

ICS 29.180  
K 41  
备案号: 63076-2018

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1807 — 2018

---

## 油浸式电力变压器、电抗器 局部放电超声波检测与定位导则

**Guide for the ultrasonic detection and location of partial discharge in  
oil-immersed power transformers and reactors**

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

---

国家能源局 发布

## 目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 检测仪器要求	2
5 局部放电超声波检测	2
6 局部放电超声波信号特征及分析	4
7 局部放电声源定位	4
附录 A (资料性附录) 超声波信号及其传输特征	6
附录 B (资料性附录) 定位算法	10
附录 C (资料性附录) 报告参考模板	12
附录 D (资料性附录) 典型案例	17
参考文献	24

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求编写。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电力变压器标准化技术委员会（DL/TC 02）归口。

本标准主要起草单位：国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司、内蒙古电力科学研究院、国网河南省电力公司电力科学研究院、中国电力科学研究院、国网上海市电力公司电力科学研究院、国网江苏省电力公司电力科学研究院、国网陕西省电力公司电力科学研究院、国网湖北省电力公司电力科学研究院、广州西门子变压器有限公司、吴江变压器有限公司、江苏华鹏变压器有限公司、合肥ABB变压器有限公司。

本标准主要起草人：刘诣、车传强、王伟、张淑珍、魏本刚、陆云才、徐靖东、邱进、沈煜、万星辰、杨家辉、涂杰、陆建林、宁可。

本标准为首次发布。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

# 油浸式电力变压器、电抗器局部放电超声波检测与定位导则

## 1 范围

本标准规定了油浸式电力变压器、电抗器（以下简称变压器）局部放电超声波检测定位的检测仪器要求、局部放电超声波检测、局部放电超声波信号特征及分析、局部放电声源定位。

本标准适用于变压器的局部放电超声波检测与定位。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 2900.77 电工术语 电工电子测量和仪器仪表 第1部分：测量的通用术语

GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量

GB 26860 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分

GB 26861 电力安全工作规程 高压试验室部分

DL/T 417 电力设备局部放电现场测量导则

## 3 术语和定义

GB/T 2900.77、GB/T 7354、DL/T 417 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**超声波传感器 ultrasonic sensor**

将接收到的超声波转变成电量信号，并进行信号传递的装置。

### 3.2

**声耦合剂 acoustic couplant**

局部放电超声波检测时，填充在超声波传感器和变压器油箱之间，可透射声波的一种中介媒质。

### 3.3

**到达时刻 arrival instant**

超声波传感器收到的局部放电超声波信号的起始时刻。

### 3.4

**绝对时延 absolute time delay**

超声波信号到达时刻与局部放电信号之间的时差。

### 3.5

**相对时延 relative time delay**

超声波信号到达时刻与某个参考时刻的时差，一般设定某个通道的超声波信号到达时刻为参考时刻。

### 3.6

**电-声定位 electric-acoustic location**

利用各通道超声波信号与局部放电信号的绝对时延进行定位的方法，一般需要至少 1 个通道电信号、3 个通道超声波信号进行定位。电信号可以由局部放电脉冲电流检测法、高频脉冲电流检测法、特高频检测法取得。



### 3.7

#### 声-声定位 **acoustic-acoustic location**

利用各通道超声波传感器之间超声波信号相对时延进行定位的方法，一般需要至少 4 个通道超声波信号进行定位。

### 3.8

#### 直接传播路径 **direct propagation path**

超声波信号穿过油/纸绝缘到油箱内壁并透过钢板直接到达传感器的路径。

### 3.9

#### 间接传播路径 **indirect propagation path**

超声波信号穿过油/纸绝缘到达油箱内壁，并沿钢板传输一段距离之后到达传感器的路径。

## 4 检测仪器要求

### 4.1 超声波传感器

超声波传感器应满足下列要求：

- a) 谐振频率：20kHz~300kHz。
- b) 温度范围：-20℃~75℃。
- c) 灵敏度：大于-40dB（参照 10V/Pa，由面对面的超声测试确定）。

### 4.2 便携式局部放电超声波检测仪

便携式局部放电超声波检测仪用于局部放电超声波巡检，应满足下列要求：

- a) 每通道采样速率不低于  $1 \times 10^6$  次/s。
- b) 应具有波形显示、数据存储和数据导出回放分析功能。
- c) 应采用可充电电池供电，连续使用时间不小于 4h。

### 4.3 局部放电超声波检测定位系统

局部放电超声波检测定位系统用于局部放电超声波巡检及定位，应满足下列要求：

- a) 检测通道不少于 4 个（更多检测通道的系统具有更高的检测效率和可靠性）。
- b) 宜具有自动电-声定位和声-声定位计算功能。
- c) 每通道采样速率不低于  $1 \times 10^6$  次/s。
- d) 具有波形显示、数据存储和数据导出回放分析功能，可连续存储数据时间不少于 12h，具有能反映局部放电超声波信号相位特征的统计图谱功能。
- e) 具有硬件或数字滤波功能。

## 5 局部放电超声波检测

### 5.1 基本要求

5.1.1 局部放电超声波检测及定位在变压器运行或由试验电源施加电压时进行，检测时的安全工作规程应遵守 GB 26860 和 GB 26861 的规定。

5.1.2 检测过程中应注意变压器外壳有带电的风险，传感器和信号线缆与带电部位应保持安全距离。

5.1.3 不宜在雨雪、风沙等天气进行超声波检测。

5.1.4 宜在变压器油中溶解气体分析、常规局部放电试验、高频局部放电检测等手段发现变压器内可能存在局部放电后，进行局部放电超声波检测。

### 5.1.5 检测报告内容应包括：

- a) 检测目的与内容；
- b) 检测日期及时间；
- c) 参考标准；
- d) 采用的仪器型号及规格；
- e) 被检变压器的概况（型号、额定电压、额定容量、编号、冷却方式、室内/室外等）；
- f) 被检变压器负荷；
- g) 被检变压器最近的油中溶解气体分析试验数据；
- h) 环境温度、被检变压器油温；
- i) 被检变压器分接开关位置，检测期间分接开关是否动作、动作时间；
- j) 检测到的典型疑似局部放电信号及干扰信号波形图、统计图谱；
- k) 对检测数据的分析和评价；
- l) 如进行定位，应给出局部放电超声波定位结果，同时标明其参考坐标系；
- m) 检测单位和检测人员。

## 5.2 传感器布置

5.2.1 传感器应直接布置于变压器箱壁上，不可在油箱加强筋、控制箱等部位布置传感器，应避免将传感器置于变压器油面以上的部位。

5.2.2 布置传感器前应在保持传感面清洁的情况下将声耦合剂均匀涂抹于传感面上，宜使用能在变压器工作温度下保持较高黏度的耦合剂（如凝胶化甘油和硅润滑脂）。

5.2.3 传感器可优先布置于可能存在缺陷的箱壁相关区域或上次超声波检测定位区域。

5.2.4 传感器可通过磁铁吸附或绑扎方式固定，传感器固定应牢固、稳定；传感器信号线缆应合理安排走线，以免检测期间传感器自身振动和信号线缆晃动造成干扰。

5.2.5 传感器布置完成后，进行检测前应验证检测仪器工作是否正常，通常采用敲击箱壁以产生振动信号的方法，通过各传感器的信号比对检验仪器及传感器是否正常。

5.2.6 进行超声波信号搜索时，传感器间距宜小于 0.8m。搜索超声波信号范围应包括整个变压器箱壁可测区域。

## 5.3 超声波检测

5.3.1 局部放电超声波检测可在变压器运行中或脉冲电流法局部放电试验中进行，脉冲电流法局部放电试验按 GB/T 7354 和 DL/T 417 规定进行。

5.3.2 在变压器运行中进行局部放电超声波检测时，可从铁芯、夹件接地线上通过穿心高频电流传感器检测局部放电信号，或采用特高频传感器检测局部放电信号。在局部放电信号难以检测或分辨的情况下，可采用超声波信号作为系统数据采集的触发信号。

5.3.3 对变压器采用脉冲电流法进行局部放电试验时，局部放电信号或超声波信号均可作为系统数据采集的触发信号，局部放电信号宜由连接套管末屏的局部放电检测阻抗取得。

