文章编号:1008-1534(2026)05-0456-09

夹装式超声导波水平管道液位测量方法

王俊峰,刘金海,尚尊轩,王璐瑶,李 牧

(中海油能源发展股份有限公司采油服务分公司,天津 300452)

摘 要:为了解决煤层气集输管线积液状态难以在线检测的问题,提出一种基于超声导波的夹装式水平管道液位测量方法。首先,利用液体负载引起的导波能量泄漏效应,通过分析导波传播特性建立液位与接收信号能量之间的关系;其次,基于圆管导波传播理论和频散特性分析确定适用于液位检测的导波模态,并搭建夹装式实验系统开展不同液位条件下的测量实验,建立液位与导波信号能量之间的标定模型。结果表明:导波信号能量随液位升高呈现单调递减的非线性变化规律,采用广义 S 型函数能够有效描述液位与信号能量之间的关系,拟合决定系数达到 0.992;相对重复性标准偏差(RSD_r)为 1.61%,液位估计平均相对误差为 0.27%。所提方法无需改变管道结构,可为煤层气集输管线积液状态的非侵入式监测提供一种工程可行方案。

关键词:仪器仪表技术;超声导波;液位测量;夹装式检测;非侵入式检测

中图分类号:TE832 **文献标识码**:A **DOI**: 10.7535/hbgykj.2026yx05009

Clamped ultrasonic guided waves horizontal pipe level measurement method

WANG Junfeng, LIU Jinhai, SHANG Zunxuan, WANG Luyao, LI Mu

(CNOOC Energy Development Company Limited Oil Production Services Branch, Tianjin 300452, China)

Abstract: To address the difficulty of online detection of liquid accumulation in coalbed methane gathering pipelines, a clamp-on ultrasonic guided wave-based liquid level measurement method for horizontal pipes was proposed. Firstly, the proposed method utilized the energy leakage effect of guided waves induced by liquid loading and established the relationship between liquid level and received signal energy by analyzing the propagation characteristics of guided waves. Secondly, based on the propagation theory and dispersion characteristics of guided waves in cylindrical pipes, an appropriate guided wave mode for liquid level measurement was determined. A clamp-on experimental system was constructed to perform measurements under different liquid level conditions, and a calibration model between liquid level and guided wave signal energy was established. The results show that the guided wave signal energy exhibits a monotonically decreasing nonlinear variation with increasing liquid level. The generalized sigmoid function can effectively describe the relationship between liquid level and signal energy, achieving a fitting coefficient of determination of 0.992. The repeatability standard deviation is 1.61%, and the average relative error of liquid level estimation is 0.27%. The proposed method requires no modification of the pipeline structure and provides

收稿日期:2026-01-14;修回日期:2026-08-13;责任编辑:丁军苗

基金项目:"十五五"国家油气重大专项(2024ZD140330603)

第一作者简介:王俊峰(1971—),男,天津大港人,高级工程师,主要从事油气田生产工艺技术方面的研究。

通信作者:尚尊轩工程师。E-mail:shangzx@cnooc.com.cn

王俊峰,刘金海,尚尊轩,等.夹装式超声导波水平管道液位测量方法[J].河北工业科技,2026,43(5):456-464.

Wang Junfeng, Liu Jinhai, Shang Zunxuan, et al. Clamped ultrasonic guided waves horizontal pipe level measurement method[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2026, 43(5): 456-464.

a practical non-invasive solution for monitoring liquid accumulation in coalbed methane gathering pipelines.

Keywords: instrumentation technology; ultrasonic guided waves; liquid level measurement; clamp-on detection; non-intrusive testing

煤层气作为高效清洁的非常规能源，其开发利用对降低煤矿瓦斯风险、减少大气污染具有重要意义[1]。煤层气长距离集输管线承担着将气源稳定输送至需求区域的关键任务[2]，而管线的畅通与安全运行直接决定了输送效率与供能可靠性。在集输管线运输过程中，外界温度和压力波动会导致游离水及重烃析出，并在管道低洼处形成积液。积液不仅会减小管道有效流通截面，还会加剧管壁腐蚀，进一步影响集输系统的稳定运行[3]。积液在低温环境下冻结后，可能引发局部封堵，严重时甚至导致管道破裂[4]。由于集输管线多为长距离埋地敷设，堵塞位置难以快速判定与处置，往往造成检修周期长、成本高以及输送中断等连锁问题，带来显著经济损失与运行风险[5]。因此，针对在役金属管道开展在线、可靠的积液检测与液位评估，对于保障煤层气集输管线的安全稳定运行具有重要意义。

对于多数集输管线而言，其运行维护过程通常要求不改变现有管道结构，实现非介入式管道探伤和液位测量。工业领域经常使用的非侵入式检测技术包括：超声检测(ultrasonic testing，UT)[6]、磁粉检测(magnetic particle testing，MT)[7]、射线检测(radiographic testing，RT)[8]、渗透检测(penetrant testing，PT)[9]和涡流检测(eddy current testing，ECT)[10]。非侵入式检测方法具有无须开孔取源，不会影响管道的结构、安装方便、耐用可靠等优点，在集输管线的液位测量中有着无可比拟的优势[11]。

