

柔性无损检测超声线阵换能器的仿真研究

李尧¹, 夏子颐², 李晓兵^{1*}, 孙瑞雨¹, 陈兴飞¹, 孙丰龙¹, 杨钊萍¹

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²上海师范大学物理系光电材料与器件重点实验室, 上海

收稿日期: 2024年4月15日; 录用日期: 2024年5月10日; 发布日期: 2024年5月16日

摘要

为了突破传统刚性超声探头无法完全贴合零部件曲面的限制, 论文设计了一种由压电材料PZT-5H和聚二甲基硅氧烷(PDMS)组成的柔性超声线阵换能器。针对设计的柔性换能器采用有限元分析方法对其电阻抗性能、脉冲回波特性进行了仿真分析, 获得了换能器的中心频率, -6 dB带宽以及发射电压响应。此外分别仿真了此柔性换能器应用于凹面和凸面金属管时对其内部裂纹的检测情况。仿真结果显示换能器的中心频率为21.5 MHz, -6 dB带宽为51.2%。换能器为凹形和凸形时其声压级均满足检测需求, 可以用于对钢管中裂隙进行检测。

关键词

线阵换能器, 柔性超声, 超声成像, 有限元仿真

Simulation Study on Flexible Non-Destructive Testing of Ultrasonic Linear Array Transducers

Yao Li¹, Ziyi Xia², Xiaobing Li^{1*}, Ruiyu Sun¹, Xingfei Chen¹, Fenglong Sun¹, Zhaoping Yang¹

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices in the Department of Physics, Shanghai Normal University, Shanghai

Received: Apr. 15th, 2024; accepted: May 10th, 2024; published: May 16th, 2024

Abstract

In order to overcome the limitation that traditional rigid probes cannot fully adhere to curved sur-

*通讯作者。

文章引用: 李尧, 夏子颐, 李晓兵, 孙瑞雨, 陈兴飞, 孙丰龙, 杨钊萍. 柔性无损检测超声线阵换能器的仿真研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(3): 2223-2232. DOI: 10.12677/mos.2024.133204

faces, a flexible ultrasonic linear array transducer composed of piezoelectric material PZT-5H and polydimethylsiloxane (PDMS) was designed. Simulate and analyze the impedance performance and pulse echo characteristics of the designed flexible transducer using the finite element software COMSOL, and obtain the center frequency, -6 dB bandwidth, emission voltage response. Then, the detection of cracks in metal pipes using this flexible transducer on concave and convex surfaces was simulated separately. The simulation results show that the center frequency of the transducer is 21.5 MHz, with a -6 dB bandwidth of 51.2%. When the transducer is concave or convex, its sound pressure level meets the detection requirements and can be used to detect cracks in steel pipes.

Keywords

Linear Array Transducer, Flexible Ultrasound Transducer, Ultrasound Imaging, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超声换能器由于其检测灵敏度高、穿透力强、费用低、设备简单等优点,广泛应用于无损检测、结构监测、医学诊断等领域[1][2]。然而目前大部分的超声换能器前端都是刚性的,无法与不同的曲面完全贴合,在检测人体或者工程零件的一些不规则表面,例如船舶、管道、人的头骨、风力涡轮机叶片和飞机结构时,在这些界面处产生的气隙或不良接触会引起声波能量反射和波畸变,使得测试结果产生误差。

近年来,国内外都对柔性超声换能器进行了大量的研究并取得了较大的进展。Kim 等人[3]使用了锆钛酸铅陶瓷(PZT-5H)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)设计了柔性复合压电传感器,采用银纳米线(AgNWs)与PDMS 混合制备了柔性电极,提高了换能器的机械灵活性,对于不规则表面检测有较大的潜力,但缺点是换能器表面较硬,不适用于人体检测。林荣辉等人[4]采用反应射频磁控溅射的方法制备了氧化锌压电薄膜,SEM 和 SRD 结果表明氧化锌薄膜具有高度(002)择优取向的柱状晶结构,压电效应较好,在多自由度位置传感方面具有应用前景。T.F 等人[5]设计一种可直接耦合人体曲率的柔性超声线阵换能器制备的曲率传感器能测量未知曲面的曲率,提高换能器的灵敏度,从而改善了图像质量。Peng 等人[6]参照了 Kim 等人的方法制备了柔性换能器,改善了换能器结构,将其应用于人体血压监测,与商用血压监测仪测量结果相比,此柔性传感器具有在心脏周期内连续检测血压波形的能力,为柔性传感器应用于血压监测提供了一种方案。Shih 等人[7]设计制备了可在高温下进行无损检测的柔性超声线阵换能器,此换能器采用溶胶-凝胶喷涂压电薄膜技术制备了换能器的阵列,这一方法制作出的换能器可在 150°C 的温度下对铝合金块中的缺陷进行无损检测。但由于元件尺寸和间隙的限制,制备出的阵列尺寸较大。

本文基于压电材料 PZT-5H,用有限元分析的方法仿真了一种适用于不同曲面的柔性超声线阵换能器。对平面、凸面、凹面三种情况的换能器声场进行了仿真分析,并模拟了对钢管中缺陷进行检测的情况。这为柔性超声换能器的设计提供了一定的理论参考。

