

声波测井压电换能器多频点阻抗匹配技术研究

苟 阳¹, 唐晓明¹, 谭宝海¹, 陈文轩², 孙云涛², 张文秀²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 针对声波测井压电换能器的多频点阻抗匹配技术展开研究, 首先采用多模态等效电路精确描述了换能器的导纳特性; 然后通过分析多模态阻抗匹配理论, 设计电感-电容复合阻抗匹配网络, 并结合换能器等效电路进行参数优化和电路仿真。实验表明, 相比于换能器没有阻抗匹配的测试结果, 该阻抗匹配技术可大幅提高换能器在谐振频率附近多个频率处的有功功率, 频带内的有功功率平均提高了 30 倍, 从而改善换能器的激励带宽和激励效率, 提高测井仪器的适应性、探测深度和分辨率。

关键词: 声波测井; 压电换能器; 电路仿真; 阻抗匹配

中图分类号: TN64 TB532

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-01-0113-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.01.019

Research on broadband impedance matching technique of acoustic logging piezoelectric transducer

GOU Yang¹, TANG Xiao-ming¹, TAN Bao-hai¹, CHEN Wen-xuan²,
SUN Yun-tao², ZHANG Wen-xiu²

(1. School of Geosciences & Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, the multi-frequency points impedance matching technique of the acoustic logging piezoelectric transducer is studied. First, the multi-frequency points admittance characteristics of the transducer are accurately described by using the multimode equivalent circuit. Then, the theory of multi-frequency points impedance matching is analyzed, and the inductance-capacitance composite impedance matching network is designed. On this basis, by combined with the equivalent circuit of transducer the parameter optimization and the circuit simulation are carried out. Experiments show that compared with the test results of the transducer without impedance matching, the proposed impedance matching technique can greatly improve the active power of the transducer at several frequencies near the resonant frequency and increases the active power in the frequency band averagely by 30 times. In this way, the excitation bandwidth and efficiency of the transmitting transducer are greatly improved, and the adaptability, detection depth and resolution of the logging instrument are improved.

Key words: acoustic logging; piezoelectric transducer; circuit simulation; impedance matching

0 引 言

随着我国在非常规油气田勘探领域的不断进步, 面对地质环境更为复杂的非常规储层, 声波测井仪器优化升级的迫切性日益凸显。高信噪比和多井适应性以及大功率、多频点换能器激励是当前的技术难点^[1-2]。发射换能器作为声波测井仪器的核心部件之一, 其激励能量的强弱将影响仪器的纵向探测深度, 而各个地区的井由于地质环境不同, 有着

不同的固有频率, 当换能器激励频率与地层固有频率相近时, 才能测得较强的地层信号^[3]; 同时, 多频点换能器激励技术的提出有望实现激励电路在单极、偶极等激励模式的复用, 从而简化激励电路和测井仪器。因此, 研究多频点、高效率的声波测井发射换能器激励技术迫在眉睫。

压电换能器作为压电陶瓷器件, 其电阻抗参数与激励源参数的匹配特性在很大程度上影响了换能器的工作带宽和激发能量。在医用超声领域, 换能器阻抗匹配技术取得了初步成效, A. Cysewska-Sobusiank 等^[4]对医用超声换能器的阻抗匹配技术进行了实验和总结, 并成功应用于医用超声仪器。在水声工程领域, R. Ramesh 等^[5]及周瑜等^[6]利用实频数据法和有限元仿真在水声换能器谐振频率处设计了宽频匹配网络, 为后续该领域的研究奠定了

收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2018-11-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA14020302)、国家自然科学基金资助项目(41774138)。

作者简介: 苟阳(1994—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 研究方向为声波测井仪器。

通讯作者: 苟阳, E-mail: Knight_gouyang@163.com

基础。然而医用超声和水声工程领域的发射换能器受空间限制较小,其换能器谐振频率位置和激励带宽的设计更为灵活,而声波测井发射换能器受仪器尺寸限制很大,谐振频率更高且激励频率带宽更窄,因而这两个领域的匹配技术虽然有重大借鉴意义,但难以成功应用到声波测井领域。

