

220kV GIL 复杂壳体结构振动传播特性分析

杜志叶¹, 郝兆扬^{1†}, 郝乾^{2,3}, 肖湃¹, 王永君², 黄文雄²

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉朗德电气有限公司, 湖北 武汉 430205;

3. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要:长距离城市气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)包含大量的伸缩节及气隔单元等复杂壳体结构, 会使沿 GIL 壳体传播的振动信号产生相应的时延, 进而影响基于时差法的振动故障定位在线监测系统的定位精度. 为明晰 GIL 复杂壳体结构对振动信号传播过程产生的影响, 为后续 GIL 击穿故障定位方法的改进提供依据, 本文从理论上分析了振动信号在流体、固体场中的传播方程以及两场间的耦合关系, 提出了振动信号在 GIL 内传播过程的声-结构耦合有限元数值模拟方法, 研究了不同激励方式下振动信号在 GIL 壳体中的传播特性, 并在南通 220 kV GIL 现场开展 GIL 管壁振动传播特性试验, 获得了振动信号经过 220 kV GIL 伸缩节单元、气隔单元、弯管单元以及支架单元等结构的典型波速与时延情况, 同时建立与试验工况一致的有限元仿真模型, 验证了文中所提出的 GIL 内振动信号传播过程数值模拟方法的可行性与有效性. 研究表明: 对于振动故障定位在线监测系统所监测的横波振动信号, 220 kV GIL 各复杂壳体结构会使其产生 0.1~1.1 ms 不等的时延.

关键词:220 kV GIL; 有限元; 故障定位; 传播特性; 时延

中图分类号:TM726 **文献标志码:**A

Analysis on Vibration Propagation Characteristics of 220kV GIL Complicated Shell Structure

DU Zhiye¹, HAO Zhaoyang^{1†}, HAO Qian^{2,3}, XIAO Pai¹, WANG Yongjun², HUANG Wenxiong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Wuhan Landpower Co. Ltd, Wuhan 430205, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Long-distance urban gas-insulated transmission line (GIL) has many complicated shell structure such as expansion joints and gas basin insulators, which will cause the time delay of vibration signal propagating along the GIL shell, and then affect the positioning accuracy of vibration fault location on-line monitoring system based on time difference method. In order to clarify the influence of GIL complicated shell structure on the propagation process of vibration signal and provide the basis for the improvement of the subsequent GIL breakdown fault location method, the propagation equation of vibration signal in the fluid and solid field and the coupling relationship be-

* 收稿日期:2021-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977152), National Natural Science Foundation of China(51977152)

作者简介:杜志叶(1974—),男,河南许昌人,武汉大学教授,工学博士

† 通信联系人, E-mail: haozhaoyang.whu@foxmail.com

tween the two fields are analyzed theoretically, and the acoustic-structure coupling finite element numerical simulation method for the propagation process of vibration signal in GIL is presented in this paper. Then, the propagation characteristics of vibration signal in GIL shell under different excitation modes are studied. The experiment of vibration propagation characteristics of GIL shell is carried out in Nantong 220kV GIL engineering site, and the typical wave velocity and time delay of vibration signal through 220kV GIL expansion joint, gas basin insulator, elbow and support are obtained. At the same time, a finite element simulation model consistent with the experiment condition is also established, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed numerical simulation method for vibration signal propagation in GIL. The results show that for the S-wave vibration signals monitored by the vibration fault location on-line monitoring system, the complicated shell structure of 220kV GIL can produce a delay ranging from 0.1ms to 1.1ms.

Key words: 220kV GIL; finite element method; fault location; propagation characteristics; time delay

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)因其输电容量大、损耗低、运行维护方便等优点^[1-3],可有效满足城市景观带建设、清洁能源外送、可再生能源消纳等场景下的电能输送需求^[4],对我国碳达峰、碳中和目标的实现具有重要作用. 受限于当前技术水平,采用模块化方式生产组装的GIL内部往往会出现一些不可避免的隐性绝缘缺陷^[5-6],这些缺陷可能会引发绝缘故障而导致击穿^[7]. 对于长距离GIL,当击穿发生时,需要快速、准确地定位击穿位置,以便及时更换损坏管段. 目前,GIL击穿故障定位方法主要包括振动法、超声波法以及接地线电流法^[8],因为GIL击穿放电产生的声振动信号主要位于可听声频段内,振动加速度传感器在此频段内灵敏度高,且安装方便、经济性好^[9],因此振动法在GIL击穿故障定位中得到了广泛的应用.

近两年来,随着无锡、南通以及武汉等地的GIL工程陆续开工建设或建成投运,我国的长距离城市GIL工程已进入快速发展期. 这些长距离城市GIL工程均以管廊的形式埋设于地下,受城市复杂地形条件的影响,上下起伏频繁,存在大量的伸缩节、弯管等复杂壳体结构. 振动法主要监测GIL内部发生绝缘故障时产生并沿壳体传播的振动信号,出于经济性考虑,在GIL壳体上安装的振动加速度传感器间隔一般较长. 对于城市GIL,两个传感器间可能会存在多个复杂壳体结构,这些结构会使经过的振动信号产生显著的时延和衰减,严重影响基于时差或幅值的故障定位结果^[10]. 为提高GIL状态监测水平,避免故障点定位不准导致的检修周期延长以及误拆正

常管段对GIL造成的二次破坏,应对振动信号经过GIL复杂壳体结构的传播特性进行研究,所得研究成果可为现有振动故障定位算法的改进提供理论依据与技术数据,进一步提高故障定位结果的精确性,有利于后续长距离城市GIL管廊工程的建设.

