

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.011

基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法可行性分析

相晨萌¹, 高树国¹, 刘宏亮¹, 赵 军¹, 孟令明¹, 贾云飞², 张 凡²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 石家庄 050000; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 宽频振动信号包括1 Hz~20 kHz的低频振动信号和20~500 kHz的高频超声信号。近年来,利用振动信号对变压器、电容器、电抗器等电力设备进行状态检测的手段日益成熟,超声信号也可以很好地检测出电力设备中的局部放电并定位,均已有较为成熟的应用。文中提出了基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法,并使用该传感器同时测量了脉冲振动源的振动以及油纸绝缘针板电极局部放电的超声,借助仿真对超声时延进行了修正,对局部放电进行了识别,并与脉冲电流法所得结果进行了对比。结果表明,所提出的监测方法可以很好地监测到振动和超声,并实现局部放电的识别,该方法应用于电力设备状态监测是可行的。

关键词: 宽频振动; 状态监测; 振动; 超声; 复合传感器

Feasibility Analysis of Power Equipment Condition Monitoring Method Based on Broadband Vibration Sensor

XIANG Chenmeng¹, GAO Shuguo¹, LIU Hongliang¹, ZHAO Jun¹, MENG Lingming¹,
JIA Yunfei², ZHANG Fan²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050000, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Broadband vibration signal includes both low frequency vibration signal within 1 Hz-20 kHz and high frequency ultrasonic signal within 20-500 kHz. In recent years, the method of using vibration signal to detect the state of such power equipment as transformer, capacitor and reactor is more and more mature. Using ultrasonic signal to detect and locate partial discharge of power equipment has also been an expertly application. In this paper, the condition monitoring method based on broadband vibration sensor is proposed. The vibration of the pulsed vibration source and the ultrasonic of partial discharge of the oil-paper insulated needle board electrode are measured simultaneously by the sensor. The ultrasonic time delay is corrected by simulation. The partial discharge is identified and compared with the results obtained by pulse current method. The results show that the proposed monitoring method can detect vibration and ultrasonic well and achieve the identification of partial discharge. The method proposed is feasible for the condition monitoring of power equipment.

Key words: broadband vibration; condition monitoring; vibration signal; ultrasonic signal; composite sensor

0 引言

电力设备状态参量的准确、及时的测量是电力设备状态监测的基础。近年来,随着智能电网的建设,对传感器的要求不断提高,传感器趋于小型化、

便携化、多功能化发展^[1-8]。

复合传感器具有结构紧凑、功能化强、安装方便等优点,使用多种信号进行状态监测也可大大增加诊断的准确率^[9]。目前,吕亮等人设计了具有超声阵列传感器和超高频传感器的复合传感器,超声

收稿日期:2023-11-28; 修回日期:2024-01-31

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(SGHEDK00DYJS2000250)。

Project Supported by Science and Technology Program of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd.(SGHEDK00DYJS2000250).

阵列用于定位,超高频用于获取局部放电的时间基准,取得了较好的成果^[10];韩旭涛等人设计了光电复合传感器,将荧光光纤和特高频传感器结合,研制出用于GIS内部局部放电监测的新型光电复合传感器,充分发挥光测法、特高频法两种局部放电监测方法的优势,实现了GIS内部局部放电准确检测^[11];宋平等人将常规UHF天线和压电陶瓷声发射AE传感器进行一体化设计,实现了基于放油阀结构的变压器用特高频、超声波侵入式局部放电复合传感器,两传感器的结果相互佐证,确保测到的信号是来自于变压器内部局部放电,而非现场的干扰信号^[12]。

宽频振动信号包括1 Hz~20 kHz的低频振动信号和20~500 kHz的高频超声信号。

近些年来,通过振动信号分析法来检测电力设备状态受到国内外学者的重视,并在这方面做了大量的研究,尤其是变压器、电容器、电抗器、GIS^[13-19]。目前,俄罗斯已在现场使用振动信号分析在线检测法,从60多台油浸式大型变压器的检测结果来看,证实了振动信号分析在线检测法可适用于各种类型的变压器,而且有12台变压器的振动信号分析结果与吊罩检查后的实际结果几乎一致,准确率达到80%~90%,验证了振动分析法在变压器在线检测和故障诊断系统的可行性和可靠性^[20]。中国也有众多学者研究了变压器振动的机理、模型和特性,利用振动对变压器的状态进行诊断^[21]。

在变压器等电力设备内部发生局部放电时会产生电荷中和的过程,会产生较快的电流脉冲,使得局部放电发生的局部区域瞬间受热而膨胀,类似于爆炸,放电结束后,原来受热膨胀的区域恢复至原有体积,引起了介质的疏密瞬间变化,形成超声波,从局部放电点以球面波的方式向四周传播^[22]。在变压器中,局部放电通常产生在油中,但所产生的超声波会在油—固界面之间发生折反射现象,斜入射的超声波还会发生波形转换的现象,在传播过程中还会出现衰减^[23]。早在20世纪50~60年代,国内外众多学者就已开展了基于超声波检测局部放电并实现定位方面研究,取得了大量的研究成果,目前认为利用超声波信号进行变压器内部局部放电电源的定位是一种常用且行之有效的方法,可根据来波方向和时间求取局部放电源的空间位置,均是求取多个传感器相对基准传感器的时间差,建立时差方程组利用定位算法来获取局部放电具体位置^[24],近年来采用超声相控阵列进行局部放电源的定位也得到了快速的发展^[25-26]。

