

文章编号: 1674-0629(2024)11-0023-08

中图分类号: TM83

DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2024.11.003

阀段均压电极垢层超声导波检测分析

魏加强¹, 王帅², 高兵^{2,3}, 黄驰², 黄晨浩²

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 3. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 目前换流站中均压电极垢层厚度检测采用输电系统停运加人工拆卸的方式, 存在较大的时间、人力成本以及结垢均压电极筛选的盲目性问题, 亟需一种非拆卸式均压电极垢层在线检测方式。超声导波具有检测效率高、能量衰减度小等优点, 因此基于超声导波提出了一种非拆卸式的均压电极垢层厚度在线检测方法, 并结合仿真及实验分析验证了其有效性。首先通过绘制聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)充水管道的频散曲线确定了超声导波大致激励频率范围为40~100 kHz, 并采用纵向L(0, 2)模式; 然后进一步建立PVDF充水管道轴向纵截面有限元模型, 通过计算确定了最佳激励频率为60 kHz, 并基于此模型分析了垢层厚度与接收信号幅值和时间上的变化规律, 同时通过搭建实验平台对超声导波检测均压电极方法进行了验证。研究结果表明, 采用纵向L(0, 2)超声导波检测均压电极垢层具有模式数量少、频散弱等优势, 且对不同垢层厚度的均压电极具有较好区分能力, 为均压电极垢层无损检测提供了一定应用基础。

关键词: 阀冷系统; 频散曲线; 超声导波; 均压电极; 超声时域分析

Analysis on Ultrasonic Guided Wave Detection for Scale Layer of Equalizing Electrode on Valve Section

WEI Jiaqiang¹, WANG Shuai², GAO Bing^{2,3}, HUANG Chi², HUANG Chenhao²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: At present, the detection of the thickness of the scale layer on the equalizing electrode in the converter station is carried out by shutting down the transmission system and manually disassembling, which has significant time, labor costs, and blind screening of the equalizing electrodes with the scale layer. There is an urgent need for a non disassembly online detection method for the scale layer on the equalizing electrode. Ultrasonic guided waves have the advantages of high detection efficiency and low energy attenuation. Therefore, based on ultrasonic guided waves, a non disassembly online detection method for the thickness of the scale layer on the equalizing electrode is proposed, and its effectiveness is verified through the simulation and experimental analysis. Firstly, by drawing the dispersion curve of polyvinylidene fluoride (PVDF) filled water pipeline, the approximate excitation frequency range of ultrasonic guided waves is determined to be 40~100 kHz, and the longitudinal L(0,2) mode is also determined. Then, a finite element model of the axial longitudinal section of the PVDF water filled pipeline is further established, and the optimal excitation frequency is determined to be 60 kHz through calculation. Based on this model, the variation patterns of scale layer thickness and received signal amplitude and time are analyzed. At the same time, an experimental platform is built to verify the ultrasonic guided wave detection method of the equalization electrode. The research results indicate that using longitudinal L(0,2) ultrasonic guided waves to detect the scale layer on the equalizing electrode has advantages such as fewer modes and weaker frequency dispersion, and has good discrimination ability for the equalizing electrode with different thickness of scale layers. This method provides a certain application basis for non-destructive testing of the scale layer on the equalizing electrodes.

Key words: valve cooling system; dispersion curve; ultrasonic guided wave; equalizing electrode; ultrasonic time-domain analysis

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52007013); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A521N006)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (52007013); the Science and Technology Project of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. (5216A521N006).

0 引言

特高压直流输电工程为中国能源大范围优化配置发挥了重要作用,而换流阀作为直流输电系统的关键设备,直接影响直流输电的稳定性和安全性^[1-4]。在实际运行中,由于大功率晶闸管工作过程中会产生大量热量,目前常采用基于去离子水的冷却系统对换流阀内部进行散热,以维持可靠温度环境。然而在阀冷水路与换流阀具有高电压差的工作条件下,二者之间通常会产生泄漏电流加速散热器等金属构件的腐蚀。虽然为抑制泄漏电流的产生,通常在水路中安装均压电极,但仍无法避免,并且腐蚀产生的金属离子容易在电场、湍流等的作用下被吸附到电极表面形成垢层^[5-7]。垢层的存在会抑制均压电极的作用,脱落的垢层甚至可能导致水路漏水、堵塞、电抗器和水冷电阻损坏等故障,严重威胁着高压直流输电系统的可靠运行^[8-9]。然而,目前均压电极垢层检测方法效率低下,人工拆卸检修的方式不仅费时费力、具有很大的盲目性,而且容易增加漏水风险,威胁输电系统安全,亟需探索一种具有非拆卸式、非损伤优点的垢层厚度在线检测方法,从而节约物力人力,提高输电系统安全性。