5.3.4 将传感器布置于变压器油箱上的初始位置后，检验传感器及系统工作状态，传感器布置见 5.2。

5.3.5 在局部放电超声波检测时，如已检测到明显的局部放电信号但未能检测到超声波信号时，应在适当延长检测时间，确认无超声波信号后再调整超声波传感器布置位置。

5.3.6 对运行中变压器的超声波检测，宜在变压器负载条件下进行。

5.3.7 超声波检测需考虑干扰信号的影响，如油箱振动、油泵及风扇噪声、现场电磁干扰等；需考虑超声波信号在变压器内的衰减和遮挡，如油箱内侧磁屏蔽或电屏蔽、绕组等的影响。

5.3.8 对运行中变压器进行超声波信号搜索时，每个测量点的连续监测时间不宜少于 10min。若信号发

生频率较低且无规律，宜进一步延长监测时间。

5.3.9 搜索信号时仅有一个传感器能重复检测到超声波信号，应调整另外的传感器布置在该传感器附近进行验证。

## 6 局部放电超声波信号特征及分析

### 6.1 超声波信号特征

通过超声波传感器检测到的变压器内部放电产生的超声信号波形，一般表现为呈指数衰减的振荡波形；由于局部放电的周期特性，局部放电超声波信号具有一定的重复性，参见附录 A。

### 6.2 超声波信号分析

6.2.1 局部放电超声波信号幅值和视在放电量是局部放电的两种表征形式，两者之间不存在明确对应关系。

6.2.2 通常较强局部放电产生的超声波信号幅值较大且持续时间较长。

6.2.3 沿面放电的超声波定位结果呈现多点分散分布的特征。

6.2.4 超声波信号传播路径不同或超声波信号传播介质差异，导致各传感器收到的超声波信号幅值和时延存在差异。

6.2.5 局部放电超声波信号与电信号一样，符合施加的交流励磁电压的周期特性和相位特性，可结合电源周期特性和相位特性进行分析。

6.2.6 检测到超声波信号时，应与变压器运行时的振动，变压器内部结构件松动导致的异常声响，油箱外部结构件振动，分接开关动作，风扇和油泵运行时噪声，异常天气状况如雨雪、风沙等导致的油箱声响等进行区分。

6.2.7 铁芯振动噪声的高次谐波频率通常可达 30kHz~50kHz，铁芯振动噪声信号波形的包络线一般为连续纺锤形。

6.2.8 可基于超声波检测和历史数据及统计数据进一步分析，如分析对比超声波信号的幅值变化趋势、超声波信号频次变化和超声波定位位置变化趋势等，并结合其他诊断方法的数据进行综合分析。

6.2.9 超声波检测时未检测到信号的可能原因有：局部放电存在较长时间的间歇性，检测时未发生明显局部放电现象；局部放电点在变压器绕组深处，超声波信号严重衰减。

## 7 局部放电声源定位

7.1 当检测到的超声波信号具有明显的局部放电特征时，可对疑似局部放电声源进行定位。

7.2 定位计算前，在收到超声波信号的区域应增加传感器进行检测，各传感器间距不宜小于 0.3m，可反复调整传感器位置，以便各传感器收到沿直接传播路径传播的超声波信号。

7.3 进行局部放电定位的方法分为电-声定位法和声-声定位法。当可以同时测量到局部放电的电信号和声信号时，可采用电-声定位法和声-声定位法进行定位。在局部放电信号受到强烈的干扰或难以获取时，可采用声-声定位法。

7.4 采用电-声定位法时，需要至少 3 个超声波传感器均检测到局部放电产生的超声波信号，且局部放电信号可分辨，可利用各传感器检测到的超声波信号与电信号的绝对时延采用球面定位算法进行定位。采用声-声定位法时，需至少 4 个超声波传感器检测到局部放电产生的超声波信号，可利用各传感器检测到的超声波信号之间的相对时延采用双曲面定位算法进行定位。球面定位算法和双曲面定位算法参见附录 B。

7.5 以检测到超声波信号的油箱区域附近显著的结构点如外箱沿、加强筋等作为参考原点，建立三维

直角坐标系，并在该坐标系下测量各个传感器的坐标。

7.6 将超声波在变压器内部包括油、纸、纸板等介质中的传播速度用简化的等效波速代替，综合温度和不同介质对波速的影响，对于采用矿物油的变压器通常取波速为 1400m/s 进行定位计算。

7.7 变压器可能存在多于一个放电点的情况，不同放电点产生的超声波信号可通过各传感器信号时延特征进行分辨，应将不同放电点产生的不同的超声波信号时延分别进行定位计算。

7.8 附录 C 给出了报告参考模板，附录 D 给出了典型案例供参考。

库七七 www.kqdw.com 提供下载

附录 A  
(资料性附录)  
超声波信号及其传输特征

A.1 声信号产生的原理

在局部放电的过程中除了伴随着电荷的转移和电能的损耗之外，同时也产生了各种非电量的信息，如产生声波、发光、发热以及出现新的生成物等。当设备发生局部放电时，在放电的区域中分子间会产生剧烈的撞击，这种撞击在宏观上就产生了一种压力，由于局部放电的脉冲特性，由此产生脉冲型的压力波。在液体材料中，放电往往发生在液体含有的气泡中，气泡在放电时会爆裂，把大气泡分裂为更小的气泡或扰动液体、气泡在液体中移动，所有这些都会造成压力的变化而发出声波。在固体介质中，局部放电形成电树枝的过程，也会伴随着微弱的爆破，爆破产生的压力变化也会发出声波。

A.2 声信号的典型特征

局部放电产生的声波分两类，一是气泡或气隙内放电，其特征是均匀密集，如金属板电极间的油中气泡放电；二是介质在高场强下游离击穿，特征是间断的大脉冲，如针对板放电，其声发射频谱更宽。在油纸绝缘中，不同类型和位置的放电产生的声波频谱是不同的，一般频谱峰值在 70kHz～150kHz 范围（属于超声波频段），而变压器各种振动噪声的频谱一般小于 65kHz。

通过超声波传感器检测到的变压器内部放电产生的超声信号波形，一般表现出最开始幅值较大然后呈指数衰减的振荡波形。同一个局部放电源产生的超声波信号，传播到变压器油箱不同的部位具有固定的时间，因此安装在变压器油箱壁不同位置的超声波传感器所收到的同一放电源信号具有固定的时延关系。但是由于超声波信号的衰减、超声波传输路径的差别以及各种干扰信号的影响，可能对准确识别超声波信号的起始时间带来困难。由于局部放电的周期特性，局部放电超声波信号具有重复性。布置在变压器油箱壁上一定区域的多个超声波传感器检测到重复性的、时延关系一致的超声波信号，是判定设备可能存在局部放电的一个重要依据。

