

文章编号:1673-5005(2014)06-0054-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.008

声波测井高灵敏度宽带接收器研究

吴金平^{1,2}, 乔文孝^{1,2}, 车小花^{1,2}

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学地球探测与信息技术重点实验室, 北京 102249)

摘要:采用有限元法与实验测量相结合对可应用于声波测井的高灵敏度宽带接收器进行研究。通过 ANSYS 对接收器的优化分析表明,接收器的性能主要受陶瓷片长度和厚度的影响,减少陶瓷片长度有利于拓宽工作频带,增加陶瓷片厚度有利于提高接收灵敏度。优化后接收器的性能指标如下:接收器的工作频率为 1 ~ 30 kHz,频带内接收灵敏度平均值为 -204.85 dB,灵敏度起伏量小于 2.3 dB。在此基础上,加工制作接收器并进行实验测试,测试结果与计算结果基本吻合,证实了接收器具有高灵敏度、宽频带的特点。

关键词:声波测井;接收器;工作频率;接收灵敏度

中图分类号: P 631.63 **文献标志码:** A

引用格式:吴金平,乔文孝,车小花. 声波测井高灵敏度宽带接收器研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(6):54-60.

WU Jinping, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua. Research on high-sensitivity and wide-band receiver used in acoustic well logging[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 54-60.

Research on high-sensitivity and wide-band receiver used in acoustic well logging

WU Jinping^{1,2}, QIAO Wenxiao^{1,2}, CHE Xiaohua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology in China University of Petroleum,

Beijing 102249, China)

Abstract: Investigations on a high-sensitivity and wide-band receiver used in acoustic well logging are conducted combining finite element methods and experimental measurements. The optimization analysis on the receiver by ANSYS shows that the length and thickness of ceramic plates have major effects on the receiver performance characteristics. The operating frequency bandwidth broadens as the length of ceramic plates decreases, and the receiving sensitivity improves as the thickness of ceramic plates increases. Furthermore, the receiving performance of the optimized receiver is simulated by ANSYS, and its performance indices are obtained. In the operating frequency bandwidth from 1 kHz to 30 kHz, the average of receiving sensitivity is -204.85 dB and the sensitivity fluctuation is less than 2.3 dB. According to the optimized structural parameters of the receiver, a prototype is fabricated and measured in a water tank. The experimentally measurements are in good agreement with the calculated results, supporting the high sensitivity and wide bandwidth of the receiver.

Key words: acoustic logging; receiver; operating frequency; receiving sensitivity

目前,声波测井发射器已由单极子声源发展到了偶极子声源、四极子声源和相控阵声源,并且对这些

声源的设计和研制都进行了大量的研究^[1-8]。同样,声波测井接收器也由单极子接收器发展到了多极子

收稿日期:2013-12-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11204380,11374371,11134011,61102102);国家油气重大科技专项(2011ZX05020-009);中国石油科技创新基金项目(2013D-5006-0304);中国石油天然气集团公司项目(2011A-3903,2011B-4001)

作者简介:吴金平(1984-),男,博士,主要从事声波测井方法、换能器等方面的研究。E-mail: jpwu10@163.com。

接收器,然而对这些接收器,特别是多极子接收器的研究却少有报道。多极子接收器是多极子阵列声波测井仪最为关键部件之一,它能够以宽频带阵列式组合接收各种模式波信号。为了不失真地接收声波全波列信号或改善波形信号处理的质量,一方面要求接收器有足够的带宽以保证其有平坦的接收响应,另一方面也要求接收阵列中各接收器有良好的一致性。最新推出的三维声波测井仪器^[9]的源距不断加大,使得声波在地层中的衰减增大,所以设计出一种高灵敏度宽频带的接收器显得尤其重要。在偶极子接收器性能分析方面前人已进行了一定的探讨^[10-11],但是这些研究不够完善且难以指导实际接收器的研制。接收器最重要的性能指标是接收灵敏度和工作频率^[12-13]。在结构上对接收器进行优化设计,使之能够发挥其最佳性能以满足实际需求。笔者以接收灵敏度和工作频率为优化目标,采用 ANSYS 对可应用于声波测井的高灵敏度宽带接收器进行结构优化;根据优化方案加工制作接收器并测试其性能,最后将测试结果与计算结果进行对比分析。