在多种非侵入式检测技术中，超声检测因具有穿透能力强、信息获取丰富以及对介质界面变化敏感等特点，在管道内部状态感知和液位检测领域得到广泛应用[12-13]。其中，超声导波是一类在波导结构中传播的超声波，当结构尺寸与波长处于同一数量级时，波在边界间多次反射并发生模态耦合，形成具有多模态和频散特性的导波。根据超声波传播方式和检测原理，超声检测常用方法包括脉冲回波法、透射法、衰减法和共振法等。传统超声检测方法通常依赖局部区域测量。其中，脉冲回波法易受液面波动及气泡等散射因素影响；透射法和衰减法存在传播距离有限的问题；而共振法对传感器安装条件要求较高，难以满足长距离管道在线监测需求。相比之下，超声阻抗法利用管壁与液体介质之间声阻抗差异，通过分析超声信号能量变化实现液位表征，具有非接触、响应速度快以及抗干扰能力强等优势，更适用于复杂管道环境下的积液检测。

超声阻抗法按所用波型主要分为纵波阻抗法和Lamb 波阻抗法。纵波阻抗法通常需要手动移动传感器完成测量，操作相对繁琐，对大体积容器的在线检测不够友好。相比之下，Lamb 波阻抗法具有安装与操作简便、衰减小、传播距离远、可对管壁实现面扫描等优势，已被广泛用于传感与液位检测研究[14]。例如，Liu 等[15]提出了一种基于 Lamb 波的储蓄罐液位测量方法，推导了单侧液体负载下 Lamb 波的频散方程，将液位上下位置信号能量的比值定义为液位变化的判别指标。然而，现有超声导波液位检测研究多针对封闭式容器等规则结构，对于实际输送管道中液体负载影响下的导波传播规律及液位响应机制尚缺乏系统研究。

为满足集输管线在线液位检测需求，本文提出了一种基于超声导波的夹装式液位测量方法。该方法利用液体负载引起的导波能量泄漏效应，通过分析导波传播特性确定检测模态，并建立液位与导波信号能量之间的关系；搭建实验系统开展不同液位条件下的测量实验，以期为煤层气集输管线积液状态的非侵入式监测提供一种工程可行的技术方案。

1　圆管超声导波传播与液位检测原理

1.1　液位检测模型与导波泄漏机理

本文研究对象为煤层气集输管线中的圆管结构超声导波传播过程。与体波不同，导波在管壁结构中传播时受到边界条件约束，其传播特性与管道几何尺寸、材料参数以及周围介质密切相关。对于薄板结构，当结构厚度与波长处于同一数量级时，纵波和横波在边界反射过程中发生耦合，形成具有多模态和频散特性的导波[16]。导波是一种复杂的波动现象，其传播特性与材料的厚度、弹性参数以及边界条件密切相关。在薄板结构中，不同频率的导波具有不同的相速度和群速度。

图 1 为导波在水平含液管道中的传播原理图。导波由传感器 A 以一定的角度激励，沿管壁传播，被对称安装在管道下侧的传感器 B 接收。在导波的传播过程中，平面外位移和衰减较大的模态会向管道中的液体介质泄漏更多的能量，即导波的泄漏效应[17]。这种泄漏效应是由导波在传播过程中与

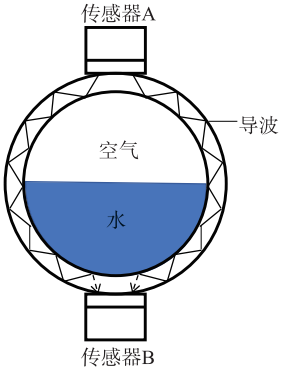

图 1 导波在水平含液管道中的传播原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the propagation of guided wave in a horizontal liquid-containing pipeline

液体介质相互作用，能量从固体介质向液体介质转移而产生的。具体来说，当导波的位移分量在液体介质中产生压力变化时，能量就会从导波传递到液体中，从而引起导波能量的衰减。换言之，接收到的导波信号的剩余能量与管段中的液位之间存在一定的关系，可用于进行管道中的液位检测。当液位发生变化时，导波与液体的相互作用程度也会改变，从而导致接收到的导波信号能量发生变化。通过分析这些能量变化，可以推断出管道中的液位高度。例如，当液位上升时，更多的导波信号能量会被液体吸收，导致接收到的信号能量减小；反之，当液位下降时，接收到的信号能量会相对增加。

此外，导波的频散特性也对液位检测具有重要影响。不同模态的导波在不同频率下具有不同的传播速度，因此可通过选择合适的激励频率和导波模态优化液位检测的灵敏度和精度。部分导波模态对液位变化具有较高敏感性，能够提供更明显的信号差异，从而提高检测区分度。在实际应用中，通常需要结合仿真分析与实验测试确定适宜的导波模态及激励条件，以实现准确的液位检测。

综上所述，导波检测技术利用导波在管壁结构中的传播特性，通过分析导波与液体介质的相互作用以及能量变化，实现对管道中液位的非接触式检测。这种方法具有响应速度快、测量范围广、精度高等优点，在工业自动化、石油化工、航空航天等领域具有广泛的应用前景。

1.2 圆管导波频散特性分析

导波在管道等空心圆柱形波导中传播时，基于管道的几何形状、材料的物理特性（如密度和弹性模量）以及波的类型，可以使用 Navier 方程对波的传播进行建模[18]，计算公式为

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

式(1)中：u 表示位移向量；ρ 表示材料密度；λ 和 μ 是 Lamé 参数，与材料的弹性模量有关；f 表示体积力密度（在没有外力的情况下，固定为 0）；t 表示时间；∇ 表示哈密顿算子；$\nabla\cdot$ 表示散度算子；∇^2 表示拉普拉斯算子。

