

· 研究报告 ·

正交偶极声波测井换能器有限元分析*

付琳[†] 王东 王秀明

(中国科学院声学研究所 声场与声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要 三叠片型换能器是正交偶极声波测井仪器的重要组成部分。换能器的性能直接影响声波测井数据的质量。本文在前人工作基础上,针对三叠片型声波测井发射换能器长度方向的一阶弯曲振动工作模式,利用有限元方法,模拟了换能器结构尺寸和边界条件变化对换能器性能的影响。结果显示,结构尺寸和边界条件对换能器的谐振频率和电导值均有不同程度的影响。参考数值模拟结果,选取合适的结构尺寸参数和边界固定方式,可以调整和选择正交偶极声波测井仪器发射换能器工作频率和最大发射效率。本文研究结果对三叠片型换能器的优化设计有较好的指导意义。

关键词 三叠片型换能器,谐振频率,电导值

中图分类号: P631.52, O429

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2014)03-0245-07

DOI:10.11684/j.issn.1000-310X.2014.03.008

Analyses of cross-dipole acoustic well logging transducers based on finite element method

FU Lin[†] WANG Dong WANG Xiuming

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Sandwich transducers are important parts of a cross-dipole acoustic logging tool. The performance of the transducers directly affects the quality of acoustic logging data. Aimed at the first longitudinal bending vibration mode of a sandwich transducer, the influence of structure sizes and boundary conditions of the transducer on the performance parameters was simulated numerically using finite element method. The results show that structure sizes and boundary conditions affect the resonance frequency and conductance differently. According to the numerical simulation, the proper working frequencies and highly efficient radiation performance which satisfy the cross dipole logging can be obtained by choosing adequate structure sizes and boundary conditions. Numerical simulation results serve as a good guidance on the optimization design for the sandwich transducers.

Key words Sandwich transducers, Resonance frequency, Conductance

2013-06-17 收稿;2013-06-30 定稿

* 国家自然科学基金重点资助项目(11134011)

作者简介:付琳(1987-),女,湖南涟源人,博士研究生,研究方向:声波测井换能器的优化设计。

王东(1968-),男,研究员。

王秀明(1962-),男,研究员。

[†] 通讯作者:付琳, E-mail:fulin1987528@163.com

1 引言

随着油气勘探开发的不断深入,现场测井所面临的问题日益突出。研究地层的各向异性,可以更好地了解地层裂缝的发育情况、分析地应力,为裂缝性储层评价、井眼稳定性评价及指导井下压裂酸化等提供帮助。正交偶极声波测井技术通过测量地层的弯曲波来确定地层的横波,克服了软地层中无法准确测量横波的限制^[1-3];偶极子波所具有的明显偏振特性,可用来有效地评价地层的各向异性,确定天然裂缝的方位^[4-6]。正交偶极声波测井仪器关键部件是低频、小体积、高温、高压声学测井换能器,而三叠片型换能器是目前使用较为普遍的发射换能器类型^[7]。

对矩形叠片式弯曲振子,前人采用不同的方法进行了理论分析^[8-9],文献[8]从力平衡的角度分析了单片薄板的弯曲振动,文献[9]将薄板的弯曲振动简化为两个矩形截面细棒弯曲振动的组合,在一定的近似条件下,推出了矩形薄板压电陶瓷振子弯曲振动的共振频率方程。对三叠片弯曲振子,由于金属基片材料、长度与压电陶瓷片的差异,用解析方法分析面临困难,更多地采用基于有限元法的仿真计算分析。文献[10]研究了弯曲振子基片结构尺寸、弹性系数和介质声阻抗对谐振频率影响,文献[11]研究了弯曲振子的振动模态和频率响应受其结构边界条件的影响,均针对圆弧阵结构的压电振子。针对正交偶极声波测井发射换能器,文献[12]探讨了换能器结构参数对谐振频率和辐射效率的影响,考虑了结构参数在较小范围内的变化,给出了一定范围内的影响变化趋势。

在实际的声波测井中,则需要频带较宽、发射频率较低(如小于 1.0 kHz)、发射效率和发射功率较大的弯曲模式换能器,以满足超软地层中的横波测量,而这些技术问题并没有得到很好的解决。

