

基于超声波法的 GIS 盆式绝缘子缺陷检测

何彦良¹, 邢博文², 辛 蕾¹, 徐 丹¹, 边少聪¹, 杨昌建¹, 任双赞¹, 薛建议²

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;

2. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)绝缘子健康状态评估迫切需要高灵敏度的缺陷检测技术。本文提出一种基于超声波扫频信号注入的 GIS 盆式绝缘子缺陷检测方法, 仿真和实验研究扫频超声波信号在洁净/缺陷盆式绝缘子上的传播规律, 并考虑存在内部气泡、表面裂纹和表面金属微粒附着 3 种缺陷的情况。仿真和实验中分别设置超声波发射和接收压电探头位于盆式绝缘子法兰相对处, 超声波扫频信号为幅值为 1 V 的变频正弦波, 频率范围为 0.5~1 MHz, 通过发射探头激励经法兰注入至盆式绝缘子, 并由对侧的接收压电探头接收超声波信号。结果表明: 超声波信号直接经盆式绝缘子传播到达接收压电探头, 经缺陷绝缘子传播后超声波时域信号幅值高于经洁净绝缘子传播后的超声波信号, 但仍难以作为评价绝缘子健康状况的依据。超声波信号经过缺陷绝缘子传播后主频低于经洁净绝缘子传播后, 经洁净、含裂纹、含金属微粒缺陷、含气泡缺陷绝缘子传播后的超声波主频信号分别为 24.00、14.83、10.51、12.13 kHz, 可作为 GIS 盆式绝缘子缺陷检测的依据。

关键词: 扫频频率; 超声波; 缺陷检测; GIS 盆式绝缘子

Defect detection of GIS basin insulator based on ultrasonic method

HE Yanliang¹, XING Bowen², XIN Lei¹, XU Dan¹, BIAN Shaocong¹,

YANG Changjian¹, REN Shuangzan¹, XUE Jianyi²

(1. Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited, Xi'an 710100, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: High sensitivity defect detection technology is urgently needed to evaluate the health status of gas insulated metal enclosed switchgear (GIS) insulator. In this paper, a defect detection method for GIS basin insulator based on ultrasonic scanning frequency signal injection was proposed. The propagation law of scanning frequency ultrasonic signals on clean/defective basin insulators were investigated by simulation and experiment, and three defects including internal bubbles, surface cracks, and surface metal particle attachment were considered. In the simulation and experiment, the ultrasonic emission and reception probes were located opposite the flange of the basin insulator. The ultrasonic scanning signal was a frequency conversion sine wave with an amplitude of 1 V and a frequency range of 0.5–1 MHz, which was energized by the transmitting probe and injected into the basin insulator through a flange, and the ultrasonic signal was received by the receiving probe on the opposite side. The results show that the ultrasonic signal directly propagates through the basin insulator to the receiving piezoelectric probe, and the amplitude of the time-domain ultrasonic signal received on the defective insulator is higher than that on the clean insulator, but it is still difficult to be used as a basis for evaluating the health status of the insulator. The main frequency of ultrasonic signals propagated through defective insulators is lower than that propagated through clean insulators. The main frequency signals propagated through clean, crack containing, metal particle defective, and bubble defective insulators are 24.00, 14.83, 10.51, and 12.13 kHz, respectively, which can be used as the basis for defect detection of GIS basin insulators.

Key words: sweeping frequency; ultrasonic; defect detection; GIS basin insulator

0 引言

气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)具有结构紧

凑、可靠性高、集成度好、使用寿命长、维护工作量少等优点, 被广泛应用于超特高压输电系统中^[1]。盆式绝缘子和支柱绝缘子是 GIS 中的关键部件, 由金属嵌件、环氧绝缘和法兰等组成, 主要起到电气绝缘和机械支撑的作用^[2]。在 GIS 中, 盆式绝缘子和支柱绝缘子是绝缘最薄弱的部位。一方面, 在生

基金项目: 国网陕西省电力有限公司科技项目(5226KY230013); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HGQA0473); 国家自然科学基金资助项目(52107143)。

产制作过程中温度的变化会使绝缘子承受内应力,可能在绝缘子内部产生气泡、在绝缘子表面产生裂纹;另一方面,在运输过程中,由于金属部件之间的摩擦会在绝缘子表面引入金属微粒,当GIS带电运行时,附着的金属微粒可能会诱发沿面放电,引起绝缘失效。绝缘子的电气性能、力学性能和热学性能直接影响GIS的安全运行^[2]。绝缘子的缺陷可能是现场组装或维修过程中引入的金属微粒,也可能是绝缘子上或铸造过程中因应力过大而产生的裂纹^[5]。因此,开展盆式绝缘子表面缺陷检测研究对于及时发现GIS潜在的危险源,保障GIS的安全可靠运行具有重要意义。

