

纪念应崇福院士诞辰 95 周年

## 多极子阵列声波成像测井技术研究\*

辛鹏来 王东 陈浩<sup>†</sup> 张海澜 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** 多极子阵列声波成像测井已经成为测井中主要方法之一,在地层评价与油气田开发中有重要作用。在已有理论与数值模拟的基础上,经过近十年的技术攻关,我们已经在多极阵列声波成像仪器制造、测试与数值处理等主要关键技术方面都取得了长足的进展,具体包括高温正交偶极子发射换能器、高温低频单极子换能器、声系测试、多极子阵列声波测井高温电路及仪器集成、资料处理及解释等主要方面。所研制的仪器及资料处理方法,经过与国外同类仪器的测井结果进行了对比分析,验证了所研发的仪器的可靠性和处理方法的正确性,这些关键技术为我国声学测井仪器装备技术研发和快速发展打下了基础,提供了技术支撑。

**关键词** 交叉偶极子, 声波测井, 声学换能器

**中图分类号:** TB51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2013)04-0237-09

### Research on key technologies of multipole array sonic logging

XIN Penglai WANG Dong CHEN Hao ZHANG Hailan WANG Xiuming

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

**Abstract** Multipole sonic logging is a principal method in borehole logging and plays an important role in formation evaluation and oil field exploration and development. Based on theory and simulation results, we had taken much progress in some key technologies on manufacture, test and related data processing method and software of multipole sonic logging tool through almost ten year's study and hard working. These key technologies include transducers of conventional transmitter and receiver for crossdipole and low frequency monopole transmitter and their test in laboratory and water tank, circuit and assembly of the downhole tool and related data processing and interpretation. Comparison with the imported instrument and processing software, the accuracy and reliability of our tool and software were validated. These lay a solid foundation for the research and development of sonic logging instrument.

**Key words** Cross dipole, Sonic logging, Acoustic transducer

2013-06-15 收稿; 2013-06-20 定稿

\*国家自然科学基金(11134011, 41204099)、国家重大科研装备研制项目 ZDYZ2012-1 和中科院知识创新工程重要方向项目

作者简介: 辛鹏来 (1968-), 男, 山东人, 高级工程师, 研究方向: 声波测井仪器制造。

王东 (1968-), 男, 研究员, 博士。

陈浩 (1969-), 男, 副研究员, 博士。

张海澜 (1946-), 男, 研究员, 博士。

王秀明 (1962-), 男, 研究员, 博士。

<sup>†</sup>通讯作者: 陈浩, E-mail: chh@mail.ioa.ac.cn

## 1 引言

在油田勘探和开发特别是在非常规油气藏勘探开发中, 声波测井是一种重要的测井方法, 也是声学的一个重要应用领域。最早的声波测井是由对称的声源激发的单极子测井, 这类仪器存在一个主要问题, 即无法测量横波速度小于井中流体声速的所谓软地层的横波速度<sup>[1]</sup>, 而在实际的地层, 特别是海上油气层中, 软地层还是占有很大比例的, 而且横波速度又是一个和地层很多参数有关的重要参数<sup>[2]</sup>。上世纪 90 年代初, 为了解决软地层横波信息的获取, 在深入研究井孔声场的基础上, 出现了偶极子声波测井仪<sup>[3]</sup>。这种仪器是利用偶极源激发横波的原理而设计的, 可直接获得任意地层的横波信息<sup>[4]</sup>。因为偶极子源具有指向性, 因此可以用不同方位的偶极子源来测量地层在不同方位的波速, 这就促成了正交偶极子测井仪器的诞生<sup>[5]</sup>。正交偶极子测井仪器由两组指向互相垂直的偶极子发射源和接收系组成。当两个偶极子源分别发射信号时, 两个方向的四个接收单元都接收信号。将相对的两个接收单元接收的信号相减, 就得到偶极子的接收信号, 主要携带了地层横波信息, 这样的设计同时抑制了其它信号。这个接收系统也可作为单极子系统, 单极子源发射时, 将接收系统中的四个接收单元信号相加, 即可得到单极子声波信号<sup>[1]</sup>。为了有效地进行声波测井测量, 人们通常把偶极子换能器与单极子换能器结合起来形成多极子声波测井仪, 最先问世的是斯伦贝谢公司的多极子阵列声波测井仪<sup>[3]</sup>, 随后阿特拉斯公司与哈里伯顿公司也相继研发出交叉偶极阵列声波测井仪。这三种仪器的结构和原理大致一样, 它们具备长源距阵列声波仪器的一切特点, 记录到的偶极横波提供了大量的可利用信息。不同公司的仪器的区别主要是声波发射的原理和隔声体结构有所不同。此外, 交叉偶极阵列声波测井仪最重要的突破就是能够判断出地层的声学各向异性, 进一步可以判断地层的地应力方向、识别有效裂缝储层并判断裂缝的方向, 这使得声波测井的应用得到了很大的发展。交叉偶极阵列声波测井仪也成为主流的声波测井仪器。