针对以上实际需求,本文采用目前较为通用的有限元软件 ANSYS^[13],对用于正交偶极声波测井仪器的三叠片型发射换能器进行了数值仿真,并探讨了换能器结构尺寸和机械边界条件对其频率特性和发射效率的影响。本工作将为研发宽频带、低频、大功率声波测井发射换能器提供有益的理论参考和技术依据。

2 换能器有限元仿真

2.1 换能器结构简介

弯曲振动是压电晶体振动的重要模式之一,比单一伸缩振动模式更为复杂,分析上也更困难。研究人员采用压电振子,成功研制出具有弯曲振动特性的、小体积、低频的换能器。叠片式的压电陶瓷弯曲振动换能器主要包括圆形及矩形两种主要结构形状,如引言中所述,在声波测井领域,弯曲振动压电陶瓷换能器常用于偶极子发射换能器,一般采用矩形叠片结构,即把两个厚度相同、背有电极的压电陶瓷片黏接在一起,产生弯曲振动;也可以用两个压电陶瓷片黏合在一金属基片上,或者用一个压电陶瓷片与一个薄金属片黏合在一起,来产生弯曲振动模式^[14]。

本文研究的换能器,是由两片长度、宽度、厚度均相同的矩形压电陶瓷片黏接在一个长度相对较长金属基片的两个面上构成的,如图 1 所示。两片压电陶瓷片极化方向相同,均为厚度方向。压电陶瓷片电路上并联,在外加电压信号的激励下,某一时刻一侧的压电陶瓷片伸长,另一侧的压电陶瓷片缩短,从而引起换能器做弯曲振动并对外辐射声波能量。金属基片常被延伸到压电陶瓷片以外,实现换能器边界支撑和固定。

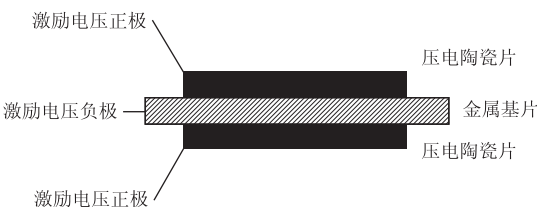


图 1 三叠片型测井发射换能器基本结构示意图
Fig. 1 Structure of sandwich well logging transducer

2.2 换能器有限元模型

在有限元软件 ANSYS 环境下建立换能器有限元模型,具体步骤是:(1)先对换能器的物理模型进行简化得到其几何模型;(2)通过输入材料参数、单元类型、划分网格等形成换能器的有限元模型;(3)选择合适的求解器求解;(4)依据求解计算结果文件中的相关输出参量,分析得到换能器频率特征和振动模态。

本文算例中,压电陶瓷片材料选取 PZT-5A,长

102 mm,宽 38 mm,厚 3.5 mm,极化方向为厚度方向;金属基片材料为硬铝,长 192 mm,宽 38 mm,厚 3.2 mm。描述压电材料的参数包括介电常数、压电矩阵、弹性系数矩阵和密度,本文计算采用了参考文献[12]的参数。实际工作中的换能器在其金属基片上打了圆孔,以使用螺栓将其固定于声系骨架上,为了更准确的模拟实际换能器结构及其工作状态,本文中的有限元模型做了圆孔和倒圆角的处理,倒角半径 4 mm,圆孔半径 2 mm,打孔圆心到宽度边的距离 7 mm,距长度边最近的圆孔的圆心到长度边距离 7 mm,两孔圆心之间的距离 8 mm,每侧打四个孔。在模拟计算中,对圆孔的内边界面上的节点施加 x 、 y 、 z 方向的位移约束 $UX=0$ 、 $UY=0$ 、 $UZ=0$,即钳定边界条件。由于换能器结构具有对称性,本文中只建立四分之一有限元模型,以节省内存资源,提高计算速度。本文计算中,重点考虑换能器工作频率在 1 kHz 左右的振动模态。在空气介质中,声波波长大约为 0.3 m,当声波波长与单元边长之比大于 10 时,有限元方法的计算误差可控制在 2% 以内^[15],本文划分有限元单元边长为 2 mm。有限元模型如图 2 所示。图 2(a)是未经处理的有限元模型,图 2(b)是金属基片经圆孔和倒角处理后的有限元模型。

