

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108048

换流阀冷却系统均压电极结垢超声导波检测方法研究^{*}

闫孝恒, 光思辰, 胡宇, 陈伟华

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘要:换流阀冷却系统中均压电极结垢检测是直流输电系统安全运行的必要保障。当前人工筛查的检测方法, 有较大的盲目性且易造成系统漏水等故障。因此提出基于超声导波回波特性的在线结垢检测方法。选取频散小、传输距离长的 $L(0,2)$ 模式导波作为激励信号, 将电极结垢视为多孔介质并计算其特征参数, 构建了流-固-声多物理场作用下的均压电极结垢检测模型, 确定了最佳超声激励频率并仿真研究了 $0.2 \sim 1.0$ mm 厚度水垢对声波信号的反射与吸收特征, 分析了 $L(0,2)$ 模式导波与水垢交互过程中的模式转换过程, 进而搭建实验系统, 开展了水垢厚度为 $0.1 \sim 0.8$ mm 的实验验证工作。实验结果表明, 基于 $L(0,2)$ 超声导波回波特性的在线结垢检测精度达 0.1 mm, 为换流阀均压电极结垢检测提供了一种有效的方法。

关键词: 均压电极; 结垢; 超声导波; 流-固-声耦合; 模式转换

中图分类号: TH17 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Investigation of ultrasonic guided wave mode conversion characteristics in grading electrodes sediments detection of the HVDC converter valve cooling system

Yan Xiaoheng, Guang Sichen, Hu Yu, Chen Weihua

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Sediments detection on the grading electrodes installed in the inner cooling system is the necessary part to ensure safe operation of the high voltage direct current (HVDC) converter valve. At present, the sediments detection of the grading electrodes mainly depends on manual screening, which has great blindness and is easy to cause system leakage and other faults. To address these issues, an online sediments detection method based on the echoing characteristics of ultrasonic guided wave is proposed. The $L(0,2)$ mode guided wave with low dispersion and long transmission distance is selected as the excitation signal. Sediments of electrodes are considered as porous medium and the characteristic parameters are calculated. Then, a fluid-solid-acoustic multi-physical field simulation model of sediments detection is formulated, and the optimum excitation frequency is determined. The reflection and absorption characteristics of $0.2 \sim 1.0$ mm thick sediments on acoustic signals are simulated. The mode conversion processes in the interaction between the longitudinal $L(0,2)$ mode and sediments are analyzed. Finally, the experimental system is established to verify the actual detection accuracy in the sediments thickness of $0.1 \sim 0.8$ mm. Experimental results show that the accuracy of online sediments detection method based on the echoing characteristics of ultrasonic guided wave is up to 0.1 mm, which demonstrates the online sediments detection method is effective for sediments detection with grading electrodes of the HVDC converter valve cooling system.

Keywords: grading electrodes; sediments; ultrasonic guided wave; fluid-solid-acoustic multi-physical field; mode conversion

0 引言

为保证特高压换流阀在正常温度范围运行, 普遍采用去离子水为冷却剂, 将换流阀上各元件功耗产生的热

量排放到阀厅外。在冷却水回路的不同位置设置均压电极, 有效地钳制电位和冷却水路中流经不同电位金属元件后产生的电解电流, 从而延长各元件的使用寿命^[1-2]。然而, 金属构件离子容易运动至均压电极表面发生化学反应产生结垢, 易发生垢质脱落堵塞水管、密封圈腐蚀、

收稿日期: 2021-06-04 Received Date: 2021-06-04

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究创新团队(LT2019007)项目、辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-02, 29)资助

电解腐蚀加重等危害,造成换流阀水冷系统故障^[3]。近年来,由于均压电极结垢导致直流输电系统闭锁,甚至强迫停运事件屡次发生于国内多家换流站,严重威胁直流输电系统安全运行^[4-5]。直流换流站中均压电极数量众多且安装在壁厚约为3 mm不透明汇流管道中,其结垢状态难以区分。目前主要采取停运换流阀对电极逐一进行定期清洗或更换的方式来消除均压电极结垢的影响,该方法具有较大盲目性,且摘取均压电极操作易造成漏水故障,因此急需一种目标精准的均压电极结垢状态在线检测新方法。

常规无损检测例如红外线检测法、射线检验、涡流和磁粉等难以适用于在役复合管道缺陷检测,其可操作性和测量精度难以符合均压电极结垢状态检测^[6]。超声导波检测通过在管道某一位置激励接收超声导波实现管道的全局检测,是一种检测距离长、范围广、效率高和成本低新兴管道检测方法。Lohr等^[7]研究了超声导波对工业食品管道除垢检测情况。Lais等^[8]研究了根据低频纵向超声导波回波信号衰减幅度量化工业管道1~5 mm厚度硬质污垢检测信息。相比一般工业管道,超声导波在充液管道中频散更加严重,传播特性和模态转换现象更加复杂,其振幅随着传播而衰减^[9]。Liu等^[10]和Kwun等^[11]分别对超声导波在充液管道中传播特性进行理论和实验研究,其研究表明充液管道频散曲线表现为空管和液体频散曲线的耦合。Pan等^[12]考察了2、120、300、500 kHz导波激励频率下充液复合管道管壁振动与流体耦合情况,结果发现随着频率增加声波能量更易集中却也产生多种振动模态。Qu等^[13]通过放置在斜楔块超声探头产生低频超声导波对充液管道进行结垢检测,实验验证了低频超声导波对于充液管道有较好的检测结果。在目前充液管道导波检测研究中,为了便于信号的分析 and 处理,通常激励导波仅考虑特定频段的单一纵向模态。刘增华等^[14]提出了纵向L(0,2)模态频散程度小、波形和幅度随距离不发生变化,适合长距离充水管道的污垢检测。Djili等^[15]实验验证了L(0,2)模态对充液管道周向范围14.331~46.861和径向深度范围0.2~0.7 mm的缺陷有良好检测灵敏度。采用脉冲回波方法虽然在一定程度可使响应结果具备可读性,却忽略了导波模态转换提供的和污垢相关的更多信息,合理使用超声导波模态转换特性进行管道检测从而提高检测和评估的效率和准确性。Song等^[16]研究了纵向模态在填充不同液体管道中模态转换随缺陷大小变化特性。王晓娟等^[17]研究了L(0,1)和L(0,2)纵向模态与管道缺陷交互过程中对称模态转换特性。Yeung等^[18]采用时域有限谱法研究了扭转模态在管道缺陷处的模态转换问题。以上成果对于理解模态转换过程以及量化评估管道污垢信息提供了有益的参考。

因此,本文提出基于超声导波回波特性的在线结垢检测新方法,选取激励频率为150 kHz的L(0,2)导波模态作为检测激励信号,将电极结垢视为多孔介质并计算其特征参数,构建了流-固-声多物理场作用下的换流阀冷却系统均压电极结垢检测模型,模拟500 kV换流阀冷却系统确定了最佳超声激励频率,研究不同厚度污垢下超声导波与污垢交互过程中模态转换特性并搭建实验系统,验证了方法的可行性。

1 充液管道超声导波传播特性

1.1 充液管道纵向模态理论基础

对于各向同性的弹性管道,忽略其自身体力影响,由弹性力学可知,波在管道结构传播的波动过程可通过Navier运动方程描述^[19],即:

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

式中: $\mathbf{u}$ 为位移场; λ 与 μ 为弹性材料的拉梅常数; ρ 为弹性材料的密度。对于充有非粘性液管道模型,液体圆柱体中传播的超声波也满足上式,利用势分解方法可得管的轴对称纵向振动位移解以及管内液体介质的轴对称纵向振动位移解。

管道中超声导波传播理论分析时需要定义边界条件,对于充液管道而言,在管道的外表面($r=b$),其应力分量 σ_r 和 σ_z 均为0,即:

$$\begin{cases} (\sigma_r)_{r=b} = 0 \\ (\sigma_z)_{r=b} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

