

变压器油中溶解气体光声信号检测的干扰抑制方法

陈伟根, 罗明才, 张嵩, 王有元

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 光声光谱气体检测技术能很好地应用于变压器油中溶解气体的在线监测, 为了提高其检测信噪比, 笔者针对光声信号检测的强噪声环境, 结合小波阈值去噪和混沌检测来抑制检测过程中的强噪声干扰, 配合使用 LabVIEW 和 Simulink 构建信号检测系统提取微弱光声信号。实验结果表明该方法对被强噪声覆盖的微弱周期信号非常敏感, 能有效地抑制强噪声干扰。

关键词: 光声信号; 干扰抑制; 小波阈值去噪; 混沌检测

中图分类号: TM930.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0139-03

Restraining-interference Method for Photoacoustic Signal Detection of Dissolved Gases in Transformer Oil

CHEN Wei-gen, LUO Ming-cai, ZHANG Song, WANG You-yuan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Photoacoustic spectrum gases detecting technique can be well applied to on-line monitoring of dissolved gases in transformer oil. In order to improve the monitoring SNR, this paper combines wavelet thresholding denoising with chaotic detection to restrain strong noise interference in photoacoustic signal detecting process, and uses LabVIEW and Simulink to set up signal detection system and pick up weak photoacoustic signal. The test results show that this method is very sensitive to weak periodic signal submerged in strong noise, and can effectively restrain strong noise.

Key words: photoacoustic signal; restraining-interference; wavelet thresholding denoising; chaotic detecting

0 引言

充油电力变压器在长期运行过程中, 由于放电和过热现象的存在, 其油纸绝缘裂解会产生多种气体。分析油中溶解气体的成分和比例, 可以有效地判断变压器潜伏性故障和类型^[1]。近年来, 光声光谱气体检测技术得到了很大发展, 其具有高灵敏度、高选择性、宽动态检测范围的特点, 在变压器油中溶解气体在线监测应用中有着广阔的前景^[2]。但是由于变压器运行现场环境的影响以及检测过程中噪声的干扰, 使得微音器输出的毫伏级光声信号(对应于溶解气体的体积分数常为 10^{-6} 级)湮没在强噪声下无法辨识, 采用滤波放大、傅里叶分析等方法对检测过程中的干扰抑制没有太显著的效果, 检测信噪比仍然较低。混沌检测是一种近年来得到广泛研究的微弱信号检测方法, 利用其对噪声的强抑制能力可以将噪声干扰下的与策动力同频的微弱周期信号提取出来, 但是

通过仿真实验发现该方法具有一定局限性: 当噪声能量远大于待测信号能量时, 会让混沌检测方法失效, 其原因在于强噪声的存在使得混沌系统临界状态误相变而破坏了对噪声的强免疫特性。为此笔者在混沌检测基础上引入小波阈值去噪的方法, 把经过小波去噪后的待测信号作为混沌系统策动力的一部分引入到系统中, 利用混沌系统对噪声强免疫的特性, 有效地抑制噪声干扰从而提取出微弱信号。

笔者通过小波阈值去噪和 Duffing 混沌振子检测相结合来对气体光声信号检测过程中的强噪声干扰进行抑制, 采用 LabVIEW 和 Simulink 软件混合编程构建信号检测系统提取光声信号, 实验结果表明该方法将检测的信噪比大幅提高, 对检测过程中的噪声干扰有很好的抑制作用。

1 光声信号检测的干扰抑制方法

微音器的输出信号可视为周期信号与强噪声干扰的叠加, 其中周期信号幅值与油中溶解气体浓度

收稿日期: 2007-05-11; 修回日期: 2008-01-07

基金项目: 重庆市科委自然科学基金重点资助项目(CSCT, 2007BA3002)。

作者简介: 陈伟根(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备的在线监测、故障诊断及状态评估。

具有函数关系,频率与光源调制频率相同。

1.1 光声信号混沌检测方法

1.1.1 信号混沌检测的原理及思路

光声信号检测最大的障碍就是噪声的类型及其分布情况未知,而混沌检测对于白噪声和未知分布色噪声均具有极强的抑制能力,利用混沌振子进行光声信号检测的理论基础是其非平衡相变对同频微弱信号具有极大敏感性和对噪声具有强免疫力^[3]。目前广泛用于强噪声背景下微弱信号检测的Duffing混沌振子的状态方程(可测不同频率)如下

$$\frac{dx}{dt} = \omega y; \quad \frac{dy}{dt} = \omega [x^3 - x^5 - ky + f \cos(\omega t)] \quad (1)$$

