

DOI: 10.7667/PSPC152031

基于多频超声波技术的变压器油参数检测方法

饶锐¹, 程乐峰², 宋浩永¹, 陈于晴¹, 李正佳², 余涛²

(1. 广州供电局有限公司电力试验研究院, 广东 广州 510420; 2. 苏州华天国科电力科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要: 为准确检测变压器油状态, 针对变压器油参数, 给出基于多频超声波检测技术的变压器油检测方法。开发相应的硬件检测装置和上位机分析软件。硬件部分可利用多频超声波技术, 在 1 s 内, 将大量不同频率的超声波新信号聚集在一个扫描测量频率, 进行数以百计的扫描, 从而在很短的时间内完成变压器状态诊断。给出了系统的设计原理和主功能单元设计, 主功能单元包括发射部分和接收部分。其次, 阐述了多元统计的计算原理。基于此, 上位机软件可对携带有变压器油参数信息的超声波参数进行统计和分析, 以提取其特征量, 进一步建立起变压器油运行状态与超声波特征量的关联, 进而判断变压器的运行状态。实验检测表明该系统可在线实时检测微水含量、击穿电压(BDV)、活性水等变压器油参数, 解决了传统检测装置检测步骤繁琐、不能在线检测等问题, 提高检测灵敏性, 降低检测成本。

关键词: 多频超声波技术; 多元统计分析; 上位机软件; 变压器; 油样本; 数据库

Research on detection method of transformer oil parameters based on multi-frequency ultrasound technique

RAO Rui¹, CHENG Lefeng², SONG Haoyong¹, CHEN Yuqing¹, LI Zhengjia², YU Tao²

(1. Electric Power Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510420, China;

2. Suzhou Huatian Power Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

Abstract: The multi-frequency ultrasound technique for transformer oil parameter detection is given. The corresponding hardware detector and upper system software are designed and developed. Based on the formulated multi-frequency ultrasound detection technique, a large number of ultrasound signals with different frequencies could be gathered in a scanned monitoring frequency in a second by the hardware part, then the state diagnosis of transformer is finished via hundreds of scannings in a short time. The design principle of system and main functional units are given, and the latter mainly includes the transmitting part and receiving part. Next, the multivariate statistical analysis algorithm is elaborated, and based on which, the ultrasonic parameters that contain the operating information of transformers are made statistics and analyzed by the upper software, to get the ultrasound characteristic values, between which and ten situations of transformer, further, relationship is built, so as to judge the operating situation of transformers. The experimental detection shows that the developed system can detect the transformer oil parameters such as the water content, breakdown voltage (BDV) and active water online and in real time. Thus the proposed transformer oil detection method based on multi-frequency technique solves the problems of cumbersome detection steps and failed online testing and has advantages of sensitive detection and lower cost, when it is compared with the traditional detection systems.

Key words: multi-frequency ultrasonic technique; multivariate statistical analysis; upper PC software; transformer; oil sample; database

0 引言

变压器是电力系统的重要设备, 对其运行状态进行准确的评估, 对故障进行正确的诊断, 关系到

整个电网的运行安全。状态评估是对变压器的运行状态及其他信息进行记录、分类和评估, 为设备检修提供决策依据^[1-3]。对电力变压器状态评估检测技术的研究可有效地了解和监视设备的运行状况, 并提供早期的故障报警, 保障变压器的安全运行^[4]。

目前应用于变压器检测的技术主要是油色谱分

基金项目: 中国南方电网科技项目 (GZGD20150301240091)

析^[5-6]、红外测温^[7-8]和局部放电在线检测^[9-10]等技术。其中, 文献[11]研究了绝缘介质弛豫响应与油纸绝缘时域极化谱特征量的内在关系, 分析出电路参数仿真变化对应的恢复电压特征量变化规律, 为运用恢复电压测试技术无损诊断变压器绝缘状态奠定了理论基础。文献[12]提出一种基于油中金属分析方法的油浸式变压器放电性故障定位方法, 为变压器状态检修的实现提供了新的技术支撑。文献[13]则应用光声光谱技术进行油浸式电气设备的故障气体检测, 可有效检测油浸式变压器设备油中溶解气体含量。文献[14]针对特高频法监测变压器内部局部放电, 设计了一种新型变压器局部放电特高频传感器, 即 Goubau 天线, 通过研究阻抗匹配线圈对 Goubau 天线驻波比的影响, 并仿真传感器安装时手孔升高座对传感器驻波比的影响, 表明天线频域相应能够分辨不同的局部放电类型, 适用于变压器局部放电特高频信号监测。