对于管道内表面即液体与管道的交界($r=a$)来说,径向位移 u_r 和应力分量 σ_r 是连续的。故液体与管道在交界处的应力分量 σ_z 均为0,即:

$$\begin{cases} (u_r)_{r=a}^p = (u_r)_{r=a}^f \\ (\sigma_r)_{r=a}^p = (\sigma_r)_{r=a}^f \\ (\sigma_z)_{r=a}^p = (\sigma_z)_{r=a}^f = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为上标,表示管道; f 为上标,表示液体。 r 表示管道半径, a 表示管道中心到管道内壁距离, b 表示管道中心到管道外壁距离,将各层相应的常量带入(3)式,得到一组关于待定系数 A_1, A_2, B_1, B_2, C 的齐次线性方程组,该方程为充液管道中超声导波的频散方程,通过求解频散方程可获得反映超声导波模态的波速和频率之间关系的频散曲线。

超声导波具有多模态特性,根据频散方程求解可得到管道结构的3种导波模态^[20],分别为纵向模态L(0, m),扭转模态T(0, m)和弯曲模态F(n, m)($n, m=1, 2, 3$), n 表示该模态导波绕管壁螺旋传播的周向阶次, m 表示该模态导波纵向振动的阶数。纵向模态和扭转模

态为对称模式,弯曲模式为非对称模式。一般在同一工作频率下,至少存在两种或两种以上的模式,频率低时模式数量较少,随着频率的增加,模式数量也随之增加。此选择合适频率和模式对检验均压电极结构情况十分重要。实际检测中,通常是在一个给定的方向上,只激发和接受一种特定模式。

本文研究的均压电极模型处于内部填充有去离子水的汇流管道内,其示意图如图 1 所示。在模型中,汇流水管材质为 PVDF,其内外直径分别为 54 mm 和 60 mm,在该阀段冷却系统中采用单针型铂质均压电极,插入水管深度为 40 mm,汇流水管的基本材料特性参数见表 1。

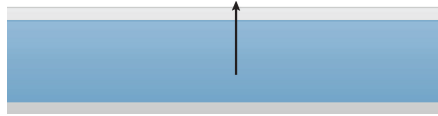


图 1 均压电极所在汇流水管模型
Fig. 1 The model of the water pipelines where grading electrodes located

表 1 汇流水管模型参数

Table 1 Parameters of the water pipe model

基本材料	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	拉伸模 量/GPa	泊松比	纵波波速 $c_L/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	横波波速 $c_T/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
PVDF 水管	1.78	2.28	0.39	1 656	676
去离子水	1	-	-	1 480	-

基于 Bocchini 等制作的 GUIGUW 软件^[21]绘制本文研究的管道频散曲线。如图 2 所示,200 kHz 频带之后频散情况复杂,不适合管道中的污垢检验,在激励频率为 50 kHz~200 kHz 之间时, $L(0,2)$ 模式的波速变化很小,即在此范围内无严重频散,相较于频散同样较小的 $L(0,1)$ 模式,其波速相对较快,为了进一步确定激励模式和频率,本文绘制了波结构图和不同频率下充液管道横截面的声压分布图如图 3 所示,波结构和声压分布研究为后面分析模式转换过程及转换模式特性提供了重要的参考信息。

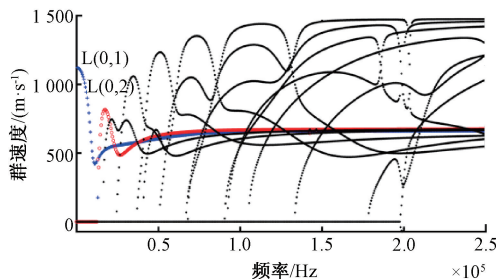


图 2 均压电极管道频散曲线
Fig. 2 Dispersion curve of the water pipe

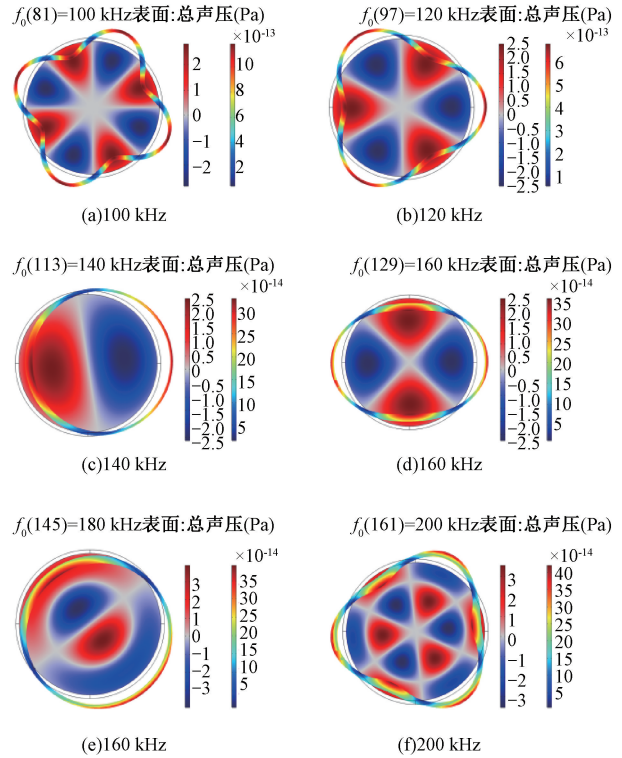


图 3 超声导波在不同频率处的声压分布

Fig. 3 Sound pressure distribution of ultrasonic guided waves at different frequencies

为了探究最佳激励频率,对 PVDF 管道与填充液体模型进行声场仿真,对 20~200 kHz 激励频率范围进行步长为 10 kHz 的扫描,图 3 给出了 100、120、140、160、180 和 200 kHz 激励信号下声压分布图。

从声压图中可以看到,随着频率变化,管道壁和填充液体呈现不同的耦合状态,100~140 kHz 频段声压分布情况复杂,管壁随振动形变严重,表明导波在传输过程中容易造成散射、折射,传播到水中信号受阻,当频率增大到 140~180 kHz 时,流体与管道运动为强耦合,频散情况减小,声波能量更易传播到整个水管中,当频率增大到 180~200 kHz 时,管壁与流体耦合强度减小,声压分布更加复杂,不适合检测。为了进一步确定最佳激励频率,图 4 绘制不同频率下的波结构图,波结构可以显示对不同缺陷程度的敏感性以及传播过程中的衰减情况。

根据物理学和波动力学原理,入射波到达两介质的界面会产生模式转换,在固体介质中可能产生纵波和横波,在无粘性的水中,只存在纵波^[22]。对于波在两种介质间的反射和透射系数可以通过建立约束方程求解。

图 4(a) 为声波径向位移随频率变化绝对值,反映了信号衰减程度。图中 145、150 和 160 kHz 衰减较小,其波结构图如图 4 (b), (c), (e)。145 kHz 时导波径向位移随半径变化不均匀,且数值较大,表明此时波径向振动