式(1)中 f 为策动力幅值; k 为阻尼系数; $(x^3 - x^5)$ 为振子的非线性项,在外加信号一定的情况下,它决定了振子的特性,也决定了检测能够达到的精度。

当 k 值固定,随着 f/k 的增加,系统状态发生由内轨周期到混沌再到大尺度周期的改变^[4]。信号混沌检测的具体思路为:首先调节系统的策动力 f ,使系统处于从混沌状态向大尺度周期状态过渡的临界状态,得到此时的策动力 f_c (分岔值),然后加入同频率的待测信号,并调整策动力相位与其相同,由于混沌系统对小信号的敏感性,系统进入大周期状态,此时,只要继续调节策动力 f ,使得系统再次处于大周期到混沌的临界状态,得到对应策动力 f_0 ,则可求得加入待测周期信号的幅值为 $A=f_2-f_0$ 。

1.1.2 噪声对混沌系统运动状态的影响

在没有噪声干扰的情况下,系统的大尺度周期运动轨迹应该是一理想的极限环,但由于噪声的影响,该环的边界显得有些粗糙。在统计的意义下,任何能量在一定范围内的噪声都不会改变系统原有状态,仅仅会使系统的运动轨迹变得粗糙些,在理想轨迹附近摆动。但是由仿真实验可知:当噪声能量远大于待测信号能量时,系统临界状态在一定概率下会由于强噪声存在而发生误相变,其对噪声强免疫的特性遭到破坏。

1.2 小波阈值去噪方法

信号和噪声在小波域中的表现不同,它们的小波系数幅值随尺度变化的趋势也不同。信号产生的小波系数幅值较大但数目较少,而噪声对应的小波系数幅值小,且随着尺度的增加很快衰减到零,而信号系数的幅值基本不变。根据上述原理,小波阈值去噪方法可按如下步骤进行^[5]:①选择小波基函数和分解层数 N 对信号进行小波分解,得到相应的小波系数,噪声小波系数通常包含在高频部分;②选择合适的阈值函数和阈值对小波分解的高频系数进行处理,把低于阈值的小波系数设为零,高于阈值的予以保留或收缩;③最后根据小波分解的第 N 层低频系数和经过量化后的 $1 \sim N$ 层高频系数进行小波重构,还原信号。

2 基于 LabVIEW 与 Simulink 结合的光声信号检测系统及其算法

LabVIEW 和 Simulink 是当今工程领域内使用广泛的两种软件,Simulink 具有非常强大的系统仿真功能,而 LabVIEW 则能非常方便的实现与数据采集硬件设备的通讯。在 LabVIEW 程序中集成 Simulink 仿真模型,可互相弥补各自不足之处,提高编程效率,也使得虚拟仪器的系统仿真功能更为强大^[6]。

基于 LabVIEW 与 Simulink 结合的光声信号检测系统由 LabVIEW 平台、Simulation 模块、MATLAB 脚本节点、Simulink 仿真模型 4 部分组成,见图 1。在 MATLAB 脚本节点中定义小波阈值去噪算法和选择相应的小波去噪参数,并在 LabVIEW 程序框图 中进行调用。Simulation 模块通过其内置程序将 Simulink 模型转化为 LabVIEW 模型,并通过用户界面控件确定仿真相关参数以及观察混沌系统相平面图,实现了 LabVIEW 和 Simulink 程序的无缝集成;同时 Simulation 模块还提供了数据采集函数将采集卡采集到的数据传输到后续程序框图中,实现了带实时 I/O 的动态系统。

