

# 声波测井压电振子的有限元分析\*

吴金平<sup>1,2</sup> 乔文孝<sup>1,2†</sup> 车小花<sup>1,2</sup>

(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 北京市地球探测与信息技术重点实验室 北京 102249)

**摘要** 压电振子是新一代方位声波测井仪器中相控圆弧阵声波辐射器的重要组成部分。利用有限元法对构成圆弧阵的压电振子进行了设计分析,结果显示了压电振子存在多阶弯曲振动模式,且长度方向一阶弯曲振动能够满足方位声波测井的工作频率要求。针对长度方向一阶弯曲振动模式,数值模拟了几何尺寸对压电振子性能参数的影响。压电振子的谐振频率随着陶瓷片长度、基片或陶瓷片厚度的减小而降低;压电振子的辐射声功率随着陶瓷片长度或压电振子宽度的增加、基片或陶瓷片厚度的减小而增大;合理地选取长度和厚度可使压电振子具有较高的机电耦合系数。数值模拟结果可以对圆弧阵结构优化设计起到良好的指导作用。

**关键词** 压电振子, 振动模式, 谐振频率, 有效机电耦合系数

**中图分类号:** P631.52 O429

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2012)02-0086-07

## The finite element analysis of a piezoelectric bender used in acoustic logging

WU Jinping<sup>1,2</sup> QIAO Wenxiao<sup>1,2</sup> CHE Xiaohua<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249)  
(2 Key Laboratory of Earth Prospecting and Information Technology, Beijing 102249)

**Abstract** Piezoelectric benders are important parts of acoustic phased arc array transmitter used in the latest generation of azimuth acoustic logging tools. Piezoelectric bender which is employed to form arc array transmitter is designed and analyzed applying a finite element method. The results show that the bender has abundant bending vibration modes and the resonance frequency of the first longitudinal bending vibration mode meets the operating frequency requirement for azimuth acoustic logging. Aimed at this first mode, the influence of geometric factors of piezoelectric bender on performance parameters is also simulated numerically. The resonance frequency will reduce as the length of ceramic plates, the thickness of the substrate or ceramic plates decreases. The radiation sound power will improve as the length of ceramic plates or the width of the bender increases, and as the thickness of the substrate or ceramic plates decreases. The bender with higher electromechanical coupling factor can be designed by choosing its length and thickness correctly. Numerical simulation results play a good guidance role on the structural optimization design for arc array transmitter.

**Key words** Piezoelectric bender, Vibration mode, Resonance frequency, Electromechanical coupling factor

2011-10-14 收稿; 2011-12-02 定稿

\*国家自然科学基金面上项目(40874097)和国家科技重大专项(2011ZX05020-009)的资助

作者简介: 吴金平(1984-), 男, 江西高安人, 博士研究生, 研究方向: 声波测井换能器设计及实验测试。

乔文孝(1956-), 男, 教授, 博士生导师。车小花(1976-), 女, 副研究员, 硕士生导师。

†通讯作者: 乔文孝, E-mail: qiaowx@vip.163.com

## 1 引言

声波测井是地球物理测井的主要方法之一, 在油气勘探开发中有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。随着复杂油气藏的勘探开发, 迫切需要声波测井能够评价井旁地层沿井周方向的变化特性, 即具有方位分辨能力。相控圆弧阵声波辐射器是由多个压电振子沿圆周排列而成, 具有周向扫描辐射特性, 可用于井下实现方位声波测井<sup>[4-6]</sup>。目前, 基于圆弧阵的新一代方位声波测井仪器尚处于现场试验阶段<sup>[7]</sup>, 对构成圆弧阵的压电振子的结构设计非常必要。由于声波测井频率的限制以及井下狭小的空间和恶劣的环境, 压电振子只能采用矩形板状结构<sup>[4,8,9]</sup>, 因而难以用解析方法进行分析。基于有限元法对声波测井换能器的结构分析前人已进行了一定的探索<sup>[10]</sup>, 但主要针对低频偶极横波测井。ANSYS 是融结构、流体、热、电磁和声学一体的大型通用有限元软件, 在工业设计和科学研究领域有着广泛的应用<sup>[11-13]</sup>。本文采用 ANSYS 设计了一种工作频率在 6~20 kHz、可用于构成圆弧阵的压电振子, 并系统地探讨了压电振子的结构尺寸对其振动特性、频率特性、有效机电耦合系数和辐射声功率等性能指标的影响。

