光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023091201

基于 Leach 模型的空气耦合超声换能器声阻抗匹配特性研究

崔亚敏[1,2*]，周进节[1,2]，白嘉琪[1,2]，崔业婷[3]，王学敏[1,2]

（1. 中北大学 机械工程学院，太原 030051；2. 恶劣环境下智能装备技术山西省重点实验室，太原 030051；
3. 国网阳泉供电公司，山西 阳泉 045000）

摘　要： 压电陶瓷与空气之间的声阻抗差异巨大，导致声波在固-气介质间的能量传输效率低，研究匹配层特性对提升换能器能量传输效率具有重要意义。文章通过 Leach 模型仿真，研究了空气耦合超声换能器阻抗与瞬态响应，并搭建实验平台进行测试验证。仿真和实验结果表明，增加一层匹配层可将接收信号幅值增大约 280%，增加两层匹配层可将接收信号幅值增大约 363%。通过采用经声阻抗匹配后的换能器对碳纤维板缺陷进行检测，能明显检测出深度为 0.5 mm、直径为 1 mm 凹槽缺陷的变化，验证了通过等效电路模型研究换能器匹配特性方法的有效性。

关键词： PSpice；空气耦合；换能器；电路设计；仿真

中图分类号： TP2　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0851－06

Research on Characterization of Acoustic Impedance Matching of Air-Coupled Ultrasonic Transducers Based on the Leach Model

CUI Yamin[1,2], ZHOU Jinjie[1,2], BAI Jiaqi[1,2], CUI Yeting[3], WANG Xuemin[1,2]

(1. School of Mechanical, North University of China, Taiyuan 030051, CHN;
2. Unit Two Shanxi Key Laboratory of Intelligent Equipment Technology in Harsh Environment, Taiyuan 030051, CHN;
3. Guowang Yangquan Power Supply Company, Yangquan 045000, CHN)

Abstract: The acoustic impedance difference between air-coupled ultrasonic transducers is huge, resulting in low energy transfer efficiency between air-solid medium. Therefore, studying the characteristics of the matching layer of the transducer is of great significance to improve the sensitivity of the transducer to defects. By simulation through Leach, the impedance and transient response of the transducer were studied, and the acoustic impedance matching characteristics of the air-coupled ultrasonic transducer was analyzed. An air-coupled ultrasonic experimental platform was built to verify the simulation results. Experimental and simulation results show that, firstly, the Leach model can accurately describe the behavior of the air-coupled ultrasonic transducer. After matching the acoustic impedance of the transducer, reflections and interference occur in the presence of the matching layer, resulting in a second resonance phenomenon in the impedance. Secondly, the matching layer designed in this paper can increase the amplitude of the ultrasonic signal and improve the detection accuracy of the ultrasonic signal. Finally, the small defects that can not be identified by the unimpedance matching transducer were detected, and the practicality of the acoustic impedance matching transducer in detecting small

收稿日期：2023－09－12.

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3005002,2016YFF0203003)；国家自然科学基金项目(62071433).

* **通信作者：**崔亚敏　**E-mail：**885545247@qq.com

defects in composite plates is verified.

Key words: PSpice; air coupling; converter; circuit design; simulation

0 引言

复合材料在航空航天、汽车工业等领域得到广泛应用。复材结构在使用过程中会受到外部冲击、拉压力或复杂载荷的作用,导致其内部产生各种缺陷,需要定期对其进行损伤检测,以保障复合材料部件或设备的安全运行[1]。超声检测是目前最适合复合材料缺陷检测的无损检测技术之一,具有高灵敏度、高精度、低成本、重复性好等优势。传统的超声检测需要采用水、油等液体作为耦合剂[2],会导致复合材料内部渗进耦合剂,影响复合材料构件的力学性能。此外,传统的超声检测对耦合条件要求也较为苛刻,如在飞机机身蒙皮、大型风力机叶片检测等场合,采用水耦合检测方式不仅成本高,而且操作困难。因此,采用空气作为耦合剂对复合材料进行超声检测具有巨大的潜在优势[3]。

