

引文:徐广丽,王一富,周志豪,等.超声内检测器直管段运行过程中背景噪声特性实验[J].油气储运,2025,44(4):1-10.

XU Guangli, WANG Yifu, ZHOU Zhihao, et al. Analysis of background noise during operation of ultrasonic in-line detector in straight pipeline segment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(4): 1-10.

## 超声内检测器直管段运行过程中背景噪声特性实验

徐广丽<sup>1,2</sup> 王一富<sup>1</sup> 周志豪<sup>1</sup> 文强<sup>1</sup> 蔡亮学<sup>1,2</sup>

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院; 2. 油气消防四川省重点实验室

**摘要:**【目的】管道系统运行时,管输环境中的压力波动会产生背景噪声。随着管道系统压力升高,压力波动的幅度会发生变化,从而影响背景噪声强度。在管道缺陷检测过程中,背景噪声会干扰超声内检测器正常工作,降低检测精度。水平直管段是油气管道的主要组成部分,其噪声特性研究可为其他管段的噪声分析提供科学依据,因此分析超声内检测器在直管段运行过程中的背景噪声尤为关键。【方法】搭建了超声内检测实验平台,采集不同压力、流量下的管道系统压力与回波信号数据。根据管道系统压力变化规律,对超声内检测器的运行位置进行定位,分析超声内检测器过直管段时的管道系统压力波动范围和压力变化速率;采用频域分析探究压力波动引起的背景噪声强度,明确背景噪声对回波信号的影响;利用渡越时间法计算壁厚与误差,量化由管输介质压力波动产生的背景噪声对超声内检测器探伤精度的影响。【结果】超声内检测器通过直管段时,管输介质会产生压力波动,其波动范围为0.093~0.196 MPa;大部分实验压力变化速率小于0.531 MPa/ms,但压力变化速率最大值高达17.792 MPa/ms。由压力信号的频域特性可知,3~7 MHz范围内,噪声幅度较小;5.000 MHz、6.929 MHz处的噪声信号受压力变化速率影响而增大,最大增幅分别为415.023%、1240.825%,但幅度增大的最大值仅为0.881,对超声内检测器性能影响较小。通过分析超声回波信号特性,发现背景噪声会引起回波信号的幅值、峰值点的采样点数发生变化,进而影响壁厚计算精度。背景噪声幅度变化对壁厚计算影响较小,误差范围为0.128%~4.324%。【结论】在工程应用中,可忽略由管输介质压力波动产生的背景噪声对超声内检测器探伤的影响,研究成果可为超声内检测器直管段运行过程中的缺陷检测提供理论参考。(图9,表4,参22)

**关键词:** 超声内检测; 压力波动; 频域分析; 回波信号; 壁厚误差

中图分类号: TE973

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)04-0001-10

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.04.000

## Analysis of background noise during operation of ultrasonic in-line detector in straight pipeline segment

XU Guangli<sup>1,2</sup>, WANG Yifu<sup>1</sup>, ZHOU Zhihao<sup>1</sup>, WEN Qiang<sup>1</sup>, CAI Liangxue<sup>1,2</sup>

1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University;

2. Oil & Gas Fire Protection Key Laboratory of Sichuan Province

**Abstract:** [Objective] During the operation of pipeline systems, pressure fluctuations inherent to the pipeline transportation environment generate background noise. As pressure increases in these systems, the magnitude of pressure fluctuations changes, subsequently affecting the intensity of the background noise. In the process of detecting pipeline defects, background noise interferes with the normal operation of ultrasonic in-line detectors, resulting in reduced detection accuracy. Horizontal straight pipeline segments make up the majority of oil and gas pipeline systems. Therefore, studying their noise characteristics provides a scientific foundation for analyzing noise in other pipeline segments. From this perspective, it is crucial to analyze background noise during the operation of ultrasonic in-line detectors in straight pipeline segments. [Methods] A simulation experimental platform for ultrasonic in-line inspection was established to collect pressure and echo signal data from a pipeline system operating under varying pressures and flow rates. The positions of the operating detector were collected according to the pressure variation law of pipeline systems. The pressure fluctuation ranges and the pressure variation rates within the pipeline system during the operation of an ultrasonic in-line detector in the straight pipeline segments were analyzed. The intensity of

background noise caused by pressure fluctuations was investigated through frequency domain analysis to clarify its influence on the echo signals. Additionally, the effect of background noise generated by pressure fluctuations of the transported media on the flaw detection accuracy of the ultrasonic in-line detector was quantified by calculating wall thickness and associated errors based on the transit time method. **[Results]** During the operation of the ultrasonic in-line detector in the straight pipeline segments, the transported media caused pressure fluctuations, ranging from 0.093 MPa to 0.196 MPa. In most experiments, the pressure variation rates were below 0.531 MPa/ms; however, a maximum rate as high as 17.792 MPa/ms was recorded. Analysis of the frequency domain characteristics of the pressure signals revealed that the noise amplitude was narrow between 3 MHz and 7 MHz. The noise signals at 5 MHz and 6.929 MHz increased due to the influence of pressure variation rates, with maximum increase rates of 415.023% and 1,240.825%, respectively. Nevertheless, the maximum increase in noise amplitude was only 0.881, indicating a minimal impact on the performance of the ultrasonic in-line detector. Further analysis of the ultrasonic echo signals showed that background noise caused changes in the amplitude and peak sampling points of these signals, thus impacting the accuracy of wall thickness calculations. The variations in background noise amplitude had little effect on the wall thickness calculations, with error rates ranging from 0.128% to 4.324%. **[Conclusion]** The influence of background noise generated by pressure fluctuations of transported media on flaw detection by ultrasonic in-line detectors is negligible in engineering applications. The findings of this study provide a theoretical reference for flaw detection using ultrasonic in-line detectors operating in straight pipeline segments. (9 Figures, 4 Tables, 22 References)

**Key words:** ultrasonic in-line inspection, pressure fluctuation, frequency domain analysis, echo signal, wall thickness error

