

# 油箱接缝式变压器局部放电传感方法研究

曾行毅<sup>1</sup>, 赵岩<sup>2</sup>, 郑书生<sup>2</sup>

(1. 国网福建武夷山市供电有限公司, 福州 354300; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 局部放电特高频检测是发现电力变压器早期缺陷的重要手段。现有内置式特高频传感器安装阻力大, 外置传感器检测灵敏度低。为此, 文中提出一种油箱接缝式特高频传感方法。通过仿真建模与实测分析研究了局部放电电磁波在油箱接缝内外的能量空间分布特征以及极化特性; 而后进行了接缝式传感器的选型, 研究了一种适于安装在缝隙中限位方钢断口处的锥形传感器, 并对传感器的形状尺寸、馈电结构进行了优化设计; 最后通过增设反射背腔进一步提高传感器的检测灵敏度。研究表明, 当放电发生在油箱内部时, 缝隙内部信号的电场强度平均为缝隙外部的 3~5 倍; 设计的接缝式传感器的检测幅值可达到传统外置式领结天线的 2~3 倍。油箱接缝式特高频传感器便于现场安装应用, 且具有较高的检测灵敏度, 具有较高的推广应用价值。

**关键词:** 变压器; 局部放电; 特高频; 油箱缝隙; 传感器

## Research on Oil Tank Seam Type Detection Method for Partial Discharge of Transformer

ZENG Xingyi<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>2</sup>, ZHENG Shusheng<sup>2</sup>

(1. State Grid Fujian Wuyishan Power Supply Co., Ltd., Fuzhou 354300, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** UHF (Ultra high frequency) on-line detection of partial discharge is an important means to find the early defects of power transformers. The existing UHF sensors and their installation methods have the problems of low safety, reliability and sensitivity. For this reason, this paper has proposed a seam UHF sensor method which application in the Transformer oil tank. The energy distribution characteristics and polarization characteristics of discharge electromagnetic signals inside and outside the seam were studied through simulation and experimental analysis. Secondly, the selection and design of seam sensors were carried out, and a conical sensor suitable for installation at the limiting square steel opening was developed. To improve the detection amplitude, the sensor's feeder shape, size and structure were optimized, and a reflective back cavity was also added. The research results indicate that when discharge occurs in-side the fuel tank, the signal electric field intensity inside the seam is on average 3-5 times that of the outside of the seam; The detection amplitude of the designed seam type sensor can reach 2-3 times that of traditional external tie antenna. The seam UHF sensor is convenient for installation and application, and can realize high sensitivity detection of partial discharge, this sensor is highly valuable for promotion and application.

**Key words:** transformer; partial discharge; ultra high frequency; oil tank gap; sensors

## 0 引言

电力变压器作为电力系统核心设备之一, 其绝缘状况直接决定变压器能否稳定运行。通常认为, 局部放电(partial discharge, PD)是造成变压器绝缘老化、劣化的重要因素之一, 也是绝缘失效的重要征兆与表现形式<sup>[1-2]</sup>。局部放电带电检测或在线监测对于及时发现变压器绝缘缺陷、预防绝缘故障具有重要的意义。

变压器局部放电检测常用方法主要有脉冲电

流法、油中溶解气体法、超声波法和特高频法等<sup>[3-5]</sup>。

其中特高频法因抗干扰能力强、检测频带宽和灵敏度高等优势而被广泛应用于现场实际检测中, 特高频传感器的安装方式主要分为内置式和外置式。内置式传感器通过放油阀、人/手孔或者变压器生产过程中预置的方式将传感器置于变压器油箱内部<sup>[6]</sup>, 但这类传感器无法应用于已投运的变压器。外置式则是通过在变压器油箱上开介质窗的方式将 UHF 天线安装在变压器油箱外部<sup>[7]</sup>, 但油箱外部的局部放电信号强度较低, 外置式传感器的检测灵敏度会

受到一定的制约。

目前,在变电站种运行的大型油浸式变压器油箱大多数采用钟罩式和桶式结构,其箱体与上端盖或箱体与底座之间焊接有限位方钢,橡胶密封圈限制在限位方钢之间,在密封圈的作用下形成围绕变压器一圈的非金属绝缘缝隙<sup>[8-9]</sup>,局部放电的电磁波信号可以通过这个缝隙传播到外界。利用上述特性,通过在变压器油箱缝隙处检测局部放电的电磁波信号,可以实现变压器局部放电的带电检测与在线监测<sup>[10-11]</sup>。目前,在变压器油箱缝隙处检测局部放电电磁波信号的方法已经取得一定的应用,但针对于局部放电电磁波在缝隙处的传播特性的研究相对较少,适用于缝隙处检测局部放电信号的传感器更是少之又少。因此,明确电磁波在缝隙中的传播特性可以为缝隙中局部放电检测传感器的设计提供指导<sup>[12]</sup>,同时设计用于缝隙中检测变压器局部放电的高灵敏度传感器,对于站内变压器局部放电检测具有重要工程应用价值。

文中主要从探究电磁波在缝隙处的传播特性;接缝式特高频传感器的研制以及接缝式特高频传感器实测 3 个方面开展相关工作。

## 1 缝隙中电磁波信号分布特征

### 1.1 缝隙处电磁波传播特性研究

#### 1.1.1 仿真分析

文中根据厂家提供的信息,定制了一款某型号变压器缩比模型(油箱法兰结构保留原尺寸),带有 3 个限位方钢结构,见图 1。油箱尺寸为 600 mm×600 mm×500 mm,法兰内边界尺寸为 600 mm×600 mm,法兰外边界尺寸为 900 mm×900 mm,限位方钢结构的变压器最内侧与最外侧的限位方钢尺寸为 12 mm×12 mm,中间的限位方钢尺寸为 10 mm×10 mm,缝隙高度为 17 mm。其结构见图 1。

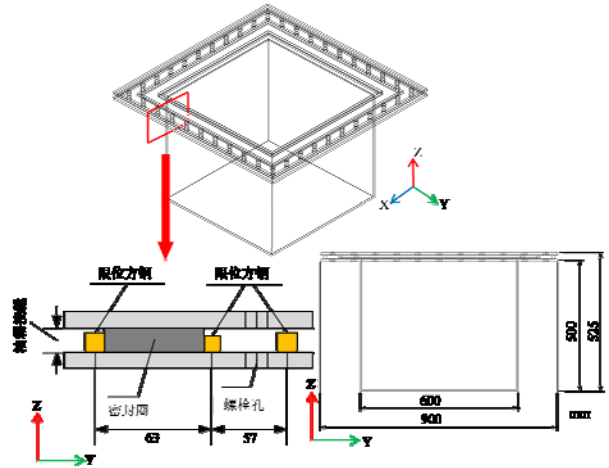


图 1 变压器油箱缩比模型结构图

Fig. 1 Structural diagram of transformer oil tank scale model

在时域有限差分仿真方法中,建立变压器油箱缩比模型,应用了一个 5 mm 的矩形网格,时间步长为 3.852 ps。油箱中的填充介质为绝缘油,相对介电常数 2.2;密封圈的相对介电常数设置为 13;其它非导电区域设置为空气,相对介电系数为 1。一个长度为 50 mm 的偶极子天线作为 50  $\Omega$  电压源置于模型的中心,方向平行于 Z 方向。偶极子天线的具体位置<sup>[13-17]</sup>见图 2。参考文<sup>[18-19]</sup>中 PD 模拟源的设置方法,在天线上施加陡脉冲电流(脉冲宽度为 1 ns、峰值为 1 A 的标准高斯脉冲电流信号)来模拟 PD 源,陡脉冲电流的波形见图 3。