在空气耦合超声检测过程中,换能器激发的超声波透过固-气界面进入空气,再透过气-固界面进入接收换能器。由于空气与换能器之间声阻抗差异巨大,使得固-气界面声波透射率极低、检测信号微弱,因此,研究空气耦合超声换能器的声阻抗匹配特性以减小界面损失,对提高换能器的性能具有重要意义。

针对压电换能器的声阻抗匹配研究,等效电路法是行之有效的一种方法。换能器的经典模型由Mason[4]提出,该模型将压电材料分离成一个电端口和两个声端口,由此绘制出了一个6端口网络形式的机电等效电路。在此基础上,Redwood[5]引入传输线模型来求解换能器的瞬态响应。Krimholtz等[6]提出了一种将变压器连接到输电线路中的等效模型,该模型适用于多层结构的模拟。为了在电路分析软件中实现等效电路模型,Morris等[7]采用Redwood[5]提出的模型在电路分析软件中实现等效电路模型,验证了该方法可有效模拟换能器的电匹配、声匹配、传输特性、带宽、阻抗图和瞬态响应。Leach[8]提出了一种新型的等效电路模型,使用控制源和无损传输线来描述厚度方向振动的压电陶瓷晶片。Guisado等[9]通过PSpice软件验证了Leach等效电路模型能准确模拟压电晶片特性。Puttmer等[10]在SPICE中建立了多匹配层压电换能器的Leach等效电路模型,利用仿真分析了换能器的时域和频域特性,并进行了实验验证。Van等[11]采用Puttmer的方法,研究了固体和液体中声速变化规律和衰减特性。魏晓媛等[12]应用Leach模型,对包括发射压电超声换能器、待检铝圆柱体、接收压电换能器的透射检测模型进行了声阻抗和瞬态特性分析。沈志天等[13]应用Leach模型,研究了不同频率、不同电缆长度对换能器阻抗值的影响。郑丹丹等[14]应用Leach模型建立了基于脉冲回波法的发射检测模型,并通过实验验证了仿真结果的可靠性。以上研究均是针对换能器与液体耦合剂进行的建模与仿真分析。

由于固-气界面声阻抗差异远大于固-液界面,空气耦合超声换能器的压电晶片需采用多层匹配层以实现与空气的声阻抗匹配,而目前尚未有针对空耦换能器等效电路模型的系统研究。综上所述,本文采用Leach模型和传输线理论建立空耦换能器的等效电路模型,通过PSpice仿真软件模拟空耦换能器的阻抗与瞬态响应,并搭建实验平台进行测试验证。然后采用优化后的换能器对深度为0.5 mm、直径为1 mm的碳纤维板缺陷进行检测,验证该模型用于研究换能器匹配特性的有效性。

1 基本理论

1.1 Leach模型

与以往使用变压器作为电路元件来建模电气、机械和声学系统之间的耦合方式不同,Leach模型采用可控的电压和电流源来建立压电材料模型。通过比较压电材料中声波的波动方程和传输线方程,建立了压电超声换能器的可控源等效模型。压电换能器的Leach模型[8]如图1所示。其中端口E用于连接激励换能器的电源信号,端口B用于连接背衬层,端口F用于连接匹配层。

Leach模型中的所有参数都是从换能器的材料特性中得出的。以下是模型所需的参数:

$$f=\frac{c}{2d} \tag{1}$$

$$C_0=\frac{\varepsilon^S A}{d} \tag{2}$$

$$h=\frac{e_{33}}{\varepsilon^S} \tag{3}$$

其中，d 表示压电换能器中压电材料的厚度，c 表示压电材料的声速，f 表示传感器中心频率，C_0 表示静态电容，ε^S 是相对钳位介电常数，A 表示压电材料在垂直于声波传播方向上的截面积，h 表示压电常数，e_{33} 表示短路弹性常数，R_1 和 C_1 表示积分器，分别为 1 kΩ 和 1 F。通过比较波在电传输线和声介质的传播方程，T_1 模拟有损传输线。