但目前尚没有将宽频振动传感器应用于电力

设备状态监测的研究。

文中提出使用宽频振动信号传感器进行电力设备状态监测的方法,可同时测量同一位置的低频振动信号和高频超声信号,进行故障诊断;并搭建局部放电故障模型以及脉冲振动源的实验平台,对油纸绝缘针板电极模型产生的超声和脉冲振动源产生的振动同时进行测量,并与脉冲电流法测量的局部放电结果进行对比,验证所提方法的可行性。

1 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法

为同时测量低频振动信号和高频超声信号,选取日本富士的HS-10A-11M2声发射振动复合传感器,该传感器可同时测量振动和超声信号。其中的超声传感器灵敏度约为80 dB,频率范围为50~200 kHz,包含了油中局部放电的主要频段^[27];振动信号传感器是IEPE传感器,需要恒流供电,灵敏度约为100 mV/g,频率范围为10 Hz~20 kHz,满足振动测量的需求。整个传感器重量约24 g,结构小巧,将常用的超声传感器的阻尼材料作为负荷重量引入到压电型振动传感器中,同时仅有一个接口,用于恒流电输入、振动和超声信号的叠加输出,频响曲线见图1。

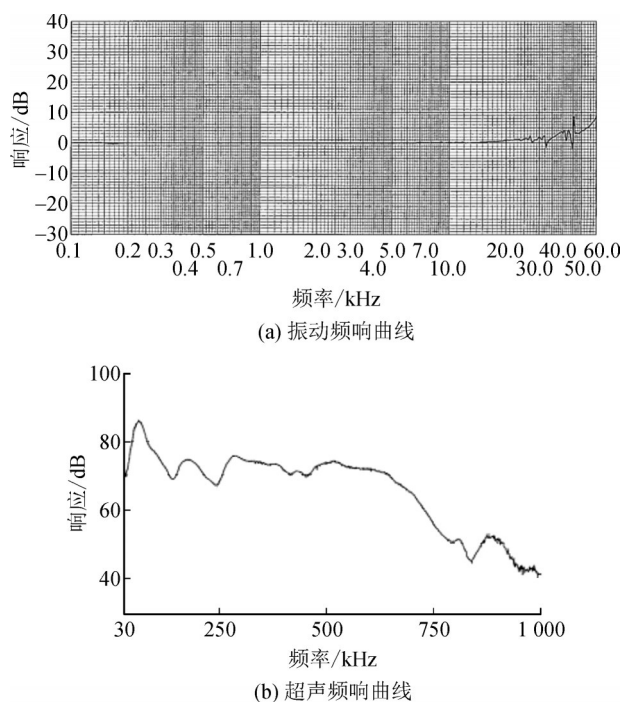


图1 宽频振动传感器频响曲线

Fig. 1 Frequency response curve of broadband vibration sensor

考虑到该传感器输出电压包括低频振动信号和高频超声信号,设计基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法的原理图见图2。

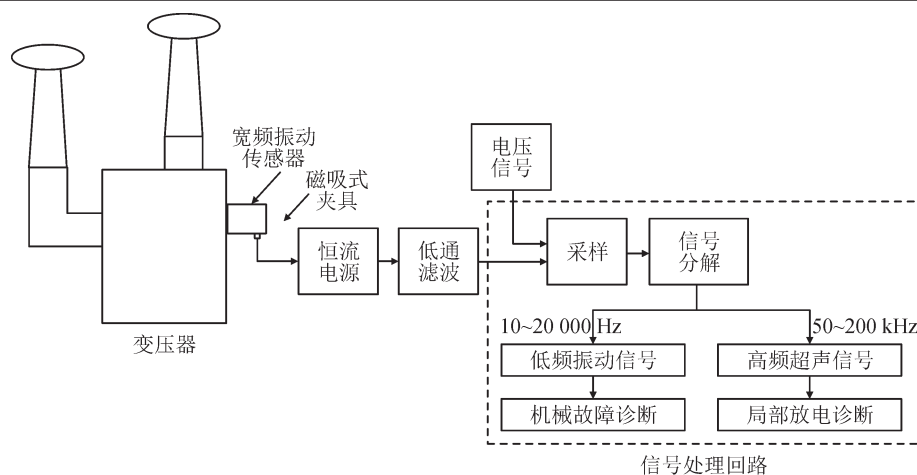


图2 基于宽频振动传感器的电力设备状态监测方法

Fig. 2 Power equipment condition monitoring method based on broadband vibration sensor

图2中,使用磁吸式夹具将宽频振动传感器固定于变压器箱体;使用恒流源为传感器供电,同时输出包含振动和超声的宽频振动信号;对该宽频振动信号进行200 kHz低通滤波,去除干扰信号;信号处理电路对宽频振动信号和此时的工频电压进行采样,并对宽频振动信号进行傅里叶分解以及重构,将其分为10 Hz~20 kHz的低频振动信号以及50~200 kHz的高频超声信号,其中低频振动信号用于机械故障诊断,高频超声信号结合此时的电压信

