

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108784

随钻声波发射换能器宽频阻抗匹配设计及实验*

苟阳^{1,2,3,4}, 付欣^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所深地资源装备技术工程实验室 北京 100029; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室 北京 100029; 3. 中国科学院地球科学研究院 北京 100029; 4. 中国科学院大学 北京 100029)

摘要:发射换能器是随钻声波测井仪器的核心部件,其工作带宽及辐射声波能量的强弱是仪器的关键技术指标。换能器是一个非线性容性负载,可以采用阻抗匹配的方式增强有功功率并拓宽工作频带。本文将换能器多模态等效电路与阻抗匹配网络结合,利用电路网格方程对元件参数进行求解。最终在消声水池进行声场测试,观测换能器有功功率、声场辐射声压、发射电压响应等电、声特性,综合评估阻抗匹配网络的效果,为后续的随钻仪器研发及实验测试提供帮助和指导。实验结果表明,本文所设计的阻抗匹配网络能够明显改善换能器的声波辐射性能,频带宽度拓宽3.3倍,有功功率提高1.7倍,声压增强1.8倍,发射电压响应提高5 dB,在12~16 kHz的频带内发射电压响应最高可达125 dB。

关键词: 随钻声波测井仪器; 压电换能器; 阻抗匹配网络; 理论计算; 水声实验

中图分类号: TH763 TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8081

Broadband impedance matching design and experiment for acoustic while drilling transducer

Gou Yang^{1,2,3,4}, Fu Xin^{1,2,3,4}

(1. CAS Engineering Laboratory for Deep Resources Equipment and Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Innovation Academy for Earth Science, CAS, Beijing 100029, China; 4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The transmitting transducer is the core component of the acoustic logging while drilling tool (ALWD). Its working bandwidth and the strength of the radiated acoustic energy are two key technical indicators of the instrument. The transducer is a non-linear capacitive load. The impedance matching can be used to enhance the active power and broaden the working frequency band. This article combines the multi-mode equivalent circuit of the transducer with the impedance matching network. And the circuit grid equation is utilized to obtain the component parameters. Finally, the sound field test is implemented in an anechoic pool, while observing the electrical and acoustic characteristics of the transducer terminal active power, sound field radiation sound pressure, and emission voltage response. The effect of the impedance matching network is evaluated comprehensively. It provides help and guidance for the follow-up ALWD instrument development and experimental testing. Experimental results show that the designed impedance matching network can significantly improve the acoustic radiation performance of the transducer. The frequency bandwidth is expanded by 3.3 times, the active power is increased by 1.7 times, the sound pressure is increased by 1.8 times, and the emission voltage response is increased by 5 dB. The transmit voltage response in the 12~16 kHz frequency band is up to 125 dB.

Keywords: sonic logging while drilling tool; piezoelectric transducer; impedance matching network; theoretical calculation; underwater acoustic experiment

收稿日期: 2021-10-28 Received Date: 2021-10-28

* 基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA14020301)项目资助

0 引言

随钻声波测井仪器广泛应用于油气勘探开发领域,通过测量声源发出的声波信号在地层中传播的时差来反演井周岩石的声学特性,现已成为非常规油气藏勘探必不可少的工具^[1]。发射换能器是随钻声波测井仪器的核心部件,作为声源向地层辐射所需频率的声波信号。由于随钻测井过程中伴随着强振动及噪声干扰,换能器辐射出的信号强度影响着仪器信噪比及探测深度。不同的地层有着不同的固有频率,只有当仪器声源频率与地层固有频率相近时,才会测得较强的地层信号^[2-3]。常用的单极子声波测井的工作频率范围在12~15 kHz之间,由于受到随钻仪器空间尺寸的限制,现有随钻声波压电换能器往往具有多个谐振点,因此阻抗随着频率的变化较为剧烈,所能使用的有效带宽仅有约0.5 kHz,这极大限制了随钻声波仪器的适用地层范围。并且,当换能器与仪器激励电路阻抗失配时,电能转换为机械能的效率会降低,甚至会损坏仪器电路系统^[4]。因此,对随钻换能器的宽频阻抗匹配设计进行研究具有极大意义。