超声导波作为一种具有单点激励、传播距离长、覆盖截面广、能量衰减小等优点的信号^[9-10],已经广泛应用于金属结构健康监测、管道无损检测等多个领域。超声导波在国外研究起步较早,理论应用研究较为全面。早在1958年文献[11]就分析了板壳理论和轴对称假设的局限性,并提出了线弹性理论,推导出了频散方程。后续文献[12]又得到了描述纵向模态和扭转模态导波在空心圆柱壳中传播的理论表达式,并数值求解绘制了频散曲线。国内超声导波研究相较落后,多集中于超声导波的应用方面,如对管段、板材、棒材等结构的缺陷检测等。在超声导波管道无损检测中,尤其是纵向L(0,2)导波以其模态少、频散弱、波形简单等优势得到广泛应用。文献[13]利用纵向L(0,2)模态超声导波对管道裂纹损伤进行检测,并通过分析不同回波信号的特征参数实现了对缺陷的定位。文献[14]同样利用纵向L(0,2)超声导波对损伤管道以及焊接弯管进行识别与定位,结果表明L(0,2)超声导波对管段损伤定位及损伤程度判断具有可行

性,且在直管中效果更好。文献[15]以纵向L(0,2)导波对污垢管道检测可行性进行实验分析,结果证明具有实用意义。在空心管道中,超声导波频散情况较为简单,且指定模态易于激励,而在充液管道中由于管道与液体的耦合效应,超声导波的频散与模态分布情况变得十分复杂,将出现模态分支现象。文献[16]研究结果表明充水钢管中具有模态分支、群速度降低等传播特性,但是当充水钢管中纵向模态的频带处于未受干扰的模态分支部分时,超声导波依旧适用于长距离充水管道的缺陷检测。文献[17]进一步验证了L(0,2)模态导波用于充水管道检测的可行性。文献[18]研究了层状充液管道的频散特性,并对层状充液管道外壁损伤进行了试验分析,结果表明纵向模态超声导波可用于充液管道缺陷检测。文献[19]介绍了一种基于频散与有限元仿真方式的可溶性聚四氟乙烯物(Polyfluoroalkoxy, PFA)管道导波模态选择方式。纵向超声导波在空心管道损伤检测、充液管道损伤检测、液体测量等方面都具有较好的效果,但是后两者相关研究依旧较少,对于充液管道内液体区域的固体检测研究更少。文献[20]利用纵向L(0,2)超声导波对均压电极的垢层检测进行了一定的研究,结果证明该类型超声导波检测具有可行性,但是频率选择方式与效果欠佳。

本文依据超声导波在管道缺陷检测方面的优越性,针对阀冷系统均压电极垢层厚度的检测问题,提出一种基于纵向L(0,2)超声导波的非拆卸式在线检测方法。该方法基于超声导波频散理论和有限元模型仿真分析选取最佳导波激励频率和声学信号与垢层厚度变化的规律,然后通过实验装置实测综合验证其可行性。相比传统的检测方法,该方法具有无需停机、检测精度高、检测速度快等优点,可以大大提高输电系统的安全性和运行效率。

1 超声导波频散理论

1.1 频散曲线绘制

超声导波是指在有限边界的介质内,基本超声波在传播时遇到内、外两个界面,声波发生折射、反射和波形转换现象,多种形式的声波叠加干涉、几何弥散,最终形成一种具有明显方向性的机械弹性波^[21]。这种波的波速与波导的材料密度、杨氏模量、泊松比等参数密切相关。超声导波具有频

散特性和多模态特性^[22]。频散特性与超声导波的相、群速度相关,其相速度指单一频率波的同一相位的传播速度,群速度是指多种波叠加形成的波包的传播速度,而当存在多组相速度不同的波时,则会发生频散现象,体现在群速度则是波包的发散。多模态特性是指同一介质内在同一频率下的超声导波存在多个不同的群、相速度。

当传播介质一定时,超声导波的频散特性和多模态特性通常可绘制为频散曲线图,而超声导波的频散曲线可通过求解相应的频散方程得到。根据弹性力学理论,管道中超声导波的波动过程可由 Navier 控制方程给出^[20, 23]。

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为导波位移场; μ 和 λ 为材料的 Lamé 常数; ρ 为材料密度。

其中管壁内导波位移场 $\mathbf{u}$ 可以分解为标量势 ϕ 和矢量势 $\mathbf{H}$, 公式表述为:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

对于充液管道中各个界面的边界条件,通过分析可知,管道外表面为自由边界条件,其应力分量为 0, 公式表述为:

$$\begin{cases} (\sigma_{rd})_{r=b} = 0 \\ (\sigma_{rz})_{r=b} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{rd} 、 σ_{rz} 分别为半径 r 处的径向应力和轴向应力; r 、 b 分别为管道径向位置和管道外径位置; 下标 z 为轴向, d 为径向。