在发射换能器和激励电路的阻抗匹配过程中,声波激励电路的阻抗特性固定不变,但换能器阻抗特性随频率变化较大且很难用解析函数表达。为解决这一问题,国内外学者进行了一系列的研究,J. Brufau-Penella 等^[7]对换能器阻抗变化与激发能量的关系进行了实验研究;潘仲明等^[8]探究了压电换能器单电感匹配的方法,在窄带匹配方面取得了初步效果。上述工作主要针对的是换能器谐振频率处的窄带匹配,可在谐振频率附近明显提升换能器激发功率。同样,换能器宽频匹配方面,国内外专家也对激励频带拓宽展开了大量研究:H. Huang 等^[9]对换能器的等效电路模型进行了讨论,并对多种阻抗匹配网络进行了仿真和测试;李晓等^[10]从换能器材料及结构参数的角度得出其等效网络并在谐振频率处进行阻抗匹配,对拓宽换能器频带具有一定的指导意义;高天赋等^[11]从宽频匹配的解析理论出发,为换能器宽带匹配打下了理论基础。但是这些技术有的缺乏对换能器频带内阻抗特性变化的充分考虑,激励频带宽度及功率提升有待优化;有的虽然考虑了阻抗变化特性,却要通过繁琐的理论推导才可以得出阻抗匹配网络参数,工程应用性需要增强。

基于此,本文立足于声波测井的迫切需求,设计研发了一种压电换能器多频点阻抗匹配技术。该技术首先采用多模态等效电路对换能器的导纳特性进行了精确表达,然后结合声波测井所常用的单极子换能器的阻抗分析数据,采用非线性回归拟合得出其准确的等效电路模型;之后通过 ADS 软件搭建阻抗匹配网络结构,并与换能器等效电路模型相结合进行参数优化;最后经过电路仿真和声场实验验证该技术对换能器频带拓宽和功率提升的效果。测试结果表明,该技术能够有效拓宽换能器激励频带,并极大提升频带内换能器的激发功率,为提升声波测井仪器激励效率、增加探测深度和提高接收信号的信噪比打下基础。

1 多模态压电换能器等效电路模型

压电换能器是通过压电效应实现电能和声波能量的相互转化,换能器的电特性可以由导纳(阻

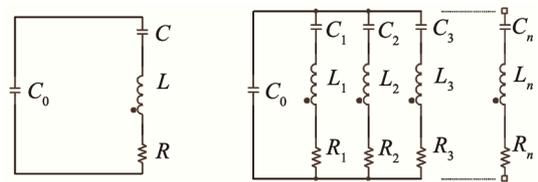
抗)特性来精确表达,通常针对单模态进行压电换能器振动的等效电路分析,图 1(a)为简化模型结果。根据该电路图,换能器的导纳值可用下式表示:

$$Y = \frac{j\omega^2 CRC_0 - (\omega C_0)(\omega^2 LC - 1) + \omega C}{\omega RC + j(\omega^2 LC - 1)} \quad (1)$$

其中, $\omega = 2\pi f$ 为角频率。然而,由于换能器的有限尺寸与三维结构,呈多模态振动特性,对应于多个谐振频率,有必要采用多模态等效电路分析,本文给出的模型假定多模态等效电路由单模态等效电路中的多个串联支路并联而成,如图 1(b)所示,其导纳值为

$$Y = j\omega C_0 + \sum_{i=1}^n \left(R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, n 为谐振点个数。



(a) 单模态等效电路 (b) 多模态等效电路

图 1 压电换能器等效电路

Fig.1 Equivalent circuits of piezoelectric transducer for single mode(a) and multi-modes (b)

为了将两种压电换能器等效电路模型进行对比,针对某种声波测井所用的单极子压电换能器用阻抗分析仪进行测试,其谐振频率为 31、19、35 kHz。换能器实物如图 2 所示,内径为 3.9 cm、外径为 5.2 cm,高为 4.8 cm。可以大致判断 31、19 kHz 分别对应于压电振子长度与径向振动谐振频率,可通过模态分析来确切证实。