2. 柔性线阵换能器建模

2.1. 柔性超声线阵换能器单阵元模型设计

压电超声换能器主要由匹配层,压电材料和背衬组成。而压电材料是其中的核心部件,超声换能器

工作的基本原理就是利用压电材料的压电效应实现电信号和声信号间的互相转换[8]。柔性线阵换能器的单个阵元结构如图 1 所示, 由于水的声阻抗较低, 为了易于阻抗匹配以及提升换能器的带宽, 采用了双层匹配层的结构。在 KLM 等效电路模型中, 将压电片视为声学传输线, 突出了压电片内部声参量的空间分布。依据传输线理论, 采用双层匹配层时, 其声阻抗 Z 的计算公式为[9]:

$$Z_1 = \sqrt{Z_0^4 Z_L^3} \quad (1)$$

$$Z_2 = \sqrt{Z_0 Z_L^6} \quad (2)$$

其中, Z_0 为压电振子的声阻抗, Z_L 为负载声阻抗, Z_1 为内匹配层声阻抗, Z_2 为外匹配层声阻抗。

本文采用的压电材料为 PZT-5H, 密度 $\rho_1 = 7500 \text{ kg/m}^3$, 声速 $c_1 = 4530 \text{ m/s}$, 其声阻抗 $Z_0 = \rho_1 c_1 = 34 \text{ MRayl}$, 换能器的目标负载为水, 密度 $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$, 声速 $c_2 = 1450 \text{ m/s}$, 其声阻抗 $Z_L = \rho_2 c_2 = 1.45 \text{ MRayl}$, 根据公式(1)、(2)可计算出内、外匹配层的声阻抗分别为 8.8 MRayl , 2.3 MRayl 。

一般情况下很难找到声阻抗值与理论值相同的材料, 因此通常换能器的匹配层多为人工复合材料。本文采用的是环氧树脂与氧化锆粉混合的方式来制备匹配层。经过多次实验, 得出当氧化锆粉质量分数为 70% 时, 其声阻抗值为 8.4 MRayl ; 质量分数为 0%, 即环氧树脂作为匹配层时, 声阻抗值为 3 MRayl , 与理论值较为接近。因而最终选定这两种材料参数作为仿真时匹配层的声参数。背衬的主要作用为吸收背向辐射的声波, 因此需要声阻抗较大的材料[10], 本文采用导电银胶与钨粉按一定比例混合作为背衬, 其声阻抗为 6.5 MRayl 。

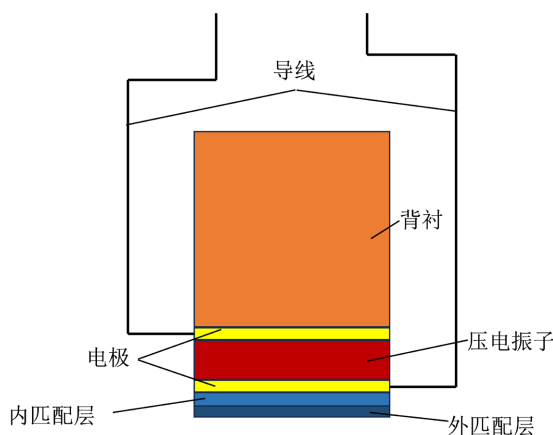
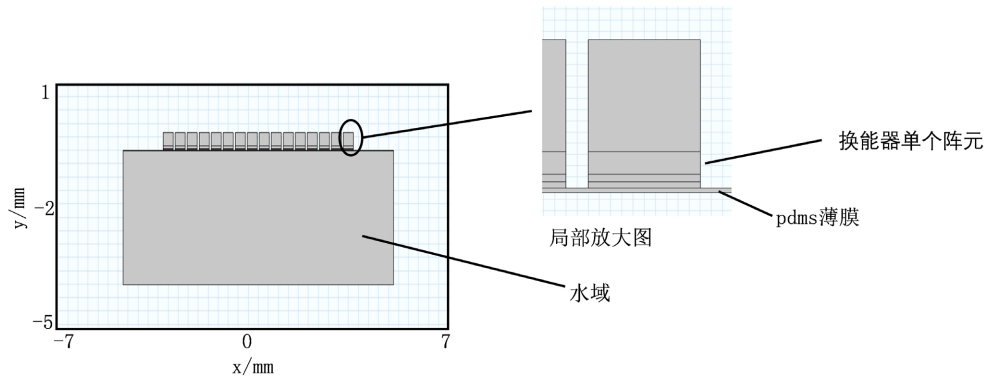


Figure 1. Structural drawing of single element of ultrasonic transducer
图 1. 超声换能器单阵元结构图