在GIS/GIL振动特性研究方面,日本学者Okutsu率先提出利用振动法监测GIS内部的机械故障与放电故障^[11];屈斌等人通过实验采集了GIS不同机械故障与局放故障下的振动加速度信号^[12];薛建议等人采用有限元法仿真了特高压GIS不同位置发生局部放电时超声振动信号的传播特性^[13];腾云、刘通等人研究了GIL发生击穿性放电时的声振动特性以及基于可听声信号的击穿故障定位方法^[14-15];刘云鹏等人通过击穿故障定位试验,研究了超声振动信号在特高压GIL中传播的衰减特性^[16]. 目前GIS/GIL振动特性的研究尚局限于母线直管段,鲜有振动信号经过GIL伸缩节、气隔单元等复杂壳体结构传播特性相关的研究.

综上所述,本文提出了一种基于声-结构耦合的GIL振动传播特性有限元仿真方法^[17],研究了不同激励方式下振动信号在GIL壳体中的传播特性,并在220 kV真型GIL上开展管壁振动传播特性试验,获得了振动信号经过220 kV GIL各型复杂壳体结构的典型波速和时延情况,通过仿真与试验结果对比,验证了该仿真方法的准确性.

1 GIL声-结构耦合仿真原理及方法

流体中的声波和固体中的应力波都属于机械

波,是振动在介质中的传播形式.因为GIL同时包含流体域和固体域,因此振动在GIL中的传播涉及声学与结构力学两物理场.考虑到GIL伸缩节、气隔单元等复杂壳体结构的材质与直管段不同,同时又包含大量的流-固交界面,振动信号经过这些结构时会发生极为复杂的折射、反射以及波形转换现象,其传播过程难以通过理论解析计算.因此,本文采用数值计算方法研究振动在GIL中的传播过程.

1.1 计算原理

1.1.1 声学波动方程

声学方程来源于流体力学,完整的流体方程由质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及本构关系组成,方程如式(1)所示.

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{l}) = 0 \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{l})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{l} \mathbf{l}^T) = \nabla \cdot (-p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_{mu}) + \mathbf{F} \\ \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha_0 T \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (-k \nabla T - \mathbf{l} \cdot \boldsymbol{\tau}_{mu}) + Q \\ \rho = \rho(p, T) \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ 为介质密度,kg/m³; \mathbf{l} 为流体质点的振动速度,m/s; T 为温度,K; $\boldsymbol{\tau}_{mu}$ 为黏性应力张量,Pa; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{F} 为体积力,N/m³; C_p 为定压比热容,J/(kg·K); p 为压强,Pa; α_0 为热扩散系数,m²/s; k 为导热系数,W/(m·K); Q 为流体的内热源,W/m³; t 为时间,s.

上述方程描述了流体力学中速度场 \mathbf{l} 、压强 p 以及温度 T 之间的关系.对于声学而言,无需求解上述诸多复杂变量,只需要求解与声学有关的压力变化即可,因此一般都会根据问题特性对流体方程进行一定的简化.本文在仿真计算前对GIL内部的介质、声波等进行了如下的简化假设:

①认为在GIL流体域中传播的声波属于线性声学的范畴,进而可以将上述方程中的介质密度 ρ 、质点振动速度 \mathbf{l} 、压强 p 以及温度 T 拆成平均不变的稳态值 x_0 和交变的扰动值 x_t ,其中扰动值远小于稳态值;

②认为SF₆在GIL中是不流动的,即流体质点的振动速度 \mathbf{l} 的稳态量 \mathbf{l}_0 为0;

③认为SF₆为理想流体,其黏度很小可以忽略,声波在SF₆中传播时不会产生热耗损,可以忽略流体

方程中的粘度项;

④认为整个体系绝热,不与外界进行热量交换,可以忽略流体方程中的温度项.

通过上述简化,可以得到描述声压 p_t 、介质质点振动速度变化量 \mathbf{l}_t 和介质密度变化量 ρ_t 这3个基本物理量之间关系的连续性方程、运动方程和物态方程^[18].将连续性方程两边对时间 t 求偏导后与物态方程一起代入运动方程,即可得到时域压力声学波动方程,如式(2)所示,可以使用该方程描述声波在GIL流体域中的运动过程.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p_t \right) + \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p_t}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

式中: ρ_0 为介质密度,kg/m³; p_t 为声压,Pa,即大气压受到声波扰动后的变化量; c 为声波在介质中的传播速度,m/s.

1.1.2 三维线弹性波方程

将GIL的固体域看作线弹性体,用弹性动力学模型来描述应力波在其中的传播过程.位移、应力、应变是弹性动力学中的3个基本物理量,它们之间由运动微分方程、物理方程、几何方程相互关联^[19].