图 2 压电换能器实物图

Fig.2 Photo of the piezoelectric transducer

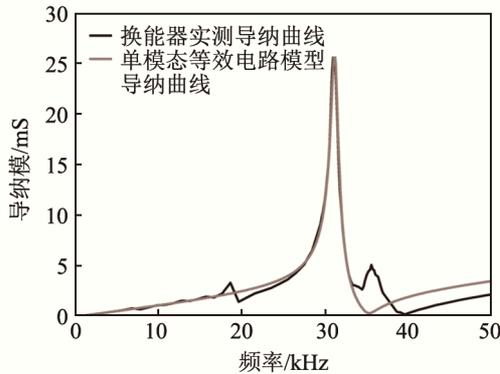
将测试结果中导纳最大值处的阻抗分析数据导入 MATLAB 中,分别对式(1)、(2)进行非线性回归拟合,两种电路模型的元件参数如表 1 所示。

根据表 1 中的数据,按照图 1(a)、1(b)在 PSpice 软件中搭建等效电路模型并进行电路仿真。图 3(a)为该换能器基于单模态等效电路仿真的导纳曲线

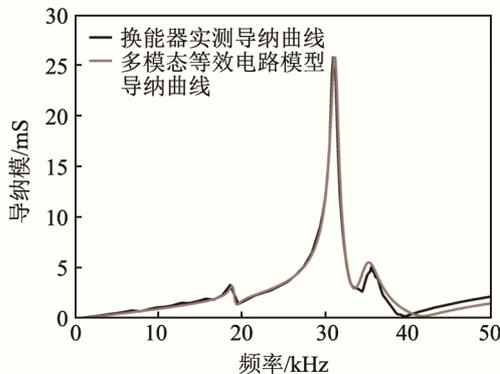
表 1 压电换能器等效电路参数
Table 1 Parameters of the equivalent circuit of piezoelectric transducer

等效电路	C_0	(C_1, L_1, R_1)	(C_2, L_2, R_2)	(C_3, L_3, R_3)
单模态	13 nF	(3.66 nF, 7.28 mH, 16.69 Ω)		
多模态	13 nF	(0.824 nF, 82.94 mH, 971.60 Ω)	(3.66 nF, 7.28 mH, 16.69 Ω)	(0.665 nF, 30.66 mH, 163.41 Ω)

与换能器实测导纳曲线对比图，可以看出两条曲线在导纳最高值的谐振频率处重合度较高，而本文需要在换能器的单极子模式下(19 kHz)进行阻抗匹配，因此，直接采用阻抗分析仪得出的导纳最高值的谐振频率处的等效电路参数无法满足阻抗匹配网络设计要求，需要对换能器所需谐振频率的等效电路进行计算。图 3(b)为其多模态等效电路仿真后的导纳曲线与实测导纳曲线的比较图，可以看出二者吻合良好，能够完整表征出换能器的阻抗特性。将表 1 与图 3 结合来看，多模态电路的一个分支参数与单模态相同，导纳曲线在特定的频段重合，可以推测多模态电路的各个分支与不同的振动模式



(a) 单模态等效电路模型导纳曲线对比



(b) 多模态等效电路模型导纳曲线对比

图 3 压电换能器实测和等效电路仿真的导纳曲线对比
Fig.3 Comparison between the tested admittance curve of piezoelectric transducer and the one simulated from the equivalent circuit of (a) single mode and (b) multi-modes

对应，这需要对换能器进行声场及振动实验研究。

通过上述研究，可以看出，常见的声波测井发射换能器往往存在多个谐振点，采用常规的单模态等效电路只能表达换能器某一谐振频率附近的导纳特性。为开展换能器多频点激励技术研究，应当根据谐振点的不同使用相应的等效电路，该模型根据换能器在谐振点实测的导纳数据，计算出等效电路元件参数，可以准确地描述换能器在各个谐振点的导纳特性，便于对换能器在多个激励频段，通过电路仿真来进行阻抗匹配设计，为后续随钻多极子仪器的阻抗匹配技术的研究奠定基础。