压电换能器是一个非线性容性负载,常规的阻抗匹配是在换能器端串联一个电感来抵消换能器的容抗,使得负载尽可能为纯阻,但是这种匹配方式为单频匹配,仅在单一的频率处满足阻抗匹配要求^[5-6]。近年来关于换能器的宽频阻抗匹配技术主要围绕水声工程领域,采用实频数据法建立阻抗匹配网络与换能器之间的传输函数,进行阻抗匹配网络参数计算。但是,水声工程领域所用的圆管状换能器尺寸较大、频率较低,频带宽度相对于随钻测井仪器所用的瓦片状换能器而言较宽,阻抗特性随着频率的变化较缓。并且,这种方法应用在具有多个谐振点换能器时,需要多次反复调整初值条件,计算结果很难收敛^[7-8]。因此该方法难以完全迁移到随钻测井换能器上。利用电脑软件辅助进行阻抗匹配设计也是一种新的方法。例如,借助射频频仿真软件史密斯图表(smith chart),通过手动改变阻抗匹配网络中电感、电容参数,获得LC拓扑结构形成带通滤波^[9],从而实现一定带宽的阻抗匹配,来达到设计目标^[10-11]。一些软件例如射频微波仿真系统(advanced design system, ADS)还能够根据具体的负载阻抗值进行自适应匹配^[12-13]。然而,采用软件计算方法存在的问题是,负载端口的阻抗值是固定值,这样设计出的阻抗匹配网络在固定频率处的功率增益较高,频带内的电压响应不平坦,这会对仪器采集端自动增益造成影响。并且,采用软件计算方法缺乏对宽频阻抗匹配理论机理的研究,难以灵活根据实际需要做出计算方法的调整。无损检测技术与声

波测井技术类似,两者的测量方法都是声源产生声波信号经过介质后被接收端采集,利用声学信号在介质中的传播差异反演被测介质的声学特性。无损检测领域近年来出现了一些关于磁滞伸缩换能器的优化方法,例如对换能器振动模式激励方法的研究以及换能器自身结果参数的优化^[14-16],这些研究对随钻换能器的宽频激励技术研发具有借鉴意义。

当前,对于随钻声波换能器宽频阻抗匹配的研究比较匮乏,大多数都停留在仪器整体设计以及数据处理方法。改善声源质量能够从源头提高仪器信噪比,因此有必要对随钻声波换能器的宽频阻抗匹配方法进行研究。针对上述问题,本文提出一种基于电路方程求解阻抗匹配网络参数的方法,设计出实际的仪器激励电路和阻抗匹配网络,在消声水池中进行声场辐射测试。评估经过阻抗匹配后,换能器有功功率、声压、发射电压响应的改善情况。

1 随钻换能器多模态谐振等效电路计算

如图1所示,为本文所使用的随钻声波测井仪器发射模块结构。主要由激励电路、仪器内铤、发射换能器以及护盖构成。发射换能器为90°弧形外部由环氧树脂包裹的压电陶瓷,4片完全相同的发射换能器镶嵌在钻铤内壁上,透过刚性护盖向地层辐射声波信号。仪器钻铤的空间有限,换能器的主频与其尺寸呈负相关,为了既满足尺寸要求又符合主频设计指标,随钻测井所用的换能器往往具有多个谐振模式。

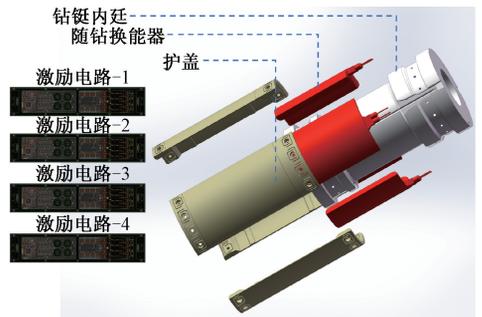


图1 随钻声波测井仪器发射模块

Fig. 1 Acoustic logging while drilling tool transmitter module

压电换能器是实现电能与机械能相互转换的器件,其电学特性可由不同频率处的阻抗来表达。因此准确的换能器等效电路模型对阻抗匹配网络设计至关重要^[17-20]。巴特沃斯(Butterworth-Van Dyke, BVD)模型是压电换能器常用的模型之一,其可以根据换能器实际的导纳数据来确定。随钻声波测井所用的压电换能器具有多个谐振模式,其对应的BVD等效电路具有多个电阻、

电感、电容支路(RLC)。如图2所示,多谐振BVD等效电路模型有四种元件:静态电容 C_0 ,动态电阻 R_i ,动态电感 L_i ,动态电容 C_i 。其中 i 为谐振频率的编号。

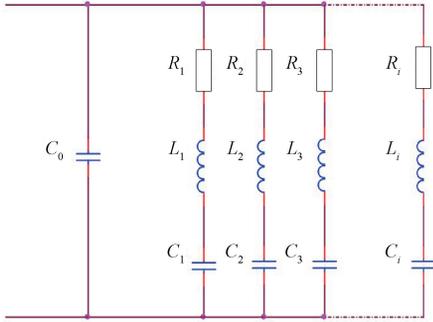


图2 换能器BVD多谐振等效电路模型

Fig. 2 BVD multi-resonance equivalent circuit model

根据图2便可得换能器多模态谐振电路的导纳表达式:

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

其中, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率, j 为复数, n 为谐振频率的个数。接下来,将阻抗分析仪测得的换能器实际阻抗数据,结合式(1)在MATLAB中利用非线性回归算法计算出BVD多谐振等效电路中的元件参数。表1为计算所得的换能器BVD等效电路元件参数。