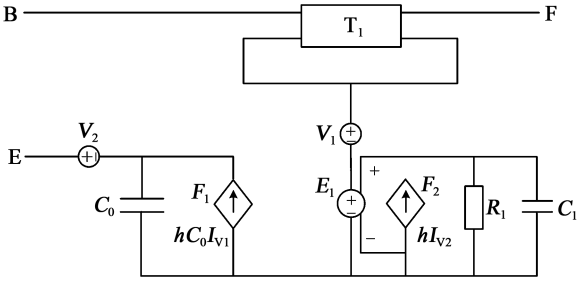


图 1　Leach 受控源模型

1.2　传输线理论

通过传输线理论[15]来比较传输线电线路和声学介质中的波传播情况，利用获取的压电超声换能器参数，获得传输线的各个参数。基于传输线理论，选择阻抗类比关系，将电压和电流视为机械系统中的力和速度，系统之间的等效性表示为：

$$Z_{el} \cong Z_a A = A\rho v_t \tag{4}$$

其中，ρ 表示压电材料的密度。通过式(4)得到传输线的电感和电容表达式：

$$L = A\rho \tag{5}$$

$$C = \frac{1}{A\rho v_t^2} \tag{6}$$

衰减常数表示为：

$$\alpha = \frac{1}{2}\sqrt{LC}\left(\frac{R}{L}\right) + \frac{1}{2}\sqrt{LC}\left(\frac{G}{C}\right) \tag{7}$$

对于方程(7)，声学衰减的经典理论关系如下：

$$\alpha_{classical} = \alpha_v + \alpha_{tc} \tag{8}$$

其中，$\alpha_{classical}$ 表示声衰减，α_v 表示粘性引起的衰减常数，α_{tc} 是热传导引起的衰减因数。

根据方程(5)～(7)，可以导出以下表达式：

$$R = 2\rho v_t A a_v \tag{9}$$

$$G = \frac{2a_{tc}}{\rho v_t A} \tag{10}$$

空气耦合超声换能器中使用的材料具有较低的热导率，由热导率引起的损耗可以忽略不计，所以电导值为零，式(7)可变为：

$$\alpha = a_v = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{w}{w}\frac{R}{2}\frac{1}{Lv_t} = \frac{w}{2v_t}\tan\delta_m \tag{11}$$

其中，$\tan\delta_m$ 是机械损耗因子。

所以式(9)可以改写为：

$$R = Lw\tan\delta_m \tag{12}$$

由上可知，有损传输线的参数为：

$$\begin{aligned} L &= A\rho \\ C &= \frac{1}{A\rho v_t^2} \\ R &= Lw\tan\delta_m \\ G &= 0 \end{aligned} \tag{13}$$

2　等效电路仿真

空耦换能器结构如图 2 所示，主要组成部分包括匹配层、压电晶片和粘接层。其中，匹配层用于调整超声波与压电晶片之间的阻抗匹配，提高能量传输效率。压电晶片用于将电能转换为超声波能量或将超声波能量转换为电能，是换能器的核心部件。为了简化分析，在模型中忽略粘接层，重点分析两层匹配层产生的影响。根据表 1 提供的参数可以看出，这种简化模型仍然能够提供关于换能器性能的重要信息。

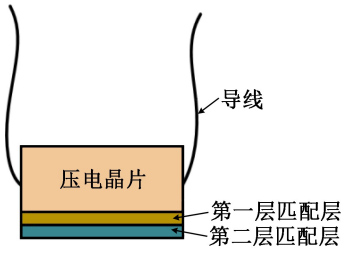


图 2　超声换能器

表 1　换能器参数

参数	PZT-5H	匹配层 1	匹配层 2
$\rho/(kg/m^3)$	5 501.81	625.35	67.13
A/m^2	2.66×10^{-4}	2.8×10^{-4}	2.8×10^{-4}
$c/(m/s)$	3 521	2 186	738
l/m	7.6×10^{-3}	1.72×10^{-3}	0.93×10^{-3}
$h_{33}/(V/m)$	18.0×10^8	\	\
$\tan\delta_m$	0.004	\	\