2 宽频阻抗匹配理论

2.1 功率传输原理与阻抗匹配方法

一般来说，压电换能器在工作频带范围内呈容性或感性，而信号源的输出阻抗则多为纯阻性，换能器与信号源直接相连会出现阻抗不匹配的现象。这会造成信号源所发出的功率被大幅反射，换能器的激励效率降低。阻抗匹配的最终目标便是激励源与换能器负载之间具有较高的功率传输。

可以用一个简易的电路模型来说明功率传输理论，示意图如图 4 所示。

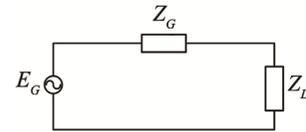


图 4 功率传输示意图
Fig.4 Schematic diagram of power transmission

图 4 中， $E_G(j\omega)$ 是一内阻为 $Z_G(j\omega)=R_G+jX_G(\omega)$ 的电压源，其驱动一个阻抗为 $Z_L(j\omega)=R_L+jX_L(\omega)$ 的负载时，负载的功率 P_L 为

$$P_L = |E_G|^2 \frac{R_L}{|Z_G + Z_L|^2} = |E_G|^2 \frac{R_L}{(R_G + R_L)^2 + (X_G + X_L)^2} \quad (3)$$

分别对式(3)中的 R_L 和 X_L 求偏导数，并令其为 0，则有：

$$\frac{\partial P_L}{\partial R_L} = |E_G|^2 \cdot \left(\frac{(R_G + R_L)^2 + (X_G + X_L)^2}{|Z_G + Z_L|^4} - \frac{R_L}{|Z_G + Z_L|^4} \right) = 0 \quad (4)$$

以及

$$\frac{\partial P_L}{\partial X_L} = |E_G|^2 \cdot \frac{-2(X_G + X_L)}{|Z_G + Z_L|^4} = 0 \quad (5)$$

由式(4)、(5)则有：

$$\begin{cases} X_L = -X_G \\ R_G = R_L \end{cases} \quad (6)$$

从式(3)中可以看出, 负载功率是 Z_L 和 Z_G 的函数, 由式(4)、(5)可知, 当 Z_L 和 Z_G 满足共轭时, 即 $X_G + X_L = 0$ 且 $R_G = R_L$ 时, P_L 可以取得极大值。Smith Chart 是一种基于功率传输理论的阻抗匹配方法, 通过添加电感、电容构成的阻抗匹配网络使得负载与激励源达到共轭匹配, 通过反射系数 S_{11} 来衡量阻抗匹配网络的性能, 其值越小则表明系统功率传输效率越高。

2.2 多频点阻抗匹配网络设计及仿真

本文采用 ADS 软件中的 Smith Chart 模块进行阻抗匹配网络的结构设计, 根据实际测井需要, 计划设计拓宽的频带范围内包括高频和低频, 故工作频带范围为 17~21 kHz, 谐振频率选取 19 kHz, 其对应的模式为压电圆管的径向振动模式。利用 ADS 软件, 首先将 19 kHz 的阻抗数据 198-294j 作为目标负载, 并且信号源阻抗为 50 Ω, 设计出阻抗匹配网络的结构, 如图 5 所示。

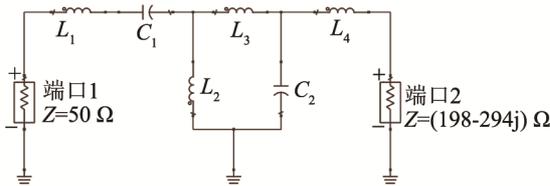


图 5 阻抗匹配网络结构
Fig.5 Structure design of impedance matching network

通过添加串、并联的电感及电容使得负载阻抗和信号源阻抗 50 Ω 共轭匹配, 由电感、电容串、并联形成的网络, 其在特定频率谐振的特性有助于拓宽频带。但此时负载阻抗是定值, 由图 3(b)可知, 在 17~21 kHz 内换能器阻抗随频率变化较大, 故仍需要对匹配网络元件参数进行优化, 从而达到宽频匹配的目的。