对于管道内非粘性液体中的超声导波,其导波的传播过程仍然符合式(1),但其位移场 $\mathbf{u}^f$ 只能用标量势 ϕ^f 表示,即:

$$\mathbf{u}^f = \nabla \phi^f \quad (4)$$

对于管道与液体的固-液交界面,由于固体与液体的连续性,因此径向位移 u_r 和径向应力分量 σ_{rd} 连续。另外考虑液体无法承受剪应力,因此固-液交界面的轴向应力分量 σ_{rz} 为 0, 可表述为式(5)。

$$\begin{cases} (u_r)_{r=a}^p = (u_r)_{r=a}^f \\ (\sigma_{rd})_{r=a}^p = (\sigma_{rd})_{r=a}^f \\ (\sigma_{rz})_{r=a}^p = (\sigma_{rz})_{r=a}^f = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ 为应力分量; u 为位移; b 为管道外半径; a 为管道内半径; 上标 p 表示管道; 上标 f 表示液体。

将上述边界条件代入到式(1)、(2)、(4)中,

同时代入多个与材料相关的常量参数,可得到一组特征方程,其矩阵形式为:

$$\mathbf{D}\mathbf{Y} = \mathbf{0} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Y} = [\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2 \ \mathbf{C}]^T$, $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 和 $\mathbf{C}$ 为计算过程中的待定系数矩阵; $\mathbf{D}$ 为 5×5 系数矩阵^[22]。

若要使得特征方程有非零解,则其系数行列式必为 0, 如式(7)所示^[22]。

$$\mathbf{D} = \mathbf{0} \quad (7)$$

因此式(7)即为充液管道中超声导波的频散方程,该方程为超越方程,需要数值求解。

针对本文研究对象,阀冷系统阀段主水路处的管道相关材料参数如表 1 所示,以此绘制出其超声导波纵向模态的相速度、群速度曲线如图 1 所示。

表 1 充液管道材料各项参数

Tab. 1 Various parameters of liquid filled pipeline materials

充液管道材料	参数	数值
PVDF	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 780
	压力波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 656
	剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	676
Water	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000
	声速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 480
	管壁外半径/mm	37.5
	管壁内半径/mm	3.6

根据图 1 中相速度、群速度频散曲线,可见在 0~250 kHz 范围内,出现了 9 条纵向模态速度曲线 L(0, 2)、L(0, 10), 而曲线波动程度反映了该模态频散特性的强弱。为了使超声导波具有较好的形式与检测性能,应当选择导波模态数量较少、频散特性较弱的频率范围^[23]。结合图 1 相、群速度频散曲线,可见波动较弱频率范围有 40~100 kHz、135~185 kHz 两段,但模态数量较少即曲线较少的频率范围明显为 40~100 kHz,而且较为符合条件的模态为纵向 L(0, 2)模态,适合作为本文研究问题所需超声导波的激励频率与激励模态,但仅通过频散曲线只能大致选择频率范围,因此为进一步筛选频散较弱的激励频率,本文继续通过构建有限元模型进行分析。

1.2 激励信号选择

通常超声导波的激励脉冲在频域内具有一定的宽度,这种宽度对于超声导波的多模态特性以及频

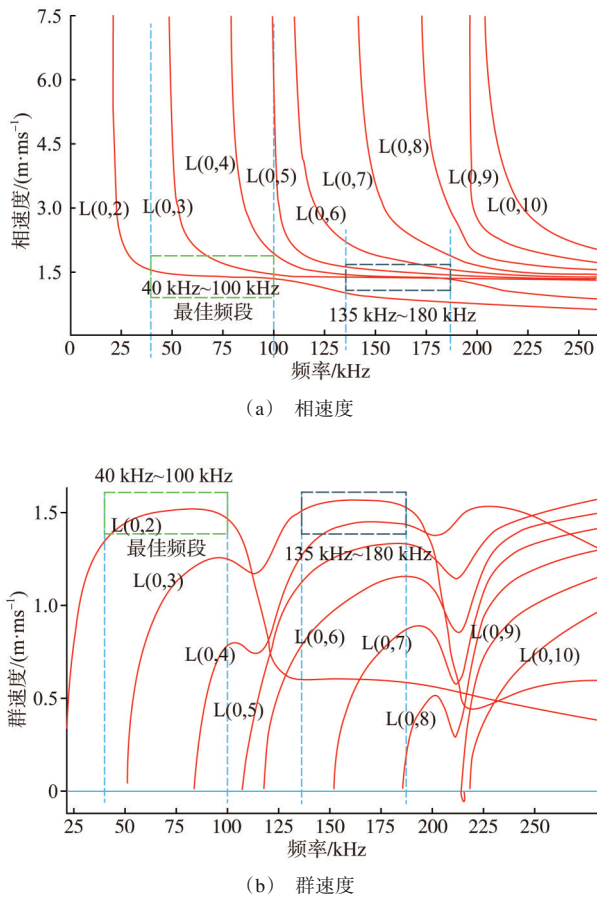


图1 PVDF充液管道纵向模式频散曲线

Fig. 1 Longitudinal mode dispersion curves of PVDF liquid filled pipeline

散特性是不利的。为了削弱这种不利因素，希望激励脉冲具有较高的能量并且具有较窄且集中的频谱，所以需要激励信号采用一定的方式进行调制。汉宁窗函数便是常用于激励纵向超声导波的调制函数^[24]，它可以有效减少信号频谱旁瓣干扰，保证信号频谱主要集中于主瓣方向。因此，本文采用经汉宁窗调制的5周期正弦函数作为激励信号，从而有效地提高激励和接收信号的质量和信噪比，提高检测的可靠性和准确性，其时域波形如图2所示。