1 高灵敏度宽带接收器

压电式高灵敏度宽带接收器采用双叠片式矩形板状结构,其基本结构是由两个相同的压电陶瓷片通过高温导电胶粘接而成。陶瓷片的极化方向沿厚度方向,按照陶瓷片极性连接方式不同,接收器既可以采用串联方式工作,也可以采用并联方式工作。如图 1 所示,两个陶瓷片按相同极化方向粘合在一

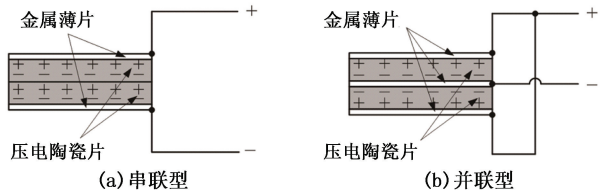


图 1 串、并联型接收器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagrams of parallel and series wired receivers

起,接收器以串联方式工作,正、负电极由粘接在陶瓷片上、下外表面的金属薄片引出;反之,两个陶瓷片按相反极化方向粘合在一起,接收器以并联方式工作,正电极由粘接在陶瓷片上、下外表面的金属薄片引出,负电极由两陶瓷片中间的金属薄片引出。串、并联工作方式对接收器的性能有较大的影响^[13],相比于并联型接收器,串联型接收器因增大了电极间的有效厚度而具有更高的灵敏度。但是,串联型接收器在其灵敏度提高的同时,也使其电容

量变小,抗干扰能力变差,因而实际声波测井仪广泛采用具有较大电容量、抗干扰能力更强的并联型接收器。接收器接收声波信号时,在入射声场的作用下,陶瓷片发生形变,并通过正压电效应在正、负电极间产生电压和电流。

声波测井声源的工作频率一般在 20 kHz 以下,高灵敏度宽带接收器的谐振基频远高于 20 kHz,其工作频率是谐振基频以下的一段较宽的频段,并且在该频段内有高的灵敏度和平坦的接收响应,可实现宽频带接收声波信号。

2 高灵敏度宽带接收器的有限元分析

2.1 接收器的流体有限元模型

并联型接收器主要由两个压电陶瓷片和三个金属薄片通过高温导电胶交替粘接而成,在有限元建模中对物理模型进行简化,忽略对接收器性能影响很小的金属薄片和粘接层。由于接收器具有良好的空间对称性,则只需建立八分之一有限元模型,这样也能节省内存资源和提高计算速度。

在 ANSYS 中创建流体中接收器的有限元模型,如图 2 所示。压电陶瓷材料选取 PbTiO_3 ,其极化方向为厚度方向, PbTiO_3 的弹性系数矩阵 c 、介电常数矩阵 e 和压电应力常数矩阵 ϵ 如下:

$$c = \begin{bmatrix} 14.17 & 3.53 & 2.59 & & & \\ & 14.17 & 2.59 & & & \\ & & 12.95 & & & \\ & & & 5.32 & & \\ & & & & 5.26 & \\ & & & & & 5.26 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2, \quad (1)$$

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & 0 & 6.90 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.58 & 0 \\ 3.58 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ N}/(\text{V} \cdot \text{m}), \quad (2)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 1.86 & & \\ & 1.86 & \\ & & 1.33 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ F/m}. \quad (3)$$

密度为 7720 kg/m^3 ;外界流体介质为水,其密度、声速和常数阻尼系数分别为 1000 kg/m^3 , 1500 m/s 和 5% 。流体介质与接收器间存在相互作用,需在它们相接触的部分施加流体——结构耦合边界条件,并将流体区域的最外层作全吸收层处理。流体区域边