号用于局放诊断。

2 实验平台

针对图2所示的监测方法,设计了相应的实验平台,用于验证其方法的可行性。

搭建了油纸绝缘针板电极模型用于产生局部放电,使用脉冲振动源来产生振动信号,具体平台见图3。

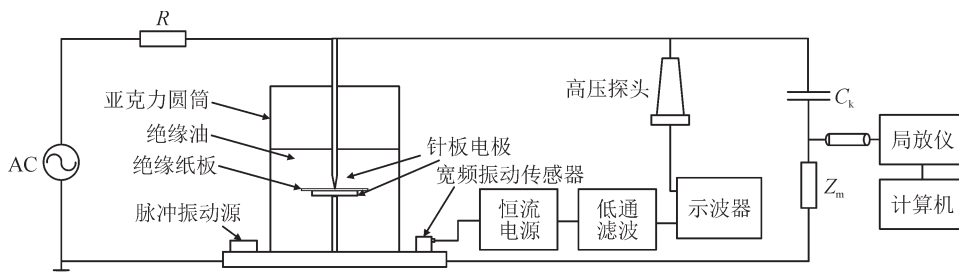


图3 局部放电和振动实验平台

Fig. 3 Partial discharge and vibration test platform

图3中,工频电源经保护电阻对亚克力圆筒顶部的针电极施加高电压,针板电极之间设置绝缘纸板,整个针板电极浸没于绝缘油中,板电极与底部金属圆盘相连并接地,因此,施加高压后,针板电极可产生局部放电;脉冲振动源放置于底部金属圆盘上,用于产生振动信号。宽频振动传感器涂抹声固耦合剂后粘贴于底部金属圆盘上,输出端依次连接恒流电源、低通滤波器(低通200 kHz,放大10倍)和示波器,示波器同时使用高压探头采集电压信号。此外,针板电极模型两端并联局部放电脉冲电流法测量仪器及设备,局部放电脉冲采用Haefely公司的DDX9121b-1局部放电仪在0.5~1.5 MHz频带范围内采集,实验之前均使用脉冲源进行标定。

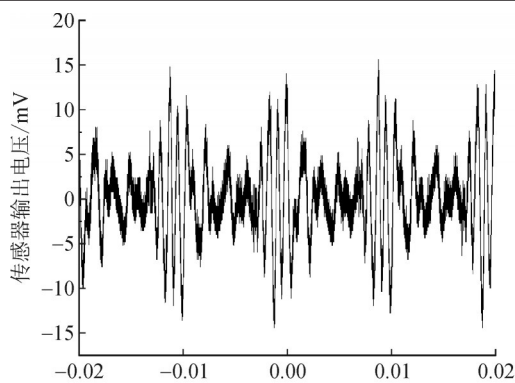
3 信号处理及分析

本节搭建如图3所示的实验平台,使用宽频振动信号传感器同时对局部放电所产生的超声信号以及脉冲振动源产生的振动信号进行测量,并与脉冲电流法所得的局部放电信息进行比对,实验验证宽频振动传感器用于电力设备状态监测的可行性。

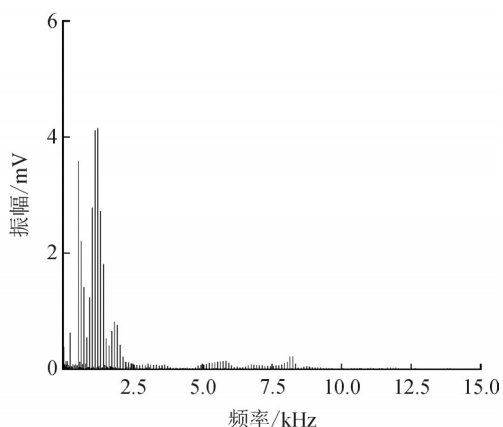
3.1 典型宽频振动信号

首先开启100 Hz脉冲振动源,仅测量振动信号,结果见图4。

由图4(a)可以明显看出,相邻两个波包之间间隔约0.01 s,频率为100 Hz,最大峰值约15 mV,考虑到振动传感器的灵敏度约为100 mV/g,后续有10倍



(a) 时域图



(b) 频域图

图4 宽频振动信号(仅100 Hz脉冲振动源)

Fig. 4 Broadband vibration signal
(100 Hz vibration source only)

放大器,其最大振动加速度约15 mg。根据图4(b)也可看出,其频带主要集中在0~2 500 Hz。

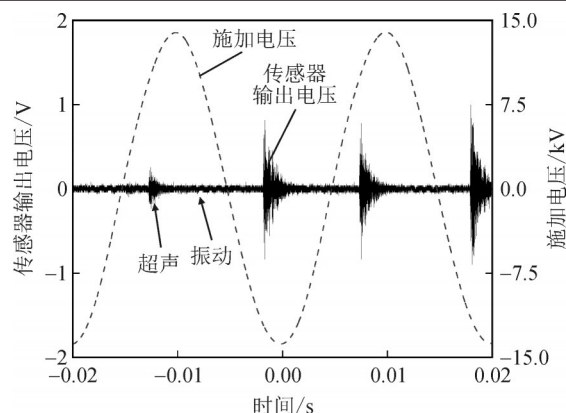
然后在开启100 Hz脉冲振动源的同时,对油纸绝缘针板电极模型施加约10 kV的工频电压,此时会产生一定的局部放电,得到宽频振动信号见图5。

由图5(a)可以看出,传感器输出电压中包含了超声的高频振荡信号,也包含了低频振动信号,对其进行傅里叶变换可得图5(b),也可看出其信号中包含了低频段的振动和高频段的超声,说明传感器、滤波电弧以及信号采集电路可以正常工作,同时采集振动和超声信号。