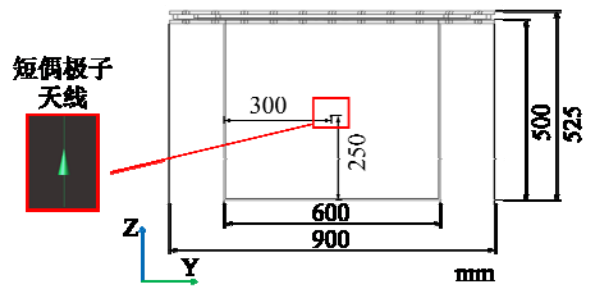


图 2 偶极子天线具体位置

Fig. 2 Specific position of short dipole antenna

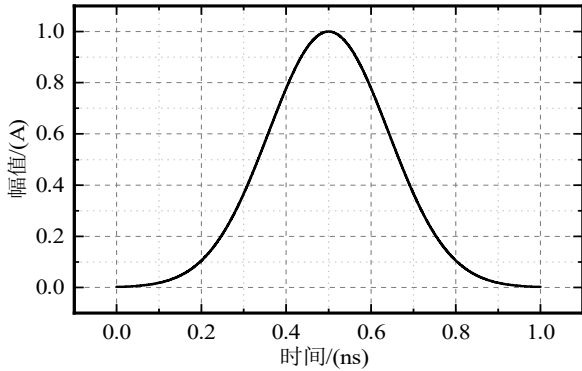


图3 陡脉冲电流波形图

Fig. 3 The waveform of the steep pulse current

21 个电位探针沿着油箱接缝放置，间隔 10 mm，检测电场强度的峰值。探针序号的数值表示其与模型中心的距离，单位为 mm。电位探针的布置见图 4。

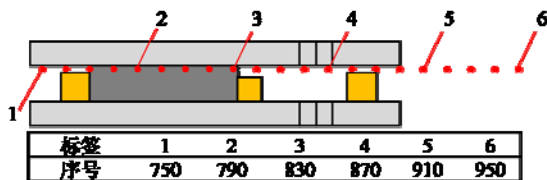


图4 电位探针布局

Fig. 4 Potential probes' layout

为防止雨水在油箱法兰缝隙中经密封圈渗透到油箱内部，通常最外侧限位方钢设有断口。传感器也可以安装在断口处。为了明确限位方钢断口对电磁波传播特性的影响，在无断口及断口宽度为 60、120、180、240 mm 的情况下进行仿真分析，880，890 两个检测点位于断口处，断口的结构见图 5，仿真结果见图 6。

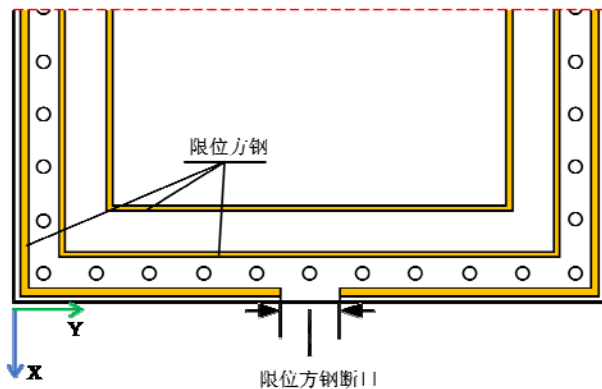


图5 限位方钢断口结构图

Fig. 5 Limiting square steel opening structure

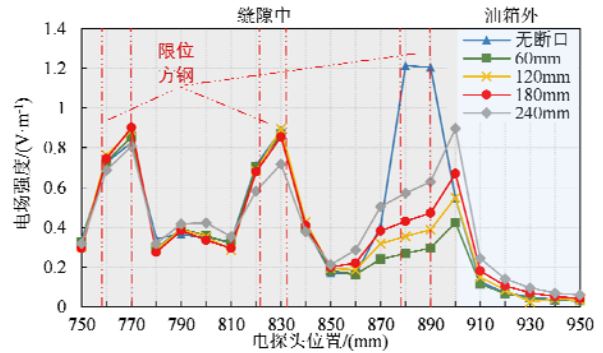


图6 不同限位方钢断口宽度下各检测点电场强度

Fig. 6 Influence of the limited square steel opening on electromagnetic wave propagation characteristics

从图 6 中可以看出：缝隙内部的电场强度显著高于缝隙外部的。最外侧限位方钢断口宽度的改变对于靠内侧两个限位方钢处的电场强度影响不明显，其对于缝隙内部电场强度的影响主要体现在缝隙末端：最外侧限位方钢完全密封时，缝隙末端的电场强度最大；而当最外侧限位方钢存在断口时，缝隙末端的电场强度会随着断口尺寸的增大而逐渐增大。不同情况下，限位方钢断口处 880、890 两个检测点幅值的平均值与缝隙外部 920 检测点幅值的对比见表 1。

表1 缝隙内外检测点信号幅值对比

Table 1 Comparison of Potential probes' signal amplitudes between internal and external the seam

参数	无断口	60 mm	120 mm	180 mm	240 mm
880-890 信号平均值/(V·m <sup>-1</sup> )	1.209 2	0.283 2	0.371 1	0.450 8	0.600 8
920 检测点幅值/(V·m <sup>-1</sup> )	0.070 768	0.066 820	0.086 109	0.105 470	0.140 780

从表 1 中可以看出，当限位方钢处没有断口时，880,890 检测点的平均值为 920 检测点幅值的 17.28 倍；当有断口存在时，为 4.22 倍。

电磁波的动力传播过程见图 7。从图 7(a)、(b) 中可以明显看出，脉冲源发出的电磁波信号以球面波的形式向外传播。从图 7(c)、(d) 中可以看出，当信号到达邮箱壁后，发生折射和反射，形成了复杂的信号强度分布。从图 7(e)、(f) 中可以看出，一部分信号传播进入到接缝内部。最终，形成了缝隙内部信号强高于油箱外部的分布模式。