界半径取为 400 mm,且满足自由场和远场条件。由于接收器不受任何位移约束,处于自由边界状态,则分析中无需对接收器加载位移约束。本文中均采用

该有限元模型进行计算,并且流体区域半径方向的网格尺寸控制在 2.5 mm 以内,这样可以保证求解精度。

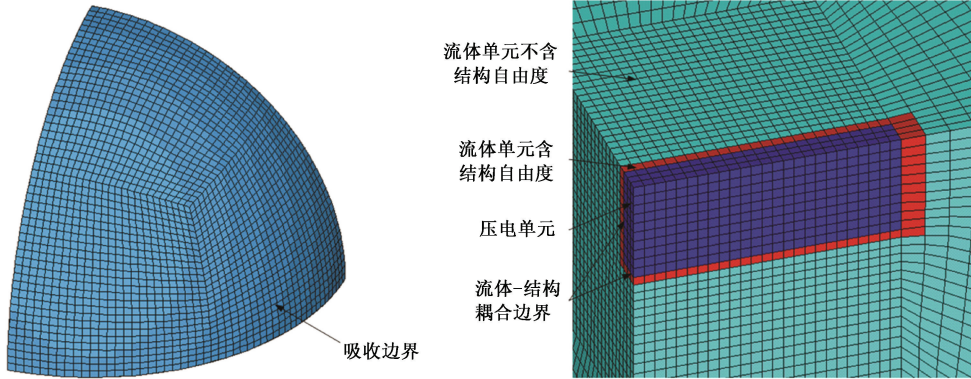


图2 接收器的八分之一流体有限元模型

Fig.2 An eighth of finite element model of receiver in fluid

2.2 接收器的结构优化设计

三维声波测井技术的发展促使接收器要进一步提高灵敏度和拓宽工作频带,以适应任意地层不同测量目的的需求。设计宽带接收器,最为关注的性能指标是接收灵敏度和工作频率,并且须将接收器的反谐振基频设计得远高于工作频率的上限频率^[12-13]。接收器的结构参数主要包括压电陶瓷片长度、宽度和厚度。在不改变接收器基本结构设计的前提下,以接收灵敏度和工作频率为优化目标,分析各结构参数对接收器性能的影响,以便优化接收器的设计方案。需特别说明的是,接收灵敏度是根据远场中接收器厚度方向对称轴上的声压数据由球面波互易原理^[12, 14]计算而来,其中基准值取为 1 V/ μPa ,接收灵敏度响应级的单位为 dB。

2.2.1 陶瓷片长度对接收器性能的影响

考察压电陶瓷片长度的变化对接收器性能指标

的影响。保持接收器的其他参数不变,仅改变压电陶瓷片长度。图3所示的是接收器的谐振基频和反谐振基频以及接收灵敏度随陶瓷片长度变化的关系曲线。从图中可以看出,随着陶瓷片长度的增加,接收器的谐振基频和反谐振基频都呈线性下降,一定程度上降低了接收器的工作频率;在频率 1 ~ 23 kHz 范围内,接收器的接收灵敏度随着陶瓷片长度的增加无明显变化;在频率 23 ~ 30 kHz 范围内,接收器的接收灵敏度随着陶瓷片长度的增加稍有下降,但降幅小于 0.5 dB;在频率 1 ~ 30 kHz 范围内,接收器的接收灵敏度上下起伏量随着陶瓷片长度的增加而增大,但最大起伏量小于 2.7 dB;接收器的最大接收灵敏度随着陶瓷片长度的增加而逐步降低,但降幅很小。由此可知,通过减小陶瓷片长度,可拓宽接收器的工作频带,但对频带内接收器的接收灵敏度无明显影响。

