

## 偶极声波换能器振动特性计算\*

陈雪莲<sup>†</sup>

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061)

**摘要** 利用 ANSYS 有限元软件计算了声波测井中使用的偶极子换能器在不同机械边界条件下的振动模态和频率响应。计算结果显示,偶极子换能器在一定的频率范围内有多个振动模态,不同的机械边界条件不仅影响振动模态的个数而且还影响同一振动模态的谐振频率;从频率响应曲线上还可以看出此结构的偶极子换能器在做弯曲振动时的频带较窄,这对在不同地层井眼中进行的偶极子声波测井非常不利。通过多个不同主频的偶极子换能器组合工作可以从根本上拓宽偶极声波换能器的频带宽度。

**关键词** 偶极子换能器, 模态分析, 频率响应, ANSYS FEM 软件

## Calculation of vibration characteristics of acoustic dipole transducer

CHEN Xue-Lian

(College of Geo-resources and Information, University of Petroleum, Dongying 257061)

**Abstract** The vibration modes and frequency response of a dipole source are calculated by ANSYS FEM software. The results show that there are many vibration modes in a certain frequency range; the different fixed boundary can excite different numbers of vibration modes; even the same vibration mode has the different leading frequency; the frequency band of the bending-vibrating mode is narrow. The computing results for frequency response are in agreement with the laboratory findings. By using of multi-dipole transducers the frequency band may be widened.

**Key words** Acoustic dipole transducer, Modal analysis, Frequency response, ANSYS FEM software

2007-07-09 收稿; 2007-11-05 定稿

\* 中国石油天然气集团公司创新基金项目(No. W060122)

作者简介:陈雪莲(1976-),女,河北衡水人,讲师,博士,研究方向:声波测井方法。

<sup>†</sup> 通信联系人 E-mail: chenxl@hdpu.edu.cn

## 1 引言

在常规的电测井和随钻测井声波测量中,测量地层横波是必要的,它可以提供油气层勘探、开发所需要的重要信息<sup>[1]</sup>。运用单极子声波仪器时可以由沿井壁传播的折射横波测量而得,但是在地层横波速度低于井眼流体声速的慢地层中,横波速度不能直接用单极子测井来测量。由于对慢地层特别是深水储集层中测量横波速度的需要,国外首先发展了偶极横波测井仪器<sup>[1]</sup>。此仪器的核心部分就是偶极子换能器,利用其弯曲振动在井壁介质中产生弯曲波从而测量地层横波速度。为了对偶极子换能器激发的声场进行物理模拟,在实验室内设计并制作了适用于声波测井的弯曲振动换能器(以下称偶极子换能器)。由于换能器的振动模态和频率响应均受机械边界条件的较大影响,本文利用 ANSYS 有限元软件分析了在不同机械边界条件下的偶极子换能器的振动模态和谐响应特征,这对正确制作和正确安装偶极子换能器起到了一定的指导作用。

## 2 偶极子换能器的有限元模型

### 2.1 弯曲振动换能器结构简介

把两个厚度相同、背有电极的陶瓷片黏结在一起,可以产生厚度方向的弯曲振动,被黏结的上下两个陶瓷片的极化方向相反时,应以串联方式接入电源,而上下两个陶瓷片的极化方向相同时,应以并联方式接入电源<sup>[2]</sup>。此外还可以用两个极性相反的压电陶瓷片黏结在一薄金属片上,或者用一个陶瓷片黏结在一薄金属片上来产生厚度方向的弯曲振动,薄金属片和黏结剂对弯曲振动元件的性能影响很大,通常都采用高稳定性的镍铬钛合金材料作为振子的薄金属片<sup>[2]</sup>。弯曲振动压电陶瓷换能器在声波测井中使用时常被称为偶极子换能器,这种换能器在声纳技术和石油勘探等领域

得到了广泛的应用。本文计算的偶极子换能器是由两个厚度极化的压电陶瓷片和一个钢片粘接而成,电路上并联,其结构如图 1 所示。在电场的激励下,当某一时刻其中一个压电片伸张时,另一个压电片则缩短,使整个复合片产生弯曲振动。为了支撑和电连接,中间基片延伸到压电陶瓷片以外。