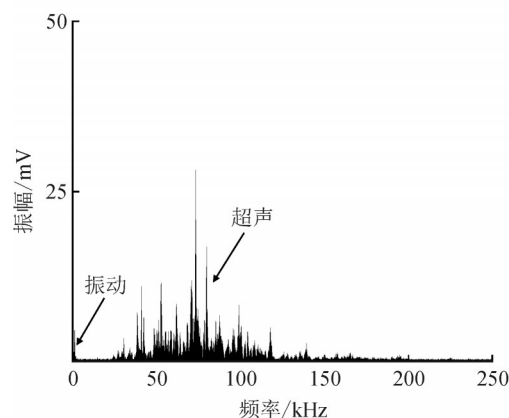
3.2 信号分离

由于图5中采集到的信号同时包含了振动信号和超声信号,为避免振动信号影响利用超声识别局部放电的准确度,在进行故障诊断之前有必要将两信号分离开来。

考虑到宽频振动传感器中振动加速度传感器的频率范围是10 Hz~20 kHz、超声传感器频率范围是50~200 kHz,借助于傅里叶变换,可将图5中的信号分解见图6。



(a) 时域图



(b) 频域图

图5 宽频振动信号(100 Hz脉冲振动源,10 kV)

Fig. 5 Broadband vibration signal(100 Hz vibration
source,10 kV)

图6中,图6(a)、(b)提取了图5中宽频振动的10~20 000 Hz频段,可以看出,其时域图和频域图均与图4相似;图6(c)、(d)提取了图5中宽频振动的50~200 kHz频段,可以很明显看出其中局部放电所产生的超声信号。说明傅里叶分解可以有效对所采集的宽频振动信号进行分离。

3.3 基于有限元仿真的超声信号时延修正

由图6(c)可以明显看出局部放电引起的超声信号,但由于传感器所放置位置与局放源有一定距离,所得到的超声信号落后于实际局部放电发生的时刻。可利用有限元仿真对时延进行修正。

根据油纸绝缘针板电极结构,建立有限元仿真模型见图7。根据局部放电发生的原理可知,发生局部放电时,气泡的震动属于欠阻尼振动,可表示为^[28]

$$f_{pd} = Ae^{-t/\tau} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式(1)中: A 为脉冲幅值; τ 为时间常数; f 为放电信号振荡频率。文中取 A 为1,时间常数 τ 为1/36 000, f 为20 kHz,声源波形见图7。

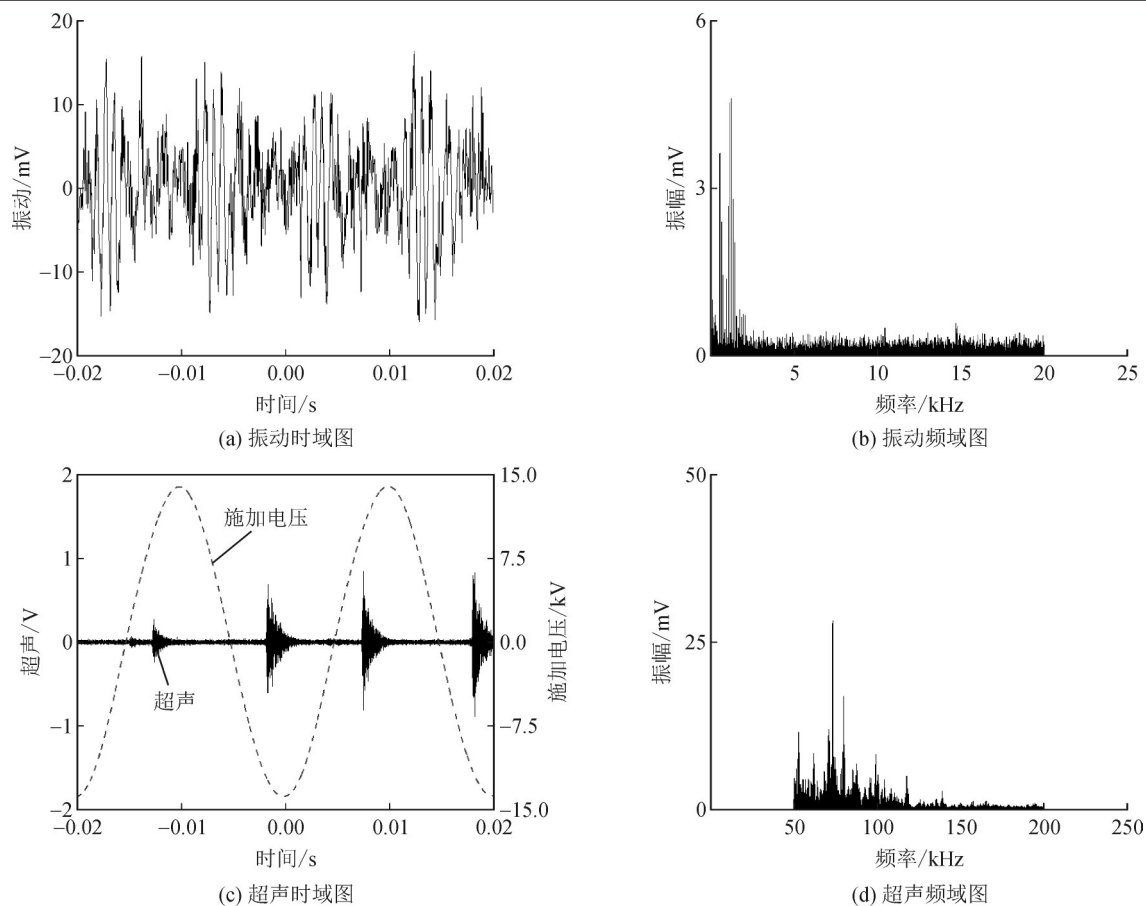


图6 宽频振动信号分离结果(100 Hz脉冲振动源, 10 kV)

