

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006323

基于主动声学的管道球形内检测器示踪定位方法*

周乾¹, 曾周末¹, 黄新敬¹, 刘媛², 封皓¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 北京市南水北调东干渠管理处 北京 100020)

摘要: 针对球形内检测器示踪定位难题, 提出了一种由内检测器主动发声、在管道外壁远距离实时侦听导波脉冲从而计算内检测器与监测点距离的方法。在分析了该方法定位原理的基础上, 通过有限元仿真和实验明确了其实施要点, 证明了其有效性。研究表明: 内检测器的聚氨酯减振层会严重抑制声波发射, 在聚氨酯上开孔使铝球壳与水接触, 可以保证足够大的发声强度; 快慢两种模式的导波均有明确的起始特征和稳定的传播速度, 可用于计算导波传播距离并对内检测器进行定位; 但慢波幅值远远大于快波幅值, 实际应用时应该使用慢波。最后在 $\Phi 219$ mm 充水钢管中开展了声速测量实验和内检测器定位实验, 实验中测得的时延具有极好的重复性, 极差不超过 $80 \mu\text{s}$, 同时实验证明该方法能够实时定位内检测器并监视其远离和靠近监测点的过程。

关键词: 球形内检测器; 示踪定位; 充液管道; 超声导波

中图分类号: TP27 TH86 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Tracing and localization method of spherical inner detector for pipelines based on active acoustics

Zhou Qian¹, Zeng Zhoumo¹, Huang Xinjing¹, Liu Yuan², Feng Hao¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing East Route Management Office of South-to-North Water Diversion Project, Beijing 100020, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of tracing and localization of spherical inner detector, this paper proposes a method of calculating the distance between the detector and the monitoring points through actively emitting sound with the detector and remotely listening to the guided wave pulses in real time on the outer surface of the pipeline. Based on analyzing the localization principle, the implementation key points are clarified and the effectiveness of this method is demonstrated through finite element simulations and experiments. Study demonstrates that polyurethane vibration-damping layer of the detector can severely suppress the acoustic emission, and opening a hole on the polyurethane and making the aluminum sphere shell contact with water can ensure sufficient emitted sound intensity; the guided waves in both fast and slow modes have clear start characteristics and stable propagation speed, which can be used to calculate the guided wave propagation distance and locate the inner detector. The amplitude of the slow wave is much larger than that of the fast wave and the slow wave should be used in practical applications. Finally, sound velocity measurement experiment and inner detector localization experiment were carried out in a $\Phi 219$ mm water-filled steel pipe. In the experiments the measured delay has excellent repeatability, its range is not more than $80 \mu\text{s}$. The experiments also demonstrate that the method can locate the spherical inner detector in real time and monitor the process of departing from and approaching to the monitoring point.

Keywords: spherical inner detector; tracking and localization; fluid-filled pipeline; ultrasonic guided wave

收稿日期: 2020-04-28 Received Date: 2020-04-28

* 基金项目: 国家自然科学基金(61773283, 61803280, 61973227)、天津市自然科学基金(19JCQNJC01700)项目资助

0 引言

截止到2019年底,我国油气管道总里程已达13.9万公里,位居世界前列^[1-2]。其中,约有60%的管道已运行超过20年,老化腐蚀严重,目前已经进入了破裂和泄漏事故的高发期^[3]。管道一旦发生泄漏,往往会造成严重的环境污染、经济损失和人员伤亡^[4-5]。因此,有必要定期对油气管道进行检测,及时发现缺陷和泄漏高风险部位。管道内检测器是最常用的管道缺陷检测手段,其原理是将搭载无损检测设备的内检测器置于管道中,在管道内流体的推动下移动,同时采集并存储管道探测信息,检测结束后取出内检测器,下载数据并进行离线分析、处理,从而判断管道缺陷的类型与位置^[6-9]。当内检测器在管内运行时,出于安全性与经济性的考虑,为防止出现意外卡堵或丢失的情况,必须实时追踪其位置。同时,所获取的实时位置信息对于管道缺陷的辅助定位有着重要意义。因此示踪定位系统是内检测器必不可少的组成部分。

目前常用的管道内检测器有两种类型:传统的柱形内检测器^[10-20]和新兴的球形内检测器^[21-26]。柱形内检测器运行时前后皮碗与管壁紧密接触,依靠检测器前后压力差推动前进,其常用的示踪定位方法有以下几种:1) 里程轮法。通常会在内检测器尾部安装几个里程轮,通过对里程轮发出的脉冲信号进行计数来计算内检测器行进的距离。宋志东等^[10]提出了一种里程轮信号优选算法,并用实验验证了该算法可以高效、准确地选择最佳里程轮脉冲信号。但由于里程轮的结构缺陷以及难以避免的打滑,这种方法会产生较大的累计误差,定位准确度低,不适用于长距离检测。2) 碰撞声学法。根据内检测器与管壁、焊缝的摩擦、撞击声来判断内检测器的通过时间^[11-14]。刘梦然等^[12]将一种高灵敏度、高信噪比的微机电系统(micro-electromechanical systems, MEMS)仿生声矢量传感器应用于声学地面标记系统,获得了良好的定向能力。Li等^[14]提出四传感器等间距线性阵列采集内检测器撞击声的方法,使用到达时差(time difference of arrival, TDOA)算法进行定位,将定位误差减小到了0.1 m。但这种声学定位方法极易受到环境噪声干扰而产生大量误报,并且无法追踪发生卡堵的内检测器;3) 静磁场法。内检测器搭载永磁体,通过检测穿过管壁的漏磁信号判断内检测器是否通过。韩升华等^[15]在所设计的漏磁通地面标记系统中增加了全球定位系统(global positioning system, GPS)卫星信号接收机进行时间同步,提高了系统的工作效率。静磁场法需要携带庞大的永磁体,并且要求检测的管壁不能太厚,因此适用范围较小。4) 极低频电磁脉冲法。内检测器中安装电磁信号发射机,发射30 Hz以内的极低频电磁信号供管外的接收机