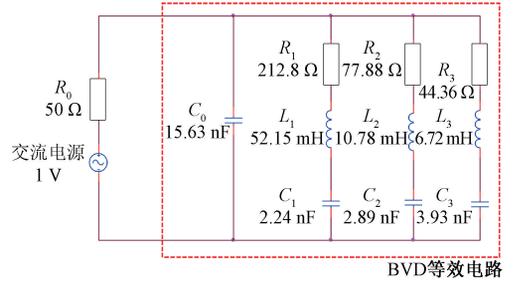
表1 BVD等效电路元件参数

Table 1 BVD equivalent circuit component parameters

换能器BVD等效电路元件	换能器BVD等效电路元件参数
C_0	15.63 nF
C_1, L_1, R_1	2.24 μ F, 52.15 mH, 212.80 Ω
C_2, L_2, R_2	2.89 μ F, 10.78 mH, 77.88 Ω
C_3, L_3, R_3	3.93 μ F, 6.72 mH, 44.36 Ω

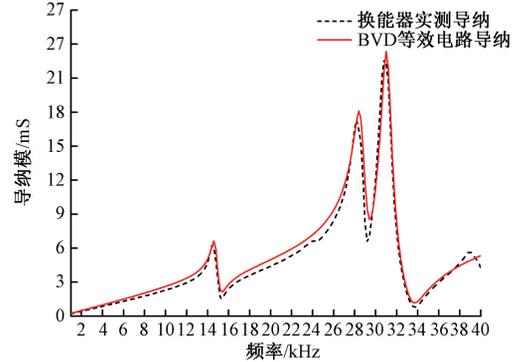
如图3(a)所示,为本文所使用随钻换能器的BVD多谐振等效电路导纳测试电路,图3(b)为BVD多谐振等效电路导纳与换能器实测导纳对比。

在图3(a)中信号源的内阻采用50 Ω 、电压1 V,这与实际的阻抗分析仪是一致的,结合图3(b)中实测导纳曲线可以看出,本文所使用的随钻换能器在1~40 kHz内具有3个谐振频率,因此图2(b)中BVD等效电路具有3个RLC分支结构,经过扫频测试后可以看出BVD等效电路与实测导纳模值吻合较好,说明利用BVD等效电路模型能够很好地表征换能器的导纳(阻抗)特性,能够将其作为负载进行宽频阻抗匹配设计。



(a) 换能器BVD等效电路导纳测试电路

(a) Transducer BVD equivalent circuit admittance test circuit



(b) 导纳曲线对比

(b) Admittance curve comparison

图3 换能器等效电路及导纳曲线对比

Fig. 3 Comparison of transducer equivalent circuit and admittance curve

2 宽频阻抗匹配网络设计

由于随钻测井仪器的空间有限,电路板上的阻抗匹配网络结构应当尽量精简。为了满足仪器空间尺寸以及宽频激励要求,本文采用由4个电感、电容元件组成的 Π 型阻抗匹配网络,如图4所示, R_g 为激励电路输出电阻,作为换能器及阻抗匹配网络的输入电阻, V_1 、 V_2 、 V_3 为节点电压, C_{i1} 、 C_{i2} 、 L_{i1} 、 L_{i2} 为阻抗匹配网络元件。随钻换能器的激励电压可达2 000 V,需要用到升压变压器。因此本文将变压器的初级电感值、变比也考虑在内,与阻抗匹配网络参数元件一同进行计算。

利用基尔霍夫电压定律,在电路中划分出3个网格并建立方程:

$$(j\omega C_{i1})^{-1}i_2 - V_1 = 0 \quad (2)$$

$$j\omega L_{i1}i_3 + (j\omega C_{i2})^{-1}i_4 - (j\omega C_{i1})^{-1}i_2 = 0 \quad (3)$$

$$j\omega i_3(L_{i2} + L_m) - (j\omega C_{i2})^{-1}i_4 = 0 \quad (4)$$

将式(4)先与式(3)相减后再与式(2)相加可得:

$$j\omega i_3(L_{i2} + L_m) - j\omega L_{i1}i_3 - V_1 - 2(j\omega C_{i2})^{-1}i_4 + 2(j\omega C_{i1})^{-1}i_2 = 0 \quad (5)$$

将变压器参数计算以及换能器阻抗数据引入阻抗匹

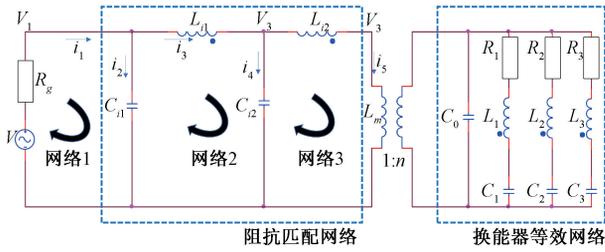


图4 阻抗匹配网络参数计算电路图

Fig. 4 Impedance matching network parameter calculation circuit diagram

配网络参数计算,可以得到:

$$V_3 = \frac{i_5}{Yn^2} \quad (6)$$

结合基尔霍夫电流定律可得:

$$i_3 = i_1 - i_2 = i_1 - j\omega C_{i1} V_1, i_4 = i_3 - i_5 \quad (7)$$

$$\frac{(V_1 - V_2)}{j\omega L_{i1}} = i_3, \frac{(V_2 - V_3)}{j\omega L_{i2}} = i_5 \quad (8)$$