## 2 压电振子的有限元仿真

### 2.1 压电振子的有限元模型

压电振子由一个金属基片和两个极化方向相同的压电陶瓷片组成, 采用矩形板状结构, 如图 1(a)所示。陶瓷片粘接在金属基片的两侧, 极

化方向为厚度方向且平行  $z$  轴; 金属基片延伸到陶瓷片以外, 以便电连接于激励电路中和支撑在圆弧阵的支架上。在外加电压信号的激励下, 某一时刻一侧的陶瓷片伸长, 另一侧的陶瓷片收缩, 从而引起压电振子作弯曲振动并向外辐射声波<sup>[12,14]</sup>。

在 ANSYS 中建立压电振子的有限元模型。陶瓷片取 PZT-8, 长 12 mm, 宽 9 mm, 厚 1 mm; 金属基片取 45#钢, 长 24 mm, 宽 9 mm, 厚 1 mm。两种材料均用六面体单元描述, 各材料的参数详见文献[8]。由于压电振子的结构具有对称性, 因此, 只需构建 1/4 有限元模型以节省内存资源和提高计算速度。如图 1(b)所示, 压电振子的有限元模型共有 864 个单元, 1270 个节点。

### 2.2 压电振子的振动特性分析

压电振子通过金属基片用螺栓固定在圆弧阵的支架上, 其长度方向的两端处于钳定状态<sup>[4]</sup>。数值模拟中, 沿着金属基片的宽度方向在  $X=9$  mm 的节点上施加  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移约束  $UX=0$ 、 $UY=0$  且  $UZ=0$ , 则压电振子处于钳定边界条件; 而对压电振子不加载任何位移约束, 即力矩为零、切应力为零, 则压电振子处于自由边界条件。

ANSYS 模态分析器 BLOCK LANZOS 法能够提取换能器各阶模态的谐振频率, 并观察其对应的模态振型<sup>[11-13]</sup>。表 1 列出了空气中不同边界条件下压电振子前四阶模态振型的谐振频率。从表中可以看出, 压电振子的振动模式较丰富, 谐振频率分布范围较广, 不同的边界条件影响相同频带内振动模态个数以及同一振动模态的谐振频率。

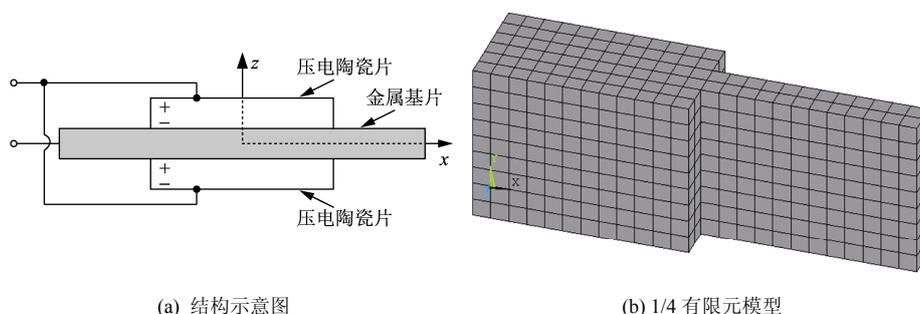


图 1 压电振子的结构示意图及其 1/4 有限元模型

表1 不同边界条件下压电振子的谐振频率

自由边界		钳定边界	
$n$	$f_i$ (kHz)	$n$	$f_i$ (kHz)
1	18.179	1	18.675
2	61.753	2	92.009
3	84.660	3	93.501
4	113.834	4	114.178