油色谱分析技术虽然可以很好的反映变压器的内部故障, 但是利用气相色谱法检测油中溶解气体^[5-6,9], 从取油样→油气分离→色谱分析的全过程来看, 存在着环节多、操作手续繁琐、试验周期长等弊病, 当然也就不可避免地引进较大的试验误差。对于发展较快的故障检测则感到不够及时, 难以充分发挥其作用。

文献[15]针对变压器油中溶解气体浓度预测中存在的输入变量选择结果受噪声影响的问题, 提出了改进的互信息变量选择和支持向量回归机的油中溶解气体浓度预测方法, 实验结果表明改进的标准化信息的输入变量选择结果吻合油劣化热动力学研究结果, 具有较优的预测精度和泛化能力。

文献[16]提出了一种基于重构贡献和灰关联熵结合的变压器故障诊断方法, 结果表明该方法具有良好的故障识别能力, 提高了故障诊断的准确性。

红外测温技术对变压器检测具有非接触式测量, 测量范围广, 测温速度快等优点^[17], 但它易受环境因素影响较大, 对于光亮或者抛光的金属表面测温读数影响较大, 只能测量变压器外部温度, 不能测量变压器内部和存在障碍物时的温度, 而且温度只是变压器其中的一个参数, 不能根据其温度而准确反映变压器的运行状态。

局部放电在线检测技术^[18]虽然能对变压器进行故障定位, 但由于局放信号很弱, 现场的干扰性很强, 有时干扰信号甚至比局放信号强 2~3 个数量级, 不能准确识别局放信号和有效抑制干扰, 测量出来的结果具有较大的误差, 这是局部放电在线检测技术一个较大的局限性。

目前, 多频超声波检测手段和技术在国内还没有开展这方面的研究, 相关资料和成果也相对较少。因此, 开展智能多频超声波变压器检测技术研究与应用, 可为变压器的在线检测提供新的思路, 具有十分重要的现实意义。

基于此, 依靠多频超声波检测技术, 本文提出一种新的变压器检测方法, 利用多频超声波技术来测量变压器油参数, 并准确反映变压器的运行状态。

1 多频超声波检测的思想

对变压器油的多频超声波检测技术的思想可从“人体全血液分析方法”中得到灵感, 如图 1 所示。根据图 1, 可将变压器油分析可看作对变压器的“全血液分析”。变压器在实际运行中, 其内部环境处于一个急速的动态变化过程, 利用多频超声波检测技术在变压器内部急速的动态变化环境中的检测原理如图 2 所示。

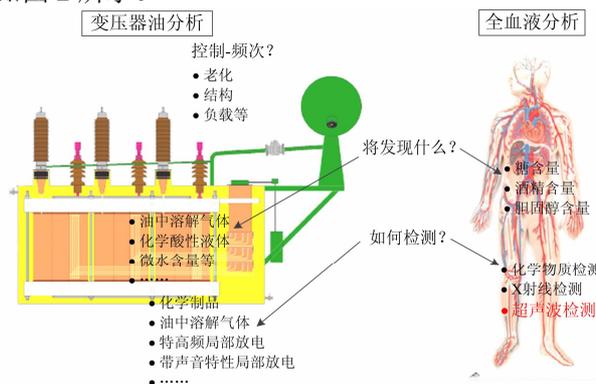


图 1 变压器油超声波分析思想来源

Fig. 1 Idea origin of transformer oil ultrasonic analysis

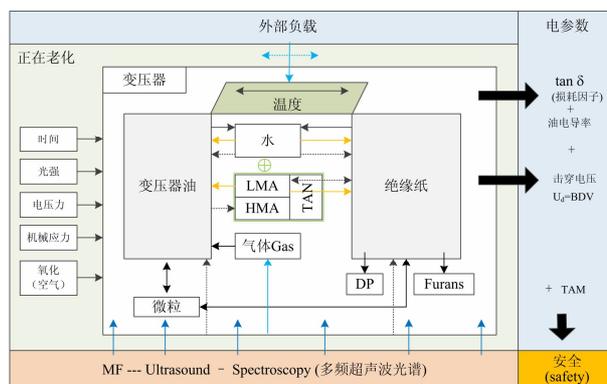


图 2 多频超声波光谱检测变压器内部动态环境示意图

Fig. 2 Detection principle of transformer inner dynamic environment by the multi-frequency ultrasonic spectroscopy

图 2 中, LMA 为 Low-molecular acids, 即低分子量酸类物质, 相应 HMA 为高分子量酸类物质。基于图 2, 多频超声波检测方法的原理在于利用多