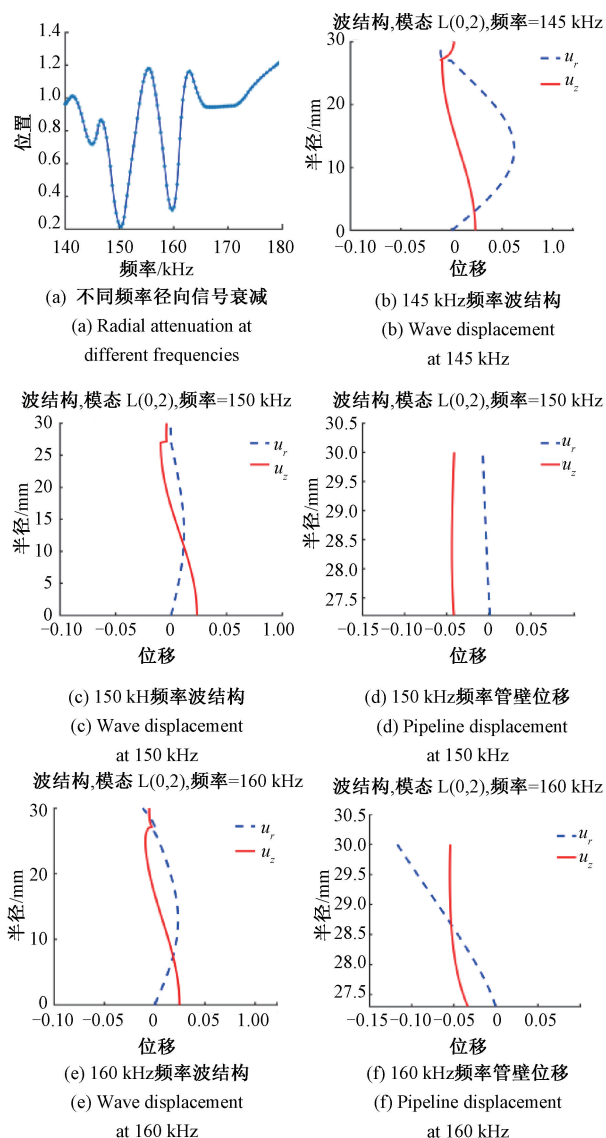


图4 超声导波在不同频率处的波结构图

Fig. 4 Wave displacements at different frequencies

剧烈,衰减较大。150 kHz时,L(0,2)模态沿管道厚度方向分布均匀,此特点使得L(0,2)模态对于检测整个壁厚方向上的缺陷都有较强的灵敏性。相较于160,150 kHz时L(0,2)模态径向位移沿半径变化较小,表明L(0,2)模态在传播中能量散射较小,衰减较小,综上所述,选择频率为150 kHz的L(0,2)模态展开进一步研究。

综上所述,本文选择150 kHz作为激励信号的中心频率,以经过Hanning窗调制的五周期toneburst信号作为系统激励信号。激励的时域信号及频谱如图5所示。

1.2 模态转换

当介质均为理想固体时,在其交界面上满足质点速度和应力分别在垂直方向和切线方向连续,其边界条件建立如式(4)所示。

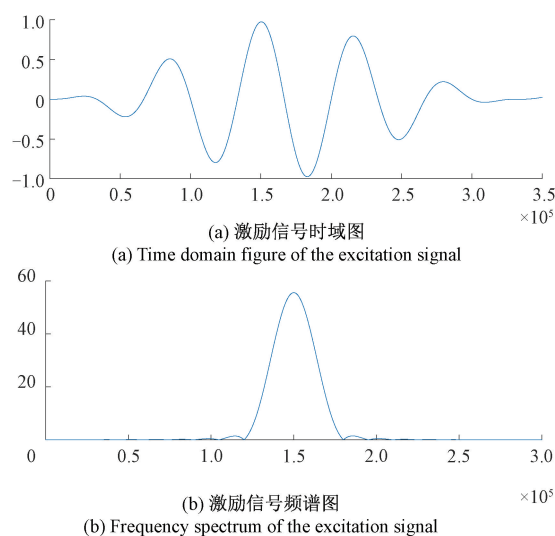


图5 均压电极管道检测激励信号

Fig. 5 The time domain figure and frequency spectrum of the excitation signal

$$\begin{cases} (V_y)_N + (V_y)_{1T} + (V_y)_{1L} = (V_y)_{2T} + (V_y)_{2L} \\ (V_z)_N + (V_z)_{1T} + (V_z)_{1L} = (V_z)_{2T} + (V_z)_{2L} \\ (\sigma_{yy})_N + (\sigma_{yy})_{1T} + (\sigma_{yy})_{1L} = (\sigma_{yy})_{2T} + (\sigma_{yy})_{2L} \\ (\sigma_{yz})_N + (\sigma_{yz})_{1T} + (\sigma_{yz})_{1L} = (\sigma_{yz})_{2T} + (\sigma_{yz})_{2L} \end{cases} \quad (4)$$

其中,下角标1表示入射波发出的介质,下角标2表示入射波传播进入的介质,L表示纵波,T表示横波,N表示入射波。将介质的波速、密度等系数带入上式(4)中,可构建传播介质与入射波参数的齐次线性方程组,求解该方程可获得入射波在不同介质界面传输的反射折射参数信息。将反射与透射波振幅用入射波振幅进行归一化处理,对于固-液和液-固界面,由于液体不能承受剪切力,不存在横波,因此计算中忽略了横波情况,并根据实际情况修改了矩阵参数。无结垢情况下,需要考虑波从去离子水传播到铂针中和从铂针传播到去离子水中两个过程,有结垢情况下,增加了从水垢到铂针和从铂针再次传播水垢中两个固-固介质传播过程。均压电极结垢物主要有铝制散热器表面发生电化学腐蚀导致铝离子与水中氢氧离子结合,沉淀物附着在均压电极铂针处,结垢物主要成分为氧化铝^[23],其声速信息如下表^[24-25]所示,有无水垢两种状态下波的传播过程及其反射折射系数如下图6所示,介质材料参数如下表2所示。

表2 介质材料参数

Table 2 Dielectric material parameter

介质材料	密度/(g·cm ⁻³)	纵波波速/(m·s ⁻¹)	横波波速/(m·s ⁻¹)
铂电极	21.4	3 962	1 670
去离子水	1	1 480	—
Al ₂ O ₃	3.25	5 190	2 432

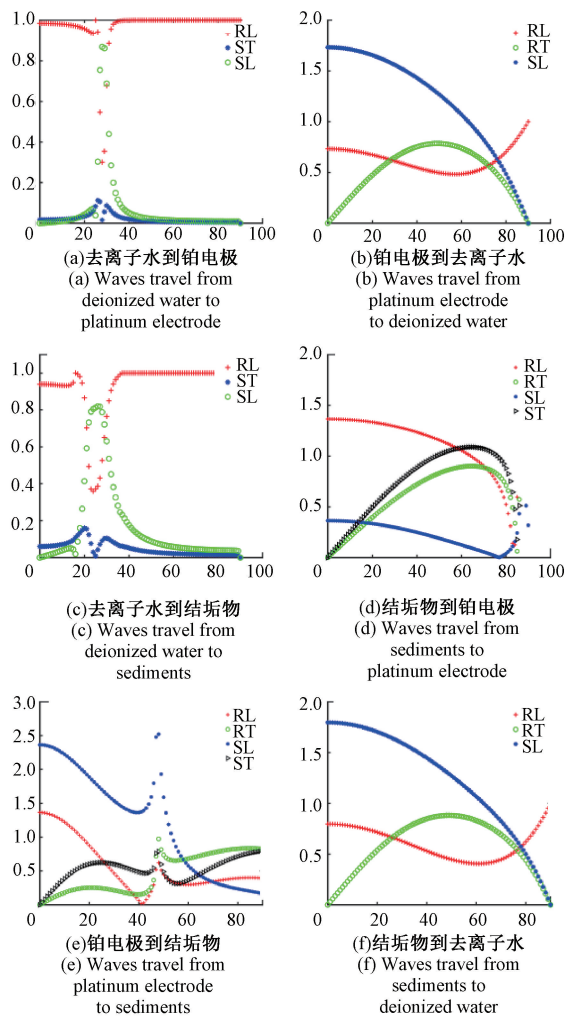


图 6 各介质界面纵向模式声波反射与吸收系数和入射角度关系

Fig. 6 Relationship between the incident angle and the reflection and transmission coefficients at the interface of different media

图 6 中 RL 表示反射纵波, RT 表示反射横波, ST 表示透射横波, SL 表示透射纵波。由于声波在入射介质波速小于折射介质波速时, 会存在临界角问题, 导致出现奇异点, 因此选取临界角之前归一化反射折射数据选取中间值, 选取阈值为 0.001, 得出有无结垢下声波反射折射系数如下图 7 所示。