经扩展处理后,在 ANSYS 通用后处理器中可以观察压电振子各阶模态振型的位移矢量图,从而可以分析压电振子的振动特性。图 2 所示的是不同边界条件下压电振子一阶模态振型的位移矢量图。从图中可以看出,不同的边界条件影响压电振子的位移矢量分布,自由边界条件下压电振子长度方向两端面处的位移幅度最大,而钳定边界条件下压电振子中心处的位移幅度最大;但是,两种边界条件下压电振子的位移矢量均主要沿厚度方向,其一阶振动模式为长度方向一阶弯曲振动,均满足设计的工作频率要求。因此,钳定边界条件下压电振子在井下激励长度方向一阶弯曲振动能够满足方位声波测井的要求。另外,由于井孔中通常是充满液体的,压电振子工作在液体介质中,因介质的阻尼和声阻抗增大,实际工作时压电振子的谐振频率会有所下降。

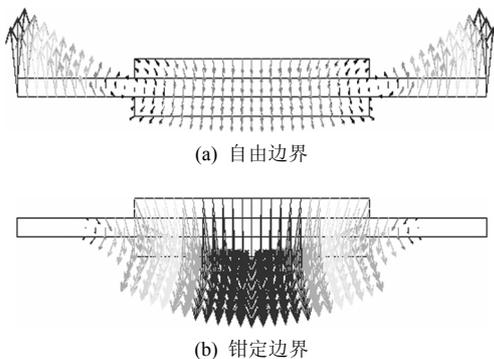


图2 不同边界条件下压电振子的一阶模态位移矢量图

### 2.3 压电振子的频响特性分析

ANSYS 谐波分析器用于求解线性结构承受随时间正弦规律变化载荷的稳态响应,适用于模拟换能器在流体中的工作状态,由此得到一系列表征换能器性能的重要参数,比如电导纳曲线、发射电压响应曲线以及流体中的辐射声场特性等<sup>[11-13]</sup>。

在等幅值但不同频率的正弦电压载荷激励下,可以得到压电振子空气中的导纳特性曲线,如图 3 所示。其中,图 3(a)表示的自由边界条件下导纳曲线;图 3(b)表示的钳定边界条件下导纳曲线。从图中可以看出,自由边界条件下压电振子在分析频率范围内的谐振频率为 18.2 kHz,对应的电导值为 0.566 mS;钳定边界条件下压电振子在分析频率范围内的谐振频率为 18.7 kHz,对应的电导值为 0.715 mS。