频超声波光谱不断扫描变压器内部动态环境，其新颖性在于产生数目非常大的不同特定频率的超声波，针对变压器油就相关的参数数据进行测量，几百个超声参数可以在 1 s 内聚集在一个测量扫描频率，数以百计的扫描，可在 1 s 内进行。这些不同频率的超声波信号在分子级别“加载”了变压器油内部的物质状态信息，通过对这些信息进行分析可以得到所需的油状态参数，从而准确反映变压器的运行状态。

2 系统设计

2.1 系统原理

超声波在液体中的通过速度不是一个常数，而是随频率有改变。多频超声光谱(MFUS)通过为流体实时提供一束超声参数，得到声学频谱。利用多频超声波检测技术，几百个超声参数可以在 1 s 内聚集在一个测量扫描频率，数以百计的扫描，可在 1 s 内进行。这些超声参数带有关于变压器油中的不同物质的具体特点的信息。对大量的试验数据进行分析，得到多种变压器油参数包括微水分含量、击穿电压、油介损等；并开发基于多元统计分析技术、人工神经网络的数据分析软件，建立一个各种类型油样本的数据库。通过一系列智能算法将这些特征值(超声波参数)和油样本参数建立关联。对变压器油参数的分析推断变压器真实的运行状态。

如图 3 所示，多频超声波变压器检测装置硬件系统主要包括：超声波发射接收控制单元、多频超声波传感器和数据分析软件。

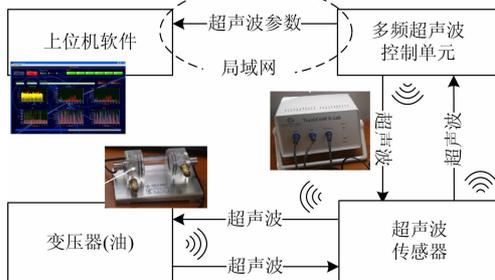


图 3 多频超声波变压器检测装置原理结构图

Fig. 3 Principle structure diagram of multi-frequency ultrasonic transformer detection device

在图 3 中，超声波发射接收控制单元上安装有电源接口、电源开关、Internet 网络接口、超声波信号输出接口及信号接收接口。

超声波发射接收控制单元内设有多个多频超声波发生装置，多频超声波发生装置内部连接至超声波发射接收控制单元的超声波信号输出接口，输出接口

经导线连接到多频超声波传感器，多频传感器的输出信号经导线连接至超声波发射接收控制单元的超声波信号接收接口，超声波信号接收接口将信号传输至超声波发射接收控制单元的信号处理电路，基于 DSP 技术的控制电路可准确地完成超声波原始信号到振幅、相位以及超声波速度等超声波参数的计算。然后通过网络将超声波参数传输给基于多元统计分析算法的上位机软件。在上位机中，通过操控该软件从超声波参数中提取超声波特征量，并通过一系列智能算法计算出变压器油的微水含量、击穿电压、活性水、介质损耗、体积电阻率、油界面张力等参数，将这些变压器油参数与数据库中的数据进行对比，从而判断变压器的运行状态或检测变压器的故障。

2.2 主功能单元设计

2.2.1 发射部分设计

如图 4 所示为发射部分设计示意图，该部分包括功率控制模块、发射控制模块、频率控制模块及发射驱动模块。功率控制模块根据变压器的类型和变压器容量的大小选择合适的功率信号指令，送发射控制模块处理。发射控制模块根据频率控制模块和功率控制模块的输出信号，产生换能器发射需要的载波脉冲信号，送到发射驱动模块，频率控制模块决定载波频率，功率控制决定脉冲宽度和幅度，从而达到控制换能器发射功率的作用。发射驱动模块将发射控制模块送来的脉冲信号经升压处理后产生大功率的输出信号，推动换能器发射合适的多频超声波。

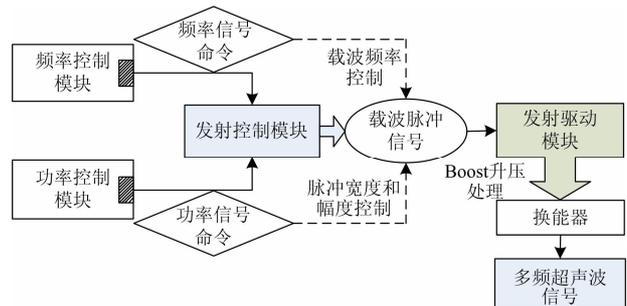


图 4 发射部分设计结构图

Fig. 4 Design structure diagram of transmitting part

在实际应用中，变压器的容量往往是不一样的，为了解决这个问题，在多频超声波发射接收控制单元的发射部分，设计了频率控制模块及功率控制模块。频率控制模块可以改变发射超声波的频率，功率控制模块可以改变发射超声波的功率，这样就可以通过改变频率控制模块和功率控制模块的输出来控制多频超声波的频率范围和功率大小，使得设备