为了验证上述理论等效模型，在实验中设计并制作了 200 kHz 频率的换能器。使用 PSpice 软件[16]建立了该换能器的等效电路模型，如图 3 所示。等效电路模型由压电材料和匹配层组成，压电材料由 T_1 和受控源模型(E_1，F_1，F_2)组成，用来模拟压电材料的压电特性。匹配层由 T_2，T_3 组成，用来模拟匹配层材料的声学特性。

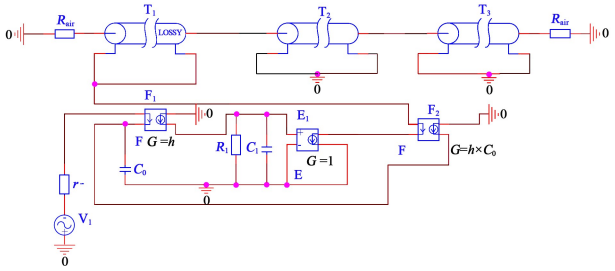


图 3 使用 PSpice 软件绘制的等效电路仿真图

3 实验系统搭建

测量阻抗装置如图 4 所示，主要由上位机、阻抗分析仪、换能器组成。扫查频率选用 150～300 kHz，激发电压选择 1 V。测量时将装有压电晶片的测试夹具或连接换能器的测试电缆与 UC710 仪器前面板的 H_{cur}，H_{pot}，L_{cur}，L_{pot} 四个测试端连接，通过上位机调试参数后开始扫描。

超声换能器时域测量装置如图 5 所示，主要由上位机、空气耦合超声探伤仪、换能器、支撑架组成。激励探头、接收探头相对放置，两个换能器放置距离 100 mm 采用一激一收的方式检测信号，实验时将换能器固定到支撑架上，保证激励、接收换能器检测的稳定性及准确性。

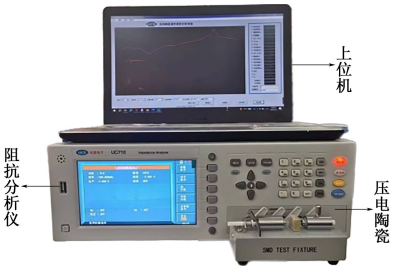


图 4 阻抗分析仪测量阻抗装置

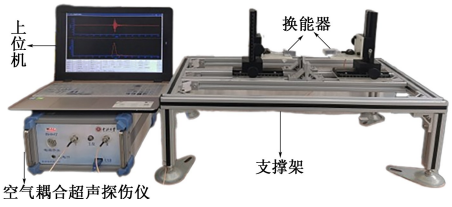


图 5 实验装置

4 结果与讨论

4.1 阻抗分析

阻抗分析对研究换能器的频率响应及其谐振和反谐振特性非常重要。通过测量和分析换能器的阻抗，可了解其在不同频率下的工作状态，获得与谐振和反谐振相关的重要参数，有助于进一步设计和优化换能器。换能器的阻抗分析实验和仿真对比结果如图 6 所示，通过分析，可以确定换能器的谐振和反谐振频率是换能器在响应电信号时表现出的共振和抗振特性，测量和模拟得到的谐振频率 f_s 和反谐振频率 f_p 见表 2。

由图 6 可知，实验和仿真阻抗测量曲线都出现了二次谐振现象，这是由于匹配层的存在导致空气耦合压电超声换能器声阻抗匹配和机械耦合性质发生变化，且匹配层的厚度和声波速度的特性与压电晶片和负载介质不同，导致匹配层的存在会导致反射和干涉，最终形成第二谐振频率。这些额外的共振频率可以实现声阻抗的匹配，提高能量传递效率。而且匹配层对压电晶片和负载介质之间的机械耦合也起着重要作用。

