

文章编号:1671-6833(2025)01-0098-07

# 基于背衬层匹配的压电式柔性超声传感器优化

于永洁<sup>1</sup>, 杜昱錡<sup>1</sup>, 黄仕磊<sup>2</sup>, 甘芳吉<sup>1</sup>

(1. 四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065; 2. 成都大学 电子信息与电气工程学院, 四川 成都 610106)

**摘要:** 基于聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜的柔性超声传感器具有体积小、质量轻、易于阵列化等优点,但容易受到背部杂波干扰和阻抗不匹配的影响,导致回波信号频率成分复杂且信噪比较低。为有效吸收传感器背部杂波,提升超声波单向辐射的能力,利用钨粉和硅胶设计针对柔性超声传感器的背衬层,在保持传感器整体柔性的同时使传感器的信号电压幅值提高了 200%。其次,根据柔性超声传感器的电学特性提出了柔性超声传感器阻抗匹配优化方法,并通过实验获得最佳匹配参数,使传感器的信噪比从 2 dB 提高到 30 dB。优化后的柔性超声传感器具有宽频带、高频率、窄脉冲的优良性能,对不同曲率、不同壁厚的管道试件厚度的测量实验结果表明其可以达到 0.01 mm 的精度。

**关键词:** 柔性超声传感器; 背衬层匹配; 阻抗匹配; 信噪比

**中图分类号:** TP212; TH89

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.006

压电式超声传感器作为超声检测技术领域最早开始研究的传感器,具有成熟的技术和广泛的应用,但在管道、锅炉等表面为曲面的设备检测中,传统刚性结构的超声传感器存在着诸多限制。一方面,硬质材料制备的传统传感器与曲面仅为线接触或点接触,用于检测的超声波能量损失较大,甚至在有空间限制的曲面容器上难以布置进而无法测量;另一方面,由于传统刚性传感器体积和重量较大,会对设备结构造成沉重负担,降低力学性能和服役的安全可靠性,难以实现阵列化形成传感器网络。综上所述,体积小、重量轻,并且可以与曲面完全贴合的柔性超声传感器有很大的优势。

Bowen 等<sup>[1]</sup>设计的超声传感器只具备垂直于压电纤维方向上的柔性;Harvey 等<sup>[2]</sup>利用垂直放置的压电纤维复合材料制备的超声换能器在二维方向有一定的柔性,但灵敏度不高;Zhen 等<sup>[3]</sup>通过柔性基底和电极实现了基于压电陶瓷(PZT)的超声传感器的柔性,但压电陶瓷脆性大、易碎的物理属性不变,限制了传感器的柔韧性;Luo 等<sup>[4]</sup>利用聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜开发了用于壁厚检测的柔性超声传感器,但测厚实验结果的精度不高,重复性较差。

为提高超声传感器性能,李珺等<sup>[5]</sup>研究了声学匹配作用机理;吴锦川等<sup>[6]</sup>提出了高阻抗背衬材料的制作方法以获得高灵敏度的窄脉冲探头;Polk<sup>[7]</sup>提出了电匹配方法,利用变压器等设计了石英换能器电路;El-Dahshan 等<sup>[8]</sup>将史密斯圆图的方法应用于阻抗匹配分析;苟阳等<sup>[9]</sup>根据压电换能器的阻抗特性设计了适用于宽频的阻抗匹配电路;Rathod 等<sup>[10]</sup>归纳了常见的阻抗匹配技术并介绍了针对特定应用的阻抗匹配设计。然而,以上研究绝大部分是针对传统硬质压电式超声传感器及其对应的无机压电材料进行的,不适用于 PVDF 这种柔性的高分子聚合物材料。因此,本文对基于 PVDF 压电薄膜的柔性超声传感器进行了优化,提出利用钨粉和硅胶设计背衬层以适用于声阻抗小的 PVDF 压电材料,提出阻抗匹配优化设计方案以提高信号的电压幅值和信噪比,进而提高传感器的测量精度。

## 1 柔性超声传感器结构和激励方式

本文选用的压电材料为 PVDF 薄膜,表 1 给出了 PVDF 和几种通用的压电材料部分性能参数比较。PVDF 作为一种压电高分子聚合物材料,与传

收稿日期:2024-05-30;修订日期:2024-07-05

基金项目:四川省科技创新创业苗子工程(2021JDRC0090)

通信作者:甘芳吉(1989—),男,四川广安人,四川大学副教授,博士,主要从事超精检测、微纳检测、弱磁检测、电磁无损检测及机器视觉等研究,E-mail: gfgj0318@foxmail.com。

引用本文:于永洁,杜昱錡,黄仕磊,等. 基于背衬层匹配的压电式柔性超声传感器优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025,46(1):94-104,112. (YU Y J, DU Y Q, HUANG S L, et al. Optimization of piezoelectric flexible ultrasonic sensors based on backing layer matching[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025,46(1): 98-104,112.)