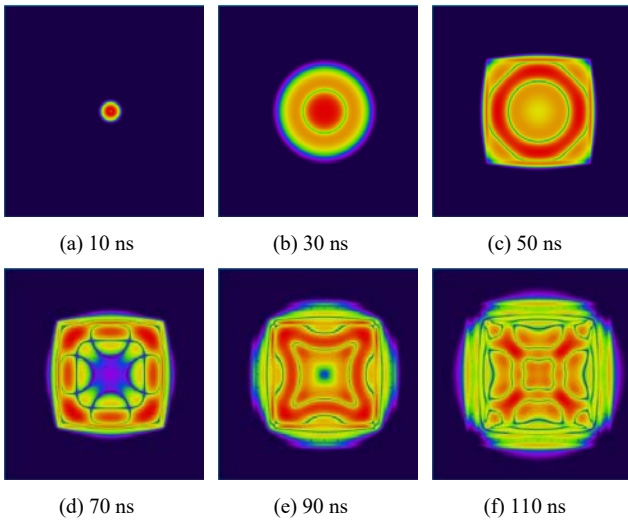


图7 XOY平面电磁波动态传播过程

Fig. 7 XOY plane dynamic propagation process of electromagnetic wave

### 1.1.2 实测分析

在定制的变压器油箱实体模型上，搭建的检测平台见图 8。为了在测试过程中保持电磁信号的稳定性，采用标准信号发生器输出双指数脉冲信号，幅值 5 V，上升时间 680 ps，信号波形见图 9。脉冲信号经单极子天线向外辐射电磁波信号，在油箱缝隙处同样使用单极子天线检测电磁波信号。

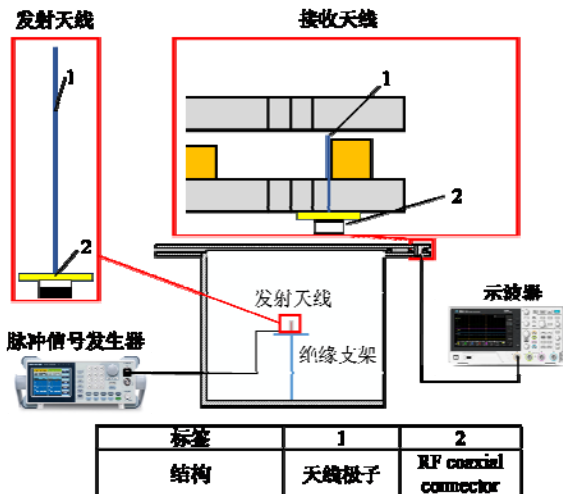


图8 缝隙处电磁波传播特性实验平台

Fig. 8 Experimental platform for electromagnetic wave propagation characteristics in the seam

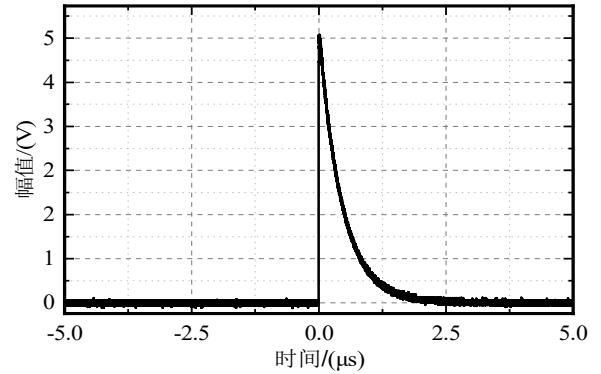


图9 双指数脉冲信号波形

Fig. 9 The dual exponential steep pulse signal waveform

发射天线长 50 mm，直径 2 mm，按 1/4 波长计算，工作频率约 6 GHz。由于限位方钢的尺寸限制，接收天线长度为 15 mm，按 1/4 波长计算，工作频率约为 20 GHz。尽管二者的频带并不完全对应，但从控制变量的角度来看，这样设置可以满足验证电磁波信号在接缝中能量分布规律的要求。

基于仿真内容及实验的可操作性，在油箱法兰 6 个观测点处(850、870、885、900、920、940)用单极子天线检测缝隙内部及外部自由空间的电磁波信号见图 10。其中 850 检测点处于螺孔处，885 检测点处于限位方钢处，920 与 940 检测点在油箱法兰外部。

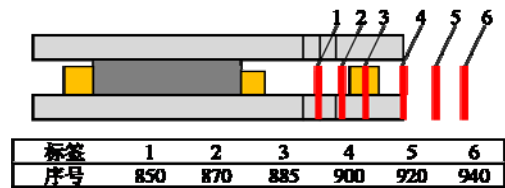


图10 检测点布局示意图

Fig. 10 Layout diagram of inspection points

在无断口以及 4 种不同断口宽度下，各观测点单极子天线检测信号的幅值见图 11。整体来看，缝隙内部检测点的信号幅值要高于缝隙外部检测点的。当最外侧限位方钢无断口时，限位方钢处的信号幅值要高于有断口时的。对比不同断口尺寸下的检测结果，可以发现，随着断口尺寸的增加，缝隙内以及油箱外部各观测点信号的幅值都随之增加。上述现象与仿真分析的结果保持一致。

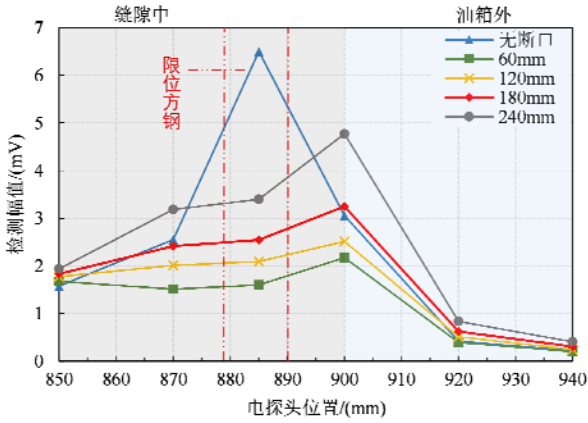


图 11 不同限位方钢断口宽度下单极子天线信号幅值

Fig. 11 Signal amplitude of monopole antenna with and without opening in the limiting square steel

不同情况下 885 检测点信号幅值与 920 检测点信号幅值的对比见表 2。当限位方钢处没有断口时，885 检测点的幅值为 920 检测点幅值的 15.45 倍；当有断口存在时，为 4.07 倍。这与仿真结果相一致。仿真与实验结果对比表明，在缝隙内部，局部放电信号强度远高于缝隙外部，因此，缝隙内部安装的传感器在理论上会比在缝隙外部具有更高的检测灵敏度。

表 2 缝隙内外检测点信号幅值对比

Table 2 Comparison of signal amplitudes between internal and external the seam

参数	无断口	60 mm	120 mm	180 mm	240 mm
885 检测点幅值/mV	6.498 3	1.602 6	2.089 7	2.544 4	3.397 0
920 检测点幅值/mV	0.420 5	0.397 1	0.511 7	0.626 7	0.836 6

### 1.2 放电信号缝隙处时频特性研究

本节对不同类型放电所产生的电磁波信号在油箱接缝处的时频特性进行分析，明确传感器的设计参数。

#### 1.2.1 典型缺陷放电原始电流测量

为保证仿真与实际情况的一致性，需要对油中典型缺陷放电的原始电流波形进行测量，将其作为仿真模型中的脉冲电流源。原始电流测量实验平台见图 12，交流电源为工频无晕试验变压器，高压电源通过无电晕导杆连接到分立电极式超宽带放电电流测量装置<sup>[20-21]</sup>，装置结构见图 13。该电流测量装