GIS盆式绝缘子缺陷检测方法主要包括电测法和非电测法两类^[6]。电测法主要检测缺陷导致的局部放电伴随产生的电磁物理信号来判定故障缺陷类型,在GIS运行过程中,盆式绝缘子的表面缺陷会引发局部放电现象,通过对局部放电信号的检测与解析可以有效地检测GIS盆式绝缘子的潜伏性缺陷。国内外学者对电测法方面开展了大量研究^[7],取得了丰富的成果,提高了现场GIS盆式绝缘子局部放电在线监测系统的可靠性。但局部放电检测电信号的强弱与局部放电量有关,易受其他信号干扰,且局部放电在线监测装置也会出现误报和漏报的问题。在非电测法中,超声无损检测技术凭借其检测灵敏度高、检测过程不危害人体和环境、操作简单、处理速度快等一系列优点为GIS盆式绝缘子缺陷检测提供一种新思路^[10]。田方园等^[13]采用超声临界折射纵波法来检测环氧复合绝缘材料中的微裂纹缺陷,使用2.5 MHz超声可变角探头可以实现长度为0.5~2.0 mm表面微裂纹的高灵敏检测;迟靖宇^[14]设计了新的特高压GIS盆式绝缘子裂纹超声波监测系统,相比传统监测方法可大幅提高裂纹监测精度;马君鹏等^[15]采用超声导波技术对盆式绝缘子裂纹与气泡进行检测,通过在盆式绝缘子上激发产生兰姆(Lamb)波,实现了盆式绝缘子的缺陷的检测与定位;王克胜等^[16]采用超声波模态分析方法对盆式绝缘子缺陷进行检测,通过对比有/无缺陷绝缘子模态频率的典型特征实现了裂纹缺陷的检测与识别;孙贺斌等^[17]提出低频双探头超声波的盆式绝缘子缺陷检测方法,实验验证了该方法的可行性。

目前基于超声波的盆式绝缘子缺陷检测方法以离线检测为主,无法实时掌握在运盆式绝缘子的

健康状态。现有的绝缘子缺陷在线检测技术可以实现对绝缘子裂纹和表面金属微粒等细微缺陷的检测,但其灵敏度不高^[6]。绝缘子缺陷会导致其表面电场畸变,从而发生沿面闪络,严重威胁电力系统的安全稳定运行。因此,为了减少由绝缘子缺陷引起的GIS故障,迫切需要研究GIS盆式绝缘子表面缺陷的高灵敏度检测方法。

本文提出一种基于扫频超声波信号注入的GIS盆式绝缘子缺陷检测方法,仿真研究了超声扫频波信号在洁净/缺陷盆式绝缘子上的传播规律,拟通过洁净/缺陷绝缘子上超声波频域信号的差异实现了对盆式绝缘子缺陷的检测。本文的研究成果可为GIS盆式绝缘子缺陷的检测提供参考,提高GIS现场运维效率。

1 仿真模型

1.1 GIS几何模型

根据现场252 kV GIS和盆式绝缘子的尺寸和结构,建立了GIS三维仿真计算模型。中心导体的半径为50 mm,外壳的半径和厚度分别约为190 mm和17 mm,盆式绝缘子的高度和半径分别约为120 mm和150 mm。GIS腔体内充入0.4 MPa的SF₆气体,仿真计算中考虑了两种类型的绝缘子:带有金属法兰屏蔽层和浇铸孔、无金属法兰屏蔽层,两种绝缘子仿真模型如图1所示。

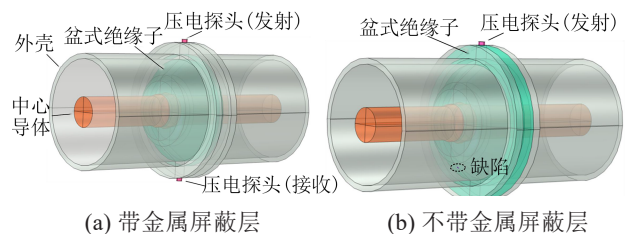


图1 GIS仿真模型

Fig.1 GIS simulation models

在GIS外壳上布置了两种压电探头:发射压电探头和接收压电探头。发射和接收压电探头布置在盆式绝缘子法兰处,其中发射压电探头用于激励产生扫频超声波信号,接收压电探头用于接收经盆式绝缘子传播后的超声波信号。对于带金属屏蔽层的绝缘子,发射压电探头位于浇铸孔上,对于不带金属屏蔽层的绝缘子,发射与接收探头相对放置,具体布置方式如图1所示。

本文中扫频超声波信号为变频正弦波,幅值为1 V,频率为0.5~1 MHz,持续时间为500 μs,通过发

射压电探头将正弦波信号注入到盆式绝缘子中,波形如图2所示。其中图2(a)为注入超声波信号的时域波形,图2(b)为相应的时域信号经傅里叶变换后的频域信号。从图2可以看出,注入信号的频率集中在0.5~1.1 MHz范围内,在这个频率范围之外,信号强度迅速衰减为零。本文中设置发射/接收压电探头材料为PZT-5H。