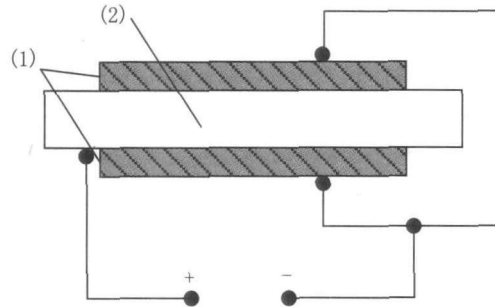


图1 偶极子换能器的结构示意图

(1)压电陶瓷 PZT4 (2)钢片

### 2.2 偶极子换能器的有限元模型

ANSYS 分析步骤是先对偶极子声源的物理模型进行简化得到其几何模型,然后通过输入材料参数、单元类型、划分网格等形成换能器的有限元模型,选择合适的求解器求解,最后查看结果文件<sup>[3]</sup>。由于机械谐振将在换能器中产生位移和电压(或电流),查看结果文件中的位移和电压值可以分析换能器的频率特征和振动模态。当给石英和陶瓷等压电材料加电压时,他们会产生位移,反之若使之振动,则会产生电压。ANSYS/Multiphysics 软件包提供了这种分析,压电分析类型可以是静力、模态、预应力模态、谐波、预应力谐波和瞬态分析<sup>[3]</sup>。

压电陶瓷材料既具有弹性介质的性质,又具有电介质的性质,同时具有压电体的性质,因此描述压电材料性能的参数有三类,即力学参数、电学参数和压电耦合参数,在设计压电模型时需要的材料特性有介电常数(或叫电容率)、压电矩阵和弹性系数矩阵。式(1)、(2)和(3)给出了本文计算采用的压电陶瓷材

PZT4 的三类参数值<sup>[4]</sup>, 密度为 7500 kg/m<sup>3</sup>。中间基片钢的密度、泊松比和杨氏模量分别为 7800 kg/m<sup>3</sup>、0.28 和 21.6 × 10<sup>10</sup>N/m<sup>2</sup>。图 2 显示了偶极子换能器在直角坐标系中的示意图, 压电陶瓷的极化方向沿着直角坐标系的 z 轴方向。

弹性常数矩阵:

$$c = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} N/m^2 \quad (1)$$

介电常数矩阵:

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 7.124 & & \\ & 7.124 & \\ & & 5.841 \end{bmatrix} \times 10^{-9} C/m \quad (2)$$

压电应力常数矩阵:

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \end{bmatrix} N/V \cdot m \quad (3)$$

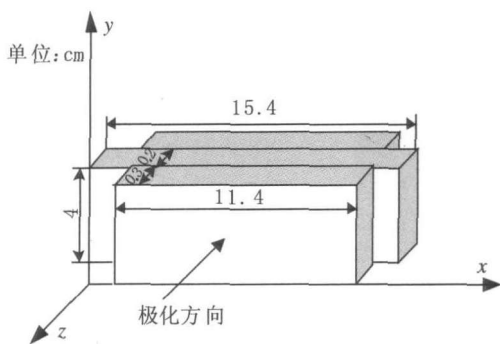


图 2 偶极子换能器在直角坐标系中的结构示意图

### 3 偶极子换能器的振动模态和频率响应分析

#### 3.1 模态分析

利用 ANSYS 模态分析器 BLOCK LANCZOS 对图 2 所示的偶极子换能器进行模态分析, 可以得到其各阶的振动频率和对应的振动模态<sup>[3]</sup>。由于偶极子换能器应用状态或者测试条件的不同, 他们可以处于不同的电学边界条件和机械边界条件。对于不同的边界条件, 需要选择不同的自变量和因变量来表述压电振子的压电方程。机械边界条件有两种, 一种是机械自由, 另一种是机械夹持, 夹持位置和方式也影响换能器的各阶谐振频率点。电学边界条件也有两种, 一种是电学短路(恒压状态), 另一种是电学开路(恒流状态)。电学短路对应换能器谐振状态, 即短路谐振频率为换能器谐振频率; 开路状态对应换能器反谐振状态, 即开路谐振频率为换能器反谐振频率<sup>[5]</sup>。