局部放电超声信号典型波形如图 A.1 所示。

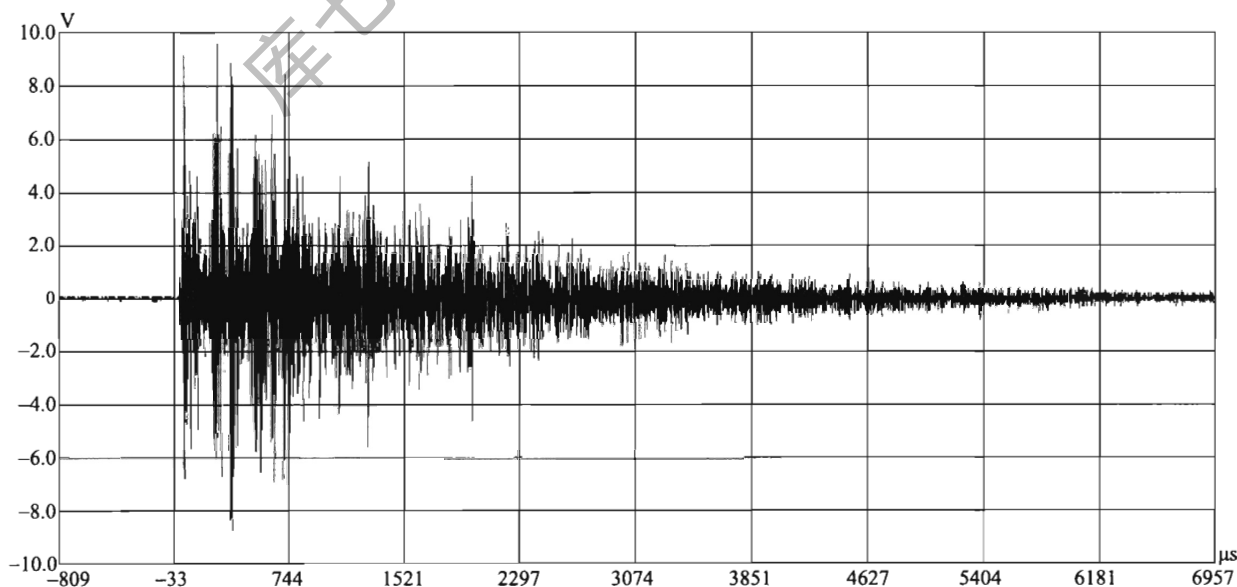


图 A.1 局部放电超声波信号的典型波形

### A.3 超声波信号传播特性

油浸式电力变压器内局部放电产生的超声波信号向四周传播，超声波信号穿过不同介质后到达变压器油箱壁。将超声波传感器放置于油箱的不同位置，由于距局部放电源距离不同，超声波信号的到达时刻也将不同。

声波在油浸式电力设备内的传播模式如图 A.2 所示，图中  $B$  为位于油箱内部的局部放电源位置， $C$  为超声波传感器在油箱壁上的位置， $H$  为局部放电源到油箱壁的垂直距离， $R$  为局部放电源到超声波传感器的直线距离， $X$  为  $A$  与  $C$  之间的直线距离， $D_1$  与  $D_2$  分别是油箱壁上  $A$  与  $C$  中间的位置。图 A.2 中从放电点  $B$  到传感器  $C$ ，超声波信号存在直接传播路径  $BC$  和间接传播路径  $BD_1C$ 、 $BD_2C$  等。传感器放置在油箱壁上不同的位置就会得到不同的信号波形。沿直接传播路径的超声波信号幅值衰减较小，信号传播速度较低；沿间接传播路径的超声波信号幅值衰减大，信号传播速度较快。超声波信号到达变压器油箱后，虽然其频率特性保持一致，而其传播模式及传播速度则发生了变化。超声波传播到油箱壁后会沿油箱壁传播至传感器，由于超声波在金属中传播速度大于油中传播速度，故以该传播路径传播的超声波可能会比沿油中直接传播路径更早抵达传感器。所以采用超声波在油中传播速度并根据超声波沿油箱结构路径抵达传感器的时间计算声源距离，其结果是不正确的。

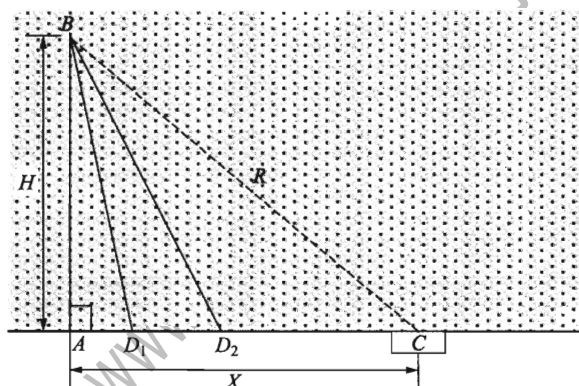


图 A.2 声波在油浸式电力设备内的传播模式

从图 A.2 中可以看到，从放电点  $B$  到传感器  $C$ ，声信号有几条传播路径：

- 油中直接传播路径 ( $BC$ )。在变压器中，声波以  $v_{oil}$  的速度沿  $BC$  传播，声波在油中的传播速度 ( $v_{oil}$ ) 大约为 1400m/s。当发生角大于  $\arcsin(v_{oil}/v_{steel})$  时，就会发生全反射。这时，在位置  $C$  上的传感器不能通过直接路径  $BC$  收到直接的声信号。
- 变压器中的复合路径。变压器中的声传播到传感器存在许多复合路径如  $BDC$ 。在油中路径  $BD_1$  或  $BD_2$ ，声波是以  $v_{oil}$  波速传播的，而在油箱中声波是以  $v_{steel}$  沿  $D_1C$  或  $D_2C$  传播。在所有这些复合路径中，有一个声波传播时间最短的路径。在这种情况下，声波的临界角  $\alpha$  即折射角为  $90^\circ$  时的入射角，用式 (A.1) 表示：

$$\alpha = \arcsin \left[ \frac{v_{oil}}{v_{steel}} \right] \quad \text{..... (A.1)}$$

这样，声波最短的传播时间为

$$t_s = \frac{H}{v_{oil} \cdot \cos \alpha} + \frac{X - H \cdot \tan \alpha}{v_{steel}} \quad \text{..... (A.2)}$$

$$H = BA$$

$$X = AC$$

图 A.3 是测量到的某变压器内部局部放电所发生的声信号的典型波形。

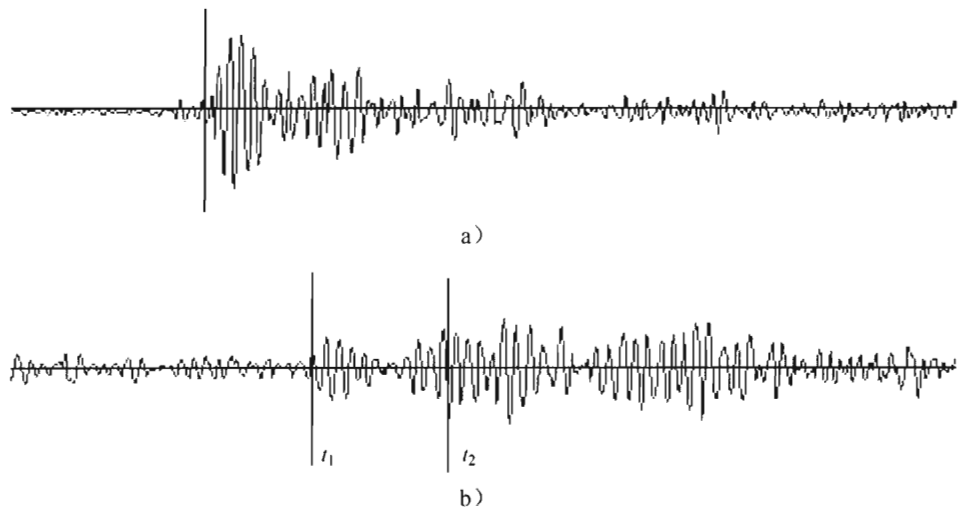


图 A.3 变压器内部局部放电声信号波形

图 A.3 a) 所示的信号波形，表示传感器所处的位置是在油中直接传播的路径区域内，用这种波形的最大脉冲前沿作为时延进行定位计算的精度较高。图 A.3 b) 所示信号波形，表示传感器的位置可能离放电点的位置较远（不在直接传播区域内）。因此，波形中第一个和第二个最大脉冲可能对应于传播路径为  $BD_1C$  和  $BD_2C$  的传播时间。如果依据图 A.3 b) 所示波形进行时延选择，其时延需要进行折算。一般进行精确定位时，要反复调整传感器的位置，尽可能使各个传感器收到类似图 A.3 a) 所示的超声信号波形。

A.4 超声波传播速度

超声波在不同的温度下，通过不同媒质的速度都不相同。表 A.1 列出了超声波在几种媒质中 20℃ 时的传播速度。

表 A.1 20℃ 时不同介质中超声波波速

材料	空气	矿物油	油浸纸	油浸纸板	铜	钢	SF <sub>6</sub>
波速 m/s	330	1400	1420	2300	4700	6000	170

气体媒质中声波传播速度在 130m/s~1300m/s 范围内，这与气体分子的平均运动速度很接近。在矿物油中声波传播速度是随温度的升高而下降，变压器的油温每上升或减少 1℃，超声波的速度大约以 5m/s 的速度差而变化，通常取波速为 1400m/s 进行定位计算。