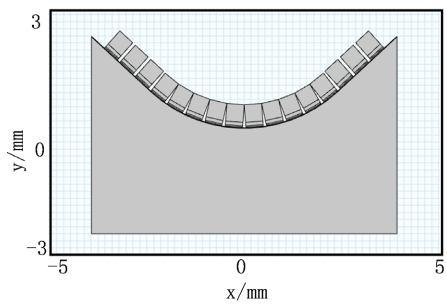
2.2. 不同曲面换能器建模

预计制备的柔性超声换能器为 16 阵元线阵换能器, 其形状分别为平面、凹面、凸面时的仿真模型如图 2 所示, 为了提高计算效率, 本文使用二维模型进行建模计算。其中压电振子厚度为 0.1 mm , 宽度为 0.5 mm , 阵元间间隔为 0.1 mm , 匹配层厚度为 $\lambda/4$ [11]。16 个阵元通过柔性薄膜 PDMS 连接起来, PDMS 膜的厚度为 0.02 mm 。仿真时使用的部分部件参数如表 1 所示。

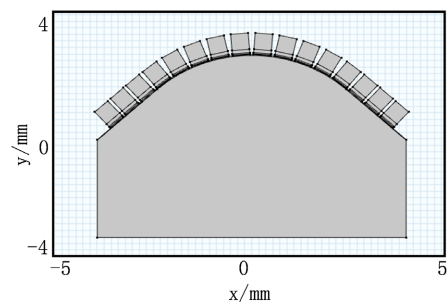
由于本文中的换能器是应用于曲面的测量, 其 16 个阵元与测量面形成了不同的夹角, 直接在 COMSOL 中建模较为复杂, 且极化方向不易设置。因而先在 AutoCAD 中画出换能器应用于三种曲面时的模型, 并测量各个阵元与水平面的夹角, 而后将模型导入 COMSOL 中, 并依据测量的角度分别设置各个阵元的极化方向。模型建立好之后, 再分别设置各个物理场的边界条件, 网格划分完成后对其进行计算。



(a)平面仿真模型图



(b)凹面仿真模型图

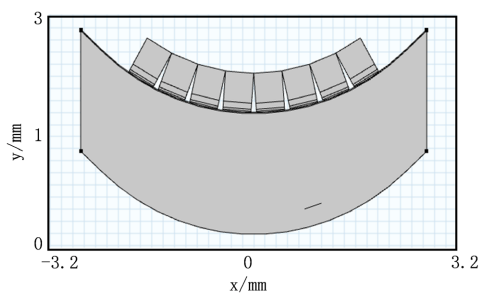


(c)凸面仿真模型图

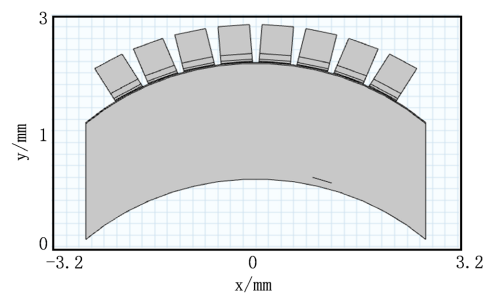
Figure 2. Structural drawing of flexible linear array transducers with different shapes
图 2. 不同形状的柔性线阵换能器仿真模型图

Table 1. Simulation parameters of some components of the transducer
表 1. 换能器部分部件仿真参数

部件	声速(m/s)	密度(m/s)	声阻抗(MRayl)
背衬	1547	860	1.33
内匹配层	2664	1480	3.94
外匹配层	2203	1224	2.7



(a)凹面检测仿真模型图



(b)凸面检测仿真模型图

Figure 3. Diagram of crack detection models with different shapes
图 3. 不同形状裂隙检测模型图

2.3. 换能器缺陷检测建模

建立的对钢管中裂隙进行检测的模型如图 3 所示, 为了提高计算效率, 只对换能器的 8 个阵元进行了建模, 钢管的厚度为 2 mm, 在边界条件中将钢管中的缺陷设置为裂隙, 其他的条件设置与上述步骤相同, 而后分别对凹形和凸形这两种情况进行仿真计算。

3. 仿真结果与讨论

3.1. 脉冲回波特性分析

在换能器两端加上激励脉冲信号, 对其进行时域分析, 本文采用的激励信号为正弦波, 振幅为 1 V。使用自由三角形网格进行划分, 网格最大单元大小为波长的 1/6; 对其时域进行研究, 仿真所得的脉冲-回波响应如图 4 所示。换能器的中心频率(f_c)和-6 dB 带宽(BW)可通过以下公式计算:

$$f_c = \frac{1}{2}(f_1 + f_2) \quad (3)$$

$$\text{BW}\% = \frac{f_2 - f_1}{f_c} * 100\% \quad (4)$$

式中 f_1, f_2 为-6 dB 时对应的频率, 由仿真结果可知此换能器的中心频率为 21.5 MHz, -6 dB 带宽为 51.2%, 换能器的压电性能较好。