如图 6 所示, 将表 1 中计算好的换能器 19 kHz 处的等效电路作为负载, 加入初步得出的阻抗匹配网络, 在 ADS 软件中设置优化目标, 频率范围为 17~21 kHz、端口反射系数 $S_{11} < -10$ dB, 并用遗传

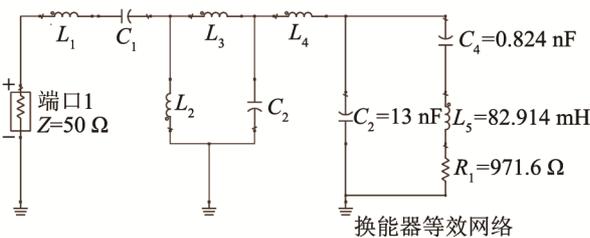


图 6 电路联调参数优化
Fig.6 Optimization of circuit joint debugging parameters

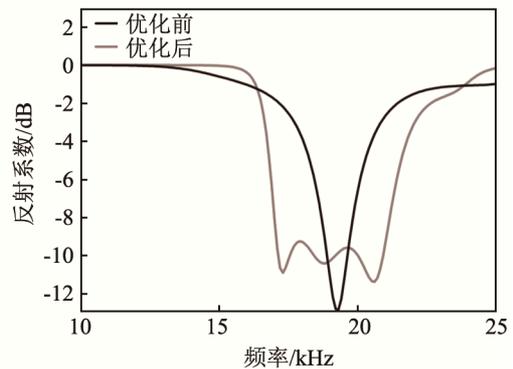
算法对匹配网络元件参数进行优化, 最后进行电路仿真测试。通过观测匹配前后的有功功率评估阻抗匹配网络的性能。

优化前后的阻抗匹配网络元件参数如表 2 所示。

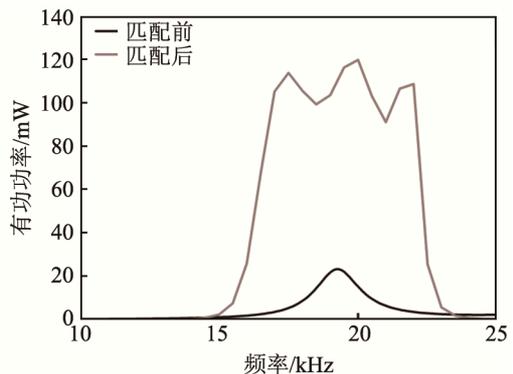
表 2 优化前后的阻抗匹配网络元件参数
Table 2 Component parameters of impedance matching network before and after optimization

	$L_1/\mu\text{H}$	C_1/nF	L_2/mH	$L_3/\mu\text{H}$	C_2/nF	L_4/mH
优化前	220.7	686.65	1.92	542.36	63.8	1.8
优化后	1 087	56.7	135.8	43.3	338.7	3.3

通过电路仿真初步观测阻抗匹配网络优化效果如图 7(a)所示。经过优化, 在 17~21 kHz 频带范围内, 反射系数 $S_{11} < -10$ dB, 误差在 0.2 dB 左右, 基本达到了预期的设计目标。图 7(b)为匹配前后有功功率仿真测试结果。图 7(b)仿真结果表明, 设计出的阻抗匹配网络拓宽了预设频率段的频带, 并有效提高了目标频段内换能器的有功功率。



(a) 优化前、后反射系数曲线



(b) 匹配前、后有功功率仿真测试结果

图 7 阻抗匹配网络参数优化前后的仿真测试结果
Fig.7 Simulation results of impedance matching network parameters before and after optimization

3 实验验证

为检验阻抗匹配网络的有效性, 进行了阻抗匹配网络实验测试, 示意图如图 8 所示。将发射换能

器放在充满硅油的塑料容器中，内阻为 $50\ \Omega$ 的信号源提供电压为 $10\ \text{V}$ 、频率为 $10\sim 40\ \text{kHz}$ 的正弦激励信号，测试频率步长为 $500\ \text{Hz}$ ，用示波器采集匹配前、后发射换能器的电压波形，并通过 $1\ \Omega$ 采样电阻采集电流波形。匹配前、后负载系统的功率因数则由阻抗分析仪测得(匹配前负载系统为换能器，匹配后负载系统为匹配网络和换能器)。