近来的研究表明, 交叉偶极声波测井在井中远反射成像中也有独特的优势<sup>[6]</sup>。因此, 正交偶极声波测井已经成为电缆测井中最重要的声波测

井方法。

从上个世纪 90 年代末到这个世纪初, 我国大多数油田和测井公司都引进了交叉偶极声波测井仪器以及相应的处理软件, 并且在油田得到了广泛的应用。随着我国石油工业的发展, 我国石油企业和国外石油公司的竞争日益激烈, 国外公司逐步限制或停止了这些仪器在我国的销售, 并进行技术封锁, 这反而使我国走上了自主研发的道路。

早期, 我们更多注重的是井孔声场理论和声波测井方法研究等, 取得了一系列重要的成果<sup>[1]</sup>。近年来, 我们面向实际需求, 开展了多极阵列声波成像测井的高技术研发工作, 形成了具有自己特色的多极子阵列声波测井数值模拟与资料处理软件, 并研发了可以直接应用于生产的高温高压声波测井换能器以及整套声波测井仪器, 从而在声波测井理论、方法与仪器等方面都取得了一系列重要的进展, 其中大部分工作还没有公开发表。

本文将从多极子阵列声波测井理论与数值模拟、高温高压正交偶极声波测井换能器与仪器、实验室测试与现场应用等方面介绍我们所取得的部分应用成果。

## 2 正交偶极声波测井理论与数值模拟

声波测井仪器设计的依据与资料处理方法的理论基础是井孔声学。正交偶极井孔声场可以用解析的、半解析和数值模拟的方法得到<sup>[1]</sup>。解析的方法可以快速准确给出各种声源的激发特性与传播特性, 是仪器参数优化设计的重要工具。在早期单极子分波分析的基础上<sup>[7]</sup>, 张秀梅等对偶极子的分别进行了深入的研究, 得出偶极弯曲波无截止频率<sup>[8]</sup>。基于半解析的摄动方法, 可以分析偶极弯曲波对径向和周向横波速度剖面的变化特征, 从而反演地层横波速度径向剖面及地应力估计<sup>[9-10]</sup>。

基于时域有限差分方法, 我们开发了一套完整的井孔声场数值模拟软件, 该软件可以模拟地层为弹性与粘弹性、各向同性与各向异性、二维和三维的井孔声场。通过对有限差分算法优化实现了快速的连续模拟<sup>[11]</sup>。

