

声阻抗可调节超声匹配层研究

丁春雄¹, 蒋晓菡¹, 俞燕萍¹, 侯永琪², 张辉^{2*}, 郑凯¹

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210036; 2. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 超声阻抗匹配在无损检测和超声成像领域中有广泛应用, 提出了一种基于压电分流的声阻抗可调节超声匹配层, 它由带分流电路的压电盘组成, 匹配层的有效声阻抗可通过调节分流电路的参数实时控制。理论结果表明, 与传统的不可调超声匹配层相比, 声阻抗可调节超声匹配层能够实现1.5~20 MRayl的阻抗可调。数值计算与仿真分析也验证了该结构的阻抗匹配效果, 透射率均大于90%。并制作了声阻抗匹配结构测试样品, 实验验证了该结构的声阻抗匹配效果。

关键词: 超声阻抗匹配; 压电分流; 有效声阻抗

中图分类号: TH7

文献标识码: A

doi: 10.62756/csjs.1671-7449.2025081

引用格式: 丁春雄, 蒋晓菡, 俞燕萍, 等. 声阻抗可调节超声匹配层研究[J]. 测试技术学报, 2025, 39(5): 511-517.

DING Chunxiong, JIANG Xiaohan, YU Yanping, et al. Study of acoustic impedance tunable ultrasonic matching based on piezoelectric shunt [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(5): 511-517.

Study of Acoustic Impedance Tunable Ultrasonic Matching Based on Piezoelectric Shunt

DING Chunxiong¹, JIANG Xiaohan¹, YU Yanping¹, HOU Yongqi², ZHANG Hui^{2*}, ZHENG Kai¹

(1. Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Nanjing 210036, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Ultrasonic impedance matching has a wide range of applications in the fields of nondestructive testing and ultrasonic imaging. In this paper, a piezoelectric shunt-based acoustic impedance tunable ultrasonic matching layer is proposed, which consists of a piezoelectric disc with a shunt circuit, and the effective acoustic impedance of the matching layer can be controlled in real time by adjusting the parameters of the shunt circuit. The theoretical results show that the acoustic impedance adjustable ultrasonic matching layer is capable of adjusting the impedance in the range of 1.5~20 MRayl compared with the conventional non-adjustable ultrasonic matching layer. Numerical calculations and simulation analyses also verified the impedance matching effect of the structure, and the transmittance was greater than 90%. Test samples of the acoustic impedance matching

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3010300); 国家自然科学基金资助项目(52272433); 江苏省市场监督管理局技术项目(KJ2024024)

作者简介: 丁春雄(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事承压类特种设备检验检测、无损检测新技术及应用研究。E-mail: dingchunxiong@163.com。

* **通信作者:** 张辉(1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事复杂声场调控与声探测技术、多物理场无损检测新技术、信号智能处理与识别等研究。E-mail: seuzhanghui@seu.edu.cn。

structure were fabricated, and the acoustic impedance matching effect of the structure was experimentally verified.

Key words: ultrasonic impedance matching; piezoelectric shunt; effective acoustic impedance

0 引言

声阻抗匹配技术可以有效缓解声波在异质界面处的反射增强传输效率,被广泛应用于声学成像^[1-2]、无损检测^[3-4]和 underwater 通信^[5]等领域。超声检测中,压电陶瓷声阻抗是探测介质(如水、生物组织)的十倍以上,这种显著的阻抗失配致使大部分声波难以穿过界面进入探测介质,引发换能器信号失真和带宽变窄^[6]。1966年,Kossoff等^[7]使用四分之一波长匹配层来拓宽换能器带宽。1984年,陈锦灿等^[8]从理论和实验上验证了四分之一波长匹配结构的有效性。之后,在1989年,Kimura等^[9]验证了四分之一波长匹配结构的最优阻抗值为两侧介质阻抗乘积的平方根,至此,四分之一波长匹配的理论基础已经完善。随后,研究人员开始研究复合材料掺杂工艺以制作带宽更高、灵敏度更强的匹配层。例如,2004年,Wang等^[10]研究环氧树脂与二氧化硅填料混合物对匹配层声阻抗的影响,得到复合材料与匹配层声阻抗的关系;2008年,Wang等^[11]利用纳米级TiO₂、光刻胶SU-8以及钛酸锶粉末,成功制备出了可在1 GHz频率下实现硅和水之间的阻抗匹配的匹配层。