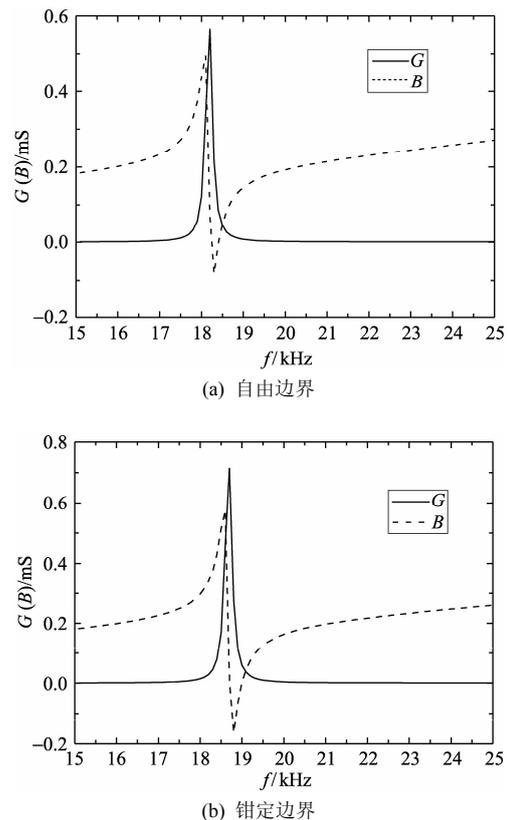


图3 不同边界条件下压电振子空气中的导纳特性曲线

图 4 所示的是钳定边界条件下压电振子在谐振频率 18.7 kHz 处对应的位移振幅沿长度方向的分布图。从图中可以看出,  $x$  方向和  $y$  方向的位移振幅近似为 0, 而  $z$  方向位移振幅曲线与总位移振幅曲线基本完全重合;压电振子长度方向两端面处的位移振幅为零,中心处的位移振幅最大,位移矢量主要沿厚度方向。这进一步表明了,钳定边界条件下压电振子工作在谐振频率 18.7 kHz 处对应的振动模式为长度方向一阶弯曲振动,在井下激励这种振动模式能够满足方位声波测井的工作频率要求。

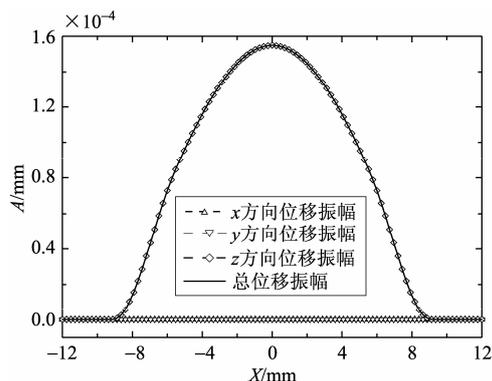


图 4 钳定边界条件下压电振子在谐振频率 18.7kHz 处对应的位移振幅分布图

### 3 结构尺寸对压电振子性能的影响

圆弧阵工作于井下恶劣的环境中,要求构成圆弧阵的压电振子有高的能量转换效率、大的发射声功率、较低的谐振频率以及良好的一致性,这有助于增大探测深度和提高测量信号的信噪比。在满足圆弧阵要求的基础上且不改变压电振子基本结构设计的前提下,改变压电振子其中一个或多个几何参量,分析压电振子性能参数的变化趋势。

#### 3.1 长度对压电振子性能的影响

考察压电振子长度的变化对其性能指标的影响。在不改变压电振子的其它参数的情况下,同时改变基片和陶瓷片的长度。表 2 列出了不同长度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数。从表中可以看出,基片和陶瓷片的长度同时增加,压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数均增大。

表 2 不同长度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数

基片 (长×宽×高)	陶瓷片 (mm×mm×mm)	谐振频率 $f_r$ (kHz)	机电耦合系数 $k_c$
22×9×1	10×9×1	17.522	0.1587
23×9×1	11×9×1	18.166	0.1757
24×9×1	12×9×1	18.675	0.1899
25×9×1	13×9×1	18.994	0.1996
26×9×1	14×9×1	19.120	0.2036

保持压电振子的其它参数不变,仅改变陶瓷片的长度。表 3 列出了不同陶瓷片长度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数。从表中可以看出,随着陶瓷片长度的增加,压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数均增大。这是由于陶瓷片长度的增加使得整个结构的等效刚度和电场能增加,从而使得压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数均增大。

表 3 不同陶瓷片长度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数

基片 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	陶瓷片	谐振频率 $f_r$ (kHz)	机电耦合系数 $k_c$
24×9×1	10×9×1	17.522	0.1587
24×9×1	11×9×1	18.166	0.1757
24×9×1	12×9×1	18.675	0.1899
24×9×1	13×9×1	18.994	0.1996
24×9×1	14×9×1	19.120	0.2036

比较表 2 和表 3 还可知,在其它参数不变的情况下,同时改变基片和陶瓷片的长度,压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数的值与仅改变陶瓷片长度时完全相同。为此,又分析了仅改变基片长度,而其它参数不变的情况。结果显示,基片长度的改变,压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数保持不变,分别为 18.675 kHz 和 0.1899;这主要是由于基片长度的改变并没有引起钳定点以内压电振子的结构尺寸发生变化。以上结果表明,压电振子的性能参数受陶瓷片长度改变的影响较大,而不受基片长度改变的影响;随着陶瓷片长度的增加,压电振子的谐振频率、有效机电耦合系数等性能参数均增大。

