

压电水声换能器宽带匹配特性研究

周 瑜^{1,3}, 涂其捷¹, 杨荣耀¹, 唐建生²

(1. 中国电子科技集团公司第三研究所, 北京 100015; 2. 水声对抗技术重点实验室, 北京 100094;
3. 哈尔滨工程大学, 黑龙江哈尔滨 100051)

摘要: 采用等效电路变换和多物理场有限元仿真计算进行压电水声换能器宽带匹配特性研究, 得出不同匹配电路下的换能器电声性能的变化规律, 合理选择电感电容值和串并联方式进行调谐匹配实现双峰谐振, 一方面提高换能器的工作带宽, 另一方面提高工作频率范围内的发送电压响应值并减小工作频带内响应值的起伏, 依照仿真数据设计制作了一款球形换能器, 采用串联电感进行调谐匹配, 并测试调谐匹配前后的水中电声性能, 对比匹配前后换能器性能的差异。结果表明, 测试结果和仿真计算吻合, 运用多物理场仿真计算手段对于预测分析水声换能器电声性能具有较好的指导意义。

关键词: 宽带匹配; 多物理场; 压电水声换能器

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-03-0286-06

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.03.017

Research on broadband matching performance of piezoelectric underwater acoustic transducer

ZHOU Yu^{1,3}, TU Qi-jie¹, YANG Rong-yao¹, TANG Jian-sheng²

(1. The Third Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China; 2. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Beijing 100094, China; 3. Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China)

Abstract: In this paper the equivalent circuit transformation and multi-physics field finite element simulation is used to research the characteristics of piezoelectric acoustic transducer with broadband matching performance, and the variation of electro-acoustic characteristics of the transducer with different matching circuits is obtained. By reasonably choosing the values of inductance and capacitance as well as the way of series-parallel connection, the double-humped response is achieved to broaden the working frequency range, and to improve the transmitting voltage response (TVR) and reduce the fluctuation in the working frequency range. According to the simulation data, a transducer is designed with the tuned matching using series inductance. The performance difference of the transducer before and after matching is tested. The test results are in agreement with the simulation calculation. It means that the multi-physics field simulation calculation has good guiding significance for predicting and analyzing the performance of underwater acoustic transducer.

Key words: broadband matching; multi-physics; piezoelectric underwater acoustic transducer

0 引言

宽带水声换能器在水声应用中具有重要的意义, 尤其是在水声通信中, 宽带换能器不局限于单频工作, 还可以线性调频工作, 提高信号的传输速率、提高通信的可靠性和保密性、降低误码率。通常利用多模态耦合、匹配层材料、混合激励、电学匹配等技术提高换能器的工作带宽。电学匹配技术主要是利用电感、电容组成的变阻调谐匹配网络, 一方面实现换能器与发射机的阻抗匹配, 保证换能

器达到最佳的功率输出; 另一方面实现调谐, 使换能器在工作频率点上接近纯阻状态, 减少无功分量, 提高电源的效率, 拓展工作带宽^[1-2]。

本文利用等效电路和多物理场有限元仿真分析方法, 对几种常见的压电换能器匹配电路进行研究, 推导出换能器匹配后的等效阻抗, 给出匹配参数的计算公式, 并进行相关实验。实验结果表明, 利用所得的等效公式可以精确地算出最佳匹配参数, 从而有效地提高换能器的机电转换效率, 提高工作带宽。

1 匹配电路的理论模型

通常情况下, 压电水声换能器在谐振频率附近工作时可以等效成一个 LC 电路, 如图 1 所示。图

收稿日期: 2016-12-20; 修回日期: 2017-03-20

基金项目: 水声对抗技术重点实验室基金支持

作者简介: 周瑜(1982-), 男, 吉林辽源人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为水声换能器与基阵。

通讯作者: 周瑜, E-mail: zycetc3@163.com

中 C_0 为静态电容, R_1 为动态电阻, L_1 为动态电感, C_1 为动态电容, 则换能器两端的阻抗为

$$Z = R + jX = \frac{(R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1) / j\omega C_0}{R_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1 + 1/j\omega C_0} \quad (1)$$