然而,单层四分之一波长匹配结构存在明显的局限性。其一,该结构实现声波全透射的条件十分苛刻,只有当匹配层厚度为波长的四分之一的奇数倍时才能达成。一旦偏离这一特定条件,声波透射率便会迅速降低,直接导致通带窗口变得极为狭窄。其二,该结构声阻抗调节能力不足。匹配层声阻抗固定,难以适应复杂环境下的阻抗动态波动问题。局限性一可通过增加四分之一波长匹配数目或者使用非均匀梯度匹配结构来解决^[12],虽然工业应用仍有不足,但目前已有较多的研究成果与理论基础。

本文主要探讨局限二,即匹配结构声阻抗调节能力不足问题。针对该问题,目前学术界的主流解决方法是材料属性调控^[13-14]与外部调控^[15-16]。前者主要通过改变匹配层掺杂介质体积比或者掺杂介质排列方式以实现等效声阻抗的可调节,问题在于无法动态调节并且调节范围很低,无法覆盖常用匹配介质(1.5~20 MRayl)。相比之下,后

者主要通过动态压力或者外部电路调节来实现匹配层的动态声阻抗可调谐。2019年,Liao等^[17]设计了一种基于压电结构的自适应匹配层,可实现极低频声阻抗匹配,可在112~236 Hz频率范围内对空气噪声实现90%以上的吸收率。2020年,Wu等^[18]设计了一个可调谐梯度阻抗匹配层,该结构可以实现20~80 kHz的超声阻抗匹配,进一步验证了利用压电材料实现声阻抗匹配的可能性。2021年,Gu等^[19]设计了一种双层压电匹配层,它由两个相同的膜型压电片和外部分流电路组成,通过调节电路参数可以实现吸声频率的可调。2023年,刘仕韬等^[20]提出了基于压电匹配层的吸声单元,可通过调节电路参数实现阻抗匹配频率从1 130 Hz移动到910 Hz。

综上所述,虽然目前声阻抗匹配结构已经取得许多成果与进展,但是在现代声学应用的要求下,声阻抗匹配结构依然存在需要解决的问题:1) 现有的可调匹配层主要依赖结构尺寸的物理调节,外部动态调节相关研究太少,并且其阻抗可调范围难以覆盖声学检测常规介质;2) 目前可调匹配层多验证于低频声学应用领域,如噪声处理与低频超声检测(40 kHz),随着生物医学领域如经颅超声检测的发展(颅骨作为稀疏介质,其声阻抗动态波动导致传统匹配层难以取得较好的穿透效果),迫切需要提高可调匹配层的适用频率。

本文研究了一种声阻抗可调节超声匹配层,它由带外部电路的压电盘组成,匹配层的有效声阻抗可通过控制电路元件进行调谐。通过理论与数值仿真分析得到该结构可以实现1.5~20 MRayl的阻抗可调,通过COMSOL进行数值仿真,验证了该结构的声阻抗可从3~6 MRayl动态调节,并且透射率均大于90%。此外,设计了外部电路板,并验证了电路设计的准确性。最后,制作了声阻抗匹配实验测试样品,验证了该结构的声阻抗匹配效果。

1 声阻抗可调节超声匹配层设计

1.1 匹配层等效声阻抗推导

图1展示了声阻抗可调节匹配层的具体结构。该匹配层由一个沿超声传输方向极化的压电盘和一

个外部分流电路组成。声阻抗可调节匹配层第 i 个单元的厚度和直径分别表示为 l 和 d 。压电盘可以等效为一个交流电源 V 和固有电容 C_p ^[21]。可调负电容电路由运算放大器(OA)、电阻器 R_1^i 、 R_2^i 、 R_3^i 和正电容 C_i^i 组成。根据文献[22], 第 i 个单元的有效弹性模量可以表示为

$$E_i = \frac{l(1 + sZ_{isc}C_p)}{lS_{33}^E(1 + sZ_{isc}C_p) - sZ_{isc}d_{33}^2A_p}, \quad (1)$$

式中: $Z_{isc}(\omega) = R_i + sL_i - 1/sC_i$ 为电路阻抗, 具体电路如图 1 所示。第 i 个压电圆盘的有效阻抗 $Z_i(\omega)$ 可表示为 $Z_i(\omega) = \sqrt{E_i(\omega)\rho}$, 其中, ρ 为压电盘的密度。