在变压器容量不同的情况下都能正常使用, 提高了产品的适用性, 降低了变压器检测的成本。

2.2.2 接收部分设计

超声波发射接收控制单元的接收部分包括: 信号放大模块、选频模块、检波器及数模转换模块(A/D 采样)。

其中, 信号放大模块将超声波传感器传输回来的信号进行放大, 然后送至选频模块, 对信号频率进行筛选。选频模块通过设置合适的频率通过范围, 从而滤除干扰信号, 得到准确的多频超声波信号模拟量。多频超声波信号模拟量经检波器传送至数模转换模块, 通过 AD 转换, 将多频超声波信号模拟量转换为数字信号传输给微处理器, 具体信号流程如图 5 所示。

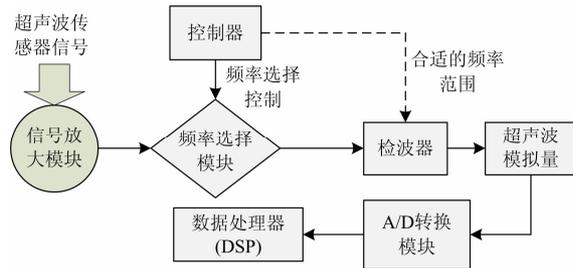


图 5 接收部分设计结构图

Fig. 5 Design structure diagram of receiving part

3 算法设计

超声检测的过程中, 描述回波的特性主要是相位、振幅和超声波的速度等参数。通过多元统计分析算法, 可以从这些参数中提取出变压器油的水分含量、击穿电压、介损、体积电阻率、油界面张力等参数, 从而判断变压器的运行状态。

该系统分析软件采用的算法是多元统计分析算法中的主分量分析算法(Principle Component Analysis, PCA), 其原理是利用过程变量间的相关性建立正常工况下的主元模型, 通过分析超声波参数, 对其进行降维处理, 提取出超声波特征值, 并建立这些特征值与油样本参数的关联^[19-24]。

3.1 主元分析模型

在构建数据矩阵时, 将超声波参数样本一行一行排列, 即每一行表示一个观测样本(物理量) x_j^* , 每一列表示一个被观测量 ξ_j^* 。考虑到不同的被观测量往往有不同的量纲, 并且不同的量纲会引起各变量取值的分散程度差异较大, 为消除此影响, 常采用变量标准化的方法^[20-21], 令

$$\xi_j = \frac{\xi_j^* - \mathbf{L}_n \mathbf{U}_j}{\sqrt{\sigma_{jj}}} \quad (1)$$

式中: \mathbf{L}_n 为所有元素为 1 的 n 维列向量; $\mathbf{U}_j = \mathbf{E}(\xi_j^*)$ 为 n 维行向量; $\sigma_{jj} = \text{Var}(\xi_j^*)$, 这时, 标准化矩阵 $\mathbf{X} = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m]$ 。对 \mathbf{X} 做主元分析, 首先需要求得 \mathbf{X} 的协方差矩阵 \mathbf{C} , 即

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i x_i^T \quad (2)$$

式中: x_i 为标准化矩阵 \mathbf{X} 的第 i 个元素; n 为元素个数; 协方差矩阵 \mathbf{C} 的 m 个特征值 λ_i 和对应的单位正交向量 p_i , 其中 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m > 0$ 。标准化矩阵 \mathbf{X} 可以分解为

$$\mathbf{X} = \hat{\mathbf{X}} + \mathbf{E} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}$ 表示 \mathbf{X} 的模型值矩阵; \mathbf{E} 为建模误差向量矩阵, 即

$$\hat{\mathbf{X}} = \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{P}}^T = \sum_{i=1}^l t_i p_i^T, \quad l < m \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = \tilde{\mathbf{T}} \tilde{\mathbf{P}}^T = \sum_{i=1}^l t_i p_i^T \quad (5)$$

式中: t_i 为得分矢量; p_i 为负荷矢量; l 为主元数目; $\hat{\mathbf{T}}$ 为主元得分矩阵; $\hat{\mathbf{P}}$ 为主元负荷矩阵; $\tilde{\mathbf{T}}$ 为残差得分矩阵; $\tilde{\mathbf{P}}$ 为残差负荷矩阵。