本文采用电学短路和不同的机械边界条件组合分析了偶极子换能器的振动模态。图 3 显示了机械自由和两种不同机械夹持方式(简支边和夹持)的边界条件示意图。自由边界条件是偶极子换能器悬置在空中, 不加载任何外力; 简支边边界条件是在偶极子换能器中间基片的上下面对称夹持, 其夹持位置在夹持方向的位移为零, 其他两正交方向的位移自由<sup>[2]</sup>; 夹持边界条件是指在夹持位置三个方向的自由度均为零<sup>[2]</sup>。在 100Hz ~ 5kHz 频率范围内对偶极子换能器实施不同机械边界条件时的计算结果见表 1 所示。由表 1 可知, 在一定的频率范围内偶极子换能器不只存在一种振动模态, 在计算频段内自由状态和简支边固定条件下共有 3 阶振动模态, 在夹持边界条件下只有 2 阶模态; 不同的机械边界条件下, 同一振动模态的频率不同; 在简支边方式下如果固定位置发生变化, 同一模态的谐振频率也会发生变化; 偶极子换能器两端的简支边固定位

置距离越近,同一模态的谐振频率越高。图4显示了表1中自由边界的前三阶振动模态,图中的虚线框为原始的静态位置。在现有的声波测井仪器中偶极子换能器是用螺丝固定在仪器支架上的,相当于夹持边界条件。

**表1 偶极子换能器不同机械边界条件下各种振动模态的谐振频率表**

振动模态 边界条件	模态1 谐振 频率(kHz)	模态2 谐振 频率(kHz)	模态3 谐振 频率(kHz)
自由边界	2.23	4.45	4.63
简支边1	0.757	2.095	2.458
简支边2	1.11	3.30	3.85
夹持边界	1.61	3.92	-

注:简支边1和2分别是在距离偶极子换能器两端面5mm和15mm处加载边界条件;夹持边界是在距离两端面15mm处加载边界条件。

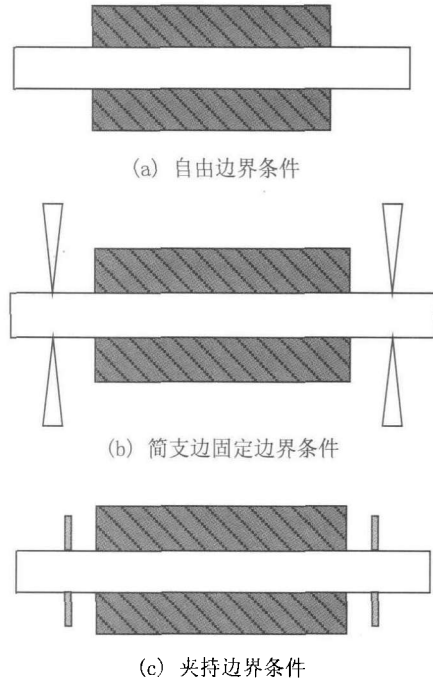
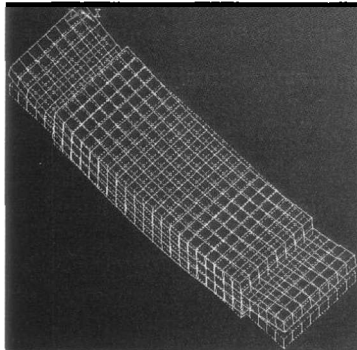
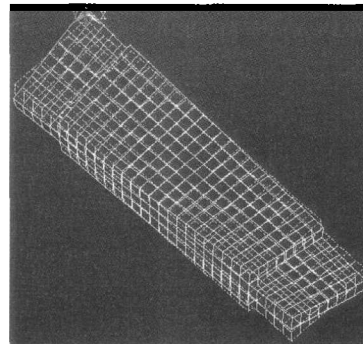


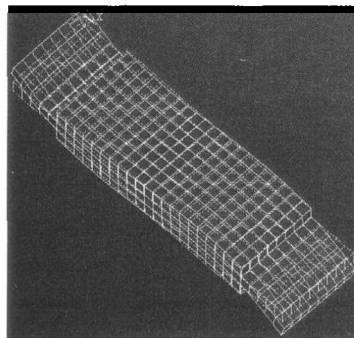
图3 机械边界条件结构示意图  
(图2模型在xz平面上的投影)