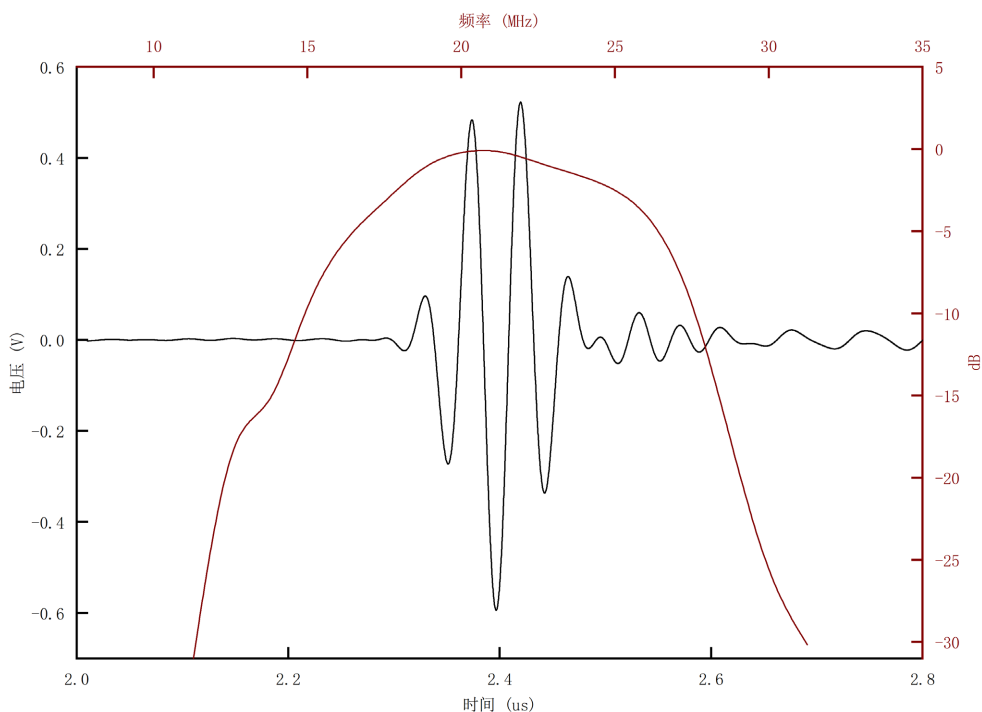


Figure 4. Echo characteristic curve and spectrum curve of transducer

图 4. 换能器回波特性曲线和频谱曲线

3.2. 声辐射特性仿真分析

发射电压响应(TVR)表示在距离 1 m 处测得的, 由 1 V 额定电压驱动的换能器灵敏度, 可采用如下的公式计算[12]:

$$TVR = 20 \log \frac{P_{RMS}/V_{RMS}}{1 \mu Pa V^{-1}} \quad (5)$$

其中 P_{RMS} 为距换能器表面 1 m 处的均方根压力, V_{RMS} 为驱动电压。

仿真出的换能器发射电压响应如图 5 所示, 由图中可以看出, 在 17 MHz ~ 27 MHz 范围内, 设计的线阵换能器的发射电压响应大于 175 dB, 且在这个范围内发射电压响应的变化也较为平缓, 可以满足传感应用的要求。

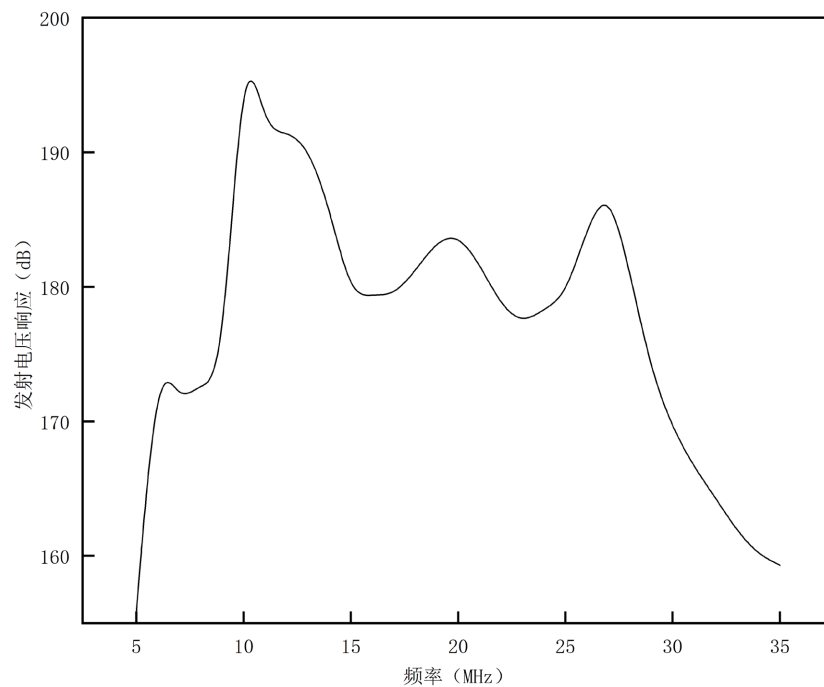


Figure 5. Transducer transmit voltage response

图 5. 换能器发射电压响应

3.3. 声场仿真分析

对换能器进行频域分析, 采用的激励信号、网格大小与时域分析一致, 频域研究范围为 5 MHz~30 MHz, 步长为 0.5 MHz。仿真计算出换能器形状为凹形和凸形时的声压级分布如图 6 所示。从图中可看出换能器发射的声波沿换能器中心向前方发射, 且声压级的大小随着传播距离的变大而逐渐减小。