统的压电晶体材料相比具有以下优点:①柔韧性和加工性能好,可定制尺寸和形状;②压电电压常数  $g_{33}$  大,接收性能较好;③声阻抗低,与水以及胶

粘剂接近;④密度低、质量轻,粘贴在设备表面对原结构影响小;⑤测量范围广,适用于薄壁件的测量。

表 1 PVDF 和几种通用的压电材料性能参数

压电材料	相对介电常数 $\epsilon$	弹性柔顺常数 $SE_{33}/$ ( $10^{-12}\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1}$ )	压电电压常数 $g_{33}/$ ( $10^{-3}\text{Vm}\cdot\text{N}^{-1}$ )	声阻抗 $Z/$ (MRayl)	密度 $\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\beta$ 相 PVDF	8.5~12.0	320	330	2.5~3.5	1 780
X 切石英	4.5	15	57.8	15.3	2 650
BaTiO <sub>3</sub>	1 700	8.5	12.6	25	6 017
PZT	1 200	18	21	34	7 500

PVDF 压电薄膜是以压电效应为基础的双向无源器件,可以进行超声波的发射和接收。当 PVDF 压电薄膜受到发射电路产生的高压脉冲激励后,由于逆压电效应产生形变,从而发射出超声波;超声波接触被测件后反射回来作用到 PVDF 压电薄膜上,使其受迫振动从而发生应力形变,由于正压电效应产生电信号。此时若已知被测件中的声速  $c$ ,根据检测到的电信号可得到超声波发射及回波之间的时间间隔  $\Delta t$ ,进而通过式(1)计算出被测件的厚度  $d$ :

$$d = \frac{\Delta t \cdot c}{2}.$$

(1)

式中: $\Delta t=T_2-T_1$ ,  $T_1$  和  $T_2$  分别为被测件相邻两次回波的时间。

目前,PVDF 压电薄膜的制备技术已经非常完善。如图 1 所示,将 PVDF 压电薄膜层压在聚酯基板保护层上以避免损伤污染。由于 PVDF 压电薄膜是高分子材料,无法焊接电极,传感器使用了压接端子引出电极,并且为屏蔽电磁干扰接了同轴电缆。最上层为高阻抗柔性背衬,吸收背部杂波的同时起到了绝缘的作用。

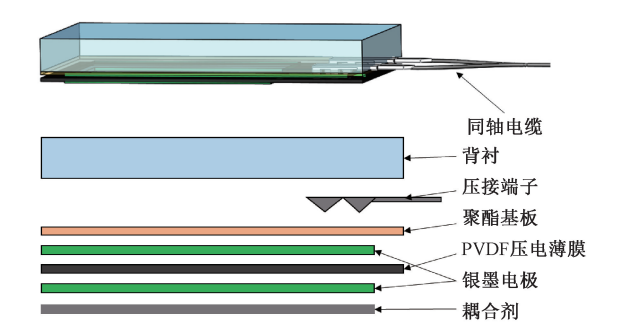


图 1 柔性超声传感器结构图

Figure 1 Structure diagram of flexible ultrasonic sensor

由于 PVDF 压电薄膜的固有特性,基于其所设计的传感器具有较高的中心频率和较宽的频带,目前常用的超声波激励信号有图 2 所示几种。双极性

多调谐脉冲能提高信号电压幅值但分辨率低;方波脉冲的频谱由离散的谐波组成,有较高的电压幅值和稳定性<sup>[11]</sup>。但这两种激励信号都很难达到 PVDF 压电薄膜 10 MHz 以上的高频要求。尖脉冲连续的频谱包含多种频率成分,特别是大量的高频成分,可以保留 PVDF 压电薄膜的宽频带特性。同时,相较于元器件需求数量多、功耗大的方波脉冲电路,尖脉冲激励电路简单、元器件少且信噪比高。因此设计尖脉冲激励电路用于激励该柔性超声传感器产生超声波,如图 3 所示。供电电压 VCC 经过升压模块  $U_1$  后在电容  $C_1$  两端形成高压,单片机通过控制场效应管  $Q_1$  的通断使得电容  $C_1$  瞬间充放电形成尖脉冲。

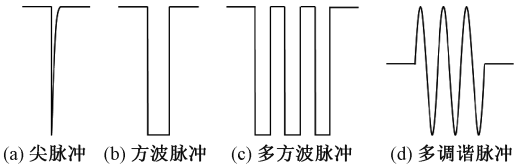


图 2 超声波激励信号

Figure 2 Ultrasonic excitation signal

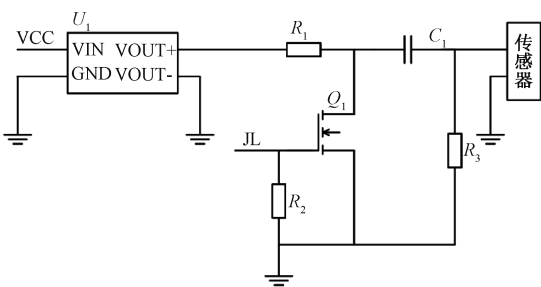


图 3 尖脉冲激励电路图

Figure 3 Sharp pluse circuit diagram

2 柔性超声传感器的背衬层优化设计

根据声学匹配理论,在压电薄膜与被测件间加入薄层介质可以提高声波的有效透射能量。 $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  分别为压电薄膜、薄层介质和被测件的声阻抗,则由压电薄膜到被测件的声能透射系数  $T$  为<sup>[12]</sup>

$$T = \frac{4Z_1Z_3}{(Z_3 + Z_1)^2 \cos^2 n_2 h_2 + \left(Z_2 + \frac{Z_3 Z_1}{Z_2}\right)^2 \sin^2 n_2 h_2} \quad (2)$$