式(1)中, R 为换能器两端的电阻, X 为换能器两端的电抗。在机械谐振时, 电抗为 0, 此时, 谐振频率 $\omega_s = 1/\sqrt{L_1 C_1}$, 换能器等效成一个静态电容 C_0 和机械电阻 R_1 的并联。通过调谐匹配电路, 一方面减小 C_0 带来的容抗分量的影响; 另一方面获得双峰谐振。合理地调节匹配电路参数可以拓展换能器的工作带宽^[3-6]。

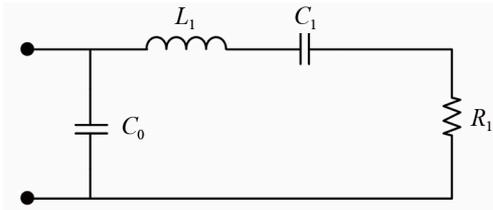


图 1 压电水声换能器等效 LC 电路

Fig.1 Equivalent circuit of the underwater acoustic piezoelectric transducer

在换能器两端接入一个电感进行调谐匹配, 按照接入方式分为并联调谐和串联调节。对于并联调谐, 如图 2 所示, 当并联电感 $L_p = 1/(\omega_s^2 C_0)$ 时, 换能器达到谐振, 电路中仅剩有功分量 R_1 , 无功分量减少, 功率传输增大。

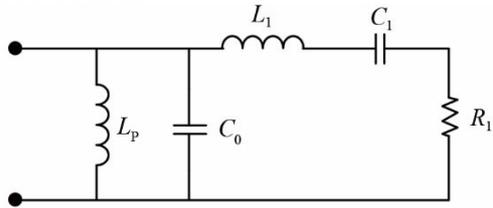


图 2 并联电感匹配等效电路

Fig.2 The matching circuit with parallel inductor tuning

在换能器一端串联一个电感 L_s , 如图 3 所示, 谐振时系统的阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} + j \left[\omega_s L_s - \frac{\omega_s C_0 R_1^2}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} \right] \quad (2)$$

此时 $L_s = C_0 R_1^2 / [1 + (\omega_s C_0 R_1)^2]$, 电路的有功分量为 $R = R_1 / [1 + (\omega_s C_0 R_1)^2]$, 小于并联调谐时的有功分量为 R_1 。

为了进一步减小有功分量, 可以在串联电感调

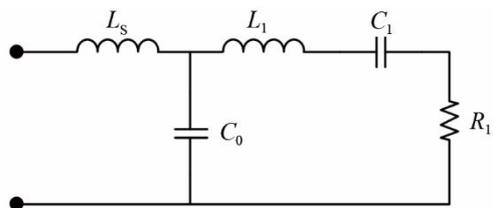


图 3 串联电感匹配等效电路

Fig.3 The matching circuit with series inductor tuning

谐的基础上并联一电容, 如图 4 所示, 谐振时系统的阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} + j \left[\omega_s L_s - \frac{\omega_s C' R_1^2}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} \right] \quad (3)$$

其中, $C' = C_0 + C_p$ 。回路中有功分量 R 进一步减少, $R = R_1 / [1 + (\omega_s C' R_1)^2]$; 回路中匹配的串联电感为 $L_s = C' R_1^2 / [1 + (\omega_s C' R_1)^2]$ 。输入回路的电品质因子 $Q_c = \omega_s L_s / R$ 为定值, 可以求解出串联电感 L_s 和并联电容 C_p 的大小。通过改变 L_s 和 C_p , 可以实现所需要的匹配效果。

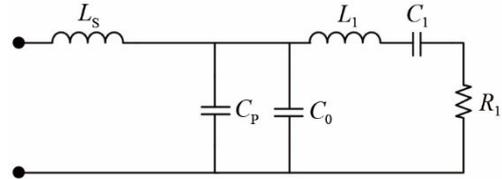


图 4 电感电容匹配等效电路

Fig.4 The matching circuit with inductor and capacitor turning

为了增加匹配电路应用的适应性, 在串联电感端串联一可变电容 C_s , 如图 5 所示, 谐振时系统的阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} + j \left[\omega_s L_s - \frac{1}{\omega_s C_s} - \frac{\omega_s C' R_1^2}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} \right] \quad (4)$$