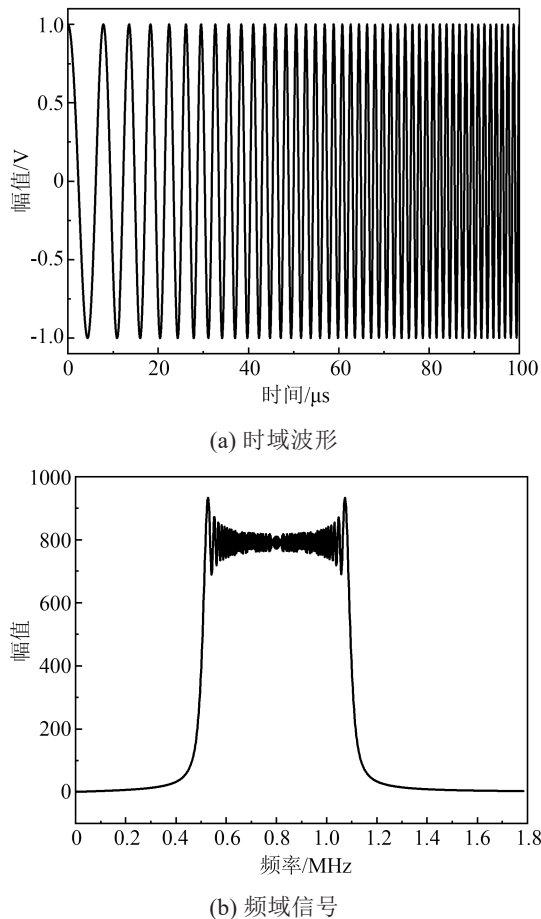


图2 扫频超声波信号

Fig.2 Sweep frequency ultrasonic signal

在GIS中,气泡、金属微粒和裂纹缺陷普遍存在于盆式绝缘子上。因此,本文主要考虑这3种缺陷,缺陷尺寸如下:金属微粒直径为0.5 mm、长度为2 mm,相对介电常数为 10^3 ,电导率为 10^4 S/m;裂纹直径为0.5 mm、长度为4 mm,相对介电常数为1,电导率为 10^{-19} S/m;气泡直径为0.25 mm,相对介电常数为1,电导率为 10^{-19} S/m。盆式绝缘子缺陷的位置可参照图1中的标注,对于有无金属屏蔽层的绝缘子,缺陷位置均相同。

1.2 边界条件设置

超声波在GIS中的传播属于多物理场耦合过

程,主要涉及压力声学场、固体力学场和静电场3个物理场之间的耦合。超声波在气体中的传播属于压力声学场,即超声波在 SF_6 气体中的传播过程满足式(1)。

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left[-\frac{1}{\rho} (\nabla p - \mathbf{q}_d) \right] = Q_m \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为材料密度, kg/m^3 ; c 为超声波在材料中传播速度, m/s ; p 为声压, Pa ; t 为时间, s ; \mathbf{q}_d 为偶极源, N/m^3 ; Q_m 为总单极域源, s^{-2} 。

超声波在固体中的传播属于固体力学场,即在高压导体、盆式绝缘子和外壳中的传播过程满足式(2)。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla S + \mathbf{F}_v \quad (2)$$

式(2)中: \mathbf{u} 表示位移矢量, m ; S 表示皮奥拉-基尔霍夫应力, N ; \mathbf{F}_v 表示压力矢量, Pa 。

发射和接收压电探头适用于静电场,在发射压电探头与盆式绝缘子法兰接触面处设置激励源,施加终端电压作为边界条件,侧表面设置为接地;接收压电探头与盆式绝缘子法兰接触面处为悬浮电位,侧表面设置为接地。

1.3 仿真中使用的参数

在仿真过程中,还需要设置计算超声波在传播过程所需的参数,其中GIS组件的参数如表1所示。

表1 GIS组件的参数

Table 1 The parameter of GIS component

组件	中心电极和外壳	SF_6	绝缘子
密度/ (g/cm^3)	2.7	6×10^{-3}	1.2
声速/ (m/s)	6 320	1 400	3 700

GIS结构复杂,超声波在传播过程中会在界面处发生反向折射。为了简化计算,将边界设置为软声场边界,模拟无限大区域,即超声波传播到GIS两端面时声压为0 Pa,不存在折反射现象。

对于发射和接收压电探头而言,静电场是适用的,压电探头的参数如表2所示。仿真试验设置总计算时间为2 ms,时间步长为2 μs 。

表2 压电探头的参数

Table 2 The parameters of the piezoelectric probe

参数	密度 (g/cm^3)	相对 介电常数	介质损耗 因数	压电系数 $(\times 10^{-12} \text{C/N})$
压电探头	7.5	2 750	1	600

2 结果与讨论

当扫频超声波信号从法兰通过压电探头注入时,电压将转化为声压信号在GIS腔体内传播。当声信号传播到发射压电探头的对侧时,接收压电探头检测到声信号。探头接收到的洁净绝缘子和缺陷绝缘子声波的差异可以作为缺陷检测的判据。

2.1 盆式绝缘子表面的声压分布

计算得到洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子(含金属微粒、裂纹和气泡)表面的声压分布,同时对比了有/无金属屏蔽层对声压分布的影响。当超声波信号传播1 ms后,盆式绝缘子表面声压分布如图3所示。