进行检测^[16-20]。杨理践等^[16]设计的低频磁信号发射机和手持式接收机实现了8 m的有效定位距离,提高了内检测器跟踪距离。Piao等^[20]提出了一种快速决策树方法来检测极低频信号,实现了高灵敏度、实时定位。但由于极低频信号的微弱性与瞬时性,这种检测方法总体来说极易漏报、误报,难以满足实际工程需要。

球形内检测器是一种新兴的管道内检测器,不同于柱形内检测器,其直径小于管径,可在管内液体推动下自由滚动,不易发生卡堵。由于球形内检测器结构、内部空间、运动特点的限制,并且其与管壁摩擦、碰撞的声音较为微弱,因此里程轮法、碰撞声学法、静磁场法都无法应用于该系统中。陈世利等^[21]尝试将基于极低频电磁原理的示踪定位技术应用于球形内检测器,但在实际应用中发现该系统跟踪距离只有2 m,误判率高,无法判断发球是否成功。

因此本文提出了一种由球形内检测器主动发声、在管道外壁远距离实时侦听导波脉冲从而计算内检测器与监测点距离的方法。首先介绍了其基本原理和实施过程,并分别从时延、声速的角度讨论了准确定位的关键;然后使用COMSOL多物理场仿真软件分析了影响球形内检测器发声性能的主要因素以及充液管道超声导波的传播特性;最后在一段充水管道中进行了声速测量实验和滚动球形内检测器定位实验,验证了所提定位方法的可行性。

1 示踪定位原理

主动声学法示踪定位的基本原理是根据球形内检测器所发出的超声脉冲到达接收器所用时间来计算球形内检测器的位置。因此准确获取声波传播时间是定位的关键之一,这首先要保证球形内检测器与接收器的时间基准是同步的,本文使用GPS模块来实现这一目的,如图1(a)所示。当GPS模块接收到至少4颗卫星的信息后,就可实现准确定位并输出秒脉冲(pulse per second, PPS)信号,该信号是占空比为10%、频率为1 Hz的脉冲波,其上升沿与GPS时间中的整秒时刻相对应,精度为ns级。在将球形内检测器放入管道之前,先使用PPS信号对球内系统进行授时,使其时钟与GPS时间保持一致,然后在检测过程中使用PPS信号的上升沿来触发接收装置的采集过程。

示踪定位过程如图1(b)所示。球形内检测器在管道内运行时,每隔1 s就发射一串超声脉冲信号。贴在管壁上的接收器将接收到的声信号转换为电信号,然后对其进行放大、滤波处理,传输到上位机中使用特定算法获取信号的起点时刻或某一特征时刻作为信号的到达时刻。由于声波在管内传输速度很快,并且检测距离通常不超过几百米,因此声波的传播时间一定小于1 s。于是取到达时刻的小数部分即可得到超声脉冲的传播时间。

因此,所建立的示踪定位模型为:

$$x = c\Delta t = c(t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: x 是球形内检测器与接收装置之间的距离; c 是超声信号在管道内的传播速度; Δt 是信号的传播时间,该时间小于 1 s; t_1 是信号发出的时刻且是已知的整秒; t_2 是信号到达接收器的时刻且其整数部分等于 t_1 、小数部分等于 Δt 。

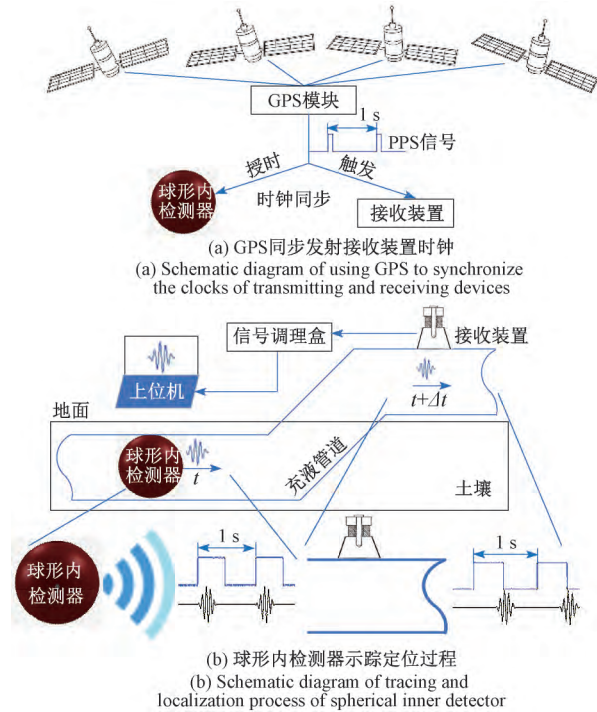


图 1 球形内检测器示踪定位原理

Fig. 1 The tracing and localization principle diagram of the spherical inner detector