回路中有功分量 $R = R_1 / (1 + (\omega_s C' R_1)^2)$, 匹配电感 $L_s = 1/\omega_s C_s + C' R_1^2 / (1 + (\omega_s C' R_1)^2)$, 回路的电品质因子 Q_c 得到了改善。

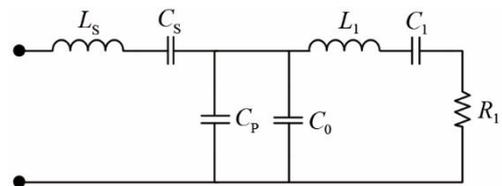


图 5 改进型电感电容匹配等效电路

Fig.5 The modified matching circuit with inductor and capacitor turning

2 压电-结构-声多物理场耦合仿真分析

利用 COMSOL 多物理场有限元仿真软件, 实现压电水声换能器的电学、声学等性能预测分析。本文以一个径向极化的压电陶瓷球作为仿真实例, 首先根据球换能器的结构特点建立一个轴对称的准物理模型, 如图 6(a)所示, 其中忽略粘接层、支撑结构、去耦结构件、电缆。其次进行物理场属性设置, 水域、透声橡胶是压力声学物理场, 赋予材料密度、声速参数; 压电陶瓷是固体力学物理场, 赋予材料弹性矩阵、压电矩阵、介电常数矩阵、密

度等参数, 由于压电陶瓷材料属于各向异性, 径向为极化方向, 因此需要指定材料坐标系, 使其与极化方向一致; 指定压电陶瓷为静电物理场。接着进行条件设置, 包括远场计算、球面波辐射、声-结构耦合、压电效应、接地、终端、电路等。在此基础上对准物理模型进行网格划分, 然后进行参数设置, 进行求解。求解之后通过后处理可以得到换能器的性能参数曲线, 包括电导纳、发送电压响应和接收灵敏度。

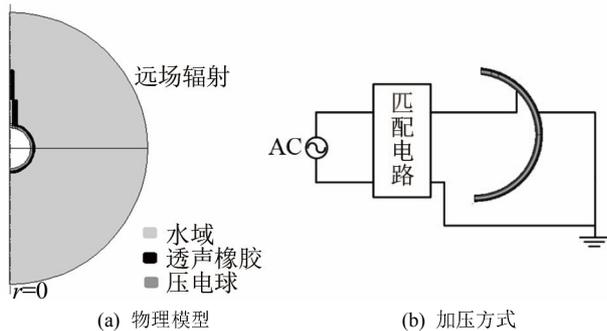


图 6 球换能器物理模型和加电方式
Fig.6 Physical model and power supply method of a spherical transducer

进行频域求解, 得到球换能器在水中的电导纳曲线、发送电压响应曲线、接收灵敏度, 如图 7~9 所示。图 7~9 给出了不加匹配电路时的球换能器在水中的电导纳、发送电压响应(Transducer Voltage Response, TVR)和接收灵敏度(Receive Voltage Sensitivity, RVS)。从电导纳曲线可以得出该球换能器在水中的谐振频率 $f_s=18\text{ kHz}$, 最大电导值 $G_{\max}=7.61\text{ mS}$, 动态电阻 $R_1=131.4\ \Omega$, 动态电感 $L_1=3.53\text{ mH}$, 动态电容 $C_1=22.15\text{ nF}$, 静态电容