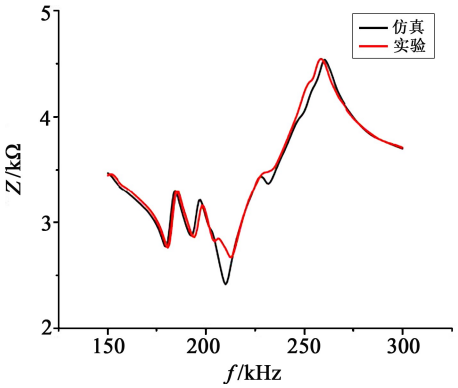


图 6 超声换能器频率-阻抗关系

表 2 超声换能器的测量和仿真谐振频率及反谐振频率

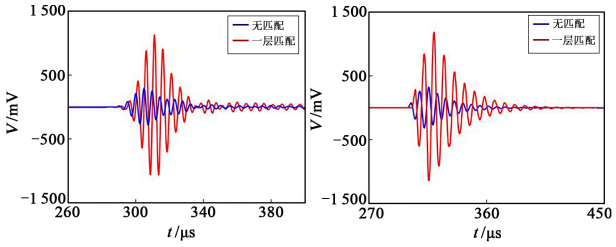
参数	仿真	实验测量
f_s/kHz	210	213
f_p/kHz	260.25	258

4.2 瞬态分析

为了研究空气耦合超声换能器的时域滤波和频率响应特性，使用空气耦合超声探伤仪在激发换能器中加载 3 周期的高压脉冲进行激励，并对接收换能器中的检测信号进行采集，实验系统如图 5 所示。通过对比实验信号的分析结果，可以了解换能器在时域上的滤波效果和信号传输性能，有助于评估和优化空气耦合超声换能器的性能，并在实际应用中提供准确的信号检测和分析能力。

测量结果如图 7 所示。当不加匹配层时，测量结果显示实验信号幅值为 312 mV，仿真结果为 308 mV。当加上第一层匹配层后，实验测量的最大幅值达到了 1 187 mV，仿真结果为 1 156 mV。实验和仿真结果表明，添加第一层匹配层后，压电超声换能器的实验和仿真信号幅值分别增大了 875 和 848 mV，表明

第一层匹配层对换能器性能的影响是非常显著的。这是因为当在空耦换能器加上第一匹配层后，换能器的输出阻抗大幅减少，空耦换能器与空气的声阻抗差距减小，产生的超声波有效地从压电晶片传输到空气中，提高了声波在气-固介质间的能量传输效率，从而使得超声信号幅值增大。

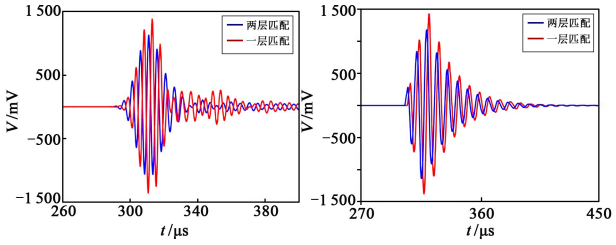


(a) 实验　　(b) 仿真

图 7　加一层匹配层后换能器模拟和测量结果

根据换能器之间的距离为 100 mm 和空气中的声速(在标准条件下，通常为 343 m/s)，可以计算出从发送信号到接收信号所需的时间。基于理想条件下的声速和距离，当时间到达约 291 μs 时，换能器开始接收激发信号。仿真过程中，设置空气中的延迟距离为 100 mm，符合实际情况，验证了仿真结果的准确性。

第二层匹配层对压电超声换能器性能影响的结果如图 8 所示。实验中，当压电超声换能器采用两层匹配层时，实验测量的最大幅值为 1 445 mV，仿真结果的最大幅值为 1 487 mV。相比采用一层匹配层，采用两层匹配层后的实验和仿真信号分别增大了 258 和 331 mV。这是因为当空耦换能器加上第二层匹配层后，压电超声换能器的输出阻抗值与空气声阻抗值的差距更小，声波在气-固界面间的能量传输效率更高，检测到的信号幅值也就更大。