Fig. 6 Broadband vibration signal separation results(100 Hz vibration source, 10 kV)

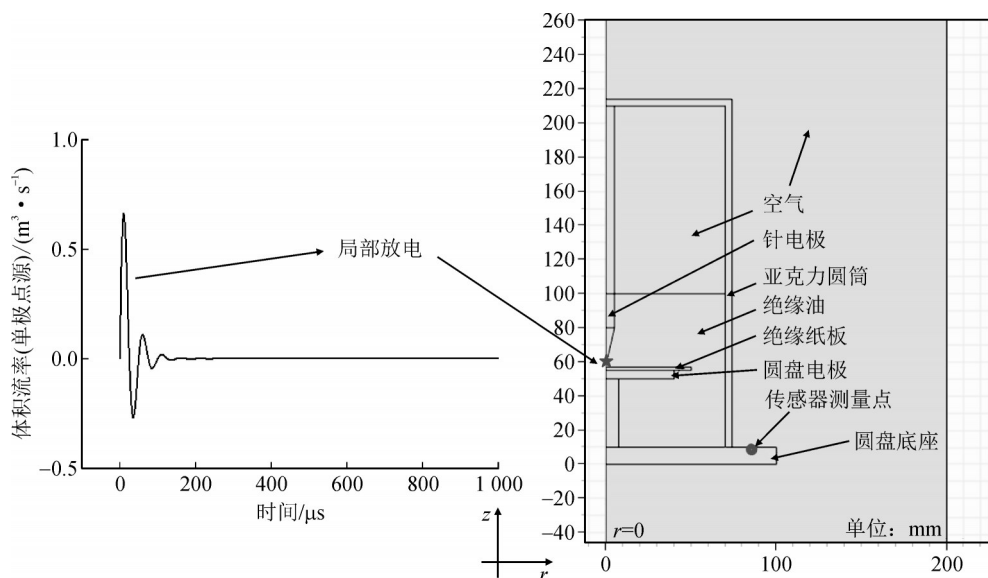


图7 超声波传播仿真模型

Fig. 7 Simulation model of ultrasonic propagation

考虑到超声信号在模型中的传播过程,在进行有限元网格剖分时,网格最大尺寸应小于金属中声速波长的 $1/10$, 约 0.02 m , 文中取最大网格尺寸为 1 mm , 满足仿真要求。

得到超声波仿真结果见图8。

由图8(a)-(d)可以看出,由局部放电源处产生的超声波在底座、亚克力圆筒之间不断发生折反射,导致虽然图8(e)中的声源衰减较快,但图8(f)中测量点处信号会有较大的波动。