式中: $h_2$  为薄层介质的厚度; $n_2$  为波数。薄层介质厚度取  $h_2 = (2n+1)\lambda/4$  时,若  $Z_2 = (Z_3 Z_1)^{1/2}$ ,  $T=1$ , 此时超声波发生全透射。而实践中与理论公式计算结果正好吻合的材料很难获取。当薄层介质厚度  $h_2 \rightarrow 0$  时,薄层介质声阻抗介于压电薄膜和被测件之间, $T \rightarrow 4Z_0 Z_1 (Z_0 + Z_1)^{-2}$ ,可知薄层介质的厚度越小,超声波的透射率越高。

本文所选的丙三醇的声阻抗值介于压电薄膜与被测件之间,可增加声能透射率,根据上述分析,应用时涂抹得越薄透射率越高。同时,丙三醇作为耦合剂,可以充分排出传感器与被测件间的空气,避免由于空气声阻抗低而造成的强反射。

然而,柔性超声传感器正常工作时不仅会向压电薄膜的正面发射超声波,同时向背面发射的超声波在反射后会形成干扰杂波,影响正常的信号接收。背衬层的设计可以吸收背部杂波,若背衬声阻抗为  $Z_4$ ,则衰减系数  $\alpha$  可表示为

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_4 - Z_1}{Z_4 + Z_1} \right|^2 \quad (3)$$

由此可见,背衬的声阻抗与压电薄膜越接近,衰减系数越高。利用该理论可增强背衬对背向辐射波及其他方向杂波的吸收,使其成为单向辐射的超声源。常见的背衬材料由液态环氧树脂混合钨粉固化而成,但会使传感器整体结构失去柔性。已知硅胶声阻抗为 1.3 MRayl 及表 1 中 PVDF 的声阻抗为 2.5~3.5 MRayl,因此选取掺有钨粉的液态硅胶固化后的材料作为背衬。钨粉颗粒的掺杂不仅会增大背衬的声阻抗使其接近 PVDF 压电材料,还相当于障碍物对超声波起到了散射衰减的作用。

为验证上述优化方法的可行性,利用图 4 中简化的二维模型对被测件及背向空气的声压进行仿真,PVDF 压电材料表面施加了 100 V 的激励电压。

图 5 为优化前后传感器的仿真结果,可以看出,加入薄层介质和背衬的传感器所发射的超声波进入被测件的声能明显增加,而背向辐射声能大幅衰减,近似于单向辐射超声源。在实际应用时,背衬层中钨粉和硅胶的最佳调配比例需要实验进一步探究。

此外,柔性超声传感器在外加高压脉冲激励下产生高频振动,由于惯性作用持续较长时间不会停止。若超声波波长为  $\lambda$ ,振动次数为  $N$ ,则超声仪器

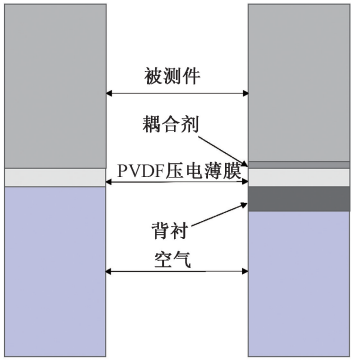


图 4 柔性超声传感器声匹配前后的仿真模型

Figure 4 Simulation modelling of flexible ultrasonic sensors before and after acoustic matching

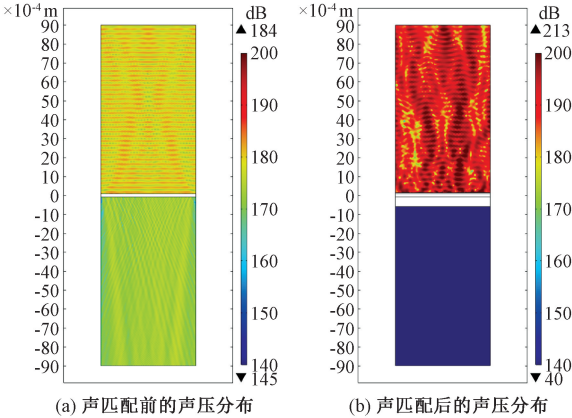


图 5 PVDF 压电薄膜声匹配前后的仿真结果

Figure 5 Simulation results before and after acoustic matching of PVDF piezoelectric film