对于主元数目 l 的确定, 通常采用主元累计贡献率的方法, 即利用计方差贡献率(cumulative percent variance, CPV) l_{CPV} 根据如式(6)计算 l 。

$$l_{CPV} = \sum_{i=1}^l \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i > l_{CL} \quad (6)$$

式中, l_{CL} 为控制限, 一般取 $0.85l$ 。

$(\hat{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{P}})$ 是单位正交矩阵, $(\hat{\mathbf{T}}\tilde{\mathbf{T}})$ 为正交矩阵。 \mathbf{X} 被投影到两个正交的互补空间^[23,24]: 主元子空间和残差子空间。当变量间存在一定的线性相关时, 主元子空间可利用很少维数的几个变量描述过程的大部分变化的信息, 而残差子空间表示噪声部分。

3.2 统计量的确定^[21,25-26]

利用建立好的主元模型, 对新样本 x 可表示为

$$x = \hat{x} + e = \hat{\mathbf{P}}t + e = \hat{\mathbf{P}}\hat{\mathbf{P}}^T x + \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{P}}^T x \quad (7)$$

式中: \hat{x} 为样本 x 在主元子空间上的投影; e 为误差矢量, 是 x 在残差子空间的投影; 统计量 Q 也称为平方预报误差, 是样本 x 在残差子空间上投影的平方, 即

$$x_{SPE} = Q = \|e\|^2 = e^T e = x^T \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{P}}^T x \quad (8)$$

当 $Q \leq Q_\alpha$ 时, 系统运行正常; 当 $Q > Q_\alpha$ 时, 系统出现故障, 其中 Q_α 是检验水平 α 下的置信限值, 即

$$Q_\alpha = \theta_1 \left(\frac{C_\alpha h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1^2} \right)^{1/h_0} \quad (9)$$

式中： C_α 为正态分布在检验水平 α 下的临界值；

$$\theta_i = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^i \quad i=1,2,3, \quad h_0=1-2\theta_1\theta_3/3\theta_2^2。$$

4 实验检测

本文开发多频超声波变压器检测装置可输送的参数主要包括四类，分别为超声波参数，物质参数，物理化学参数和电参数等，详情如表 1 所示。

表 1 检测参数类型列表

Table 1 Detection parameter types

超声波参数	每赫兹超声波速率、每赫兹吸收量
物质参数	温度、气压、微粒等
物理化学参数	密度、粘度、界面张力、酸性(低/高分子酸性物质、TAN、NN 等)、微水含量、油中溶解气体、氧化稳定性(抑制剂含量和降解程度)、DBDS 及其降解程度、呋喃类物质、其他感兴趣物质含量(酒精类、醛类、酮类等)
电参数	直接参数：电偶极矩、油电导率/电阻率； 间接参数：介电系数、击穿电压、损耗因数(功率因数，DDF， $\tan\delta$ 等)

通过系统检测，计算得到主要检测气体的界面张力参数如表 2 所示，电偶极矩参数如表 3 所示。

表 2 界面张力参数计算表

Table 2 Interfacial tension parameters calculation results

参数类型	$\sigma_{beob.}$ dyn/cm	$\sigma_{ber.}$ dyn/cm
Hg	472	484
C ₃ H ₅ (OH) ₃	65	67
CHBr ₃	51	51
C ₆ H ₅ NH ₂	43	44
HCOOH	38	36
C ₆ H ₄ · C ₄ H ₈	34	34
C ₆ H ₅ Cl	33	32
C ₂ H ₅ J	28	31
CCl ₄	26	29
C ₆ H ₆	29	27
C ₄ H ₉ OH	24	23
CO(CH ₃) ₂	24	21
CH ₃ OH	23	19
O	13	19
N	9	13
H	1.9	1.8
He	0.11	0.19