(a) 实验　　(b) 仿真

图 8　加两层匹配层后换能器模拟和测量结果

根据图 7 和图 8 的结果，可以明显观察到第一层匹配层对换能器信号幅值的影响大于第二层匹配层的影响。这是因为具有一层匹配层的换能器输出阻抗值已经相对匹配了空气声阻抗，因此只需要对第二层匹配层进一步优化，而无需大幅度的调整。这样的结果具有重要意义，在今后设计空气耦合超声换能器时，可以将更多的精力集中在设计第一层匹配层上，确保其与空气介质的声阻抗较为接近。这样可以在一定程度上简化设计过程，节约时间和资源。

4.3　应用研究

经过声阻抗匹配后的空气耦合超声换能器对碳纤维板进行缺陷检测实验，装置图如图 9 所示，在图 5 的实验基础上，将碳纤维板置于两换能器的中心轴线上，垂直于传感器放置，调整换能器位置，使其分别检测碳纤维板的位置 1 和 2，其中位置 1 无缺陷，位置 2 存在深度为 0.5 mm、直径为 1 mm 的凹槽缺陷。

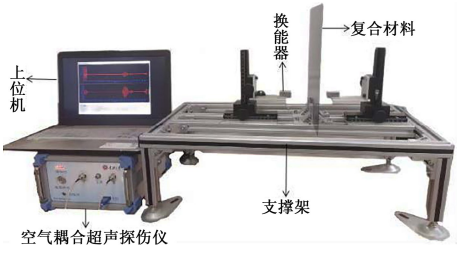


图 9　实验装置图

分析图 7 得出，当换能器未进行声阻抗匹配时，只有少部分的能量可透过空气进入复合材料，导致空气耦合超声探伤仪接收到的信号较为微弱，难以实现对缺陷的有效检测。当换能器进行声阻抗匹配后，对碳纤维板的检测结果如图 10，在位置 1 处的检测信号幅值为 261 mV，位置 2 处检测信号幅值为 52 mV。说明信号经过缺陷位置时，部分能量被反射，导致透射信号幅值降低，通过对比有、无缺陷位置检测信号幅值的大小可判断出在位置 2 处存在缺陷，从而实现对缺陷的检测。

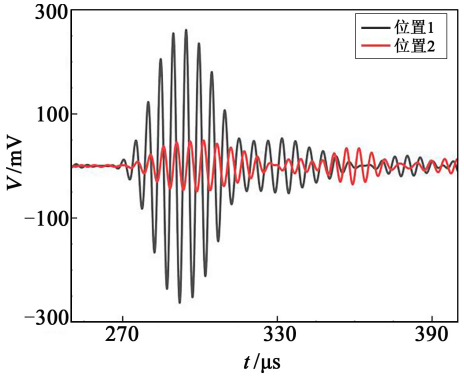


图 10　对碳纤维板检测信号图

5 结论

本文使用 PSpice 搭建了空气耦合超声换能器的电路模型，通过仿真和实验，验证了声阻抗匹配对空气耦合超声换能器的重要性，得出以下结论：

(1)使用 Leach 模型对空气耦合超声换能器进行模拟仿真，通过优化模型中参数，计算出的频率响应、阻抗特性均与实验结果吻合较好，表明 Leach 模型能够有效用于空耦换能器的特性研究。

(2)在实验和仿真中，阻抗曲线都出现了二次谐振现象，说明匹配层的存在会改变换能器的刚度和振动模态，导致额外共振频率的出现。通过分析阻抗曲线中二次谐振现象和额外的共振频率，说明匹配层会影响换能器的阻抗特性和共振频率。