2 有限元仿真模型

2.1 模型设置及网格划分

为了进一步分析40~100 kHz频率范围内更合适的激励频率，同时考虑有限元模型的计算效率。本文依据超声导波激励与待检测对象均压电极及垢

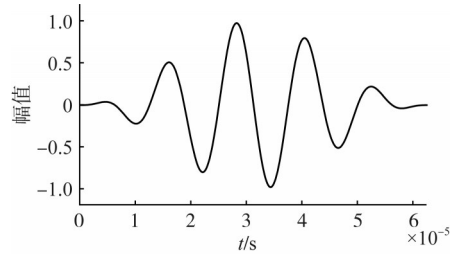


图2 5周期汉宁窗调制正弦波

Fig. 2 Five periods Hanning window modulation sine wave

层的位置，选择PVDF充液管道的轴向纵截面为仿真对象，构建了建模简单、计算速度快，且能有效分析变化规律的二维有限元模型。

该二维有限元模型长度为1 000 mm，宽度为75 mm，上下边界分别设置3.6 mm宽的区域作为管壁，中部67.8 mm宽的区域作为液体。同时在模型两端、中部划分10 mm宽的矩形区域，方便后续加载边界条件和均压电极。整个模型基于“固体力学”和“压力声学-瞬态”物理场构建。

纵向超声导波为轴对称模式，而且在本研究目标中需要其指向均压电极位置，所以激励源至少应对称加载^[25-27]，同时考虑实际中接收装置常常置于管壁侧壁位置，所以将接收端口至于侧壁。在本文模型中激励边界设置为截面一侧端边界，接收端口设置为侧端短边处。整体模型以及边界条件设置如图3所示。

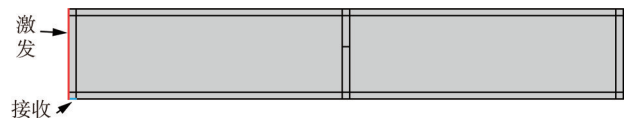


图3 有限元模型及边界条件设置

Fig. 3 Finite element model and boundary condition settings

有限元模型主要以矩形网格进行剖分，当模型中加入电极、垢层之后，由于几何不规则性，附近区域无法统一划分为矩形网格，因此将均压电极附近区域通过矩形划出并采用三角形网格剖分方式，其余部分采用不大于材料内声波波长1/8的矩形网格方式剖分^[25]。各部分网格剖分形式如图4所示。

对于模型中的矩形网格区域，令其每个矩形的大小不超过材料内相应频率下波长的1/8。对于模型中的自由三角形网格区域，管壁处网格大小设置为PVDF材料横波声速对应相应频率波长的1/10，液体处网格大小设置为水中声速对应相应频率波长

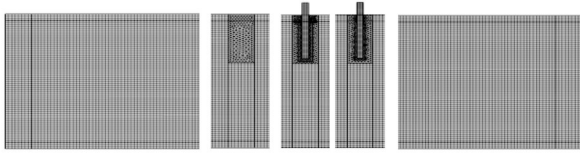


图 4 模型各部分网格划分情况

Fig. 4 Grid division of various parts of the model

的 1/10, 垢层处网格采用内置“超细化”方式划分。

2.2 最佳激励频率确定

基于上述建立的二维有限元模型分别针对无电极、有电极模型进行仿真。首先以管道中无电极模型进一步探寻超声导波多模态与频散特性对检测效果影响更小的频率范围, 然后加入电极再次仿真从而确定具有最佳检测效果的频率, 进而确保后续含有垢层均压电极在进行超声导波检测时具有最佳效果。对 40~100 kHz 范围内, 本着较小步长且不过度增加仿真次数的原则采用 10 kHz 步长进行仿真, 同时为了使仿真波形更加平滑, 基于最大导波频率 100 kHz 在其每个周期内采集 20 个点, 即采集间隔为 $0.5 \mu\text{s}$, 得到如图 5—6 所示的结果, 其超声导波信号幅值在仿真中以压力均值表示。