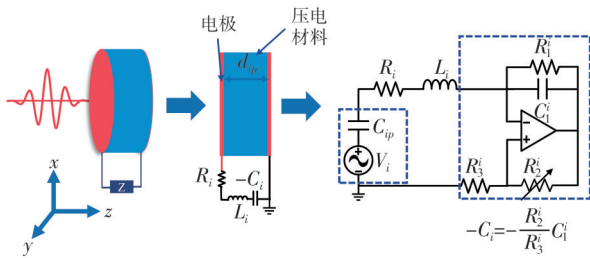


图 1 声阻抗可调节的超声匹配层与压电分流电路

Fig. 1 Ultrasonic matching layer with adjustable acoustic impedance and piezoelectric shunt circuit

1.2 多层介质声传输模型

多层介质超声传输模型如图 2 所示。假设平面波垂直入射且声波主要以纵波形式传播。模型中匹配层的厚度远小于波长, 可以将单个压电匹配层视为均匀的^[23]。平面波通过多层系统的传输矩阵由式(2)给出。

$$\begin{pmatrix} P_{p1} \\ v_{p1} \end{pmatrix} = \prod_{i=0}^n \begin{bmatrix} \cos \theta_i & jZ_i(\omega) \sin \theta_i \\ \frac{j}{Z_i(\omega)} \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_{nM} \\ v_{nM} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_{nM} \\ v_{nM} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: P_{p1} 和 v_{p1} 为图 2 边界 AB 的声压与声速; P_{nM} 和 v_{nM} 为介质 2 的声压与声速; $\theta_i = k_i l$, k_i 为第 i 层匹配层波数, $k_i = \omega \sqrt{\rho} / \sqrt{E_i}$ 。由于目标介质的厚度远大于波长, 因此, 匹配层和目标介质整体的等效声阻抗 Z_{eq} 可由式(3)求得。

$$Z_{eq} = \frac{T_{11}Z_M + T_{12}}{T_{21}Z_M + T_{22}}, \quad (3)$$

式中: Z_M 为介质 2 声阻抗。当入射波沿 z 方向在介质中传播时, AB 界面处的反射系数和透射系数可表

示为

$$R = \left| \frac{1 - Z_{eq}^*}{1 + Z_{eq}^*} \right|^2, \quad (4)$$

$$T = 1 - R, \quad (5)$$

式中: 归一化的复有效阻抗 Z_{eq}^* 定义为 Z_{eq}/Z_p , 其中, Z_p 为介质 1 声阻抗。

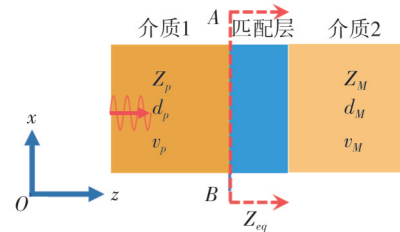


图 2 多层介质声传输模型

Fig. 2 Modeling of acoustic transport in multilayer media

2 数值计算与仿真结果

2.1 匹配层可调性分析

本文使用的压电材料几何形状和材料参数详见表 1, 其中, S_{33}^E 、 d_{33} 、 ϵ_{r33}^T 分别为应力与相应应变之间的弹性柔顺系数、压电常数和介电常数, ρ 为材料密度。压电盘的厚度为 2 mm, 直径为 6 mm。图 3(a)~(c)展示了单个超声匹配层的可调性与分流电路参数的关系, 其中, 负电容比 $\lambda = -C/C_p$ 。图 3(a) 中, 电阻 R 与电感 L 分别为 1Ω 和 $1 \mu\text{H}$, 说明了声阻抗对频率和负电容比的依赖性。当 λ 趋向于 -1 时, 阻抗的实部约为 1.5 MRayl , 此时 $|-C|$ 近似等于 C_p 。

表 1 可匹配层几何形状和材料参数

Tab. 1 Matching layer geometry and material parameters				
参数	$S_{33}^E / (10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1})$	$d_{33} / (10^{-12} \text{ C} \cdot \text{N}^{-1})$	ϵ_{r33}^T	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
数值	16.8	320	1 630	7 500