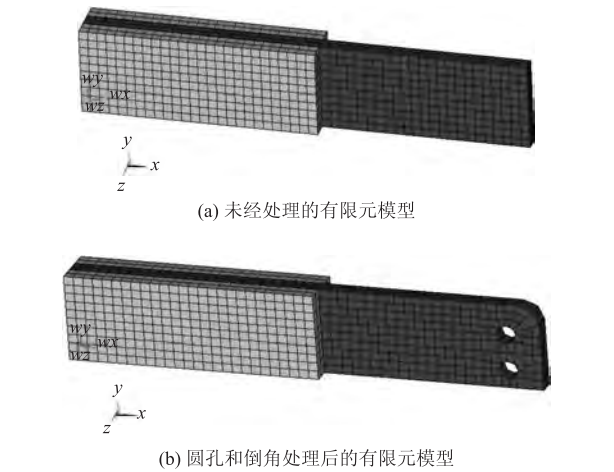


图 2 三叠片型换能器有限元模型(四分之一)示意图
Fig.2 Quarter finite element model of sandwich transducer

2.3 换能器基频振动特性分析

由于换能器实际工作时是用螺栓固定于声系骨架上的,螺栓固定的位置为钳定状态。数值模拟时,重点考虑这种钳定的边界条件,实际上,这种边界条件是近似的,而严格意义上,其应为带负载的

边界条件。

图 3 显示的是 0.1 kHz ~ 1 kHz 范围内,换能器在空气中的导纳曲线模拟计算结果,图中谐振峰应为长度方向上一阶弯曲振动模态,频率为 483 Hz (金属基片经过处理后),而在空气中实验样片的测量值为 533 Hz,数值计算结果与实验样片测量值偏差为 9.30%。未经处理的有限元模型数值计算结果是 382 Hz,与实验样片测试值偏差为 28.3%。可见,处理后的有限元模型与实际换能器测试结果更为接近;初步计算分析认为,数值计算结果和实验样片测量值之间的差别,是由于数值计算没有考虑实验样片结构中陶瓷和金属基片之间的胶层影响造成的。图 4 是换能器一阶弯曲振动时表面的位移振幅矢量图,从图中可以看到,换能器中心处的位移振幅最大,螺栓钳定处的位移振幅为零,位移矢量均沿厚度方向。

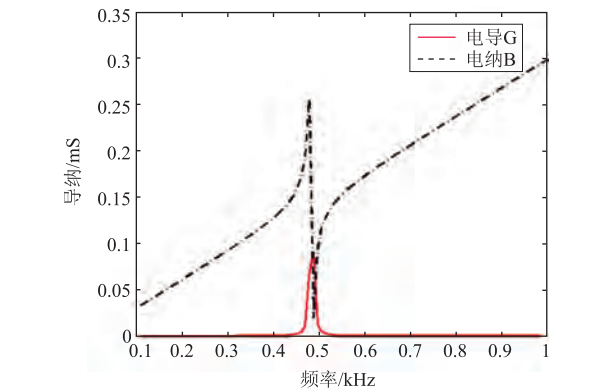


图 3 三叠片型换能器导纳曲线的模拟计算
Fig.3 The numerical admittance curve of sandwich transducer

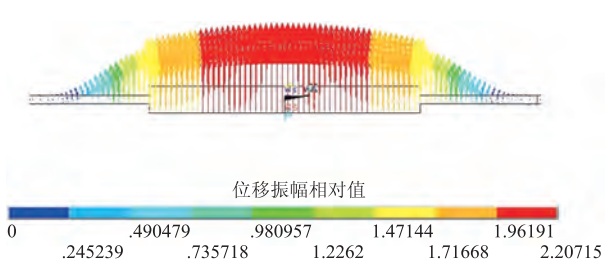


图 4 换能器表面位移振幅矢量图的模拟计算
Fig.4 The numerical displacement amplitude vector

3 换能器结构尺寸变化对性能的影响

当板的厚度远小于其长度和宽度时,由文献[9]中的共振频率方程,经推导可知,矩形薄板两对

边钳定,两对边自由情况下的弯曲振动共振频率由下式决定

$$f_{ij} = \frac{c_r R \pi}{2 \sqrt{1 - \nu^2}} \left(\frac{i^2}{L^2} + \frac{j^2}{W^2} \right), \tag{1}$$