超声检测技术是常用的管道内检测技术之一<sup>[1]</sup>,其灵敏度高、响应快、穿透力强<sup>[2-5]</sup>,可对管道缺陷进行定性及定量分析,有效提高管道运营安全性<sup>[6-8]</sup>。当超声内检测器在管道中运行时,皮碗与管道摩擦产生的非匀速运动<sup>[9]</sup>、高频下离心泵的剪切力、管道内流体介质的不同流速等因素均会引起压力波动,产生背景噪声,影响超声内检测器性能<sup>[10]</sup>。因此,分析背景噪声对超声内检测探伤的影响尤为关键。

目前,针对管道运行过程中背景噪声的研究,主要集中于高压环境下的背景噪声对超声内检测器工作性能的影响。敬华飞<sup>[11]</sup>研究了纯液管道流动时的背景噪声幅值特性,发现随实验流量与压力增大,背景噪声幅值的最值增大。纪健<sup>[12]</sup>对气液两相流管道正常运行时的流动背景噪声信号进行实验分析,发现不同流型下噪声幅值范围不同,最大噪声压力可达 10 kPa。贾梦雯等<sup>[13]</sup>实验研究了高静水压力下换能器的阻抗特性,发现随压力增大,换能器谐振频率发生偏移,使导纳圆图发生变化。肖锋等<sup>[14]</sup>通过对探头施压,发现超声检测时探头接收的缺陷波高随探头压力增大而升高。Wang 等<sup>[15]</sup>通过实验表明压电陶瓷在高压应力脉冲作用下具有最大的放电效应,介电常数随压力增大而增大,当应变大于电磁力时,压电陶瓷不再产生感应电荷。Feeney 等<sup>[16]</sup>测试了环境压力为 10 MPa 时弯曲超声换能器的动态性能,结果表明高压下换能器可正常

工作,但频率响应不够稳定,无法精确测量超声信号。Zhang 等<sup>[17]</sup>模拟了管道检测器通过环焊缝的过程,发现环焊缝引起的轴向振动随着检测器速度的增加而显著增强,影响其检测性能。然而,上述研究未探究背景噪声对超声内检测器检测精度的具体影响,高压环境下压力波动引起背景噪声频域特性和背景噪声对回波信号和壁厚计算的影响程度尚不明确。

搭建了输油管道超声内检测实验平台,以自来水作为耦合液进行超声内检测实验,采集不同压力、流量下管道系统压力与回波信号,研究管道系统压力波动产生的背景噪声对超声内检测器性能的影响程度。

## 1 超声内检测在线实验

### 1.1 实验系统

超声内检测实验系统(图 1)中测试管段壁厚为 8 mm,由水平 90° 弯管段、下倾 30° 管段、上倾 30° 管段、水平直管段组成;KDQP40-10-122 型离心泵提供动力,可单泵或双泵并联工作;收发球筒用于发送、接收与内检测器材质相同的清管模拟器;通球指示器用于记录模拟器通过时间;数据采集系统包括压力数据采集系统、超声回波信号数据采集系统,二者均由 PC 端口控制。实验时,离心泵将储罐中的水送入测试主管段,经调节阀后回到储罐形成循环通路,通过控制

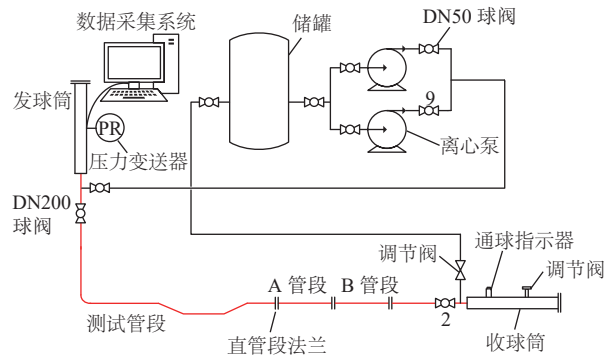


图1 超声内检测实验系统组成示意图

Fig. 1 Process flow diagram of simulation experiments for ultrasonic in-line inspection

阀开度、调节离心泵频率进行不同流量、压力下的超声内检测实验。

表1 超声内检测实验方案对比表

Table 1 Parameters of simulation experiments for ultrasonic in-line inspection

实验编号	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	6 <sup>#</sup>	7 <sup>#</sup>	8 <sup>#</sup>	9 <sup>#</sup>
设计压力/MPa	0.6	0.6	0.9	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
实验压力/MPa	0.584	0.608	0.877	0.645	0.892	1.205	0.634	0.957	1.217
实验流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	8.851	12.344	8.129	13.858	13.276	8.909	15.023	14.674	10.306

## 2 内检测器过直管段背景噪声分析

### 2.1 内检测器直管段运行定位

超声内检测器工作时位于管道内部, 封闭状态无法判断内检测器具体位置。当内检测器经过测试管段特定位置时, 管道系统压力瞬间升高或降低, 产生较大的压力波动, 故可根据管道系统压力波动变化情况判断内检测器在管道内的位置, 从而对直管段进行定位分析。在实验过程中, 温度、外部环境干扰、传感器质量等因素会对压力传感器的信号采集造成影响, 产生高频数据波动或噪声。因此, 在压力信号分析前, 使用小波降噪对压力信号进行了预处理。

实验中利用示波器进行压力数据采集, 数字示波器的储存长度为 1 400 点, 波形点采样率为 20 MHz, 波形重复频率为 71.43 Hz, 压力采集时间计算式为:

$$t = \frac{N}{1400f} \quad (1)$$

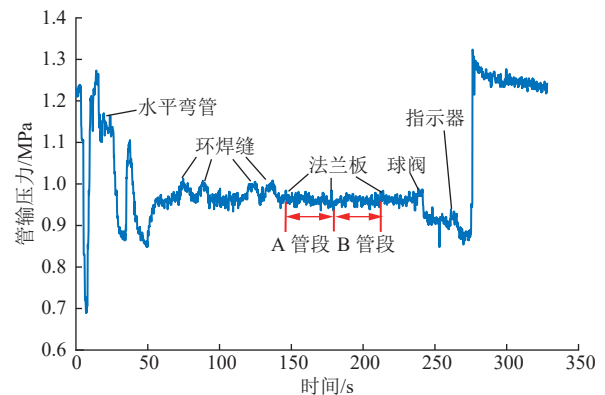
式中:  $t$  为压力采集时间, s;  $N$  为采集数据总量;  $f$  为波形重复频率, Hz。