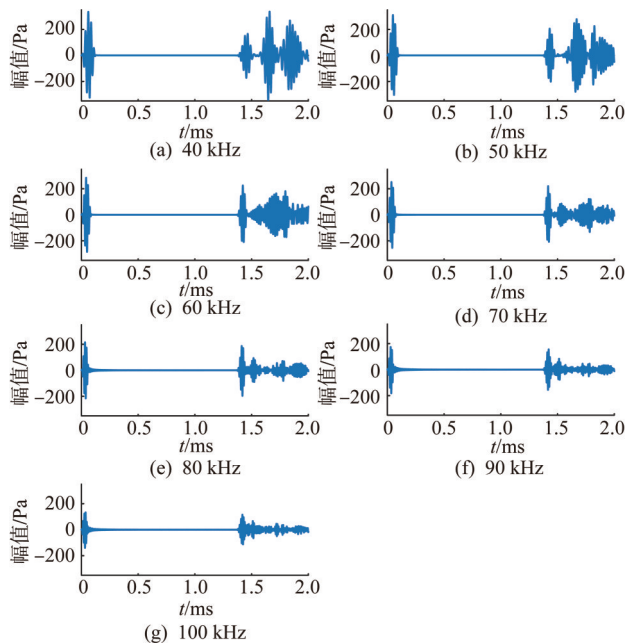


图 5 无电极时仿真结果

Fig. 5 Simulation results without electrodes

在图 5 中, 位于 0 ms 附近的信号波形为超声导波发射波, 位于 1.5 ms 附近的波形为右侧管壁反射波; 在图 6 中 0.5~1 ms 范围内新增的波形即为均压

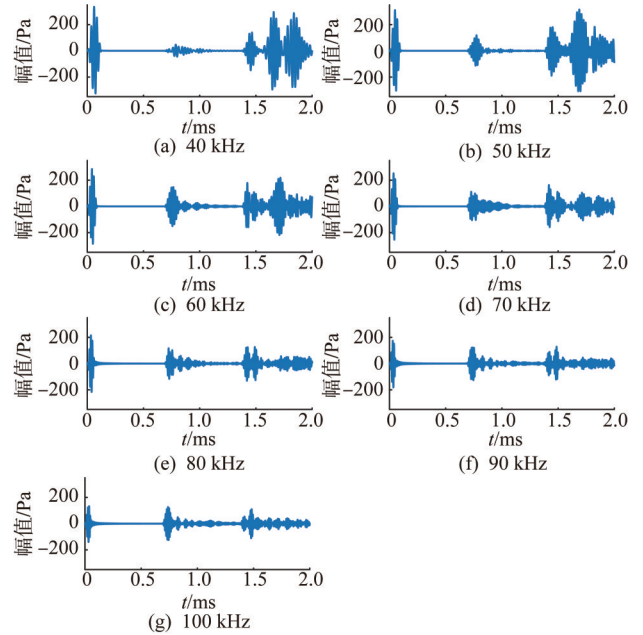


图 6 有电极时仿真结果

Fig. 6 Simulation results with electrodes

电极反射波。结合分析图 5—6 中发射和右侧管壁反射信号对应的幅值以及时间宽度, 可以发现随着频率的上升, 导波发射信号的压力幅值逐渐降低, 在 40~70 kHz 时幅值较大, 而在 80~100 kHz 时该簇信号末端逐渐出现衰减特性, 与超声导波的多模态特性相关。右侧管壁反射检测信号随着频率的上升幅值呈现先增大后减小的现象, 在 50~70 kHz 时幅值最大, 时间宽度上因为导波的频散以及模态转换现象显得十分复杂, 且随着频率的增大, 波包数量增多, 不过首波波形依旧十分清晰, 且 50~60 kHz 较佳。进一步分析图 6 中均压电极反射检测信号, 相比于 50 kHz, 60 kHz 时的电极反射信号波形模态数量以及频散现象同样较弱, 但是信号幅值以及时域清晰度都明显优于 50 kHz, 更大的幅值、较少的模态数量及较弱的频散效应对于含垢层的均压电极超声导波检测将会有更好的效果, 因此本文确定最佳激励频率为 60 kHz。

2.3 垢层仿真结果分析

为研究均压电极不同厚度的垢层与 60 kHz 超声导波的交互现象, 在均压电极的外表面添加一定厚度的多孔氧化铝垢层, 物理场相应增加“达西定律”, 所需的各项参数如表 2 所示。垢层厚度分别设置为 1.5 mm、1.0 mm、0.5 mm、0 mm 4 种情况。

表 2 氧化铝多孔垢层参数^[20]

Tab. 2 Parameters of alumina porous scale layer

孔隙率	渗透率/ m^2	动力粘度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Biot-Willis 系数	流体的可压 缩性
0.47	8×10^{-10}	0.001	1	0.048 5

以 1.5 mm 厚的垢层模型为例, 纵向轴对称超声导波与电极和垢层交互过程中的管壁位移与液体压力分布云图如图 7 所示。

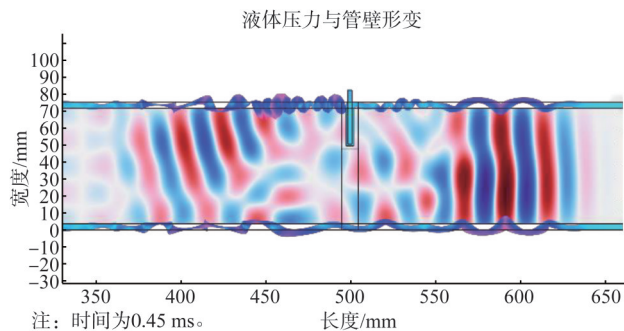


图 7 压力、位移分布云图

Fig. 7 Cloud chart of pressure and displacement distribution

根据图 7 中的压力与位移分布, 可知当超声导波在传播过程中遇到电极时, 会发生透射与反射现象, 透射导波形几乎仍然保持为轴对称形式, 但是反射导波彻底失去了轴对称形式, 呈现以均压电极为中心的辐射形式, 同时在电极的安装位置首先发生了模态转换, 波形变得更加复杂。