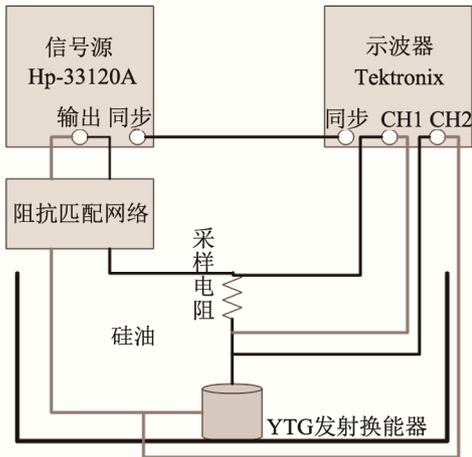
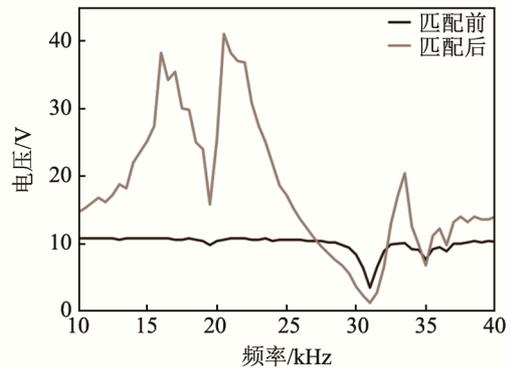
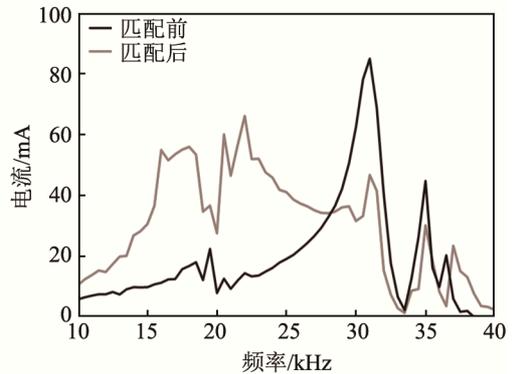


图 8 阻抗匹配网络测试的布设图
Fig.8 Layout for impedance matching network test

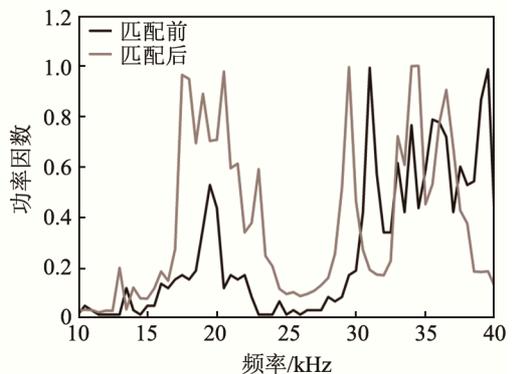
图 9 为换能器匹配前后测试结果。由图 9(a)、9(b)可以看出，加入阻抗匹配网络后，在预设频段 $17\sim 21\ \text{kHz}$ 内，换能器两端的电压和电流均有明显增加，但频带内起伏变化较大，并且在 $19\ \text{kHz}$ 附近存在极值。若要评估换能器频带及激励能量是否增大，则应当综合电压、电流和换能器自身功率因数，从有功功率的角度进行衡量。图 9(c)表明在匹配后，预设频段内负载系统功率因数增大，这说明阻抗匹配网络有效降低了负载系统的容性，改善了信号源与换能器之间的功率传输效率。将图 9(d)和表 3 相结合可以看出，若以半功率点为评估阻抗匹配效果的标准，匹配前在中心频率 $19\ \text{kHz}$ 附近 $18\sim 20\ \text{kHz}$ 处，有功功率大于匹配目标频带内有功功率最高值的一半，经过匹配后满足上述评估标准的激励带宽拓宽到 $16\sim 22\ \text{kHz}$ ，激励频点增加了 4 个，而在 $16\sim 22\ \text{kHz}$ 频带内去掉匹配后两个有功功率极值以后，计算有功功率平均提高 30 倍左右。至此，本文所设计的多频点阻抗匹配网络的有效性得到了实验验证。若将有功功率测试的实验结果结合电路仿真来分析，如图 10 所示，实验结果与电路仿真基本吻合，说明利用换能器等效电路模型与 ADS 仿真软件结合进行宽频阻抗匹配网络设计是可行的，实验与仿真存在一定误差，推测是实际的电路元件存在寄生参数和电阻损耗，故实际所用元