基于 Helmholtz 分解定理[19]，位移场 U 由膨胀标量势函数 Φ 和等容矢量势函数 H 组成，并且满足：

$$\begin{cases}\nabla\cdot H=0,\\ U=\nabla\Phi+\nabla\times H。\end{cases} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)可得：

$$\begin{cases}c_{\mathrm{L}}^2\nabla^2\Phi=\dfrac{\partial^2\Phi}{\partial t^2},\\ c_{\mathrm{T}}^2\nabla^2\Phi=\dfrac{\partial^2 H}{\partial t^2},\end{cases} \tag{3}$$

式(3)中：c_{L} 表示管道的纵波波速；c_{T} 表示管道的横波波速。

3 个方向上应力场的分量可表示为

$$\begin{cases}u_r=U_r(r)\cos(n\theta)\cos(\omega t+kz),\\ u_\theta=U_\theta(r)\sin(n\theta)\cos(\omega t+kz),\\ u_z=U_z(r)\cos(n\theta)\sin(\omega t+kz),\end{cases} \tag{4}$$

式(4)中：n 表示导波周向阶数；θ 表示圆周方向角坐标；k 表示轴向波数；ω 表示角频率；r 表示径向坐标；U_r、U_θ、U_z 表示根据 Bessel 函数形成的相应位移幅值；u_r、u_θ、u_z 分别表示位移场的径向、周向和轴向分量。

依据胡克定律，将应力场和位移场关系代入管壁边界条件，可得到如下齐次方程组。

$$[\boldsymbol{c}_{ij}]_{6\times6}[A\ \ B\ \ A_1\ \ B_1\ \ A_2\ \ B_2]^{\mathrm{T}}=[0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0]^{\mathrm{T}}, \tag{5}$$

式(5)中：$[\boldsymbol{c}_{ij}]$ 表示材料弹性刚度矩阵；A、B、A_1、B_1、A_2、B_2 为由边界条件确定的位移势函数系数。

如果系数矩阵的行列式为 0，则可以得到管道中的导波频散方程：

$$|\boldsymbol{c}_{ij}|=0\ 。 \tag{6}$$

导波群速度 c_{g} 和相速度 c_{p} 的关系式为

$$c_{\mathrm{g}}=\frac{c_{\mathrm{p}}^2}{c_{\mathrm{p}}-(fw)\dfrac{\mathrm{d}c_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}(fw)}}\ , \tag{7}$$

式(7)中：w 表示管道壁厚度。

由式(6)、式(7)可以得到圆管中超声导波频散曲线。基于圆管导波频散特性分析，计算得到不同纵向模态的传播特性。

上述理论分析为实验参数选择提供了依据。通过求解圆管导波频散关系，可以确定不同模态的传播特性，并结合群速度和相速度分析选择适合液位

检测的导波模式。同时，导波模态及传播特性的确定为后续激励频率、换能器布置方式以及信号分析方法的选择提供理论指导。

1.3　液位检测模态选取

在管道检测与监测领域，导波技术因其独特的优势而备受关注。管道中存在 3 种模态的导波，分别是纵向模态 $L(0,m)$、扭转模态 $T(0,m)$和弯曲模态 $F(n,m)$导波[20]。这 3 种模态导波各自具有不同的传播特性，对于实际应用有着不同的影响。

扭转模态和弯曲模态较为复杂，且没有径向位移，这一特性使其在许多情况下并不适合用于液位测量。相比之下，纵向模态 $L(0,m)$则具有较为明显的优势。在通常情况下，为了实现液位测量，研究者更倾向于激发纵向模态，特别是纵向模态 $L(0,2)$。$L(0,2)$模态具有平面外位移，当管道中存在液体时，这种位移会导致能量泄露。这一现象虽然看似是能量损失，但实际上却为液位测量提供了重要的依据。此外，$L(0,2)$模态的频率频散较小，易与其他模态进行区分。在复杂的管道环境中，能否准确区分不同模态对于测量的准确性至关重要。因此，综合考虑各种因素，选用 $L(0,2)$模态进行液位测量是较为理想的选择。

在进行液位测量时，还需要考虑声波的传播特性。根据 Snell 定律[21]，可以得到斜探头的楔角、声波在斜探头楔块中的纵波速度和目标模态的相速度之间的数值关系。这一关系对于确定声波在管道中的传播路径和速度至关重要。通过精确计算这些参数，可以确保声波能够有效地激发目标模态，从而实现准确的液位测量。在实际应用中，这一数值关系的确定需要综合考虑多种因素，包括管道的材质、尺寸以及液体的性质等。通过对这些因素的综合分析，可以优化测量方案，提高测量的精度和可靠性。