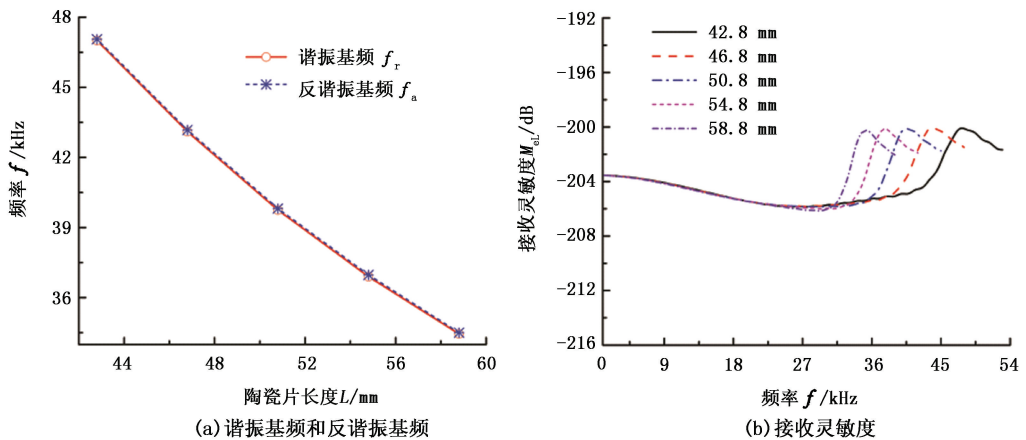


图3 接收器的性能指标随长度变化曲线

Fig.3 Changing curves of performance indices for receiver with length

2.2.2 陶瓷片宽度对接收器性能的影响

考察压电陶瓷片宽度的变化对接收器性能指标的影响。保持接收器的其他参数不变,仅改变压电陶瓷片宽度。图4所示为接收器的谐振基频和反谐振基频以及接收灵敏度随陶瓷片宽度变化的关系曲线。从图中可以看出,随着陶瓷片宽度的增加,接收器的谐振基频和反谐振基频都小幅度缓慢减小,但对接收器的工作频率影响不明显或无影响;在频率1~20 kHz范围内,接收器的接收灵敏度随着陶瓷片宽度的增加无明显变化;在频率20~37 kHz范围内,接收器的接收灵敏度随着陶瓷片宽度的增加稍

有小幅度增大,但增幅小于1.7 dB;在频率1~37 kHz范围内,随着陶瓷片宽度的增加,接收器的接收灵敏度上下起伏量减小,接收响应变得更加平坦;在频率37~45 kHz范围内,接收器的接收灵敏度随着陶瓷片宽度的增加无明显变化。所以,陶瓷片宽度的变化对接收器的工作频率和接收灵敏度均无明显的影响,但可适当增加陶瓷片宽度以获得较平坦的接收响应。实际上,陶瓷片宽度主要受可适应的井眼尺寸的限制,可充分利用井下狭小的空间将陶瓷片宽度设计得足够大,以期获得平坦的接收响应。