A.5 采用超声波法针对不同局部放电类型及部位的检测效果

表 A.2 为采用超声波法针对不同局部放电类型及部位的检测效果，下表仅列举部分部位和类型。

表 A.2 不同局部放电类型及部位的检测效果

局部放电类型及部位	检测效果
引线、围屏、绕组端部绝缘、出线装置放电	好
油流静电	好
绝缘油界面电弧/爬电	好
悬浮电位放电	好

表 A.2 (续)

局部放电类型及部位	检测效果
分接开关局部放电	好
油中套管表面电弧/爬电、套管均压球放电	好
套管内局部放电	差
绕组内部局部放电	差
绕组、铁芯间局部放电	差



## 附录 B

### (资料性附录)

### 定位算法

#### B.1 概述

对变压器进行局部放电超声波定位，将超声波传感器吸附在变压器油箱的不同位置，通过测量各传感器通道的绝对时延或相对时延。将这些绝对时延或相对时延代入一系列满足放电点和传感器几何位置的方程，求这个非线性方程解，就能得到放电点的位置。

#### B.2 球面定位算法

在某些环境条件下，可以同时测量到局部放电的电信号和声信号，可以确定出电信号和声信号之间的时差。进行局部放电超声波定位时，电-声定位以局部放电脉冲电信号到达时刻作为各检测通道超声波信号的参考时刻，利用各通道超声波信号与局部放电电信号的时间差进行定位的方法，一般需要至少 1 通道电信号、3 通道超声波信号进行定位。以变压器的一个角为原点  $O(0, 0, 0)$  建立空间直角坐标系，局放源用  $P(x, y, z)$  表示，各个传感器分别用  $S_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2, z_2)$ ,  $S_3(x_3, y_3, z_3)$  和  $S_n(x_n, y_n, z_n)$  表示。由于电信号的传输速度远大于声波传播速度，这样电信号与声信号之间的时间差，就可以认为是声波在变压器中从放电点传播到传感器的时间。

如果假设吸附在变压器外壳上的传感器个数为  $m$ ，声波在变压器中的传播速度为  $v_e$ ，从放电点到第  $i$  个传感器时间为  $t_i$ ，那么  $v_e \cdot t_i$  就是放电点到传感器  $i$  的距离。根据所测量的时延，就可以建立超声波传感器距离和时间的球面方程。如：

$$f_i(x, y, z, v_e) = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 - (v_e t_i)^2 = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (m \geq 3) \quad \text{..... (B.1)}$$

其中， $x, y, z$  对应于放电点的位置坐标， $(x_i, y_i, z_i)$  对应于第  $i$  个传感器的位置。通过求这个非线性方程的解，就可以得到放电点的位置。其物理意义就是：放电点位于以各传感器为球心，以  $v_e \cdot t_i$  为半径的球面上，因此各球面的交点就是放电源的位置。

为求解上面的方程，可使用最小乘法，设放电点到第  $i$  只传感器的距离为  $d_i$  (真值)， $t_i$  的测量误差为  $\delta_i$ ，则有

$$d_i = v_e t_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (m \geq 3) \quad \text{..... (B.2)}$$

$$\delta_i = t_i - \frac{d_i}{v_e} \quad \text{..... (B.3)}$$

$$\text{令} \quad y = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \quad \text{..... (B.4)}$$

由式 (B.1) ~ 式 (B.4) 可得

$$y = \sum_{i=1}^n t_i^2 - 2 \sum_{i=1}^n \frac{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{1}{2}}}{v_e} + \sum_{i=1}^n \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}{v_e} \quad \text{..... (B.5)}$$

可以看出满足式 (B.4) 的值就是式 (B.1) 的最小二乘解。

也可以采用其他方法进行求解，例如牛顿法/阻尼牛顿法、最速下降法、共轭梯度法、变尺度法以及蚁群优化算法、模拟退火算法、遗传算法等现代优化算法。

#### B.3 双曲面定位算法

局部放电超声波声-声定位，是利用放电源至各通道超声波传感器之间超声波时延进行定位，一般

需要至少 4 通道超声波信号进行定位。在现场进行定位检测时，所测到的局部放电电信号往往会受到强烈的干扰，在电信号不便于测量或难以辨识的情况下，就要用到双曲面定位算法。双曲面定位算法是在所有传感器中，以第一个声信号到达时刻作为参考时刻，通过测量后续到达的超声波信号不同的传播时间和传感器的几何位置，就可以进行放电点位置计算，如果以第一个收到声信号的传感器作为参考传感器，这样第  $i$  个传感器相对参考传感器的声波传播时差  $t_{i-0}$  就可以测得，各传感器相对参考传感器的声波传播时差就满足双曲面方程：

$$t_i - t_0 = t_{i-0}, i=1, 2, 3, \dots, m-1 \quad (m \geq 4) \dots\dots\dots (\text{B.6})$$

这里， $t_i$  是从放电点到第  $i$  个传感器的声波传播时间， $t_0$  是放电点到参考传感器的声波传播时间。  
所以

$$\frac{\sqrt{(x_i-x)^2+(y_i-y)^2+(z_i-z)^2}}{v_c} - \frac{\sqrt{(x_0-x)^2+(y_0-y)^2+(z_0-z)^2}}{v_c} = t_{i-0}, i=1, 2, 3, \dots, m-1 \dots\dots\dots (\text{B.7})$$

其中， $(x_i, y_i, z_i)$  是第  $i$  个传感器所对应的位置坐标， $(x_0, y_0, z_0)$  是参考传感器的位置坐标。

式 (B.7) 称为双曲面方程，满足该方程的点就是双曲面上的点。求上面非线性方程的解，就可以得到放电点的位置坐标  $(x, y, z)$ ，这个点是  $(m-1)$  个双曲面的交点。

因为这种方法不需用到局部放电电信号，因此它不同于球面定位方法。对于双曲面的定位方法，至少需要 4 个超声波传感器，采用更多的传感器能够得到更准确的定位结果。

附 录 C  
(资料性附录)  
报告参考模板

## C.1 试验概况

委托单位: \_\_\_\_\_  
 检测目的: \_\_\_\_\_  
 检测内容: \_\_\_\_\_

## C.2 试品说明

试品名称	电抗器/变压器	型 号	×××
出厂编号	×××	出厂年月	××××.××
额定电压	×××	额定容量	—/×××
冷却方式	×××	室内/室外	×××
试验时负荷	—/×××	联结组别	×××
试验时油温	×××	分接开关状态	—/×××

## C.3 参考标准

GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量  
 GB/T 7252 变压器油中溶解气体分析和判断导则  
 DL/T 1807 油浸式电力变压器、电抗器局部放电超声波检测与定位导则

## C.4 试验类型

委托试验。

## C.5 检测日期及环境

检测日期	检测时间	天气	环境温度 ℃	环境湿度 %
×××	×××	晴	25	45

## C.6 使用的主要测量设备

仪器设备名称	型号/规格	设备编号	制造厂家
局部放电超声自动定位系统	×××	×××	×××

## C.7 结论

## 【检出局部放电缺陷】

对××站一线 C 相高压电抗器进行局部放电超声波检测及定位。在电抗器油箱四个侧面均匀布置传感器进行局部放电超声波信号搜索及检测。在 C 相电抗器中性点套管附近的油箱区域收到时差关系一致、重复出现的超声波信号,结合油色谱分析数据,判断电抗器内部靠近中性点出线侧的上夹件区

域存在局部放电，定位结果及坐标轴设置见试验报告附录 C.8.5。建议对定位结果及其附近的紧固结构件或其他可能缺陷部位进行分析和检查。

#### 【未检出局部放电缺陷】

对××站一线 C 相高压电抗器进行局部放电超声波检测及定位。在电抗器油箱四个侧面均匀布置传感器进行局部放电超声波信号搜索及检测。在检测期间未检出疑似局部放电超声波信号。

试 验： \_\_\_\_\_  
 校 核： \_\_\_\_\_  
 审 核： \_\_\_\_\_  
 批 准： \_\_\_\_\_ 职 务： \_\_\_\_\_  
 日 期： \_\_\_\_\_