利用阵列声波测井除获取时差及各向异性分析外, 通过对信号频率域的分析还可以得到更丰富的地层信息, 如渗透率、地层径向剖面等。目前,

研发的阵列声波处理方法和软件已经应用到多个服务公司的开发平台中。

这部分内容既涉及到井孔声学的基本理论与数值模拟方法,也涉及到阵列信号的处理方法及实现,既涉及到理论,也涉及到技术,是几个方面合作的结果。

### 3 高温高压正交偶极声波测井换能器

#### 3.1 低频正交偶极子换能器

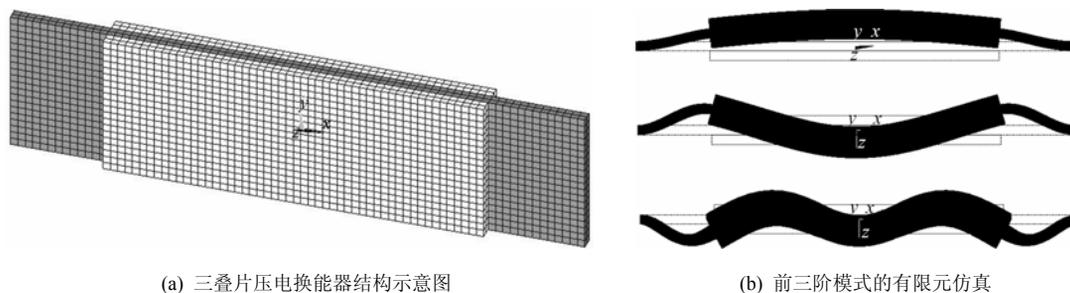
换能器是正交偶极声波测井仪器的关键部件,换能器的性能直接决定了仪器整体探测性能。长期以来,国内主要石油公司所需的高温、高压声波测井换能器一直依赖于进口,随着国际上石油资源勘探和开发激烈竞争的不断升级,国外主要石油测井公司严格控制换能器关键部件的出口。针对这一现状和国内石油企业的迫切需求,我们在相关石油企业的支持下,开展偶极声波测井换能器的研制与生产平台搭建,研发成功了满足正交偶极声波测井仪器的高温高压偶极换能器,并建立了较为系统而专业的产品制造平台。研制的换能器与进口换能器在实验室、消声水池和油田 3000 m 试验井进行了测试对比,其性能整体达到进口换能器的技术指标,部分性能超过进口换能器产品,如为适应严寒环境下的仪器运输和操作以及高温深井的测试,经过工艺优化,换能器的温度范围拓宽到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

正交偶极声波测井仪器的换能器系列主要由三大类换能器组成:圆管结构大功率单极发射换能器,主峰带宽是 $8\text{ kHz}\sim 15\text{ kHz}$ ;叠片结构弯曲振动型偶极发射换能器,工作频率范围是 $0.5\text{ kHz}\sim 6\text{ kHz}$ ;叠片结构接收换能器,带宽是 $0.1\text{ kHz}\sim 20\text{ kHz}$ 。其中,单极发射换能器结构和机理的研究

较深入,工艺也比较成熟,本文不详细介绍。偶极发射换能器多是一种基于弯曲振动的组合式三叠片换能器,其结构比较复杂。为了在高电压激励下产生具备一定多谐振峰的、含低频的弯曲波,对压电材料、合金材料和粘接材料等有温度和性能方面的特殊要求,同时,制造生产工艺也相对繁琐复杂。而接收换能器是基于多层结构的换能器,用于接收具有一定平坦带宽的单、偶极等声波信号,类似结构的接收换能器,国内外机理方面的研究相对成熟,其同样也需要与偶极发射换能器相似的材料和工艺制造要求。

换能器的基本理论是研制换能器的基础。压电换能器的经典理论中有一些关于圆管或薄板等规则形状的换能器的解析解,实际换能器的结构虽然很复杂,但是这些解析解帮助我们深刻了解换能器的工作机理和性能与参数之间的关系,因此必须熟悉这部分知识。在此基础上,分析实际换能器的有效的方法是数值仿真<sup>[12]</sup>,从而可以得到与实际模型接近的换能器的声场特性,包括换能器的振动模式、在流体介质中的振动和辐射的稳态或瞬态声场。图 1 的例子是用有限元计算的三叠片换能器的前三个振动模式。

理论分析和数值仿真大致确定了换能器的基本参数,但是实际的器件还包括材料和工艺等许多复杂的因素,因此实际的制作和测试是最关键的环节。在这个阶段工艺的探索和控制非常重要,尤其是高温粘接工艺,微小的工艺改变可能使成品性能产生很大的变化。经过大量反复的试验和对比得到的工艺必须固定,在后续的实验和生产中严格遵循和管理。另一个重要的因素是测试。我们研发的换能器在石油测井现场得到较为广泛的应用,效果良好。图 2 是各类换能器单元和总成的图片。