此外,如何准确提取信号的到达时刻也是关键之一。在传统超声测距的应用中,最常使用的方法是通过设定固定阈值电压来确定信号到达时刻,但对于幅值波动较大、噪声明显的信号,这种方法容易产生很大的误差。有学者提出双比较器整形确定信号前沿的方法,相对单阈值法精度较高,但也会因接收信号幅度变化较大而产生较大误差^[27-28]。另有学者使用赤池信息准则法(Akaike information criterion, AIC)来识别信号到达时刻,其原理是根据信号时域上各点的 AIC 特征值大小来找出信号的起点,这种方法检测精度较高^[29-30]。但是由于其原理复杂、计算量庞大,难以实现实时在线检测。本文采用动态阈值法来判断信号到达,首先确定一组接收信号的最大幅度即峰值,然后按照峰值的一定比例(本文中设置为 $\sqrt{2}/2$) 来确定检测阈值,接收信号幅值第一次超过阈值的时刻即视为信号到达时刻。这种方法解决了超声信号幅值波动的问题,同时原理简单、易于实现,实时性和准确度较高。

2 充液管道导波的产生及传播特点

与无限均匀介质中自由传播的声波不同,当声波在管道内进行传播时,受介质边界约束而产生了复杂的波形转换与干涉耦合,最终形成了超声导波。由于管道内的超声导波能量集中,不易扩散衰减,因此能沿着管道进行长距离传播,这是实现球形内检测器远距离跟踪定位的重要理论基础。

由示踪定位模型式(1)可知,定位结果是否准确完全取决于所使用的声速与所获取的传播时间是否准确。而超声导波的群速度代表导波能量的传播速度,也即进行定位所需的声速。因此对于群速度的分析是提高定位准确度的关键,也是本文的重要研究内容之一。另一方面,导波的多模态特性与频散特性不仅引起了模态间的相互干扰、转换,使信号的信噪比降低,而且使同一频率下的不同模态导波产生了不同的群速度,给声速的确定带来了极大麻烦。因此非常有必要对充液管道导波的产生和传播过程进行仿真,进而分析不同模态导波的波形特点及其群速度。

2.1 球形内检测器发声特点仿真

管道导波由球形内检测器发出。特殊的球壳结构使球形内检测器的电声性能不同于传统的夹心式或弯张压电换能器。因此需要通过有限元仿真明确其材料参数、结构参数对于发声性能的影响规律以提高发声强度。仿真采用“压电-声-固耦合物理场”,使用的物理场及材料参数如表 1 所示。此外,多物理场接口“压电效应”的作用域为压电陶瓷(piezoelectric ceramics, PZT),而“声结构边界”作用于流体-固体交界面。由于整个装置是轴对称的,因此可将三维模型简化为二维轴对称模型,大大简化了计算量。同时在求解域外侧添加完美匹配层以消除回波的干扰。

表 1 仿真物理场及材料参数

Table 1 Physical field and material parameters used in the simulation

物理场	材料	密度/ (kg/m^3)	杨氏模量/ Pa	泊松比	声速/ (m/s)
固体力学	球内壳 铝	2 700	7×10^{10}	0.33	6 197
	球外壳 聚氨酯	1 250	9×10^9	0.47	3 100
	压电陶瓷 PZT-5H	7 500	-	-	-
静电	压电陶瓷 PZT-5H	7 500	-	-	-
压力声学	球外 水	1 000	-	-	1 500
	球内 空气	1.29	-	-	343

进行了 3 组仿真对比。首先去掉模型中的球形内检测器,只对水中压电陶瓷的发声特点进行仿真。在压电

陶瓷上表面施加调制电压信号,其波形如图 2(a)所示,压电陶瓷受激后下表面附近的声压信号如图 2(b)所示。一段时间后压电陶瓷在水中激发的声场分布如图 3(a)所示。将压电陶瓷置于球形内检测器中后,球形内检测器下表面处声压随时间变化规律如图 2(c)所示,经过一定时间后球形内检测器外的声场分布如图 3(b)所示。对比图 2(b)、(c)可知,声波经过球壳后发生了大幅衰减,且球壳发生余振使声信号出现了畸变。因此考虑在球壳下方的聚氨酯层打孔以增强声波的外传且减少信号畸变,但孔径不宜过大否则会影响内检测器正常平稳滚动。打孔后仿真结果如图 2(d)与图 3(c)所示。对比图 2(b)、(d)可知,由于铝层声阻抗介于压电陶瓷与水之间,压电陶瓷产生的声波经由铝层过渡可以较好地传入水中,因此去除聚氨酯后球形内检测器的发声强度相较压电陶瓷本身也有提升。

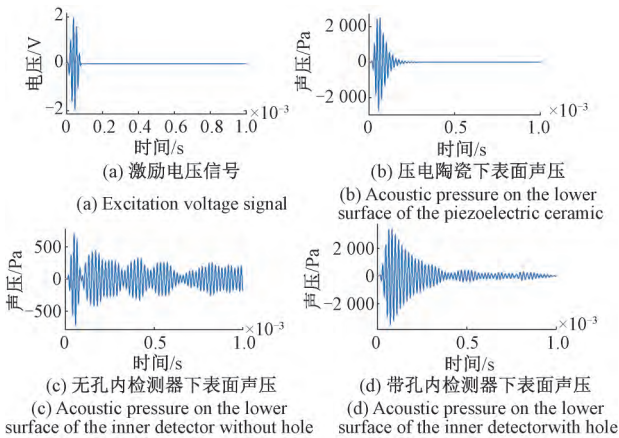
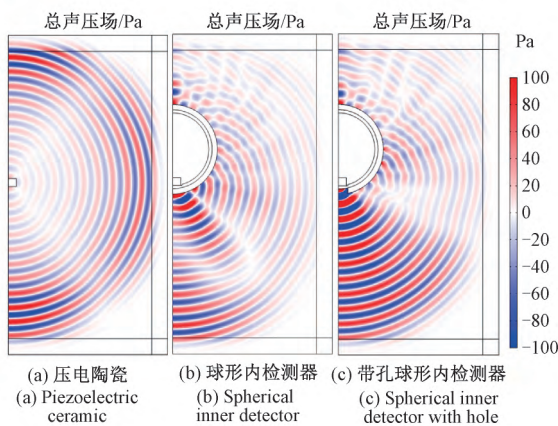