联立式(6)、(8)可得 i_5 的表达式:

$$i_5 = \frac{(V_1 - j\omega L_{i1} i_3)}{(Yn^2)^{-1} + j\omega L_{i2}} \quad (9)$$

将式(7)、(9)代入式(5)便可得阻抗匹配输入端口的阻抗表达式:

$$\frac{V_1}{i_1} = \frac{(Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4) + j(Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4)}{Z_3^2 + Z_4^2} \quad (10)$$

其中, $Z_p (p = 1, 2, 3, 4)$ 。

接下来,将输入阻抗的实部和虚部定义为关于频率 f 的函数:

$$Re(f) = \frac{(Z_1 Z_3 + Z_2 Z_4)}{Z_3^2 + Z_4^2}, I(f) = \frac{(Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3)}{Z_3^2 + Z_4^2} \quad (11)$$

传统的窄带阻抗匹配是令负载端的等效阻抗实部与信号源输入相等,虚部为0。然而对于宽频阻抗匹配,需要根据边界条件进行计算,本文所用的随钻换能器工作频带是12~16 kHz,中心频率为14.45 kHz,结合式(11),将换能器所需频带内的实部相对误差控制在0.08,虚部阻抗值的极值在频带端点相等,利用MATLAB对阻抗匹配网络元件参数进行计算。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta r = \left| \frac{R(f) - R_g}{R_g} \right| \leq 0.08 \\ 0 \leq I(f) \leq 0.1 \\ \text{Min} \left(\left| \frac{R(f) - R_g}{R_g} \right| \right) = \left| \frac{R(13) - R_g}{R_g} \right| \\ \text{Min}(I(f)) = I(13) \\ \text{Max} \left(\left| \frac{R(f) - R_g}{R_g} \right| \right) = \left| \frac{R(12) - R_g}{R_g} \right| = \left| \frac{R(16) - R_g}{R_g} \right| \\ \text{Max}(I(f)) = I(12) = I(16) \end{array} \right.$$

$$(12)$$

式(13)为式(12)的边界条件。由于仪器空间有限,阻抗匹配网络中电感、电容都限制在200 μH 、6 μF 以下,变压器的变比及初级电感同样进行了限制。

$$\left\{ \begin{array}{l} 12 \text{ kHz} \leq f \leq 16 \text{ kHz} \\ 5 \leq n \leq 7 \\ 0 \leq L_{i1} \leq 200 \mu\text{H} \\ 0 \leq L_{i2} \leq 200 \mu\text{H} \\ 0 \leq C_{i1} \leq 6 \mu\text{F} \\ 0 \leq C_{i2} \leq 6 \mu\text{F} \\ 0 \leq L_m \leq 600 \mu\text{H} \end{array} \right. \quad (13)$$

经过计算可得阻抗匹配网络参数如表2所示。

表2 阻抗匹配网络元件参数

Table 2 Impedance matching network component parameters

阻抗匹配元件	参数值
$L_{i1}/\mu\text{H}$	37.41
$L_{i2}/\mu\text{H}$	94.60
$C_{i1}/\mu\text{F}$	4.85
$C_{i2}/\mu\text{F}$	5.74
$L_m/\mu\text{H}$	452.34
n	6.4

为了进一步验证阻抗匹配网络参数计算的有效性,将激励电路、阻抗匹配网络以及换能器等效电路结合起来进行电路仿真测试。如图5所示为激励电路以及阻抗匹配网络仿真电路,本文所设计的激励电路采用FPGA作为主控芯片,产生四路脉冲激励信号分别控制由4个MOSFET管组成的全桥功率输出电路,并将图3(a)中换能器等效电路代入仿真。工作时,MOSFET-1、MOSFET-4与MOSFET-2、MOSFET-3交替导通,产生正负高压信号经过阻抗匹配网络及变压器后激励换能器。通过观测换能器端的有功功率来评估阻抗匹配网络效果。