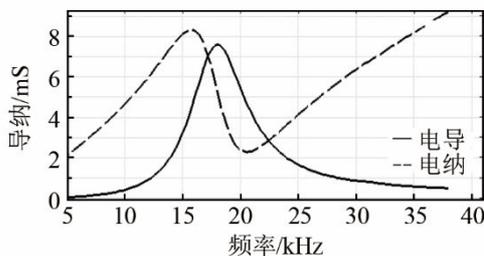


图 7 水中电导纳曲线
Fig.7 Admittance curves of the transducer in water

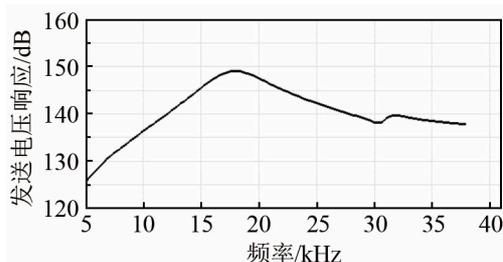


图 8 水中发送电压响应曲线
Fig.8 TVR curve of the transducer in water

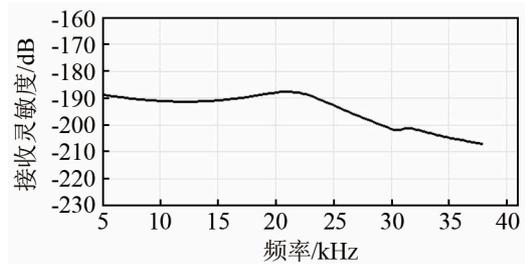


图 9 水中接收灵敏度响应曲线
Fig.9 Receiving sensitivity curve of the transducer in water

$C_0=46.67\text{ nF}$, 半功率频率点为 $f_2=21.32\text{ kHz}$, 机械品质因子 $Q_m=3.04$, $Q_e=0.69$, 有效机电耦合系数 $k_{\text{eff}}=0.59$ 。

3 宽带匹配特性研究

结合匹配电路理论模型和多物理场有限元仿真分析, 研究不同匹配电路对换能器特性的影响。

3.1 并联电感匹配

并联电感 $L_p=1/(\omega_s^2 C_0)=1.67\text{ mH}$, 得到调谐后的电导纳曲线, 如图 10 所示。由图 10 可以看出, 并联调谐不改变换能器的电导和发送电压响应。

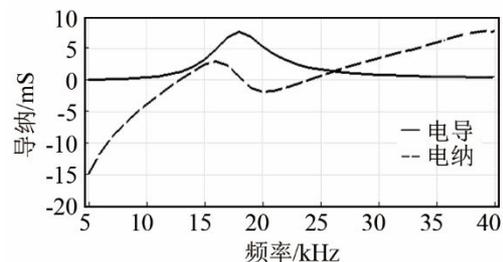


图 10 水中并联电感 L_p 调谐电导纳曲线
Fig.10 Admittance curves of the transducer with parallel inductor L_p turning in water

3.2 串联电感匹配

从上述分析结果计算得到了串联电感 $L_s=0.54\text{ mH}$, 如图 11 所示。可以看出, 串联 0.54 mH 电感后换能器出现双峰谐振, 但此时两个谐振峰的频差大, 并且阻抗差别亦大, 并没有达到预期效果。从图 12 给出的不同串联电感值下电路的阻抗曲线可

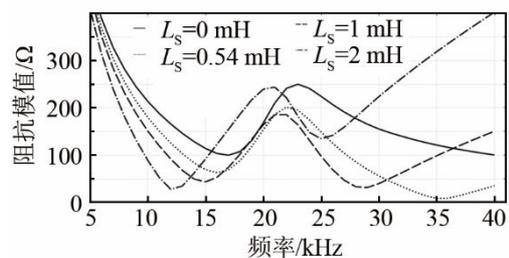


图 11 水中串联电感 L_s 调谐阻抗曲线
Fig.11 Impedance curves of the transducer with series inductor L_s tuning in water

见，串联谐振频率 f_s 、并联谐振频率 f_p 和第二峰谐振频率 f_{s2} 都随电感值的增大而降低，其中 f_s 和 f_{s2} 变化率相对更明显，有效机电耦合系数 k_{eff} 随串联电感的增加而增大，如表 1 所示。因此选择合适的电感值，可以得到预期的阻抗曲线，如选择 1 mH 电感值时，两个谐振峰的阻抗相近。