运动微分方程如式(3)所示,它描述了弹性体的应力分量和位移分量之间的变化关系,其中 $\boldsymbol{\sigma}$ 表示应力张量,Pa; \mathbf{F} 表示体积力矢量,N/m³; \mathbf{u} 表示位移矢量,m; ρ 表示固体介质密度,kg/m³.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (3)$$

物理方程如式(4)所示,它描述了弹性体的应力分量和应变分量之间的变化关系,其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 表示应变张量; \mathbf{C} 为材料的弹性参数矩阵,其为6阶对称方阵,可以通过Lame常数 λ 和 μ 、体积模量 K 和剪切模量 G 或杨氏模量 E 和泊松比 ν 来表示.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

几何方程如式(5)所示,它描述了弹性体的位移分量和应变分量之间的变化关系,其中 $\nabla \mathbf{u}$ 表示位移矢量的梯度,其为一个二阶张量,上标T表示二阶张量的转置.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u}] \quad (5)$$

忽略运动微分方程中的体积力项,根据物理方程将运动微分方程中的应力分量表示为应变分量,再通过几何方程将应变分量转化为位移分量,即可

以得到直角坐标系中均匀、各向同性、线弹性固体介质中的三维线弹性波方程,如式(6)所示:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (6)$$

1.1.3 声-结构耦合关系

振动信号在 GIL 流体域中传播时只包含纵波,在 GIL 固体域中传播时同时包含纵波和横波. 因此,当振动信号到达 GIL-固交界面时,会发生相应的折射、反射及波形转换,其过程遵循波的折射反射定律.

在 GIL 流-固交界面上,流体压力以法向单位面积载荷作用于固体;固体沿界面法向的加速度作用于流体,相当于法向加速度产生声源,如图 1 所示. 两者间的耦合为双向耦合,关系如式(7)所示,其中 ρ_c 为流体介质密度, kg/m^3 ; p_i 为声压, Pa ; α 为加速度矢量, m/s^2 ; F_A 为交界面处的单位面积载荷, Pa ; n 表示法向单位矢量.

$$\begin{cases} -n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_i) \right) = -n \cdot \alpha \\ F_A = p_i n \end{cases} \quad (7)$$

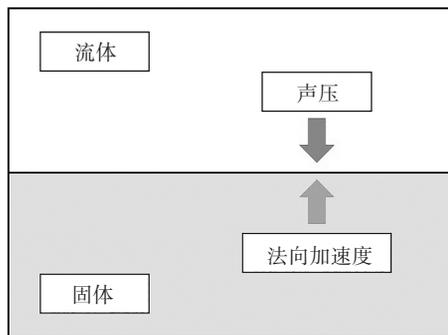


图 1 流-固交界面的耦合关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of coupling relationship of fluid-solid interface

1.2 220 kV GIL 仿真模型及边界条件设置

1.2.1 几何模型

根据 220 kV GIL 的结构尺寸,对其直管段、伸缩节单元、盆式绝缘子及气隔单元、支架单元建立相应的三维仿真模型.

伸缩节单元仿真模型如图 2 所示,其主要由中间的波纹管以及四周的限位拉杆组成. 对于单伸缩节侧面安装的铜/不锈钢软管连接,由于其由无数厚度为 0.05 mm 的金属箔组成,难以进行仿真建模,因此对这一部分进行简化.

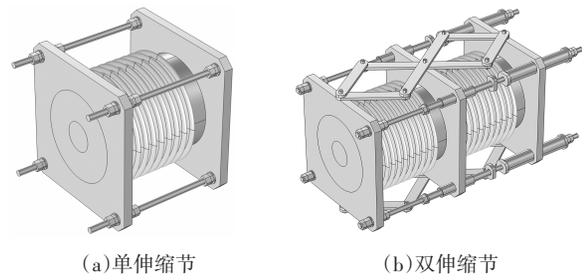


图 2 220 kV GIL 伸缩节三维仿真模型

Fig.2 Three-dimensional simulation model of 220 kV GIL expansion joint

气隔单元仿真模型如图 3 所示,其主要由两侧直管法兰、盆式绝缘子、导体以及导体屏蔽层组成. 盆式绝缘子采用弧形结构,相比于先前研究中常用的简化锥形结构更加接近于实际.

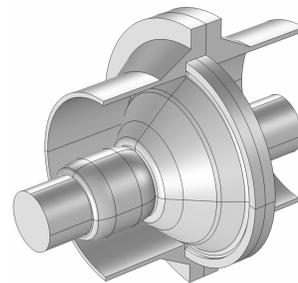


图 3 220 kV GIL 气隔单元三维仿真模型

Fig.3 Three-dimensional simulation model of 220 kV GIL gas basin insulators

支架单元仿真模型如图 4 所示,包括活动支架与固定支架两种.

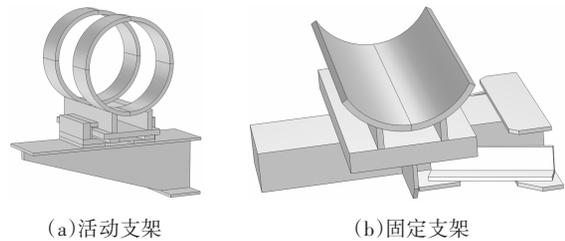


图 4 220 kV GIL 支架单元三维仿真模型

Fig.4 Three-dimensional simulation model of 220 kV GIL support unit

1.2.2 边界条件

实际的 GIL 长度很长,在构建仿真模型时考虑到 GIL 结构的重复性,往往只针对其中的一小段进行建模. 当 GIL 内的振动信号传播到模型两侧的边界时,不应该发生反射,因此模型的边界应该完全吸

收传播过来的波,通过在模型两侧设置无限长边界条件来模拟这一特征.

