成定位。局放源的位置坐标为:

(1200、1000、1620),此时 16 个传感器均匀分布时的局放定位,定位点集中于人工局放源所靠近的 A 相位置,定位点在垂直方向较分散。表一为检测过程检测过程的检测时间与所施加的电压值关系表。

表 1 检测时间与施加电压值表

时间 (s)	电压 (kv)	时间 (s)	电压 (kv)
88.141703	10	308.908208	35
173.902537	15	352.508832	40
237.134202	25	680.660842	45
284.530885	30	1292.833508	50

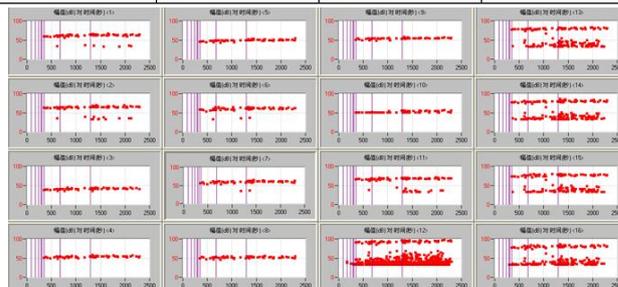


图 5 不同电压阶段的信号幅值图

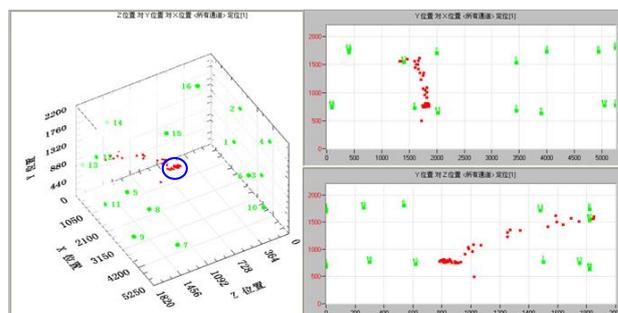


图 6 信号三维定位图

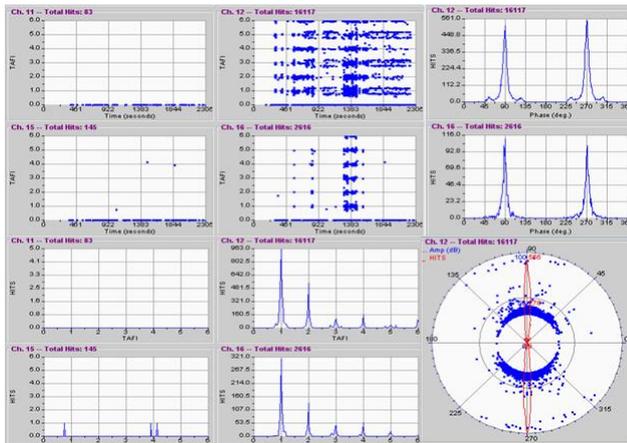


图 7 局放信号特征指数图

图 5 为检测过程产生局放的信号幅值散点图，局放发生后，距离局放源较近的传感器接收到更丰富的信号特征，其中在 35kv 的电压下，由 UHF（电源处）方法发现由于电晕造成的类似于局放的频率特征。建议开始保持该电压，保压过程中间断性出现了高幅值的声发射信号，高幅值信号的间断性规律表明，在该电压下，局放的发生是一个不断累积与释放的过程，每一个释放结束后，需要累积一定时间（几十秒或几分钟不等），达到介质的电离强度，产生局放现象。

图 6 为检测过程的三维定位图，此过程共检测 38 分钟，形成 58 个定位事件，定位点较为集中，且偏向于实际局放源位置。其定位产生的偏差原因既与放电源结构有关，同时与其信号源传播路径经 300

过变压器内部的复杂结构，传播路径变化，传感器接受信号的时差产生了较大误差。

图 7 为采用局放分析系统对数据进行特征指数分析，得到 12 通道最早接收到信号，接受的信号量最多，且信号特征具有典型的 180 相位关系，满足特征指数整数分布规律，因此判断局放源位于 12 通道附近，这与实际局放源的位置关系一致。