以 8<sup>#</sup> 实验为例, 采集数据点 32 814 600 个, 利用式(1)计算得到压力采集时间为 328.146 s。

### 1.2 实验步骤及方案

超声内检测实验步骤分为以下 6 个步骤: ①向测试管段内注水直至排空阀出水; ②启动泵, 保持球阀开启, 对测试管段内进行憋压; ③改变调节阀开度, 控制系统实验压力与流量大小, 进行数据采集; ④清管模拟器从发球筒出发, 经过测试管段, 通过收球筒前的球阀与通球指示器后, 进入收球筒; ⑤停止数据采集, 关闭测试管段上的 2 处球阀, 并排出收发球筒中的水; ⑥从收球筒中取出清管模拟器完成单次实验。因人为操作和设备误差的原因, 实验压力与设计压力略有不同, 设计了 3 组方案进行对照实验(表 1): 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>为单泵调频实验, 4<sup>#</sup>~6<sup>#</sup>为单泵调压实验, 7<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>为双泵并联调压实验。

当内检测器运行至通球指示器时, 管道内径减小, 内检测器中的 3 层皮碗受挤压程度增大, 运行阻力增加, 管道系统压力骤增; 当末端皮碗通过指示器时, 受挤压程度减小, 运行阻力降低, 管道系统压力骤减, 此过程管道系统压力表现为先增大、后减小。根据压力变化情况, 可确定内检测器通过通球指示器的时间, 同理可判断内检测器通过各处的具体时间。选取 8<sup>#</sup> 实验(图 2)为例, 其超声内检测器通过第 1 个法兰的时间为 148.502 s, 到达第 2 个法兰的时间为 174.215 s; 通过第 2 个法兰的时间为 178.413 s, 到达第 3 个法兰的时间为 211.122 s。在超声内检测实验中, 测试管段

图2 8<sup>#</sup>实验管道系统压力变化图Fig. 2 Pressure graph of pipeline system in experiment 8<sup>#</sup>

存在多处直管,以A管段(第1个法兰与第2个法兰之间)、B管段(第2个法兰与第3个法兰之间)作为分析对象,A、B管段长度均为4.12 m。

### 2.2 管道系统压力波动特性

超声内检测器在直管段中运行时,管输介质压力高且存在高频波动,会对超声内检测器的工作性能产生不利影响。为对比不同实验中内检测器通过直管段时的管道系统压力波动特性,提取1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>实验中内检测器通过直管段时压力数据的最大值、众数、最小值、压力波动范围(图3)。A管段的最值、压力变化范围大部分大于B管段,这是由于超声内检测器进入A管段前经过了上坡段、法兰,动力不足而产生较大的压力变化范围。除

单泵调压对比实验(4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>)外,离心泵调频(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>)与双泵调压实验(7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>)的压力波动范围均未随实验流量或压力变化呈线性变化关系。在单泵调压实验中,随着实验压力由0.645 MPa增至1.205 MPa,实验流量由13.858 m<sup>3</sup>/h降为8.901 m<sup>3</sup>/h,A、B管段的压力波动范围呈单调递减变化,分别由0.583 MPa、0.581 MPa降至0.102 MPa、0.094 MPa。3<sup>#</sup>实验中A管段压力波动范围最大,为0.689 MPa。除3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>实验,其余7次实验压力波动范围差异较小,说明内检测器通过直管段时,皮碗受挤压情况较为稳定,不易出现卡堵或运行速率不均现象。

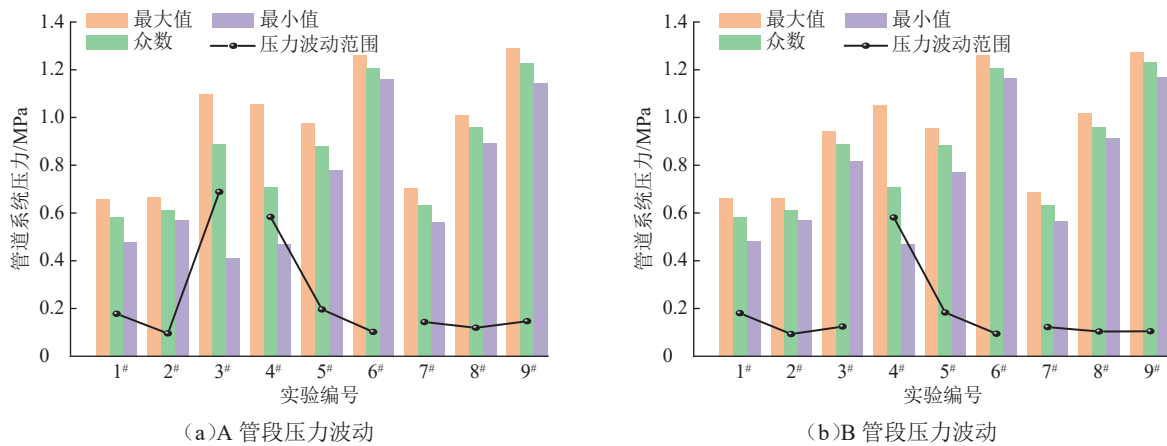


图3 9次超声内检测实验管道系统压力波动图  
Fig. 3 Pressure fluctuations within the pipeline system in ultrasonic in-line inspection experiments

提取9次实验中的最值、众数(图4),分析管道系统压力对超声内检测器运行的影响。单泵调压实验与双泵调压实验中的压力变化速率最大值均随流量减小而减小,表明实验流量减小时,管道内介质流速随之降低,压力波动、压力变化速率最大值亦均减小。在3组对照实验中,A、B管段压力变化速率最大值