置已在文[21]的实验中得到应用，实验结果表明，该装置的带宽能够满足局部放电原始电流的测量要求，精度符合 IEC 60270: 2000<sup>[22]</sup>标准。

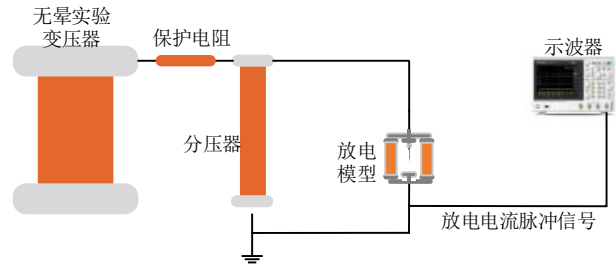


图 12 原始电流测量实验平台

Fig. 12 The original current acquisition experiment platform

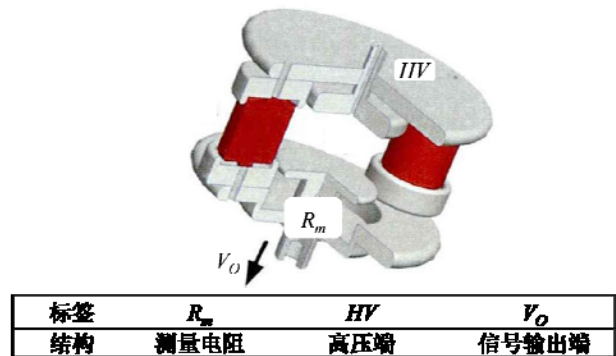


图 13 分立电极式超宽带放电电流测量装置结构

Fig. 13 The basic structure of discrete electrode type ultra-wideband discharge current measuring device

参照变压器中常见的绝缘缺陷，制作 4 种典型缺陷放电模型，分别为尖端缺陷、沿面缺陷、气隙缺陷和悬浮缺陷，见图 14。

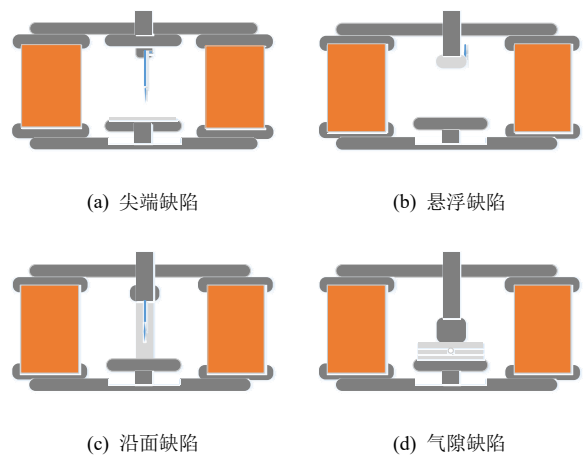


图 14 典型缺陷放电模型

Fig. 14 Typical defect discharge model

尖端缺陷，即点对平面，针尖与下电极板之间的距离为 10 mm，见图 14(a)。悬浮缺陷，即悬浮颗粒，针头长度为 10 mm，尖端距离上板 1 mm，见图 14(b)。沿面缺陷，即针与高压端连接紧密地附着在中间绝缘柱上，针尖距离下极板 15 mm，见图 14(c)。气隙缺陷，即电介质中的气泡，有 3 层厚度为 2 mm、直径 50 mm 的绝缘材料，保证足够的沿面距离避免产生沿面放电，中间层有一个直径为 2 mm 的气泡，见图 14(d)。

原始电流的归一化测量结果见图 15。从图 15 可以看出，对于不同类型的放电，原始电流信号的上升时间存在显著差异：油中尖端缺陷放电为 460 ps，油中悬浮缺陷放电为 600 ps，油中气泡缺陷放电为 1 060 ps，油中沿面缺陷放电为 1 000 ps。由于这些差异的存在，有必要综合考虑在缝隙中，不同类型放电信号的频谱特性。

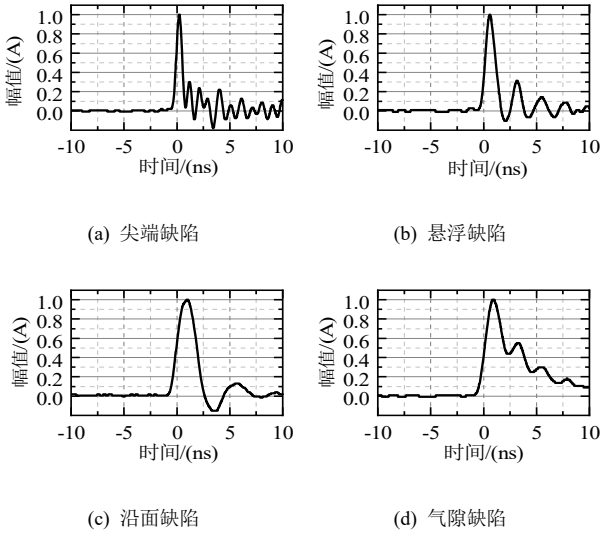


图 15 典型缺陷放电电流

Fig. 15 Typical defect discharge current

### 1.2.2 时频特性分析

分别将油中典型缺陷放电的原始电流波形导入仿真模型中。选取油箱缝隙中的 870、880、890 电位探头作为检测点，检测点位置见图 16，分析其信号特性。

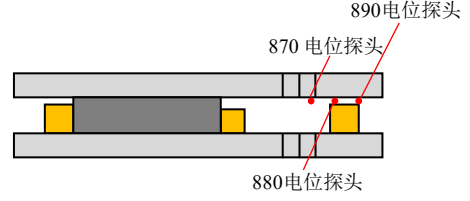


图 16 检测点位置

Fig. 16 Detection point position

以 880 点的检测结果为例，该检测点信号的频谱见图 17。

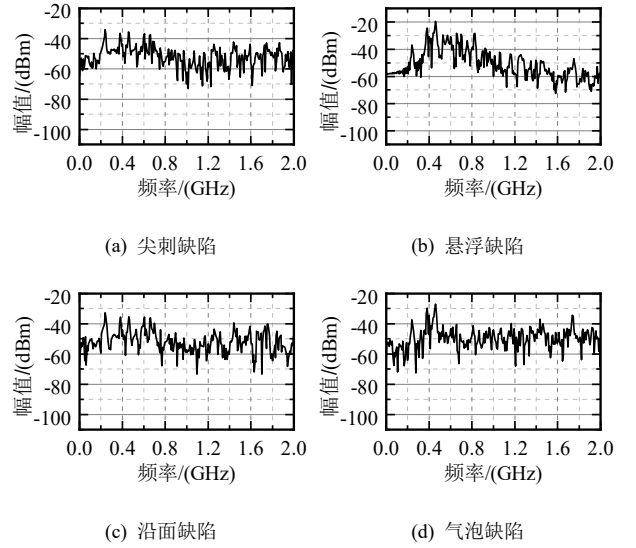


图 17 检测点信号频谱

Fig. 17 Detection point signal spectrum

为了更好地量化分析信号的频域特性，对信号的频率重心和等效频宽进行计算。信号的频谱用  $S(\omega)$  来表示。首先对信号频谱进行归一化处理，归一化后的信号频谱用  $S_N(\omega)$  来表示

$$S_N(\omega) = S_N(\omega) / \sqrt{\int_0^{\infty} S(\sigma)^2 d\sigma} \quad (1)$$