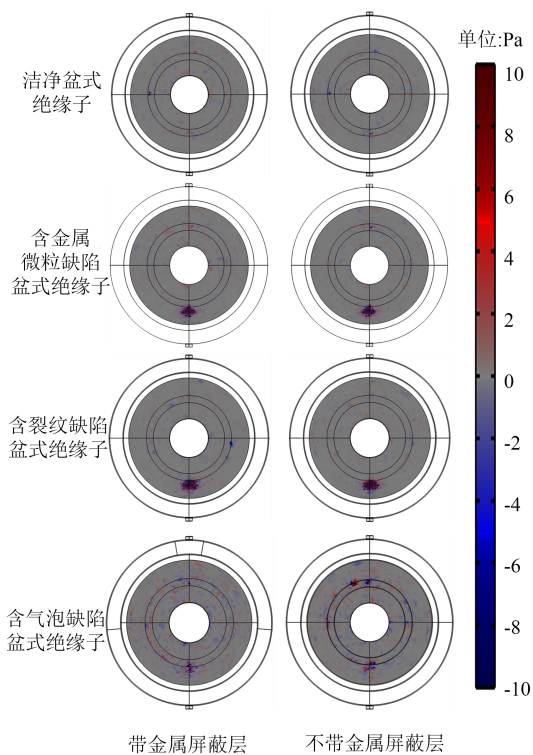


图3 盆式绝缘子表面的声压分布
Fig.3 The acoustic pressure distribution on basin insulator surface

从图3可以看出,盆式绝缘子的结构差异对声压分布的影响较小,有/无金属屏蔽层的绝缘子表面声压强度和分布基本一致。对于洁净盆式绝缘子表面,超声波声压分布均匀且幅值较低,而当盆式绝缘子上存在缺陷时,声压信号的分布和幅值发生显著变化。当金属微粒粘附在盆式绝缘子表面时,声压分布略有不同。当超声波传播到金属微粒时,折射和反射使得叠加的声波信号具有很高的幅值,声压信号聚集在金属微粒附近;对于裂纹缺陷,观察到与金属微粒附着绝缘子表面时类似的声压分

布规律;对于气泡缺陷,气泡处声压强度要略低于金属微粒和裂纹缺陷,但仍高于洁净盆式绝缘子。

为了进一步揭示超声波的传播规律,图4给出了接收压电探头检测到的有/无金属屏蔽层上的声压信号。从图4可以看出,金属屏蔽层对于接收压电探头接收到的超声波信号影响较小,且不会影响超声波到达接收压电探头的初始时刻。在0.096 ms之前,接收压电探头的电压幅值几乎为零,在0.096 ms之后,电压幅值才开始出现明显变化,即接收压电探头检测到超声波初始信号大约需要0.096 ms,本仿真中,盆式绝缘子法兰的半周长约为0.722 m,仿真中的声速约为6 320 m/s。如果声波通过金属法兰传播后到达接收压电探头,则探头接收到超声波初始时刻的信号大约需要 $0.722/6\ 320$ s,即0.114 ms,大于0.096 ms,因此,可以判断出超声波是直接经过盆式绝缘子到达接收探头。

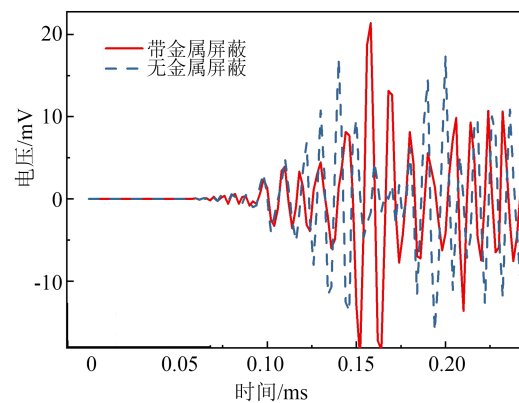


图4 接收压电探头检测到的超声波信号
Fig.4 The ultrasonic signal detected by the receiving piezoelectric probe

2.2 不同缺陷下超声波时域和频域信号

接收压电探头检测到的超声波时域信号如图5所示。从图5(a)可以看出,超声波经洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子传播后到达接收压电探头的时间基本一致,经缺陷盆式绝缘子传播后超声波信号幅值略高于洁净盆式绝缘子。总体来看,经裂纹缺陷绝缘子传播后接收压电探头接收到的信号幅值最高,含金属微粒的绝缘子次之,含气泡缺陷的绝缘子最低,但仍略高于洁净盆式绝缘子。从图5(b)可以看出,无金属屏蔽层仿真结果与有金属屏蔽层类似,经缺陷盆式绝缘子传播后的超声波信号幅值均高于洁净盆式绝缘子。统计得到有/无金属屏蔽层下超声波经不同缺陷盆式绝缘子传播后接收压电探头接收到的超声波信号最高幅值,如表3所示。从表3可以看出,无论是否带有金属屏蔽层,超