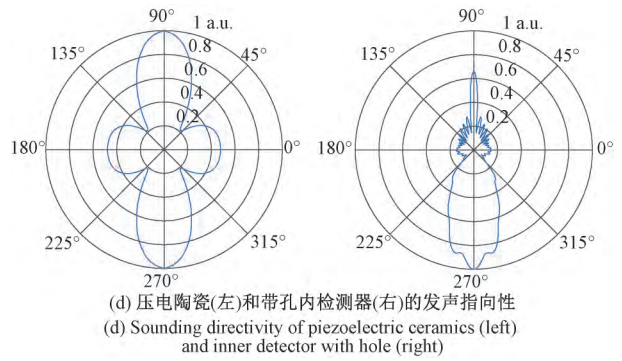
图 2 激励电信号与激发的声信号

Fig. 2 Excitation electrical signals and excited acoustic signals

此外,对比图 3(a)、(b)或图 3(a)、(c)可知,由于压电陶瓷上表面与空气耦合传声效率差,球壳上方的声压明显弱于下方,球形内检测器的发声强度出现了明显的指向性。为了避免指向性的影响,球形内检测器的结构和运行姿态需要仔细设计。压电陶瓷和带孔内检测器的发声指向性曲线如图 3(d)所示。



(a) Piezoelectric ceramic (b) Spherical inner detector (c) Spherical inner detector with hole



(d) Sounding directivity of piezoelectric ceramics (left) and inner detector with hole (right)

图 3 不同模型的声场分布

Fig. 3 The sound field distribution for different models

为进一步分析研究孔的大小、形状对带孔内检测器发声强度的影响,进行了以下两组仿真。首先改变内检测器的孔径大小,得到对应的激发声信号,绘制声信号最大幅值与孔径的关系曲线如图 4(a)所示,由图 4可知,当孔径小于压电陶瓷直径(30 mm)时,发声强度明显减弱,而当其超过压电陶瓷直径后,发声强度不会继续显著增强,因此设计孔径为 35 mm 能保证较高的发声强度且不会影响内检测器的平稳滚动。然后将孔的形状设计为环形,并使内检测器裸露出的铝壳表面积与单一孔(孔径为 35 mm)结构下大致相等,整体截面如图 4(b)所示。此时内检测器发声强度有所减弱,如图 4(c)所示,因此使用单一孔结构既能简化工艺同时可以保证足够的发声强度。

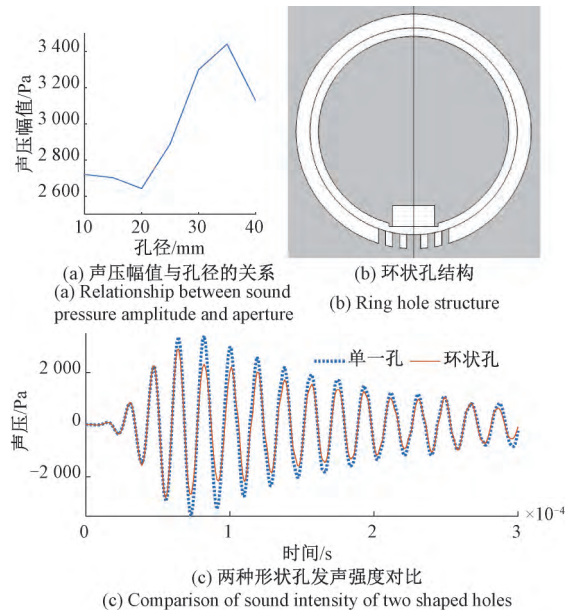


图 4 孔的大小与形状对内检测器发声强度的影响

Fig. 4 Influence of hole size and shape on excited sound intensity of the inner detector

2.2 基于有限元法的充液管道导波分析

使用“压电-声-固耦合物理场”、瞬态分析研究类型,模拟球形内检测器在充液管道内发射超声脉冲信号、形成导波并传播的过程。仿真模型在前述模型基础上进行修改,将水域改为充水管道,其外径 219 mm,壁厚 6 mm,材料为结构钢。图 5(a) 所示为一段时间后管道内的声场分布,图 5(b) 所示为管道内到内检测器不同距离处的声压-时间图。

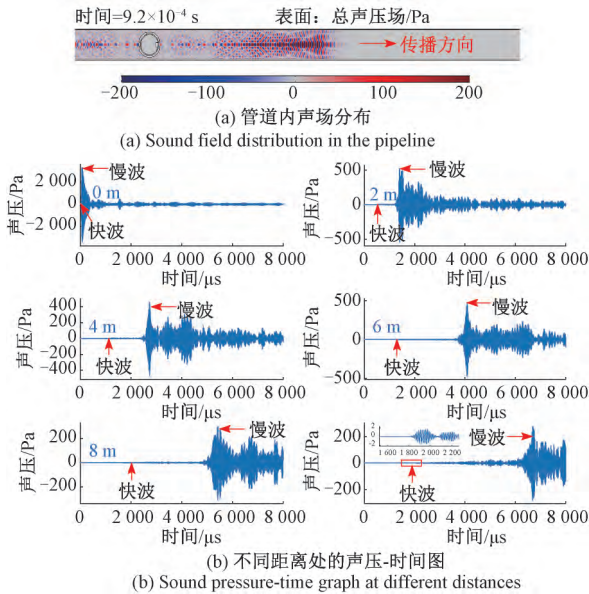


图 5 充液管道导波仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the guided waves in liquid-filled pipelines