为了保证斜探头激发的超声波能够与目标导波模态实现相速度匹配，根据 Snell 定律，超声波入射角与斜探头楔块中的纵波速度及目标导波模态相速度之间需满足

$$\theta_r = \arcsin \frac{c_1}{c_p}, \tag{8}$$

式(8)中：c_1 表示表示斜探头楔块材料中的纵波速度；c_p 表示管道中目标导波模态相速度；θ_r 表示超声波入射角。

根据试验室现有的条件，本文采用楔形角为 30°的斜探头、频率为 200 kHz 的 3 个周期正弦脉冲作为激励信号。

1.4　导波模态识别

在实际检测过程中，充液管道内多种模态间导波的传播速度差距较小，并且管段内存在回波等噪声干扰，导致检测信号不同模态波包混叠，因此单纯依赖时域信号模态识别法并不可靠。Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang transform，HHT)能够有效分析非线性和非平稳信号，由 Huang 等于 1998 年提出。HHT 可以对信号的局部变化特征进行自适应分析处理，有利于将所需模态的特征信息从混叠信号中分离出来。因此，选用 HHT 对实验测得信号进行模态识别。HHT 主要包括 2 个步骤：经验模态分解(empirical mode decomposition，EMD)和希尔伯特谱分析(Hilbert spectral analysis，HSA)。其中，EMD 将目标信号分解成多个本征模态函数(intrinsic mode functions，IMF)；HSA 把获得的信号由实值转换成复数形式，用以获得解析信号的瞬时频率与瞬时幅值。最终，通过 HHT 得到信号的高精度时频信息。EMD 流程图如图 2 所示。

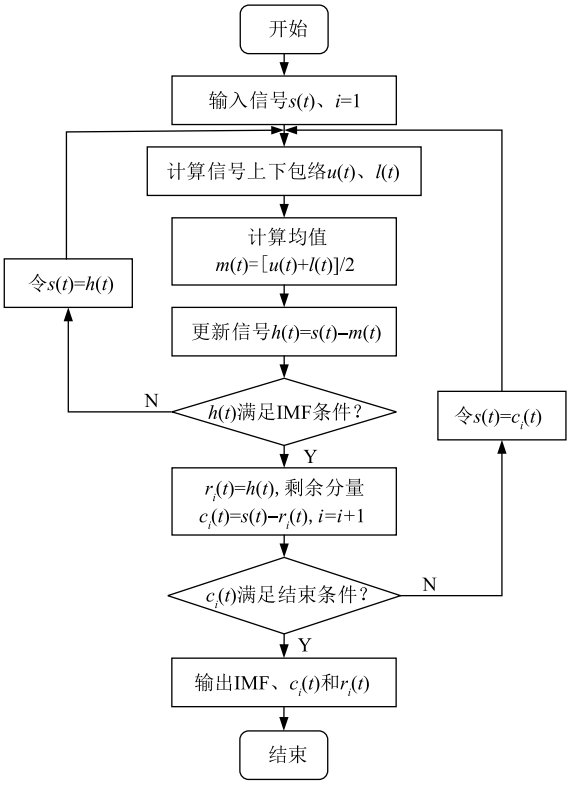

图 2　EMD 流程图

Fig. 2　EMD flowchart

信号 EMD 分解公式为

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N} r_i(t) + c_i(t), \tag{9}$$

式(9)中：$s(t)$表示待分解信号；$r_i(t)$表示第 i 阶 IMF 分量，用于描述信号中不同尺度的振荡特征；$c_i(t)$表示残差分量，反映信号整体变化趋势。

对每个 IMF 进行 HSA 变换，计算其瞬时频率和瞬时幅值，将所有 IMF 的瞬时参数组合，形成希

尔伯特谱。该谱图保留了信号在时域的局部特性，并提供了幅度和频率域的信息。其变换公式为

$$H[m_i(t)]=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{m_i(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau\ , \qquad (10)$$

式（10）中：$m_i(t)$ 表示第 i 阶 IMF 分量，$H[m_i(t)]$ 表示其 HHT 结果；τ 表示积分变量。

通过 HHT，可构造 IMF 分量的解析信号，进一步获得信号的瞬时幅值和瞬时频率特征。以 HHT 方法为基础，对实验测得的信号进行模态识别分析。图 3 为 30°空管检测信号 HHT 结果曲线。信号被分为 6 个本征函数，IMF4 在激励频率下的幅值分量最大，因此选择 IMF4 进行 HSA 变换。图中主要存在 1 个波包，根据波包的峰值时间与频散曲线中的群速度可以确认其为 $L(0,2)$模态。

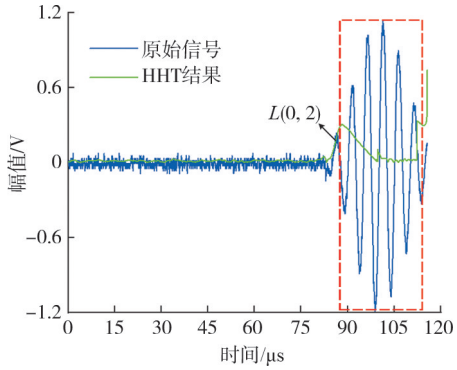

图 3 30°空管检测信号 HHT 结果曲线

Fig. 3 HHT transform of 30° air traffic control detection signal

2 实验方法与结果分析

2.1 实验方法

管道积液状态监测系统结构如图 4 所示，实际监测系统如图 5 所示。该系统主要由碳钢管道（直径为 114 mm、壁厚为 6 mm、长度为 0.4 m）、信号发生器、信号放大器、数字示波器、数据采集仪以及超声换能器（200 kHz 纵波斜探头）组成。其中，管道内部测量介质是空气和水。考虑到煤层气集输管线中的积液主要表现为液态水和凝析液等液相介质，为便于实验控制和重复验证，本文采用水作为模拟积液介质，研究不同液位条件下超声导波传播能量变化规律。实验在室内环境下进行，测试过程中环境温度保持在(25±2)℃，相对湿度保持在(45±10)%范围内。实验期间环境条件基本稳定，避免了温度和湿度变化对管道材料弹性参数以及超声导波传播特性的影响。