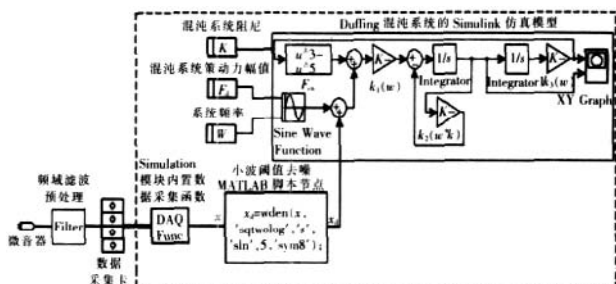


图 1 光声信号检测系统及其算法图

3 光声信号检测干扰抑制的实验分析

为了检验检测系统对不同分布噪声的抑制能力,分别对均匀噪声、高斯噪声以及未知分布实测噪声下的光声信号进行检测实验。其中均匀噪声、高斯噪声为采用 LabVIEW 软件生成的仿真噪声,而实测噪声为实际光声信号检测中所包含的真实噪声。

3.1 实验步骤与结果

将已知体积分数的变压器油中溶解特征气体 CH_4 充入到光声池,并用斩波器对入射的红外光线进行频率调制(频率 100 Hz),根据气体光声光谱原理^[2],光声池内会产生周期声压波动,在池顶端放置的麦克风接收到该声信号并输出与气体体积分数相对应的电信号(根据已知的气体浓度标定相应电信号幅值为 0.001 V)。该信号经过频域滤波预处理环节滤掉平稳噪声(包括工频噪声)后,被数据采集卡采样储存并由数据采集函数传输到信号检测系统中去。3 种不同分布噪声下的待测信号波形分别见图 2(a)、图 3(a)和图 4(a),由图可见光声信号湮没

在强噪声中而无法辨识。此时在信号检测系统中调用 MATLAB 脚本节点对待测信号进行小波阈值去噪处理(去噪参数:小波基函数为 sym8, 分解层数为 5, 阈值函数为软阈值函数, 阈值选取准则为固定阈值准则), 经小波去噪处理后的信号波形分别见图 2(b)、图 3(b) 和图 4(b), 可以看出小波阈值去噪方法在很大程度上抑制了初始的噪声干扰, 此时的噪声能量相比于初始噪声降低了数倍, 但是信号仍然存在有剩余噪声的现象, 使得信号波形出现许多毛刺甚至在某些地方发生畸变。

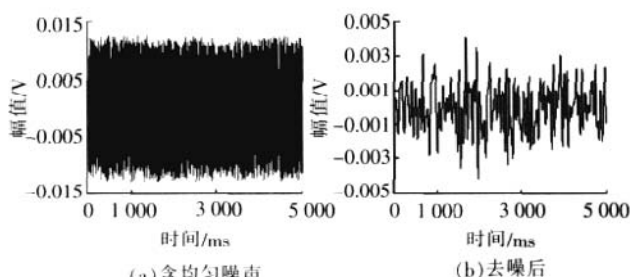


图 2 待测信号波形图与小波去噪后信号波形图

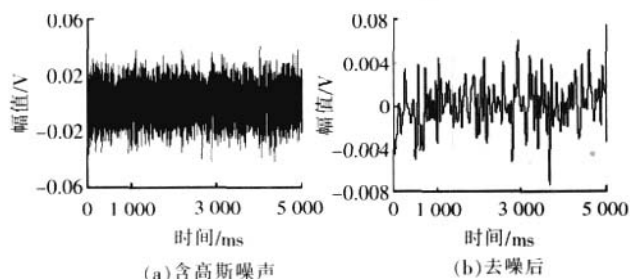


图 3 待测信号波形图与小波去噪后信号波形图

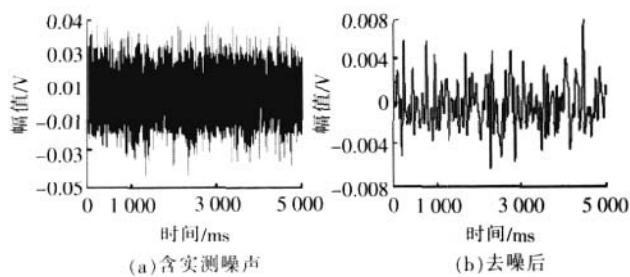


图 4 待测信号波形图与小波去噪后信号波形图

为了抑制剩余噪声的干扰, 将经过小波阈值去噪处理后的待测光声信号作为策动力的一部分引入到混沌系统仿真模型中来, 按照上文所示的混沌检测具体思路, 通过 LabVIEW 用户界面相应的输入控件调整仿真参数并通过显示控件观察系统相平面的改变从而确定出微弱光声信号的幅值。混沌系统相变前后的运动状态见图 5(a)、(b)。实验结果见表 1。