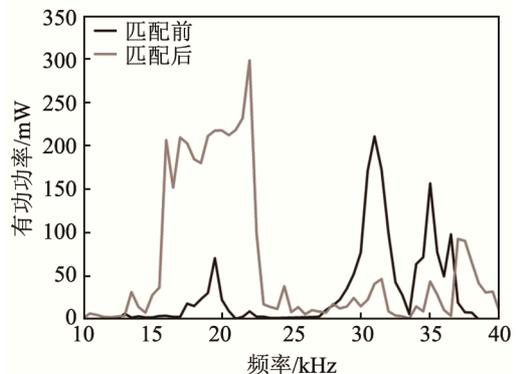
(a) 匹配前、后换能器电压



(b) 匹配前、后换能器电流



(c) 匹配前、后系统功率因数



(d) 匹配前、后换能器有功功率

图 9 换能器匹配前后的测试结果
Fig.9 Test results of the transducer before and after impedance matching

件取值应当在理论计算值附近进行调整,才有可能达到更为理想的效果,并且等效电路模型与实际换能器存在一定差异。综合来看,所设计的宽频阻抗匹配网络基本达到了预期目标,实现了多频点激励,有功功率平均提高 30 倍,为后续声波测井仪器宽频阻抗匹配研究提供了参考。

表 3 预设频带处换能器匹配前、后有功功率
Table 3 The measured active power in the preset frequency band of the transducer before and after impedance matching

频率/ kHz	匹配前功率/ mW	匹配后功率/ mW	匹配前 归一化功率	匹配后 归一化功率
15	2.66	28.58	0.08	0.09
16	4.56	206.43	0.15	0.69
17	3.30	209.47	0.10	0.70
18	15.76	184.50	0.51	0.62
19	30.78	211.16	1.00	0.70
20	22.98	217.76	0.74	0.73
21	1.26	218.13	0.04	0.73
22	9.67	298.38	0.31	1.00
23	3.60	17.63	0.11	0.06

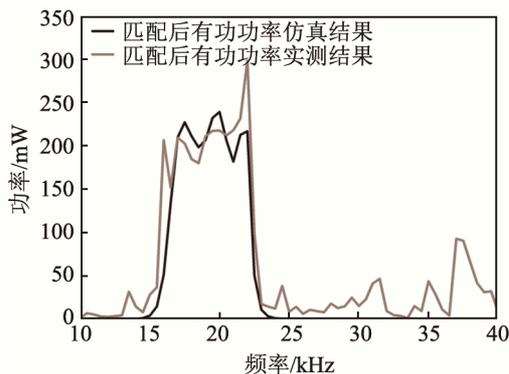


图 10 匹配后有功功率实际测量与仿真结果
Fig.10 The measured and simulated results of active power after impedance matching

4 结 论

本文立足于声波测井的实际需要,以提高发射换能器激发功率、拓宽其激励频带为目标展开研究。相对于换能器传统的单模态等效电路模型,本文利用换能器实际的阻抗分析数据,通过非线性回归拟合得出其相应的多模态等效电路,比传统的单模态等效电路能更完整地表征换能器的阻抗特性,有助于根据不同需求,对阻抗匹配网络进行快捷设计。基于 Smith chart 图得出阻抗匹配网络的结构,在 ADS 射频仿真软件中将换能器的等效电路及阻抗匹配网络联调根据预设目标进行元件参数优化,充分考虑了换能器频带内的阻抗变化特性。最后通过电路仿真及实验,从有功功率的角度验证了所设