的纵向分辨率  $\delta$  为

$$\delta = \frac{1}{2} N \lambda \quad (4)$$

背衬还可以增大机械阻尼、抑制拖尾,使得  $N$  值减小,提高传感器分辨率。

3 柔性超声传感器阻抗匹配优化方法

基于 PVDF 压电薄膜的柔性超声传感器本身有较高的中心频率和较宽的频带,但要使得传感器在高频谐振时具有较高的信噪比并保留宽频特性,还需要对其与配套电路进行阻抗匹配。一般情况下,由于接收电路的输入阻抗较高,在电缆不是很长的情况下,与传感器直接相连不影响正常的工作。因此,主要对激励电路与换能器间的阻抗匹配方法进行研究:一是调谐,调节 PVDF 压电薄膜的输入电抗,使负载处于谐振状态时,相位角趋近于 0 以增大传输功率的输出效率;二是变阻,调节 PVDF 压电薄膜的有功电阻使之达到最佳负载,以获得最大传输功率。

对 PVDF 压电薄膜的电学特性分析研究时,为简化该振动,方便将此压电换能器件与电路网络进



行统一分析,本文用 KLM 网络对其电学特性进行等效,电路如图 6(a)所示,其中  $V$  为激励电压,  $R$  为信号源内阻,  $R_0$  为介电损失电阻,  $R_1$  为探头辐射等效电阻,  $C$  为静态等效电容。整个器件呈现容性,因此使用电感进行匹配,常见的方式有 3 种:串联电感匹配、并联电感匹配及网络匹配。由于串联电感匹配易使换能器中心频率向低频方向移动,网络匹配则需要得到  $R_1$  的准确值,因此本文选用并联电感的匹配方式。由于 PVDF 压电材料的介电常数很小,其容抗远大于  $R_0$ ,  $R_0$  可以忽略不计,如图 6(b)所示。匹配电感  $L$  和 PVDF 等效电路中的  $C$  组成的 LC 网络的谐振频率应与 PVDF 压电薄膜的谐振频率  $f$  保持一致<sup>[13]</sup>,最佳匹配电感  $L$  的计算公式为

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}$$

(5)

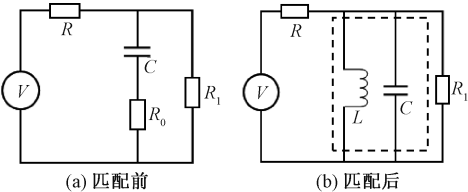


图 6 柔性超声传感器匹配前后等效电路

Figure 6 Equivalent circuits before and after matching of flexible ultrasonic sensors

该 PVDF 压电薄膜的谐振频率  $f$  为 10 MHz,将直接测得 PVDF 压电薄膜没有发生振动时的电容值 437 pF 近似作为静态电容  $C$ ,可得匹配电感  $L$  理论值约为 0.58  $\mu\text{H}$ 。由于实际条件限制,无法精确得到谐振频率  $f$  和静态电容  $C$ ,同时传感器的信号线上也存在寄生电容和电感,因此在实际进行匹配时,需要在该理论值附近不断调整,进行梯度实验以达到最佳匹配效果。否则,传感器电路的电抗或电纳在谐振频率附近和总的换能器的电抗或电纳产生谐振,可能会导致出现两个甚至两个以上的谐振点,即“双峰现象”,直接影响到换能器的检测效果。

4 实验

4.1 实验方案

本文搭建的实验平台如图 7 所示,包括超声激励装置、传感器、厚度为 8 mm 的曲面试件及数字示波器。其中,超声激励装置由电池、电源模块和激励电路组成。超声激励装置产生尖脉冲激励,传感器受到激励产生超声波并接收到回波后传送到数字示波器,由数字示波器显示超声波信号。

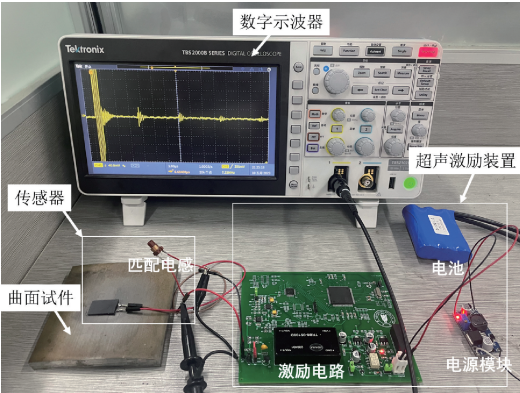


图 7 柔性超声传感器测厚实验平台

Figure 7 Flexible ultrasonic sensor thickness measurement experiment platform

实验主要包括背衬层匹配实验、阻抗匹配实验和管道壁厚测量实验 3 部分,分别对背衬层和阻抗匹配的电感参数进行了探究,并对传感器测量精度进行了验证。

4.2 背衬层匹配实验

利用基于 PVDF 压电薄膜制作的柔性超声传感器对图 7 曲面试件进行测量得到的回波信号如图 8 所示,可以看出,回波波形信噪比仅有 2 dB,5 次回波电压幅值逐渐降低,且各次回波的相似性较低,将给后续的回波识别、数据处理和算法设计带来很大的困难。