为了更清晰的表示声压级的变化, 分别绘制了 $y = 0$ mm、 $y = -1.5$ mm 和 $y = -2.5$ mm 处换能器的声压级图, 如图 7 所示。左侧为凹形换能器的声压级分布图, 右侧为凸形换能器的声压级分布图。从图中可以看出, 换能器为凹形时, $y = 0$ mm 时, 声压级最小值为 142 dB, 最大值为 194 dB; $y = -1.5$ mm 时, 声压级最小值为 152 dB, 最大值为 189 dB; $y = -2.5$ mm 时, 声压级最小值为 136 dB, 最大值为 186 dB, 声压级的最大值随着探测距离的增加在逐渐减小, 对于同一深度来说, 由于换能器形状为凹形, 在 x 为 0 mm 附近的声压级值最大, 声压级值沿着 x 轴向两边逐渐减小, 但声压级的最小值也在 135 dB 之上, 可满足检测所需的要求。换能器为凸形时, 由于声波的合成, 对于同一深度来说, 不同水平位置的声压级相差不大; 对于不同深度来说, 随着探测距离的增加, 声压级最大值反而在逐渐增加, 在 -2.5 mm 处, 声压级最大值达到了 209 dB。三种探测深度的最小声压级大于 150 dB, 表明换能器为凸形时, 声波的强度更高, 其有效探测的距离较凹形时更远。

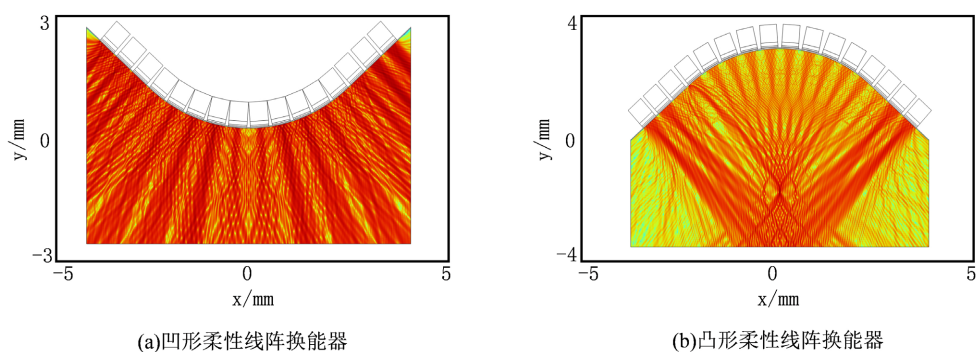


Figure 6. Sound pressure level distribution diagram of flexible linear array transducer