2 个超声换能器通过耦合剂夹装在管道外壁的相对位置，一个用于激励信号，另一个用于接收信号。激励信号由信号发生器产生，经信号放大器放大，从而传输给超声换能器，超声换能器经电压激励后产生超声波，超声波在管壁中以 Lamb 波的形式传输和衰减后，剩余的超声能量被管道另一端的换能器接收，波形被数据采集仪采集并在示波器上显示。最后，在计算机上绘制和分析所得数据。

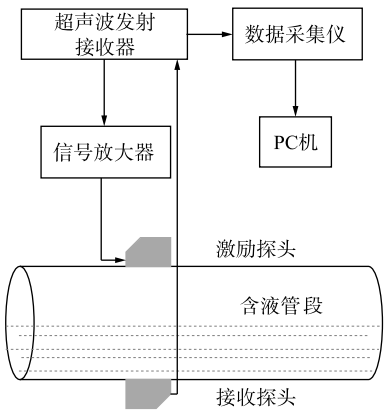

图 4 管道积液状态监测系统结构

Fig. 4 Structure of the pipeline fluid accumulation state monitor system

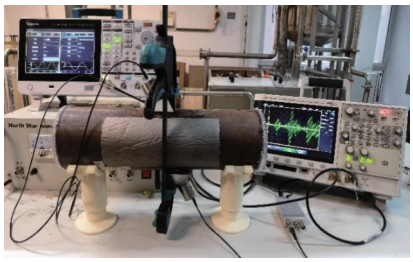

图 5 实验监测系统

Fig. 5 Experimental monitor system

2.2 结果分析

记水平管道内液位高度为 h，从空管状态（$h=0$ mm）开始记录，每隔 10 mm 记录一次相应液位下信号的幅值能量，每组测量 3 次并取平均值。为了减少信号发生器及放大器的不稳定性的影响，将接收信号与激励信号进行比较，对接收信号幅值进行归一化。对采集到的信号进行傅里叶变换和带通滤波，提取中心频率下对应的信号能量，并将结果进行数值拟合。激励信号和原始接收信号波形分别如图 6、图 7 所示。由图可知，导波在满管状态下受到水载作用的影响，幅值有较大的衰减，符合理论分析结论。

为建立液位与导波信号能量之间的定量关系，采用广义 S 型函数对不同液位条件下获得的导波信号能量进行拟合，数值拟合结果如图 8 所示。

由图 8 可知，随着液位高度 h 增大，接收信号能量整体呈现逐渐降低的变化趋势，并表现出明显的非线性特征。广义 S 型函数能够较好地描述液位与导波信号能量之间的映射关系，拟合曲线与实验

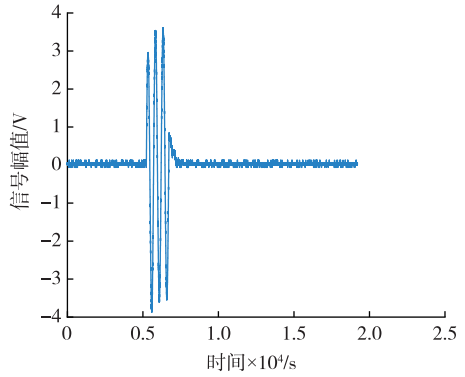

图 6　激励信号波形

Fig. 6　Excitation signal waveform

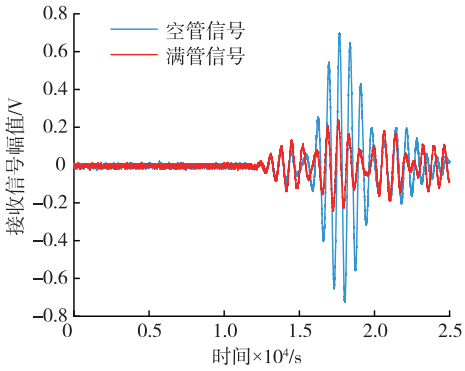

图 7　原始接收信号波形

Fig. 7　Original received signal waveform

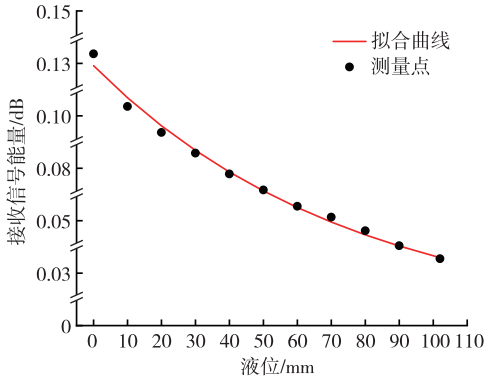

图 8　数值拟合结果

Fig. 8　Numerical fitting results

测量点具有较好的一致性。该函数具有上下限约束特性，其参数具有明确的物理意义。其中，上下限参数分别对应空管和满管状态下的信号能量水平，中间参数能够反映液位变化过程中导波能量响应的变化特征。因此，该函数适用于构建水平管道液位标定模型，为后续液位测量提供理论依据。

所选非线性函数模型的标准形式为

$$E(h)=A+\frac{K-A}{1+\mathrm{e}^{-B(h-M)}}, \tag{11}$$

式(11)中：$E(h)$ 表示液位高度 h 对应的预测信号能量值；A 表示满管时的理论能量值；K 表示空管时的理论能量值；B 为生长速率因子，控制曲线在中点附近的陡峭程度；M 为曲线的中点，即能量值为 $(A+K)/2$ 时对应的液位高度。