具有局放特征的信号与工频具有一定的对应关系，其信号的特征指数往往呈现整数集中特征，相位关系相差 180 度。由信号 12 通道和 16 通道接收信号的分布特征判断局放源距离这两个传感器附近，且距离其他通道较远，远距离传输衰减无法有效的接收。

3.2A 相局放源坐标为（1200、1000、1620）

表 2 为调整位置集中监测过程的电压随时间变化表。图 8 调整位置集中监测过程的信号幅值图，由图可知，调整位置后，相同的局放源信号可以被更多的传感器接收到，且信号幅值接受较为一致。

经过 3.1 的检测过程分析，12 和 16 通道接收到了明显的局放信号，且局放源距离 12 通道更近。因此调整传感器的布置位置，重点监测 12 通道附近的区域，调整后的传感器布置图如图 11 所示。调整后，检测过程持续 18 分钟，得到 41 个定位事件，此时的定位结果与实际放电源的位置一致，因此实际的定位效果既与传感器的数量有关，同时与传感器的布置与信号源相对位置有关。局放源放电严重程度与信号的传播路径对声发射影响很大。

图 9 和图 10 为典型的人工局放源信号的波形和频谱图。局放信号波形具有典型突发型特征，频谱成分丰富，具有一定高频成分。

表 2 检测时间与施加电压值表

时间 (s)	电压值 (kv)	时间 (s)	电压值 (kv)
79.775840	20	228.278861	40
104.903846	30	390385067	45
139.874798	35	1089.4271055	结束

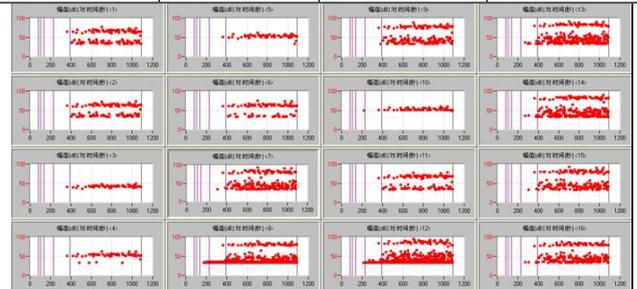


图 8 不同电压阶段的信号幅值图

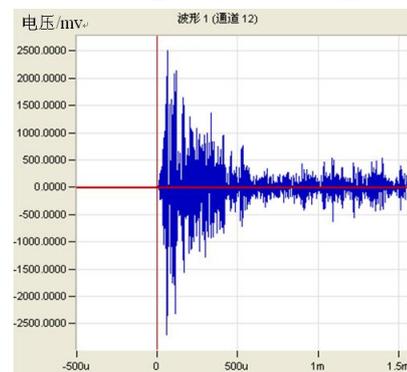


图 9 典型局放波形图

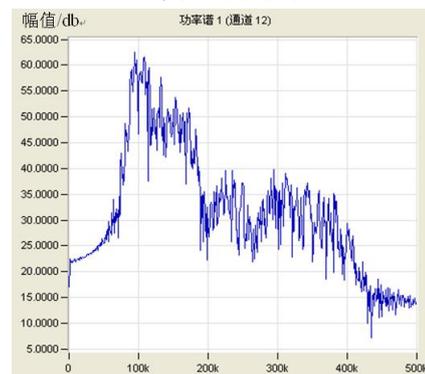


图 10 典型局放功率谱图

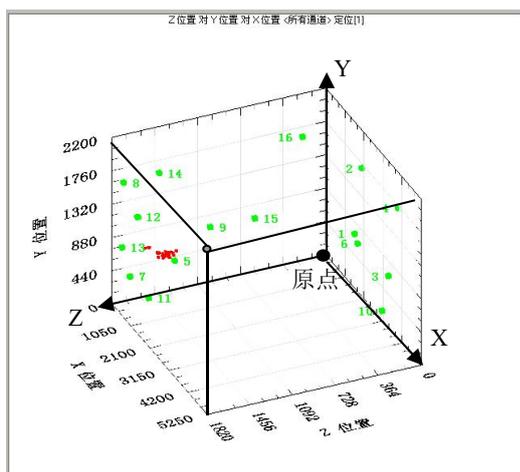


图 11 三维定位图，定位集中区域坐标为 (1214±50、893±50、1540±50)