图 6. 柔性线阵换能器声压级分布图

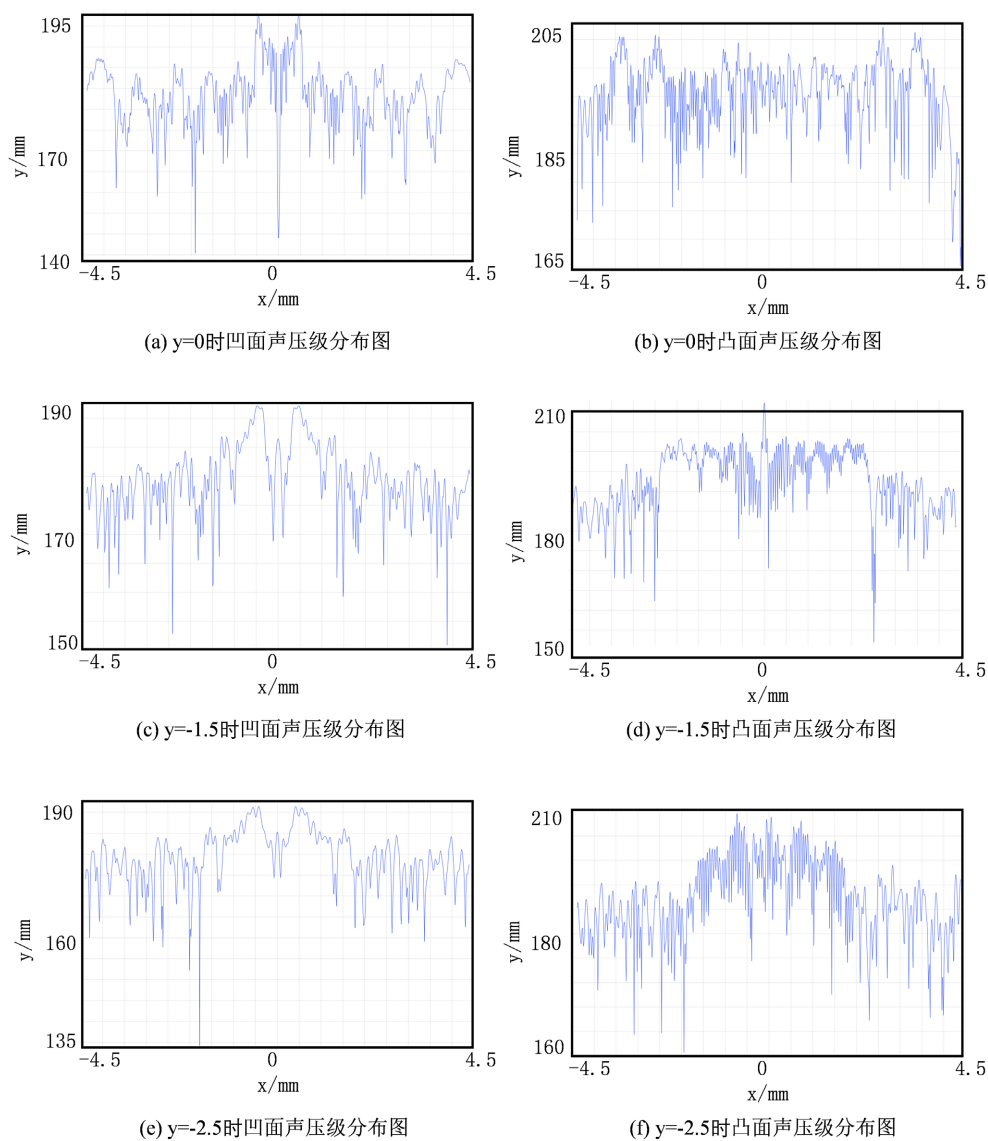


Figure 7. Sound pressure level distribution of flexible linear array transducers at different depths

图 7. 柔性线阵换能器不同深度声压级分布

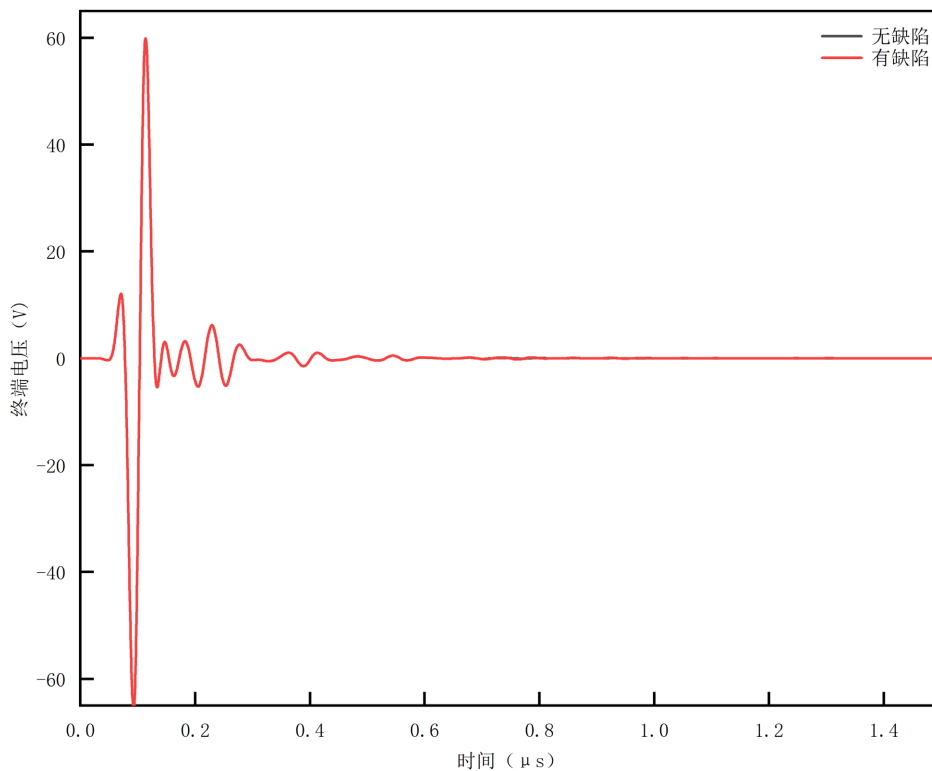


Figure 8. Defective and flawless transducer terminal voltage for concave steel pipes
图 8. 凹形钢管有缺陷和无缺陷的换能器终端电压