振动信号会随传播距离的增加而逐渐衰减,主要的衰减形式包括散射衰减、介质的吸收衰减以及扩散衰减^[20].在仿真过程中,认为 GIL 内各介质为均匀介质而忽略散射衰减,同时考虑到振动在 SF₆ 中的传播距离很短而忽略 SF₆ 气体的吸收衰减.振动信号在 GIL 固体域中的衰减使用阻尼描述.因为模拟振动信号在 GIL 中的传播过程是一个时域问题,因此采用瑞利阻尼的方式模拟 GIL 金属壳体中的阻尼.金属材料的阻尼比普遍较低,可以认为其为恒定阻尼比.铝的阻尼比在 0.000 2~0.002 之间,本文在仿真中取近似值 0.000 5.

在 GIL 仿真模型内部的流-固交界面添加声-结构耦合边界条件.同时将 GIL 金属壳体表面作为模型的外边界,设置没有约束和载荷的自由边界条件.这样无需对 GIL 外部的空气域进行建模,大幅降低了模型的计算量.

2 振动在 GIL 金属壳体中的传播特性

根据上述声-结构耦合有限元仿真方法建立 GIL 直管段仿真模型,沿 GIL 外壁径向施加冲击激励,研究振动信号在 GIL 金属壳体中的传播特性.

施加激励 3.5 ms 后,GIL 表面各点的位移变形场如图 5 所示;距离激励源 6 m 和 16 m 处探针得到的振动加速度时域波形如图 6 所示.因为当前振动在线监测系统均通过 GIL 金属外壳顶部放置的单轴加速度传感器监测径向振动信号,因此图 6 中的加速度是 GIL 金属外壳顶部各点加速度的径向分量.

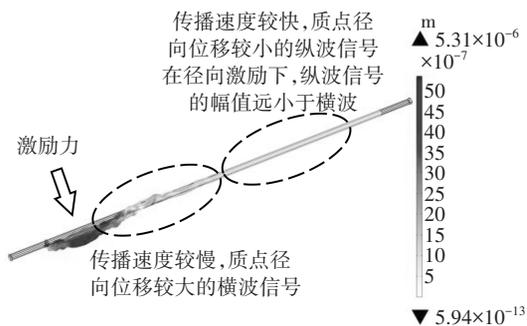


图 5 GIL 表面各点位移变形场图(径向激励)

Fig.5 Displacement and deformation diagram of GIL surface(Radial excitation)

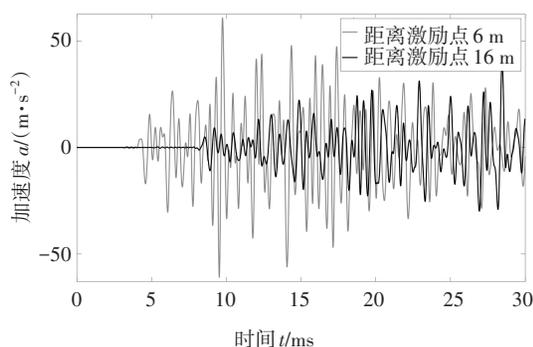


图 6 探针点振动加速度时域波形图(径向激励)

Fig.6 Time domain waveform of probe point vibration acceleration(Radial excitation)

由理论可知,在 GIL 管壁中传播的振动信号包含纵波和横波,根据两者质点振动方向与波传播方向之间的关系,由图 5 和图 6 可以得到以下结论:

①探针点的时域波形由前方传播速度较快的纵波和后方传播速度较慢的横波组成,纵波和横波波形的区分随着传播距离的增大而愈加明显.

②沿径向激励 GIL 金属壳体时,激励方式以激励横波为主,此时横波的径向加速度幅值远高于纵波.图 6 中位于时域波形前方的纵波幅值很小,仅为 0.3 m/s²左右.

③根据纵波与横波的传播机理,横波媒质质点的振动会与周围介质发生相互作用,产生较大的径向振动.对于 GIL 金属壳体而言,管壁中传播的径向振动会与 GIL 支架单元以及管内的 SF₆ 气体发生相互作用而辐射声能,造成能量衰减.相比之下,纵波在管壁中传播时,其径向位移与轴向位移相比要小得多.因此,横波相比于纵波衰减得更快.

对该 GIL 直管段模型金属壳体轴向施加冲击激励,其余条件保持不变,施加激励 3.5ms 后,GIL 表面各点的位移变形场如图 7 所示;距离激励源 6 m 和 16 m 处探针得到的振动加速度时域波形如图 8 所示.

对比径向与轴向激励下 GIL 表面各点位移变形场图与探针点径向振动加速度时域波形图可以看出,施加轴向激励时,探针点加速度径向分量中横波幅值明显降低,而纵波幅值相对于横波有所增加,证明轴向激励以激励纵波为主.

根据仿真结果,计算得到纵波在 GIL 直管段的波速为 6 211.18 m/s,接近其在铝合金中的理论速度

6 272.6 m/s;横波在 GIL 直管段的波速为 3 115.26 m/s,接近其在铝合金中的理论速度 3 159.7 m/s.