为了拟合该非线性函数模型，本研究采用非线性最小二乘法对模型参数进行估计，以残差平方和(SSE)最小为优化目标，其计算公式为

$$\mathrm{SSE}=\min_{\theta}\sum_{i=1}^{N}\left[E_i-\hat{E}(h_i;\theta_r)\right]^2, \tag{12}$$

式(12)中：E_i 表示在液位高度 h_i 下测量得到的信号能量值；$\hat{E}(\cdot)$ 表示超声波入射角为 θ_r 时在液位高度 h_i 下的信号能量预测值；N 为数据点总数。

通过初始参数设置和 Levenberg-Marquardt 算法迭代优化，对广义 S 型函数进行非线性拟合，获得各参数估计值 $A=0.032$、$K=0.124$、$B=0.018$ 和 $M=48$。各参数估计值及其 95% 置信区间如表 1 所示。参数置信区间能够反映模型参数估计的不确定性，为评价拟合结果的可靠性提供依据。

表 1　各参数估计值及其 95% 置信区间

Tab. 1　Estimated values of each parameter and their 95% confidence intervals

参数	估计值	95%置信区间
A	0.032	(0.031 55,0.032 45)
K	0.124	(0.123 1,0.124 9)
B	0.018	(0.017 4,0.0186)
M	48	(46,50)

由表 1 可知，广义 S 型函数各参数均获得了明确的估计值，且对应的 95% 置信区间较窄，表明基于实验数据得到的模型参数具有较好的稳定性和较小的不确定性，说明所建立的非线性函数模型能够较为合理地表征液位变化与接收信号能量之间的对应关系。

为了评价模型整体拟合效果，本文引入决定系数 R^2，其公式为

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i-\hat{E}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(E_i-\overline{E})^2}, \tag{13}$$

式(13)中：n 表示参与模型拟合的液位实验数据组数；$\overline{E}$ 表示 n 个液位条件下实验测得的接收信号能量的平均值。

R^2 取值越接近 1，表明拟合曲线计算所得的预测值与实验测得的接收信号能量数据之间的偏差越小，拟合程度越高。本研究的 $R^2=0.992$，表明广义 S 型函数拟合曲线与实验数据变化曲线具有较高的一致性，能够较好地表征液位与接收信号能量之间的非线性关系。因此，所建立的广义 S 型函数可作为后续液位标定与测量的数学模型，为利用接收信

号能量反演管道液位提供依据。

2.3 重复性实验

为定量评估本文所设计的管道积液状态监测系统的稳定性与可靠性，进行了严格的重复性实验。实验采用上发下收的传感器布置模式，在其余实验条件与前述完全相同的前提下，以每隔 10 mm 向管内加水的方式改变液位高度，并完整记录每个液位点下的检测信号能量值。上述过程独立地重复执行 5 次，以获取充足的数据用于统计分析，重复性测量曲线如图 9 所示。

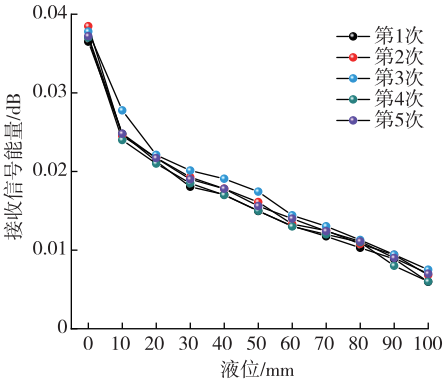

图 9 重复性测量曲线

Fig. 9 Repeatability measurement curve

极差法是一种简洁、高效的估计实验标准偏差的方法，适用于小样本（重复次数 $n \leqslant 10$）的重复性测量分析。其核心是计算各液位点下多次测量数据的极差，并通过极差系数推导出重复性标准偏差。

对每个液位高度 h_i（$i=1,2,\cdots,m$），都有 5 次重复测量得到的信号能量值分别为 E_{i1}，E_{i2}，…，E_{i5}。

各液位点的极差 R_i 的公式为

$$R_i = \max(E_{i1},E_{i2},\cdots,E_{i5}) - \min(E_{i1},E_{i2},\cdots,E_{i5}), \tag{14}$$

式(14)中：h_i 表示第 i 个液位测试点；m 表示液位测试点总数；E_{ij} 表示在液位 h_i 条件下第 j 次重复测量得到的信号能量值。

对全部 m 个液位点的极差 R_i 求均值，得到平均极差 $\overline{R}$，计算公式为

$$\overline{R} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} R_i 。 \tag{15}$$

极差系数 d 是一个与重复次数 n 相关的统计常数。根据《测量不确定度评定与表示》[22]，当重复次数 $n=5$ 时，极差系数 $d=2.33$。

平均极差除以极差系数，即可得到重复性标准偏差的估计值，即为重复性标准偏差 s_r：

$$s_r = \frac{\overline{R}}{d} 。 \tag{16}$$

s_r 是衡量测量系统随机误差的关键指标，其值越小，表明系统的精密度越高，重复性越好。

对 5 次重复性实验数据按上述方法进行处理，得到了不同液位高度下的信号能量极差 R_i。为避免数据重复，表 2 列出了部分典型液位点下 5 次重复性测量结果的极差值。