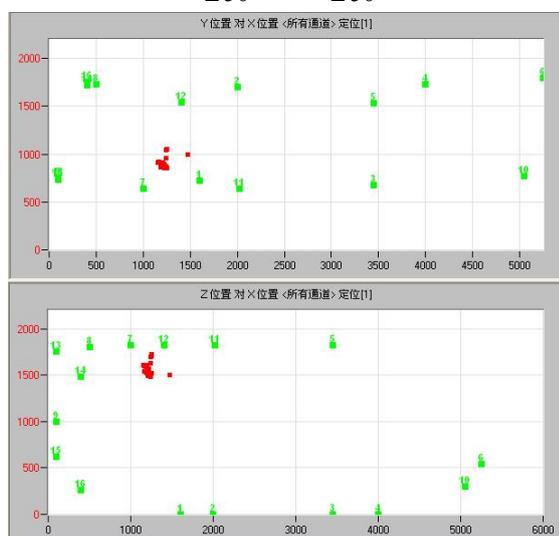


图 12 三维定位平面投影图

图 11 和图 12 为检测过程中的三维定位图和平面投影图。局放信号的定位位置具有一定的集中趋势，其位置区域坐标范围为 (1214±50、893±50、1540±50)，与实际的局放源位置一致，具有较好的定位集中性和重复性。

3.3 C 相局放源坐标为 (4480、1100、600)

该处局放源放于 C 相附近的人孔处，进入油液内部。根据局放源位置的变化，将传感器进行重点布置，监测局放源附近区域。

图 13 和图 14 检测过程中的三维定位图和平面投影图。局放信号的定位位置具有一定的集中趋势，其位置区域坐标范围为 (4250±50、1223±50、615±50)，与实际的局放源位置一致，具有较好的定位集中性和重复性。

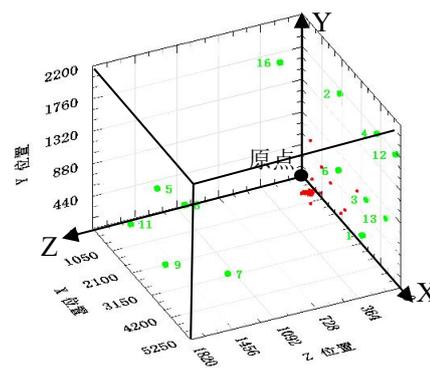


图 13 三维定位图，定位集中区域坐标为 (4250±50、1223±50、615±50)

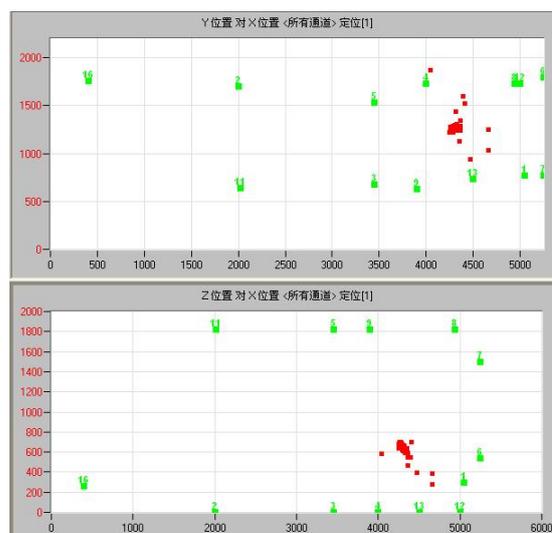


图 14 三维定位平面投影图

3.4 C 相局放源坐标是 (4480、1400、600)

为进行对比分析，将 3.3 中的油液面下方的局放源位置继续下移，进行局放检测。图 15 和图 16 检测过程中的三维定位图和平面投影图。局放信号的定位位置具有一定的集中趋势，定位聚类中心与实际局放源位置吻合，其位置区域坐标范围为 (6249±50、1087±50、597±50)，与实际的局放源位置一致，具有较好的定位集中性和重复性。