相反, 当 λ 接近 -3 时, $|-C|$ 远超过 C_p , 阻抗的实部接近 20 MRayl 。从图 3(a) 还可以看出在该条件下, 有效阻抗的频率相关性几乎可以忽略不计, 即等效声阻抗不随频率改变而发生较大改变, 并且损耗阻抗(虚部 Y)几乎为零。图 3(b) 中, 电感 L 与负电容比 λ 分别为 $1 \mu\text{H}$ 与 -1.5 。随着电阻增加, 阻抗虚部 Y (损失阻抗) 显著增加, 这表明高频时, 电路的电阻对声波传输起到阻碍作用。图 3(c) 中, 电阻 R 与负电容比 λ 分别为 1Ω 与 -1.5 。随着频率的增加, 在高电感时, 阻抗实部发生急剧的降低且虚部

增加。这是由于随着电感增加,电路谐振频率会降低,从而导致压电盘在谐振频率处出现负弹性模量(损失模量)。图3(d)展示了在1 MHz时, $\lambda = -1.5$,

电感的变化对阻抗的影响,可以看出随着频率的增加,在高电感时,阻抗实部发生急剧的降低且虚部增加,这与图3(c)吻合。

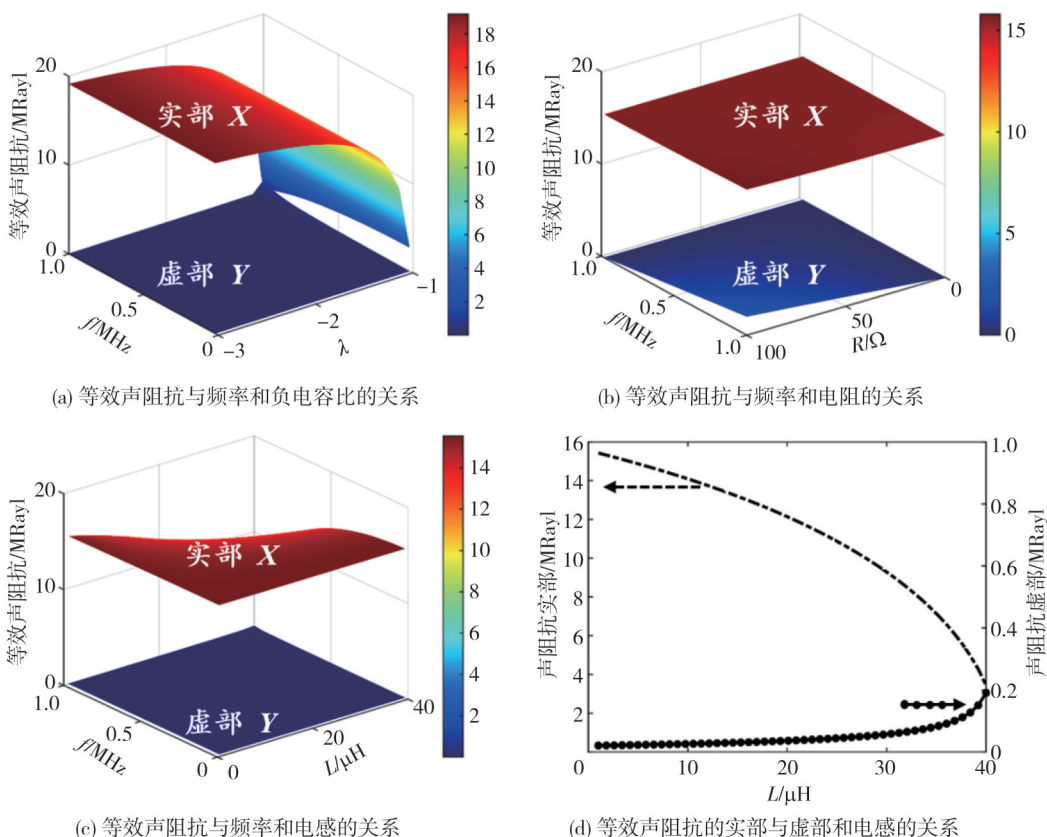


图3 等效声阻抗与不同参数的关系

Fig. 3 Effective acoustic impedance with different parameters

2.2 匹配层可调性验证

为验证所提超声匹配层可调性的应用性能,通过理论与数值仿真模拟进行验证。基于COMSOL的数值仿真模型如图4所示。