图 7 中 R 表示反射波, T 表示透射波, 由于铂电极和水垢密度相差较大, 因此声波信号在有无结垢情况下模式转换过程和回波信号幅值差别较大, 在无结垢情况下, 声波反射信号强, 模式转换较为单一, 在有结垢情况下, 声波信号被吸收入水垢内并在各介质中传播, 其模式转换更为复杂且信号分散。分析模式转换过程可为超声导波检测均压电极结垢提供理论依据。

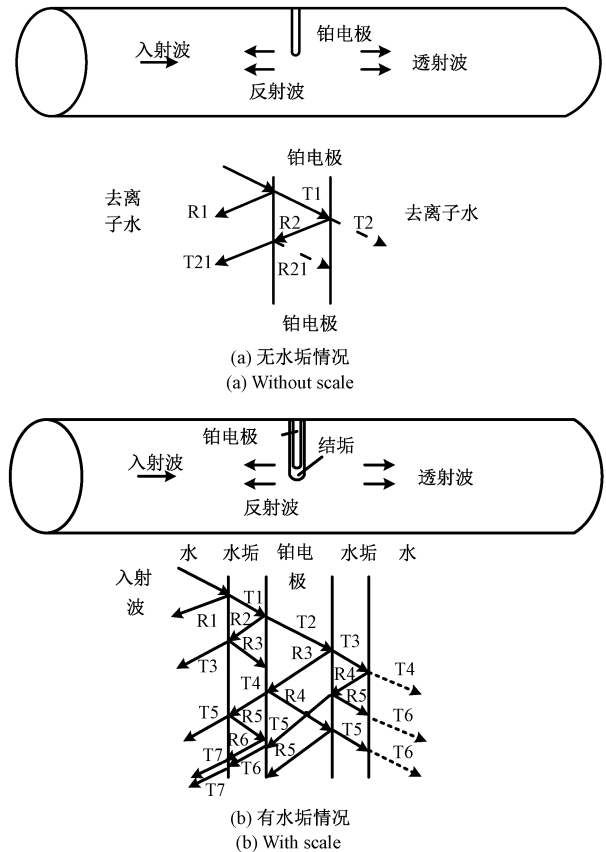


图 7 超声导波与均压电极管道交互过程

Fig. 7 Interaction between ultrasonic guided wave and voltage equalizing electrode pipe

2 纵向模式的模式转换现象

2.1 模式转换特性仿真分析

为了确定超声导波对均压电极结垢物检测的灵敏性, 对超声导波检测均压电极结垢物进行模型仿真。均压电极结垢物呈鱼鳞状分布, 其尖端处垢层相对疏松, 形状不规则, 但是垢层表面存在细小的空隙, 可以将垢层近似为具有一定空隙率的多孔物质^[26], 其结垢图如图 8 所示。多孔介质的声学特性主要表现在它对入射声波具有极强的吸收和修改能力, 入射声波可以与均压电极孔隙内的流体相互作用。多孔介质声学特性主要由黏性摩擦、惯性和热耗散效应造成, 通过设置材料的孔隙率和孔隙结构等参数可以计算出声波的折射反射系数及声波能量传输过程。材料孔隙率等结构参数和结构形态之间的关系非常重要。然而, 均压电极结垢厚度分布在 0.1 ~ 1.5 mm^[27], 其尺度微小难以计算孔隙率与渗透率。因此本文将水垢分解为半径 0.01 和 0.02 mm 两种尺寸微型球体堆积模型, 通过计算流经单位空隙模型流量获得垢样孔隙率参数, 通过达西定律研究宏观尺度上的球体堆积模型获得水垢渗透率参数。根据实际垢样建立结垢模型和计算过程如图 9 所示。

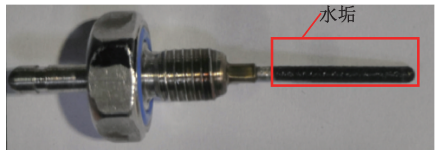
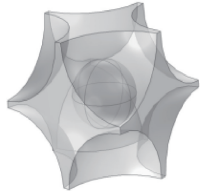
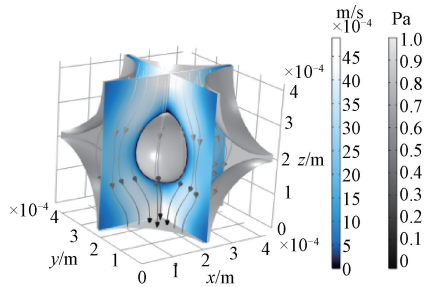


图 8 均压电极结垢实物

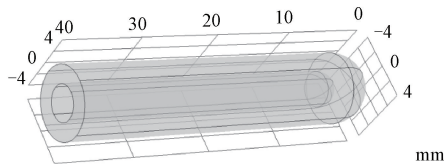
Fig. 8 Eiments material of the grading electrodes



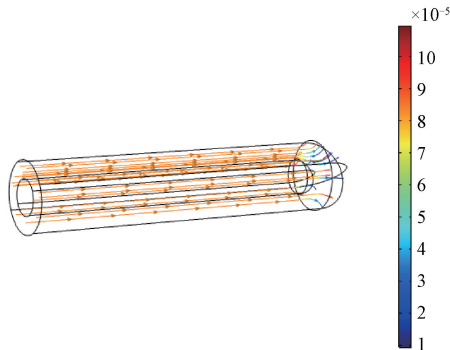
(a)单位水垢空隙模型
(a)Unit sediments void model



(b)单位空隙流速
(b)Flow rate per unit void



(c)均压电极垢样仿真模型
(c) Sediments sample simulation model of the grading electrodes



(d)均压电极垢样达西速度场

(d) The Darcy velocity field of the sediment sample of the grading electrodes

图 9 水垢多孔参数计算模型

Fig. 9 Calculation model of sediment porosity parameters

流体通多孔介质发生耦合现象. 在多孔介质中, 流体流动均遵循达西定律. 达西定律描述了渗透流速与水头损失率成正比的关系. 同时还可知渗透系数只取决于渗流材料系统自身的特性和流体自身特性两种因素, 其表达式如下:

$$Q = KA \frac{\Delta H}{l} \tag{5}$$

其中, Q 为水在单位时间内通过多孔介质的渗流量; l 为渗流路径长度; A 为断面面积; K 为渗透系数; ΔH 为上下两测压管的水头差. 根据模型和达西定律可以计算水垢空隙率 ε 和渗透率 K , 其计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_{tot}} \tag{6}$$

$$K = u_{out} \mu \frac{L}{\Delta p} \tag{7}$$

其中, V_f 为空隙体积; V_{tot} 垢样总体积; u_{out} 为出口方向的流速; ΔP 为进出水口压差; L 为单位空隙模型长度; μ 为液体的粘滞性. 计算获得均压电极水垢试样多孔材料参数如表 3 所示.

表 3 均压电极水垢多孔材料参数

Table 3 The porous material parameters of the grading electrodes sediments sample

孔隙率	渗透率/ m^2	动力粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Biot-Willis 系数	曲折因子
0. 47	8×10^{-10}	1×10^{-3}	1	1. 25

为探究多孔介质水垢对声压吸收和反射情况, 本文采用 COMSOL 仿真软件建立均压电极超声导波检测模型, 如图 10 所示, 为保证压电传感器有较好的激励和接收性能, 选用 Lead Zirconate Titanate (PZT-5H) 为压电材料, 采用斜楔激发技术激励出纵向超声导波, 斜探头加工和安装比较方便, 更利于导波技术的工程应用. 均压电极插入水管部分材料 COMSOL 内置材料库中的金属铂, 水垢材料为氧化铝, 其参数设置如表 2 所示. 为了模拟实际汇流水管, 在模型尾端添加完美匹配层 (PML). 为了确保模型计算得正确性, 元件的最大尺寸应该是在网格设置下小于或等于 $1/8$ 波长. 与此同时, 时间步长不大于 $1/6$ 周期. 根据上述原则, 最大单元大小设为 $1/10$