硅胶中钨粉的配比可以调节背衬材料的声阻抗,随着钨粉含量的提高,复合材料的声阻抗随之增

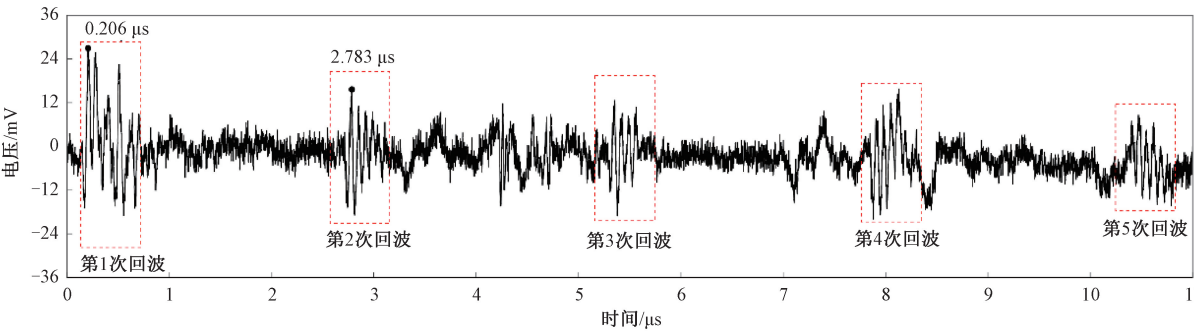


图 8 优化前的柔性超声传感器测得的回波信号

Figure 8 Echo signals measured by flexible ultrasonic sensor before optimization



大。已知硅胶的声阻抗为 1.3 MRayl,PVDF 压电材料的声阻抗为 2.5~3.5 MRayl,因此钨粉含量不宜过高。本文设计了不同调配比例的背衬,钨粉和硅胶的质量比分别为 10:1、15:1、20:1、25:1、30:1。作为对照,还设计了一组不含钨粉的硅橡胶作为背

衬。传感器安装各种背衬后所接收到的回波如图 9 所示,可以看出,随着钨粉比例的增大,背衬对杂波的吸收效果先增大后减小,钨和硅胶的质量比为 20:1 的背衬在传感器性能的改善中效果最佳。最终本文选用 20:1 的背衬制作柔性超声传感器。

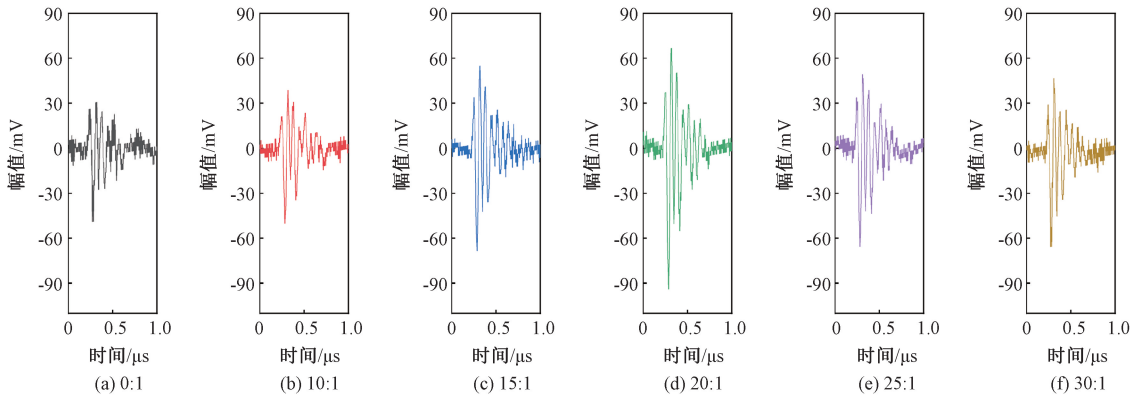


图 9 不同配比的背衬条件下传感器测得的回波信号

Figure 9 Echo signals measured by the sensor with different backing conditions

使用柔性背衬层对柔性超声传感器进行优化前后所接收到的回波波形对比如图 10 所示,可以看出,反射波脉冲周期明显缩短,拖尾减少,避免了反射回波重叠,可以拓宽壁厚测量范围的下限;回波信号电压幅值提升了约 200%,噪声电压值有所降低,提高了信噪比。

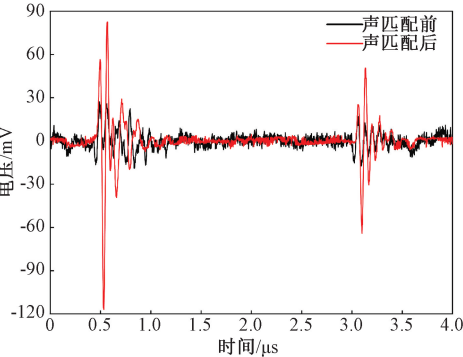


图 10 声匹配前后 PVDF 压电薄膜测得的回波信号

Figure 10 Echo signals measured by PVDF piezoelectric film before and after acoustic matching