由图 5(b) 可知,由于超声导波的频散,随着传播距离的增加,波包的时域宽度逐渐变宽,信号起点时刻与峰值时刻之间的时延越来越大,这两处信号即为导波的两模式。图 6(a)、(b) 所示为计算两种模式群速度的过程。首先确定不同位置处信号的起始时刻和峰值时刻。然后绘制时刻-距离的散点图并进行线性拟合。拟合直线的斜率的倒数即为两种模式的群速度,分别约为 5 529.6 m/s 和 1 527.6 m/s,与管壁、管内流体中的声速相当。据此可判断这两种模式分别是在管壁、管内流体中进行传播。由于声波在固体中的衰减要比在液体中更加显著,随着传播距离的增加,快波的衰减会明显大于慢波。不同位置处快波信号与慢波信号的到达时刻如图 5 所示,由于快波幅值远小于慢波,因此其到达时刻在图中无法肉眼辨别,但根据 10 m 处快波信号的细节放大图可知,其幅值不足慢波幅值的 1%。因此,实际定位时,快波信号会很微弱,无法用于确定接收信号起点,可用能量大的慢波确定信号到达时刻。

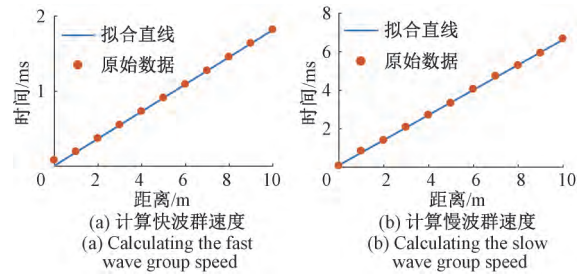


图 6 计算两种模式波的群速度

Fig. 6 Calculation of the group velocities of two mode waves

3 充液管道声速测量实验

在一段充液管道中进行管内声速测定实验。搭建的实验系统包括 3 部分:球形内检测器、充水管道、信号接收系统。球形内检测器及其发声装置如图 7 所示。将压电陶瓷置于球形内检测器底部预先打磨好的平台上,用夹紧装置固定于球壳底部。由于压电陶瓷与铝壳之间声阻抗不匹配,因此需要施加耦合剂作为声波耦合层。压电陶瓷上下两表面粘有树脂薄片作绝缘层,同时用不锈钢板施加预紧力,增强压电陶瓷与球壳的接触力以增强发声强度。

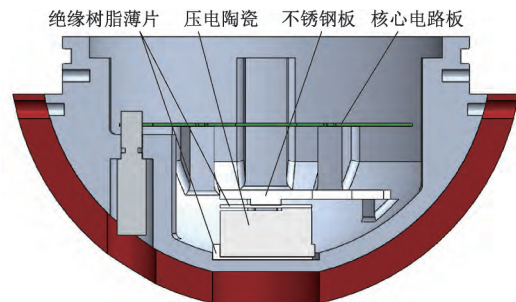


图 7 球形内检测器发声装置

Fig. 7 Schematic diagram of the sound devices in the spherical inner detector

实验现场如图 8(a) 所示,声速测量系统如图 8(b) 所示。其中,管道外径 219 mm、壁厚 6 mm,材料为 X52 石油管线钢。信号接收系统由接收 PZT、信号调理电路、数据采集卡和计算机组成。其中接收 PZT 与发射 PZT 有相同的尺寸、极化方向和性能参数,因此二者谐振频率相同,具有相同的压电转换系数。调理电路对电压信号进行初步放大、滤波、再次放大;信号采集卡将处理后的两路电压信号同步采集到上位机,使用 LabVIEW 软件编程进行数据分析。

实验时使用两组信号接收装置,二者相对距离已知,求出声波到达二者的时间差即可计算声速。如图 8(c) 所示,在管道表面位置 0 处固定一组接收装置 PZT1,将

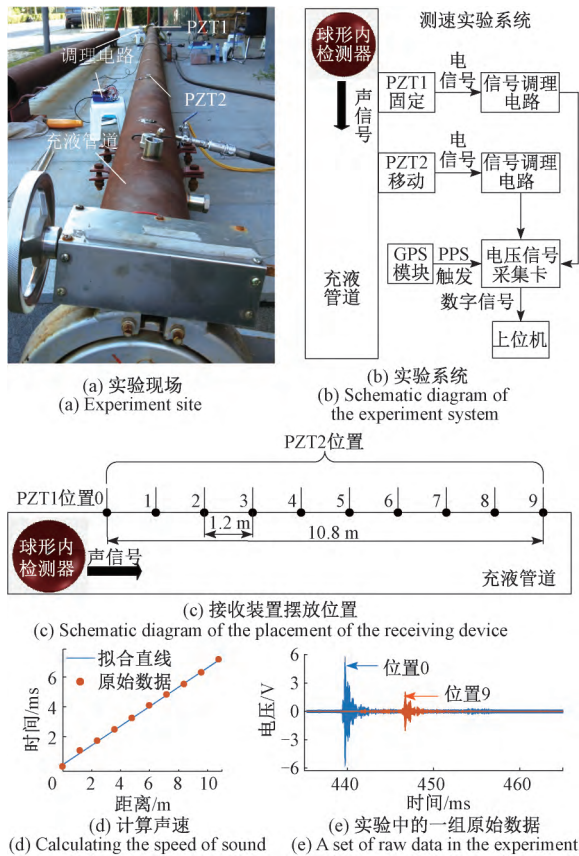


图 8 充液管道导波声速测量实验

Fig. 8 Measurement experiment of the sound velocity of the guided waves in a liquid-filled pipeline