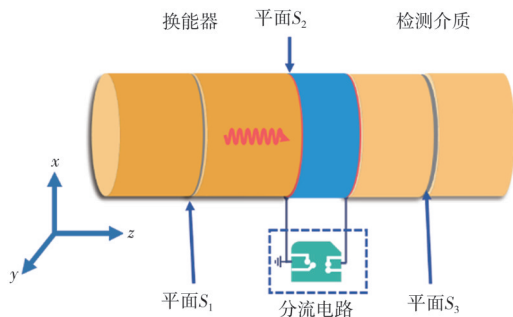
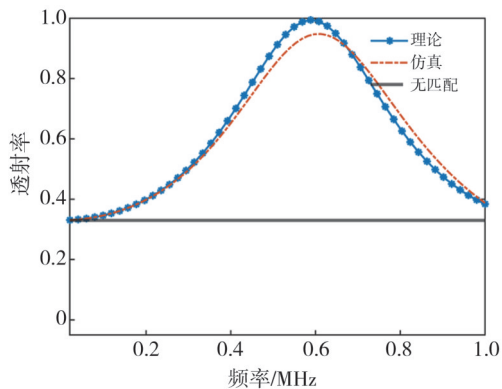


图4 数值仿真模型

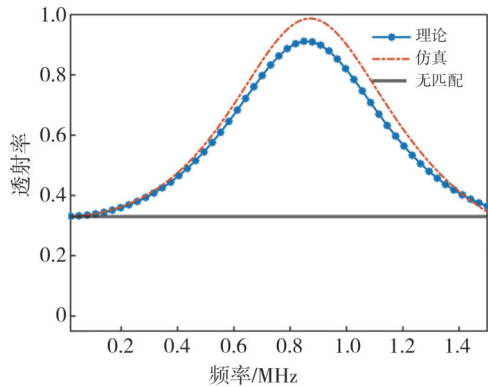
Fig. 4 Numerical simulation model

检测目标的声阻抗为3 MRayl,换能器阻抗为30 MRayl。使用可调压电超声匹配层进行阻抗匹配,所需的最优匹配层(假设为1层)的阻抗约为

9.48 MRayl。根据式(2)计算得到 λ 为 -1.09 。MATLAB理论计算与COMSOL数值仿真得到的超声能量透射谱如图5(a)所示。显然,当没有匹配层时,超声能量透射率约为0.33,添加可调匹配层后,透射率明显提升。同理,假设检测目标的声阻抗为6 MRayl,那么所需的最优匹配层(假设为1层)的阻抗约为13.4 MRayl。根据式(2)计算得到 λ 为 -1.25 。超声能量透射谱如图4(b)所示。



(a) 检测目标声阻抗为3 MRayl时($\lambda = -1.09$)



(b) 检测目标声阻抗为6 MRayl时($\lambda=-1.25$)

图 5 不同检测目标声阻抗的能量透射谱

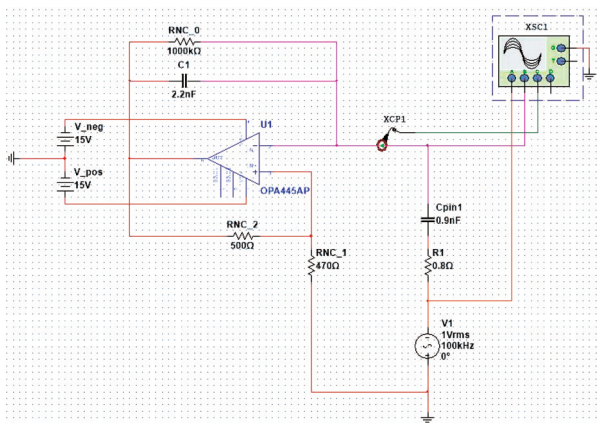
Fig. 5 Transmittance at different target acoustic impedance