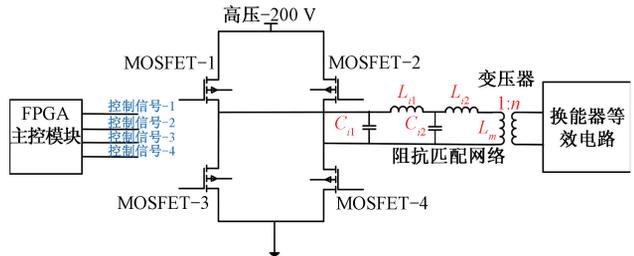


图5 阻抗匹配网络电路仿真

Fig. 5 Impedance matching network circuit simulation

从图6中可以看出,经过阻抗匹配网络后,换能器在13~16.5 kHz频带内的有功功率提高了1.8倍,并且以

半功率点为衡量标准,频带宽度扩大了2.8倍。为了进一步评估经过阻抗匹配网络后,换能器的声压、辐射声功率以及声场指向性等声学特性,将在消声水池中对实际的仪器进行声场实验。

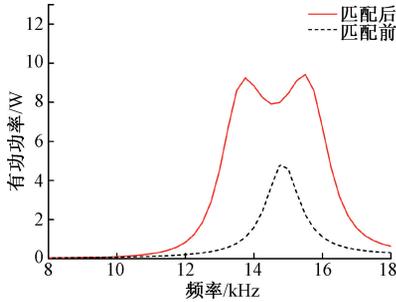


图6 阻抗匹配前后有功功率电路仿真

Fig. 6 Simulation of active power circuit before and after impedance matching

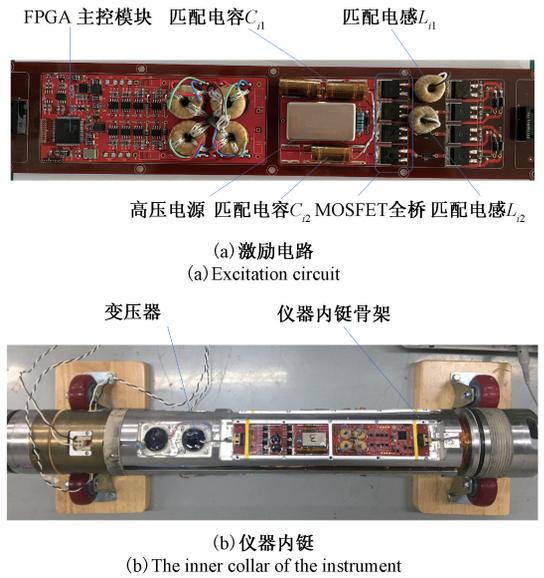
3 声场实验测试

以往的换能器阻抗匹配效果测试仅从电学特性的角度进行分析,未能结合换能器的声学特性进行综合评估,无法确认经过阻抗匹配后,换能器辐射声场强度是否得到了明显增强。因此,本文在消声水池中同时观测经过阻抗匹配后换能器实际的有功功率、辐射声压、发射电压响应等电学、声学指标,评估本文所设计阻抗匹配网络的实际效果。

如图7(a)、(b)为仪器激励电路及仪器内铤骨架,脉冲信号交替开启MOSFET全桥功率开关电路,经过阻抗匹配网络及变压器后激励换能器产生声波信号。图7(c)为随钻换能器,由4片完全相同的瓦片状压电陶瓷构成,外部由氟橡胶和环氧树脂构成以防止钻井泥浆腐蚀。图7(d)为仪器外铤,随钻换能器镶嵌在仪器外铤的凹槽内部,内铤嵌套于外铤内部。

将仪器各个模块组装好后吊装在超声水池中进行声场实验,如图8所示,控制台将仪器吊装在水池中,距离1 m处为水听器,将采集到的声波信号转换为电信号,通过示波器与控制台的计算机进行数据交互,计算声压、声辐射功率、水平指向性,控制台中还有一台功率测试仪,测量换能器的有功功率。

首先,从8~18 kHz对仪器进行扫频测试,观测阻抗匹配前后的有功功率,如图9所示,经过阻抗匹配后,换能器在12.5~16 kHz的频带内有功功率提高了1.7倍,频带宽度拓宽了3.3倍。与图6电路仿真的结果相比,实际经过阻抗匹配后,目标频带发生了约1 kHz的偏移,并且在16~17 kHz处耦合出新的谐振峰值,引起匹配目标频带偏移的原因主要有两点:1)实际的换能器工作时