另一组接收装置 PZT2 依次从位置 0 移动到位置 9 相邻位置间隔为 1.2 m, 进行多组实验。然后使用动态阈值法获取信号到达时刻并计算其差值, 得到同一距离下多组时延数据, 计算其标准差、极差, 结果如表 2 所示, 除 PZT 距离为 1.2 m 时所测得的实验数据产生了部分粗大误差外, 其余组数据均表现出了极好的重复性, 极差不超过 80 μs 。根据不同距离下对应的时延, 绘制时延-间距散点图, 作线性拟合, 结果如图 8 (d) 所示。拟合直线的斜率的倒数即为声速, 计算结果为 1 548.1 m/s, 与仿真结果慢波群速度 1 527.6 m/s 的相对误差仅有 1.3%。图 8 (e) 所示为实验过程中采集到的一组原始信号。

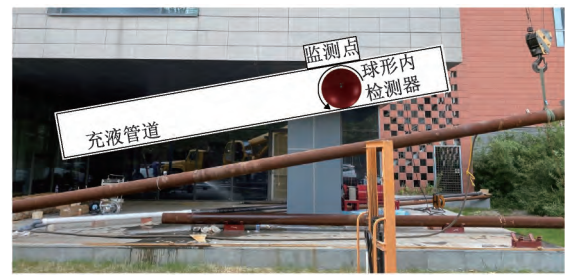
4 球形内检测器定位实验

球形内检测器定位的实验管道与图 8 (a) 所示相同, 但是需要将管道的一端抬起, 形成坡度, 使球形内检测器在管道内向下滚动, 如图 9 (a) 所示。在球形内检测器内安装了压电发声装置和加速度计, 利用加速度信号来确定球在管道内的滚动距离, 将其与最终的超声定位结果进行对比。需要指出的是, 利用加速度确定球的里程需要将球取出、进行离线信号处理。在管道外壁监测点处

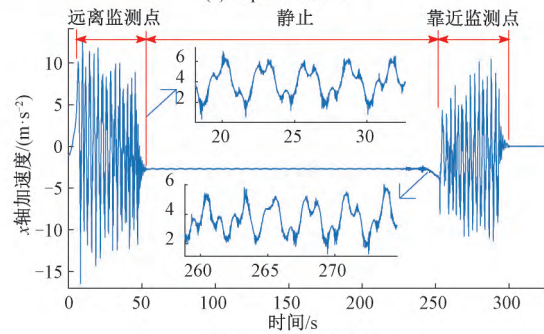
安装有一套压电接收装置, 用来采集在充液管道内传播的超声导波信号。

表 2 同一距离下多次测量时延的重复性
Table 2 Repeatability of the delay in multiple measurements at the same distance

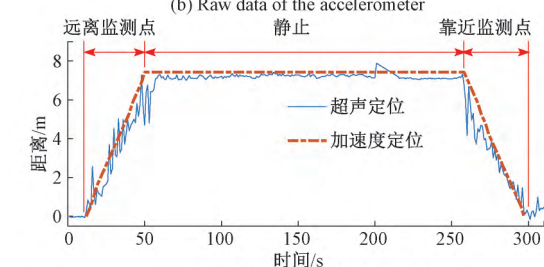
PZT 距离 /m	时延标准差 / μs	时延极差 / μs	PZT 距离 /m	时延标准差 / μs	时延极差 / μs
0	13.8	65	6	9.43	39
1.2	80.5	226	7.2	8.21	31
2.4	9.2	28	8.4	4.77	17
3.6	17.27	71	9.6	10.58	33
4.8	5.45	25	10.8	9.94	33



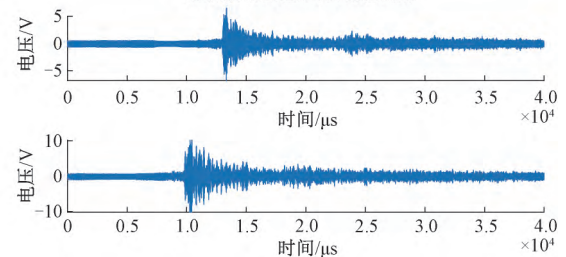
(a) 实验现场



(b) 加速度计原始数据



(c) 超声定位与加速度计定位对比
(c) Comparison between ultrasonic localization and accelerometer localization