4.3 阻抗匹配实验

对图 8 中优化前柔性超声传感器接收到的前两次回波放大并进行频谱分析后得到的结果如图 11 所示,可以看出,回波波形规整度较差,与理想的正弦振荡波形相差较大,频谱图显示其频率成分不单一,具有明显的“多峰”现象,对测量精度有很大影响。这是由于本文所用信号源为高压尖脉冲激励,具有宽频域的谐波成分所导致的。同时该信号在时域上的电压幅值较低,这是由于未经匹配的柔性超声传感器具有较大的阻抗。

根据式(5)可知,本文传感器并联匹配电感大

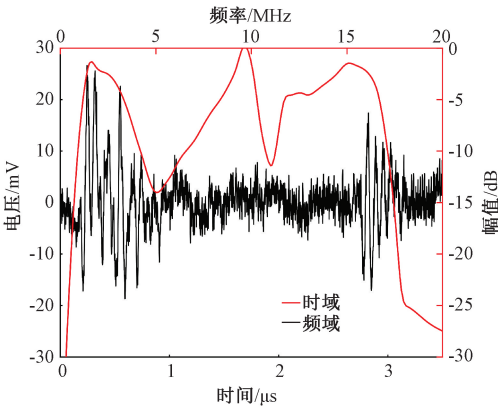


图 11 PVDF 压电薄膜测得回波信号的时域图和频域图

Figure 11 Diagrams of time-domain and frequency-domain of the echo signal measured by PVDF piezoelectric film

小约为 0.58 μH。实际应用时,在理论值附近不断调整匹配电感的大小,并对所接收到的相应回波信号进行时域及频域分析,最终得到最佳的匹配电感值。本文在柔性超声传感器上依次匹配 0.4~0.9 μH 的电感,电感值变化梯度为 0.1 μH,实验结果如图 12 所示。

观察图 12 的回波信号的时域图和频域图可以发现,并联电感值偏小时,波形较规整,频率成分单一。但信号电压幅值低,脉冲振荡周期多,频带带宽较窄。随着电感值增大,信号电压幅值增加,振荡周期数减少,频带变宽,在理论值 0.58 μH 附近的 0.6 μH 时达到最佳,而后波形规整度下降,开始出现“双峰”现象。

最终传感器匹配电感值选定为 0.6 μH,此时波形规整且信号电压幅值较高,脉冲振荡时间短,

频率成分单一且带宽较宽。基于上述实验结果,制作经过背衬层和阻抗匹配优化的传感器再次对曲面试件进行测量。图 13 给出了优化后柔性超声传感器测得的回波信号。与图 8 对比可以发现,优化后柔性超声传感器的回波信号电压幅值提高了 3 倍,信噪比由 2 dB 提高到了 30 dB。已知室温下曲面试件声速为 6 260 m/s,根据式(1),优化前测得壁厚值为 8.066 mm,绝对误差为 0.066 mm;优化后测得壁厚值为 8.003 mm,绝对误差为 0.003 mm,精度提高了一个数量级,相对误差为 0.04%,与现有研究的此类传感器<sup>[4]</sup>相比提高了 5%左右。

4.4 管道壁厚测量实验

利用优化设计的柔性传感器对不同厚度、不同曲率半径的管道进行了壁厚测量实验,具体参数如表 2 所示,其中壁厚由美国 Innerspec

公司的便携式超声检测仪(精度为 0.001 mm)标定。由于柔性传感器尺寸固定,因此其灵敏度可以由式(6)计算<sup>[14]</sup>,管道半径越小,灵敏度越小,各半径与厚度的管道壁厚均在传感器灵敏度范围内。

$$S = \frac{Q}{F} = \frac{A \cdot d_{31}}{\delta \sin \frac{\theta}{2}} = \frac{A \cdot d_{31}}{\delta \sin \frac{90L}{\pi r}} \quad (6)$$

式中: $A$ 为电极的有效面积; $d_{31}$ 为拉伸方向的压电系数; $\delta$ 为压电薄膜侧面积; $L$ 为压电薄膜拉伸方向长度; $r$ 为试件的半径。

实验具体过程是使用同一传感器对各个管道试件的同一位置进行了 5 次测量以验证传感器的精度和重复性,结果如表 2 所示,可以看出,优化设计后的柔性超声传感器测量误差为 $\pm 0.01$  mm,在进行重复测量时,偏差保持在 0.004 mm,具有较好的重复性。