对比图8(e)、(f)的结果可知,测量点所得脉冲信

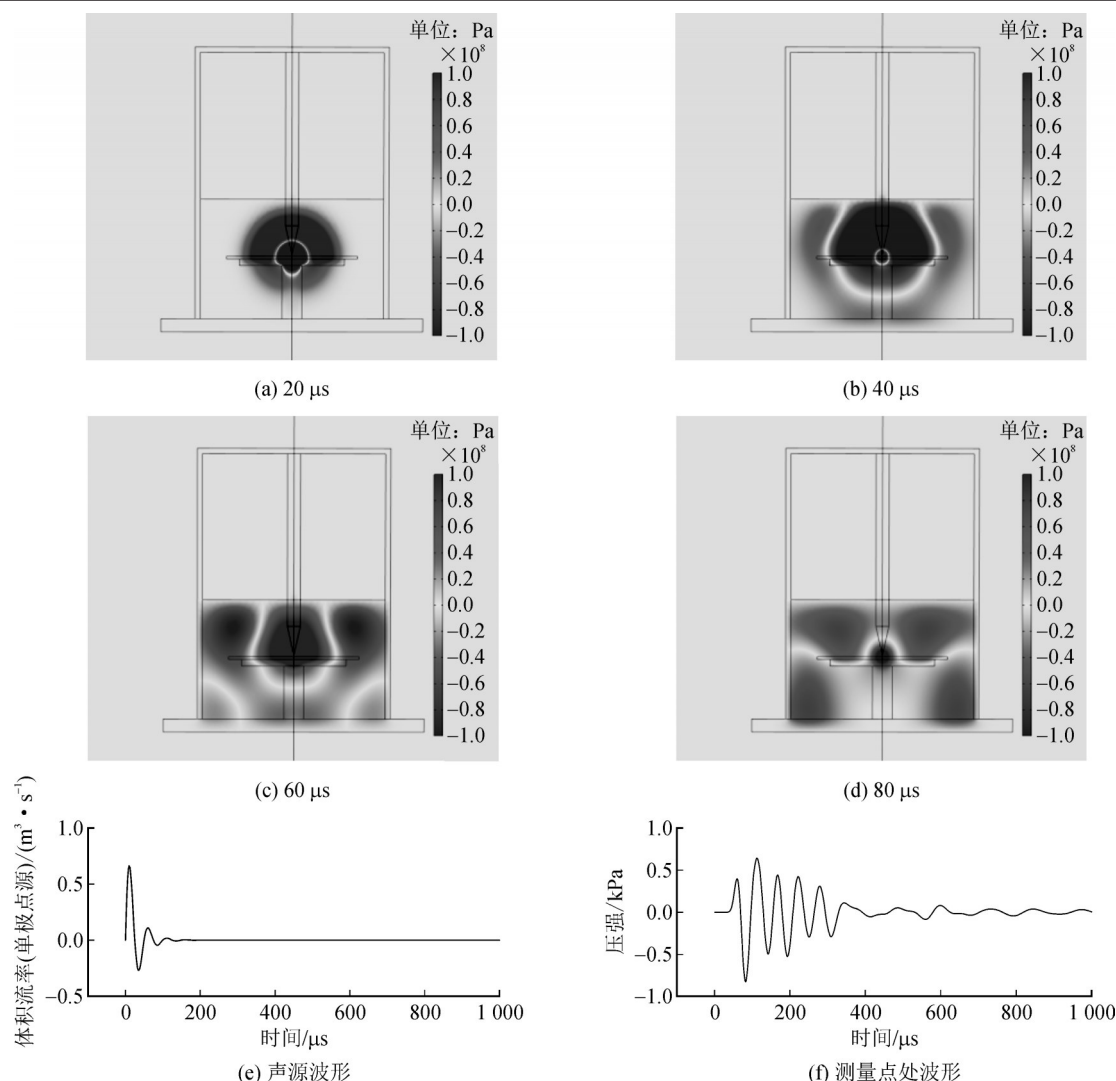


图8 超声波传播仿真结果

Fig. 8 Simulation results of ultrasonic propagation

号峰值落后于声源信号峰值约0.08 ms,远小于20 ms的工频周期。由星点处产生的局部放电存在两种路径传播至传感器测量点:经圆盘电极和圆盘底座传播、经绝缘油传播,前者主要通过金属传递超声波,波速约5 000 m/s,路径长度约140 mm,时延约0.03 ms,后者主要通过绝缘油传播,波速约1 400 m/s,路径长度约120 mm,时延约0.08 ms。在之后的局部放电识别中,可进行一定的时延修正。

3.4 基于宽频振动信号的局部放电识别

在MATLAB中编程实现对图6(b)中超声波峰值的识别,结果见图9。

图9中除了标注根据超声识别的峰值,还标注了脉冲电流法的测量结果。由于超声法监测局部放电无法识别放电的极性,为方便对比,对脉冲电流法测量的结果均取绝对值,忽略极性。

由图9可以看出,超声信号中由局部放电引起的峰值均已被识别,并用圆点标注。相比于星点所

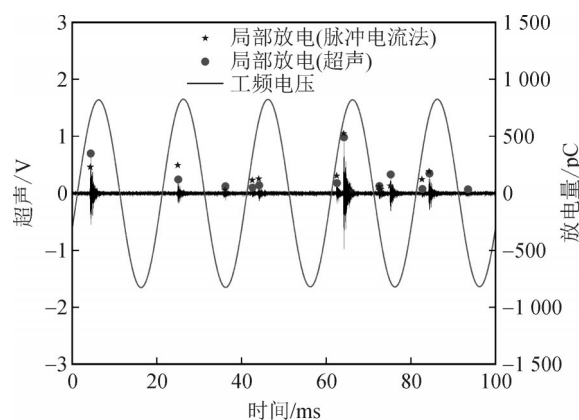


图9 超声波峰值识别

Fig. 9 Ultrasonic peak recognition

代表的脉冲电流法测量结果(可认为是准确值),超声法测量结果均落后约0.1 ms,与仿真值接近。

图9中超声波峰值虽然与局部放电量不能很好地相对应,但较大放电量趋于产生较大的超声波。

图9中,当相邻两次局部放电的时间间隔较短

时(通常前者放电量较大),后者所产生的超声信号会被前者所淹没,导致通过超声只能识别为一次局部放电,这也是超声法测量局部放电的一个缺点。

3.5 基于宽频振动信号的油纸绝缘针板电极 PRPD 图谱

同时施加 100 Hz 脉冲振动源以及高电压,采样率为 500 kHz,采集时长为 10 s,通过宽频振动法和脉冲电流法可以得到结果见图 10、11。

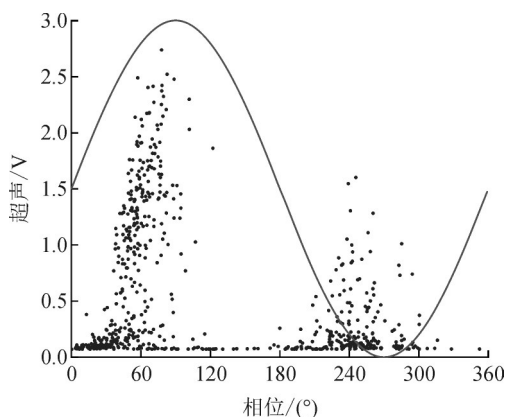


图 10 油纸绝缘针板电极 PRPD 图谱(宽频振动法)

Fig. 10 PRPD pattern of oil-paper insulated needle-plate electrode(broadband vibration method)