(a) 三叠片压电换能器结构示意图

(b) 前三阶模式的有限元仿真

图 1 有限元计算的三叠片换能器的前三个振动模式

换能器在现场完成了和进口设备的对比试验,图3的结果表明我们研发的换能器的性能达到了国外仪器的水平。

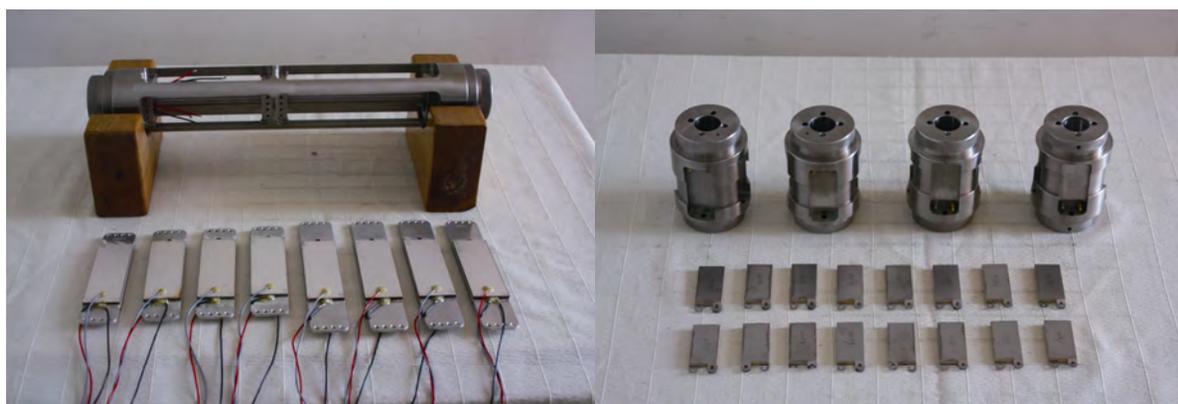
### 3.2 低频单极子换能器

为了解决低频斯通利波测量问题,我们研究了用于低频单极子声波测井的弯张换能器的工作原理,并研发了相关换能器。井孔的尺度限制对换能器设计提出了考验,为了实现低频高效辐射,我们采用三叠片作为基本阵元设计了一种低频单极子换能器。换能器结构及对应的导纳图如图4所示,设计采用四组三叠片,固定在一安装骨架上,组成一个正方形阵,每个三叠片处于正方形的一条边上,并对所有三叠片采用特定的激励,使其均同向振动。

采用有限元对置于油囊内的换能器结构进行

仿真分析,图5和图6分别是模拟的发射灵敏度与指向性图及其与实际测试结果进行比较。从图4可以看出,换能器在10 kHz 频率范围内设计换能器存在两个较明显的谐振峰,分别位于2.5 kHz 和5.2 kHz 附近。本设计主要应用于仪器的斯通利波激励,因此主要关注2.5 kHz 处的谐振峰,此处的电导和电纳分别为1.16 mS 和1.56 mS,较高的输入电导有利于与功率电信号输出装置的输出端匹配,利于高效辐射。

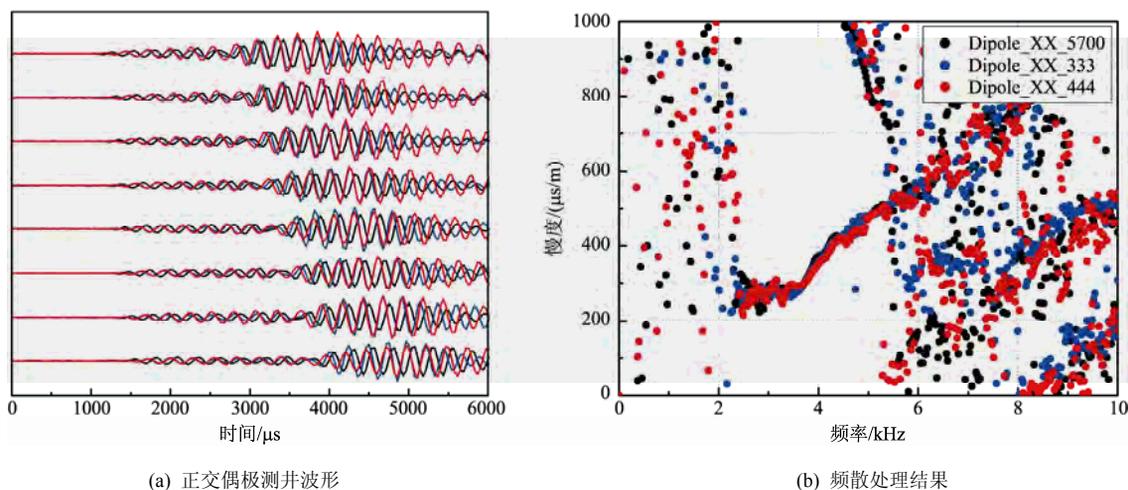
从图6的灵敏度仿真分析与实测结果对比可以看出,二者有较好的对应性,同时设计换能器在2.5 kHz 处的发射灵敏度达到125 dB,远高于压电圆管单极子换能器设计,很好地实现了低频高效辐射。并且随着设计和装配工艺的完善,换能器灵敏度能够进一步地提高,达到理论设计中的130dB。