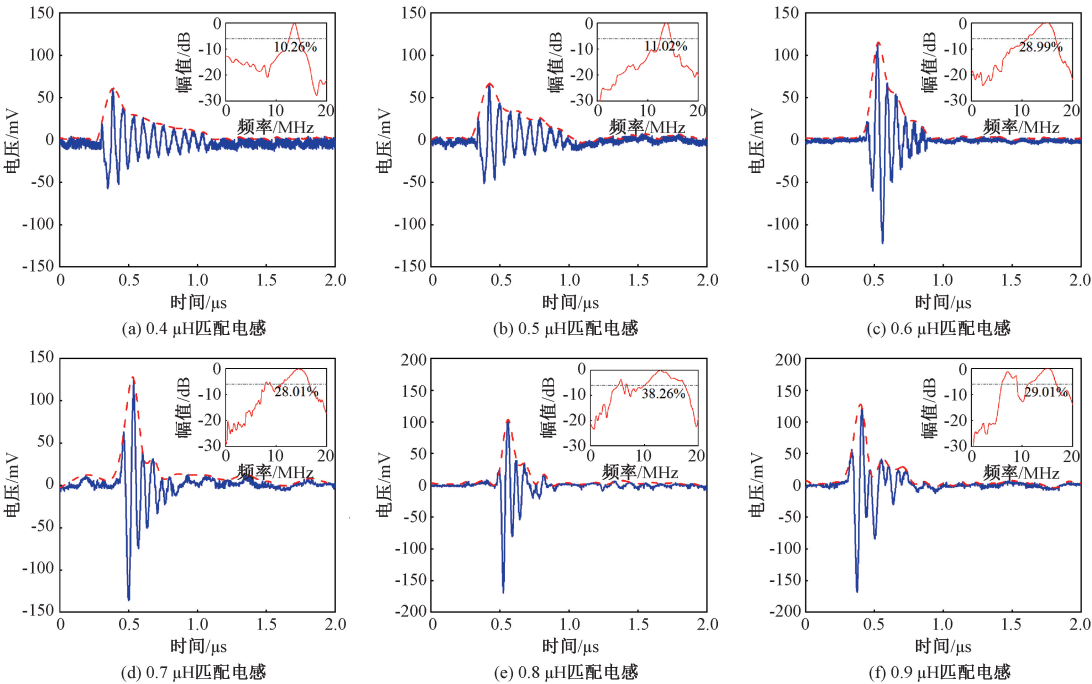


图 12 不同匹配电感条件下传感器测得回波信号的时域图及频域图

Figure 12 Time-domain diagram and frequency-domain diagram of the echo signal measured by the sensor with different matching inductance conditions

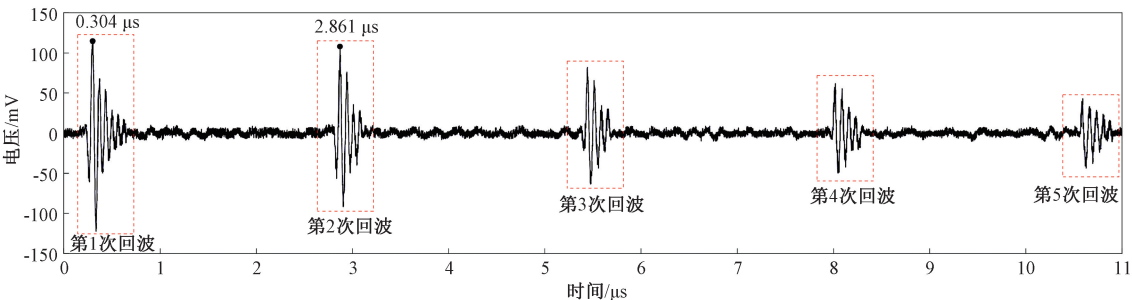


图 13 优化后的柔性超声传感器测得的回波信号

Figure 13 Echo signals measured by flexible ultrasonic sensor after optimization

表 2 不同管道试件壁厚测得结果

Table 2 Measured wall thickness of different pipe specimens

试件	半径	壁厚	第 $n$ 次壁厚测量数据					第 $n$ 次壁厚测量误差					重复性
			$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	偏差
1	150	5.001	5.007	5.007	5.003	5.004	5.005	0.006	0.006	0.002	0.003	0.004	0.004
2	100	10.007	10.001	10.003	10.003	10.002	10.001	-0.006	-0.004	-0.004	-0.005	-0.006	0.002
3	150	10.006	10.013	10.012	10.012	10.013	10.011	0.007	0.006	0.006	0.007	0.005	0.002
4	200	9.996	9.993	9.994	9.994	9.994	9.993	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	0.001
5	150	15.013	15.019	15.022	15.020	15.022	15.020	0.006	0.009	0.007	0.009	0.007	0.003

5 结论

本文基于超声波的传播特性及 PVDF 压电薄膜的电学特性,从背衬层匹配及阻抗匹配两个方面提出该柔性超声传感器的优化设计方法,得到背衬层钨粉和硅胶的最佳调配,以及柔性超声传感器中匹配电感的最佳参数。实验结果表明,背衬可以有效吸收柔性超声传感器的背部干扰杂波,与激励电路间的阻抗匹配方案可以有效提高传感器回波信号的质量。本文优化后的柔性超声传感器具有窄脉冲、宽频带和高频率的优良性能,信噪比从 2 dB 提高到 30 dB。同时,回波信号波形规整度高、拖尾小,在实际应用时精度达 0.01 mm,重复性偏差达 0.004 mm。

参考文献:

[1] BOWEN C R, BRADLEY L R, ALMOND D P, et al. Flexible piezoelectric transducer for ultrasonic inspection of non-planar components [J]. Ultrasonics, 2008, 48 (5): 367-375.

[2] HARVEY G, GACHAGAN A, MACKERSIE J W, et al. Flexible ultrasonic transducers incorporating piezoelectric fibres[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(9): 1999-2009.

