

# 电力变压器局部放电超声波检测抗干扰技术

代俊安 付志国

湖北紫电电气集团有限公司 湖北 荆州 434000

**【摘要】：**变电站现场干扰会影响油浸变压器超声局部放电检测，作业中易出现信号畸变、有效脉冲难甄别、定位精度不足的问题。文章探究变压器局放超声波生成传播规律，分析机械振动、窄带电磁、宽频白噪声干扰的时频特征，阐释干扰作用于检测的影响机理。单一降噪技术存在局限，依托带通滤波、小波包降噪与工频相位筛选搭建分层联合抗干扰模型，完成局放超声信号提纯。结合声-声球面定位模型，遗传算法可弥补最小二乘法的收敛缺陷，改善复杂工况下的局放定位效果。试验表明，该体系可提升信号信噪比与脉冲识别准确率，完成变压器全域局放高精度定位，为设备绝缘故障检测提供技术支撑。

**【关键词】：**变压器；局部放电；超声检测；抗干扰降噪；遗传算法

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.028

## 引言

油浸电力变压器为电力系统核心设备，内部绝缘老化、气隙缺陷造成的局部放电，会诱发设备故障，威胁电网运行安全。超声检测依托非接触、带电作业、高安全性的优势，多用于变压器局放故障检测。变电站现场各类机械、电磁及噪声干扰，会造成超声信号畸变、有效特征丢失。传统检测定位手段抗干扰性不足，检测定位效果无法适配现场运维标准。文章分析局放信号传播与现场干扰机理，搭建联合抗干扰降噪模型，优化局放定位算法，构建适配复杂工况的高精度局放检测定位技术体系。

## 1 变压器超声局放信号与现场干扰机理分析

### 1.1 局部放电超声波生成与传播规律

油浸电力变压器内部绝缘气隙、油纸夹层气泡发生局部放电时，气隙击穿快速消解电场力，气泡壁在弹力、摩擦力与惯性力作用下产生衰减震荡，挤压绝缘油生成 30kHz~160kHz 的局放超声波纵波<sup>[1]</sup>。超声波在变压器多层介质传播中存在扩散、散射、吸收三类衰减效应，油中传播速度为 1.42mm/μs。油浸绝缘纸对信号衰减作用微弱，干燥绝缘纸气隙与钢板油箱会大幅损耗信号幅值。110kV 主变现场检测可见，绕组内部局放超声波经多层绝缘结构与油箱传导后，脉冲波形产生多径畸变，信号能量损耗超六成，存在微秒级时延偏差，影响变压器局放故障识别与空间定位精度，降低现场检测可靠性。

### 1.2 检测现场各类干扰来源与时频特性

变电站变压器带电检测现场干扰分为机械振动、窄带电磁、宽频白噪声三类，各类干扰拥有独特的时频特性。冷却油泵、散热风机工作产生低频振动干扰，频率低于 2.5kHz，时域表现为周期性小幅脉冲。线路电晕、射频载波产生的窄带电磁干扰聚焦于 20kHz、500kHz 固定频点，呈现连续等幅正弦

波形。设备元件热运动产生的白噪声覆盖全检测频段，信号幅值随机波动。220kV 主变实测数据显示，设备静置时检测信噪比为 18dB，风机满负荷运行后信噪比降至 3dB。多重干扰叠加会遮蔽微弱的局放超声脉冲，有效信号无法识别，阻碍现场变压器局部放电检测作业。

### 1.3 干扰信号对局放超声检测的影响机理

三类现场干扰会从波形、时延、频谱维度影响局放超声检测，各类干扰均有对应的现场故障案例。窄带电磁干扰贴合局放信号频谱，抬升信号基线并生成虚假脉冲，造成变电站设备误判绕组绝缘放电故障。全域白噪声模糊脉冲轮廓，增加时差提取误差，使定位计算结果产生偏移<sup>[2]</sup>。风机与分接开关机械脉冲贴近局放脉冲波形，无固定工频相位特征，现场曾误判冷却泵振动信号为套管放电，启动多余吊罩检修，造成停电故障与资源浪费。各类干扰叠加会造成超声信号时频特征紊乱，丧失检测效用，制约变压器局放识别与定位精度提升（见图 1）。

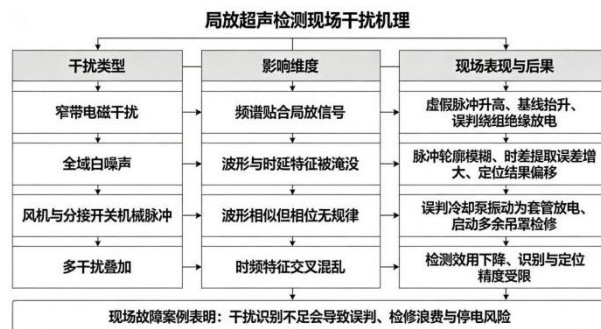


图 1 局放超声检测现场干扰机理

## 2 分层式超声局放信号抗干扰降噪技术

### 2.1 带通滤波器窄带干扰抑制技术

高频射频、工频谐波构成的现场窄带电磁干扰，可通过 25kHz~200kHz 通带的切比雪夫 I 型数字带通滤波器处理，设

备设置 22kHz 下阻带、500kHz 上阻带，把控通带与阻带衰减参数，剔除有效检测频段外的各类干扰信号。滤波器依托时频域变换相关原理筛选信号，现场测试可大幅削弱窄带正弦干扰，优化原始检测信号，减轻后续算法运算负担。设备仅能处理固定频点窄带干扰，对白噪声无抑制效果，降噪性能存在局限，可用于抗干扰预处理流程，辅助后续深度降噪工作开展。