### C.8 试验报告附录

#### C.8.1 被检设备近期油中溶解气体分析试验数据

监测时间	氢气 含量	甲烷 含量	乙烷 含量	乙炔 含量	乙烯 含量	一氧化碳 含量	二氧化碳 含量	氧气 含量
××/3/26	36.09	4.37	2.36	6.87	7.04	21.33	270.1	390.74
××/3/27	37.81	4.07	2.79	6.87	7.5	21.36	271.5	383.01
××/3/28	36.22	5.04	2.11	6.84	7.35	21.45	263.37	382.4
××/3/29	34.84	4.82	2.04	7.02	7.16	21.79	263.77	375.87
××/3/30	34.9	4.87	2.15	7.12	7.07	21.37	259.05	397.24
××/3/31	38.15	4.33	2.29	7.04	7.29	20.72	266.84	371.98
××/4/1	39.26	5.02	1.93	7.5	7.38	21.94	264.1	400.6
注：各气体组分单位为 $\mu\text{L/L}$ 。								

#### C.8.2 试验原理

变压器（电抗器）内部发生局部放电的同时伴随有相应频率特征和波形特征的超声波信号。该超声波信号可由故障点传播到油箱外侧。将超声波传感器贴于变压器油箱外侧，接收放电产生的超声波信号，并由检测系统对此超声信号进行记录。在计算机控制下，读取各传感器收到的超声信号的时间差；选定变压器上的某一点作为参考坐标原点，测量各探头的位置坐标；选定超声波在油中的传播速度，由检测系统中的计算分析软件进行计算，便可得到放电故障点的位置坐标。

#### C.8.3 局部放电超声波标准特征波形

图 C.1 为局部放电超声波标准特征波形。

局部放电超声波波形，具有以下特征，可作为判别依据：

- 收到的声信号波形，一般表现为最开始较大，然后持续衰减振荡的三角形状，这种信号的中心频率范围在 70kHz~120kHz 之间。
- 声信号的波形长度一般大于 0.6ms，如果波形较短，则通常认为是电磁干扰的影响。
- 不同位置的声传感器所收到的信号具有一定的时延关系。根据实际高压电器的尺寸和声波在高

压电器内传播的速度，时延的范围应在 0ms~2ms 以内。

d) 局部放电超声波波形具有重复性。

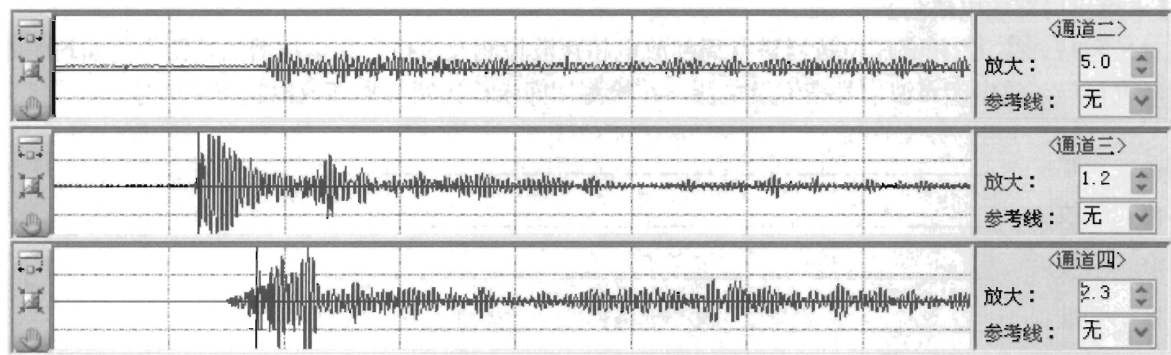


图 C.1 局部放电超声波标准特征波形

C.8.4 本次局部放电超声波检测情况

××××年××月××日，对×××站××一线 C 相电抗器进行局部放电超声波检测及定位。在电抗器油箱四个侧面均匀布置超声波传感器进行局部放电超声波信号搜索及检测。

图 C.2 为 C 相电抗器出线端子及检测到疑似局放超声波信号区域图（虚线部分检测到疑似局放超声波信号）。

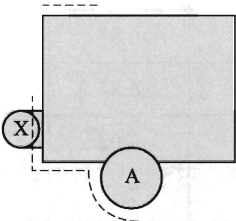


图 C.2 检测到疑似局放超声波信号区域（C 相）

图 C.3 和图 C.4 为传感器布置区域，在该区域可以检测到连续且各通道时差关系一致的超声波信号，图 C.5 为本次检测到的典型信号波形图。



图 C.3 传感器布置区域（高压出线端子附近）

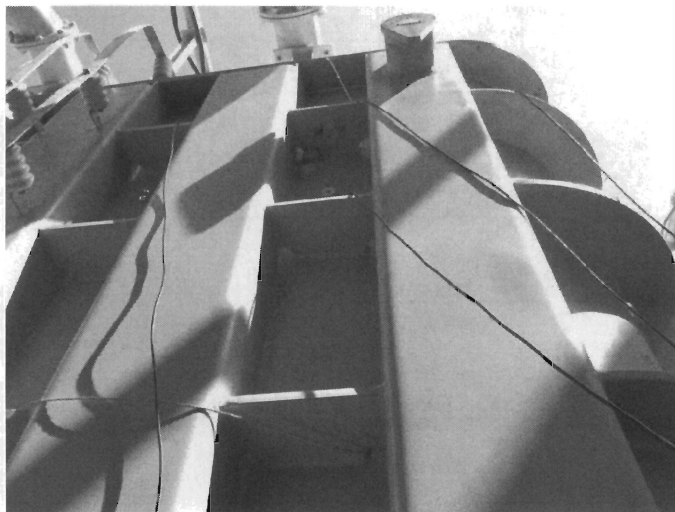


图 C.4 传感器布置区域（高压出线端子对面侧的油箱）

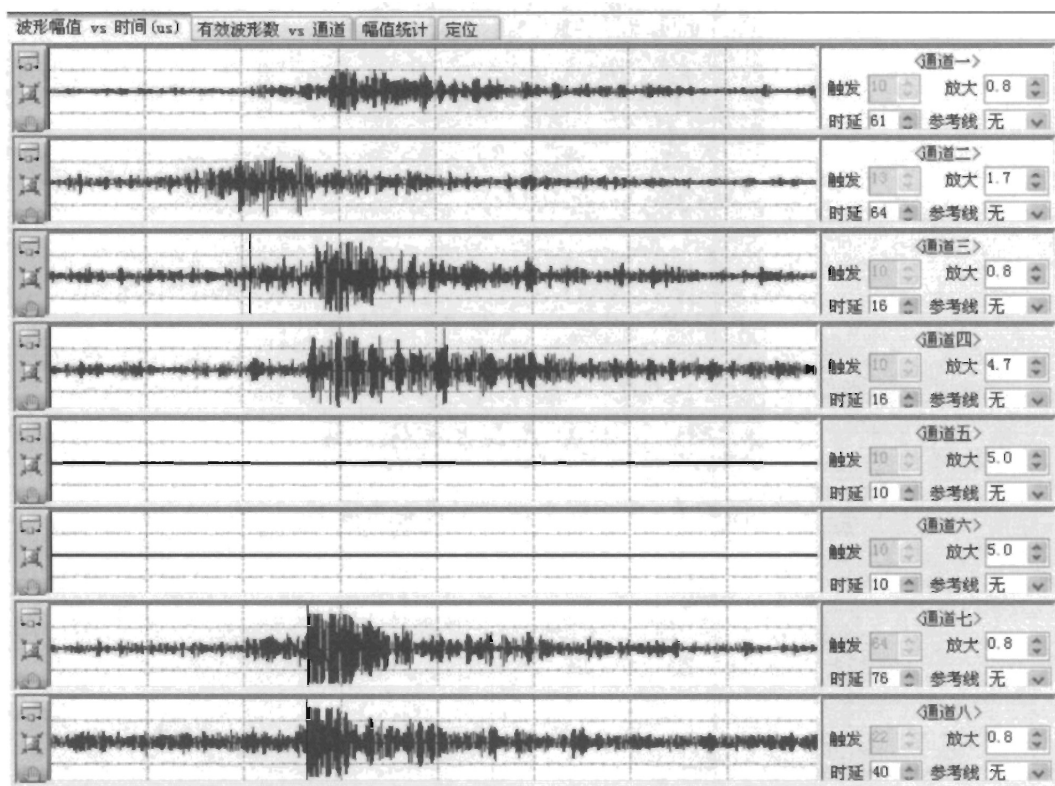


图 C.5 本次检测典型信号波形图

### C.8.5 本次局部放电定位结果

对检测到的信号进行定位计算，坐标设置如图 C.6 所示，图 C.6 所示阀门位于图 C.7 中中性点套管侧油箱下部， $o$  点为上节油箱加强筋底部， $x$  轴指向高压套管侧， $y$  轴方向为高度方向， $z$  轴方向指向电抗器内部。