(a) 正交偶极子发射换能器单元与总成

(b) 接收换能器单元与总成

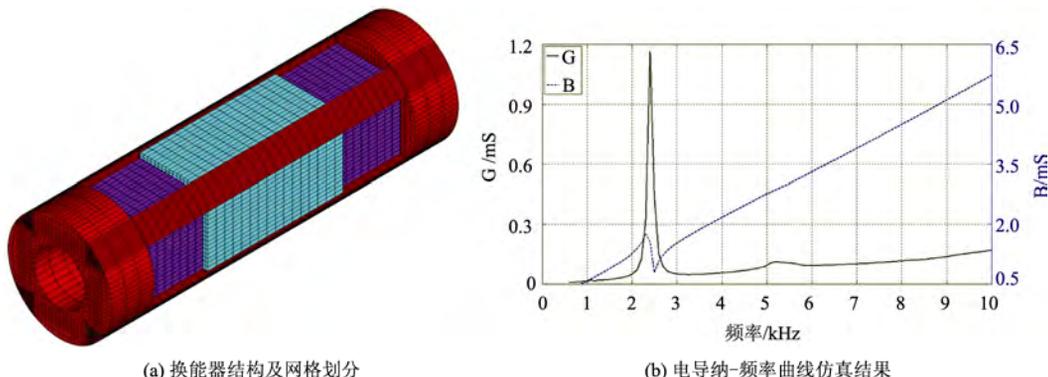
图2 各类换能器单元和总成



(a) 正交偶极测井波形

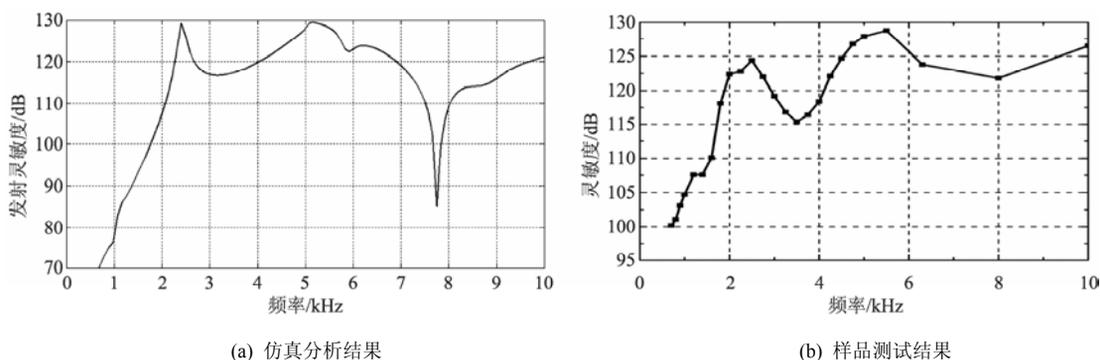
(b) 频散处理结果

图3 油田试验井正交偶极测井波形和频散处理结果比较试验,黑色和蓝色是进口换能器的结果,红色是我们研制的换能器的结果



(a) 换能器结构及网格划分 (b) 电导纳-频率曲线仿真结果

图 4 低频单极子换能器结构及输入电导纳仿真分析结果



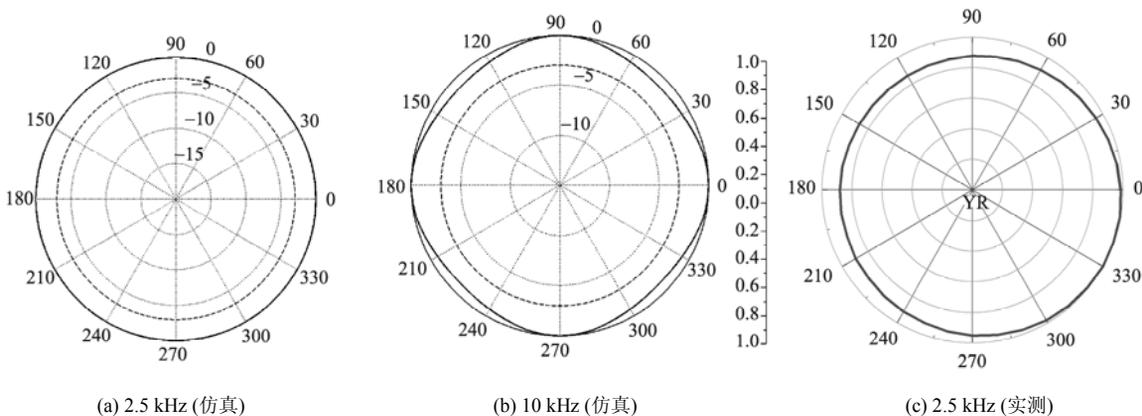
(a) 仿真分析结果 (b) 样品测试结果

图 5 探头发射灵敏度

从图 6 的换能器结构可以看出，本文中的低频单极子换能器设计方案中，换能器周向的振动并不均匀，但当换能器的周向结构尺度远小于波长（低频）时，换能器并不会表现出明显的空间指向性，图 6 模拟与实测的指向性图都表明换能器在 2.5 kHz 处均不存在周向指向性，完全满足低频单极子换能器的技术要求。而当换能器工作在高频如 10 kHz 以上时其周向指向性开始显现，同时频率越

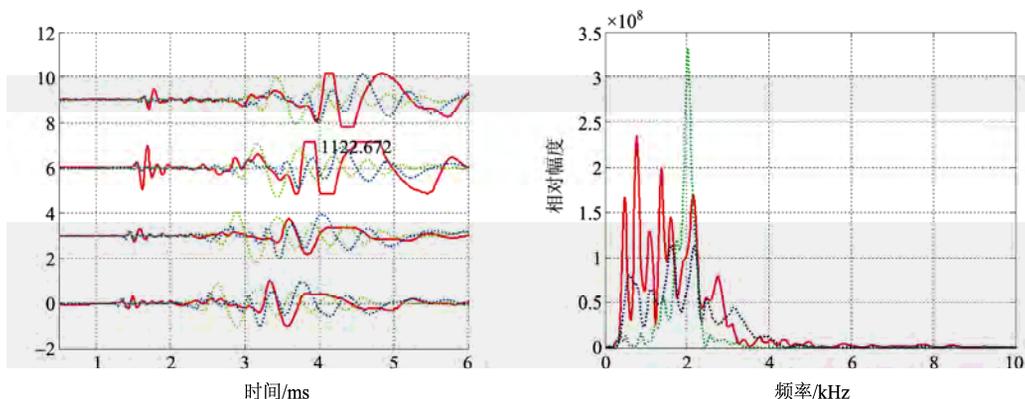
高，指向性越强。

由于采用了专用的低频斯通利波测量方法，它采用的频率等参数是根据斯通利波的性质优化确定的，因此提高了仪器的性能，图 7 是测试得到的信号、频谱及其与高频单极子换能器的对比。图中的绿色虚线是新研制的低频单极子换能器得到的斯通利波波形（上）及其频谱（下），红色实线为通常高频发射探头得到的波形及其频谱，蓝色实线