仿真计算 4 种垢层厚度下接收端采集的压力均值信号, 并绘制如图 8 所示的波形图, 同时对电极反射信号的最大幅值点进行幅值采集、对电极反射信号最大幅值波峰过零处时间进行采集绘制出幅值、时间随垢层变化趋势图如图 9 所示。

依据图 9 中波形, 不同垢层厚度下的电极反射

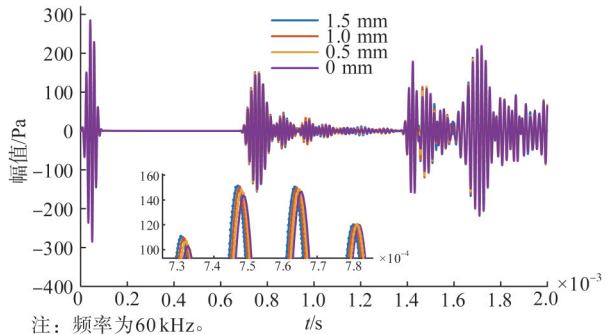


图 8 不同垢层厚度下接收信号

Fig. 8 Received signals under different scale layer thicknesses

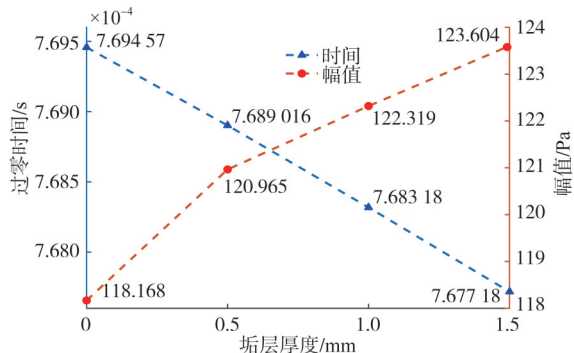


图 9 仿真幅值和时间随垢层厚度变化

Fig. 9 Simulation changes in amplitudes and times with the thicknesses of the scale layer

信号基本保持一致, 通过细节图可知随垢层厚度增加, 电极反射信号幅值逐渐增大, 而且时间上也逐渐前移。分析超声导波在 PVDF 充液管道中的传播过程可知, 垢层厚度的增加使得电极反射声信号传播路程缩短, 进而声能量损失减少, 从而造成时间与幅值上的区别。不同垢层厚度的反射声信号表明, 60 kHz 超声导波具有区分均压电极垢层厚度的能力, 且具有好的规律性。

3 实验平台结果验证

为了验证仿真结论的真实性, 搭建了阀冷系统阀段主水路处均压电极垢层厚度检测实验平台, 设备连接图如图 10 所示。

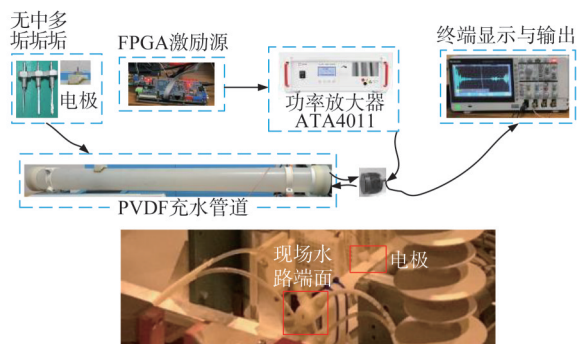


图 10 设备连接图

Fig. 10 Equipment connection diagram

5 周期汉宁窗调制正弦激励信号由 FPGA 输出, 经由功率放大器放大后接入 60 kHz 的超声探头, 超声探头通过夹具固定, 采用侧向加载与侧向接收方式, 最大程度保证轴对称形式信号以及接收回波幅值。对无垢层电极 (0 mm)、中等垢层厚度电极 (0.12 mm)、厚垢层厚度 (0.39 mm) 电极分别进行

超声导波检测,并通过示波器采集数据,将3组数据降噪后绘制出如图11所示波形图。另外根据电极反射波,将图11中子坐标图内波形最大值及其过零时间绘制出如图12的关于垢层厚度的变化趋势图。