从表 1 实验结果可以看到, 检测系统对上述 3 种噪声都具有较强的抑制能力, 且检测误差都较小, 认为这样的检测结果是令人满意的。

3.2 实验过程中所遇到的问题

由上述实验过程可以看出, 经过小波阈值去噪

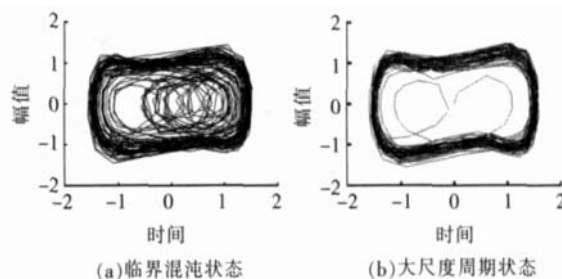


图 5 系统的临界混沌状态与加入待测信号后大尺度周期状态图

表 1 3 种不同噪声下光声信号的检测结果

噪声类型	测得信号幅值/ μ	信噪比(SNR)/dB	相对误差/%
均匀噪声	0.000 997 6	52	0.24
高斯噪声	0.001 002 6	53	0.26
实测噪声	0.001 010 7	48	1.07

注: $\text{SNR} = -10 \lg(\text{周期信号功率}/\text{噪声方差})$ 。

处理后的待测信号存在有剩余噪声的现象, 造成该现象的主要原因有以下两方面: 一是在小波系数处理阈值的选择时将一些噪声小波系数误保留下来, 使得重构后的信号仍含有一定噪声; 二是用阈值法去噪时, 重构的信号在奇异点附近会交替出现较大的波动峰值, 这些峰值并不是原始信号固有的, 而是去噪过程中引入的干扰。针对第一方面原因, 可以采用自适应的方法对小波系数阈值选取准则进行改进, 使得阈值的选取具有更大灵活性, 并能更有效地将有用信号与噪声的小波系数区分开来; 针对第二方面原因, 可以采用平移不变量去噪方法, 该方法正是在阈值去噪方法的基础上对其奇异点重构引入噪声问题的修正。

同时还有一点值得注意, 在信号混沌检测中, 关键在于临界分岔阈值 f_2 值的确定, 但是由于该分岔值没有确切公式得到其解析解, 只能通过观察策动力不同时对应系统运动状态变化的情况, 重复进行试验将 f_2 值的精度顺次向高位扩展。为了保证 f_2 值的准确性, 可以根据李雅普诺夫特性指数来判定系统运动状态, 该指数正是表征混沌系统运动状态的特征参数。由李氏指数变化的规律, 可以准确得到系统发生相变的时刻和对应的分岔阈值, 这就解决了单凭肉眼判断以及系统仿真时间选取不恰当引起的对系统运动状态误判断的问题。

4 结语

针对在变压器油中溶解气体光声光谱检测过程中光声信号湮没在强噪声下难以检测的问题, 笔者采用小波阈值去噪和混沌检测相结合的方法来抑制噪声干扰, 并采用在 LabVIEW 平台中集成 Simulink 仿真模型的方法构建信号检测系统来提取微弱光声信号。实验结果表明该方法可以在很大程度上提高信噪比且具有较高检测精度, 对检测过程中噪声干扰的抑制是行之有效地。(下转第 144 页)

宝钢变压器 900 kV(截波 990 kV)、第 2 电炉变压器 950 kV(截波 1 050 kV)。可见,即使对于过电压最严重的方式 3, GIS 中各设备和变压器上出现的雷电过电压也远远低于各自的耐压值。因此,进线与 GIS 连接处的 3 台 MOA 可以为 GIS 以及变压器提供可靠的雷电过电压保护。

图 2 是方式 3 流过 MOA 的电流波形。经计算, MOA 的热容量远大于动作时吸收的热容量。

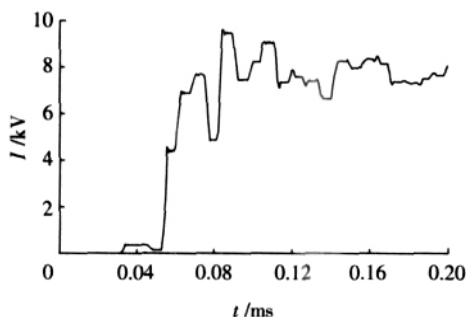


图 2 流过 MOA 的电流波形

虽然由于 MOA 的保护使得变压器上的雷电过电压不高,远低于其冲击耐受水平,但是雷电过电压频率分量丰富,可能会使变压器内部出现频率较高的谐振过电压而导致绕组绝缘事故^[6, 7]。因此,有必要对变压器端部的雷电过电压波形进行频谱分析。图 3、4 是方式 3 第 2 电炉变压器端部的雷电过电压波形及其频谱分析。