在对声阻抗不同的介质进行超声无损检测时, 如果想保证能量的高透射(即中心频率处透射率最大), 需要更换具备不同匹配层的超声探头。

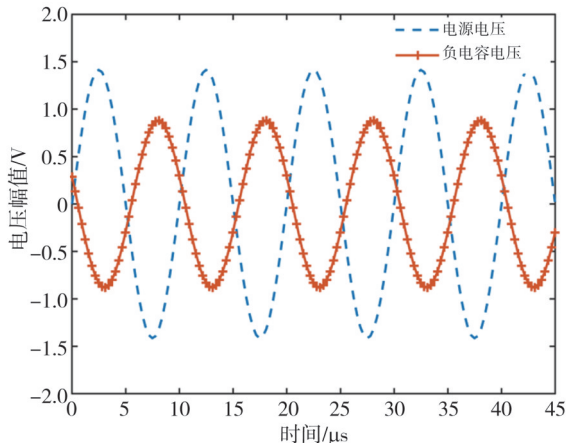
3 实验测试

3.1 分流电路设计

为了验证电路的准确性, 使用 Multisim 软件对电路进行模拟仿真, 模拟电路如图 6(a) 所示。其中, 压电片的等效电路模型包括交流电压源“V1”和电容“Cpin1”。模拟电路中的“C1”为负电容电路中的电容 C_i 。压电片的等效电路模型包括交流电压源“V1”和电容“Cpin1”。模拟电路中的“C1”为负电容电路中的电容。电路中的“RNC_0”为负电容电路中的“ R_i ”, 该大电阻成类似高通滤波器功能, 以此防止由运放产生的偏置电流给电容充电, 使之直接流向接地, 并且消除了补偿电压对电路的影响。运算放大器由 ± 15 V 直流电源供电。示波器“XSC1”测量压电片产生电压以及负电容两端电压, 具体示波器的结果如图 6(b) 所示。



(a) 负电容模拟电路



(b) 电源电压与负电容电压模拟结果

图 6 负电容模拟电路与模拟结果

Fig. 6 Negative capacitance simulation circuit and simulation results

根据电路理论可知, 电源电压相位应该与负电容相位相差 180° , 同理电源电压相位与正电容同相位^[21-22]。图 6(b) 为示波器所示电源与负电容电路两端电压。可以看出当电路中输入电压源为 100 kHz 的 1 V 交流电压, 内置电容为 0.9 nF 时, 负电容值为 $2.2 \times 500 / 470$ nF, 大于内置电容, 满足稳定性条件。根据图 6(b) 可知电源与负电容两端电压相位相差几乎 180° , 证明电路设计正确。

3.2 阻抗匹配效果测试

在理论和模拟部分, 声源和目标介质的阻抗分别为 30 MRayl 和 3 MRayl。因此, 实验选择了性能相似的不锈钢和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)来实现声信号的产生和接收, 使用超薄环氧树脂粘合剂在不锈钢和 PMMA 的侧面粘贴了两个高灵敏度的 PZT-5 压电传感器, 样品由激发器、SS、匹配层、PMMA 和接收器组成。图 7(a) 为制备的实验样品。

图 7(b) 为实验设备图, 其中包括超声信号发生接收器(JPR-600C)、Tektronix 高功率可编程电源、外部电路、波形显示(戴尔)。激励信号为中心频率 130 kHz 与 200 kHz 的短电脉冲激励, 接收信号采样率满足奈奎斯特定律。直流电源给外部电路中的放大器供给 ± 15 V 的电源。JPR-600C 的接收设置中, 信号增益调至 0 以接收原始波形。图 7(c) 所示波形为测量数据导出后在 MATLAB 中绘制。实验环境为室内正常环境。

接收器测量到的信号如图 7(c) 与 7(d) 所示, 7(c) 对应激励信号中心频率 130 kHz, 7(d) 对应信号中心频率 200 kHz。其中, 无匹配时对应