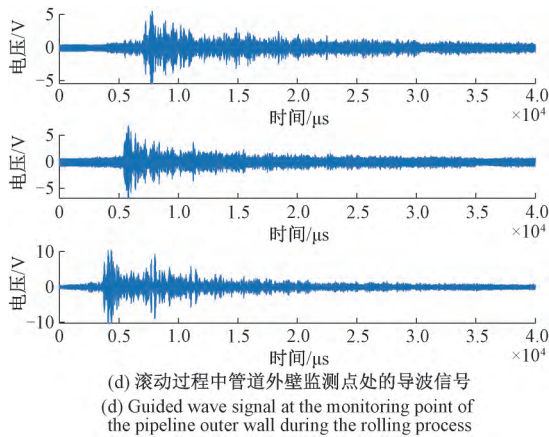


图 9 管道球形内检测器定位实验

Fig. 9 Spherical inner detector localization experiment in a pipeline

首先球形内检测器被放入管道右端、管道右端被抬起,球形内检测器慢慢滚动到管道左端;停留一段时间,其间起吊机调整挂钩到管道左端、抬起管道左端,球形内检测器又缓慢滚回右端。因此,球形内检测器记录的加速度信号出现周期波动、直线、周期波动的 3 段特征,如图 9(b) 所示。球形内检测器在管道内的滚动较为平稳,从一端运动到另一端用时约 40 s,滚动圈数 15~16 圈。根据球形内检测器周长计算出滚动距离约为 7 m,与实际相符。图 9(c) 所示为利用超声导波定位方法计算的球形内检测器距离-时间曲线,并与加速度定位曲线进行了对照。根据曲线中的超声定位距离可以判断,内检测器先远离监测点,静止一段时间后,又开始靠近监测点,这与实验过程中内检测器的滚动过程相吻合,并且与加速度计定位结果基本相等。图 9(d) 所示为管道外壁监测点处一段时间内所采集到的原始信号,由于每次触发采集的时刻与信号发射时刻相同,因此根据所示信号到达时刻的明显前移,即可判断出内检测器在靠近监测点。实验结果表明,本文所提出的定位方法能跟踪球的轨迹,证明了本文所提出的定位方案的可行性。该方法可以实时跟踪和定位球形内检测器,尤其可用于收发球过程监测和定点通过性判断等。

5 结 论

本文针对球形内检测器示踪定位难题,提出了一种基于主动声学的球形内检测器示踪定位方法,并通过有限元仿真和实验明确了其实施要点、证明了其有效性。结果表明,内检测器的聚氨酯减振层对声波发射强度有较大衰减作用,在聚氨酯层上开孔使铝球壳与水接触,可以保证足够大的发声强度,快慢两种模态的导波均有明

确的起始特征和稳定的传播速度,可用于计算导波传播距离并对内检测器进行定位,但慢波幅值远远大于快波幅值,实际应用时应该使用慢波。最后在 $\Phi 219$ mm 充水钢管中进行了声速测量实验和内检测器定位实验,实验中测得的时延具有极好的重复性,极差不超过 $80 \mu\text{s}$,同时实验证明该方法能够实时定位内检测器并监视其远离和靠近监测点的过程。

参考文献

- [1] 高鹏,高振宇,刘广仁. 2019 年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济, 2020, 28(3): 52-58.
GAO P, GAO ZH Y, LIU G R. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2019 [J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(3): 52-58.
- [2] 吴宗强. 世界油气资源消费现状及油气管道发展趋势分析[J]. 云南化工, 2018, 45(7): 7-10.
WU Z Q. Global oil and gas consumption and the development trend analysis of pipeline [J]. Yunnan Chemical Technology, 2018, 45(7): 7-10.
- [3] 廖雍,周迎. 长输油气管道安全运行管理浅析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(8): 209.
LIAO Y, ZHOU Y. Analysis on the safe operation management of long-distance oil & gas pipeline [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2011, 31(8): 209.
- [4] HU Y, LIU K, XU D, et al. Risk assessment of long-distance oil and gas pipeline based on grey clustering [Z]. IEEE, 2017: 198-201.
- [5] 房剑萍. 国内外油气管道事故案例分析[J]. 石油和化工设备, 2016, 19(9): 90-93.
FANG J P. Case analysis of oil and gas pipeline accidents at home and abroad [J]. Petro & Chemical Equipment, 2016, 19(9): 90-93.
- [6] 诸海博,徐晓甲,宋华东,等. 管道内检测技术及系统发展综述[J]. 管道技术与设备, 2018(3): 22-25.
ZHU H B, XU X J, SONG H D, et al. review of in-pipe inspection technology and system development in pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2018(3): 22-25.
- [7] 李健,陈世利,黄新敬,等. 长输油气管道泄漏监测与准实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.
LI J, CHEN SH L, HUANG X J, et al. Review of leakage monitoring and quasi real-time detection technologies for long gas & oil pipelines [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [8] 任魁杰,鲁岑,翟培君,等. 油气管道在线检测技术研