表 2 重复性测量结果极差

Tab. 2 Range of repeatability experiments measurement results

液位高度/mm	极 差
0	0.002 0
40	0.002 1
80	0.001 0
100	0.001 6

经计算，所有液位点的平均极差 $\overline{R}$ 为 0.000 8。取 $n=5$ 时的极差系数 $d=2.33$，代入公式(16)计算得到系统的重复性标准偏差 $s_r=0.000\ 3$。

此外，对整个测量范围内的信号能量平均值进行了计算，得到平均能量值 $\overline{E}=0.018\ 7$。为进一步评价不同液位条件下测量结果的相对离散程度，引入相对重复性标准偏差（RSD_r），其计算公式为

$$RSD_r = \frac{s_r}{\overline{E}} 。 \tag{17}$$

实验结果表明，本系统在整个液位测量范围内的重复性标准偏差 $s_r=0.000\ 3$，相对重复性标准偏差（RSD_r）为 1.61%，表明测量结果具有较好的重复性。根据测量系统分析的相关标准，通常认为 $RSD_r<5\%$ 即表明测量系统的重复性良好。本系统的 RSD_r 远低于此阈值，这说明 5 次重复性测量结果之间具有高度的一致性，测量值离散性极小。

基于极差法的定量分析证明，所设计的管道积液状态监测系统在不同液位高度下均表现出优异的稳定性和可靠性，随机误差小，重复性高。计算所得 $RSD_r=1.87\%$，证明该检测系统性能稳定，满足对管道积液状态进行可靠检测的应用需求。

2.4 精度分析

基于两端校准方案，采用空管和满管 2 种状态下测得的归一化信号来计算拟合广义 S 型函数曲线。选取这种方法的原因在于，通过选取 2 个极端状态（空管和满管）作为校准点，能够有效覆盖整个测量范围，从而提高模型在整个区间内的拟合精度和可靠性。其优点是操作简单、易于实施，且能够显著提高测量设备的精度，确保测量结果的准确性。将测得的归一化信号与拟合曲线之间的偏差记为拟合残差，用于评价标定曲线的拟合精度。两端标定法拟合残差结果如图 10 所示，拟合函数与实际测量

值之间的均方根误差为 4.6×10^{-3}，这一较低的误差值验证了两端校准曲线的可行性和有效性，表明该方法能够准确地反映液位与接收信号能量之间的关系。

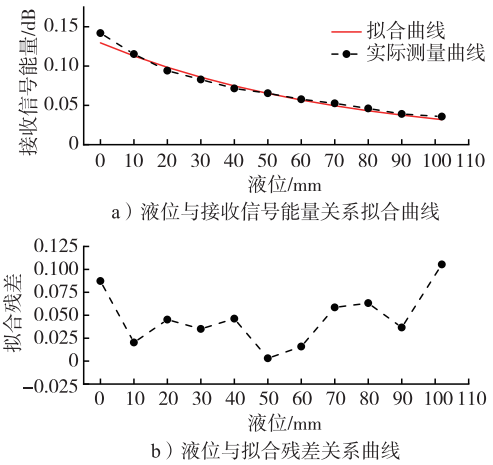

图 10　两端标定法拟合残差结果

Fig. 10　Result of fitting residuals of two-end calibration method

依据计算所得的校准曲线进行水平管道中的液位测量。测量液位与实际液位的对比如图 11 所示。液位估计平均相对误差为 0.27%，表明该方法具有较高的测量精度。

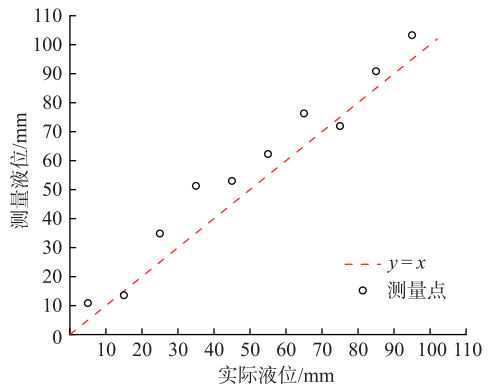

图 11　测量液位与实际液位的对比

Fig. 11　Comparison between measured water level and actual water level

3　结　语

本文提出了一种夹装式超声导波液位测量方法，利用液体负载引起的导波能量泄漏实现水平管道液位的非侵入式检测。主要结论如下。

1）液体负载会引起管壁导波能量向液体介质泄漏，且能量泄漏程度随液位升高而增强。$L(0,2)$ 模态具有明显的平面外位移，对液体负载变化较为敏感，且频散程度较小，适合作为水平管道液位检测的目标模态。

2）接收信号能量随液位升高呈现单调递减的非线性变化规律。广义 S 型函数能够较好地表征液位与导波信号能量之间的映射关系，拟合决定系数达到 0.992，拟合函数与实际测量值之间的均方根误差为 4.6×10^{-3}，表明所建立的液位标定模型具有较好的拟合精度。

3）所提方法具有较好的测量稳定性和准确性，RSDr=1.87%，液位估计平均相对误差为 0.27%。测量结果能够有效反映水平管道内部液位变化，且无需改变现有管道结构，可为煤层气集输管线积液状态的非侵入式监测提供技术支撑。

本研究目前主要针对室内稳定环境下的单一水介质和静态液位条件进行了实验验证，对实际煤层气集输管线中复杂气液流动、多介质组成及温度、压力波动等工况的适应性仍有待进一步研究。后续将重点研究不同气液流动状态、介质特性及环境参数变化对导波传播和液位测量结果的影响，并开展长期稳定性和现场应用验证，以进一步提高该方法的工程适用性和可靠性。

参考文献/References：

[1] 张浩亮，顾根堂，薛志亮，等. 煤层气集输管网积液在线监测及处理技术[J]. 中国煤层气，2023，20(6)：22-25.
Zhang Haoliang，Gu Gentang，Xue Zhiliang，et al. Online monitoring and processing technology of liquid accumulation in coalbed methane gathering pipeline network[J]. China Coalbed Methane，2023，20(6)：22-25.