(a) 激励电路

(a) Excitation circuit

变压器 仪器内铤骨架

(b) 仪器内铤

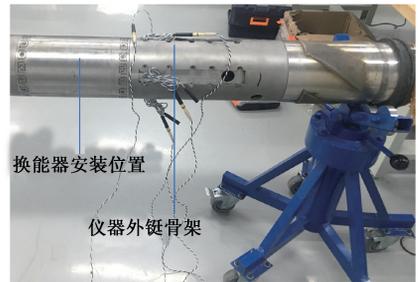
(b) The inner collar of the instrument



随钻声波换能器

(c) 随钻换能器

(c) Transducer



(d) 仪器外铤

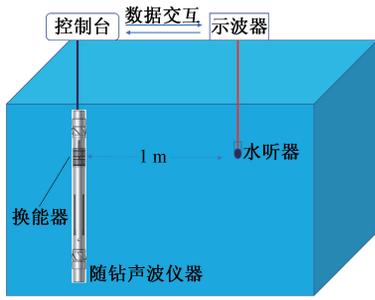
(d) The outer collar of the instrument

图7 随钻声波仪器各组件

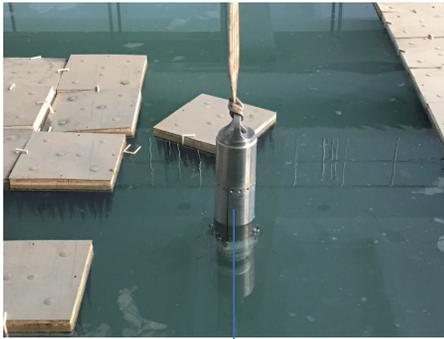
Fig. 7 Components of the sonic while drilling instrument

会有机械损耗以及阻尼,图6中的换能器等效电路无法完全表征实际换能器。2)由于换能器是一个机电转换器件,在进行水声实验时,外部水的围压会对其力学特性产生一定影响,因此会发生一定范围的频率偏移。

以13 kHz时的换能器发射电压以及水听器接收波形为例,进一步分析阻抗匹配后换能器激励电压及接收信号的变化。如图10(a)、(b)所示,经过阻抗匹配后,换能器的发射电压峰峰值增加了2倍,并且由于换能器外



(a) 声场实验示意图
(a) Schematic diagram of sound field experiment



随钻声波测井仪器
(b) 声场实验测试
(b) Sound field test

图8 消声水池声场实验

Fig. 8 Sound field experiment of anechoic pool

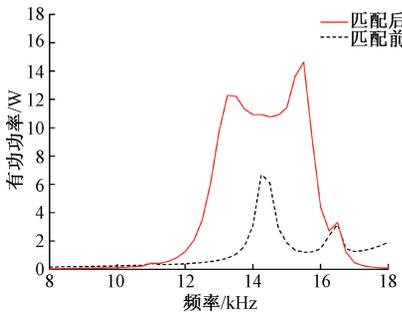
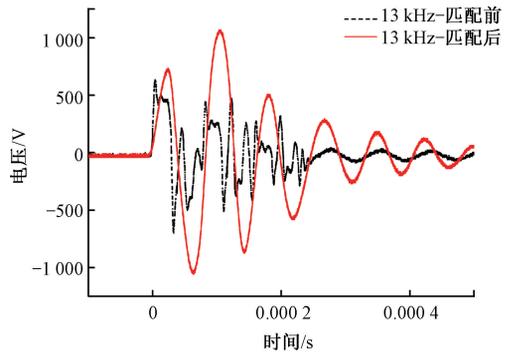


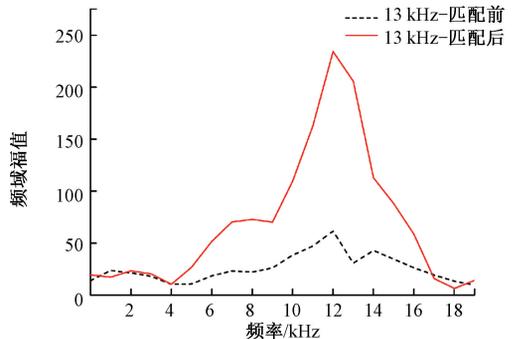
图9 换能器有功功率实验测量

Fig. 9 Experimental measurement of active power of transducer

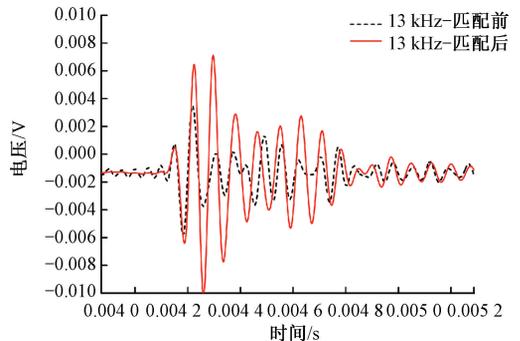
围水压的影响,未匹配时发射电压尖峰较多,这种激励信号易击穿开关电源电路的 MOSFET,阻抗匹配电路不仅增强了换能器的输入电压,还起到了滤波的作用,使得激励波形更加平滑,从发射电压的频域来看,换能器的频带的确发生了偏移,激励电压的频率为 13 kHz,然而频域的主频为 12 kHz。从图 10(c)、(d) 来看,仪器换能器经过阻抗匹配后,水听器采集到的电压信号也增强了两倍左右,这也说明换能器辐射出的声场能量的确得到了提高,频谱分析说明经过阻抗匹配后,激发频率更加集中,非常有利于随钻测井作业时仪器克服环境噪声的干扰。