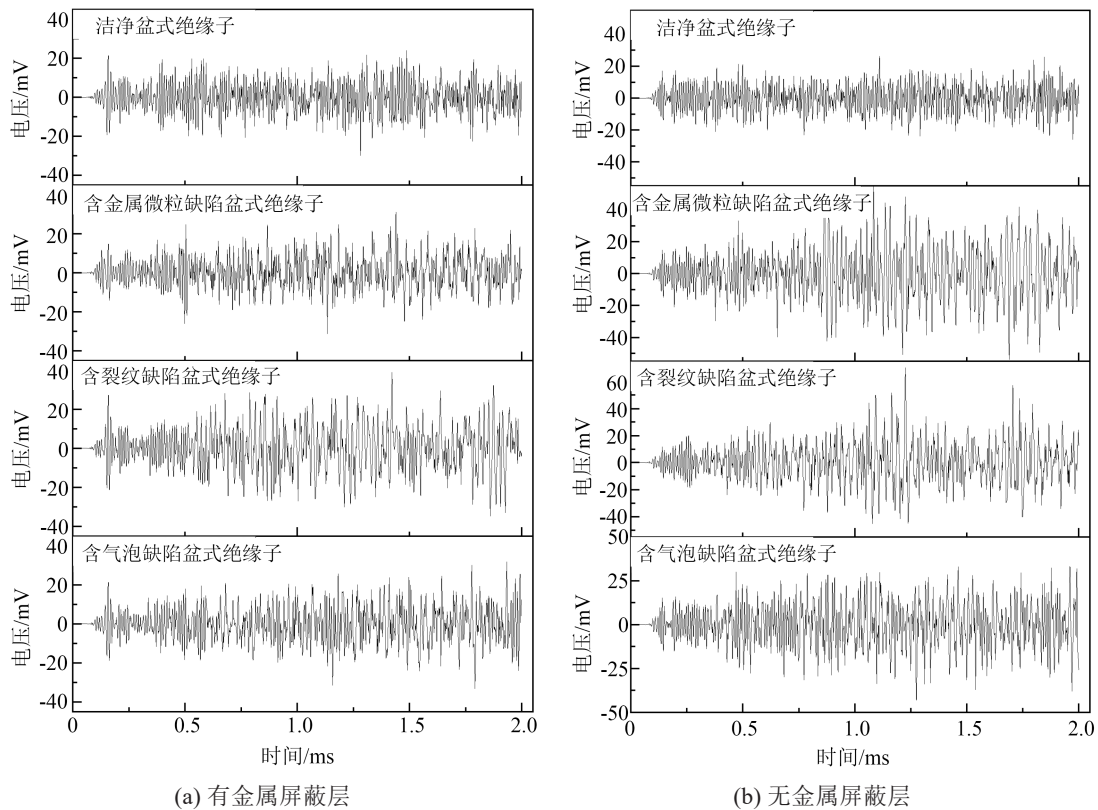


图5 接收压电探头在洁净和缺陷盆式绝缘子上检测到的超声波时域信号

Fig.5 The time-domain ultrasonic signal detected by the receiving piezoelectric probe on pure and defective basin insulator

表3 接收压电探头接收到的超声波信号最高幅值
Table 3 The highest amplitude of the ultrasonic signal received by the receiving probe

缺陷类型	洁净盆式绝缘子	含裂纹缺陷	含金属微粒缺陷	含气泡缺陷
最高幅值/mV	26.4	70.3	56.7	33.3
	24	38.9	31.1	31.8

声波经过缺陷绝缘子后到达接收压电探头的信号幅值均高于洁净盆式绝缘子,含裂纹缺陷盆式绝缘子幅值最高,其次为含金属微粒和气泡缺陷盆式绝缘子,这表明当盆式绝缘子含有缺陷时,超声波信号在缺陷处会发生多次折反射,最终表现为接收压电探头接收到的超声波信号幅值增大。

尽管超声波信号经洁净和缺陷盆式绝缘子传播后接收压电探头接收到的时域信号具有一定差异,但该差异并不显著,难以用作缺陷检测的判据。为了进一步提取有效信息,分析洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子超声波信号的典型差异,对时域超声波信号进行傅里叶变换,得到相应的频域信号,如图6所示。从图6可以看出,接收压电探头接收

到的超声波信号频率为0~250 kHz。此外,不论绝缘子是否有金属屏蔽层,经洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子传播后到达接收压电探头的超声波频域信号都有显著差异,经洁净盆式绝缘子传播后的超声波信号主频均为101 kHz左右,而经缺陷盆式绝缘子传播后的超声波信号主频均低于洁净盆式绝缘子。表4统计了压电探头接收到的经洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子传播后超声波信号的主频率。从图6和表4可以看出,与洁净绝缘子相比,缺陷盆式绝缘子超声波频域信号表现为多个峰,信号主频均明显小于洁净绝缘子。因此,该频域信号可作为GIS盆式绝缘子金属微粒、裂纹和气泡缺陷检测的判据。

3 实验验证

为了进一步验证所提方法在GIS盆式绝缘子缺陷检测方面的有效性,在252 kV GIS腔体段开展了实验研究,如图7所示。考虑3种典型绝缘子缺陷:含金属微粒、内部气泡、表面裂纹,缺陷盆式绝缘子如图8所示,缺陷尺寸与仿真中的缺陷尺寸一致。