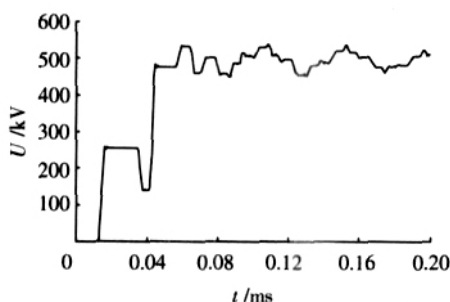


图 3 第 2 电炉变压器端部的雷电过电压波形

由图可见,威胁变压器绕组匝间绝缘的高频分量幅值不高,基本小于 60 kV,因此雷电过电压对变压器绕组匝间绝缘基本无威胁,这与变压器与 GIS

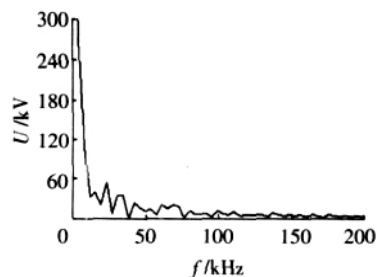


图 4 变压器端部过电压的频谱分析

之间的电缆线路有一定的关系,因为电缆的电容滤掉了一些高频分量。

3 结语

利用 ATP-EMTP 对宝能 220 kV GIS 变电站雷击进线段杆塔塔顶侵入变电站时引起的雷电过电压进行了计算。GIS 内设备及主变上的雷电过电压远低于各自的冲击耐压水平。不同的进线落雷具有随机性,但由于 GIS 的布置较对称,对设备上的雷电过电压的影响很小。运行方式 3 出线分支少,过电压较严重。宝能变电站原有的架空进线入口处的 3 台 MOA 可以为 GIS 以及变压器提供可靠的雷电过电压保护,且 MOA 热容量足够。变压器与 GIS 之间的电缆一定程度上限制了过电压的高频分量。

参考文献:

- [1] 林韶文, 黄群古, 曾益民. 多雷区输电线路及变电站防雷保护[J]. 高电压技术, 2003, 29(5): 17-19.
- [2] 刘青. 750 kV GIS 变电站中变压器的快速暂态过电压防护的研究[D]. 西安交通大学, 2005.
- [3] 谷定燮. 我国 500 kV 输变电工程过电压设计方面存在的问题和改进措施[J]. 电力建设, 2002, 23(7): 26-30.
- [4] 阮全荣, 施围. 750 kV GIL 在拉西瓦水电站应用需考虑的问题[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 66-71.
- [5] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [6] LIU Qing. Study of Protection of Transformer from Very Fast Transient Over-voltage in 750 kV GIS [J]. ICEMS '05, 2005(3): 2153-2156.
- [7] 颜湘莲, 文远芳. 变压器绕组纵绝缘连续式绕组分段并联 MOV 保护[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 11-12.

(上接第 141 页)

参考文献:

- [1] 孙才新, 陈伟根, 李俭. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 刘先勇, 周方洁, 胡劲松, 等. 光声光谱在油中气体分析中的应用前景[J]. 变压器, 2004, 41(7): 30-33.
- [3] 李月, 杨宝俊, 石要武. 色噪声背景下微弱正弦信号的混

沌检测[J]. 物理学报, 2003, 52(3): 526-530.

- [4] 朱志宇, 姜长生, 张冰, 等. 基于混沌理论的微弱信号检测方法[J]. 传感器技术, 2005(5): 65-68.
- [5] 戎舟, 高翔, 徐蕾. 小波阈值去噪及其在 labview 中实现[J]. 自动化与仪表, 2005(1): 87-90.
- [6] 张志平, 刘正平. 在 labview 中应用 matlab 进行信号处理[J]. 中国测试技术, 2004, 30(4): 77-79.