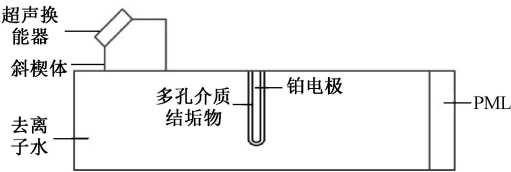


图 10 均压电极结垢检测仿真模型

Fig. 10 Simulation model for sediments detection of the grading electrodes

波长,时间步长设为 $1/8$ 周期,为了减小迭代时间和复杂度,设置 PML 网格划分单元数为 20,自由三角形网格总数为 23 489。

图 11 显示了汇流水管声压的瞬态分布。换能器激励信号可以快速覆盖整个管道,正负声压沿管道轴线方向分布。

由图 11 可以看出声压分布为探究超声导波对不同水垢厚度检测灵敏度,对水垢厚度进行参数化扫描,扫描范围为 $0.2 \sim 1.0$ mm,扫频步长为 0.2 mm,其瞬态声波图如图 12 所示。

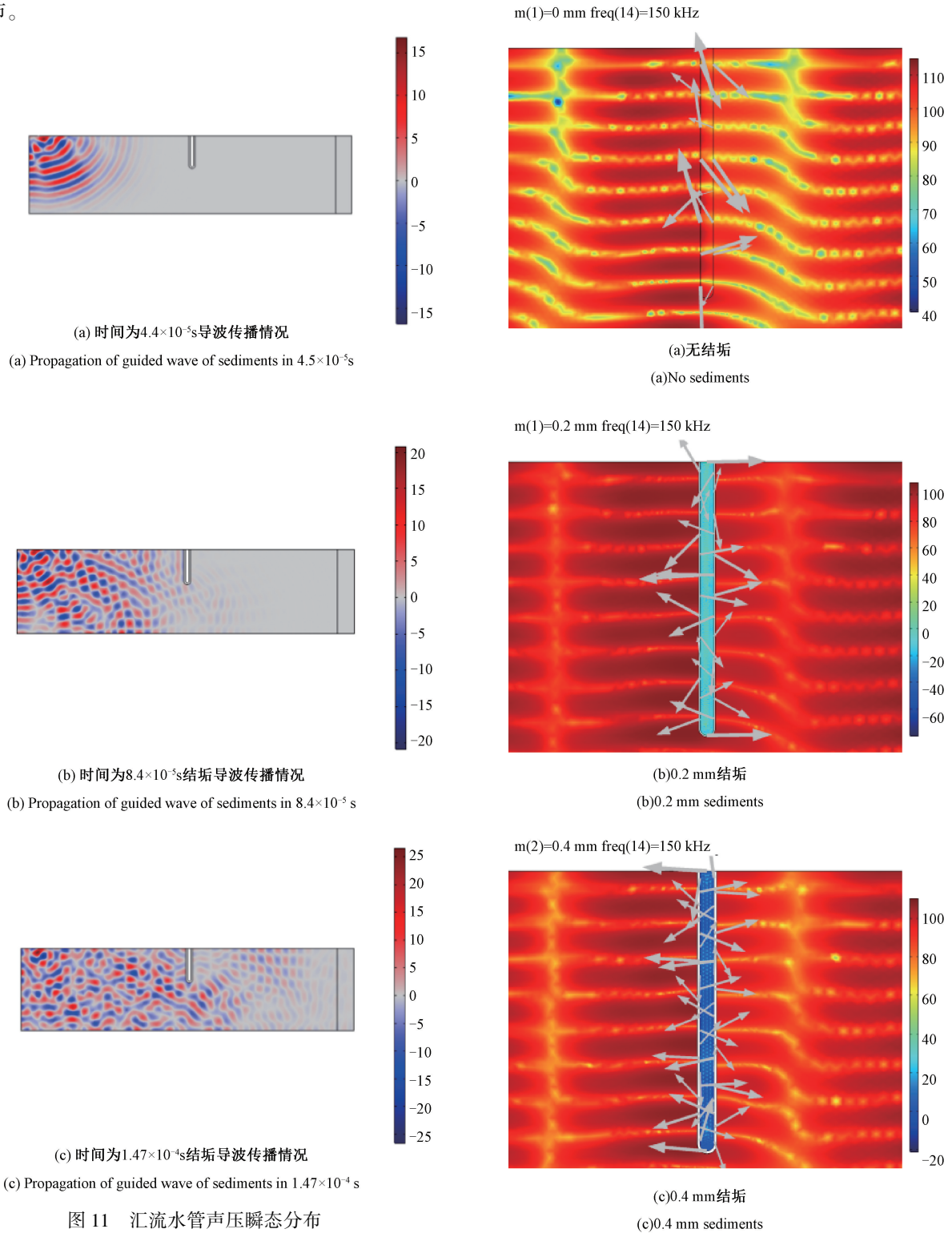


图 11 汇流水管声压瞬态分布

Fig. 11 Transient distribution of sound pressure in the bus pipe

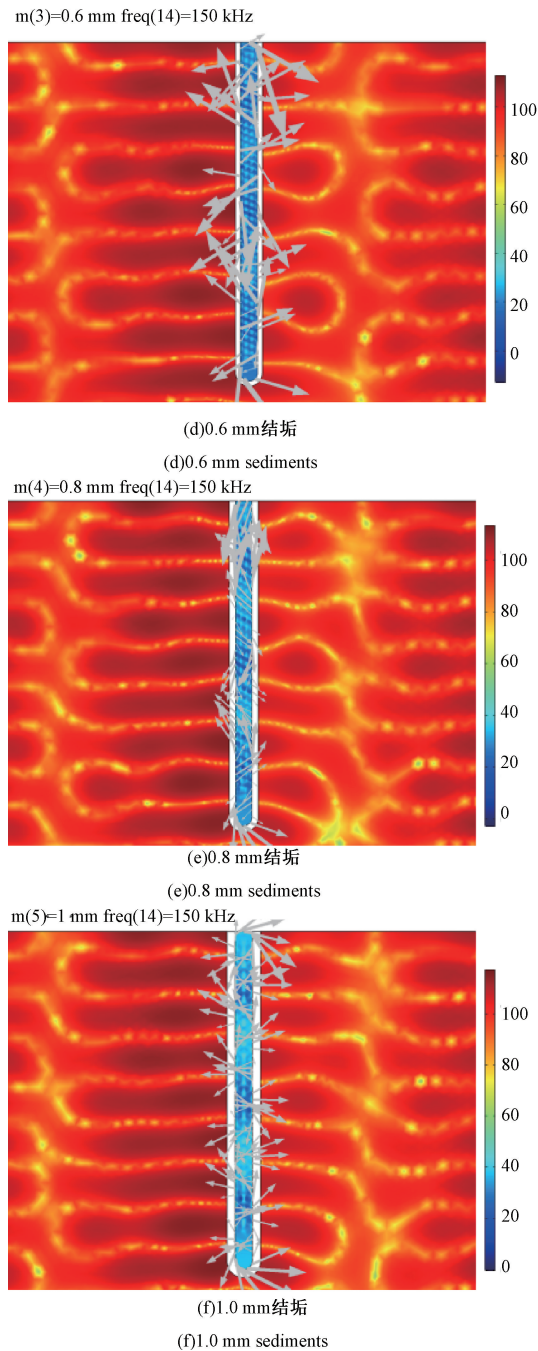


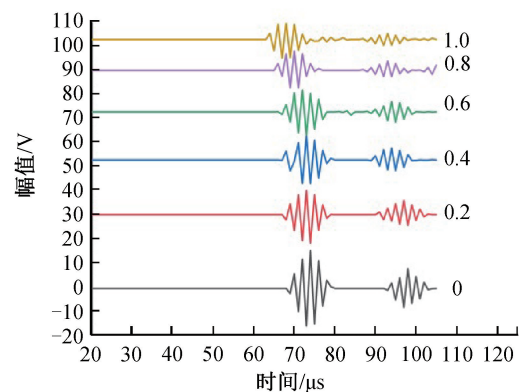
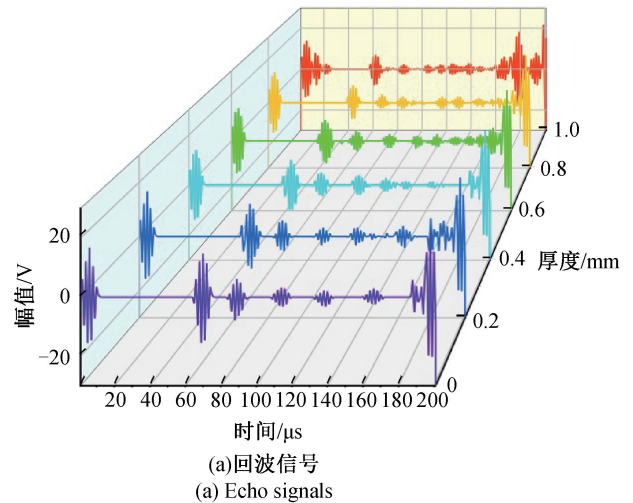
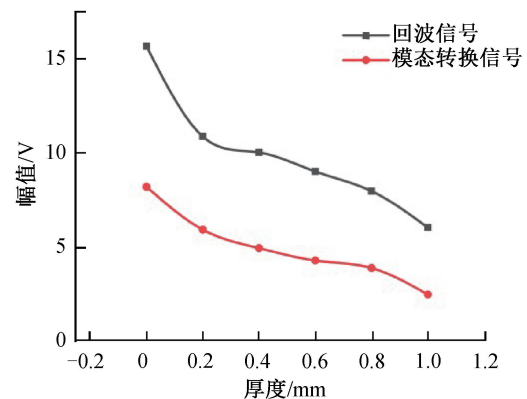
图 12 不同厚度水垢声压传播情况

Fig. 12 Sound pressure propagation of sediments with different thicknesses

图 12 中箭头大小表示声波信号强弱,箭头方向表示声波传输方向。由图 12 可得当均压电极表面无结垢时,由于均压电极密度较大,透射进入声波能量弱且数量小,因此均压电极两侧声波数量相差较大,当水垢层在均压电极上附着较少时,声波大部分被反射,且能量较为集中,随着水垢厚度增加,水垢空隙增多,声波信号多数散射到水垢中,与水垢壁发生多次反射,因此传播中水中声波信号杂乱,能量减小,模态转换复杂。

2.2 模态转换特性分析

对仿真声压信号进行模态提取,其结果如图 13 所示,缺陷回波由多组波包组成,根据被检测管道的频散曲线可知,本研究所使用的工作频率对应两种纵向模态: $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$,根据管道的频散曲线取得的 $L(0,1)$ 和 $L(0,2)$ 模态的理论波速,结合模态时序分析结果可确定除去管壁信号,前 3 组波包分别对应 $L(0,2)$ 模态,纵向转换模态和 $L(0,1)$ 模态。

(b) The main mode $L(0,2)$ signals

(c) The amplitude of the echo signals and the mode signal varies with the thickness