计的多频点阻抗匹配网络的有效性,为后续声波测井仪器的优化升级提供了参考和帮助。

参 考 文 献

- [1] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 赵晓敏, 译. 北京: 石油工业出版社, 2004: 4-8.
TANG Xiaoming, ZHENG Chuanhan. Quantitative borehole acoustic methods[M]. ZHAO Xiaomin, translate. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 4-8.
- [2] 谭宝海, 唐晓明, 魏周拓, 等. 随钻偶极横波远探测优势频带及反射声场[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1152-1158.
TAN Baohai, TANG Xiaoming, WEI Zhoutuo, et al. Dominant frequency band and reflect wave field of LWD dipole shear wave remote detection[J]. Acta petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1152-1158.
- [3] 许玉俊, 沈建国, 田素月, 等. 提高声波测井仪器的关键-换能器的频率特征[J]. 石油仪器, 2003, 17(4): 5-7.
XU Yujun, SHENG Jianguo, TIAN Suyue, et al. Key factors for improving the properties of sonic logging tool: Frequency characters of the transducer[J]. Petroleum Instruments, 2003, 17(4): 5-7.
- [4] CYSEWSKA-SOBUSIANK A, SOWIER A, SKRZYWANEK P. Application of rotating EUS micro-probes for deep penetration of upper gastrointestinal tract[C]//Sensors, 2004. Proceedings of IEEE, 2004, 1492-1495.
- [5] RAMESH R, PILIAL S S, ABRAHAM P, et al. Characteristics of broadband underwater transducers integrated with turning coil and cables[C]//IEEE Proceedings of SYMPOL, 2009: 133-138.
- [6] 周瑜, 涂其捷, 杨荣耀, 等. 压电水声换能器宽带匹配特性研究[J]. 声学技术, 2018, 37(3): 286-291.
ZHOU Yu, TU Qjie, YANG Yongyao, et al. Resear on broadband matching performance of piezoelectric underwater acoustic transducer[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(3): 286-291.
- [7] BRUFAU-PENELLA J, PUIG-VIDAL M. Piezoelectric energy harvesting improvement with complex conjugate impedance matching[J]. J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2008, 20(5): 597-608.
- [8] 潘仲明, 祝琴. 压电换能器阻抗匹配技术研究[J]. 应用声学, 2007, 26(6): 357-361.
PAN Zhongming, ZHU Qin. Study of impedance matching technology for piezoelectric transducer[J]. Appl. Acoust, 2007, 26(6): 357-361.
- [9] HUANG H, PARAMO D. Broadband electrical impedance matching for piezoelectric ultrasound transducer[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, 2011, 58(12): 2699-2706.
- [10] 李晓, 宋雁鹏, 王志斌, 等. 压电换能器等效模型分析与阻抗匹配设计[J]. 应用声学, 2016, 35(1): 13-19.
LI Xiao, SONG Yanpeng, WANG Zhibin, et al. The analysis of piezoelectric transducer equivalent impedance model and the design of an impedance matching circuit[J]. Appl. Acoust, 2016, 35(1): 13-19.
- [11] 高天赋, 曾娟, 李海峰, 等. 压电陶瓷发射换能器的 Butterworth 匹配定理[J]. 声学学报, 2006, 31(4): 297-304.
GAO Tianfu, ZENG Juan, LI Haifeng, et al. A theorem on Butterworth matching for piezoelectric ceramic emission transducer[J]. Acta Acustica, 2006, 31(4): 297-304.
- [12] CHEN Y, WU S. Multiple acoustical matching layer design of ultrasonic transducer for medical application[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(10): 6098-6107.
- [13] 徐晓伟. 压电超声换能器的阻抗匹配分析[J]. 压电与声光, 2014, 36(5): 745-747.
XU Xiaowei. Analysis on the matching impedance of piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(5): 745-747.