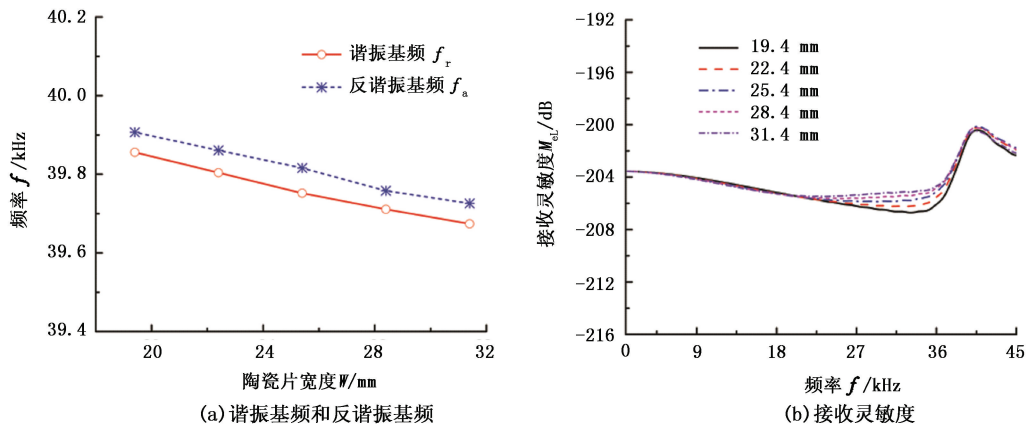


图4 接收器的性能指标随宽度变化曲线

Fig. 4 Changing curves of performance indices for receiver with width

2.2.3 陶瓷片厚度对接收器性能的影响

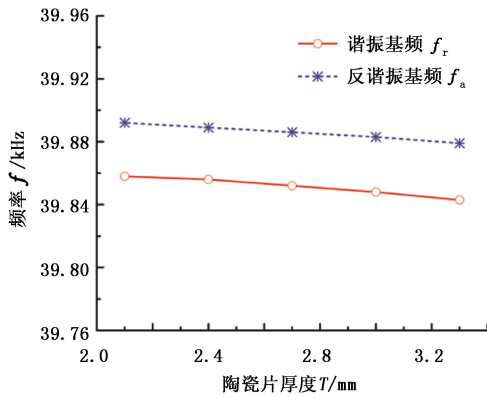
考察压电陶瓷片厚度的变化对接收器性能指标的影响。保持接收器的其他参数不变,仅改变压电陶瓷片厚度。图5所示为接收器的谐振基频和反谐振基频以及接收灵敏度随陶瓷片厚度变化的关系曲线。从图中可以看出,随着陶瓷片厚度的增加,接收器的谐振基频和反谐振基频都逐渐下降,但降幅均很小,可以认为陶瓷片厚度变化对接收器的工作频率影响不明显或无影响;随着陶瓷片厚度的增加,接收器的接收灵敏度明显增大,但增幅依次减小,因而接收灵敏度不会无限地增大;在频率1~30 kHz范围内,接收器的接收灵敏度上下起伏量随着陶瓷片厚度的增加而增大,但最大起伏量小于2.7 dB。所以,通过增加陶瓷片厚度,一定范围内可明显提高接收器的接收灵敏度,且能保持在一个较高的水平。

2.2.4 接收器的性能分析

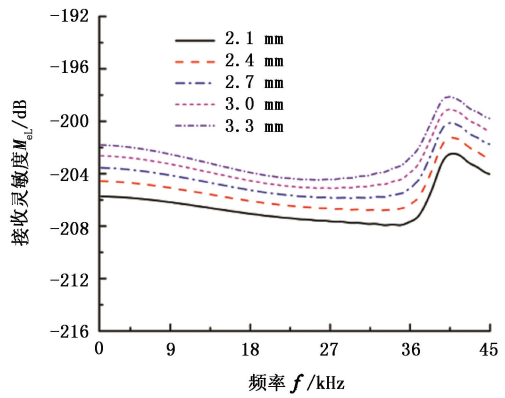
从陶瓷片长度、宽度和厚度三个方面系统分析了结构参数的改变对接收器性能的影响。陶瓷片长度对接收器的工作频率起决定性作用,选择长度较短的陶瓷片将有利于拓宽工作频带和获得平坦的接

收响应。陶瓷片宽度对接收器的工作频率和接收灵敏度均无明显影响,宽度选取主要受实际井眼尺寸的控制,可充分利用井下空间将宽度设计得足够大以获得平坦的接收响应。陶瓷片厚度主要对接收器的接收灵敏度有一定的影响,可适当地选择较厚的陶瓷片以获得高的接收灵敏度。实际设计制作中,首先依据可适应的最小井眼尺寸确定陶瓷片宽度,然后根据所设计的工作频率确定陶瓷片长度,最后通过改变陶瓷片厚度来优化接收器的性能,以获得高的接收灵敏度和宽而平坦的接收响应。

依据上述分析,优化选取了接收器的结构参数,并在流体中对优化后的接收器性能进行了分析。图6所示为接收器流体中的导纳特性曲线。从图中可以看出,流体中接收器在分析频率范围内仅存在一个谐振点,谐振基频为39.60 kHz,对应的电导值为0.019 mS,以及反谐振基频为39.65 kHz,对应的电阻值为0.114 k Ω ;在反谐振基频以下的一段频段内(如频带1~30 kHz),电导曲线比较平滑,接收器接收该频段的声波信号,可以平稳地工作于弹性控制区,这保证了接收器在该频段内有平坦的接收响应。