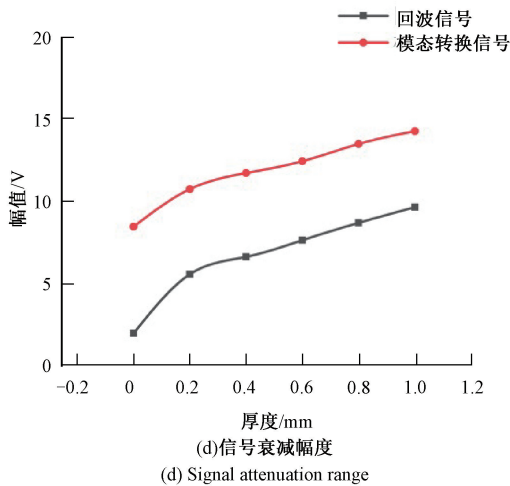


图 13 不同污垢厚度的回波信号和转换模式信号

Fig. 13 Echo signals and converted mode signals of different sediments thicknesses

当纵向 $L(0,2)$ 模式被激励并与均压电极进行交互会发生模式转换,即交互结果中除了主模式 $L(0,2)$,还包含 $L(0,1)$ 模式,导波信号在均压电极铂针各处的反射和透射都存在相同的转换过程。

当均压电极表面没有水垢附着时,由于铂针密度较大,因此大部分的导波信号发生反射,缺陷产生的导波回波信号主要包括 4 部分: $L(0,2)$ 激励信号在铂针处反射回来的 $L(0,2)$ 模式, $L(0,2)$ 激励信号在铂针处反射回来的 $L(0,1)$ 模式, $L(0,2)$ 激励信号透射入铂针处发生二次反射产生的 $L(0,1)$ 模式和 $L(0,2)$ 激励信号透射入铂针处发生二次反射产生的 $L(0,2)$ 模式,其仿真声波时序图下图 12 所示。当均压电极铂针表面附着一层水垢时,由于氢氧化铝的密度较小,因此声波很大一部分会透射进入水垢内,并在其中进行多次反射透射,造成回波信号的复杂,缺陷产生的导波回波信号主要包括: $L(0,2)$ 激励信号在铂针处反射回来的 $L(0,2)$ 模式和 $L(0,1)$ 模式, $L(0,2)$ 激励信号透射入铂针处发生二次反射产生的 $L(0,1)$ 模式和 $L(0,2)$ 模式。由图可以看出反射信号幅值和模式转换信号幅值均随着均压电极污垢厚度增加而减小,信号衰减幅度随着污垢厚度增加而增加。

3 实 验

为进一步研究基于纵向导波回波特性的均压电极结垢检测方法有效性,在实际水管管道上进行了实验。实验管道内径为 54 mm,外径为 60 mm,内部填充有静态

水,实验管道的几何尺寸和材料特性均与上文数值仿真所用参数相同。斜楔体及超声探头布置在管道端部,均压电极设置在管道中心,距探头约 300 mm,实验主要考虑 9 种均压电极结垢状态:0.1~0.8 mm 步长为 0.1 mm 设置结垢及无结垢状态。

实验所用的具体装置如图 14 (a) 所示,任意波形信号发生器 33500B 产生中心频率为 150 kHz 激励信号,通过功率放大器 ATA-4011 放大后加载于布置在管道端部的收发一体压电换能器 X1019 上,激励形成 $L(0,2)$ 纵向超声导波并与铂电极进行交互。图 14 (b) 为实验用结垢均压电极,其表面附着有不同厚度的结垢用于检验超声导波对不同厚度结垢均压电极检测灵敏度。

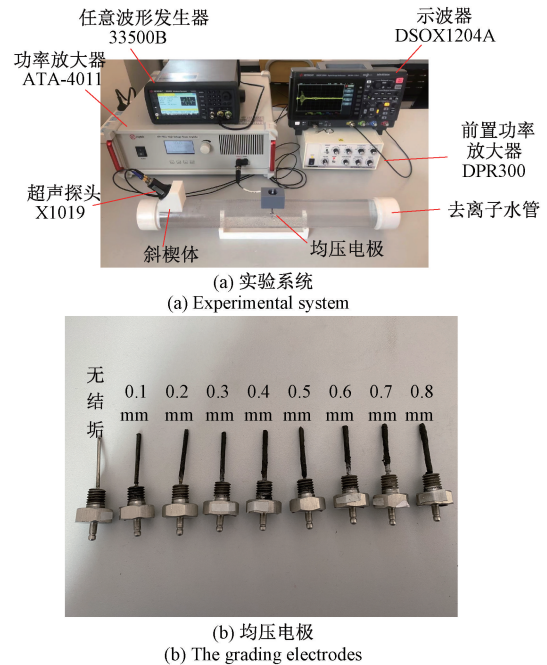


图 14 实验系统

Fig. 14 Experimental system

图 15 为实验中接收到的 9 种结垢状态回波信号。图中第 1 个圆圈标注为主模式 $L(0,2)$,第 2 个圆圈标注为转换模式,与仿真分析的模态时序和幅值变化规律一致。