(17.792 MPa)为4<sup>#</sup>实验的B管段。除1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>实验外,两直管段的压力变化速率众数均相等。9次实验中压力变化速率众数大多未超过0.531 MPa/ms,且A管段中7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>实验和B管段中1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>实验的压力变化速率众数均为0.531 MPa/ms。这说明超声内检测器处于直管段运行时,压力变化速率较小,不易出现较大压力波动。

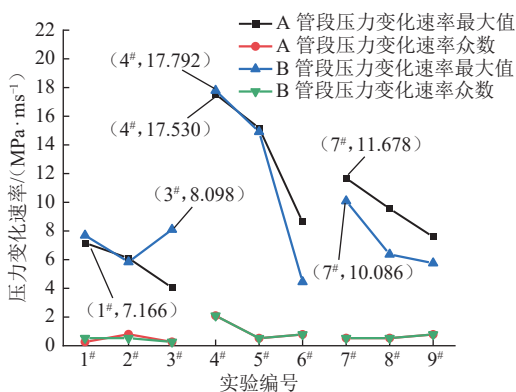


图4 9次超声内检测实验管道系统压力变化速率图  
Fig. 4 Pressure variation rates in ultrasonic in-line inspection experiments

### 2.3 压力信号频域分析

当压力波与超声内检测器发射的声波同处于管道中时,存在叠加、干涉现象<sup>[19]</sup>。若高频压力波动下产生的噪声频率与超声内检测器接收频率相近,则会对超声内检测信号产生影响,进而影响超声内检测精度。

压力采集系统采样率为20 MS/s,进行频域转换后可观察0~10 MHz频域内的信号幅度,幅度大小表示采样波形中压力波动产生的噪声强弱。超声内检测器信号接收的中心频率为5 MHz,且超声信号采集系统自带滤波器,可分别过滤0~3 MHz、7 MHz以上的

杂波, 故 3~7 MHz 频率范围内的杂波会对超声内检测器接收的电信号产生影响。在 3~7 MHz 频率范围内, 其中 6.929 MHz 处的噪声信号最强且变化幅度较大(图 5)。提取中心频率 5.000 MHz、6.929 MHz 处的噪声幅度(表 2)进行对比可见, 在 3 组对照实验中, 5.000 MHz、6.929 MHz 处的噪声信号均未随实验流量或压力变化呈规律性变化, 噪声信号幅度最大值分别为 0.356、0.530。

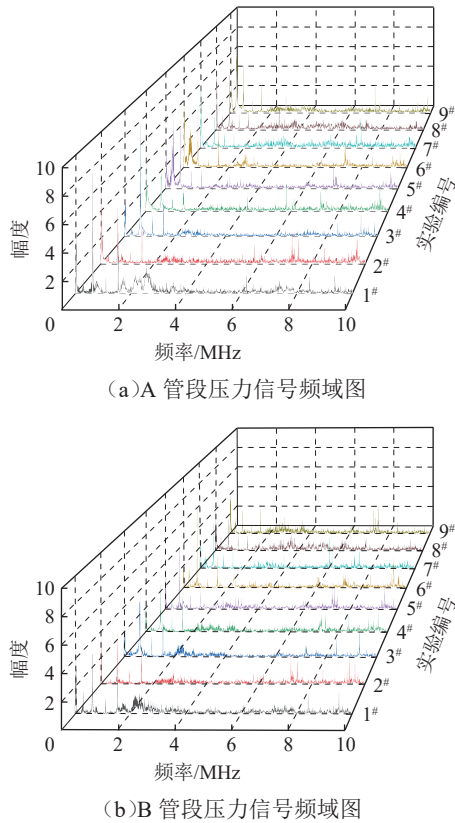


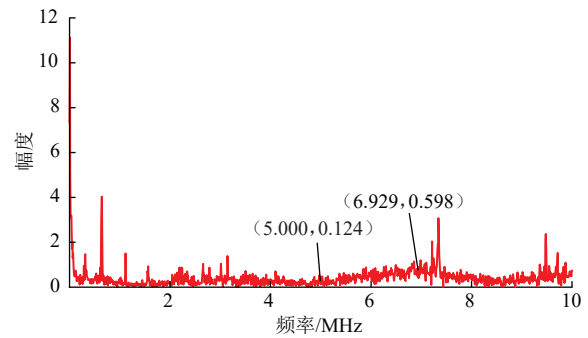
图 5 超声内检测实验压力信号频域图

Fig. 5 Frequency domains of pressure signals in ultrasonic in-line inspection experiments

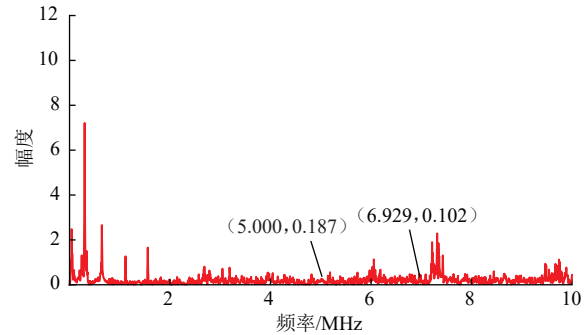
表 2 超声内检测实验不同频率下噪声幅度值表  
Table 2 Noise amplitudes at different frequencies

实验编号	A 管段噪声信号幅度		B 管段噪声信号幅度	
	5.000 MHz	6.929 MHz	5.000 MHz	6.929 MHz
1#	0.065	0.013	0.218	0.247
2#	0.356	0.213	0.161	0.241
3#	0.159	0.211	0.278	0.080
4#	0.100	0.114	0.165	0.268
5#	0.249	0.214	0.119	0.110
6#	0.111	0.050	0.127	0.378
7#	0.117	0.432	0.109	0.248
8#	0.355	0.427	0.309	0.247
9#	0.116	0.530	0.268	0.280