[3] ZHEN L Y, LIU Z D, LIU Z T, et al. High-density flexible piezoelectric sensor array with double working modes [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(5): 5270-5277.

[4] LUO Q, WANG H, XU D. The research of corrosion monitoring on pipe based on flexible ultrasound sensor[C]//Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing. Northampton: BINDT, 2014: 135-142.

[5] 李珺, 张峰, 贺西平, 等. 换能器匹配层参数的选定[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2009, 37(5): 38-41.

LI J, ZHANG F, HE X P, et al. The parameters selection of matching layer of ultrasonic transducers[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 37(5): 38-41.

[6] 吴锦川, 蔡恒辉. 一种制作高阻抗背衬材料的新方法[J]. 声学技术, 2008, 27(2): 214-216.

WU J C, CAI H H. New technique for manufacturing high impedance backing composites [J]. Technical Acoustics, 2008, 27(2): 214-216.

[7] POLK E. Impedance matching circuit for piezoelectric transducers[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1978.

[8] EL-DAHSAN A, AHMED H N, EL-TAGER A. An interactive approach to the design of adaptive impedance matching circuits[C]//2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Piscataway: IEEE, 2011: 607-610.

[9] 苟阳, 付欣. 随钻声波发射换能器宽频阻抗匹配设计及实验[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 186-193.

GOU Y, FU X. Broadband impedance matching design and experiment for acoustic while drilling transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 186-193.

[10] RATHOD V T. A review of electric impedance matching techniques for piezoelectric sensors, actuators and transducers[J]. Electronics, 2019, 8(2): 1-32.

[11] 杨剑, 高成强, 刘晓方. 超声激励方式对检测信号的影响[J]. 无损检测, 2010, 32(1): 36-38.

YANG J, GAO C Q, LIU X F. Affect of different simulation mode on ultrasonic testing signal[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(1): 36-38.

[12] 徐广春. 超声显微检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.

XU G C. Ultrasonic microscopic testing technology[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[13] 王翥, 刘春龙, 罗清华. 超声波传感器特性分析与测试方法的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(2): 13-18.

WANG Z, LIU C L, LUO Q H. Research on ultrasonic sensors characteristics and testing method[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(2): 13-18.

[14] 徐丹君. 基于柔性超声传感器的管道腐蚀监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

XU D J. The research of corrosion monitoring on pipe based on flexible ultrasound sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.



Laser Ultrasonic Defect Detection Based on Local Outlier Factor and Isolated Forest

LI Yang<sup>1</sup>, ZHU Wenbo<sup>1</sup>, JING Fengyu<sup>2</sup>, YE Zhongfei<sup>3</sup>, MA Yunrui<sup>3</sup>, ZHOU Yang<sup>1</sup>, ZOU Yun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. POWERCHINA Henan Electric Power Equipment Co., Ltd., Luohe 462000, China; 3. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** In response to the issue of artifacts in the maximum amplitude images in laser ultrasonic (LU) defect detection, principal component analysis (PCA) was integrated with two unsupervised machine learning algorithms including local outlier factor (LOF) and isolated forest (IF) to perform unsupervised anomaly detection on LU data. Firstly, the PCA algorithm was used to reduce the dimensionality of the LU data, simplifying its complexity. Secondly, the LOF and IF algorithms were employed to identify outliers in the data, and the thresholds for these outliers were determined using the cumulative distribution function and kernel density estimation. Finally, a comparison of the detection results from the LOF, IF algorithms, and the maximum amplitude images revealed that the LOF algorithm offered superior defect detection precision and a lower false positive rate.

**Keywords:** laser ultrasonic; defect detection; principal component analysis; local outlier factor; isolated forest; aluminium alloy

(上接第 104 页)

Optimization of Piezoelectric Flexible Ultrasonic Sensors Based on Backing Layer Matching

YU Yongjie<sup>1</sup>, DU Yuqi<sup>1</sup>, HUANG Shilei<sup>2</sup>, GAN Fangji<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** Even with the advantages of small size, light weight, and easy matrixing, flexible ultrasonic sensors based on polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric film are susceptible to back clutter and impedance mismatching, resulting in a complex frequency component of the return signal and a low signal-to-noise ratio. In order to effectively absorb the stray waves at the back of the sensor and improve the ability of unidirectional radiation of ultrasonic tungsten powder and silica gel were used to design the backing layer for flexible ultrasonic sensors, which could increase the signal voltage amplitude of the sensor by 200% while maintaining the overall flexibility of the transducer. Secondly, according to the electrical characteristics of the flexible ultrasonic sensor, an impedance matching method for flexible ultrasonic sensors was proposed, and the best matching parameters were obtained through experiments, so that the signal-to-noise ratio of the sensor was increased from 2 dB to 30 dB. The optimized flexible ultrasonic sensors had the excellent performance of wide bandwidth, high frequency, narrow pulse. The experimental results of the measurement of the thickness of pipe test specimens with different curvatures and wall thicknesses showed that it could reach the accuracy of 0.01 mm.

**Keywords:** flexible ultrasonic sensors; backing layer matching; impedance matching; signal-to-noise ratio