表 3 电偶极矩计算表

Table 3 Dipolmoment parameters calculation results

参数类型	P cm ³	电偶极矩	
		$\mu \cdot 10^{18}$ e · s · E mit R	mit u
C ₆ H ₁₄	30.5	0	0
C ₂ H ₅ OH	73.5	1.70	1.66
CO(CH ₃) ₂	170.0	2.80	2.69
CH ₂ Cl ₂	68	1.59	2.60
CHCl ₃	52	1.25	1.30
C ₃ H ₇ Cl	98.5	1.92	1.94
C ₆ H ₅ CH ₃	34.7	0.37	0.38
C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂ : o-Xylol	43.3	0.52	0.54
C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂ : m-Xylol	39.3	0.36	0.33
C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂ : p-Xylol	36.7	0	0
C ₆ H ₃ (CH ₃) ₃	41.4	0	0
C ₆ H ₅ Cl	82.5	1.69	1.56
C ₆ H ₅ NO ₂	366.0	3.95	3.93
C ₆ H ₄ ClCH ₃ : o-Chlortoluol	79.5	1.35	1.41
C ₆ H ₄ ClCH ₃ : m-Chlortoluol	102.5	1.78	1.77
C ₆ H ₄ ClCH ₃ : p-Chlortoluol	115.5	1.90	1.92
C ₆ H ₅ NH ₂	79.7	1.52	1.53
C ₆ H ₄ CH ₃ NH ₂ : o-Toluidin	88.1	1.58	1.59
C ₆ H ₄ CH ₃ NH ₂ : m-Toluidin	78.9	1.44	1.43
C ₆ H ₄ CH ₃ NO ₂ : o-Nitrotoluol	326.0	3.69	3.72
C ₉ H ₇ N	137.9	2.16	2.13
C ₅ H ₅ N	138.7	2.34	2.31
C ₅ H ₁₁ N	57.4	1.20	1.19

表2为物理化学参数计算表，表3为电参数计算表，这些参数在上位机软件上进行诊断，通过对这些参数进行推理分析，得到变压器的老化曲线，从而反映变压器的老化过程，该分析推理过程的主要方法步骤如图6所示。

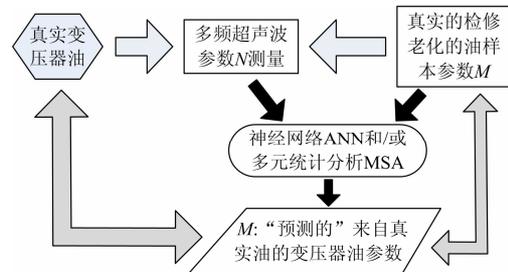


图 6 变压器测量系统主要分析方法的步骤

Fig. 6 Principal methodical procedure of transformer measurement system

超声波吸收量测量界面如图7所示，上位机软件分析界面如图8所示，上位机软件分析得到的微水含量、击穿电压和活性水等参数，如图9(a)~(c)所示。

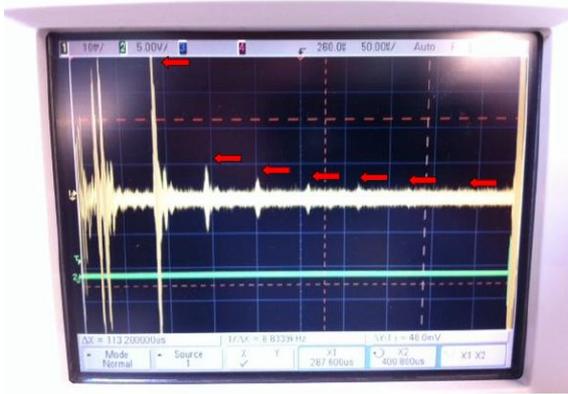


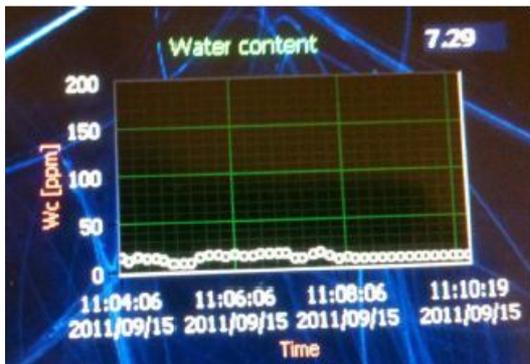
图 7 超声波吸收量测试界面

Fig. 7 Ultrasonic absorption measurement interface



图 8 上位机软件分析界面

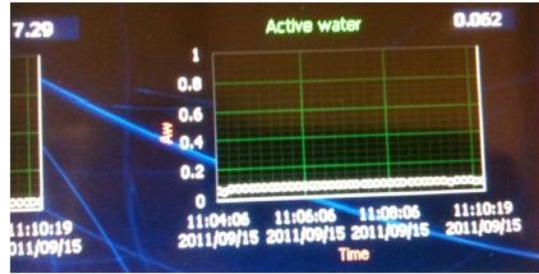
Fig. 8 Analysis interface of upper software



(a) 微水含量(water content)



(b) 击穿电压(breakdown voltage)



(c) 活性水(active water)