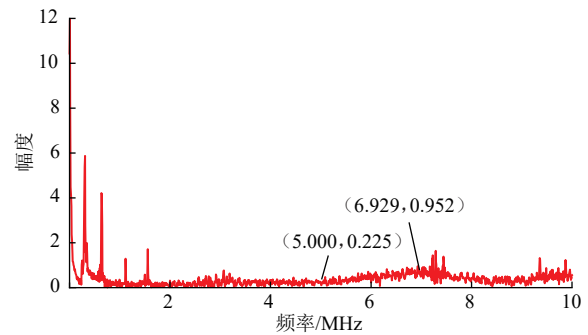
为了明确背景噪声幅度的变化程度, 以 5# 实验为例, 分析压力变化速率对背景噪声的影响。提取压力变化速率最大值及众数附近的压力数据进行频域转换(图 6): 以压力变化速率最值点及众数点为中心, 对其前、后各 1 400 个压力数据点进行分析可见, 当压力变化速率处于最大值时, 6.929 MHz 处信号幅度明显



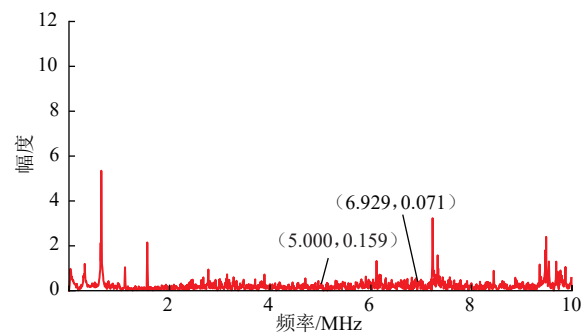
(a) A 管段压力波动速率最值附近频域转换



(b) A 管段压力波动速率众数附近频域转换



(c) B 管段压力波动速率最值附近频域转换



(d) B 管段压力波动速率众数附近频域转换

图 6 5# 实验压力信号频域转换图

Fig. 6 Frequency domains of pressure signals in experiment 5#

增强,但 5.000 MHz 处的信号幅度变化较小。对 1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup> 实验压力变化速率最大值及众数附近的压力数据进行频域转换,分别提取 A、B 管道 5.000 MHz、6.929 MHz 处 4 种情况的噪声信号幅度(表 3)进行分析。可见,其中情况①、情况②分别为压力变化速率最大值及众数附近的压力信号,频域转换后 5.000 MHz 处的噪声信号幅度;情况③、情况④分别为压力变化速率最大值及众数附近的压力信号,频域转换后位于 6.929 MHz 处的噪声信号幅度。可见,除了部分实验,

较高的压力变化速率引起 5.000 MHz、6.929 MHz 处噪声信号的幅度变强。在 5.000 MHz、6.929 MHz 两处,压力变化速率最大值附近的压力信号幅度相较于压力变化速率众数附近的压力信号幅度,增加的最大百分率分别为 415.023%、1 240.825%,但幅度增大的最大值仅为 0.881。由此可知,高频压力波动会产生噪声,并增强位于超声换能器接收的中心频率附近的噪声信号强度,但增强的幅度较小。

表 3 超声内检测实验不同压力变化速率的噪声信号幅度值表  
Table 3 Noise signal amplitudes at different pressure variation rates

实验编号	A 管段噪声信号幅度				B 管段噪声信号幅度			
	情况①	情况②	情况③	情况④	情况①	情况②	情况③	情况④
1 <sup>#</sup>	0.374	0.107	0.355	0.231	0.314	0.567	0.312	0.313
2 <sup>#</sup>	0.403	0.049	0.200	0.126	0.515	0.143	0.273	0.189
3 <sup>#</sup>	0.119	0.107	0.273	0.307	0.253	0.297	0.387	0.151
4 <sup>#</sup>	0.223	0.132	0.682	0.370	0.183	0.145	0.509	0.791
5 <sup>#</sup>	0.124	0.187	0.598	0.102	0.225	0.159	0.952	0.071
6 <sup>#</sup>	0.237	1.025	0.165	0.473	0.417	0.23	0.204	0.003
7 <sup>#</sup>	0.313	0.162	0.816	0.257	0.515	0.143	0.273	0.189
8 <sup>#</sup>	0.244	0.440	0.350	0.128	0.171	0.162	0.366	0.099
9 <sup>#</sup>	0.693	1.126	0.123	0.223	1.097	0.213	0.194	0.024

### 2.4 超声回波信号特性

超声内检测器在直管段内运行中时,背景噪声会影响回波信号幅度<sup>[20]</sup>,进而对壁厚计算产生影响。在超声内检测器接收范围内,单次采样波形中有 488 个采样点,可观测到表面回波信号、一次底面回波信号、二次底面回波与三次底面回波信号(图 7),利用表面回波、一次底面回波中的特征点即可计算管道壁厚<sup>[21]</sup>。

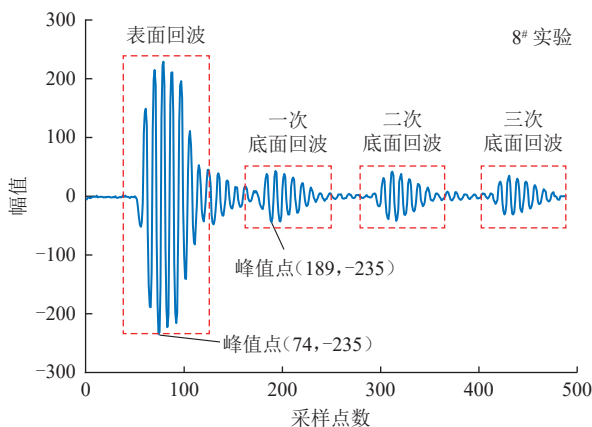


图 7 超声内检测实验单次回波信号图

Fig. 7 Single echo signal graph of ultrasonic in-line inspection experiment

由渡越时间法<sup>[22]</sup>可知,当超声探头与管壁垂直时,利用探头接收到表面回波与一次底面回波的时间差、超声波在管材与介质中的传播速度,即可计算得到管道壁厚:

$$\delta = vt_0 \quad (2)$$

$$t_0 = \frac{L \Delta n}{v_0 n} \quad (3)$$

式中: $\delta$  为管道壁厚, m;  $v$  为超声波在管材中的传播速度(计算时取 6 000 m/s), m/s;  $t_0$  为接收到回波信号的表面回波及一次底面回波时间差的 50%, s;  $L$  为回波信号采样窗口长度(实验中设为 0.008 m), m;  $v_0$  为超声波在管输介质中的传播速度(实验时取 1 468 m/s), m/s;  $\Delta n$  为一次底面回波采样点数与表面回波采样点数之差;  $n$  为回波信号采样点数的间隔总数,实验中为 487。