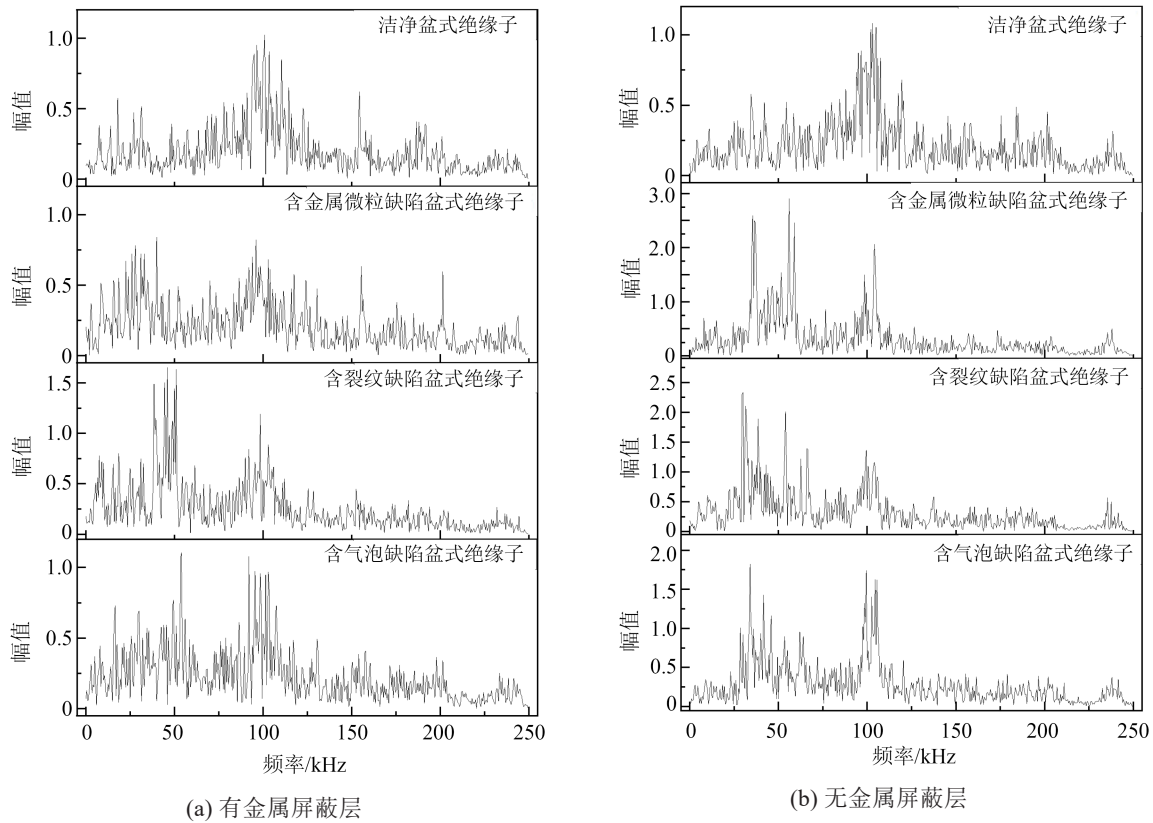


图6 接收压电探头在洁净和缺陷盆式绝缘子上检测到的超声波时域信号

Fig.6 The frequency-domain ultrasonic signal detected by the receiving piezoelectric probe on pure and defective basin insulator

表4 探头压电接收到的超声波信号的主频
Table 4 The main frequency of the ultrasonic signal received by the receiving probe

绝缘子类型		洁净盆式绝缘子	含裂纹缺陷	含金属微粒缺陷	含气泡缺陷
超声波主频 /kHz	有金属屏蔽	101	51	40.0	54
	无金属屏蔽	103	54	36.5	34



图7 实验用GIS腔体及盆式绝缘子
Fig.7 The GIS chamber and basin insulator for experiment



图8 实验用缺陷盆式绝缘子
Fig.8 Defect basin insulator for experimental

实验采用超声波探头作为发射和接收超声波信号的传感器,采用CTS-04UT型多通道超声探伤仪作为超声信号的接收和发射平台。

通过发射探头向盆式绝缘子注入扫频超声波信号,由接收压电探头在对侧检测传播过来的超声波信号。超声波经盆式绝缘子传播后由接收压电探头接收,超声波经洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子传播后的时域信号如图9(a)所示,对时域信号作傅里叶变换,得到超声波频域信号,如图9(b)所示。统计得到超声波经无缺陷/缺陷绝缘子传播后接收压电探头检测到的时域最高幅值和频域主频,如表5所示。由表5可以看出,经洁净盆式绝缘子和缺陷盆式绝缘子的时域超声波信号最高幅值差别较小,幅值均为200 mV左右,但频域超声波信号主频具有较大差异,可以作为缺陷检测的判据。

4 结论

本文提出了一种基于扫频超声波信号注入的GIS盆式绝缘子缺陷检测方法,仿真研究了扫频超声波信号在洁净/缺陷盆式绝缘子上的传播规律,主要得出如下结论:

- (1)超声波直接经盆式绝缘子传播到接收压电

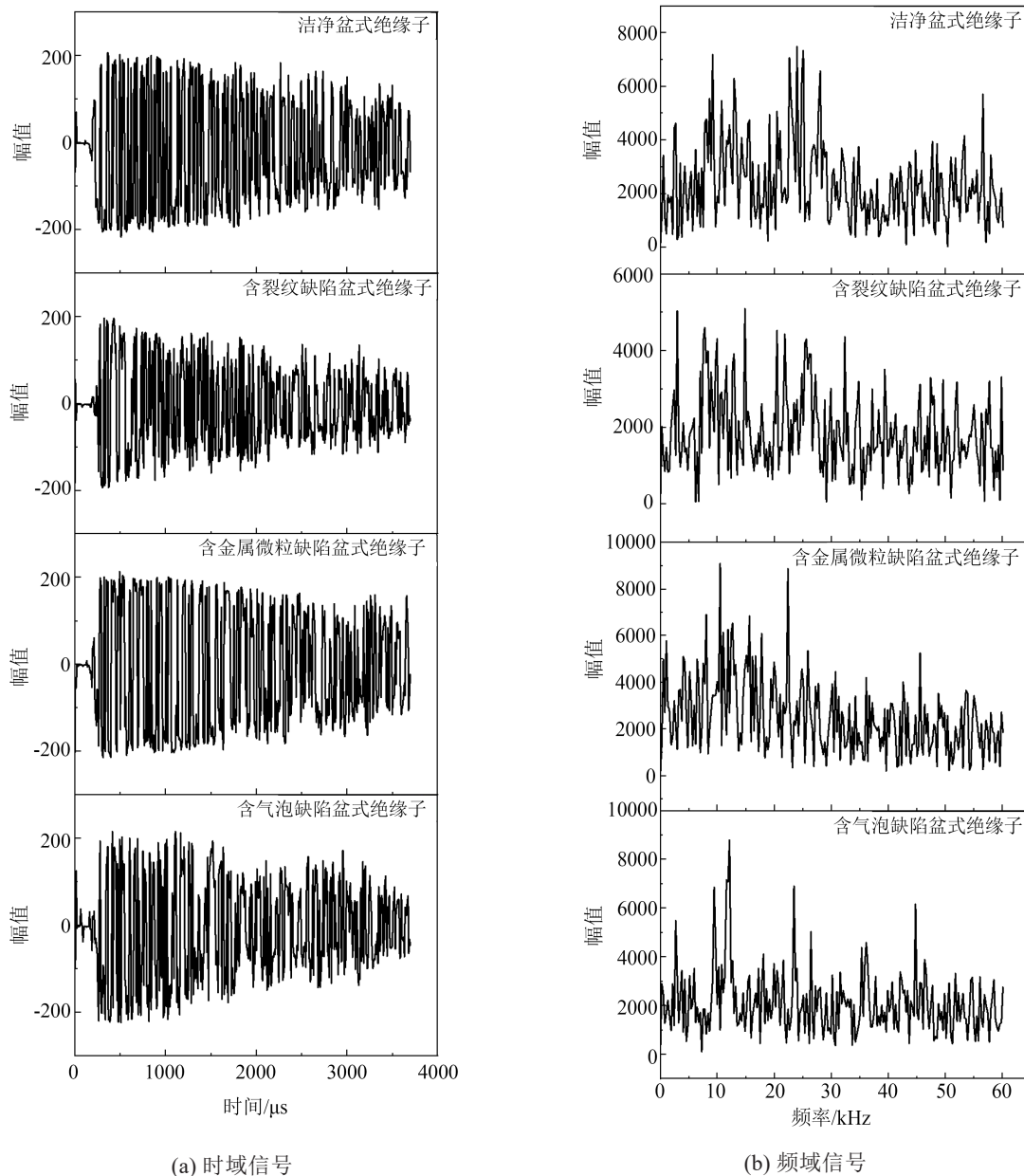


图9 接收压电探头在洁净和缺陷盆式绝缘子上检测到的超声波信号

Fig.9 The ultrasonic signal detected by the receiving piezoelectric probe on pure and defective basin insulator

表5 超声波的时域最高幅值和主频

Table 5 Highest amplitude and main frequency of ultrasonic in time domain

绝缘子类型	洁净绝缘子	含裂纹缺陷	含金属微粒缺陷	含气泡缺陷
时域最大幅值/mV	206	196	213	215
频域主频/kHz	24.00	14.83	10.51	12.13

探头, 声波经缺陷盆式绝缘子传播后信号幅值高于洁净盆式绝缘子, 但差异并不显著, 难以用作缺陷检测的判据。

(2)与洁净盆式绝缘子相比, 缺陷盆式绝缘子

的频域超声波信号表现为多个峰, 超声波信号主频均明显小于洁净盆式绝缘子。因此, 超声波信号主频可作为GIS盆式绝缘子金属微粒、裂纹和气泡缺陷检测的判据。

参考文献 References

[1] 李鹏, 李金忠, 崔博源, 等. 特高压交流输电变电装备最新技术发展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1068-1078.
LI Peng, LI Jinzhong, CUI Boyuan, et al. Achievements in the newest technology of UHV AC power transmission equipment[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1068-1078.

[2] 何柏娜, 孔杰, 姜仁卓, 等. 盆式绝缘子金属丝缺陷下电场分布仿真研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 39-44.