表 1 L_s 对系统性能的影响

Table 1 The influence of series inductor L_s on system performance

L_s /mH	f_s /kHz	f_p /kHz	f_{s2} /kHz	k_{eff}
0	17	23	-	0.673
0.54	16	22	35	0.686
1	15	21	29	0.699
2	12	21	25	0.820

从图 12 中的发送电压曲线上可以看出，随着 L_s 的增大，第一谐振峰频率降低，发送电压响应增大；第二谐振峰频率降低，发送电压响应减小。因此，选择合适的电感值可以让两个谐振峰的响应值趋于一致，拓展换能器的工作带宽。如选择 1 mH 电感值时，换能器两个谐振峰的发送电压响应为 154 dB，谐振峰之间凹点处的响应为 147 dB，在 13~31 kHz 的频率范围内，带内起伏为 7 dB。

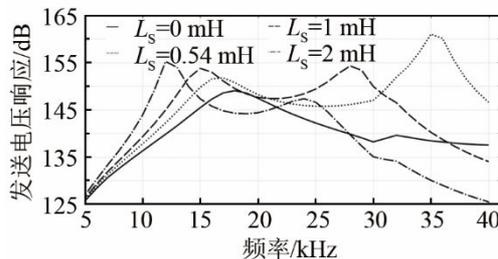


图 12 水中串联电感 L_s 调谐发送电压响应曲线
Fig.12 TVR curves of the transducer with series inductor L_s tuning in water

3.3 电容电感匹配

串联电感匹配虽然能得到两个谐振峰，但是具有一定的局限性，两个谐振峰之间的起伏可能较大。为此在换能器两端并联一电容 C_p 进行改善， C_p 对系统性能的影响如表 2 所示。如图 13 所示的阻抗随并联电容的变化曲线，可以发现，在不改变串

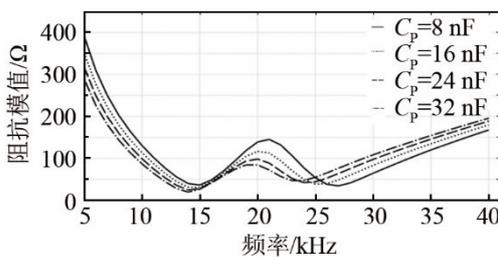


图 13 水中并联电容 C_p 匹配调谐阻抗曲线
Fig.13 Impedance curves of the transducer with parallel capacitor C_p tuning in water

表 2 C_p 对系统性能的影响

Table 2 The influence of parallel capacitor C_p on system performance

L_s /mH	C_p /nF	f_s /kHz	f_p /kHz	f_{s2} /kHz	k_{eff}
1	8	15.0	21.0	27.0	0.699
1	16	14.5	20.5	25.5	0.706
1	24	14.5	20.0	24.5	0.688
1	32	14.0	19.5	23.5	0.696

联电感的情况下，换能器的谐振频率降低，这是由于并联电容 C_p 使整体静态电容增大，从而导致谐振频率降低。

从图 14 中的发送电压曲线上可以看出，随着 C_p 的增大，第一谐振峰频率降低，发送电压响应增大；第二谐振峰频率降低，发送电压响应减小，两个谐振峰凹点处的发送电压响应增加，但所期望的频率范围内发送电压响应值的起伏略微增加，如图 14 所示。因此单方面调节 L_s 或 C_p 的值并不能达到很好的预期效果，需综合考虑。

由图 15 和表 3 可见，不同的 L_s 、 C_p 值匹配效果不同。 L_s 越大，为保证两个谐振峰响应值趋于一致，需要 C_p 越小，有效机电耦合系数 k_{eff} 越大。