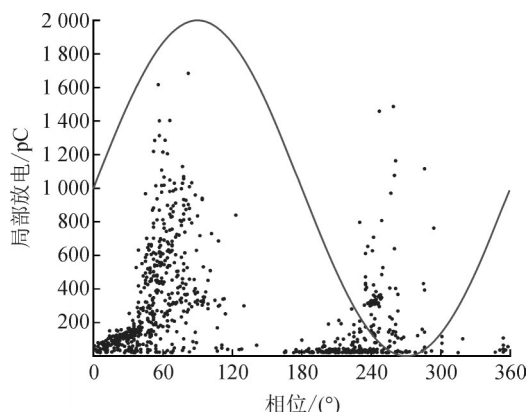


图 11 油纸绝缘针板电极 PRPD 图谱(脉冲电流法)

Fig. 11 PRPD pattern of oil-paper insulated needle-plate electrode(pulse current method)

对比图 10、11 可知,由于宽频振动法的灵敏度差于脉冲电流法,图 11 中一些放电量较低的局放(<50 pC)并没有被宽频振动法检测到,但宽频振动法得到的 PRPD 图谱形状与脉冲电流法测量结果相似,也符合文[29-30]中的结果。

此外,宽频振动法还测量到与图 4 相同的振动信号,说明该方法同时测量低频振动信号和高频超声信号是可行的,且高频超声信号所得 PRPD 图谱与脉冲电流法基本相符。

4 结论

文中提出了基于宽频振动传感器的电力设备

状态监测方法,并搭建了油纸绝缘针板电极模型和脉冲振动源的实验平台,实现了相同位置的低频振动信号和高频超声信号的同时测量,并根据超声进行得到了油纸绝缘针板电极的 PRPD 图谱,验证了该方法的可行性,主要结论如下:

1)使用宽频振动传感器可同时测量相同位置的低频振动信号和高频超声信号,具有结构紧凑、功能化强、安装方便等优点。

2)宽频振动传感器可应用于电力设备状态监测,可同时测量低频的振动和高频超声信号,用于机械故障和局部放电故障的诊断。

3)宽频振动法可有效检测放电量大于约 50 pC 的局部放电,放电量越大的局部放电趋于产生更大的超声波。

4)宽频振动法得到的油纸绝缘针板电极的 PRPD 图谱与脉冲电流法所得结果相符,验证了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 陈伟根,张知先,李 剑,等. 电气设备状态参量智能传感技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(s1):323-342.
CHEN Weigen, ZHANG Zhixian, LI Jian, et al. Intelligent sensing technology for power equipment state parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(s1): 323-342.
- [2] 杨 庆,孙尚鹏,司马文霞,等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术,2019,45(2): 349-367.
YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [3] 李 剑,张 劲,王 灿,等. 变电设备物联网一体化智能监测装置研究[J]. 高电压技术,2015,41(12): 3881-3887.
LI Jian, ZHANG Jin, WANG Can, et al. Research on integrated smart monitoring devices for Internet of power transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3881-3887.
- [4] STRASSER T, ANDRÉN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [5] 陈超起,张伟超,白仕光,等. 非本征光纤法—珀传感器局部放电检测研究进展[J]. 电工技术学报,2022,37(5): 1305-1320.
CHEN Qichao, ZHANG Weichao, BAI Shiguang, et al. Research progress of extrinsic fiber fabry-perot interferometer sensor in partial discharge detection[J]. Transactions of