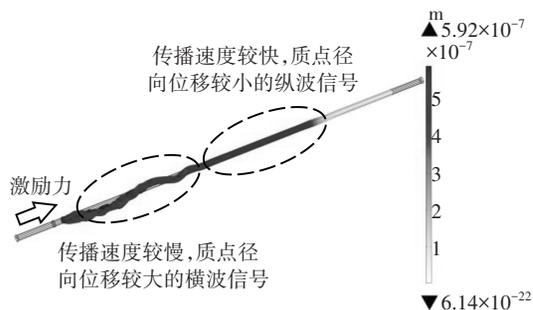


图7 GIL表面各点位移变形场图(轴向激励)

Fig.7 Displacement and deformation diagram of GIL surface(Axial excitation)

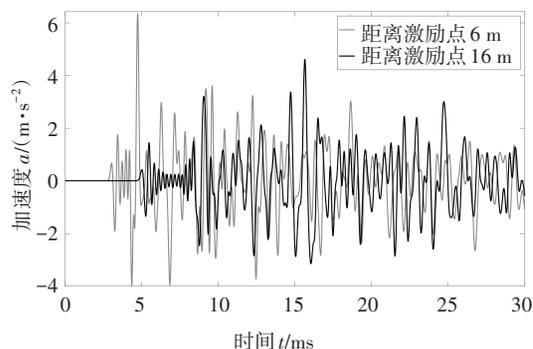


图8 探针点振动加速度时域波形图(轴向激励)

Fig.8 Time domain waveform of probe point vibration acceleration(Axial excitation)

3 试验研究与仿真对比

3.1 试验布置

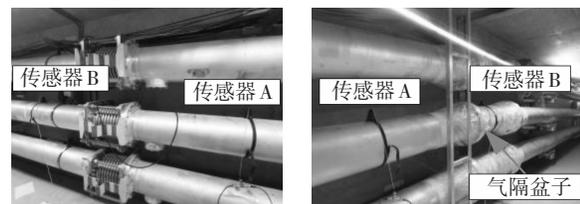
为准确测试振动经过 GIL 复杂壳体结构的传播特性,在南通 220kV GIL 现场开展了 GIL 管壁振动传播特性试验. 试验时 GIL 已完成充气,尚未加压投入使用,因此 GIL 壳体不存在电磁力以及磁致伸缩引起的持续低频振动,进一步降低了试验干扰.

在南通试验中,考虑到在真型 GIL 上进行击穿试验可行性低,同时真型 GIL 整体长度长,击穿位置不确定,难以准确研究振动经过 GIL 特定结构的传播特性,因此使用压电式冲击力锤敲击 GIL 外壳的方式产生激励声源,这也是在 GIS/GIL 击穿故障定位研究中模拟击穿声源的常用方式^[21-22].

南通 GIL 工程全线安装振动故障定位在线监测系统,该系统使用量程为 5g 的 IEPE 型单轴振动加速度传感器监测 GIL 发生绝缘故障时产生的径向振动信号,并基于时差法进行故障定位. 因为振动波阵面

到达 GIL 流-固界面时主要对壳体施加径向激励,导致沿 GIL 壳体传播的振动信号径向分量中的横波幅值远大于纵波,因此该系统使用横波作为故障定位的判断依据. 由于系统未考虑 GIL 复杂壳体结构对振动信号产生的影响,因此内置的振动波速统一为 1 900 m/s,低于横波在 GIL 外壳中的波速.

在试验中使用与振动故障定位在线监测系统同一型号的振动加速度传感器,试验布置如图 9 所示. 试验过程中,分别将传感器安装在 GIL 单伸缩节、双伸缩节、气隔单元等复杂壳体结构的两侧,通过在不同位置敲击 GIL 壳体产生激励,测取经过 GIL 各结构前后的振动信号.



(a)单伸缩节单元试验

(b)气隔单元试验

图9 试验布置示意图

Fig.9 Schematic diagram of test layout

3.2 220 kV GIL 复杂壳体结构振动传播特性

3.2.1 试验测量设备噪声分析

未加载敲击信号时,GIL 表面传感器采集到的噪声信号如图 10 所示,其主要包括环境背景噪声,传感器、信号调理器等设备的引入噪声以及信号采集装置的本底噪声等. 测量得到的噪声信号的平均幅值为 0.03 V,换算可得噪声信号的幅值约为 0.3 m/s².

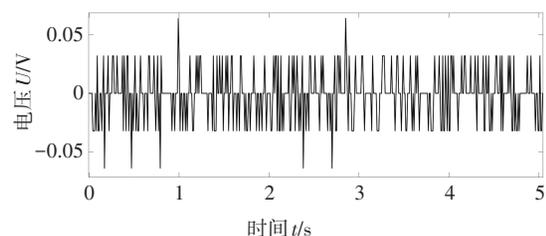


图10 未加载激励时传感器测得的噪声信号时域波形图

Fig.10 Time domain waveform of noise signal measured by the sensor when the excitation is not loaded

噪声信号频域波形图如图 11 所示,可见噪声信号主要集中在 0~2 000 Hz 的低频段以及 20 kHz 以上的高频段,在 330 kHz 附近的噪声振幅最大. 在后续分析中,使用低通滤波器对波形进行滤波处理,以消除高频噪声信号对有效振动信号产生的影响.

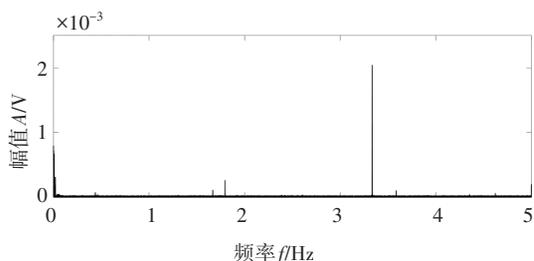


图 11 未加载激励时传感器测得的噪声信号频域波形图

Fig.11 Frequency domain waveform of noise signal measured by the sensor when the excitation is not loaded

3.2.2 振动在 GIL 直管段的传播特性

在 GIL 直管段两侧安装传感器,根据两传感器波形首波波峰时刻的差值计算振动信号在两传感器间的传播速度.分别改变两传感器间的距离、激励方式、传感器固定位置等进行不同工况的试验,试验结果如下表 1 所示.