其中: $c_r = \sqrt{\frac{1}{S_{11}^E \rho}}$, $R = \frac{H}{\sqrt{12}}$, $\nu = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$, S_{11}^E 和 S_{12}^E 为板的弹性柔顺常数, ρ 为板的体密度, R 是截面回转半径, H 是板的厚度, L 和 W 分别为板的长度和宽度, 正整数 i 与 j 的不同组合表示薄板的各种振动模式。

本文研究长度方向的一阶弯曲振动,故 $j = 0$, 而 $i = 1$, 共振频率表达式可写成

$$f_1 = \frac{c_r R \pi}{2 L^2 \sqrt{1 - \nu^2}}. \tag{2}$$

金属基片两端固定时,经估算基频频率约为 0.4 kHz;两个压电陶瓷片粘结在一起、两端固定时,估算基频频率约为 2.5 kHz。

有限元计算基频频率为 483 Hz,在金属基片的共振频率附近,因此,三叠片弯曲振子基频共振主要是由金属基片引起的,谐振频率和发射效应主要受金属基片的结构尺寸和材料参数影响,从共振频率表达式中看出,谐振频率同时也受长度和厚度变化的影响。本文重点研究结构尺寸对换能器性能的影响。

换能器的电导值越大,则表明振子内部损耗越小,用于发射的功率越大,因此,可以通过计算换能器电导值的大小,间接地评价衡量换能器发射效率的大小。

3.1 压电陶瓷片长度变化对换能器性能的影响

在不改变换能器其他结构参数的情况下,仅改变压电陶瓷片的长度,可考察长度参数变化对换能器性能的影响。本文分别计算了压电陶瓷片长度是金属基片长度的 40%、50%、60%、70%、80%、85% 条件下的六种情况。图 5 是不同压电陶瓷片长度的换能器电导曲线模拟计算结果,从图中可以看出,随着压电陶瓷片长度与金属基片长度的接近,换能器的谐振频率先增大,后保持不变;电导值先增大后减小。参考文献[16]中的结论是随着压电陶瓷片长度的增加,压电振子的谐振频率和表面位移振幅均增大。这个结论是在压电陶瓷片长度是金属基片长度的百分之六十以下,且长度变化范

围比较小的情况下得到的。本文的结论是,在压电陶瓷片的长度不大于基片,且压电陶瓷片长度的变化范围较大的情况下得到的,是对参考文献[16]中结果的进一步完善。

计算表明,当压电陶瓷片长度是金属基片长度的 80% 时,可达到较大的发射效率。

压电陶瓷长度的增大引起的谐振频率升高原因是,一方面,压电陶瓷片长度的增大减小了金属基片长度方向上满足自由边界的长度,导致基片 L 弯曲振动的有效长度减小,从基频表达式中可知谐振频率增大,另一方面,压电陶瓷片长度的增大导致了三叠片振子等效刚度增大,谐振频率升高。长度增大使激励电极面积增大,发射效率增大。

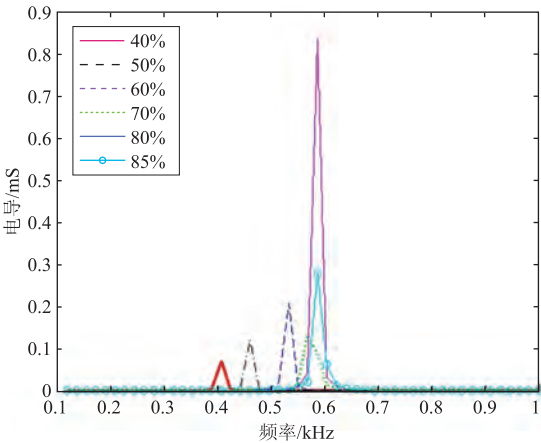


图 5 不同压电陶瓷片长度条件下换能器电导曲线的模拟计算

Fig. 5 The numerical conductance of transducer with different length of ceramic plate