## 2.2 小波变换白噪声干扰滤除算法

针对带通滤波残留的宽频白噪声干扰，研究采用 bior3.7 小波基的小波包多尺度降噪算法，结合 Shannon 熵筛选最优分解结构，依据小波系数与李氏指数差异区分局放信号与噪声。自适应软阈值优化高频系数，去除噪声分量后重构超声信号，修复畸变脉冲形态。3dB 低信噪比仿真测试中，算法可提升 21dB 信噪比，消除油泵工作产生的全域白噪声。算法补齐带通滤波的降噪短板，作为分层抗干扰核心模块，满足变压器复杂现场的信号提纯需求。

## 2.3 分层联合抗干扰模型构建与仿真

本文搭建带通滤波预处理、小波包噪声滤除、工频相位筛选的三级联合抗干扰模型，逐级处理变电站现场检测干扰。前置带通滤波剔除高低频固定干扰，收拢信号带宽<sup>[3]</sup>。中层小波包变换去除随机白噪声，恢复完整脉冲波形。后置相位筛选依托局放脉冲相位分布规律，剔除无关振动干扰脉冲。基于实体仿真油箱平台模拟多干扰环境，1.2dB 低信噪比信号经模型处理后提升至 24.7dB，脉冲识别准确率由 29% 提升至 96.3%。模型降噪覆盖全面、信号保真度良好，可为变压器局放精准定位提供高精度时延数据。

## 3 抗干扰优化下局部放电定位技术研究

### 3.1 超声时差球面定位数学模型搭建

声-声球面定位原理可支撑变压器局放三维时差定位模型的搭建，以油箱顶角为坐标原点，外壁布设多组超声传感器采集局放超声信号。以单组传感器为时延基准，依托变压器油固定声速测算通道时延差值，依据传感器坐标与传播距离建立非线性球面方程组，求解得到局放源三维坐标。模型贴合设备内部介质传播特性，减小声速偏差带来的计算误差，无干扰环境下，变压器核心结构局放定位误差可控制在 2cm 以内，适配高精度定位应用需求（见图 2）。

### 参考文献：

- [1] 赵蓓蓓. 变压器局部放电超声信号传播特性及定位方法研究[D]. 西安理工大学, 2025.
- [2] 唐志国, 胡瑞. 变压器局部放电超声传播路径分析和其对定位误差的影响[J]. 高电压技术, 2026, 52(3): 1292-1303.
- [3] 翁佳南, 李慕子, 卢波, 等. 电力变压器严重受潮时围屏沿面爬电特性研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(8): 19-31.

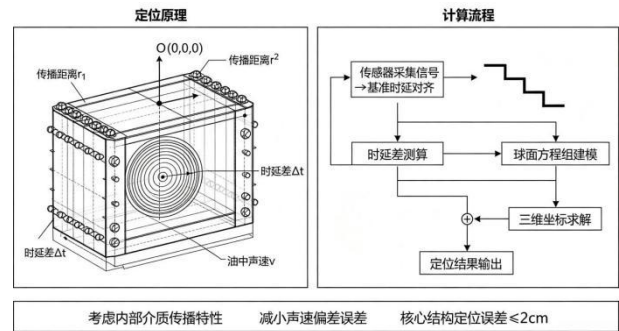


图 2 超声时差球面定位数学模型搭建

### 3.2 传统最小二乘法抗干扰定位缺陷

传统最小二乘法迭代求解局放定位方程组，以误差平方和最小为目标，抗干扰性能薄弱。该算法缺乏容错与粗差剔除能力，残余干扰引发的时延误差，易使迭代陷入局部最优，偏离真实放电位置。实测表明，轻微干扰下其定位偏差超 35cm，易出现局放位置误判。同时，变压器边角区域放电源易导致迭代初值选取失效、坐标越界，无法满足复杂工况下的高精度定位需求，现场实用性不足。

### 3.3 遗传算法全局抗干扰定位优化方法

为弥补最小二乘法的定位缺陷，本文引入全局搜索遗传算法优化局放定位求解。算法采用 20 位二进制编码，覆盖放电坐标与声速参数，计算精度可达 1mm；以误差平方和构建适应度函数，搭配选择、交叉、变异算子，设置 0.8 杂交概率、0.2 变异概率与 100 代迭代上限，全局遍历求解，有效规避局部收敛问题。模拟测试表明，复杂干扰工况下，最小二乘法边角定位偏差最高 451mm，遗传算法可将偏差控制在 17mm 以内，全域定位精度与抗干扰性能显著提升，适配现场复杂检测场景。

## 4 结语

本文针对复杂工况下变压器超声局放精准检测定位难题，开展了干扰机理分析、分层抗干扰技术研发与定位算法优化的系统性研究。结合带通滤波与小波变换搭建分层降噪模型，克服单一降噪技术缺陷，显著提升信号信噪比与脉冲识别准确率。引入遗传算法替代传统最小二乘法，规避局部收敛问题，大幅提升复杂干扰下的局放定位精度。试验验证该技术体系适用性强，可精准诊断变压器绝缘故障、支撑运维决策，对保障变压器安全稳定运行具备重要工程价值。