C 相电抗器定位结果在 ( $x=0.45\text{m}\sim 0.65\text{m}$ ,  $y=3.20\text{m}\sim 3.50\text{m}$ ,  $z=1.00\text{m}\sim 1.20\text{m}$ ) 范围，建议根据超声定位及油色谱分析结果，对定位区域及其附近的紧固结构件或其他可能缺陷部位进行分析和检查。

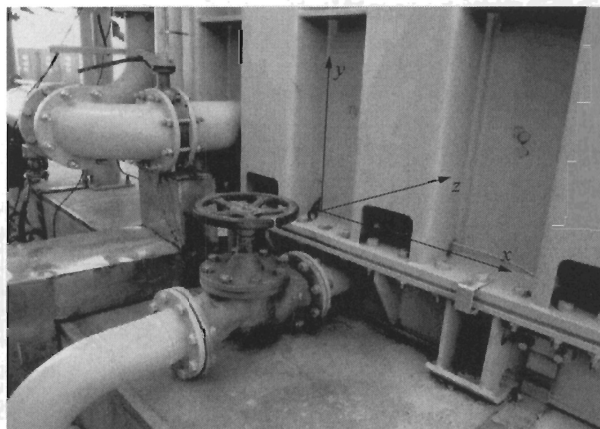


图 C.6 坐标系设置



图 C.7 电抗器中性点出线侧油箱

**附录 D**  
(资料性附录)  
**典型案例**

**D.1 大型单相自耦变压器局部放电超声定位**

××××年××月××日进行×××大型单相自耦变压器局放试验时，在  $1.3U_m/\sqrt{3}$  电压下主变压器中压局放量在 100pC~5000pC 范围波动，图 D.1 下部左边为中压局放波形图。因此决定在中压套管下部油箱布置超声探头进行局放超声监测和定位。

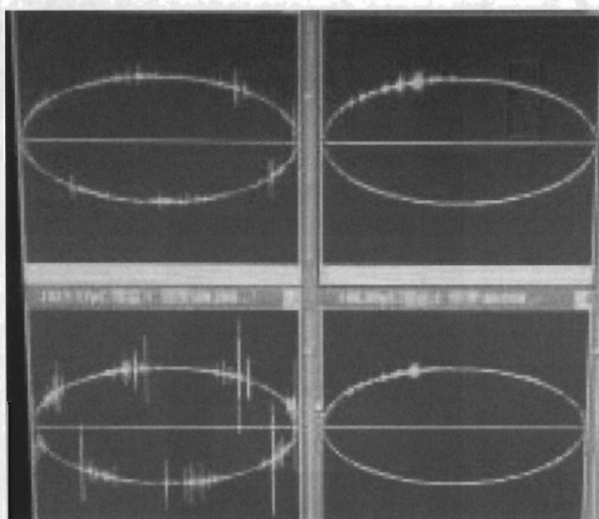


图 D.1 局放波形图（下部左边为中压局放波形）

在交接试验期间的多次加压过程中，布置在此区域的超声波传感器均收到变压器内部的超声波信号。图 D.2 为探头布置区域和坐标轴示意图，以下所有定位均基于该坐标轴：以中压套管下部油箱箱沿为原点，油箱长轴方向为  $x$  轴，油箱高度为  $y$  轴，油箱短轴为  $z$  轴。

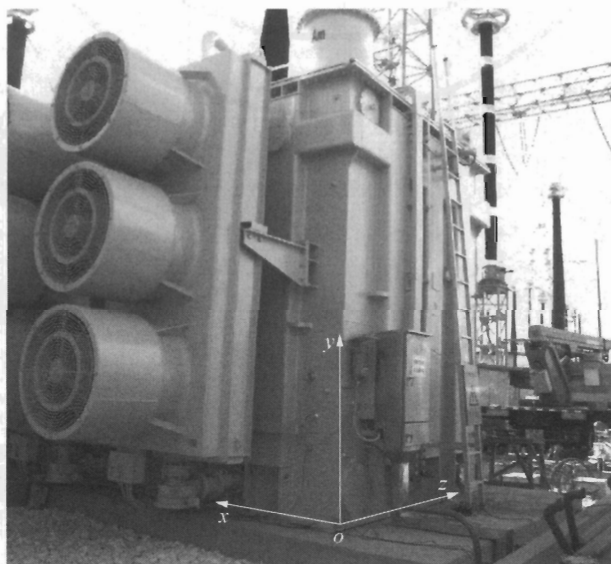


图 D.2 探头布置区域和坐标轴示意图



图 D.3 为测量的一组波形图，其中 1~5 通道为超声探头收到的声信号，6 通道为中压的局放测量的电信号，电信号清楚。图 D.4 的 6 个通道都为超声信号。图 D.5 为采用双曲面进行定位计算。

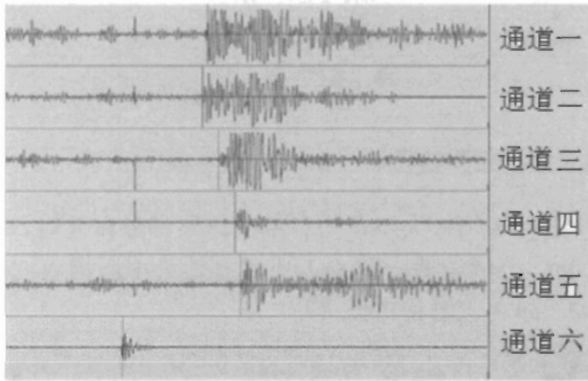


图 D.3 声电信号图（1~5 通道为声信号，6 通道为电信号）

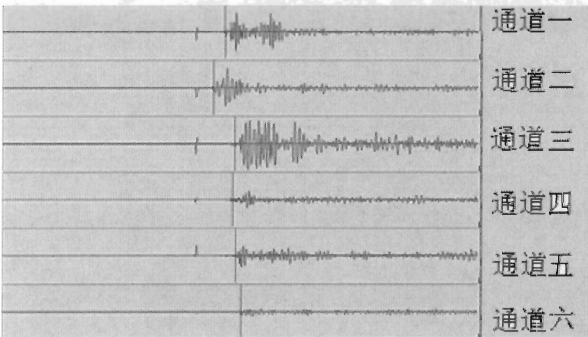


图 D.4 超声信号图（6 个通道都是声信号）

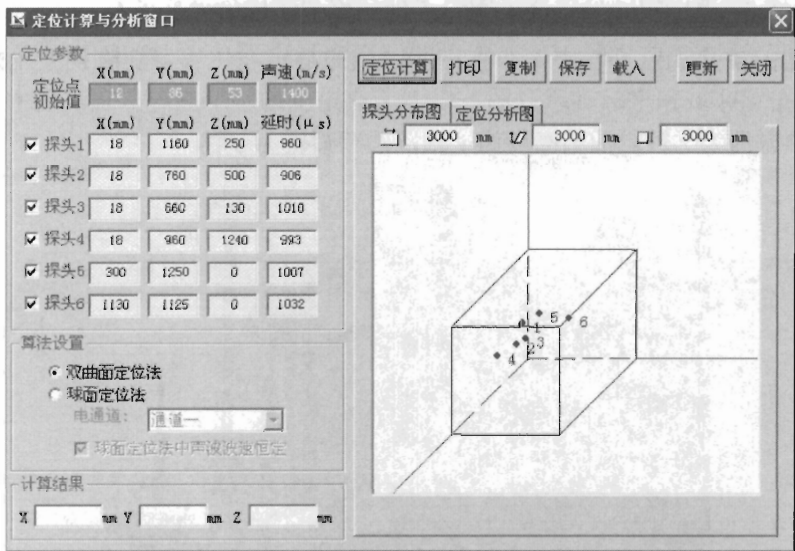


图 D.5 采用双曲面进行定位计算

多组测量波形显示，各通道之间的超声信号时差和声电时差稳定。通过声-声定位和声-电定位分别进行了精确计算，计算结果一致，定位坐标集中在（0.6m，0.95m，0.66m）直径 0.2m 球体内，结合变压器内部结构，该声源位置为中压绕组上下连线与下部水平连线的转角连接处，可能为变压器内部局部放电所引起。