以 8<sup>#</sup> 实验为例,超声内检测器通过直管段时,表面回波信号峰值在 237 左右波动,波动范围较小,而峰值点的前一点与后一点的幅值随压力变化而波动较大(图 8a)。结合图 2 可知,峰值点前一点的幅值绝对值与管道系统压力变化趋势相近,而峰值点后一点的

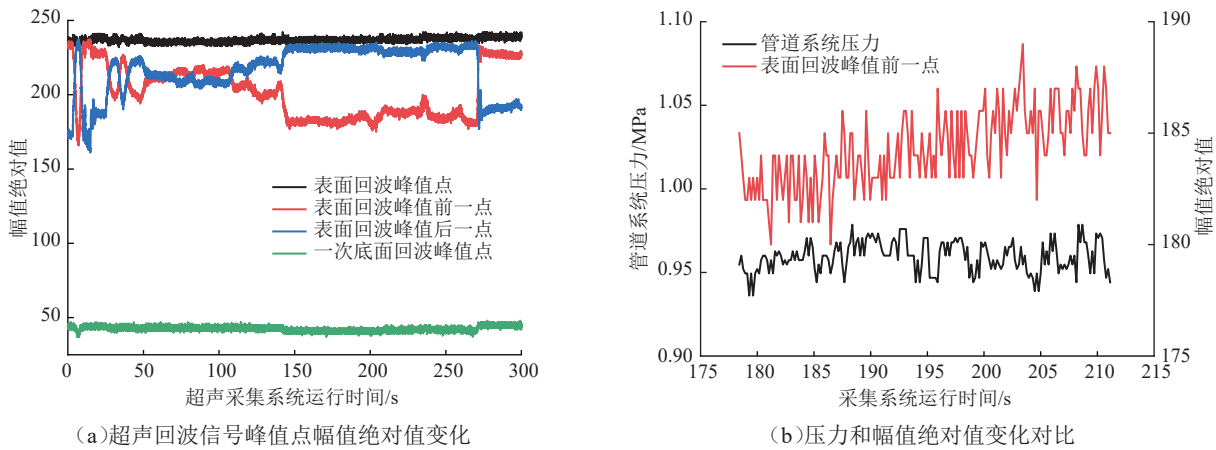


图 8 8# 实验回波信号峰值点幅值和压力对比图  
Fig. 8 Amplitude and pressure variation curves at echo signal peaks in experiment 8#

幅值绝对值变化趋势则相反。当内检测器通过直管段时, 管道系统压力波动范围为 0.936~0.979 MPa, 随时间变化范围较小; 峰值点前一点的幅值绝对值在 180~189 范围波动, 增高趋势较为明显(图 8b)。

幅值的变化会引起回波信号峰值点位置的变化,

使峰值点对应的采样点数前移或后移, 进而影响管道壁厚计算精度。提取内检测器通过直管段 0.515 m、1.030 m、1.545 m、2.060 m、2.575 m、3.090 m 时的回波信号数据进行分析, 发现内检测器通过直管段不同位置时, 幅值大小及位置均发生变化(图 9)。

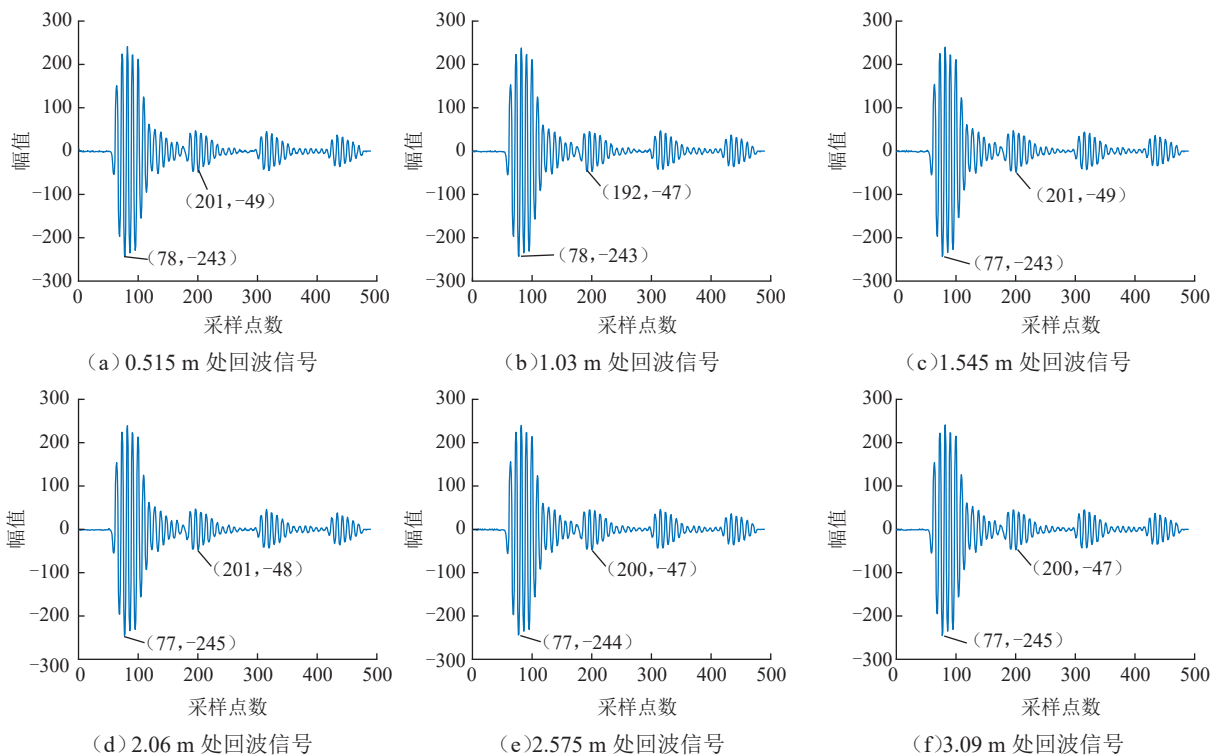


图 9 超声内检测器过直管段不同位置时回波信号图  
Fig. 9 Echo signal graphs of ultrasonic in-line detector at different positions in straight pipeline segment