表 1 220kV GIL 直管段实测典型波速

Tab.1 Typical wave velocity measured by 220kV GIL straight pipe section

试验工况	两传感器间波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	备注
1	6 315.79	轴向激励
	5 813.95	
	6 000	
2	3 125	径向激励
	3 012.05	
	3 225.81	
3	2 159.83	传感器 B 逆时针旋转 90° , 其余布置与试验工况 2 一致
	2 130.69	
	2 142.86	

从表 1 可以看出,施加以激励纵波为主的轴向激励时,位于波形前方的纵波信号幅值较大,此时根据两传感器测得波形首波波峰对应时刻的差值计算得到的波速,接近纵波在铝合金中的理论速度;施加以激励横波为主的径向激励时,位于时域波形前方的直达纵波的幅值很小,埋在噪声信号中无法区分,此时传感器测得波形中的首波实际上是位于纵

波之后的横波,因此计算得到的波速接近横波在铝合金中的理论速度.将试验结果与上一节中 GIL 直管段振动波速仿真结果进行比较,可见仿真结果与试验结果基本吻合.

对比试验工况 2 和 3 可以看出,当激励点、传感器 A、传感器 B 不处于同一条与轴线平行的直线上时,横波的传播距离实际上大于两传感器间的直线距离.因此在实际工程布置中振动故障定位在线监测系统的所有传感器均安装在 GIL 壳体的顶部位置,处于同一条与轴线平行的直线上.

3.2.3 振动经过 GIL 复杂壳体结构的传播特性

在 GIL 各复杂壳体结构两侧安装传感器,使用冲击力锤沿径向敲击 GIL 外壳,记录振动信号经过 GIL 复杂壳体结构前后的波形信号,如图 12 所示.

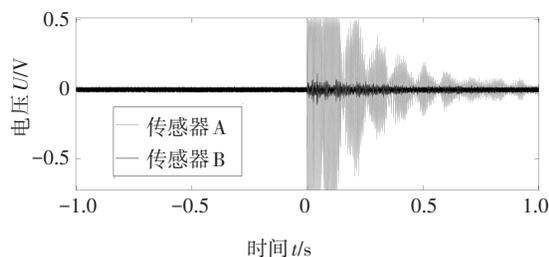


图 12 振动信号经过 GIL 双伸缩节前后的加速度波形
Fig.12 Acceleration waveform of vibration signal before and after GIL double expansion joint

如图 9 所示,在试验布置时,传感器固定点与复杂壳体结构间存在一段直管,因此振动信号在两传感器间传播的总时间是振动信号经过复杂壳体结构以及复杂壳体结构两侧直管段的时间之和.为了得到振动信号经过复杂壳体结构的等效波速,需要在总时间中减去振动信号在直管上的传播时间.根据先前仿真与试验结果,当对 GIL 外壳施加径向激励时,安装在 GIL 外壳顶部的单轴振动加速度传感器只能测得幅值较大的横波信号,幅值很小的纵波信号埋在噪声中无法区分,因此取横波在铝合金杆中的传播速度 $3 159.7 \text{ m/s}$ 作为直管段的波速.

在 GIL 的 B 相和 C 相分别开展试验,计算得到的振动信号经过 GIL 复杂壳体结构的等效波速如表 2 所示,每一组试验工况下的典型波速均为三组重复试验计算所得结果的平均值.

表2 220kV GIL 复杂壳体结构实测典型波速

Tab.2 Typical wave velocity measured by 220kV GIL complicated shell structure

GIL 结构	结构长度 L/m	结构典型 波速 $v/(m \cdot s^{-1})$	时延数 值 t/ms
单伸缩节	0.43	457.92	0.82
双伸缩节(带仪表管)	2.02	1 209.88	1.1
双伸缩节(仅波纹管)	0.82	748.74	0.91
气隔单元	0.06	490.89	0.11
弯管单元(一侧存在盆式绝缘子)	1.01	1 609.28	0.33
活动支架单元	0.4	915.94	0.32
固定支架单元	0.6	3 301.15	—

试验结果表明, 220 kV GIL 各复杂壳体结构会使当前振动故障定位在线监测系统所监测的横波振动信号产生 0.1~1.1 ms 不等的时延. 因此, 可根据实际振动故障定位在线监测系统传感器的布置方式, 在算法中综合考虑传感器间复杂壳体结构造成的振动信号时延量, 以实现故障点的进一步精确定位.

3.3 仿真与试验结果比较

为验证本文所提出的振动信号在 GIL 内传播过程数值模拟方法的正确性, 按照上述各试验工况建立与之对应的仿真模型, 如图 13 所示.

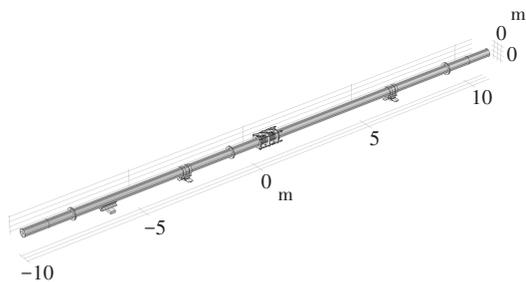


图 13 与试验工况对应的仿真模型

Fig.13 Simulation model corresponding to test condition

在 GIL 仿真模型外壳上与试验工况中力锤敲击位置相对应处添加激励力, 所添加的激励力波形由各试验工况中压电式冲击力锤输出的激励力波形拟合得到. 试验中压电式冲击力锤输出波形以及仿真模型中添加的激励力拟合波形如图 14 所示. 相比于直接采用力锤的输出波形, 使用拟合函数作为激励力可以有效减少仿真结果波形抖动的情况.