等效频宽  $\overline{W}_N$  为

$$\overline{W}_N = \int_0^{\infty} \omega |S_N(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

频域重心  $F$  为

$$F = \sqrt{\int_0^{\infty} (\omega - \overline{W}_N)^2 |S_N(\omega)|^2 d\omega} \quad (3)$$

频域特性参数的计算结果见表 3。

表 3 信号频域特性参数

Table 3 Signal frequency domain parameters

缺陷类型	电位检测点序号	频域中心/Hz	等效频宽/Hz
尖刺缺陷	870	$1.19 \times 10^9$	$2.67 \times 10^8$
	880	$1.12 \times 10^9$	$1.76 \times 10^8$
	890	$1.08 \times 10^9$	$1.61 \times 10^8$
悬浮缺陷	870	$5.54 \times 10^8$	$7.19 \times 10^7$
	880	$5.67 \times 10^8$	$7.91 \times 10^7$
	890	$5.83 \times 10^8$	$8.64 \times 10^7$
沿面缺陷	870	$5.87 \times 10^8$	$2.25 \times 10^8$
	880	$6.07 \times 10^8$	$2.55 \times 10^8$
	890	$6.34 \times 10^8$	$2.99 \times 10^8$
气隙缺陷	870	$8.15 \times 10^8$	$2.91 \times 10^8$
	880	$7.34 \times 10^8$	$2.65 \times 10^8$
	890	$6.61 \times 10^8$	$2.12 \times 10^8$

由表 3 可知, 880、890 两个检测点信号频谱的能量多分布在 500 MHz 以上。为满足局部放电检测的要求, 需要设计一种工作频带在 500 MHz 以上的天线, 用来在油箱接缝处对局部放电电磁波信号进行检测。

为明确缝隙中电磁信号的极化方向, 以尖刺放电为例, 参照图 2 中的设置方法, 在模型中央设置放电电流脉冲源, 对不同断口宽度下 880 电位检测点检测到的电场强度在每个方向分量( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ )的峰值进行分析。分析的结果见表 4, 从表 4 中可以看出, 在不同的断口宽度下, 缝隙中的电场强度在  $Z$  方向上的分量始终最高, 平均为  $X$  方向分量 56.09 倍; 在无断口时,  $Z$  方向分量, 为  $Y$  方向分量  $3.46 \times 10^5$  倍, 存在断口时, 平均为 4.25 倍, 当限位方钢存在断口时, 由于断口处的边缘绕射效应,  $Y$  方向的分量有所增强。综上所述, 需要设计一种主增益方向为  $Z$  方向的线极化天线。

表 4 电场强度最大值

Table 4 Peak value of the electric field intensity

限位方钢断口宽度 /mm	$E_x/(V \cdot m^{-1})$	$E_y/(V \cdot m^{-1})$	$E_z/(V \cdot m^{-1})$
无断口	$1.71 \times 10^{-2}$	$3.12 \times 10^{-6}$	1.08
60	$0.45 \times 10^{-2}$	0.07	0.24
120	$0.67 \times 10^{-2}$	0.09	0.34
180	$0.74 \times 10^{-2}$	0.09	0.42

240

 $1.01 \times 10^{-2}$ 

0.10

0.56

## 2 传感器设计

在本章中设计了一种适合在油箱缝隙中安装的传感器。首先进行了传感器的选型; 为了获得更好的检测性能, 而后对传感器天线极子的尺寸以及馈电端口的结构进行了优化设计。此外, 还设计了反射背腔, 进一步提高传感器的检测性能。

### 2.1 基于极化方向的天线选型和优化

目前, 局部放电检测用的特高频天线主要有以单极天线为主的线天线、以微带天线为主的面天线、以喇叭天线为主的口径天线和以螺旋天线、锥形天线为主的非频变天线。

锥形天线具有良好的线极化特性, 且结构紧凑, 因此结合所需要的频带特性以及油箱缝隙对传感器尺寸的限制, 选取锥形天线作为油箱接缝式局部放电信号检测传感器。

锥形传感器的基本结构见图 18, 锥形传感器的性能主要由天线极子的尺寸所决定。为适配缝隙尺寸, 传感器高度设置为 17 mm, 底部通过同轴线馈电, 传感器的安装方式见图 19。

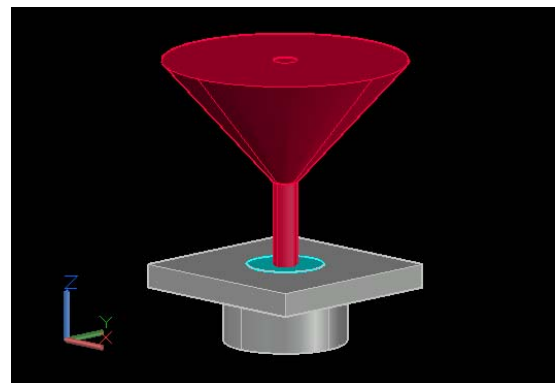


图 18 锥形传感器的基本结构

Fig. 18 Basic structure model of conical sensor

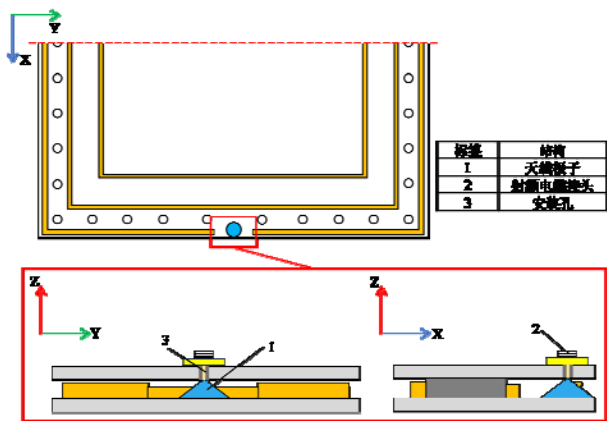


图 19 锥形传感器安装位置示意图

Fig. 19 Schematic diagram of installation position of conical sensor

在锥形传感器高度确定的情况下，其底面直径对于传感器的性能起主要作用。为了实现更好的检测性能，对锥形传感器的底面直径进行优化设计，参照图 2 中所示的仿真分析方法，断口宽度设置为 120 mm，在图 19 所示位置设置锥形天线，以如图 3 所示的陡脉冲电流作为 PD 源，对锥形天线的检测幅值进行分析。