对回波信号做模态分析,最终可获得这些纵向导波与不同结垢状态均压电极交互过程声波传播特性。不同厚度结垢均压电极回波信号可以得出 $L(0,2)$ 模式和模式转换信号对均压电极厚度敏感,随着厚度变化呈现一定的变化趋势,根据 $L(0,2)$ 模式和模式转换信号幅值与水垢厚度实验结果绘制关系曲线,进一步得出超声导波检测均压电极厚度灵敏度与准确性。

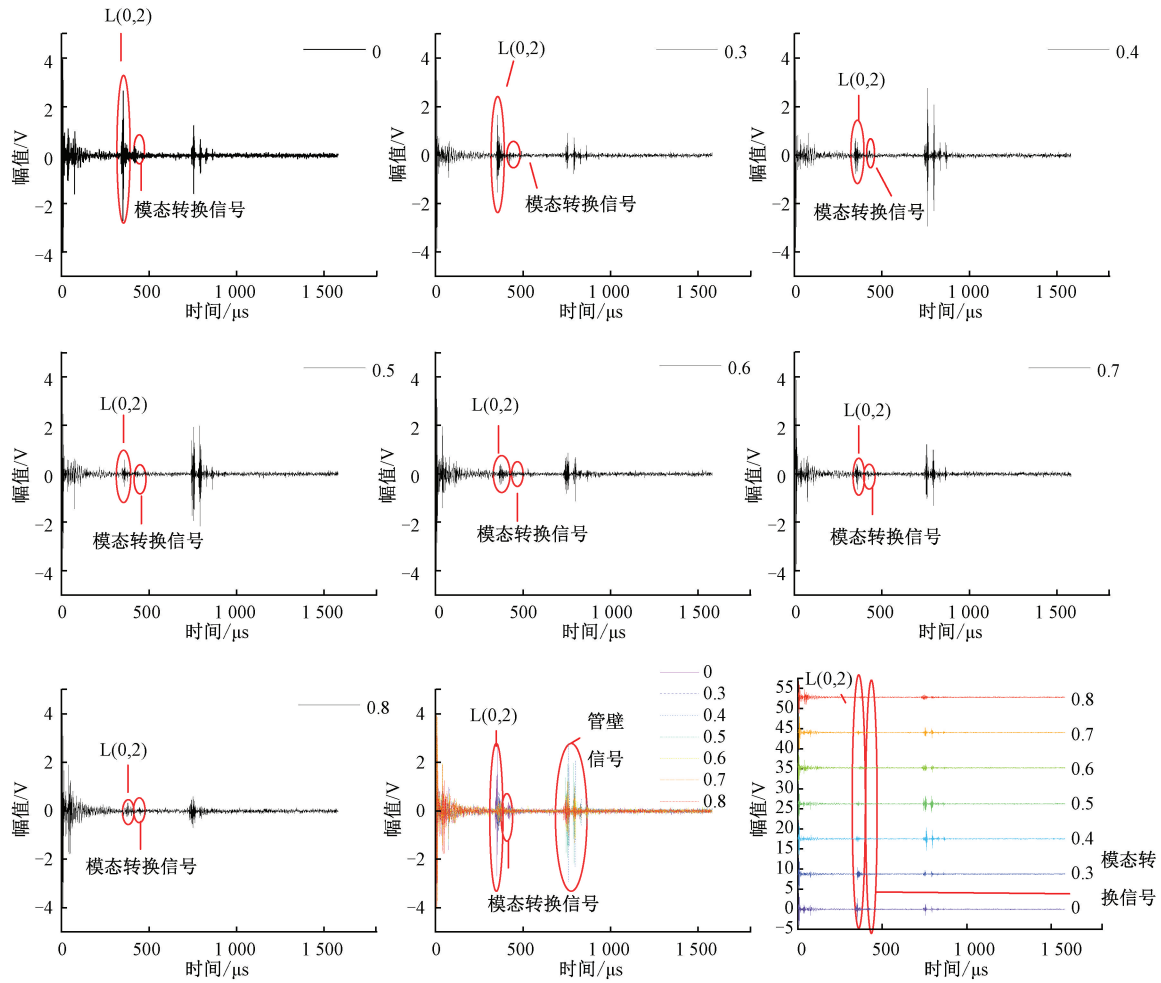


图15 实验中的回波信号

Fig. 15 Echo signal in experiment

针对实验结果的分析如图16所示,同数值模拟的结果一致,均压电极结垢物厚度增加时 $L(0,2)$ 反射信号和模态转换信号幅值均随着厚度的增加呈下降趋势,其衰

减幅度与厚度呈正比关系,主模态和转换模态之间的能量差值减小。

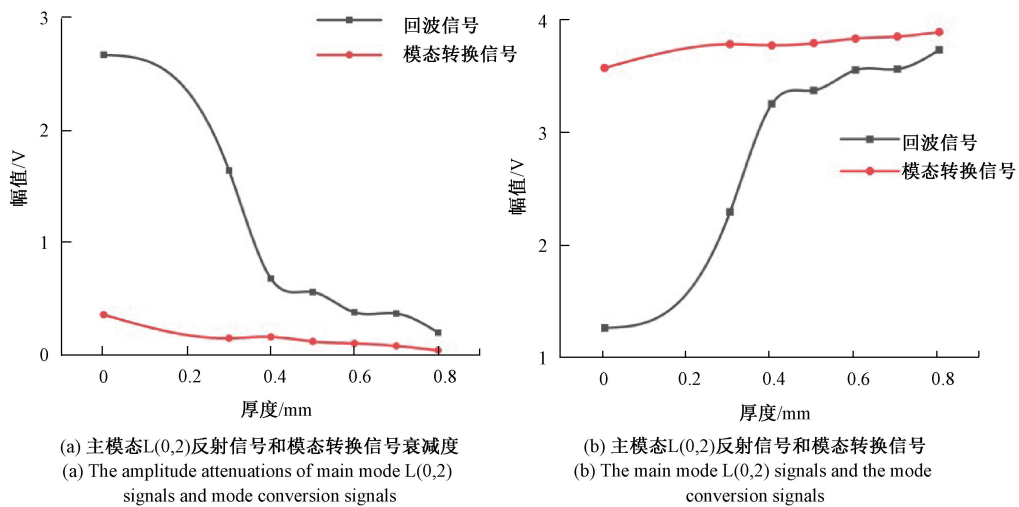


图16 实验数据的分析结果

Fig. 16 Analysis results of experimental data

从曲线得出有无结垢差异明显,0.4 mm 以上污垢厚度差异较小,表明超声导波检测法对较薄污垢识别效果良好,能适用于换流站阀冷系统均压电极结垢检测。转换模态可以提供缺陷的特征信息,而主模态 $L(0,2)$ 反射信号和转换模态分量变化趋势相同,且其变化随着厚度增加更加敏感,这说明在实际应用中可以考虑直接使用主模态反射信号进行检验分析。

4 结 论

为建立有效的特高压换流站均压电极结垢检测方法,本文研究了纵向超声导波 $L(0,2)$ 模态与换流阀内水冷系统中均压电极及其结垢物交互过程中超声导波模态的转换问题,对有无结垢状态回波中的对称模态成分进行了具体分析,进一步开展了对超声导波检测污垢的仿真分析,通过构造两种不同半径的微型小球填充宏观水垢模型,结合达西定律计算出了水垢的多孔介质参数,并建立了流-固-声多物理场耦合模型对超声导波检测水垢灵敏度和准确性进行仿真,在此基础上,系统地研究了均压电极结垢物厚度对回波信号中主模态反射信号和模态转换信号的影响,分析了纵向超声导波与不同厚度的均压电极结垢物交互过程中对称模态的转换特性,得到以下结论:

1) 本文基于 $L(0,2)$ 纵向导波回波特性检测方法建立了流-固-声多物理场耦合模型,并实验验证了仿真正确性。结果表明,根据超声导波回波特性检测均压电极结垢方法可行,仿真结果检测范围为 0.2~1.0 mm,能满足特高压换流阀冷却系统实际检测需求。