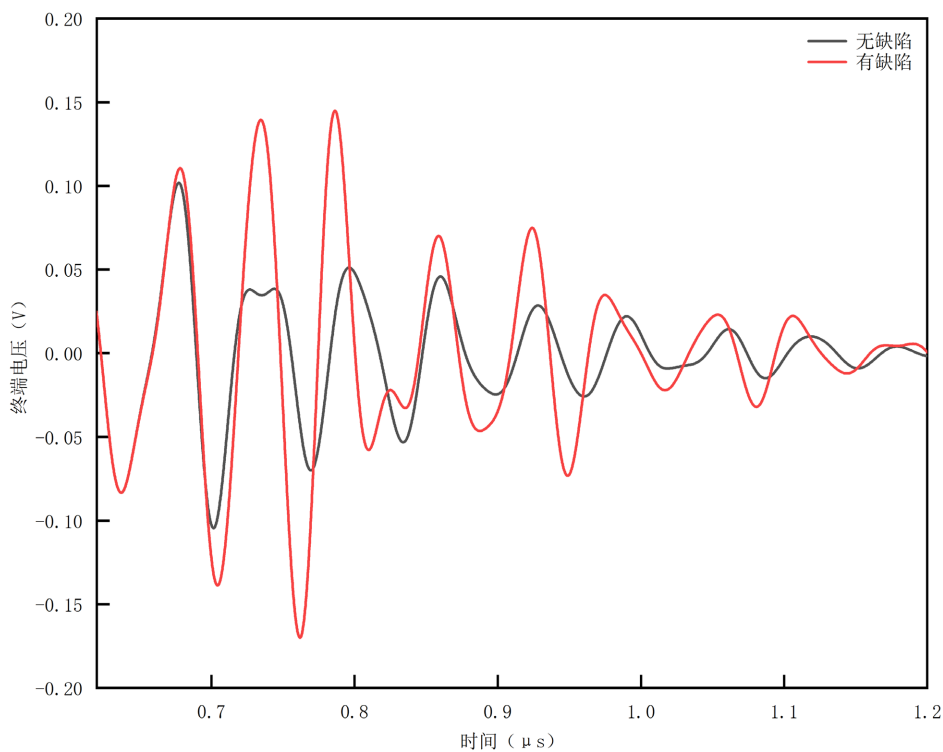


Figure 9. Enlarged diagram of transducer terminal voltage
图 9. 换能器终端电压放大图

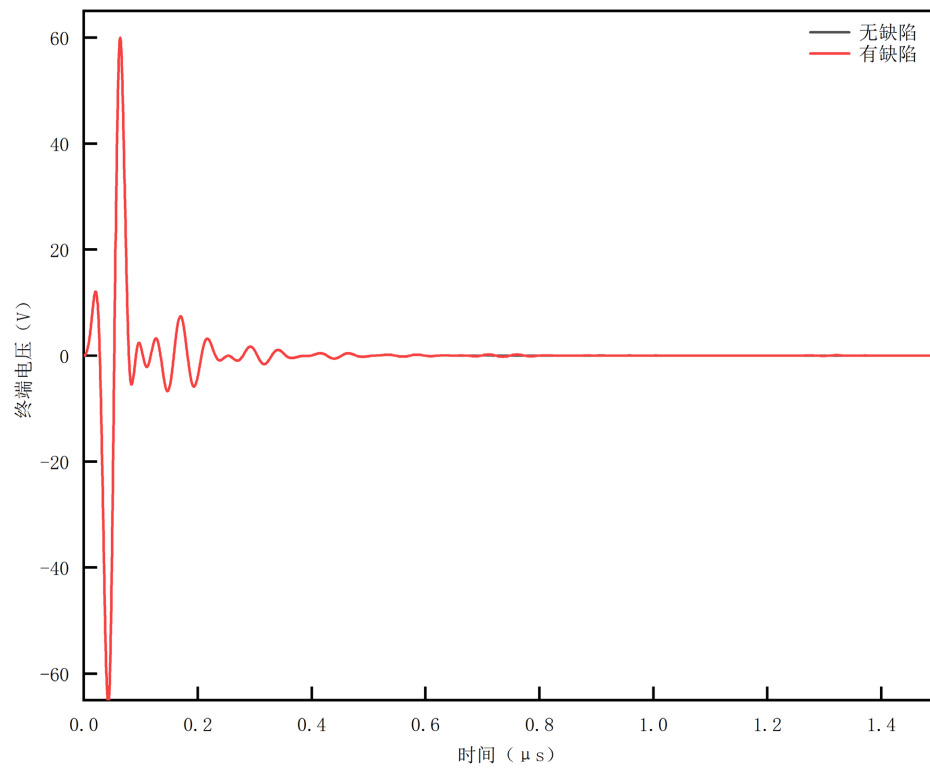


Figure 10. Defective and flawless transducer terminal voltage for convex steel pipes
图 10. 凸形钢管有缺陷和无缺陷的换能器终端电压