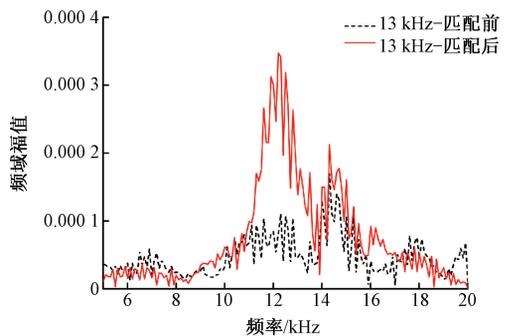
(a) 13 kHz 发射电压-时域
(a) 13 kHz transmit voltage-time domain



(b) 13 kHz 发射电压-频域
(b) 13 kHz transmit voltage-frequency domain



(c) 13 kHz 水听器接收电压-时域
(c) 13 kHz hydrophone receiving voltage-time domain



(d) 13 kHz 水听器接收电压-频域
(d) 13 kHz hydrophone receiving voltage-frequency domain

图10 13 kHz 换能器发射及水听器接收电压

Fig. 10 13 kHz transducer transmitting and hydrophone receiving voltage

通过以上对换能器阻抗匹配前后电学特性的分析,可以看出经过阻抗匹配后换能器的有功功率和频带宽度得到了提高。接下来对声学特性进行分析,如图10(a)、(b)所示,可以看出与电学特性不同的是,经过阻抗匹配后换能器的声压在10 kHz附近耦合出新的峰值,发射电压响应同样存在此现象,这说明换能器的电学特性与声学特性存在一定差异。这是因为声波是一种机械波,换能器辐射出声波后,整个空间中的波场还会受到仪器结构的影响,不同的频率成分叠加耦合后会产生多个频率峰值。但从总体来看,如图11所示,换能器的辐射声压以及发射电压响应在12~15 kHz都得到了增强,辐射声压提高1.8倍,发射电压提高5 dB。

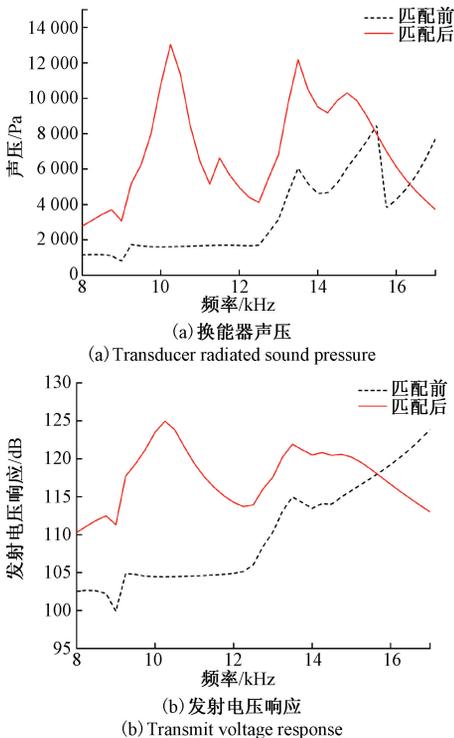


图11 换能器声压及发射电压响应

Fig. 11 Transducer sound pressure and emission voltage response

结合换能器的电学特性和声学特性,对比分析了换能器经过阻抗匹配后的有功功率、发射电压、水听器采集电压以及辐射声压和发射电压响应,印证了本文所设计阻抗匹配网络的有效性,能够有效提高换能器的有功功率及辐射声场。

4 结 论

综上,将电路网络方程以及换能器等效电路结合起来计算阻抗匹配网络元件参数能够实现换能器的宽频阻抗匹配,该方法可以根据实际需要元件参数、设计指标

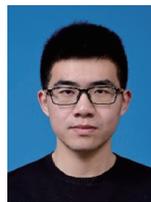
进行调整并对变压器的设计提供指导,从电路层面将仪器电路、阻抗匹配网络、变压器、换能器组成一个系统进行考虑,使得计算结构更贴合实际。以往的换能器阻抗匹配测试仅讨论电学特性,本文在声场实验中同时观测换能器的电学特性以及声学特性,实验结果表明,经过阻抗匹配后,换能器有功功率在所需频带内提高1.7倍,频带宽度拓宽3.3倍,辐射声场增强1.8倍,发射电压响应提高5 dB。从实验结果来看,换能器的声学特性与电学特性在频率响应方面存在一定差异,这主要是受到仪器结构的影响。因此,在接下来的研究中,应当充分考虑换能器与仪器之间的耦合问题,并通过电路设计和阻抗匹配研究对其进行补偿,这将是下一步工作的方向。本文的宽频阻抗匹配网络计算方法能够有效提高随钻测井仪器的发射能量及工作频带,对仪器研发和测试具有重要意义。