(a) 谐振基频和反谐振基频



(b) 接收灵敏度

图5 接收器的性能指标随厚度变化曲线

Fig.5 Changing curves of performance indices for receiver with thickness

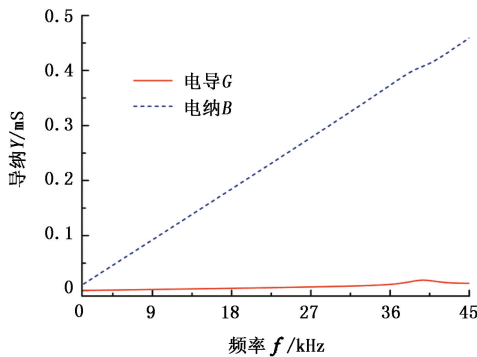


图6 接收器流体中的导纳特性曲线

Fig.6 Admittance curves for receiver in fluid

接收器的接收灵敏度响应曲线如图7所示。从图中可以看出,随着频率的增加,接收灵敏度先缓慢减小,在频率29.4 kHz附近降至最小,随后开始急剧增大,在频率40.55 kHz附近达到最大值,再开始减小;接收灵敏度的最小值和最大值分别为-205.87 dB和-200.13 dB。可见,接收器的工作频率可确定为1~30 kHz,该频带内有比较平坦的接收响应,接收灵敏度平均值为-204.85 dB,灵敏度起伏量小于2.3 dB。另外注意到,接收灵敏度最大值对应的频率与导纳特性曲线对应的反谐振基频稍有不同,这是因为灵敏度曲线是根据球面波互易原理^[12,14]计算得出的,假设声源为点声源,而实际上接收器只能在低频时近似成点声源,在高频段存在一定误差。

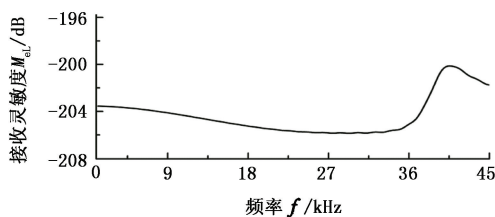


图7 接收器的接收灵敏度曲线

Fig.7 Receiving sensitivity curve for receiver

3 接收器的性能测试及结果分析

依据优化设计方案,并结合实际工艺水平,加工制作了并联型高灵敏度宽带接收器。接收器是由两个压电陶瓷片和三个金属薄片在高温下加压粘接而成,如图8所示,其中金属薄片一端突出部分主要是方便焊接于接收器承载架上以及保证接收器处于自由边界条件下。压电陶瓷片采用了改良型耐高温的PbNb₂O₆材料,金属薄片采用了低膨胀合金材料。

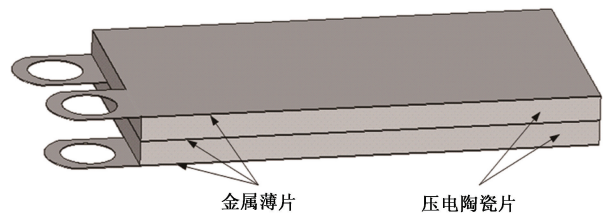


图8 并联型接收器的三维结构图

Fig.8 3-D structural drawing of parallel wired receiver

由于接收器需采用充满硅油的橡胶皮囊密封,为方便操作,首先将焊接于承载架上的接收器直接浸没于硅油中,并利用阻抗分析仪测量了其导纳特性曲线;然后在尺寸5 m×5 m×4 m的非消声实验水池中对密封好的接收器进行了接收灵敏度测量。测量方式采用与标准水听器作比较的校准方法^[12],即将接收器和已知接收灵敏度的B&K 8103水听器先后放入同一声场进行比较,并由B&K 8103水听器的接收灵敏度求得接收器的接收灵敏度。测量时,以四个周期的Burst信号激励圆管状单极子发射器,电压峰峰值为200 V;由于有限尺寸的水域限制了能校准的低频下限,为了保证换能器能够达到稳态条件,扫频范围设为4~25 kHz,步长1 kHz。图9所示为接收器在硅油中实测的导纳特性曲线。从图