图 9 变压器油主要参数分析界面

Fig. 9 Transformer oil main parameters analysis interface

图 7 为超声波吸收量测试界面, 红色箭头为相应的吸收量脉冲波, 可看到在这些时刻有一个吸收脉冲; 图 8 为上位机软件分析界面, 可以看到测量信号幅值(V)随着时间(刻度为 0.02ms)的变化情况; 从图 9(a), (b)和(c)可看出当前变压器油微水含量在 10~20VVC[此处单位 1VVC=1ppm, 且 1ppm=1mg/kg=1mg/L]间, 符合 IEC 60814 标准, 在正常范围内; 击穿电压(BDV)在 30~60kV 之间, 平均值接近 50kV(测量设备绝缘电压等级为 66~220kV, BDV \geq 35 为正常), 符合 IEC 60156 标准, 在正常范围内; 活性水含量在 0.05Avv 左右。根据微水含量、击穿电压和活性水含量等参数可以判断当前变压器油处于健康状态, 无故障出现。

根据所测量的超声波参数及后台数据库, 基于多元统计分析智能算法即可对变压器动态运行环境及可能存在的故障进行有效识别, 整个检测分析流程如下图 10 所示。

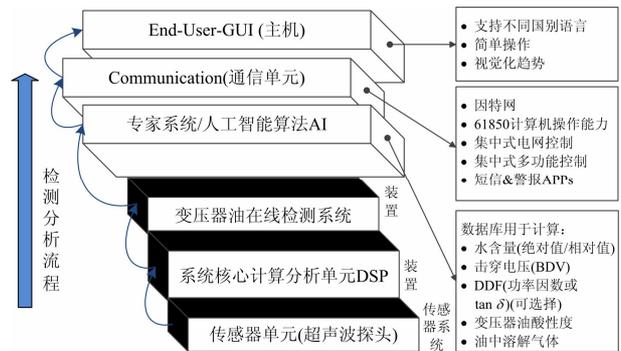


图 10 检测分析流程图

Fig. 10 Flow chart of detection and analysis

5 结论

多频超声波变压器检测装置使用多频超声波技术, 通过多频超声波控制单元和多频超声波传感器发射接收超声波。对于传输回来的超声波参数,

利用基于多元统计分析算法的上位机软件进行分析,从而得出变压器油的微水分含量、击穿电压、活性水、油介损耗等参数,最后将这些参数与数据库对比,即可实时判断变压器的运行状态。

所开发基于多频超声波技术的变压器检测系统可实现对变压器油的在线检测和故障诊断,从技术上解决了传统检测装置的易受干扰、不能连续实时检测以及检测步骤繁琐等问题,并且该系统可实现超声波频率范围及功率大小的调节,使得系统可依据变压器容量的大小发射出合适的频率和功率的超声波。这样,既可降低变压器在线检测的成本,又能更加准确地判断变压器的实时运行状态。

参考文献

[1] 安永东. 变压器超声监测器的硬件设计与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
AN Yongdong. The design and realization of the transformer ultrasound monitor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012.

[2] 赵晨光. 电力变压器的安装调试运行技术要求[J]. 黑龙江科技信息, 2004, 8(5): 214.
ZHAO Chenguang. Installation commissioning technical requirements for power transformers[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2004, 8(5): 214.

[3] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.

[4] 栗然, 刘会兰, 卢云, 等. 基于交叉熵理论的配电变压器寿命组合预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 97-103.
LI Ran, LIU Huilan, LU Yun, et al. A combination method for distribution transformer life prediction based on cross entropy theory[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 97-103.

[5] 张闽, 曾任清. 油色谱分析在电站充油设备故障分析中的应用[J]. 变压器, 2003, 40(4): 39-41.
ZHANG Min, ZENG Renqing. Application of oil chromatographic analysis in fault analysis of oil filled equipment in substation[J]. Transformer, 2003, 40(4): 39-41.

[6] 倪晋兵, 黄延庆, 徐国八. 主变压器绝缘油色谱异常原因研究[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1974-1978.
NI Jinbing, HUANG Yanqing, XU Guoba. Causal analysis of abnormal chromatograph of main transformer oil[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1974-1978.

[7] 刘健, 解辰, 蔺丽华. 基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 965-970.
LIU Jian, XIE Chen, LIN Lihua. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 965-970.

[8] 尹海晶. 基于红外测温技术的电力变压器过热故障在线监测系统的设计与开发[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
YIN Haijing. Design and development of power transformer overheating fault online monitoring system based on infrared temperature measurement technique[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.