(3)在进行时域分析时，无论是实验还是仿真，加入匹配层后都表现出时域曲线幅值的显著增加。这表明匹配层的存在可以增大信号的幅值，使得信号更容易被检测到，提高了应用中的灵敏度和可靠性。通过换能器时域信号幅值对比，可以看出第一层匹配层对换能器信号幅值的影响大于第二层。实验证明，只有进行声阻抗匹配的空气耦合超声换能器才能在复合材料缺陷检测中得到实际应用。

参考文献：

[1] 夏玉秀，张义凤，薛 峰. 相控阵超声检测技术在航空领域应用研究进展[J]. 无损探伤，2023，47(4)：6-10，38.
Xia Yuxiu，Zhang Yifeng，Xue Feng. Research progress and application status of phased array ultrasonic testing method in aviation industry [J]. Nondestructive Testing Technology，2023，47(4)：6-10，38.

[2] 陈有强. 超声检测在工业管道定期检验中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量，2023，43(14)：50-52.

[3] 李立兵，王 猛. 复合材料空气耦合超声单侧检测仿真研究[C]// 2020' 中国西部声学学术交流会论文集，2020：322-325.

[4] Mason W P. Electromechanical Transducers and Wave Filters [M]. 2nd ed. Van Nostrand：Princeton，NJ，USA，1948.

[5] Redwood M. Transient performance of a piezoelectric transducer[J]. Acoust. Soc. Am.，1961，33：527-536.

[6] Krimholtz R，Leedom D A，Matthaei G L. New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers[J]. Electron. Lett.，1970，6：398-399.

[7] Morris S A，Hutchens C G. Implementation of Mason's model on circuit analysis programs [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control，1986，33：295-298.

[8] Leach W M. Controlled-source analogous circuits and SPICE models for piezoelectric transducers [J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control，1994，41：60-66.

[9] Guisado A，Torres J L，González A M. Study of equivalent circuits of piezoceramics to use in simulations with PSpice[J]. Ferroelectrics：Letters Section，2003，293(1)：307-319.

[10] Puttmer A，Hauptmann P，Lucklum R. Spice model for lossy piezoceramic transducers[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control，1997，44，60-66.

[11] Van D J，Lofqvist T，Delsing J. PSpice simulation of ultrasonic systems[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control，2000，47，1014-1024.

[12] Wei X Y，Yang Y，Yao W Q，et al. PSpice modeling of a sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in longitudinal vibration[J]. Sensors，2017，17(10)：2253.

[13] Shen Z T，Xu J，Li Z J，et al. An improved equivalent circuit simulation of high frequency ultrasound transducer [J]. Frontiers in Materials，2021，8：663109.

[14] Zheng D D，Mao Y，Cui Ziqiang，et al. Optimization of equivalent circuit model for piezoelectric ultrasonic transducer [C]// 2018 IEEE Inter. Instrumentation and Measurement Technology Conf.，2018：1252-1256.

[15] 谢志远，杨 锐，胡正伟. 基于传输线理论的信道幅频特性与负载阻抗关联机制分析[J]. 无线电工程，2023，53(8)：1901-1909.
Xie Zhiyuan，Yang Rui，Hu Zhengwei. Analysis of correlation mechanism between channel amplitude frequency characteristics and load impedance based on transmission line theory[J]. Radio Engineering，2023，53(8)：1901-1909.

[16] 王晓媛，刘东梅，原桂彬，等. 基于 PSpice 软件的电路参数分析方法在线上仿真实验教学中的应用[J]. 中国现代教育装备，2022(23)：116-118.
Wang Xiaoyuan，Liu Dongmei，Yuan Guibin，et al. Application of circuit parameter analysis method based on PSpice software in online simulation experiment teaching[J]. China Modern Educational Equipment，2022(23)：116-118.

作者简介：

崔亚敏(1997—)，男，山西省临汾市人，硕士，主要研究方向为空气耦合超声换能器；

周进节(1981—)，男，湖北省天门市人，博士，副教授，主要研究方向为超声检测方法、传感器与检测仪器、声场可视化技术等。