(a) 模态1



(b) 模态2



(c) 模态3

图4 自由边界条件下偶极子换能器的前三阶振动模态

由以上分析可见,偶极子换能器在测井仪器中的机械固定方式对换能器的工作状态影响很大。为了减少偶极子源在工作频段内的振动模态、提高声电转换效率,在组装声波测井仪器时需要慎重考虑偶极子换能器的夹持方式和位置。在安装完成后需要再次测量其频率响应,以免其工作频带低于弯曲波的截止频率,致使在测井过程中观测不到地层弯曲波信息。

### 3.2 谐波响应分析

在对偶极子换能器进行谐波响应分析时,偶极子换能器的电极面上定义节点自由度耦

合,在求解器中选择 Harmonic 分析类型,求解方法选择 Full,频率范围为 100Hz ~ 5kHz,子步设为 200 步,常数阻尼系数为 1%。图 5(a)显示了自由边界条件下谐响应分析得到的换能器导纳曲线,主频值为 2.22kHz,这与表 1 中显示的模态分析结果一致。图 5(b)显示了在实验室内的阻抗分析仪上测试的偶极子换能器的导纳曲线,自由状态下的谐振频率为 2.2kHz,与 ANSYS 模拟结果一致。从图 5 中的电导曲线可见偶极换能器弯曲振动模态的频带较窄。

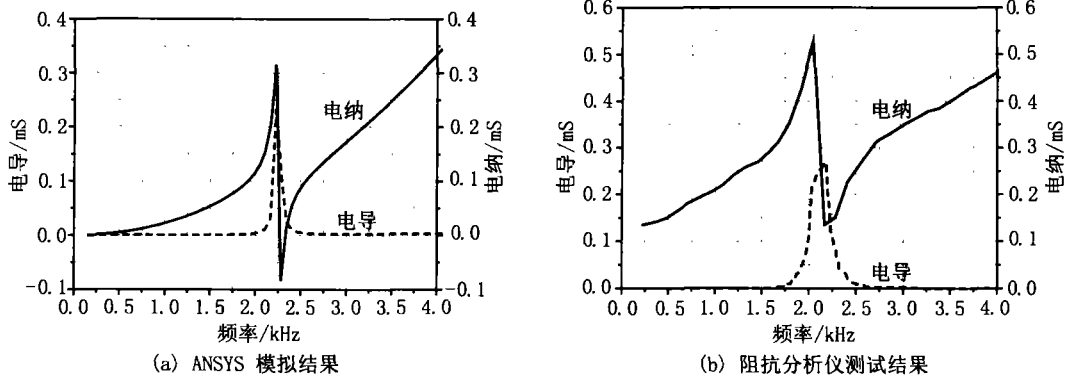


图 5 空气中偶极子换能器的导纳曲线

### 3.3 利用多个换能器组合工作增加偶极子声源的响应带宽

利用偶极子换能器在井壁介质中激发弯曲波时,不同岩性地层弯曲波的截止频率和激发强度最大的频率点都不相同,因此希望偶极子声源的 3dB 带宽较宽,可以覆盖到所有地层需要的频率范围。

本文通过多个弯曲振动换能器组合工作来拓宽换能器的振动频带。把  $2N + 1$  个不同主频的弯曲换能器沿着一条直线排列成换能

器阵(相互之间声电隔离),中间位置的弯曲振动换能器主频为 2.25kHz,相邻弯曲振动换能器的主频值相差 0.2kHz,相邻弯曲振动换能器之间的间距为 0.2m。图 6 显示了 1、3 和 5 个弯曲振动换能器组合成的偶极子声源在频率-波数域的二维谱,由图 6 可见 5 个弯曲振动换能器组成的声源频带最宽,从灰度等级上观察响应幅度也最强。可见通过多个弯曲振动换能器的组合工作不仅可拓宽声源的频带而且还可以增强其辐射能量。