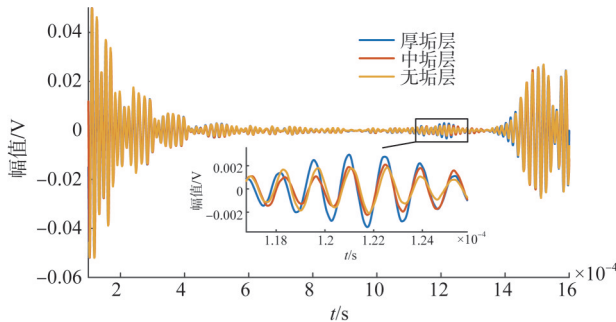


图 11 实验检测信号

Fig. 11 Experimental detection signal

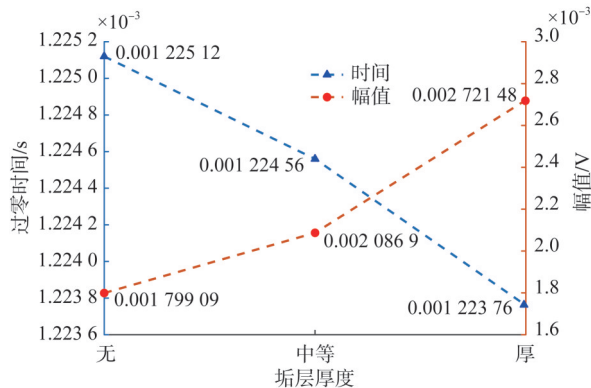


图 12 实验幅值和时间随垢层厚度的变化图

Fig. 12 Experiment variation of amplitudes and times with the thicknesses of the scale layer

与仿真结果类似地,多种不同垢层厚度下超声探头接收到的信号基本一致,只在电极反射信号处和端面反射信号处有所差别。其中电极反射信号细节图波形同样呈现出随着垢层厚度的增加而信号幅值增加,时间上粗略呈现随着垢层厚度的增加而逐渐前移,这大概率是实际探头抖动或者降噪过程中的偏差导致的,但规律趋势基本一致。实验平台检测结果表明,60 kHz的超声导波具有较好的区分不同垢层厚度均压电极的能力,且具有较好的变化规律,因此本文提出的均压电极超声导波在线检测方法具有可行性。

4 结论

本文针对当前阀冷系统均压电极结垢厚度检测

低效问题,提出了一种基于超声导波的非拆卸式在线检测方法。本文通过频散曲线、二维有限元仿真模型分析、实验平台检测综合验证了该方法的可行性,并得出以下结论。

1) 当轴对称纵向超声导波在PVDF充水管道中传播时,频率在40~100 kHz时导波模态数量较少,且纵向 $L(0, 2)$ 模态频散较弱,适用于检测。

2) 在轴对称超声导波有限元仿真中,矩形网格剖分方式具有最佳计算效果,同时仿真结果证明60 kHz附近时纵向 $L(0, 2)$ 在本研究中具有最佳检测效果。

3) 不同垢层厚度的超声信号仿真结果与实验平台检测结果具有相似的变化规律,随垢层厚度的增加电极反射波幅值增大,抵达时间逐渐前移,表明了60 kHz超声导波具有区分垢层厚度能力,证明了本文所提纵向 $L(0, 2)$ 导波检测的可行性。

参考文献

- [1] 付志超,陈奥博,朱劲磊,等. 柔性直流输电换流阀型式实验平台谐波注入方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 89-96. FU Zhichao, CHEN Aobo, ZHU Jinlei, et al. Harmonic wave injection method for type test platform of VSC-HVDC converter valve [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 89-96.
- [2] 洪乐洲,江一,翁洪志,等. 换流站阀内冷系统设计缺陷与改进措施[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 44-46. HONG Lezhou, JIANG Yi, WENG Hongzhi, et al. Design flaws and corrective measures of valve cooling system at converter station [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 44-46.
- [3] 李惠玲. 新型电力系统背景下西部送端直流电网及系统运行特性[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 166-174. LI Huiling. Sending-terminal DC power grid in Western China and its operation characteristics in the context of new power system [J]. Electric Power, 2023, 56(8): 166-174.
- [4] 何平港,牟大林,林圣. LCC-MMC混合级联型直流输电系统启动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 71-80. HE Pinggang, MU Dalin, LIN Sheng. Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 71-80.
- [5] 卢世才,李道豫,王行飞,等. 高压直流换流阀内水冷系统致垢离子带电特性[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 64-70. LU Shicai, LI Daoyu, WANG Xingfei, et al. Charged property of sediment-forming ions in inner cooling system for HVDC converter valves [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 64-70.
- [6] 吴俊杰,刘凯,唐洪,等. 高压直流输电阀冷系统水质控制与管理探究[J]. 湖南电力, 2018, 38(1): 51-54. WU Junjie, LIU Kai, TANG Hong, et al. Water quality control and operations management of valve cooling system of