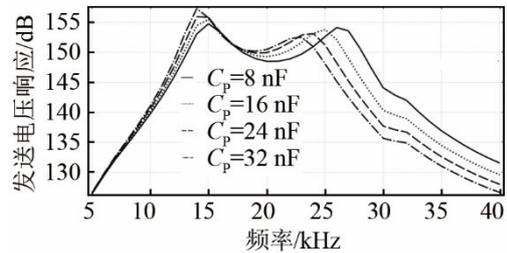


图 14 C_p 调谐发送电压响应曲线
Fig.14 TVR curves of the transducer with C_p tuning

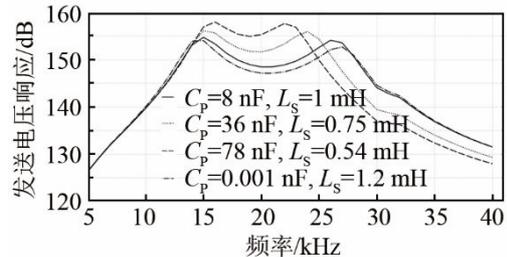


图 15 L_s 和 C_p 调谐发送电压响应曲线
Fig.15 TVR curves of the transducer with L_s and C_p tuning

表 3 L_s 、 C_p 对系统性能的影响

Table 3 The influence of L_s and C_p on system performance

L_s /mH	C_p /nF	f_s /kHz	f_p /kHz	f_{s2} /kHz	k_{eff}
1.2	0.001	14	21	27	0.745
1	8	15	21	27	0.699
0.75	36	15	20	24	0.661
0.54	78	15	19	23	0.614

3.4 改进电容电感匹配

改进电容电感匹配是在串联电感端串联一个

电容 C_s ，在不改变其他参数的情况下，随着 C_s 的增大，系统谐振频率降低，有效机电耦合系数 k_{eff} 增大，如图 16 和表 4 所示。

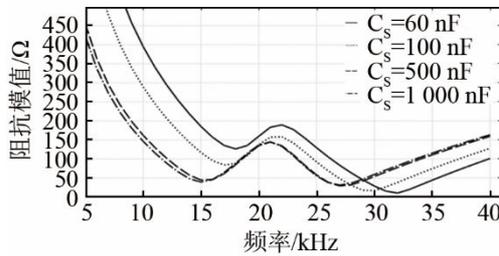


图 16 C_s 调谐阻抗曲线

Fig.16 Impedance curves of the transducer with series capacitor C_s tuning

表 4 C_s 对系统性能的影响

Table 4 The influence of C_s on system performance

L_s /mH	C_s /nF	f_s /kHz	f_p /kHz	f_{s2} /kHz	k_{eff}
1	60	18	22	32	0.575
1	100	17	22	30	0.635
1	500	15	21	27	0.731
1	1000	15	21	27	0.731

从图 17 所示的发送电压曲线上可以看出，随着 C_s 的增大，第一谐振峰频率降低，发送电压响应增大；第二谐振峰频率降低，发送电压响应减小。

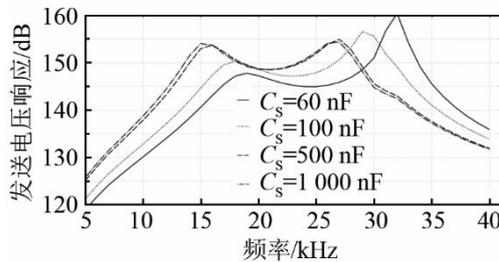


图 17 C_s 调谐发送电压响应曲线

Fig.17 TVR curves of the transducer with C_s tuning

综合考虑 L_s 、 C_p 、 C_s 匹配调谐，可以发现合理调节 L_s 、 C_p 、 C_s 可以实现宽带发射，同时 L_s 、 C_p 、 C_s 的组合选择更加灵活，如图 18 和表 5 所示。