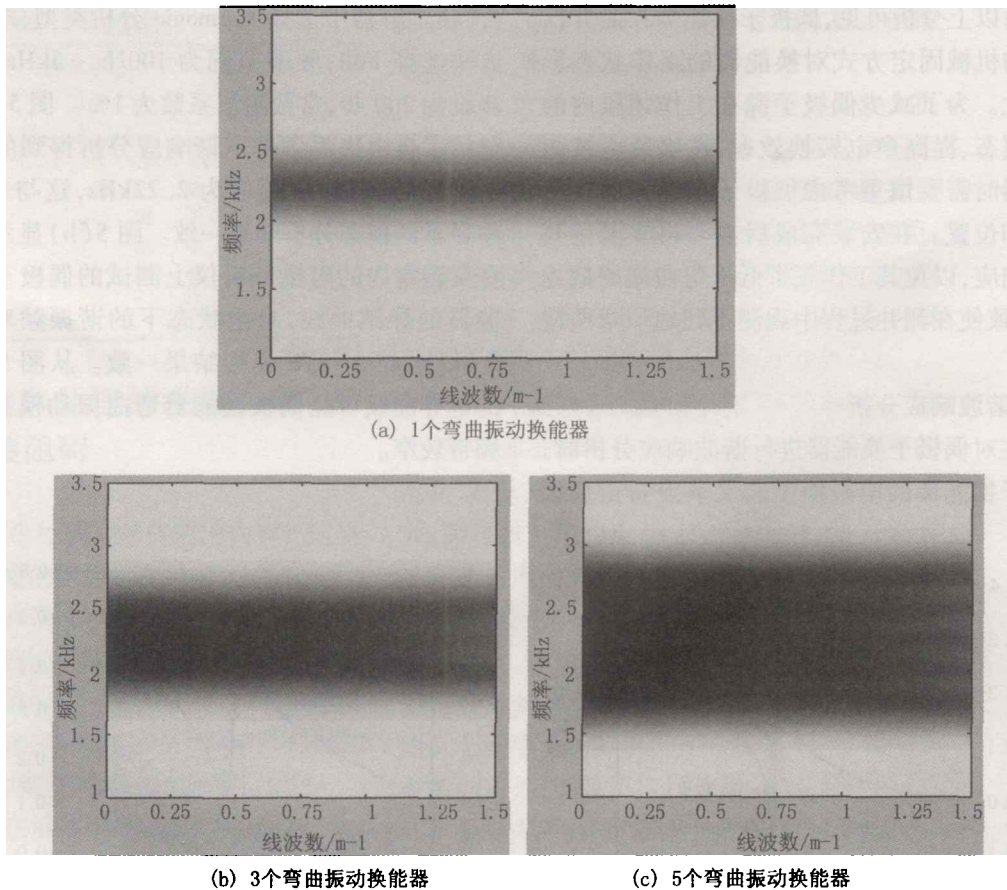


图6 多个弯曲振动换能器组合的偶极子声源的二维谱

## 4 结论

利用 ANSYS 有限元软件计算了偶极子换能器在不同机械边界条件下的振动模态,不同的机械边界条件不仅影响振动模态个数而且还影响同一振动模态的谐振频率,可见在自行研制的偶极声波测井仪中对偶极子换能器的安装和固定要选择合适的边界条件和固定位置,使其在工作时产生所需的振动模态和合适频率响应。

通过 ANSYS 谐波响应分析和实验测量得到了偶极子换能器的导纳曲线,两者吻合较好。通过多个不同主频的弯曲振动换能器组合工作可展宽声源的频带宽度并增强声源的

辐射强度,这对进一步开发和优化偶极声波仪器具有一定的指导意义和参考价值。

**致谢** 感谢中国石油大学乔文孝教授对本文工作的支持和指导。

## 参 考 文 献

- [1] Kitsunezaki, C. . A new method for shear-wave logging. *Geophysics*, 1980, 45(10): 1489 - 1506.
- [2] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵(修订版). 北京:北京大学出版社,2005年:172 - 178.
- [3] 小飒工作室. 最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程. 北京:电子工业出版社,2004: 634 - 636.
- [4] ANSYS User's Manual.
- [5] 林书玉. 超声换能器的原理与设计. 北京:科学出版社,2004:17 - 18.