- 究综述[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(1): 8-9.
- REN K J, LU C, ZHAI P J, et al. Review of research on oil & gas pipeline online inspection technology [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 32(1): 8-9.
- [9] 邱光友, 王雪. 油气管道内检测技术研究进展[J]. 石油化工自动化, 2020, 56(1): 1-5.
- QIU G Y, WANG X. Research development status of internal detection technology for gas-oil pipeline [J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2020, 56(1): 1-5.
- [10] 宋志东, 靳世久, 李一博, 等. 管道内检测器里程轮信号优选算法的设计与实现[J]. 管道技术与设备, 2006(3): 12-13.
- SONG ZH D, JIN SH J, LI Y B, et al. Design and implementation of algorithms of selecting PIG odometer wheels signals [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2006(3): 12-13.
- [11] 张鹏, 李一博, 吴晓, 等. 基于声检测的管道内检测器定位系统[J]. 现代科学仪器, 2011(1): 45-47.
- ZHANG P, LI Y B, WU X, et al. Locating system of pipeline inspection gauge based on acoustic detecting [J]. Modern Scientific Instruments, 2011(1): 45-47.
- [12] 刘梦然, 张国军, 简泽明, 等. 管道内检测器声定位技术研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(4): 500-504.
- LIU M R, ZHANG G J, JIAN Z M, et al. Research on acoustic localization technology for PIG [J]. Journal of Transduction Technology, 2014, 27(4): 500-504.
- [13] 葛晓洋, 张国军, 杜春晖, 等. 一种用于管道地面标记的 MEMS 仿生矢量声传感器[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 882-885, 889.
- GE X Y, ZHANG G J, DU CH H, et al. New MEMS bionic acoustic vector sensor used in above-ground marker of pipeline [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2012, 34(6): 882-885, 889.
- [14] LI Y B, WANG D, SUN L Y. A novel algorithm for acoustic above ground marking based on function fitting [J]. Measurement, 2013, 46(8): 2341-2347.
- [15] 韩升华, 李一博, 靳世久, 等. 新一代管道内检测地面标记系统设计[J]. 现代科学仪器, 2009(2): 34-36.
- HAN SH H, LI Y B, JIN SH J, et al. Design of new above ground marker system of pipeline internal inspection instrument [J]. Modern Scientific Instruments, 2009(2): 34-36.
- [16] 杨理践, 申晗, 高松巍, 等. 低频电磁的管道内检测器跟踪定位技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(1): 48-53.
- YANG L J, SHEN H, GAO S W, et al. Low frequency electromagnetic tracking and positioning technology for pipeline internal detector [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(1): 48-53.
- [17] 王少平, 刘金海, 高丁, 等. 海底管道内检测器实时跟踪与精确定位[J]. 无损检测, 2013, 35(9): 26-30, 65.
- WANG SH P, LIU J H, GAO D, et al. A method of tracking and precisely locating submarine in-line inspection tool [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(9): 26-30, 65.
- [18] 杨理践, 申晗, 高松巍, 等. 管道内检测器低频跟踪定位方法[J]. 油气储运, 2018, 37(6): 613-619.
- YANG L J, SHEN H, GAO S W, et al. Low-frequency tracking and positioning method for pipeline internal detector [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(6): 613-619.
- [19] 徐云, 戴波, 谢祖荣, 等. 低频电磁波在管道内检测外定位的应用[J]. 北京石油化工学院学报, 2010, 18(2): 35-40.
- XU Y, DAI B, XIE Z R, et al. Application of low frequency electromagnetic wave in the external positioning of pipeline internal inspection [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2010, 18(2): 35-40.
- [20] PIAO G Y, GUO J B, HU T H, et al. High-sensitivity real-time tracking system for high-speed pipeline inspection gauge [J]. Sensors, 2019, 19(3): 731.
- [21] 陈世利, 王冬祥, 郭世旭, 等. 球形管道内检测器示踪定位技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2): 87-93.
- CHEN SH L, WANG D X, GUO SH X, et al. Tracking and localization technology of spherical pipeline internal detector [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(2): 87-93.
- [22] 苏智超, 黄新敬, 薛亚萌, 等. 基于球形内检测器的管道倾角测量新方法[J]. 电子技术应用, 2018, 44(5): 93-97, 102.
- SU ZH CH, HUANG X J, XUE Y M, et al. A new pipeline inclination measurement method using spherical inner detector [J]. Application of Electronic Technique, 2018, 44(5): 93-97, 102.
- [23] GUO L, ZENG ZH M, HUANG X J, et al. Vibration detection of spanning subsea pipelines by using a

- spherical detector [J]. IEEE Access, 2019, 7: 7001-7010.
- [24] ZHANG Y, XUE Y M, HUANG X J, et al. Pipeline inclination measurements based on a spherical detector with magnetic proximity switches [J]. IEEE Access, 2018, 6: 39936-39943.
- [25] GUO L, ZENG ZH M, HUANG X J, et al. Low-cost and high-efficiency method for detecting vertical bends of subsea pipelines [J]. IEEE Access, 2020, 8: 33926-33933.
- [26] HUANG X J, CHEN S L, GUO SH X, et al. A 3D localization approach for subsea pipelines using a spherical detector [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1828-1836.
- [27] 赵海鸣, 卜英勇, 王纪婵, 等. 一种高精度超声波测距方法的研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版). 2006(3): 35-38.
ZHAO H M, BU Y Y, WANG J CH, et al. Research on a high-precision ultrasonic ranging method [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition) 2006(3): 35-38.
- [28] 陈洁, 余诗诗, 李斌, 等. 基于双阈值比较法超声波流量计信号处理[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1024-1033.
CHEN J, YU SH SH, LI B, et al. Signal processing based on dual-threshold of ultrasonic flow meter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(11): 1024-1033.
- [29] 王晓伟, 刘占生, 龚唯. 基于 AR 模型的声发射信号到达时间自动识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(11): 79-83.
WANG X W, LIU ZH SH, DOU W. Automatic recognition of arrival time of acoustic emission signal based on AR model [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 79-83.
- [30] XU J. An effective way to validate signal arrival time in ae structural monitoring [J]. Advanced Materials Research 2011, 1067: 2471-2476.

作者简介



周乾, 2018 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为管道内检测器示踪定位技术。

E-mail: zhouqian1028@tju.edu.cn

Zhou Qian received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate in School of Precision Instruments and Opto-electronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include the tracking and localization technology of pipeline inner detectors.



曾周末, 1982 年和 1985 年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院讲席教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术及仪器。

E-mail: zhuzeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1982 and 1985, respectively, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1993. He is currently a professor and PhD student supervisor at School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. His main research interest includes detection technology and instrument.



黄新敬(通信作者), 2010 年和 2016 年于天津大学分别获得学士学位和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为管道缺陷检测、管道安全预警和新型管道内检测器。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. Now, he is an associate professor and master student supervisor in School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University. His main research interests include pipeline defect detection, pipeline safety warning and new type pipeline inner detector.