3.2 换能器宽度变化对换能器性能的影响

保持换能器的基本结构不变,在不改变换能器其他结构参数情况下,同时改变压电陶瓷片和金属基片的宽度,考察了对换能器性能的影响。本文分别计算了换能器宽度是金属基片长度的 20%、40%、50%、60%、80% 条件下的五种情况。图 6 是不同宽度换能器的电导曲线模拟计算结果。图中显示,随着换能器的宽度与金属基片长度的接近,换能器的谐振频率向低频漂移;电导值基本呈现增大的趋势。计算也表明,换能器设计时可选择换能器宽度是金属基片长度的 80% 或以上,这将获得较大的发射效率。但考虑实际换能器宽度受到声系骨架径向尺寸的影响,宽度尺寸应结合具体的仪器结构,进行综合考虑。

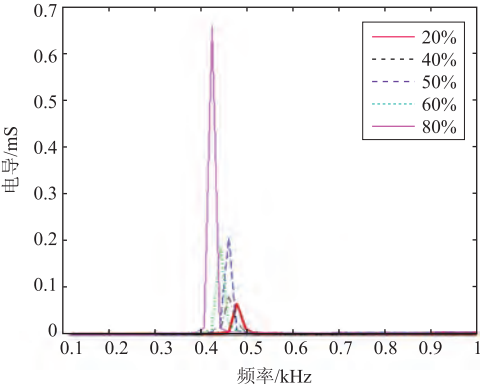


图 6 不同宽度换能器电导曲线的模拟计算
Fig. 6 The numerical conductance of transducer with different width

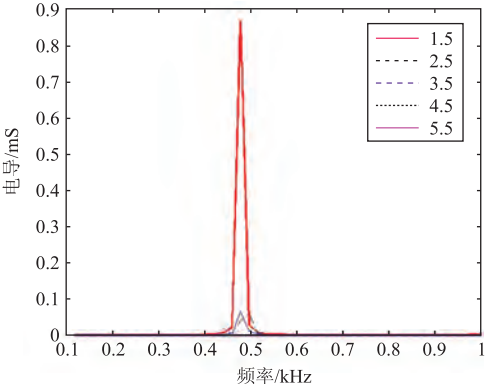


图 7 不同压电陶瓷片厚度换能器的电导曲线模拟计算
Fig. 7 The numerical conductance of transducer with different thickness of ceramic plate

从共振频率表达式(2)看,振子宽度变化不影响基频谐振频率,模拟计算中频率的变化可能是由于,在打孔圆心尺寸一定的情况下,宽度变化导致打孔个数发生变化,此时不只宽度一个因素变化,边界条件也发生了变化,这种边界条件的变化会使长度方向的有效尺寸变化,进而导致频率改变。

3.3 换能器厚度变化对换能器性能的影响

研究厚度对换能器性能的影响可分为三方面:压电陶瓷片厚度变化对换能器性能的影响,金属基片厚度变化对换能器性能的影响,压电陶瓷片和金属基片厚度同时变化时对换能器性能的影响。

首先,在不改变换能器其他结构参数的情况下,仅改变压电陶瓷片的厚度,考察了对换能器性能的影响。本文分别计算了压电陶瓷片厚度是 1.5 mm, 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm, 5.5 mm 条件下的五种情况。图 7 是不同压电陶瓷片厚度的换能器的电导曲线模拟计算结果。可以看出,随着压电陶瓷片的厚度的增大,换能器的谐振频率基本保持不变;电导值先急剧减小,但当其厚度大于 2.5 mm 后基本保持不变。

其次,在不改变换能器其他结构参数的情况下,仅改变金属基片的厚度,考察了对换能器性能的影响。本文分别计算了金属基片厚度是 2.2 mm, 3.2 mm, 3.5 mm, 4.2 mm, 5.2 mm 条件下的五种情况。图 8 是不同金属基片厚度换能器的电导曲线模拟计算结果。从图 8 中可以看出,随着金属基片厚度的增大,换能器的谐振频率增大;电导值先增大后减小,当金属基片和压电陶瓷片厚度相等时,电导值最大,即发射效率最大。