不同底面半径下，锥形天线的检测幅值(峰值)见表 5。从表 5 可以得出，锥形天线的底面半径选取为 20 mm。

表 5 锥形天线检测峰值

Table 5 Peak value of conical antenna detection signal

锥形天线底面半径/mm	检测幅值/mV
14	8.94
15	9.12
16	9.63
17	9.95
18	10.75
19	11.64
20	12.57

选定的锥形传感器三维辐射方向图见图 20，主辐射方向的增益为-1.5 dB。

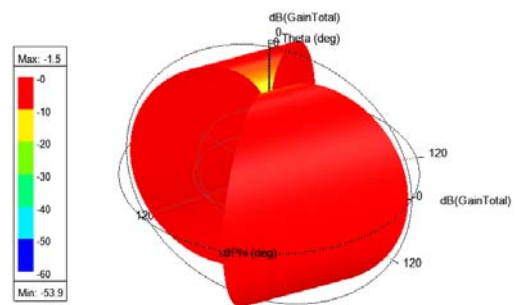


图 20 锥形传感器三维辐射方向图

Fig. 20 3D radiation pattern of conical sensor

锥形传感器 XOZ 面和 YOZ 面的轴比方向见图 21，主辐射方向上的轴比均大于 70 dB，可见锥形传感器线极化特向良好。

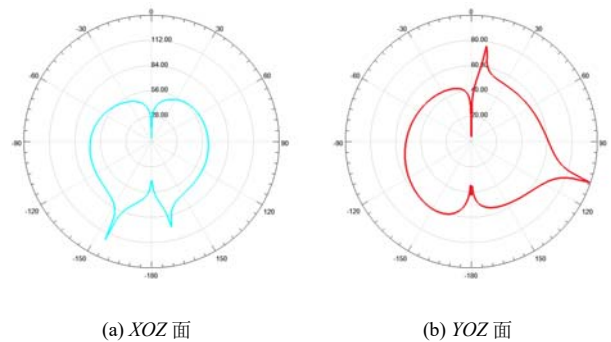


图 21 锥形传感器 XOZ 面和 YOZ 面的轴比方向图

Fig. 21 Axial ratio direction diagram of the XOZ and YOZ surfaces of the conical sensor

## 2.2 输出阻抗匹配结构设计

由天线接收理论可知，要想使天线能可靠不失真地传感瞬变电场信号且能与理论计算响应一致，除天线本身的制造工艺达到要求外，采用同轴馈电的锥形天线要保证馈电端口的阻抗匹配。

锥形天线的安装方式见图 22，锥形传感器安装于最外侧限位方钢断口处。内导体与箱体开孔构成同轴结构，依据式(4)确定内导体直径和开孔直径，使其满足 50 Ω 匹配。

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4)$$

式(4)中： $Z_0$ 为同轴结构的传输阻抗； $\epsilon_r$ 为介质的相对介电常数，此处的介质为空气， $\epsilon_r$ 取 1； $d$ 为

内导体直径； $D$ 为开孔直径。结合实际结构与式(4)约束， $d$ 取3 mm， $D$ 取6.9 mm。

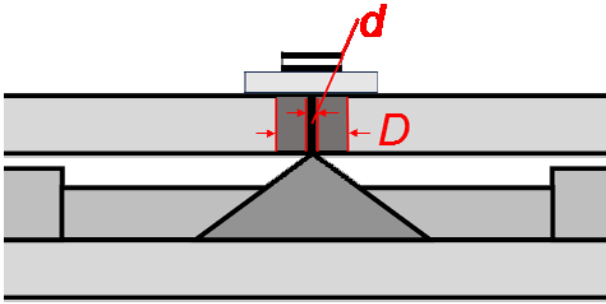


图 22 锥形传感器安装孔结构图

Fig. 22 Installation structure diagram of conical sensor installation hole

### 2.3 反射背腔

锥形天线在接收正面信号的同时，也接收背面的信号，这不仅使得天线在主要的检测方向上的接收效率降低，周围环境的杂波也会被天线接收，导致信号失真、信噪比降低。为此，需要将天线放入金属背腔内形成背腔式天线。

背腔在天线平面法向的长度对天线的性能有主要影响，而背腔的宽度和高度可以按照天线的应用场合要求来决定。根据尺寸要求，初步选定背腔的宽度为33 mm，高度为17 mm。下面计算背腔的长度 $h$ 。背腔底部镜像作用见图23。

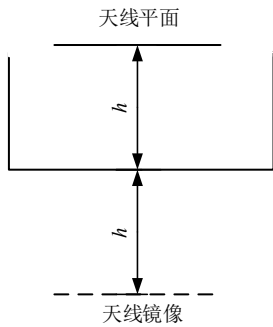


图 23 背腔底部镜像作用

Fig. 23 Mirror effect at the bottom of back-cavity

如图23所示，背腔的底面对天线有镜像作用，这样就将天线等效为一个二元天线阵。此时天线的发射场强可以按阵列天线的理论来分析，见式(5)

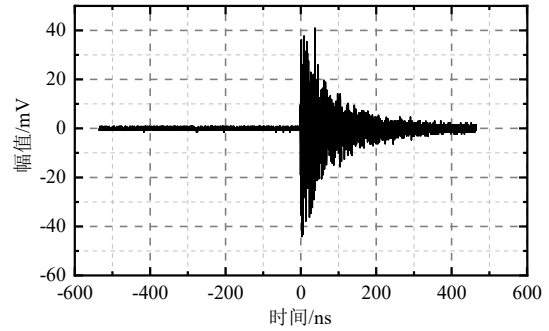
$$E = E_1 \left( 1 - e^{j \frac{4\pi}{\lambda_0} h} \right) \quad (5)$$

式(5)中： $E_1$ 为天线自身在空间中发射的电场强

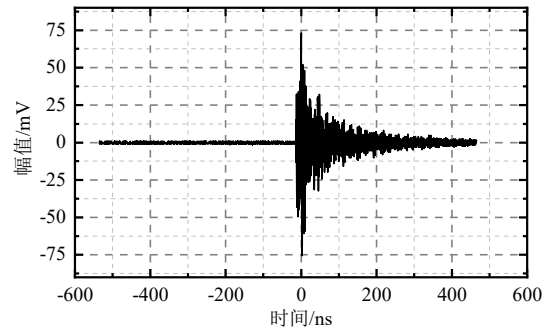
度； $\lambda_0$ 为电磁波中心频率波长。当背腔的高度 $h = \lambda_0/4$ 时，天线加背腔后的发射场强 $E$ 最强。通过计算，设置 $h$ 为150 mm。