与 0.515 m 处相比, 1.030 m 处一次底面回波峰值点的采样点数前移且幅值减小。随着内检测器继续运行, 表面回波峰值点也发生变化, 但变化范围较小。结合频域分析, 压力信号频域中 3~7 MHz 的背景噪声会对超声内检测器接收的信号产生影响, 导致回波幅

值大小、峰值点的采样点数发生变化。

进一步分析回波信号峰值点变化对测量精度的影响, 提取 1#~9# 实验中内检测器通过直管段 0.515 m、1.030 m、1.545 m、2.060 m、2.575 m、3.090 m 时的回波信号进行分析并计算壁厚(表 4)。在 1#~9# 实验中,

表4 超声内检测1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>实验各参数值  
Table 4 Parameter values of ultrasonic in-line inspection experiments 1<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>

实验编号	表面回波峰值对应采样点数	表面回波峰值范围	一次底面回波峰值对应采样点数	一次底面回波峰值范围	壁厚计算值/mm	壁厚计算误差
1 <sup>#</sup>	71	233~238	186~195	45~48	7.721~8.325	0.128%~4.068%
2 <sup>#</sup>	74	235~239	188~197	45~47	7.654~8.258	0.128%~4.324%
3 <sup>#</sup>	69	233~237	183~192	45~47	7.654~8.258	0.128%~4.324%
4 <sup>#</sup>	70	235~243	184~193	47~50	7.654~8.258	0.128%~4.324%
5 <sup>#</sup>	77 或 78	243~245	192~200	46~49	7.654~8.325	3.229%~4.324%
6 <sup>#</sup>	75 或 76	236~239	190~199	45~48	7.654~8.325	0.967%~4.324%
7 <sup>#</sup>	76	237~240	190~199	44~47	7.654~8.258	0.128%~4.324%
8 <sup>#</sup>	74	235~239	189~198	43~45	7.721~8.325	0.128%~4.068%
9 <sup>#</sup>	73 或 74	234~239	188~197	43~48	7.654~8.258	0.128%~4.324%

超声内检测器接收信号中峰值点的采样点数不同,表面回波与一次底面回波峰值点的采样点数间距变化较小,波动范围为114~124。由此,计算得到的管道壁厚误差波动范围为0.128%~4.324%,说明超声内检测器在直管段运行过程中,压力波动所产生的背景噪声对管道壁厚计算影响较小。

### 3 结论

搭建了超声内检测实验系统,开展了不同压力、流量下的实验。通过分析管道系统压力的波动特性、压力信号的频域特性、超声回波信号特性,明确了背景噪声对超声内检测器测厚精度的影响。结果表明,超声内检测器在直管段运行过程中,存在较大的压力变化速率,最值为17.792 MPa/ms;由压力波动引起的背景噪声对超声内检测器的主频信号影响幅度较小,最大仅为0.881,该影响反馈到回波信号上时变化较小,在管道壁厚计算时产生的误差在4.324%以内。在工程应用中,超声内检测器在直管段进行探伤时,可忽略管输介质压力波动所产生的背景噪声及其对测厚的影响。

搭建的超声内检测实验系统设置了安全阀,管道系统压力上限为1.4 MPa。但在管输系统中,外部扰动会导致压力波动加剧,高压的管输环境会放大这些扰动的影响,产生更大的背景噪声,从而降低超声内检测器测厚精度。在后续研究中,可考虑更高的管道系统压力下压力波动产生的背景噪声对超声内检测器测厚精度的影响,并基于本研究继续分析弯曲管段和倾斜管段的背景噪声特性;此外,也可通过进一步优化

超声内检测系统的抗干扰能力、提高信号处理算法的鲁棒性,以期减少背景噪声的干扰,提升超声检测的精度与可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 李睿. 油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J]. 油气储运, 2024, 43(3): 241-256. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.03.001.
- [2] LI R. Current progress and prospects of in-line inspection techniques and data analysis methods for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(3): 241-256.
- [3] 孙长河, 李博伦, 黑创, 罗明璋, 杜国锋, 刘玉菲. 压电微型超声换能器阵列设计及焊缝检测应用[J]. 压电与声光, 2023, 45(4): 595-600. DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2023.04.023.
- [4] SUN C H, LI B L, HEI C, LUO M Z, DU G F, LIU Y F. Design of miniaturized piezoelectric ultrasonic transducer array for welding seam detection[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(4): 595-600.
- [5] SHEN Y, ZOU B C, ZHANG Z D, XU M S, WANG S, LI Q X, et al. In situ detection of lithium-ion batteries by ultrasonic technologies[J]. Energy Storage Materials, 2023, 62: 102915. DOI: 10.1016/j.ensm.2023.102915.
- [6] SEBASTIAN U, ILKIN A, FRANK S, CONSTANZE T, MATTHIAS W. A review of synthetic and augmented training data for machine learning in ultrasonic non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2023, 134: 107041. DOI: 10.1016/j.ultras.2023.107041.
- [7] YANG X L, HUANG R C, MENG Y J, LIANG J L, RONG H L, LIU Y S, et al. Overview of the application of Ground-Penetrating Radar, Laser, infrared thermal Imaging, and ultrasonic in nonde-