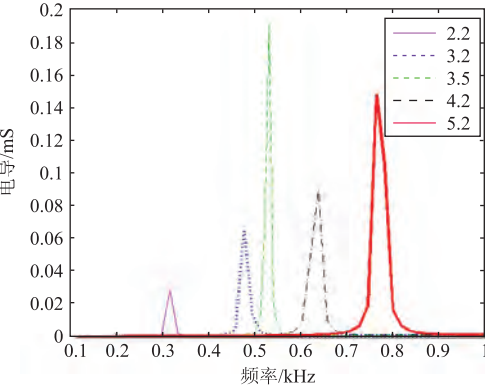


图 8 不同金属基片厚度换能器的电导曲线模拟计算
Fig. 8 The numerical conductance of transducer with different thickness of metal plate

第三,在不改变换能器其他结构参数的情况下,同时改变压电陶瓷片和金属基片的厚度,考察了对换能器性能的影响。本文分别计算了压电陶瓷片和金属基片的厚度同时变化的情况:减小 2 mm, 减小 1 mm, 增加 1 mm, 增加 2 mm 的四种情况。图 9 是对应的电导曲线计算结果。可以看出,随着压电陶瓷片和金属基片的厚度的同时增大,换能器的谐振频率增大,电导值有明显变化。

三叠片弯曲振子基频主要由金属基片几何尺度决定,压电陶瓷片厚度的增大对基频几乎没有影响,而金属基片厚度的增大将导致换能器基频频率增大,与理论分析相符合。

3.4 圆孔的大小及倒角半径对换能器性能的影响

换能器两侧圆孔越大,等效于减小金属基片长度,弯曲振动谐振频率会升高,在压电陶瓷片长度不大于金属基片长度的 80% 时,圆孔增大,发射效

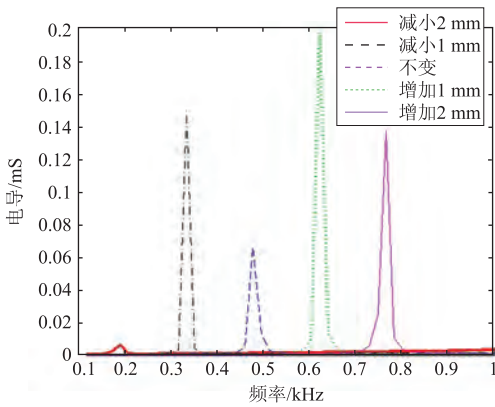


图9 不同厚度换能器的电导曲线模拟计算
Fig.9 The numerical conductance of transducer with different thickness

率增大。因倒角半径只能在很小范围内变化,由此引起的基片等效长度变化也很小,所以对换能器的谐振频率和发射效率影响都很小,只是在高频时倒角处会出现应力集中。而该换能器主要应用在低频,因此本文没有研究倒角半径变化引起的换能器性能的变化。

4 换能器边界条件变化对换能器性能的影响

在不改变换能器其他结构参数的情况下,改变螺栓的固定位置,可考察边界条件对换能器性能的影响。计算时,设定打孔圆心距几何中心距离分别为93 mm,91 mm,89 mm,87 mm,85 mm。图10是这五种情况下对应的电导曲线模拟计算结果。从图中可以看出,随着打孔位置向换能器几何中心靠近,谐振频率增大;而电导值变化规律不明显,但当打孔圆心距几何中心距离小于等于87 mm时,能够达到较大的电导值。

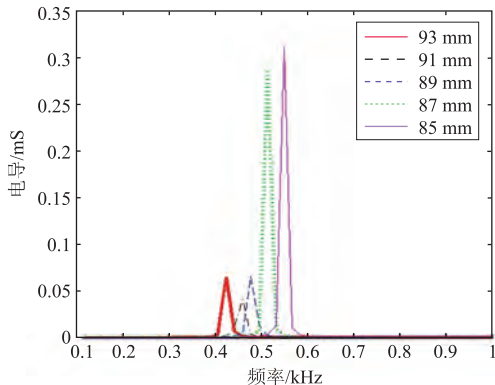


图10 不同的边界条件下换能器的电导曲线模拟计算
Fig.10 The numerical conductance of transducer with different boundary conditions