图 5 所示的是保持压电振子的其它参数不变,在正弦电压载荷激励下不同陶瓷片长度的压电振子的位移振幅沿长度方向的分布图。从图中可以看出,不同陶瓷片长度的压电振子的位移振幅分布形状相似,表明仅改变陶瓷片的长度并不影响压电振子在工作状态下的振动模式;位移振幅随着陶瓷片长度的增加而增大,相应的辐射声功率也随着陶瓷片长度的增加而增大。

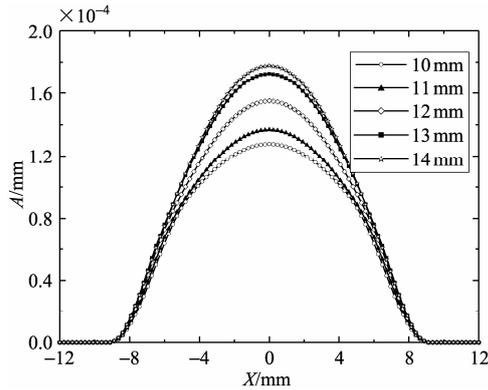


图5 不同陶瓷片长度的压电振子的位移振幅分布图

### 3.2 厚度对压电振子性能的影响

考察压电振子厚度的变化对其性能指标的影响。首先同时改变基片和陶瓷片的厚度,而压电振子的其它参数均保持不变。表4列出了不同厚度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数。从表中可以看出,基片和陶瓷片的厚度同时增加,压电振子的谐振频率大幅度地增大,而有效机电耦合系数却逐渐减小。

表4 不同厚度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数

基片 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	陶瓷片 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	谐振频率 $f_r$ (kHz)	机电耦合系数 $k_e$
24×9×0.6	12×9×0.6	11.723	0.2076
24×9×0.8	12×9×0.8	15.311	0.1992
24×9×1.0	12×9×1.0	18.675	0.1899
24×9×1.2	12×9×1.2	21.796	0.1795
24×9×1.4	12×9×1.4	24.665	0.1688

保持压电振子的其它参数不变,仅改变陶瓷片或基片其中一种材料的厚度,分析其厚度的变化对压电振子性能参数的影响。图6所示的是压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数随陶瓷片或基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,压电振子的谐振频率逐渐平缓地增大,但最终趋于恒定值,而有效机电耦合系数却先增大后减小,在0.8 mm附近取最大值;随着基片厚度的增加,压电振子的谐振频率近似呈线性增大,而有效机电耦合系数也是先增大后减小,在1.0 mm附近取最大值。比较两者厚度的变化对压电振子性能参数的影响,

还可知,压电振子的谐振频率对基片厚度的变化更加敏感,而有效机电耦合系数对陶瓷片厚度的变化更加敏感。

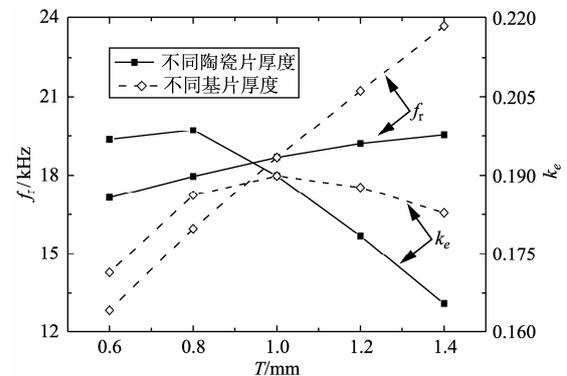


图6 压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数随厚度变化曲线

图7所示的是保持压电振子的其它参数不变,在正弦电压载荷激励下不同陶瓷片厚度的压电振子的位移振幅沿长度方向的分布图。从图中可以看出,不同陶瓷片厚度的位移振幅分布形状相似,位移振幅随着陶瓷片厚度的增加而减小,相应的辐射声功率也随着陶瓷片厚度的增加而减小。另外,不同基片厚度的压电振子的位移振幅沿长度方向的分布也有类似的规律,在此不再赘述。