- China Electrotechnical Society, 2022, 37(5):1305-1320.
- [6] 蒋超,徐妍,王江彬,等.单局放传感器电缆局部放电源点定位方法研究[J].电子设计工程,2022,30(2):24-27.
JIANG Chao, XU Yan, WANG Jiangbin, et al. Research on localization method of cable partial discharged point by single partial discharged sensor[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(2):24-27.
- [7] 辛明勇,徐长宝,田兵,等.基于阵列式磁传感器的电力设备接地网定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(8):95-101.
XIN Mingyong, XU Changbao, TIAN Bing, et al. Power equipment grounding grid location method based on array magnetic sensor[J]. Smart Power, 2022, 50(8):95-101.
- [8] 郑子超,李永红,岳凤英,等.基于电子技术的主动式传感器物联网控制系统设计[J].电子设计工程,2022,30(3):67-70.
ZHENG Zichao, LI Yonghong, YUE Fengying, et al. Design of internet of things control system for active sensor based on electronic technology[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(3):67-70.
- [9] 朱海洋,张合,马少杰.低功耗声/超声复合传感器节点设计[J].仪器仪表学报,2014,35(10):2223-2230.
ZHU Haiyang, ZHANG He, MA Shaojie. Design of low power acoustic - ultrasonic compound sensor node[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10):2223-2230.
- [10] 吕亮,辛晓虎,黄国强,等.用于油中局部放电定位且可重复布置的超声阵列与超高频复合传感器设计[J].高电压技术,2014,40(8):2328-2334.
LYU Liang, XIN Xiaohu, HUANG Guoqiang, et al. Design of re-locatable ultrasonic array and ultra high frequency combined sensor for partial discharge location in oil[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8):2328-2334.
- [11] 韩旭涛,刘泽辉,李军浩,等.基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6760-6769.
HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22):6760-6769.
- [12] 江友华,王春吉,崔昊杨,等.基于振动分析法的变压器故障诊断[J].变压器,2021,58(5):77-81.
JIANG Youhua, WANG Chunji, CUI Haoyang, et al. Transformer fault diagnosis based on vibration analysis[J]. Transformer, 2021, 58(5):77-81.
- [13] 宋平,陆启宇,张琪祁,等.变压器特高频、超声波侵入式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.
- [14] 刘会兰,许文杰,赵书涛,等.面向高压断路器故障分类的电流—振动信号类聚几何敏感特征优选方法[J].电工技术学报,2023,38(1):26-36.
LIU Huilan, XU Wenjie, ZHAO Shutao, et al. Optimization method of clustering geometric sensitive features of current vibration signals for fault classification of high voltage circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1):26-36.
- [15] 朱明,黄勤清,齐用卡,等.基于振动信号总离散频谱的高压并联电抗器健康评估方法[J].电测与仪表,2023,60(8):114-120.
ZHU Ming, HUANG Qinqing, QI Yongka, et al. Healthy assessment method of high voltage shunt reactor based on total discrete spectrum of vibration signal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8):114-120.
- [16] 何文林,郑一鸣.基于振动检测的变压器绕组机械稳定性评估[J].浙江电力,2022,41(7):57-62.
HE Wenlin, ZHENG Yiming. Evaluation on mechanical stability of transformer windings based on vibration detection[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7):57-62.
- [17] 马宏忠,徐艳,魏海增.基于MPE和改进K-means算法的分接开关机械故障诊断方法[J].高压电器,2020,56(8):198-204.
MA Hongzhong, XU Yan, WEI Haizeng. Mechanical fault diagnosis of on-load tap changer based on MPE and improved K-means algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8):198-204.
- [18] 许中平,赵峰,李守超,等.基于变压器振动信号的电能质量特征基提取方法[J].变压器,2022,59(1):34-39.
XU Zhongping, ZHAO Feng, LI Shouchao, et al. Extraction method of power quality characteristic basis based on vibration signal of transformer[J]. Transformer, 2022, 59(1):34-39.
- [19] 杜厚贤,刘昊,雷龙武,等.基于振动信号多特征值的电力变压器故障检测研究[J].电工技术学报,2023,38(1):83-94.
DU Houxian, LIU Hao, LEI Longwu, et al. Power transformer fault detection based on multi-eigenvalues of vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1):83-94.
- [20] 孙翔,何文林,詹江杨,等.电力变压器绕组变形检测与诊断技术的现状与发展[J].高电压技术,2016,42(4):1207-1220.
SUN Xiang, HE Wenlin, ZHAN Jiangyang, et al. Current status and development of test and diagnostic technique of transformer winding deformation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1207-1220.
- [21] 汲胜昌,张凡,师愉航,等.基于振动信号的电力变压

- 器机械状态诊断方法研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 257-272.
- JI Shengchang, ZHANG Fan, SHI Yuhang, et al. Review on vibration-based mechanical condition monitoring in power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 257-272.
- [22] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 29-35.
- GUO Jun, WU Guangning, ZHANG Xueqin, et al. The actuality and perspective of partial discharge detection techniques[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 29-35.
- [23] 王玉龙, 张晓虹, 李丽丽, 等. 基于超声波声压衰减效应的局部放电源定位与强度标定[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 305-314.
- WANG Yulong, ZHANG Xiaohong, LI Lili, et al. Localization and intensity calibration of partial discharge based on attenuation effect of ultrasonic sound pressure[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(9): 305-314.
- [24] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [25] XIE Qing, CHENG Shuyi, LYU Fangcheng, et al. Location of partial discharge in transformer oil using circular array of ultrasonic sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1683-1690.
- [26] 谢庆, 张建涛, 陈艺丹, 等. 基于RD-MUSIC算法的局放超声阵列检测方法仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 1-6.
- XIE Qing, ZHANG Jiantao, CHEN Yidan, et al. Simulation study on detection method of partial discharge ultrasonic array based on RD - MUSIC algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(12): 1-6.
- [27] 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 for partial discharge in power transformer and new multiplexing method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1768-1780.
- [28] 于雷, 王世杰, 王鹏, 等. 变压器绕组内部局放超声定位仿真及试验研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(6): 72-78.
- YU Lei, WANG Shijie, WANG Peng, et al. Simulation and experimental study on ultrasonic localization of partial discharge in transformer winding[J]. Insulating Materials, 2019, 52(6): 72-78.
- [29] 祝令瑜, 崔彦捷, 李斯盟, 等. 交直流复合电压下油纸绝缘针板缺陷局部放电发展过程研究[J]. 绝缘材料, 2017, 50(7): 55-60.
- ZHU Lingyu, CUI Yanjie, LI Simeng, et al. Study on partial discharge development processes of needle-plate defects in oil - paper insulation under AC - DC compound voltage[J]. Insulating Materials, 2017, 50(7): 55-60.
- [30] 廖瑞金, 段炼, 汪可, 等. 交流电压下油纸绝缘针板放电特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 648-654.
- LIAO Ruijin, DUAN Lian, WANG Ke, et al. Partial discharge characteristics of point-plane model in oil-paper insulation under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 648-654.
- 相晨萌(1989—), 女, 博士, 工程师, 主要从事变压器等设备状态评估与故障诊断等方面的研究工作(E-mail: dyxx-iangcm@163.com)。
- 高树国(1982—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电气设备故障诊断与状态监测等方面的研究工作。
- 贾云飞(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为变压器等电力设备状态评估与故障诊断、绝缘子结构优化等。