[9] 朱超杰, 王友臣, 朱琪, 等. 新型变压器局放监测特高频传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4): 749-755.
ZHU Chaojie, WANG Youchen, ZHU Qi, et al. Study on new type of UHF sensor for partial discharge detection in transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(4): 749-755.

[10] 李剑, 王小维, 金卓睿, 等. 变压器局部放电超高频信号多尺度网络维数的提取与识别[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 159-163.
LI Jian, WANG Xiaowei, JIN Zhuorui, et al. Multi-scale grid dimension extraction and recognition of ultra-high frequency signals of transformer partial discharge[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 159-163.

[11] 黄爱东. 浅析电力变压器施工安装工程监理[J]. 广东科技, 2008, 18(18): 103-104.
HUANG Aidong. Construction and installation of power transformers project management[J]. Guangdong Science & Technology, 2008, 18(18): 103-104.

[12] 魏云冰, 王东辉, 韩立峰, 等. 一种基于 MIA 的油浸式变压器放电性故障定位新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 41-47.
WEI Yunbing, WANG Donghui, HAN Lifeng, et al. A novel method for discharging fault diagnosis and location of oil-immersed power transformers based on MIA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 41-47.

[13] 毛知新, 文劲宇. 光声光谱技术在油浸式电气设备故障气体检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 76-82.
MAO Zhixin, WEN Jinyu. Dissolved gas analysis in oil-immersed electrical equipment based on photoacoustic spectroscopy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 76-82.

[14] 邹阳, 蔡金锭. 变压器极化谱特征量与绝缘状态关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 605-614.

- ZOU Yang, CAI Jinding. Study on the relationship between polarization spectrum characteristic quantity and insulation condition of oil-paper transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 605-614.
- [15] 唐勇波, 桂卫华, 彭涛. 基于互信息变量选择的变压器油中溶解气体浓度预测[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1492-1498.
- TANG Yongbo, GUI Weihua, PENG Tao. Prediction method for dissolved gas concentration in transformer oil based on variable selection of mutual information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 1492-1498.
- [16] 唐勇波, 桂卫华, 彭涛, 等. 基于重构贡献和灰关联熵的变压器诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 132-138.
- TANG Yongbo, GUI Weihua, PENG Tao, et al. Transformer fault diagnosis method based on reconstruction-based contribution and grey relation entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 132-138.
- [17] 刘文泽. 变电站的远程网络图像监控系统设计[J]. 电站系统工程, 2003, 19(4): 53-56.
- LIU WENZE. Design of remote network image supervising system in transformer substation[J]. Power System Engineering, 2003, 19(4): 53-56.
- [18] 顾朝敏, 孙振权, 郭治锋, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘内部气隙缺陷局部放电特性[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 9-13.
- GU Chaomin, SUN Zhenquan, GUO Zhifeng, et al. Partial discharge characteristics of internal gas-gap defect in oil-paper insulation system under AC and DC composite voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 9-13.
- [19] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. 统计教育, 2007, 15(9): 4-7.
- FU Deyin. Statistical test problems of principal component analysis[J]. Statistical & Education, 2007, 15(9): 4-7.
- [20] 王学仁, 王松桂. 实用多元统计分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [21] 方开泰. 实用多元统计分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1989.
- [22] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [23] 赵立杰, 柴天佑, 王纲. 多元统计性能监视和故障诊断技术研究进展[J]. 信息与控制, 2004, 33(2): 197-201.
- ZHAO Lijie, CHAI Tianyou, WANG Gang. The progress of multivariate statistical performance monitoring and fault diagnosis[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 197-201.
- [24] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 1-7.
- WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 1-7.
- [25] 张新荣. 基于 PCA 的连续过程性能监控与故障诊断研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- ZHANG Xinrong. Researches on continuous process performance monitoring and fault diagnosis based on PCA[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [26] 李明. 基于多元统计分析的故障诊断方法及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- LI Ming. Researches on fault diagnosis method and its application based on multivariate statistics analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2006.

收稿日期: 2015-11-21; 修回日期: 2016-04-05

作者简介:

饶锐(1981-), 男, 本科, 工程师, 主要从事于电力化学监督管理工作; E-mail: raorui1210@aliyun.com

程乐峰(1990-), 男, 通讯作者, 硕士, 主要研究领域为配网自动化、电力系统运行控制等; E-mail: chenglf_scut@163.com

宋浩永(1985-), 男, 硕士, 主要从事电气化学试验及电力新技术研究工作. E-mail: 373066723@qq.com

(编辑 张爱琴)