中可以看出,流体中接收器在分析频率范围内仅存在一个谐振峰,谐振基频为 33.50 kHz,对应的电导值为 0.017 mS;反谐振基频为 34.40 kHz,对应的电阻值为 0.056 k Ω ;在频带 1~25 kHz 范围内,电导曲线比较平稳,起伏很小。接收器的接收灵敏度响应曲线实验测量结果如图 10 中的点划线所示。从图中可以看出,随着频率的增加,接收灵敏度缓慢地减小,频带 4~25 kHz 范围内接收灵敏度平均值为 -204.34 dB,灵敏度起伏量小于 3.04 dB。由于低频受限,无法测量到频率 1~4 kHz 范围内接收器的接收灵敏度响应值,但是从该频段内电导曲线比较平滑可以预计,工作频率 1~25 kHz 范围内接收响应也将比较平坦,频带内接收灵敏度平均值在 -204.34 dB 附近,灵敏度起伏量稍大于 3.04 dB,表明该接收器具有高灵敏度、宽频带的

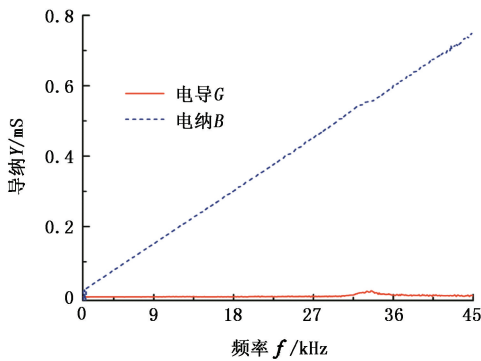


图 9 接收器硅油中实测的导纳特性曲线

Fig. 9 Measured admittance curves for receiver in silicon oil

将接收器的特性参数实际测量值与有限元计算值进行了对比,如图 10 和表 1 所示。可以看出,接收器的接收灵敏度的测量结果与计算结果吻合较好,频率 4~25 kHz 范围内测量得到的接收灵敏度平均值与频率 1~30 kHz 范围内计算得到的接收灵敏度平均值基本相近;但是,其他参数测量值均比计算值要小,其中反谐振基频测量值比计算值要相对小 13.24%,一定程度上降低了实际制作的接收器的工作频率。导致两者存在这些差异的原因可能有:有限元计算时所选用的材料参数与实际接收器的材料参数不完全一致,有限元计算时忽略了金属薄片和粘接层等,实验测量时流体介质与有限元计算情况不完全相同,同时实验测量也存在一些误差。由于频率的相对误差控制在 16% 以内,说明计算中对接收器所采取的各项简化是合理的,实际应用中能够接受。

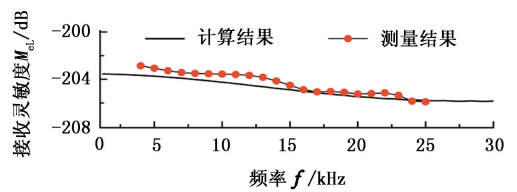


图 10 接收器的接收灵敏度曲线测量结果和计算结果对比

Fig. 10 Comparison of receiving sensitivity curves for receiver between experiment and calculation results

表 1 接收器的特性参数测量值与计算值对比

Table 1 Comparison of characteristic parameters for receiver between experiment and calculation results

| 参数值 | 谐振基频 f_r /kHz | 反谐振基频 f_a /kHz | 电导峰值 G /mS | 电阻峰值 R /k Ω | 接收灵敏度 M_{eL} /dB |
|-----|--------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| 计算值 | 39.6 | 39.65 | 0.019 | 0.114 | -204.85 |
| 测试值 | 33.5 | 34.40 | 0.017 | 0.056 | -204.34 |