- structive testing of road surface[J]. *Measurement*, 2024, 224: 113927. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.113927](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113927).
- [6] 吴志平, 玄文博, 戴联双, 李妍, 常景龙, 王富祥. 管道内检测技术与管理的发展现状及提升策略[J]. *油气储运*, 2020, 39(11): 1219–1227. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.11.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.11.002).
- WU Z P, XUAN W B, DAI L S, LI Y, CHANG J L, WANG F X. Development status and improvement strategy of in-line inspection technology and management[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2020, 39(11): 1219–1227.
- [7] YU Y C, SAFARI A, NIU X D, DRINKWATER B, HOROSHENKOV K V. Acoustic and ultrasonic techniques for defect detection and condition monitoring in water and sewerage pipes: a review[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 183: 108282. DOI: [10.1016/j.apacoust.2021.108282](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108282).
- [8] GUO S F, CHEN S T, ZHANG L, LIEW W H, YAO K. Direct-write piezoelectric ultrasonic transducers for pipe structural health monitoring[J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102131. DOI: [10.1016/j.ndteint.2019.102131](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2019.102131).
- [9] 刘海潇, 何利民, 陈建恒, 罗小明, 赫松涛, 李清平. 管道清管器运行速度控制技术研究进展[J]. *化工进展*, 2020, 39(6): 2327–2335. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1437](https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2019-1437).
- LIU H X, HE L M, CHEN J H, LUO X M, HE S T, LI Q P. Research progress of pipeline pigs speed control technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(6): 2327–2335.
- [10] LI X B, JIANG L Y, CHU J W, ZHAO J F, SONG Y C. In-situ ultrasonic measurement for hydrate pressure cores sampled by deep sea drilling[J]. *Measurement*, 2023, 221: 113529. DOI: [10.1016/j.measurement.2023.113529](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113529).
- [11] 敬华飞. 单相及混输管道流动背景噪声及泄漏声波特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2019.
- JING H F. Study on characteristics of background noise and leak-acoustics for single-phase and mixed-phase Pipelines[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.
- [12] 纪健. 气液两相流管道流动背景噪声分析研究[J]. *油气田地面工程*, 2019, 38(增刊 1): 24–30. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6896.2019.z1.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6896.2019.z1.006).
- JI J. Analysis and study on background noise of gas-liquid two-phase flow pipeline[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2019, 38(S1): 24–30.
- [13] 贾梦雯, 赵鹏, 王月兵. 高静水压下换能器阻抗特性的测量方法研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(4): 461–468. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1158.2020.04.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2020.04.12).
- JIA M W, ZHAO P, WANG Y B. Research on measurement method of electrical impedance of transducer under high hydrostatic pressure[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(4): 461–468.
- [14] 肖峰, 俞卫权, 桂兴亮. 超声检测时探头压力对缺陷尺寸评定的影响[J]. *无损检测*, 2015, 37(6): 74–76. DOI: [10.11973/wsdc.201506019](https://doi.org/10.11973/wsdc.201506019).
- XIAO F, YU W Q, GUI X L. Effect of pressure on the ultrasonic probe on defect size assessment[J]. *Nondestructive Testing*, 2015, 37(6): 74–76.
- [15] WANG R Z, TANG E L, YANG G L, HAN Y F, CHEN C, CHANG M Z, et al. Electrical properties of PZT under high-pressure stress pulse: effects of loading frequency and circuit load[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(2): 2421–2430. DOI: [10.1016/j.ceramint.2021.10.023](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.023).
- [16] FEENEY A, KANG L, SOMERSET W E, DIXON S. The influence of air pressure on the dynamics of flexural ultrasonic transducers[J]. *Sensors*, 2019, 19(21): 4710. DOI: [10.3390/s19214710](https://doi.org/10.3390/s19214710).
- [17] ZHANG H, GAO M Q, TANG B, CUI C, XU X F. Dynamic characteristics of the pipeline inspection gauge under girth weld excitation in submarine pipeline[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(2): 774–788. DOI: [10.1016/j.petsci.2021.09.044](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.044).
- [18] CUI X W, GAO Y, MUGGLETON J, LIU Y Y. Superimposed imaging of acoustic wave reflections for the detection of underground nonmetallic pipelines[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 209: 111127. DOI: [10.1016/j.ymssp.2024.111127](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111127).
- [19] CHANG M J, LU Z K, HUANG Q H, YANG C. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms[J]. *Measurement*, 2022, 194: 111010. DOI: [10.1016/j.measurement.2022.111010](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111010).
- [20] 徐广丽, 占霖勇, 汪冉, 蔡亮学. 管道在超声内检测声场作用下的 PZT 电信号模拟[J]. *油气储运*, 2021, 40(12): 1370–1377. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.007](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.007).
- XU G L, ZHAN L Y, WANG R, CAI L X. Simulation of PZT electrical signals under the action of sound field in ultrasonic inline inspection of pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(12): 1370–1377.

- [21] 滕艳菲, 陈尚松. 超声波测距精度的研究[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(2): 23–25. DOI: [10.3969/j.issn.1002-8978.2006.02.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-8978.2006.02.007).  
TENG Y F, CHEN S S. Study on precision of ultrasonic ranging[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(2): 23–25.
- [22] 蔡亮学, 董辉, 陈飞, 徐广丽. 超声内检测含缺陷管道壁厚确定方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13293–13300. DOI: [10.3969/j.issn.1671-1815.2022.30.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2022.30.019).  
CAI L X, DONG H, CHEN F, XU G L. Method for determining wall thickness of pipes containing defect in ultrasonic internal inspection[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(30): 13293–13300.

(编辑: 曾力波)

**基金项目:**四川省自然科学基金面上项目“含缺陷油气管道超声内检测声场特征信号研究”, 2023NSFSC0421。

**作者简介:**徐广丽, 女, 1984年生, 副教授, 2011年博士毕业于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 现主要从事油气管道内检测器研发、油气多相流动保障、非金属管道适用性评价等方面的研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学, 610500。电话: 18980449383。Email: [530xugl@163.com](mailto:530xugl@163.com)

- Received: 2024-05-16
- Revised: 2024-06-19
- Online: 2024-12-12