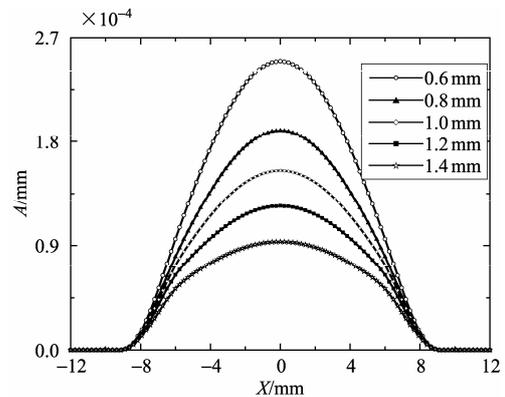


图7 不同陶瓷片厚度的压电振子的位移振幅分布图

### 3.3 宽度对压电振子性能的影响

考察压电振子宽度的变化对其性能指标的影响。由于压电振子采用矩形板状结构,只有同时改变基片和陶瓷片的宽度才能保证压电振子的基本结构不变,而只改变其中一种材料的宽度会破坏压电振子的完整性,因此下面主要针对同

时改变基片和陶瓷片的宽度进行分析。表 5 列出了仅改变宽度而其它参数均保持不变的情况下压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数。从表中可以看出, 压电振子宽度的增加, 其谐振频率和有效机电耦合系数均有增大的趋势, 但两者增大的幅度均很小, 可忽略不计。故可以认为压电振子宽度的改变对其谐振频率、有效机电耦合系数等性能参数没有影响或影响不明显。

表 5 不同宽度的压电振子的谐振频率和有效机电耦合系数

基片 (长×宽×高)	陶瓷片 (mm×mm×mm)	谐振频率 $f_r$ (kHz)	机电耦合系数 $k_c$
24×7×1	12×7×1	18.652	0.1886
24×8×1	12×8×1	18.664	0.1894
24×9×1	12×9×1	18.675	0.1899
24×10×1	12×10×1	18.686	0.1903
24×11×1	12×11×1	18.695	0.1916

图 8 所示的是保持压电振子的其它参数不变, 在正弦电压载荷激励下不同宽度的压电振子的位移振幅沿长度方向的分布图。从图中可以看出, 不同宽度的压电振子的位移振幅分布形状相似, 位移振幅随着压电振子宽度的增加而增大, 但当增加到 10mm, 位移振幅趋于稳定, 不再随宽度的增加继续增大。

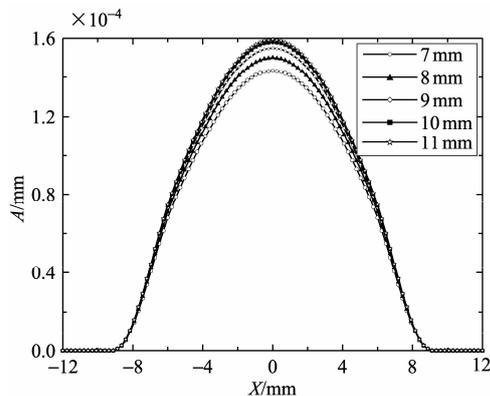


图 8 不同宽度的压电振子的位移振幅分布图

可见, 压电振子宽度的变化对其性能参数无明显的影响, 这与其振动模式为长度方向一阶弯曲振动是相吻合的。实际设计井下圆弧阵时, 可充分地利用井下狭小的空间制作宽度足够大的压电振子, 从而使得压电振子的辐射面积增大, 相应的辐射声功率也增大。