[2] 李鹏，宋振坤，刘明仁，等. 煤层气集输管道积液判断及治理技术[J]. 中国煤层气，2021，18(3)：35-36.
Li Peng，Song Zhenkun，Liu Mingren，et al. Estimation and treatment technology of liquid accumulation in CBM transportation pipelines[J]. China Coalbed Methane，2021，18(3)：35-36.

[3] 熊波. 油气集输发展现状与关键技术研究[J]. 石油天然气学报，2023，45(4)：366-372.
Xiong Bo. Research on the development status and key technologies of oil and gas gathering and transportation[J]. Journal of Oil and Gas Technology，2023，45(4)：366-372.

[4] Dong Bo. Analysis of freeze damage in drainage pipe networks in cold high-altitude regions and engineering mitigation practices[J]. Frontiers in Engineering，2026，1(3)：17-26.

[5] 董绍华，袁士义，张来斌，等. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展战略研究[J]. 石油科学通报，2022，7(3)：435-446.
Dong Shaohua，Yuan Shiyi，Zhang Laibin，et al. Research on integrity development strategy for long-distance oil and gas pipeline[J]. Petroleum Science Bulletin，2022，7(3)：435-446.

[6] 杨友良，陈宇擎，孟凡伟. 基于波形峰值检测的超声波流量计[J]. 传感器与微系统，2021，40(4)：114-116.
Yang Youliang，Chen Yuqing，Meng Fanwei. Ultrasonic wave

flowmeter based on peak detection of waveform[J]. Sensors and Microsystems,2021,40(4):114-116.

[7] Wu Qiang,Dong Kang,Qin Xunpeng,et al. Magnetic particle inspection:Status,advances,and challenges:Demands for automatic non-destructive testing[J]. NDT & E International,2024,143:103030.

[8] Franco A,Cornacchia A P,Moreira D,et al. Radiographic morphology of canines tested for sexual dimorphism via convolutional-neural-network-based artificial intelligence [J]. Morphologie,2024,108(362):100772.

[9] Mohd Hashim S A,Bin Abd Malek N M S,Kanagaraj M,et al. Automatic weld bead discontinuities detection based on dye penetrant test by deep learning[J]. Malaysian Journal of Information and Communication Technology (MyJICT),2025,10(1):1-9.

[10] Tian Guiyun,Yang Changrong,Lu Xiaolong,et al. Inductance-to-digital converters (LDC) based integrative multi-parameter eddy current testing sensors for NDT & E[J]. NDT & E International,2023,138:102888.

[11] Liu Enbin,Li Dangjian,Zhao Wanwei,et al. Correlation analysis of pipeline corrosion and liquid accumulation in gas gathering station based on computational fluid dynamics[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2022,102:104564.

[12] Lü Feng,Zhou Xinyue,Ding Zheng,et al. Application research of ultrasonic-guided wave technology in pipeline corrosion defect detection:A review[J]. Coatings,2024,14(3):358.

[13] Zhang Xulei,Xu Zhaodong,Lu Hongfang,et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection:A review[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping,2023,206:105033.

[14] Xue Weizhao,Gao Wanjia,Liu Wenyi,et al. Impact of wedge parameters on ultrasonic lamb wave liquid-level sensor[J]. Sensors,2022,22(13):5046.

[15] Liu Yu,He Xiping,Zhang Tiaotiao,et al. Liquid-level measurement based on out-of-plane energy of Lamb waves[J]. Applied Acoustics,2023,210:109421.

[16] Rose J L,Nagy P B. Ultrasonic waves in solid media[J]. The Journal of the Acoustical Society of America,2000,107(4):1807-1808.

[17] Liu Fulu,Li Zhiying,Huang Xiaofei,et al. A defects detection method of buried liquid-filled pipes based on $T(0,1)$ guided waves[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2024,73:6003012.

[18] Durdiyev D,Safarov I,Teshaev M. Propagation of waves in a fluid in a thin elastic cylindrical shell[J]. Wseas transactions on fluid mechanics,2024,19:113-119.

[19] 郑建军,樊承谋. Helmholtz 方程的中值定理[J]. 上海力学,1994,15(2):80-83.
Zheng Jianjun,Fan Chengmou. On the mean value theorem on Helmholtz equation[J]. Shanghai Journal of Mechanics,1994,15(2):80-83.

[20] Ducasse E,Deschamps M. Mode computation of immersed multilayer plates by solving an eigenvalue problem[J]. Wave Motion,2022,112:102962.

[21] Deighton M O,Gillespie A B,Pike R B,et al. Mode conversion of Rayleigh and Lamb waves to compression waves at a metal-liquid interface[J]. Ultrasonics,1981,19(6):249-258.

[22] JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S].