在制造厂内打开中压引线上下连接线下部转角处时，发现内部有明显放电迹象。该放电位置与上述定位中心位置的偏差小于 5cm，很好地验证了定位结果及诊断意见。故障点如图 D.6 所示。

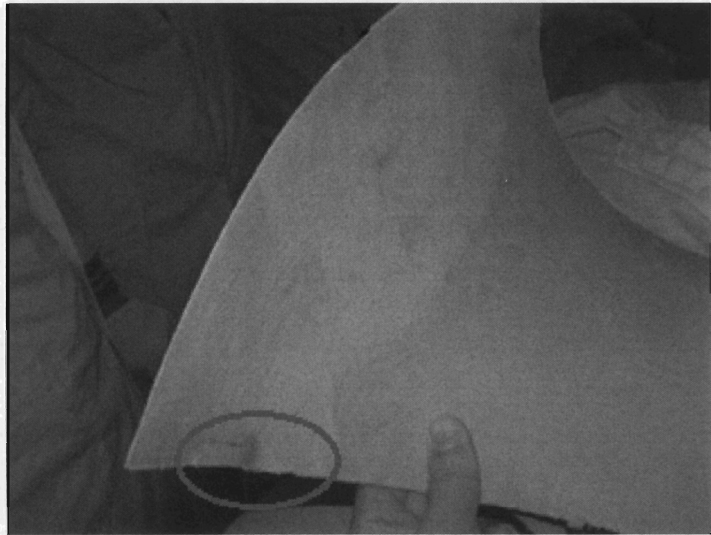


图 D.6 中压引线外绝缘筒纸板上带有放电痕迹

D.2 大型并联高压电抗器局部放电超声定位

在某工程第一阶段系统调试期间，对某站某线 A 相并联高压电抗器进行油色谱分析时发现乙炔气体含量由 0 增长到 0.10 $\mu$ L/L 左右。第一阶段系统调试前后该高压电抗器油色谱数据见表 D.1。

表 D.1 第一阶段系统调试期间 A 相高压电抗器油色谱数据

取样时间	气体成分含量 $\mu$ L/L							
	甲烷	乙烯	乙烷	乙炔	氢	一氧化碳	二氧化碳	总烃
注油后	0.83	0.03	0.00	0.00	7.2	6.6	118	0.86
耐压试验后	0.80	0.05	0.00	0.00	7.4	6.9	120	0.85
第一阶段调试后	0.47	0.02	0.02	0.10	8.38	18.36	59.20	0.61

针对该台高压电抗器乙炔气体含量异常的情况，由于高压电抗器不具备进行现场局放试验的条件，只能通过系统带电 36h 的方法对电抗器进行考核，带电期间密切进行油色谱分析和局部放电超声波检测及定位。

20 $\times\times$ 年 12 月 12 日凌晨 1:30，电抗器开始带电。12 日上午开始进行局放超声波检测和定位。按照预先制定的检测方案，从高压套管升高座附近区域开始布置超声波传感器，以逆时针方向沿电抗器四侧面搜索局部放电超声波信号。而且对重点区域（例如靠近高压引线、中性点引线等区域）提高传感器布置密度和延长检测时间。

把超声波传感器布置在靠近中性点下方油箱上部区域时，检测到较大幅值的超声波信号，如图 D.7 所示椭圆区域内。

由于电抗器的振动较大，反复调整传感器位置、信号采集参数和门槛后，可以获得超声信号时差关系明确的波形图，如图 D.8 所示。

下午在相同部位继续检测时，发现超声信号幅值减小，最后淹没在电抗器的振动干扰信号中。继续搜索电抗器其他位置至带电结束（电抗器实际带电时间为 16h），在其他区域没有收到时差关系明确的超声波信号。图 D.9 为在其他位置检测到的信号，为电抗器振动产生的干扰信号。

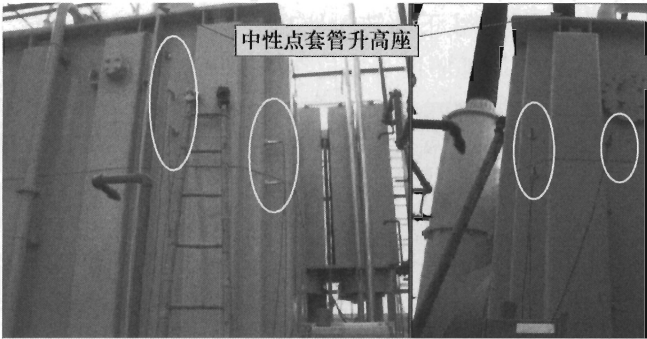


图 D.7 电抗器探头布置图

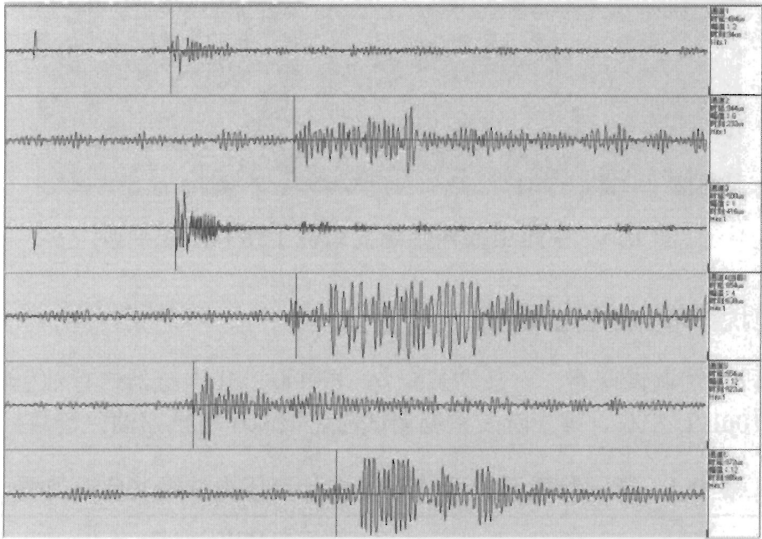


图 D.8 超声信号波形图

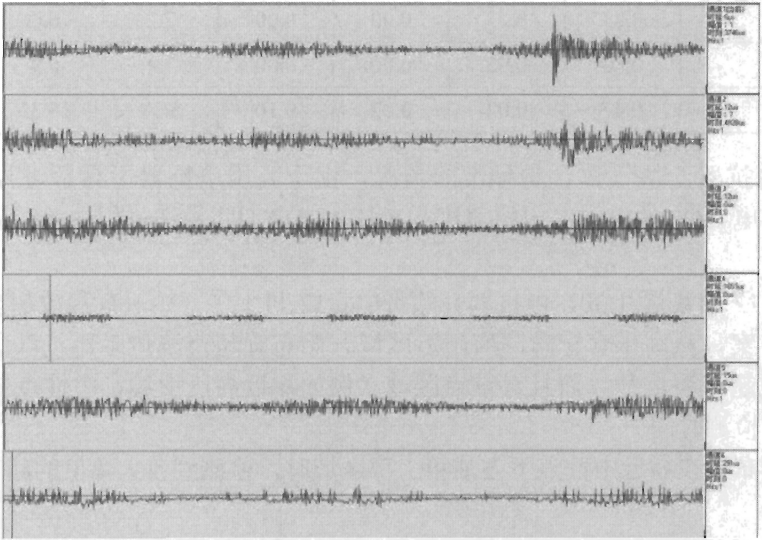


图 D.9 电抗器振动产生的干扰信号

进行超声定位前必须先设定好坐标轴，并测量各传感器的坐标。超声定位时的坐标轴以中性点套管升高座下油箱底角为原点，油箱长轴为  $x$  轴，短轴为  $z$  轴，垂直方向为  $y$  轴，如图 D.10 所示。各传感器坐标见表 D.2。