将局放源的位置进行更换，观察对固定的局放源定位效果。通过调整局放源的高度，来观察局放监测系统的监测结果测试过程中，局放源的位置进行高度上的调整，由高向低调整，两次调整后分别进行放电监测，通过局放监测系统的定位与实际位置进行对比，位置较为准确，

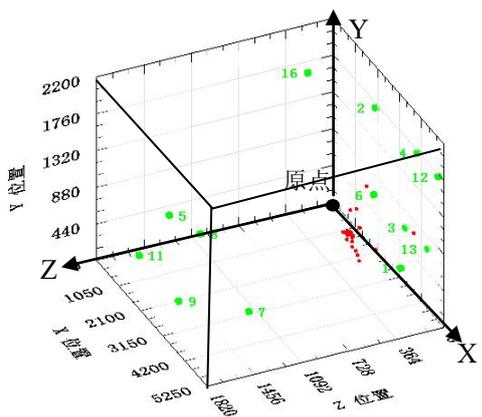


图 15 三维定位图，定位集中区域坐标为 (6249±50、1087±50、597±50)

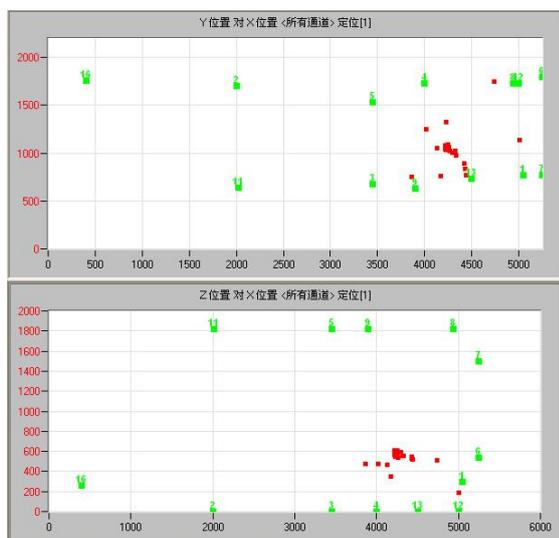


图 16 三维定位平面投影图

4 结论和建议

通过本次超声监测试验可得出如下结论：

- 1、利用人工局放源在实际的变压器内部产生局放，采用超声局放系统进行采集分析，是对变压器真实结构内部局放的模拟检测，具有典型的实际应用价值。
- 2、成功的超声局放测试取决于在检测与监测过程中

是否发生了局放。在局放或故障源不活动的情况下，超声技术无法获取有用信号。

3、超声技术并不是直接用以确定定量的放电量大小，而是确任是否存在局放，局放源的位置以及局放源的强度和活度。

4、超声检测可识别多个局放源，探测不同类型的故障，长期监测跟踪故障发展趋势可实时连续监测整套电力设备。

5、超声检测结果的准确程度与传感器数量，布置方式，放电源放电量大小，信号的传播路径等有关，通过由大到小，由粗略到精确的思维，最终会得到准确的局放源相关信息。

6、超声检测的优点：快速布置、无侵入检测、在线长期监测、现场实时分析、对放电源进行空间三维定位、对变压器结构没有特殊要求、专用局放分析方法、判断局放的严重程度和发展趋势，提供实时的信息反馈。

参考文献

- [1] 郭艳平，解武波，郑小平.声发射技术及其在变压器局部放电检测中的应用. 甘肃：现代电子技术，2007.
- [2] 王成江，贾智斌，顾玉凯等. 绝缘子放电声发射的传播特性研究. 北京：高压电器，2007.
- [3] 胡平，林介东，马庆增.声发射技术在变压器局部放电测量中的应用. 广东：无损检测，2004..
- [4] 林介东，胡平，马庆增. 500kv 增城变电站变压器局部放电的声发射检测. 广东：广东电力，2006.
- [5] 罗日成，李卫国，文习山. 大型变压器局部放电多目标定位实验. 长沙：高电压技术，2007.
- [6] 陆瑾，袁聪波，孙骏等. 变压器局部放电的电-声联合检测技术应用. 上海：华东电力，2006.