金属基片上打孔位置向几何中心靠近,相当于减小了金属基片的长度,弯曲振子基频谐振频率增大。

5 讨论与结论

本文利用有限元方法数值模拟了用于正交偶极声波测井仪器的、三叠片型发射换能器的振动特性,探讨了换能器结构尺寸和边界条件对其工作性能的影响。研究表明,换能器的一阶弯曲振动模态主要受金属基片结构尺寸和边界条件的影响,且影响程度不同。在满足正交偶极声波测井要求的前提下,可通过增大金属基片长度或减小金属基片厚度使换能器谐振频率降低,在压电陶瓷片长度不大于金属基片长度的80%时,减小金属基片长度,或使金属基片厚度与压电陶瓷片厚度相等来增大换能器发射效率。

当然,降低换能器的谐振频率和增大换能器的电导值是相互关联的,在换能器实际设计时,要结合实际工程需求,综合权衡选择。

参 考 文 献

[1] WHITE J E. Computed response of an acoustic tool[J]. Geophysics, 1968, 33(2): 302-310.
[2] WINBOW G A, A theoretical study of acoustic S-wave and P-wave velocity logging with conventional and dipole sources in soft formations[J]. Geophysics, 1988, 53(10): 1334-1342.
[3] 唐晓明,郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
[4] 楚泽涵,高杰,黄隆基,等. 地球物理测井方法与原理[M]. 北京:石油工业出版社,2007.
[5] 徐忠清,陈草堂,罗学东,等. 偶极子声波的正交原理及其在地层评价中的应用[J]. 石油仪器,2009,23(5): 62-64.
XU Zhongqing, CHEN Caotang, LUO Xuedong et al. The principle of cross dipole wave and the application in formation evaluation[J]. Petroleum instruments, 2009, 23(5): 62-64.
[6] 沈建国. 声波测井原理与技术[M]. 北京:石油工业出版社,2009.
[7] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京:科学出版社,2004.
[8] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 第2版. 北京:人民教育出版社,1982.
[9] 林书玉. 压电陶瓷矩形薄板振子的弯曲振动研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),1997,25(1): 39-43.
LIN Shuyu. On the bend vibration of thin rectangular piezoelec-

tric ceramic plate [J]. J Shanxi Normal University, 1997, 25(1): 39-43.

[10] 陈雪莲, 鲍文刚. 弯曲振子振动模态的理论分析与实验研究 [J]. 测井技术, 2009, 33(5): 421-424.
CHEN Xuelian, BAO Wengang. On the modes of bending vibrators with theoretical simulation and experiments [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(5): 421-424.

[11] 乔文孝, 车小花, 张菲. 边界条件对声波测井弯曲振子振动模态的影响 [J]. 中国科学, 2008, 38, 增刊 I: 174-179.
QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua, ZHANG Fei. The effect of boundary condition to the mode of vibration of well logging bender vibrator [J]. Science in China, 2008, 38, I: 174-179.

[12] 郑林, 林伟军, 王东. 三叠片型偶极声波测井换能器的有限元设计 [J]. 测井技术, 2009, 33(2): 106-109.
ZHENG Lin, LIN Weijun, WANG Dong. The design of sandwich dipole transducer based on finite element method [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(2): 106-109.

[13] 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 analyses of acoustic transducers using the ANSYS software [J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1279-1290.

[14] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

[15] 郑林. 三叠片型偶极声波测井换能器的有限元设计 [D]. 中国科学院声学研究所硕士学位论文, 2008.

[16] 吴金平, 乔文孝, 车小花. 声波测井压电振子的有限元分析 [J]. 应用声学, 2012, 31(2): 86-92.
WU Jinping, QIAO Wenxiao, CHE Xiaohua. The finite element analysis of a piezoelectric bender used in acoustic logging [J]. J. Appl. Acoust., 2012, 31(2): 86-92.