图 D.10 坐标轴

表 D.2 各传感器坐标

超声波速度 m/s	1400		
使用传感器数量 个	6		
传感器坐标	x 坐标	y 坐标	z 坐标
坐标开始值	0	0	0
通道 1 传感器	865	3690	0
通道 2 传感器	0	3190	815
通道 3 传感器	975	4180	0
通道 4 传感器	0	3200	125
通道 5 传感器	835	3310	0
通道 6 传感器	0	2840	170

对收到的多组时差关系明确且固定的超声信号波形图进行声-声精确定位，计算结果一致，定位坐标集中在（0.94m，3.84m，0.70m）附近。该定位结果表明收到的超声波信号为电抗器内部放电所引起。该定位坐标结合电抗器结构分析，得出放电部位在 X 柱上部夹件附近区域，如图 D.11 所示圆框区域。图 D.12 为电抗器结构示意图。

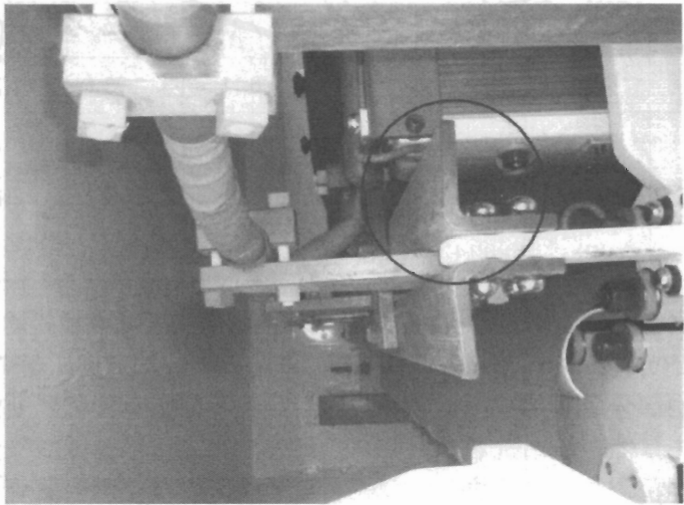


图 D.11 声源位置示意图

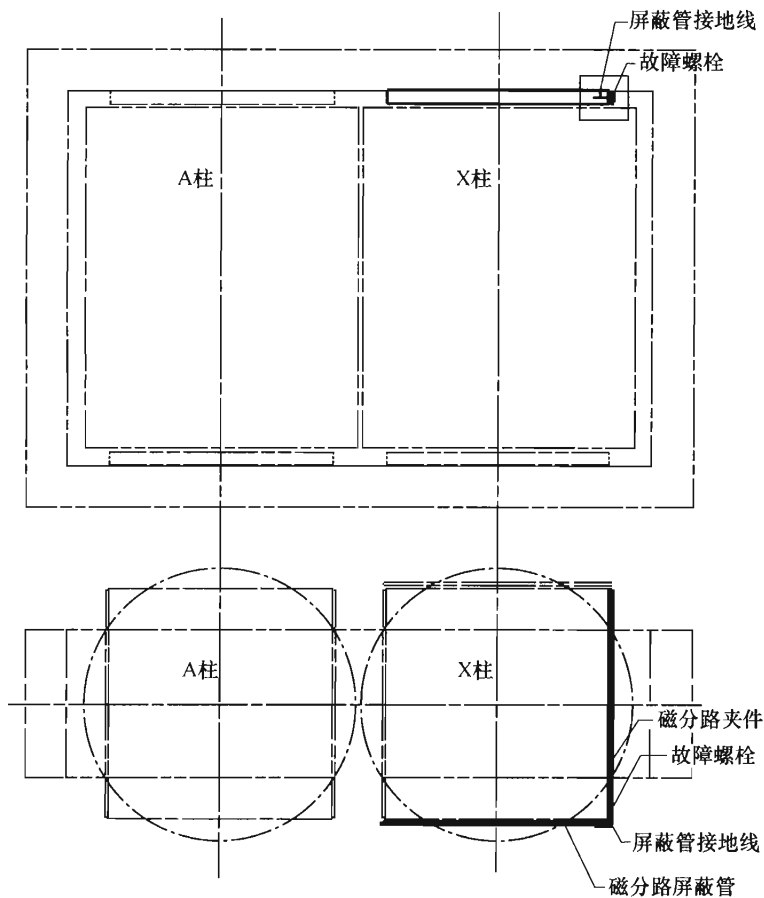


图 D.12 电抗器结构示意图

A 相高压电抗器带电期间的油色谱分析数据见表 D.3。电抗器带电 16h 后氢气和乙炔都有较大增长，其中乙炔气体由 0.11 $\mu$ L/L 增加到 0.36 $\mu$ L/L。

表 D.3 A 相高压电抗器带电期间的油色谱分析数据

取样阶段	气体成分含量 $\mu$ L/L							
	甲烷	乙烯	乙烷	乙炔	氢	一氧化碳	二氧化碳	总烃
升压前	0.21	0.06	0.07	0.11	3.92	17.75	76.89	0.45
升压后 1h	0.24	0.03	0.06	0.12	7.09	16.4	53	0.45
升压后 7h	1.19	0.03	0.08	0.21	9.10	18.74	143.24	1.51
升压后 16h	0.28	0.14	0.23	0.36	10.31	15.88	66.43	1.01

厂方进箱检查发现放电原因是 X 柱的上磁分路夹件上的一个紧固螺栓松动，导致接地线未可靠连接。该放电位置与上述定位中心位置的偏差小于 5cm。缺陷点的烧蚀痕迹如图 D.13 所示。缺陷点烧蚀比较严重，已经融化周围部分金属部件，使之充分连接一起。缺陷点的位置处在金属构件和层压板围绕中，因此在试验过程中只能在该电抗器靠近中性点下方油箱上部部分区域检测到局放超声波信号；缺陷点烧蚀程度，则解释色谱数据中乙炔含量增长明显的原因以及检测到的局放超声波信号随时间由大变小直至消失的原因。

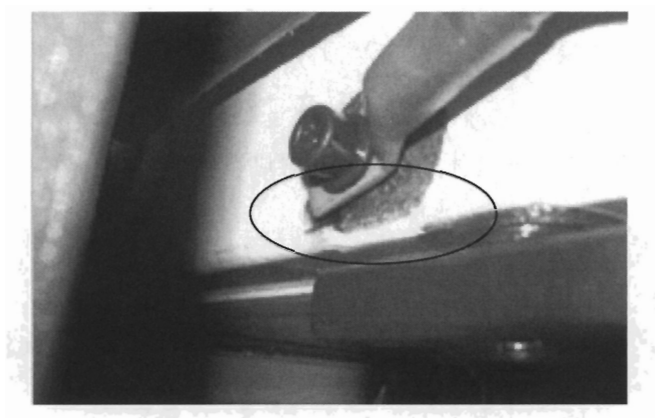


图 D.13 发现的故障点

参 考 文 献

- [1] GB/T 7252 变压器油中溶解气体分析和判断导则
-

中 华 人 民 共 和 国  
电 力 行 业 标 准  
油浸式电力变压器、电抗器  
局部放电超声波检测与定位导则  
DL/T 1807—2018

\*

中国电力出版社出版、发行  
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)  
北京传奇佳彩数码印刷有限公司印刷

\*

2019年12月第一版 2019年12月北京第一次印刷  
880毫米×1230毫米 16开本 1.75印张 54千字  
印数 001—300册

\*

统一书号 155198·1498 定价 27.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究  
本书如有印装质量问题,我社营销中心负责退换



中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 最及时、最准确、最权威 的电力标准信息



155198.1498