的为上方横坐标,有匹配时对应的为下方横坐标。从图中可以看出,与无匹配层的样品相比,带匹配层的样品信号传播时间增加,这是由于匹配层的存在增加了传输距离。

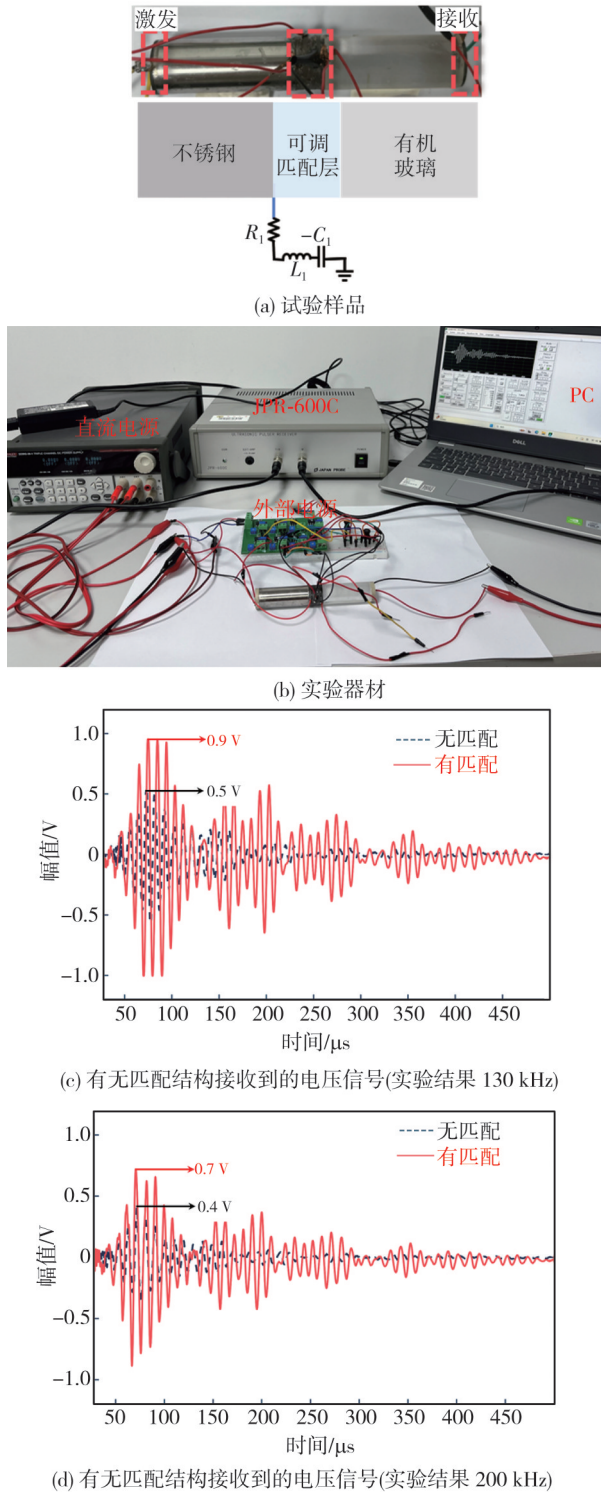


图7 试验材料与电压信号

Fig. 7 Test materials and voltage signals

从图7(c)与(d)可以看出,接收传感器感应到的信号振幅明显大于未集成匹配层的信号振

幅,表明当添加匹配层时,更多的声波可以穿过阻抗失配界面。这与图5中的仿真结果吻合,即该匹配结构可以有效提高声波跨介质传输效果。此外,在同样的样品与环境条件下,接收器在激励信号为200 kHz时接收到的信号明显弱于激励信号为130 kHz时接收到的信号,这可能是由于高频激励信号带来更多的传输损失的缘故。

目前学术界已发表的关于使用压电材料进行可调超声匹配层研究的是2020年,Wu等^[18]设计的可调谐梯度匹配层,该结构同样利用压电材料的动态可调性实现了40 kHz与80 kHz频率下的超声匹配,证实了压电材料不仅可用于低频声波匹配,为高频可调声阻抗匹配研究做出了贡献。客观地分析,Wu等的研究尚缺少对压电材料声能损耗的详细分析,而这对高频压电匹配层性能评价至关重要;此外,该研究局限于100 kHz以下,这可能是由于高频率下带来的压电损耗阻碍了研究进展。本文对压电材料的高频损耗进行了详细的研究,针对高频电路中的电阻、电感、电容展开了详细的参数化研究,通过合理的参数组合避免高频损耗,制作了可用于100 kHz以上且阻抗可调范围横跨1.5~20 MRayl的高频可调匹配层。

4 结论

本文设计了一种可调声阻抗超声匹配层,并研究了其阻抗可调节性和声传输效果。根据压电方程得到压电盘的等效阻抗表达式,分析了电路参数对等效声阻抗的调节机制,实现了1.5~20 MRayl的等效声阻抗调节。与传统匹配层相比,该结构可以同时适用于1.5~20 MRayl的大范围声阻抗匹配。设计了压电分流电路板,并通过仿真验证了电路设计的准确性。最后,制作了声阻抗匹配实验测试样品,并验证了该结构的声阻抗匹配效果。该方法促进可调超声学匹配层的研究,并为工业应用提供具有宽可调范围的超声匹配层。

参考文献:

- [1] 卞加聪,王艳,刘振君,等. 高频声呐换能器梯度匹配层声学特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 153-158.
- BIAN Jiacong, WANG Yan, LIU Zhenjun, et al. Acoustic characteristics of gradient matching layer of high frequency sonar transducer[J]. Journal of Vibra-