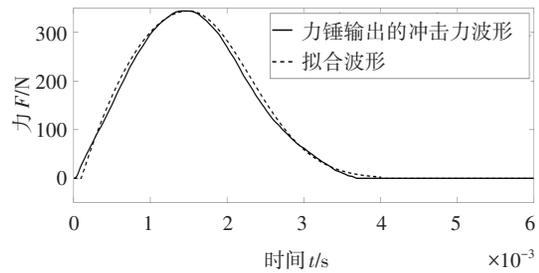


图 14 冲击力锤输出的激励力信号及其拟合波形

Fig.14 Exciting force signal output by impact hammer and its fitting waveform

仿真得到的含复杂壳体结构的 GIL 模型径向加速度分布场如图 15 所示. 在各仿真模型的复杂壳体结构两侧添加探针, 记录探针处的径向加速度时域波形, 如图 16 所示. 试验中测量得到的噪声信号的平均幅值为 0.3 m/s^2 . 为考虑噪声干扰带来的影响, 将仿真波形中第一个峰值大于 0.3 m/s^2 的波头作为首波, 认为其之前的波头在实际测量时均淹没在噪声信号中, 无法测得.

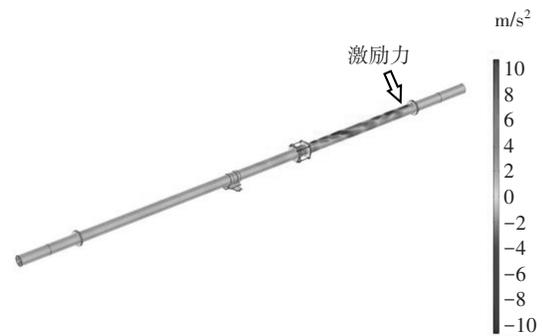


图 15 含单伸缩节的 GIL 仿真模型
径向加速度分布场图

Fig.15 Radial acceleration distribution diagram of GIL simulation modal with single expansion joint

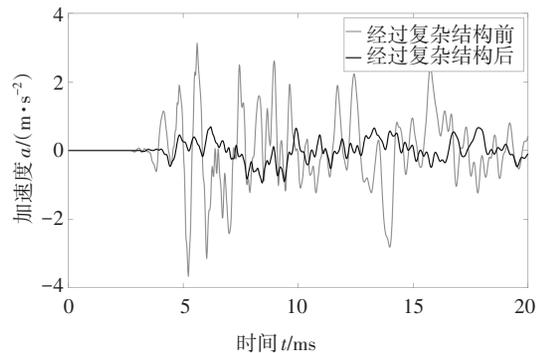


图 16 振动信号经过 GIL 单伸缩节前后的加速度仿真波形

Fig.16 Acceleration simulation waveform of vibration signal before and after GIL single expansion joint

以仿真得到的复杂壳体结构两侧探针处加速度波形的首波峰值点作为计算基准点,分别计算振动信号经过各种复杂壳体结构的典型波速,结果如表3所示。

表3 220kV GIL复杂壳体结构仿真典型波速

Tab.3 Typical wave velocity simulated by 220kV GIL complicated shell structure

GIL结构	结构典型波速 $v/(m \cdot s^{-1})$
单伸缩节	653.85
双伸缩节(带仪表管)	1 161.11
双伸缩节(仅波纹管)	809.09
气隔单元	507.04
弯管单元(一侧存在盆式绝缘子)	1 545.45
活动支架单元	1 052.63
固定支架单元	3250

对比表2和表3可以看出,振动信号经过GIL各复杂壳体结构的传播速度仿真值与试验值较为接近,证明了振动信号在复杂壳体结构GIL内传播过程的声-结构耦合有限元数值模拟方法的正确性与有效性。

4 结论

本文基于多物理场耦合技术,提出了一种振动信号在GIL内传播过程的声-结构耦合有限元仿真方法,并对220kV真型GIL开展试验与仿真研究,得到了如下结论:

(1)GIL壳体受到径向激励时,沿壳体传播的振动信号中横波振幅远大于纵波,幅值很小的纵波信号容易淹没在现场噪声之中不易于区分。

(2)通过现场试验获得了径向激励下横波振动信号经过GIL各复杂壳体结构的典型波速与时延数值,所得结果可以直接用于改进基于时差法的振动故障定位算法,即从总时差中减去复杂壳体结构所造成的时延量,进而忽略复杂壳体结构的影响,将实际GIL等效为纯直管段,按振动在直管段的传播速度计算故障点所在位置。