4 结束语

基于有限元法对声波测井高灵敏度宽带接收器进行了结构优化,并根据优化方案加工制作了接收器。由流体模型对接收器的优化分析发现,陶瓷片长度和厚度对接收器的性能特性有较大的影响,而陶瓷片宽度对其无明显的影响;通过减少陶瓷片长度,可拓宽工作频带,以及增加陶瓷片厚度,可提高接收灵敏度。进一步通过 ANSYS 分析并得到了优化后接收器的性能指标:接收器的工作频率为 1~30 kHz,频带内接收灵敏度平均值为 -204.85 dB,灵敏度起伏量小于 2.3 dB。最后实验测试了加工制作的接收器,测试结果与计算结果基本吻合,证实了接收器具有高灵敏度、宽频带的特性。所设计制作接收器在现有声波测井仪器改进和新一代声波测井仪器研制中有良好的应用前景。

致谢 感谢鞠晓东教授、赵宏林教授、卢俊强博士、吴文河博士、门百永博士和曹雪坤等人对本文的帮助!

参考文献:

- [1] TANG X M, CHENG A. Quantitative borehole acoustic methods [M]. UK: Elsevier Academic Press, 2004:1-6.
- [2] BRIE A, MUELLER M C, CODAZZI D, et al. New directions in sonic logging [R]. Oilfield Review, 1998:40-50.
- [3] KESSLER C, VARSAMIS G L. A new generation crossed dipole logging tool: design and case histories [R]. SPE71740, 2001.

- [4] 成向阳,鞠晓东,卢俊强,等. 井下大功率多极子声波换能器激励源的设计[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(6):40-43.
CHENG Xiangyang, JU Xiaodong, LU Junqiang, et al. Design of downhole multipole acoustic transducer transmitter with high power [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(6):40-43.
- [5] 陈雪莲,乔文孝,李刚. 声波测井相控线阵声波辐射器的指向性测量[J]. 石油地球物理勘探,2003,38(6):661-665,679.
CHEN Xuelian, QIAO Wenxiao, LI Gang. Measuring directivity of phased-array acoustic transmitter in acoustic log[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003,38(6):661-665,679.
- [6] 乔文孝,鞠晓东,车小花,等. 基于圆弧阵的多极子声波测井辐射器[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):33-36, 41.
QIAO Wenxiao, JU Xiaodong, CHE Xiaohua, et al. Multipole acoustic logging transmitter structured by annular array [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(5):33-36, 41.
- [7] 乔文孝,车小花,鞠晓东,等. 声波测井相控圆弧阵及其辐射指向性[J]. 地球物理学报,2008,51(3):939-946.
QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua, JU Xiaodong, et al. Acoustic logging phased arc array and its radiation directivity [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008,51(3):939-946.
- [8] WU J P, QIAO W X, CHE X H, et al. Experimental study on the radiation characteristics of downhole acoustic phased combined arc array transmitter [J]. Geophysics, 2013,78(1):D1-D9.
- [9] PISTRE V, KINOSHITA T, ENDO T, et al. A modular wireline sonic tool for measurements of 3D (azimuthal, radial, and axial) formation acoustic properties [C]. New Orleans, USA: SPWLA 46th Annual Logging Symposium, 2005:26-29.
- [10] 李玉霞,贾长雨,秦玉坤,等. 偶极子声波接收换能器[J]. 石油仪器,2005,19(6):20-21.
LI Yuxia, JIA Changyu, QIN Yukun, et al. A dipole acoustic receiving transducer [J]. Petroleum Instruments, 2005,19(6):20-21.
- [11] 李世平,唐炼,丛健生. 叠片型多极子阵列声波测井仪接收换能器灵敏度分析[J]. 测井技术,2012,36(6):620-623.
LI Shiping, TANG Lian, CONG Jiansheng. Finite element analysis of receiving transducers for multipole acoustic array logging tool [J]. Well Logging Technology, 2012,36(6):620-623.
- [12] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器与换能器阵[M]. 修订版. 北京:北京大学出版社,2005:326-336.
- [13] SHERMAN C H, BUTLER J L. Transducers and arrays for underwater sound [M]. New York: Springer, 2007:152-173.
- [14] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用[J]. 声学技术,2007,26(6):1279-1290.
MO Xiping. Simulation and analysis of acoustics transducers using the ANSYS software [J]. Technical Acoustics, 2007,26(6):1279-1290.

(编辑 修荣荣)