参照图8中的测试方法，对增设背腔前后锥形传感器的性能进行测试，同时与外置式领结天线的测量结果进行对比。

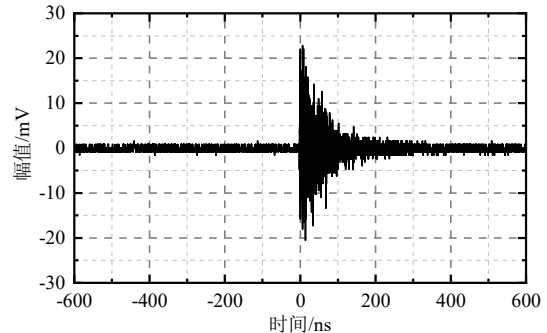
有无反射背腔对比测试结果见图24，测试结果表明，增设的反射背腔使得锥形传感器的信号上升了78.87%，达到了领结天线的3.2倍。



(a) 无反射背腔



(b) 增设反射背腔



(c) 外置式领结天线

图 24 有无反射背腔对比测试结果

Fig. 24 Comparison test results with and without reflective back cavity

### 3 传感器灵敏度对比测试

#### 3.1 测试方法与装置

在定制的变压器油箱实体模型中搭建的检测平台见图 25，放电模型置于变压器油中，锥形传感器安装在限位方钢断口处。另外选用实验室现有的领结天线作为对照，测试过程中保持领结天线的极化方向与缝隙中电磁波的极化方向一致。

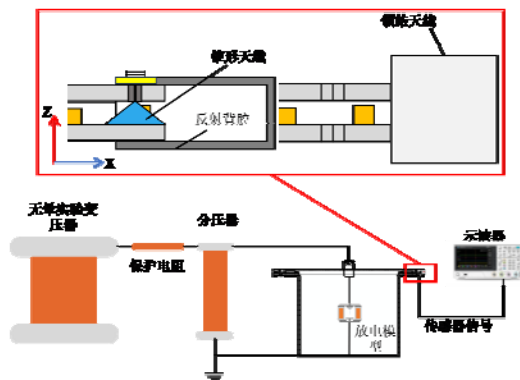
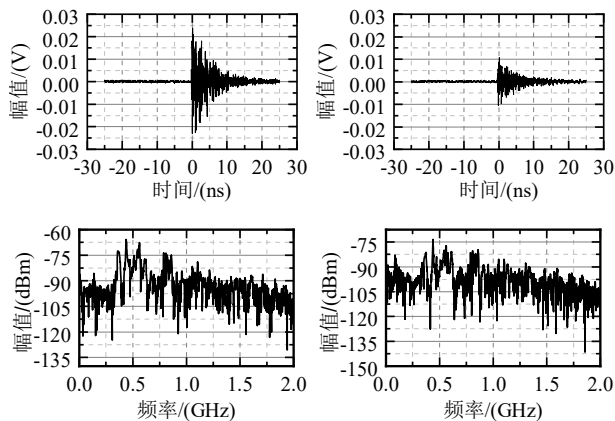


图 25 典型缺陷油箱模型检测平台

Fig. 25 Typical defect tank model inspection platform

#### 3.2 接缝式传感器与领结天线灵敏度对比分析

接缝式锥形传感器与外置式领结天线针对尖端放电的测试结果见图 26，锥形传感器信号幅值为 23.8 mV，领结天线信号幅值为 10.7 mV。两种传感器信号的能量都主要集中在 400~800 MHz 的范围内，相比而言，接缝式传感器的信号能量更为集中。

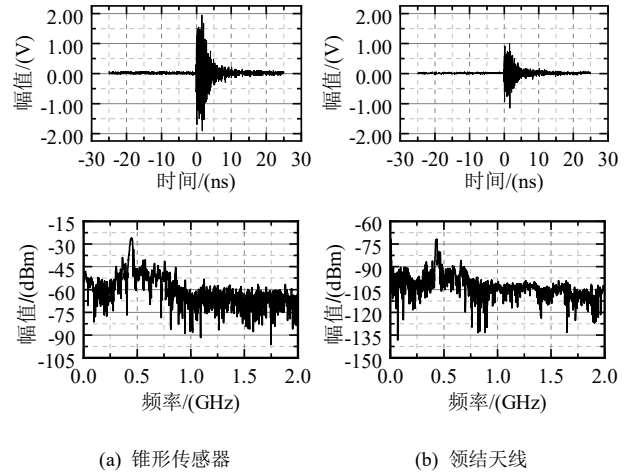


(a) 油箱接缝锥形传感器 (b) 外置式领结天线

图 26 油中尖端缺陷放电传感器信号强度对比

Fig. 26 Signal strength comparison of discharge sensor with tip defect in oil

接缝式锥形传感器与外置式领结天线针对于悬浮放电的测试结果见图 27，锥形传感器信号幅值为 1 980 mV，领结天线信号幅值为 990 mV。两种传感器信号的能量都主要集中在 300~900 MHz 的范围内。

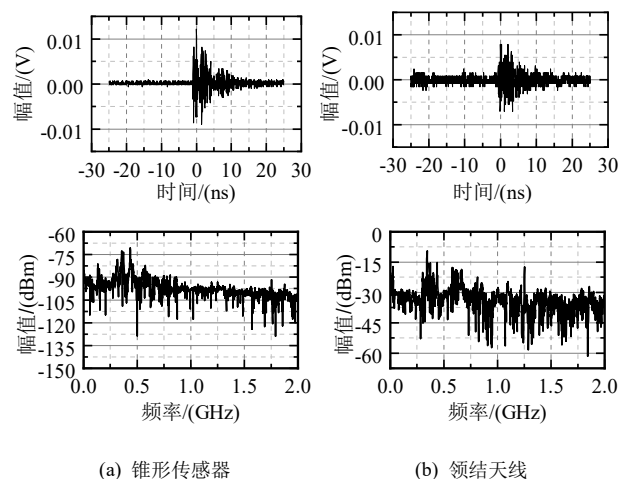


(a) 锥形传感器 (b) 领结天线

图 27 油中悬浮缺陷放电传感器信号强度对比

Fig. 27 Signal strength comparison of discharge sensor with suspended defect in oil

接缝式锥形传感器与外置式领结天线针对于沿面放电的测试结果见图 28，锥形传感器信号幅值为 19.4 mV，领结天线信号幅值为 8.4 mV。两种传感器信号的能量都主要集中在 300~800 MHz 的范围内。



(a) 锥形传感器 (b) 领结天线

图 28 油中沿面缺陷放电传感器信号强度对比

Fig. 28 Signal strength comparison of discharge sensor with surface defects in oil

接缝式锥形传感器与外置式领结天线针对于

尖端放电的测试结果见图 29, 锥形传感器信号幅值为 26.8 mV, 领结天线信号幅值为 7.4 mV。两种传感器信号的能量都主要集中在 400~700 MHz 的范围内, 相比而言, 接缝式传感器的信号能量更为集中。