(3)按照试验工况建立1:1仿真模型,对比仿真与试验结果证实了本文数值模拟方法的正确性与有

效性。本文提出的分析方法可以推广到各种电压等级GIL设备振动信号传播规律的研究中,为当前故障定位在线检测系统的性能提升提供依据。

参考文献

- [1] 高克利,颜湘莲,刘焱,等. 环保气体绝缘管道技术研究进展[J]. 电工技术学报,2020,35(1):3-20.
GAO K L, YAN X L, LIU Y, *et al.* Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 3-20. (In Chinese)
- [2] 汪泓,康添慧,饶夏锦,等. 高压同轴GIS母线三维磁-热耦合场的计算与分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(8):73-77.
WANG F, KANG T H, RAO X J, *et al.* Analysis and calculation of magnetic-thermal coupled field for high-voltage coaxial GIS busbar[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(8): 73-77. (In Chinese)
- [3] 李鹏,阎湘莲,王浩等. 特高压交流GIL输电技术研究及应用[J]. 电网技术,2017,41(10):3161-3167.
LI P, YAN X L, WANG H, *et al.* Research and application of UHVAC gas-insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3161-3167. (In Chinese)
- [4] 肖登明,阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术,2017,43(3):699-707.
XIAO D M, YAN J D. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707. (In Chinese)
- [5] MAGIER T, TENZER M, KOCH H. Direct current gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 440-446.
- [6] XU Y P, QIAN Y, SHENG G H, *et al.* Simulation analysis on the propagation of the optical partial discharge signal in I-shaped and L-shaped GILs[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1421-1428.
- [7] 詹振宇,宋曼青,律方成,等. 交流环保GIL中微粒运动规律及陷阱抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(S1): 278-286.
ZHAN Z Y, SONG M Q, LU F C, *et al.* Study on particle movement and trap suppression in AC environmentally friendly GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 278-286. (In Chinese)
- [8] 黄捍志. GIS局部放电超声信号传播特性及检测系统设计[D]. 长沙:湖南大学,2016:3-5.
HUANG C Z. Research on propagation characteristics of partial discharge ultrasonic signals in GIS and design of detection system

- [D]. Changsha: Hunan University, 2016: 3-5. (In Chinese)
- [9] 张雅林, 钱家骊. GIS内部局部放电引起壳体振动的试验研究[J]. 高压电器, 1989, 25(4): 13-16.
ZHANG Y L, QIAN J L. The experimental study of vibration in enclosure of GIS by internal partial discharge [J]. High Voltage Apparatus, 1989, 25(4): 13-16. (In Chinese)
- [10] FEI Y, LIU Y P, CHEN J B, *et al.* The attenuation and propagation law of ultrasonic wave in UHV gas insulated line [J]. IEEE Access, 2020, 8: 163308-163315.
- [11] OKUTSU N, TAKAHASHI Y, MATSUDA S, *et al.* Pattern recognition of vibrations in metal enclosures of gas insulated equipment and its application [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(6): 2733-2739.
- [12] 屈斌, 张利, 王永宁, 等. 基于振动信号的GIS机械松动与局部放电诊断方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 98-106.
QU B, ZHANG L, WANG Y N, *et al.* Study of mechanical looseness and partial discharge diagnoses of GIS based on vibration signals [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 98-106. (In Chinese)
- [13] 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 J Y, ZHU M X, SHAO X J, *et al.* Simulation on ultrasonic propagation characteristics of partial discharge in ultra-high voltage GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 67-75. (In Chinese)
- [14] 腾云, 杨景刚, 马勇, 等. GIL击穿放电低频声场仿真[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 906-914.
TENG Y, YANG J G, MA Y, *et al.* Low frequency acoustic field simulation of GIL disruptive discharge [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 906-914. (In Chinese)
- [15] 刘通, 腾云, 杨景刚, 等. 基于可听声的GIL设备交流耐压击穿放电定位研究[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 26-32.
LIU T, TENG Y, YANG J G, *et al.* Study on AC withstand voltage breakdown discharge location of GIL equipment based on audible-signal [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 26-32. (In Chinese)
- [16] 刘云鹏, 费焯, 陈江波, 等. 特高压GIL故障定位超声衰减特性及试验研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3186-3192.
LIU Y P, FEI Y, CHEN J B, *et al.* Ultrasonic attenuation characteristics and its experimental research for UHV GIL fault location [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3186-3192. (In Chinese)
- [17] 晏致涛, 李孟珠, 熊辉, 等. 考虑高差覆冰输电线路链式脱冰振动[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 115-121.
YAN Z T, LI M Z, XIONG H, *et al.* Zippered deicing vibration of an iced transmission line considering altitude difference [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 115-121. (In Chinese)
- [18] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 3版. 南京: 南京大学出版社, 2012: 110-116.
DU G H, ZHU Z M, GONG X F. Fundamentals of acoustics [M]. 3rd ed. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 110-116. (In Chinese)
- [19] 李世芸, 肖正明. 弹性力学及有限元[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 8-12.
LI S H, XIAO Z M. Elasticity and finite element [M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 8-12. (In Chinese)
- [20] LUNDGAARD L E. Partial discharge. XIII. Acoustic partial discharge detection-fundamental considerations [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-31.
- [21] 徐鹏, 苏勇令, 贺林, 等. 振动测试技术在GIS耐压试验故障定位中的应用研究[J]. 华东电力, 2014, 42(1): 23-27.
XU P, SU Y L, HE L, *et al.* Vibration test system using in breakdown location of GIS withstand voltage test [J]. East China Electric Power, 2014, 42(1): 23-27. (In Chinese)
- [22] 马文长, 马博辉, 何宁辉, 等. 基于声源信号的GIL击穿性放电定位研究[J]. 宁夏电力, 2021(2): 28-34.
MA W C, MA B H, HE N H, *et al.* Research on location of GIL breakdown discharge based on acoustic signal [J]. Ningxia Electric Power, 2021(2): 28-34. (In Chinese)