2) PVDF 管道与内部填充液体耦合关系随着频率变化呈现不同结果,140~180 kHz 之间其耦合关系较强,管壁振动位移小,声压分布集中,在此频段进行波结构分析,确定了最佳中心频率为 150 kHz。

3) 通过构造一个完全分解的微观空隙模型进而堆积宏观上的水垢模型,结合达西定律求得水垢渗透率、孔隙率等多孔介质参数的方法具有一定的可行性,准确度较高,可用于微型或难以求解多孔材质仿真研究。

4) 本文仿真及实验结果表明,对称转换模态信息可作为主模态分析的补充,提供更多的均压电极结垢厚度相关信息,从而优化均压电极结垢物厚度的检测与评估;均压电极处 $L(0,2)$ 与转换模态分量变化趋向相同,具有更强的能量形式,能检测 0.1~0.8 mm 水垢,在实际检测或评估中可直接应用。

参考文献

- [1] WANG C, LIU X, WANG X, et al. The distributing characteristics of sediment deposited on pin-type grading electrodes in inner cooling circuit of HV converter valve[J]. IEEE, 2015:24-28.
- [2] GAO B, HE T T, YANG F, et al. Investigation on deposition behavior of HVDC water cooling system based on electro-mass transfer-velocity coupling model [J]. IEEE Access, 2019, 07: 67960-67971.
- [3] WEBER I, MALLICR B, SCHILD M, et al. Inside cover: Behavior of highly diluted electrolytes in strong electric fields-prevention of alumina deposition on grading electrodes in HVDC transmission modules by CO_2 -induced pH-control[J]. Chemistry-A European Journal, 2014, 20(38):11958-11958.
- [4] 程建登, 吴斌, 毛文俊, 等. 特高压换流站故障统计与反措[J]. 高压电器, 2018, 54(12):292-298.
CHEN J D, WU B, MAO W J, et al. Failure statistics and countermeasures of UHVDC converter stations. [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12):292-298.
- [5] 赵文亮. 高压直流输电换流阀晶闸管铝散热器腐蚀问题研究[J]. 清洗世界, 2015, 31(12): 1-3.
ZHAO W L. Researching of converter valve thyristor aluminum heat sink corrosion problem of HVDC [J]. Cleaning Word, 2015, 31(12): 1-3.
- [6] HE C F, LIU J, LIU Z H. Theoretical investigation of propagation of longitudinal guided waves in cylindrical pipe filled with quiescent or flowing fluid: A foundational experimental investigation [J]. 2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, Venice, Italy, 2010: 84-88.
- [7] LOHR K R, ROSE J L. Ultrasonic guided wave and acoustic impact methods for pipe fouling detection [J]. Journal of Food Engineering, 2003, 56:315-324.
- [8] LAIS H, LOWE P S, GAN T H, et al. Characterization of the use of low frequency ultrasonic guided waves to detect fouling deposition in pipelines [J]. Sensors, 2018, 18(7):21-22.
- [9] WON B N, YEON S R, JEONG T K, et al. Attenuation of fundamental longitudinal cylindrical guided wave propagating in liquid-filled steel pipes [J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2005, 19(5): 26-33.

- [10] LIU S X, WU Z J, TANG L G, et al. Data transfer using the low frequency longitudinal guided wave in a liquid-filled pipe [J]. *Applied Acoustics*, 2012, 73 (2): 158-163.
- [11] KWUN H, BARTELS K A, DYNES C. Dispersion of longitudinal waves propagating in liquid-filled cylindrical shells[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 105(5):2601-2611.
- [12] PAN H, KOYANO K, USUI Y. Experimental and numerical investigations of axisymmetric wave propagation in cylindrical pipe filled with fluid[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113 (6): 3209-3214.
- [13] QU ZH G, JIN SH, WU L Q, et al. Influence of water flow velocity on fouling removal for pipeline based on eco-friendly ultrasonic guided wave technology[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240:118-173.
- [14] 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 Z H, HE C F, YANG SH M, 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.
- [15] DJILI S, BENMEDDOUR F, MOULIN E, et al. Notch detection in copper tubes immersed in water by leaky compressional guided waves[J]. *NDT&E International*, 2013, 54:183-188.
- [16] SONG ZH H, XIANG SH, LIU Z H, et al. Experimental study of guided wave propagation and damage detection in large diameter pipe filled by different fluids[J]. *NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2018, 93:78-85.
- [17] 王晓娟,赵锴,郑毅. 管道纵向超声导波的对称模式转换特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41 (9): 151-160.
- WANG X J, ZHAO K, ZHENG Y. Characteristics of symmetric mode conversion of longitudinal guided-wave modes in pipeline [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9):151-160.
- [18] YEUNG C, NG C. Time-domain spectral finite element method for analysis of torsional guided waves scattering and mode conversion by cracks in pipes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 128:305-317.
- [19] DUAN W, KIRBY R, MUDGE P, et al. A one dimensional numerical approach for computing the eigenmodes of elastic waves in buried pipelines [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2016, 384:177-193.
- [20] WÖCKEL S, STEINMANN U, ARNDT H. Low frequency guided wave transmission in water pipe systems[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 1257-1260.
- [21] BOCCHINI P, MARZANI A, VIOLA E. Graphical user interface for guided acoustic waves [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2011, 25(3), 202-210.
- [22] JOSEPH L R. Ultrasonic guided waves in solid media[M]. Cambridge University Press, 2014, DOI: 10.1017/CBO9781107273610.
- [23] 姜银方,井然,严有琪,等. 基于 $L(0,2)$ 模式导波的缺陷反射信号的实验研究[J]. *机械科学与技术*, 2014, 33(4):551-554.
- JIANG Y F, JING R, YAN Y Q, et al. Experimental study of signal identification on crack and corrosion with ultrasonic guided wave [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014, 33 (4): 551-554.
- [24] 王丽萍,郭昭华,池君洲,等. 氧化铝多用途开发研究进展[J]. *无机盐工业*, 2015, 47(6):11-15, 62.
- WANG L P, GUO SH H, CHI J ZH, et al. Progress in multipurpose research and development of multiform alumina [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2015, 47(6):11-15, 62.
- [25] GUPTA Y M. Hear and compression wave measurements in shocked polycrystalline Al_2O_3 [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*[J]. 1983, 88(B5), 4304-4312.
- [26] 杨帆,贺婷婷,高兵,等. 沉积模型的阀冷系统电极均压能力评估方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 188-197.
- YANG F, HE T T, GAO B, et al. Evaluation method of voltage-equalizing ability of electrodes in value cooling system based on sediment dynamic deposition model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40 (7): 188-197.

- [27] 张格红, 闵建文, 赵勤虎, 等. 换流阀冷却系统腐蚀结垢分析研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(11): 92-97.

ZHANG G H, MIN J W, ZHAO Q H, et al. Analysis and study of corrosion and scaling in HDVC converter valve cooling water system[J] Power Grid Analysis & Study, 2018, 46(11): 92-97.

作者简介



闫孝姮, 2005 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2008 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: xiaohengyan@163.com

Yan Xiaoheng received her B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Liaoning Technical University in 2005, 2008, and 2016, respectively. She is currently an associate professor at Liaoning Technical University. Her main research direction is nondestructive testing.



光思辰(通信作者), 2019 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波检测。

E-mail: guangsichen@126.com

Guang Sichen (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Liaoning Technical University in 2019. She is currently a master student at Liaoning Technical University. Her main research direction is ultrasonic guided wave detection.



胡宇, 2019 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为超声导波检测。

E-mail: 332949668@qq.com

Hu Yu received his B.Sc. degree from Liaoning Technical University in 2019. He is currently a master student at Liaoning Technical University. His research direction is ultrasonic guided wave detection.



陈伟华, 2002 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2006 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2016 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为无线电能传输技术。

E-mail: fxlgd@163.com

Chen Weihua received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from Liaoning Technical University in 2002, 2006, and 2016, respectively. He is currently an associate professor at Liaoning Technical University. His main research direction is nondestructive testing.