如图 19 所示，从发送电压曲线上可以看出，要获得宽带效果，当选择的电感值大时，需选择容量小的电容。

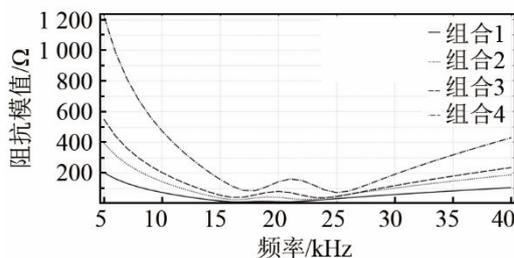


图 18 L_s 、 C_p 、 C_s 匹配调谐阻抗曲线

Fig.18 Impedance curves of the transducer with L_s 、 C_p and C_s tuning

表 5 L_s 、 C_p 、 C_s 对系统性能的影响
Table 5 The influence of L_s 、 C_p and C_s on system performance

组合方式	L_s /mH	C_p /nF	C_s /nF	f_s /kHz	f_p /kHz	k_{eff}
组合 1	0.54	140	480	17	19	0.446
组合 2	1.0	60	180	16	19	0.539
组合 3	1.3	30	120	16	20	0.600
组合 4	2.5	4.5	37	18	21	0.515

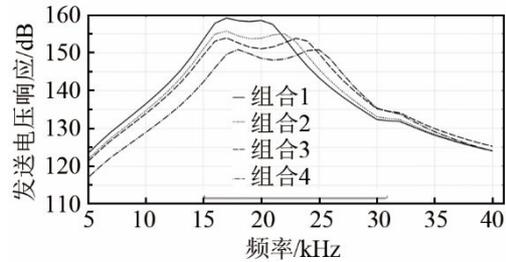


图 19 L_s 、 C_p 、 C_s 匹配调谐发送电压响应曲线

Fig.19 TVR curves of the transducer with L_s 、 C_p and C_s tuning

4 实验验证

为验证仿真计算的准确性，本实验以一个压电圆球为例，结合上述理论仿真分析，采用串联电感匹配方式，制作匹配电路，并测试换能器的发送电压响应曲线。如图 20 所示，未调谐的测试结果和多物理场仿真曲线比较吻合。

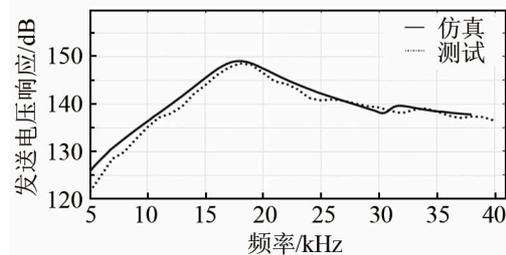


图 20 未调谐发送电压响应曲线仿真与测试对比

Fig.20 Comparison between simulated and measured TVRs without tuning

利用有限元软件进行计算，球形换能器在水中的谐振频率 $f_s=18$ kHz，动态电阻 $R_1=131.4 \Omega$ ，动态电感 $L_1=3.53$ mH，动态电容 $C_1=22.15$ nF，静态电容 $C_0=46.67$ nF，根据解析表达式 $L_s=C_0R_1^2/[1+(\omega_s C_0 R_1)^2]$ 计算可得，串联电感值为 0.54 mH。实际制作的球换能器在水中的谐振频率 $f_s=18$ kHz，动态电阻 $R_1=177.6 \Omega$ ，动态电感 $L_1=4.80$ mH，动态电容 $C_1=15.52$ nF，静态电容 $C_0=38.42$ nF。根据解析表达式 $L_s=C_0R_1^2/[1+(\omega_s C_0 R_1)^2]$ 计算可得，串联电感值为 0.76 mH。图 21 为解析计算结果、有限元计算结果和测量结果的发送电压响应曲线的对比。由图 21 可见，解析解可以得到双峰效果，但双峰频率差大，起伏大；有限元计算解和测量数据比较吻合，