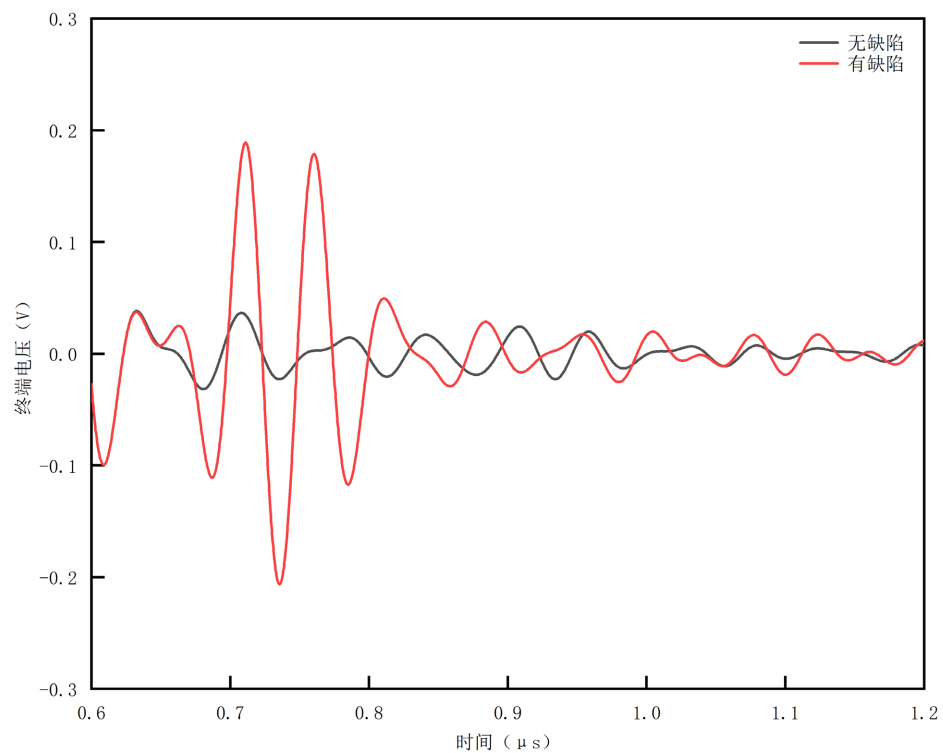


Figure 11. Enlarged diagram of transducer terminal voltage
图 11. 换能器终端电压放大图

3.4. 缺陷检测仿真分析

图 8 为凹形钢管中裂隙检测仿真结果, 反射波到达换能器时的信号放大图如图 9 所示, 从图中可以看出, 在 $0.68 \mu\text{s}$ 后, 反射的信号到达换能器, 终端电压的值开始偏离无缺陷时的值, 表明换能器检测到了钢管中的裂隙。凸形钢管中裂隙检测仿真结果如图 10、图 11 所示, 从图中可以看出, 在 $0.68 \mu\text{s}$ 后, 换能器检测到了裂隙反射的信号, 且由于换能器为凸形时其声压级较高, 因而反射的信号也更强, 其终端电压的信号变化相对于凹形时也更加明显。

4. 结论

本文仿真了一种由 PZT-5H 和 PDMS 组成的柔性线阵超声换能器, 计算了其压电性能, 声辐射特性, 声场分布和钢管中裂隙检测的情况。仿真结果表明换能器的中心频率为 21.5 MHz , -6 dB 带宽为 51.2% , 在探测深度为 2.5 mm 时, 其最小声压级也大于 135 dB , 可以清晰的检测出凹形和凸形钢管中的裂隙。在理论上验证了柔性换能器进行无损检测的可行性。

参考文献

- [1] 蒋危平, 方京, 编著. 超声检测学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991: 85-92.
- [2] 胡建恺, 张谦琳, 编著. 超声检测原理和方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993: 109-114.
- [3] Kim, T., Cui, Z., Chang, W.-Y., Kim, H., Zhu, Y. and Jiang, X. (2020) Flexible 1-3 Composite Ultrasound Transducers with Silver-Nanowire-Based Stretchable Electrodes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **67**, 6955-6962. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2937063>
- [4] 林荣辉, 孙翠敏, 尤晖, 等. 基于 ZnO 压电薄膜的柔性 MEMS 超声波换能器[J]. 压电与声光, 2016, 38(6): 851-854+860.
- [5] de Oliveira, T.F., Pai, C.N., Matuda, M.Y. et al. (2019) Development of a 2.25 MHz Flexible Array Ultrasonic Transducer. *Research on Biomedical Engineering*, **35**, 27-37. <https://doi.org/10.1007/s42600-019-00006-1>
- [6] Peng, C., Chen, M., Sim, H.K., Zhu, Y. and Jiang, X. (2021) Noninvasive and Nonocclusive Blood Pressure Monitoring via a Flexible Piezo-Composite Ultrasonic Sensor. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 2642-2650. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3021923>
- [7] Shih, J.L., Wu, K.T., Jen, C.K., Chiu, C.H., Tzeng, J.C. and Liaw, J.W. (2013) Applications of Flexible Ultrasonic Transducer Array for Defect Detection at $150 \text{ }^\circ\text{C}$. *Sensors*, **13**, 975-983. <https://doi.org/10.3390/s130100975>
- [8] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 20-28.
- [9] 孙裕后, 王甫霖, 董杰, 靳丽, 王锋华, 董帅. 不同匹配层阵列式换能器的有限元仿真[J]. 压电与声光, 2022, 44(2): 273-277.
- [10] Hou, C., Fei, C., Li, Z., Zhang, S., Man, J., Chen, D., Wu, R., Li, D., Yang, Y. and Feng, W. (2022). Optimized Backing Layers Design for High Frequency Broad Bandwidth Ultrasonic Transducer. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **69**, 475-481. <https://doi.org/10.1109/TBME.2021.3098567>
- [11] 张雪晴, 尹冠军, 张家裕, 冉建清, 杨雪冰, 郭建中. 超声换能器辐射特性的优化[J]. 应用声学, 2023, 42(3): 540-547.
- [12] 侯京川, 鲜晓军, 李瑞峰, 曾祥明, 冯小东, 刘振华. 高频压电复合材料球形换能器仿真设计[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 425-428.