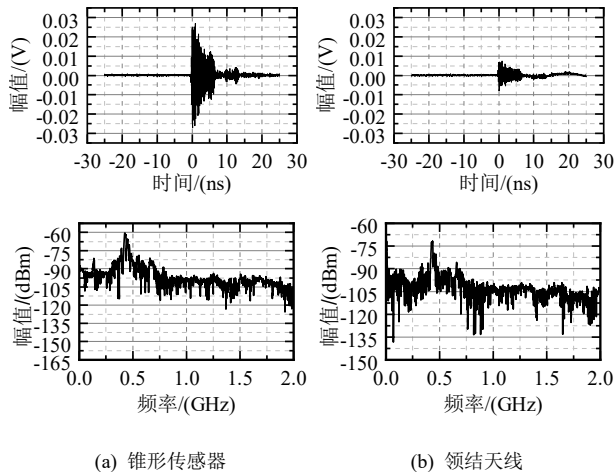


图 29 油中气泡缺陷放电传感器信号强度对比

Fig. 29 Signal strength comparison of discharge sensor with bubble defect in oil

## 4 结论

文中主要研究了变压器局部放电电磁波在油箱法兰缝隙处的传播特性, 并在此基础上设计了油箱接缝式锥形传感器, 在模拟油箱局部放电实验平台上对设计的接缝式传感器进行了实测, 证明了在油箱接缝处检测局部放电的可行性, 并检验了接缝式传感器的灵敏度, 取得的研究成果主要有:

1)通过对局部放电信号在油箱缝隙中的传播特性进行仿真以及实验分析, 仿真结果显示缝隙中限位方钢处信号的幅值为缝隙外部的 3.89 倍; 实验结果显示内部信号为外部的 2.42 倍。局部放电电磁波信号在缝隙中的幅值要远大于在油箱外部的幅值。

2)通过对油中典型放电缺陷电磁波信号在缝隙处频谱特性的仿真分析, 明确了接缝式传感器需满足的性能要求, 在此基础上设计了一种满足检测要求的锥形传感器。并对传感器的馈线形状尺寸、馈电结构进行了优化设计, 增设了背腔结构, 有效的提高了传感器的性能。

3)对接缝式的锥形传感器进行了实际测试, 并与领结天线对比, 实测结果表明: 所研制的油箱接缝式传感器可有效的检测出变压器油箱内部局部放电产生的特高频信号, 接缝式传感器的检测灵敏度要高于外置式领结天线的检测灵敏度。

## 参考文献:

- [1] TENBOHLEN S, JAGERS J, VAHIDI F. Standardized survey of transformer reliability: On behalf of CIGRE WG A2.37[C]//2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 593-596.
- [2] MARTIN D, WATSON N R. Statistical analysis of Australian and New Zealand power transformer catastrophic fires[C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis. Perth, Australia: IEEE, 2018: 331-335.
- [3] 宋平, 陆启宇, 张琪祁, 等. 变压器特高频、超声侵入式 PD 联合检测技术[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 67-71.  
SONG Ping, LU Qiyu, ZHANG Qiqi, et al. Combined intrusive PD detection technology with UHF and AE methods for transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 67-71.
- [4] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于迈克尔逊光纤干涉的变压器局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 8016-8024.  
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in power transformer based on the michelson optical fiber interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 8016-8024.
- [5] 马国明, 周宏扬, 刘云鹏, 等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1768-1780.  
MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Yunpeng, et al. Optical fiber ultrasonic detection technology and new multiplexing method for partial discharge of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1768-1780.
- [6] ZHENG Xincan, CAO Haijun, TANG Ju, et al. Application of sleeve monopole antenna for partial discharge detection in transformer[C]//2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. New Orleans, USA:

- IEEE, 2010: 293-296.
- [7] JUDD M D, FARISH O, PEARSON J S, et al. Dielectric Windows for UHF partial discharge detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 953-958.
- [8] TANG J, ZHOU J, ZHANG X, et al. A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber[J]. Energies, 2012, 5(5): 1490-1502.
- [9] SAMIMI M H, ILKHECHI H D. Survey of different sensors employed for the power transformer monitoring[J]. IET Science Measurement & Technology, 2020, 14(1): 1-8.
- [10] 欧阳旭东, 柯春俊, 杨 贤, 等. 变压器局部放电 UHF 传感器安装方式对检测灵敏度的影响理论分析[J]. 变压器, 2014, 51(5): 55-58.
- OUYANG Xudong, KE Chunjun, YANG Xian, et al. Theoretical analysis of impact to detection sensitivity for installation mode of UHF sensors in transformer PD test[J]. Transformer, 2014, 51(5): 55-58.
- [11] SIEGEL M, BELTLE M, TENBOHLEN S, et al. Application of UHF sensors for PD measurement at power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 331-339.
- [12] ROBLES G, ALBARRACIN R, MARTINEZ-TARIFA J M. Shielding effect of power transformers tanks in the ultra-high-frequency detection of partial discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 678-684.
- [13] 杜劲超. 真型变压器局部放电超高频信号传播特性与仿真建模研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- DU Jinchao. Research on propagation characteristics and simulation modeling of UHF signal of partial discharge in real transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [14] 王 鹏. 换流变压器局部放电超高频传播特性及监测传感器研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- WANG Peng. Research on UHF propagation characteristics and monitoring sensor of partial discharge in converter transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [15] UMEMOTO T, TENBOHLEN S. Validation of simulated UHF electromagnetic wave propagation in power transformers by time and frequency domain measurements[C]//2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Athens, Greece: IEEE, 2018: 1-4.
- [16] 赵 煦, 孟永鹏, 成永红, 等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 6-11.
- ZHAO Xu, MENG Yongpeng, CHENG Yonghong, et al. Simulation analysis of effects of transformer windings on propagation characteristics of partial discharge electromagnetic waves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(4): 6-11.
- [17] 马小光, 吕静志, 张 弛, 等. 局部放电特高频电磁波信号在变压器内外部传播特性的仿真研究[J]. 河北电力技术, 2018, 37(6): 15-18.
- MA Xiaoguang, LV Jingzhi, ZHANG Chi, et al. Simulation study on propagation characteristics of partial discharge UHF electromagnetic wave signal inside and outside transformer[J]. Hebei Electric Power, 2018, 37(6): 15-18.
- [18] ZANJANI M, AKBARI A, MIRZAEI H R, et al. Investigating partial discharge UHF electromagnetic waves propagation in transformers using FDTD technique and 3D simulation[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 497-500.
- [19] TANG Zhiguo, LI Chengrong, WANG Wei, et al. The propagation characteristics of electromagnetic wave generated from partial discharges in power transformer by FDTD simulation[C]//2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Vancouver, Canada: IEEE, 2007: 200-203.
- [20] OKAMOTO T, H. Uehara, partial discharge current measurements with small discharge Gaps over polyimide film[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 3(1): 158-164.
- [21] 张 强. X 射线激励下 GIS 中典型绝缘缺陷局部放电特性和机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- ZHANG Qiang. Research on characteristics and mechanism of partial discharge of typical insulation defects in GIS under X-ray excitation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [22] High-voltage test techniques: partial discharge measurements: IEC 60270: 2000[S]. Geneva: IEC, 2000.
- 曾行毅(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电

---

力设备管理工作。

术(通信作者)(E-mail: [3202600338@qq.com](mailto:3202600338@qq.com))。

赵 岩(1999—), 男, 硕士, 主要研究高电压与绝缘技