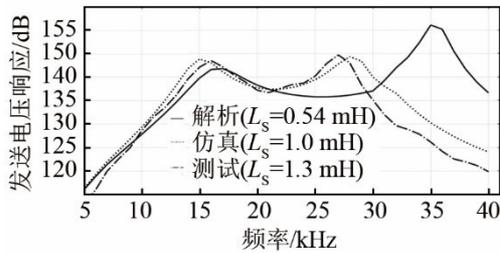


图21 调谐后发送电压响应曲线仿真与测试对比

Fig.21 Comparison between simulated and measured TVRs with tuning

匹配后换能器出现双峰谐振，两个谐振峰和之间凹点的响应值起伏为 8 dB，频率范围为 13~30 kHz。

图 21 中解析计算结果、有限元仿真结果和测试结果存在差异的原因，一方面是等效成可解析求解的理论值利用的是谐振时的等效电路参数直接计算的电感值，而有限元仿真是根据所期望要达到的双峰效果优化后的计算得到的电感值，因此两者存在差异；另一方面，测试结果是根据有限元仿真计算得到的电感值附近选择合适的数值，因此两者之间的差异较小。

测试的接收灵敏度响应曲线如图 22 所示，由图 22 可以发现，串联电感对换能器的接收灵敏度没有影响。

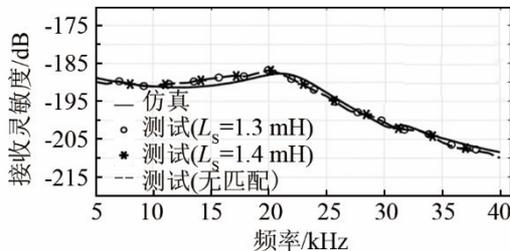


图22 接收灵敏度曲线仿真与测试对比

Fig.22 Comparison between simulated and measured receiving sensitivity curves

5 结论

通过等效电路计算和多物理场仿真分析不同匹配电路对换能器阻抗、发送电压响应等性能的影响，得出以下几点结论：

(1) 并联电感匹配可以调谐换能器，使换能器

趋于纯阻的状态工作，不改变换能器的发送电压响应；

(2) 串联电感匹配可以出现双峰谐振，合理选择电感值可以获得宽带发射效果；

(3) 电感电容匹配可以调整换能器发送电压响应的起伏，合理选择电容电感值和串并联方式，可以在一定频率范围内获得平坦的响应曲线；

(4) 电感电容匹配出现双峰谐振，当固定其中一个变量时，则随着另一个变量值的增大，第一谐振峰频率降低，对应的发送电压响应值增大，第二谐振峰频率降低，对应的发送电压响应值减小；

(5) 运用多物理场仿真计算的结果和实际测试结果相吻合，因此，该手段对于预测分析水声换能器的电声性能具有很好的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 郭林伟. 压电换能器在串并联谐振频率附近的特性研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2010, 23(3): 368-371.
GUO Linwei. Study on piezoelectric transducer working near parallel and series resonance frequency[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2010, 23(3): 368-371.
- [2] 陈航, 滕舵, 钱惠林. 宽带换能器电匹配网络设计方法[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 954-957.
CHEN Hang, TENG Duo, QIAN Huilin. Technology research on electricity matching for broadband transducer[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 954-957.
- [3] 陈友淦, 许肖梅, 雷开卓, 等. 宽带水声发射系统换能器分段匹配方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(3): 297-302.
CHEN Yougan, XU Xiaomei, LEI Kaizhuo, et al. Piecewise matching method of transducer for broadband underwater acoustic transmitter system[J]. Acta Armamentar, 2010, 31(3): 297-302.
- [4] 李建成, 唐义政, 唐军. 电感串联调谐对压电换能器电声性能的影响[J]. 声学与电子工程, 2010(1): 31-33.
LI Jiancheng, TANG Yizheng, TANG Jun. Series inductance tuning effect the performance of the piezoelectric transducer[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2010(1): 31-33.
- [5] 郭林伟, 林书玉, 许龙. 压电陶瓷换能器电感与电容匹配特性研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 39-42.
GUO Linwei, LIN Shuyi, XU Long. Study on inductance capacitance matching features of piezoelectric ceramic transducer[J]. Journal of Shanxi Normal University, 2010, 38(2): 39-42.
- [6] WANG YONGHENG, SUN DAJUN, YONG JUN. Design of Broadband Matching Circuit for Underwater Acoustic Communication Transducer[C]//ISRME, 2015.