- tion and Shock, 2022, 41(7): 153-158. (in Chinese)
- [2] 李政. 宽带压电超声换能器声阻抗匹配材料的研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [3] 陈秀明, 林莉, 李喜孟, 等. 超声干涉法薄层厚度测量声阻抗匹配判据及其应用[J]. 航空材料学报, 2009, 29(1): 87-91.
CHEN Xiuming, LIN Li, LI Ximeng, et al. Acoustic impedance matching criteria and their applications for layer thickness measurement by ultrasonic interferometry[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(1): 87-91. (in Chinese)
- [4] 张浩, 赵旭, 曾涛. 材料表面缺陷检测用空气耦合超声换能器的研制[J]. 无损检测, 2022, 44(1): 60-62.
ZHANG Hao, ZHAO Xu, ZENG Tao. Development of air-coupled ultrasonic transducer for material surface defect detection[J]. Nondestructive Testing Technology, 2022, 44(1): 60-62. (in Chinese)
- [5] BIAN J, WANG Y, LIU Z, et al. Ultra-wideband underwater acoustic transducer with a gradient impedance matching layer[J]. Applied Acoustics, 2021, 175: 107789.
- [6] 朱棵. 基于声阻抗梯度匹配层的宽带高灵敏度超声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [7] KOSSOFF G. The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966, 13(1): 20-30.
- [8] 陈锦灿, 夏丽君, 董其瑾. 具有 $1/4$ 波长匹配层的超声换能器频率特性[J]. 无损检测, 1984, 6(3): 1-4.
CHEN Jincan, XIA Lijun, DONG Qijin. Frequency characteristics of ultrasonic transducer with $1/4 \lambda$ matching layer[J]. Nondestructive Testing Technology, 1984, 6(3): 1-4. (in Chinese)
- [9] KIMURA K, 宫继祥. 采用声阻抗匹配技术的宽带聚合物超声换能器[J]. 声学与电子工程, 1989(1): 41-46.
KIMURA K, GONG Jixiang. Broadband polymer ultrasonic transducer using acoustic impedance matching technology[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 1989(1): 41-46. (in Chinese)
- [10] WANG H, CAO W, ZHOU Q F, et al. Silicon oxide colloidal/polymer nanocomposite films[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(24): 5998-6000.
- [11] WANG S X, CARLIER J, NDIEGUENE A, et al. Stiffness controlled SU-8-based nanocomposites: application for 1 GHz matching layer conception[C]// 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, 2008: 678-681.
- [12] 朱棵. 超声波换能器声阻抗梯度匹配层理论与方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] DONG E, SONG Z, ZHANG Y, et al. Bioinspired metagel with broadband tunable impedance matching[J]. Science Advances, 2020, 6(44): 3641.
- [14] ZHANG J, ZHOU N, DONG E, et al. Soft bio-metamaterials with high acoustic transparency and gradient refractive index for tunable acoustic beamformer[J]. Matter, 2024, 7(11): 3857-3875.
- [15] YAW Z, ZHOU W, LIM C W. Anomalous wave control by an adaptive elastic metasurface shunted with negative capacitance circuit[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 525: 116782.
- [16] WONG C M, CHAN S F, WU W C, et al. Tunable high acoustic impedance alumina epoxy composite matching for high frequency ultrasound transducer[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106506.
- [17] LIAO Y, ZHOU X, CHEN Y, et al. Adaptive metamaterials for broadband sound absorption at low frequencies[J]. Smart Materials Structures, 2019, 28(2): 025005.
- [18] WU J, YANG Y, JIA H, et al. A tunable gradient impedance matching layer based on piezoelectric materials with external circuits[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(6): 064502.
- [19] GU L, ZHAO C, WANG K, et al. Asymmetric sound absorption achieved by double-layer piezoelectric metamaterials with tunable shunt circuit[J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(13): 131903.
- [20] 刘仕韬, 胡晓磊, 谷立敏, 等. 用于变频噪声吸收的压电声学超材料[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(2): 272-277.
LIU Shitao, HU Xiaolei, GU Limin, et al. Piezoelectric acoustic metamaterials for the absorption of frequency-tunable noises[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(2): 272-277. (in Chinese)
- [21] 赵晨雪. 负电容压电分支阻尼振动控制方法及在空间科学实验平台中的应用研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [22] 陈良. 压电分流声子晶体的带隙拓宽方法与减振特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [23] HILL R, EL-DARDIRY S M. A theory for optimization in the use of acoustic emission transducers[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1980, 67(2): 673-682.