- HVDC[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(1): 51 – 54.
- [7] 闫迎, 晏桂林, 郝剑波. 高压直流换流阀水冷却系统常见缺陷分析及对策[J]. 湖南电力, 2017(4): 56 – 58, 68.
YAN Ying, YAN Guilin, HAO Jianbo. Analysis and countermeasure of the water cooling system fault for HVDC converter valve [J]. Hunan Electric Power, 2017 (4): 56 – 58, 68.
- [8] WANG Chenxing, LIU Xuezhong, WANG Xianrong, et al. The distributing characteristics of sediment deposited on pintype grading electrodes in inner cooling circuit of HV converter valve [C]//2015 IEEE Electrical Insulation Conference, June 7 – 10, 2015, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 2015: 24 – 28.
- [9] 金吉发, 赵东辉. 换流阀冷却系统管道渗漏原因分析探究[J]. 湖南电力, 2017, 37(S1): 39 – 41
JIN Jifa, ZHAO Donghui. Research on the causes of converter valve cooling sytem's pipe leakage [J]. Hunan Electric Power, 2017, 37 (S1): 39 – 41.
- [10] 曲志刚, 武立群, 安阳, 等. 超声导波检测技术的发展与应用现状[J]. 天津科技大学学报, 2017, 32(4): 1 – 8.
QU Zhigang, WU Liquan, AN Yang, et al. Development and application of guided wave ultrasonic testing technique [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2017, 32(4): 1 – 8.
- [11] GAZIS D C. Exact analysis of the plane strain vibrations of thick walled hollow cylinders[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(8): 786 – 794.
- [12] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders: I analytical foundation [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(5): 568 – 573.
- [13] 包化, 谢涛, 王伟, 等. 基于L(0,2)超声导波的管道裂纹损伤回波特征分析[J]. 广东电力, 2015, 28(5): 10 – 14.
BAO Hua, XIE Tao, WANG Wei, et al. Analysis on echo characteristic of pipeline crack damage based on L (0, 2) ultrasonic guided wave [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(5): 10 – 14.
- [14] 周琛. 基于L(0,2)超声导波的管段损伤定位研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [15] 张学聪, 何存富, 李楠, 等. L(0,2)模态在管道内壁附着物测厚中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 354 – 363.
ZHANG Xuecong, HE Cunfu, LI Nan, et al. Thickness measurement of inner surface attachment of pipes with L(0,2) mode [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24 (2): 354 – 363.
- [16] 刘增华, 何存富, 杨士明, 等. 充水管道中纵向超声导波传播特性的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2006(3): 171 – 178.
LIU Zenghua, HE Cunfu, YANG Shiming, et al. Theoretical and experimental studies of longitudinal ultrasonic guided wave propagation characteristics in water-filled pipes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006(3): 171 – 178.
- [17] 王钱钱, 陈次昌, 陈科旭, 等. L(0,2)模态导波检测充水管道的试验研究[J]. 无损探伤, 2011, 35(4): 7 – 10.
- [18] 刘丁嘉. 压电超声导波在层状充液管道结构中传播特性研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
- [19] ZHANG Hongbo, CAO Li. A guided wave mode selection method in PFA tube for ultrasonic flow measurement [C]//2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications, August 25 – 27, 2020, Dalian, China. New York: IEEE, 2020: 1 – 7.
- [20] 闫孝姮, 光思辰, 胡宇, 等. 换流阀冷却系统均压电极结垢超声导波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 251 – 263.
YAN Xiaoheng, GUANG Sichen, HU Yu, et al. Investigation of ultrasonic guided wave mode conversion characteristics in grading electrodes sediments detection of the HVDC converter valve cooling system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021(10): 251 – 263.
- [21] 顾军. 超声导波在管中的频散特性及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [22] 马骥. 基于超声导波的管道损伤识别研究[D]. 武汉: 长江大学, 2021.
- [23] 梁伯翱. 基于多模态超声导波的管道缺陷检测系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [24] 王秀彦, 王智, 焦敬品, 等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004(1): 11 – 16.
WANG Xiuyan, WANG Zhi, JIAO Jingpin, et al. Theroetical and experimental studies of ultrasonic guided waves propagation in pipes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004(1): 11 – 16.
- [25] 张鑫宇, 李忠虎, 关丽坤, 等. 超声导波缺陷检测仿真分析[J]. 内蒙古科技大学学报, 2022, 41(1): 36 – 41.
ZHANG Xinyu, LI Zhonghu, GUAN Likun, et al. Simulation analysis in defect detection with ultrasonic guided waves [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022, 41(1): 36 – 41.
- [26] 张小明, 李卓然, 李智, 等. 自由锚杆纵向超声导波特性理论计算与试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 27 – 33.
ZHANG Xiaoming, LI Zhuoran, LI Zhi, et al. Theoretical calculation and experimental study on the characteristics of longitudinal ultrasonic guided wave propaganda [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(2): 27 – 33.
- [27] 李忠虎, 李昊霖, 李刚, 等. 超声导波管道缺陷检测中的温度补偿方法研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2021, 40(3): 251 – 255.
LI Zhonghu, LI Haolin, LI Gang, et al. Study on the influence of temperature on nondestructive testing of ultrasonic guided wave pipelines [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2021, 40(3): 251 – 255.

收稿日期: 2023-09-12; 网络首发日期: 2024-03-21

作者简介:

魏加强(1990), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力化学与环保, 1021770984@qq.com;

王帅(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为输变电设备数字孪生技术与无损检测技术, 2859943592@qq.com;

高兵(1987), 男, 副教授, 博士, 研究方向为多物理场计算和电声换能技术, 785208784@qq.com。