参考文献

- [1] WANG H, TAO G, ZHANG K. Wavefield simulation and analysis with the finite-element method for acoustic logging while drilling in horizontal and deviated wells[J]. *Geophysics*, 2013, 78(6): D525-D543.
- [2] 许玉俊,沈建国,田素月,等. 提高声波测井仪器性能的关键——换能器的频率特征[J]. *石油仪器*, 2003, 17(4): 5-7.
XU Y J, SHENG J G, TIAN S Y, 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.
- [3] JI Y, HE X, CHEN H, et al. Monopole collar wave characteristics for acoustic logging while drilling in fast formations in the frequency and spatial domains [J]. *Wave Motion*, 2019, 90: 66-81.
- [4] ZHOU H, HUANG S, LI W. Electrical impedance matching between piezoelectric transducer and power amplifier[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(23): 14273-14281.
- [5] 杨哲,鞠晓东. 压电换能器阻抗匹配研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(1): 70-74.
YANG ZH, JU X D. Impedance matching of acoustic transducer [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(1): 70-74.
- [6] 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 ZH M, ZHU Q. Study of impedance matching technology for piezoelectric transducer [J]. *Appl. Acoust*, 2007, 26(6): 357-361.
- [7] FU L, WANG D, WANG X M. Optimization of the mono-pole acoustic transducer for logging-while-drilling[J]. *Chinphyslett*, 2014 (10): 70-73.

- [8] 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 T F, ZENG J, LI H F, et al. A theorem on butterworth matching for piezoelectric ceramic emission transducer[J]. Acta Acustica, 2006, 31(4):297-304.
- [9] JYM A, JL B, JIN H. Electrical impedance matching networks based on filter structures for high frequency ultrasound transducers [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 251: 225-233.
- [10] HUANG H, PARAMO D. Broadband electrical impedance matching for piezoelectric ultrasound transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2011, 58(12): 2699-2707.
- [11] SUN G, JANSEN R H. Broadband doherty power amplifier via real frequency technique [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(1): 99-111.
- [12] 王玉江,王志斌,陈媛媛,等. AOTF-NIR 宽带功率超声换能器阻抗匹配网络的设计与优化[J]. 电子学报, 2017, 45(5):1057-1063.
WANG Y J, WANG ZH B, CHEN Y Y, et al. The design and optimization of impedance matching network based on broadband and Power ultrasonic transducer of AOTF-NIR[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1057-1063.
- [13] 艾慧,谭阳红,何怡刚,等. 自动调谐系统阻抗匹配网络解析法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(2): 283-290.
AI H, TAN Y H, HE Y G, et al. Analytical algorithm for impedance matching network of auto-tuning system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(2):283-290.
- [14] 金亮,冯时,杨庆新,等. 基于改进 NSGA-III 的电磁超声换能器多目标优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 49-59.
JIN L, FENG SH, YANG Q X, et al. Multi-objective optimization of electromagnetic acoustic transducer based on the improved NSGA-III algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 49-59.
- [15] 时亚,石文泽,陈果,等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 239-249.
SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 239-249.
- [16] 周勃,张士伟,陈长征,等. 风力机叶片多裂纹扩展声发射信号的特征识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1):110-117.
ZHOU B, ZHANG SH W, CHEN CH ZH, et al. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015,36(1):110-117.
- [17] OR S W, CHAN H L W, LIU P C K. Piezocomposite ultrasonic transducer for high-frequency wire-bonding of microelectronics devices [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 133(1): 195-199.
- [18] KAGAWA Y, TSUCHIYA T, WAKATSUKI N. Equivalent circuit representation of a vibrating structure with piezoelectric transducers and the stability consideration in the active damping control [J]. Smart Materials & Structures, 2001, 10(2): 389-392.
- [19] SONG S M, KIM I D, LEE B H, et al. Design of matching circuit transformer for high-power transmitter of active sonar [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2020, 15(5): 2145-2155.
- [20] WANG J D, JIANG J J, DUAN F J, et al. A high-tolerance matching method against load fluctuation for ultrasonic transducers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1147-1155.

作者简介



苟阳(通信作者)2019年在中国石油大学(华东)取得测试技术及仪器硕士学位。当前在中国科学院地质与地球物理研究所攻读博士学位,研究方向为海洋技术工程、换能器网络。

E-mail: Knight_gouyang@163.com

Gou Yang (Corresponding author) received his M. Sc. degree in Measurement and Control Technology from China University of Petroleum in 2019. He is currently pursuing his Ph. D. degree in Earth Exploration Technology at Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. His research interests include ocean technology and engineering, transducer technology, and networked control.



付欣,2014年在中科院声学所获得声学硕士学位。当前在中国科学院攻读博士学位,主要研究方向为声波测井。

E-mail:jessica_fx@163.com

Fu Xin received her M. Sc. degree in Acoustics from Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences in 2014. She is currently pursuing her Ph. D. degree in Geophysics at Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences. Her research interest is sonic logging.