以上从长度、厚度和宽度三个方面分析了几何尺寸的改变对压电振子性能的影响, 而压电振子作为圆弧阵的重要组成部分, 其性能的变化必然会影响圆弧阵的频率特性和辐射特性。在工作频率 6~20 kHz 范围内, 圆弧阵的周向指向性随着工作阵元个数和工作频率的增加而增强<sup>[5]</sup>, 这就要求圆弧阵中参与工作的压电振子的个数尽可能多, 谐振频率尽可能高, 但在实际应用中会变得更加困难。因此, 对于圆弧阵结构优化设计, 在保证圆弧阵的辐射特性满足方位声波测井要求的前提下使压电振子的个数尽可能少, 谐振频率尽可能低, 具体可通过减小基片或陶瓷片厚度来降低压电振子的谐振频率以及通过增加陶瓷片长度或压电振子宽度来减小压电振子个数, 这也有利于增大压电振子的辐射声功率。

## 4 结论

本文利用有限元方法数值模拟了可应用于新一代方位声波测井的压电振子的振动模态, 并讨论了空气中压电振子几何尺寸的变化对其性能指标的影响。研究表明, 一定频带内压电振子存在多阶弯曲振动模态, 井下采用长度方向一阶弯曲振动能够满足实际的工作频率要求。压电振子的性能参数受其几何尺寸的改变影响较大, 并且长度、厚度和宽度对其性能参数的影响也不同。压电振子的谐振频率随着陶瓷片长度、基片或陶瓷片厚度的减小而降低; 压电振子的辐射声功率随着陶瓷片长度或压电振子宽度的增加、基片或陶瓷片厚度的减小而增大。压电振子作为相控圆弧阵的重要组成部分, 其性能的变化必然会对圆弧阵的特性有较大的影响。因此, 对于圆弧阵结构优化设计, 在保证圆弧阵的辐射特性满足方位声波测井要求的前提下, 可通过减小基片或陶瓷片厚度使压电振子的谐振频率降低, 可通过增加陶瓷片长度或压电振子宽度以及减小基片或陶瓷片厚度使压电振子的辐射声功率增大; 另外, 还可通过合理地选取长度和厚度使压电振子具有较高的机电耦合系数。

## 参 考 文 献

- [1] TANG X M, CHENG A. Quantitative borehole acoustic methods[M]. UK: Elsevier, 2004.
- [2] 楚泽涵, 高杰, 黄隆基, 等. 地球物理测井方法与原理(上册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
- [3] BRIE A, MUELLER M C, CODAZZI D, et al. New directions in sonic logging[R]. Oilfield Review, 1998: 40-50.
- [4] 乔文孝, 鞠晓东, 陈雪莲, 等. 井下方位角方向指向性可控圆弧阵声波辐射器: 中国, ZL 03137596.0[P]. 2006.
- [5] 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.
- [6] 车小花, 乔文孝, 鞠晓东. 相控圆弧阵声波辐射器在井旁地层中产生的声场特征[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 343-346.
- [7] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 从换能器技术的变化看声波测井技术的发展[J]. 物理, 2011, 40(2): 99-106.
- [8] QIAO W X, CHE X H, ZHANG F. Effects of boundary conditions on vibration mode of acoustic logging dipole transducer[J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2008, 51(Supp. II): 195-200.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘永平. 外部驱动弯张换能器的CAD设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- [12] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器与换能器阵(修订版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [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.
- [14] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

## 《应用声学》再次入编《中国核心期刊要目总览》

经《中国核心期刊要目总览》2011年版编委会公布, 依据文献计量学的原理和方法, 经研究人员对相关文献的检索、统计和分析, 以及学科专家评审, 《应用声学》入编《中国核心期刊要目总览》2011年版(即第六版)的核心期刊。

本次核心期刊的评价仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被引量、被摘量、被引量、他引量、被摘率、影响因子、被国内外重要检索工具收录、基金论文比、Web 下载量等9个评价指标,

选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达到60余种, 统计到的文献数量共计221177余万篇次, 涉及期刊14400余种。参加核心期刊评审的学科专家达8200多位。经过定量筛选和科专家定性评审, 从我国正在出版的中文期刊中评选出1982种核心期刊。

(本文摘编自2012年1月《中国核心期刊要目总览》入编通知)