- HE Bona, KONG Jie, JIANG Renzhuo, et al. Simulation research on electric field distribution of basin insulators with metal wire defect[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(1): 39-44.
- [3] 何柏娜, 孔杰, 宁家兴, 等. 存在气泡缺陷的盆式绝缘子电场仿真分析[J]. *绝缘材料*, 2019, 52(5): 86-92.
- HE Bona, KONG Jie, NING Jiaying, et al. Electric field simulation analysis of basin-type insulator with bubble defects[J]. *Insulating Materials*, 2019, 52(5): 86-92.
- [4] 沙伟燕, 罗艳, 马鹏欢, 等. 不同金属微粒缺陷下GIS盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(9): 89-93.
- SHA Weiyang, LUO Yan, MA Penghuan, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of GIS basin insulator with different metal particle defects[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(9): 89-93.
- [5] 高晋武, 宋建成, 王伟, 等. 基于超声导波能量的盆式绝缘子裂纹检测方法研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 165-171.
- GAO Jinwu, SONG Jianchen, WANG Wei, et al. Research on crack detection method of basin insulator based on ultrasonic guided wave energy[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 165-171.
- [6] 韩帅, 高飞, 廖思卓, 等. GIS盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(2): 12-22.
- HAN Shuai, GAO Fei, LIAO Sizhuo, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(2): 12-22.
- [7] 刘钊, 李晓溪, 弓艳朋, 等. 基于声光联合法发现的GIS内部绝缘子裂纹引起的局部放电缺陷[J]. *广东电力*, 2023, 36(9): 100-106.
- LIU Zhao, LI Xiaoxi, GONG Yanpeng, et al. A partial discharge defect caused by cracks in GIS internal insulator based on acoustic and optic joint[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(9): 100-106.
- [8] 薛建议, 朱明晓, 邵先军, 等. 特高压GIS局部放电超声波传播特性仿真[J]. *高压电器*, 2018, 54(9): 67-75.
- XUE Jianyi, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation on ultrasonic propagation characteristics of partial discharge in ultra-high voltage GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(9): 67-75.
- [9] 杨勇, 邵先军, 金涌涛, 等. GIS盆式绝缘子结构对局部放电特高频信号泄漏特性的影响研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(9): 95-101, 108.
- YANG Yong, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Influence of spacers structure on ultra-high Frequency partial discharge signal leakage characteristics[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(9): 95-101, 108.
- [10] 苏耕, 伍维健, 周峻, 等. 残余应力测试方法在GIS盆式绝缘子中的应用前景[J]. *绝缘材料*, 2017, 50(3): 1-5.
- SU Gen, SU Weijian, ZHOU Jun, et al. Application prospect of residual stress measurement in GIS basin-type insulators[J]. *Insulating Materials*, 2017, 50(3): 1-5.
- [11] 王伟, 刘宏, 董理科, 等. 基于激光超声峰值重建算法的盆式绝缘子缺陷检测研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(1): 96-101.
- WANG Wei, LIU Hong, DONG Like, et al. Research on basin insulator defect detection based on laser ultrasonic peak reconstruction algorithm[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(1): 96-101.
- [12] 徐光辉, 李继承, 郝留成. 超声频谱分析技术在1100kV盆式绝缘子金属夹杂物检测中的应用研究[J]. *绝缘材料*, 2013, 46(5): 80-84.
- XU Guanghui, LI Jicheng, HAO Liucheng. Application study of ultrasonic spectrum analysis technique in detecting metallic inclusion of 1100 kV basin-type insulator[J]. *Insulating Materials*, 2013, 46(5): 80-84.
- [13] 田方园, 郝艳捧, 邹舟诣奥, 等. 环氧复合绝缘表面微裂纹检测的超声临界折射纵波法[J]. *广东电力*, 2019, 32(12): 106-112.
- TIAN Fangyuan, HAO Yanpeng, ZOU Zhouyi'ao, et al. Ultrasonic LCR method for detecting micro cracks on the surface of epoxy composite insulation[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(12): 106-112.
- [14] 迟靖宇. 基于超声波的特高压盆式绝缘子裂纹监测方法[J]. *自动化应用*, 2022(6): 98-100.
- CHI Jingyu. Crack monitoring method of UHV basin insulator based on ultrasonic wave[J]. *Automation Application*, 2022(6): 98-100.
- [15] 马君鹏, 孙兴涛, 李硕, 等. 基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测及定位[J]. *高电压技术*, 2019, 45(12): 3941-3948.
- MA Junpeng, SUN Xingtao, LI Shuo, et al. Detection and location for defects of basin-type insulator based on ultrasonic guided wave[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(12): 3941-3948.
- [16] 王克胜, 赵彦平, 原帅, 等. 基于电场计算及模态分析的220kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(8): 32-38, 47.
- WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. *Power Syst. Clean Energy*, 2021, 37(8): 32-38, 47.
- [17] 孙贺斌, 周治伊, 吕岩婷, 等. 基于低频双探头超声波的盆式绝缘子缺陷检测方法研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(1): 110-114.
- SUN Hebin, ZHOU Zhiyi, LÜ Yanting, et al. Research on defect detection method of basin insulator based on low frequency dual probe ultrasonic[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(1): 110-114.

收稿日期: 2027-05-16; 修回日期: 2027-05-21。

作者简介:

何彦良(1992-), 男(汉族), 陕西宝鸡人, 博士, 工程师, 主要从事电力设备故障诊断与状态检测的研究;

通信作者: 薛建议(1993-), 男(汉族), 安徽阜阳人, 副教授, 博士, 主要从事GIS/电缆绝缘与缺陷诊断方面的研究。