(a) 2.5 kHz (仿真) (b) 10 kHz (仿真) (c) 2.5 kHz (实测)

图 6 换能器灵敏度



(a) 高低频单极子仪器第一、三、五、七道原始资料对比

(b) 高低频单极子第一道频谱对比

图7 三种单极子实际测井结果对比

为进口仪器高频单极子的波形及其频谱,从对比可以看出,我们研制的低频单极子测得的斯通利波波形更为纯净,频谱呈明显的单峰,在实际资料处理中可能有其独特的优势。

#### 4 透声封装和高温电路设计与实现

我们以井孔声场分析和模拟为基础,根据测井实际的要求以及材料和工艺的现状就可以确定和设计仪器的组成、指标和功能。利用最新发展的材料和电子器件,可以研制出性能更好的声波测井仪器。

##### 4.1 井下透声封装设计

为了解决目前橡胶透声皮囊易受气体腐蚀的问题,选用一种新的透声材料,其声学参数见表1,对该材料采用不同厚度进行了优化设计研究,图8和图9分别是低频和高温无声窗和一定厚度声窗接收信号的对比。从这两个图可以看出,无论是低频还是高频信号声窗的引入的影响都较小,满足声波测井对透声窗的要求。

表1 透声模拟计算参数

	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
井内流体	1500	/	1000
透声材料	2449	1358	1300
硬地层	4500	2500	2500

##### 4.2 井下高温电路设计

在电路方面采用了集成度更高的芯片,不但简

化了仪器的结构,缩小了电路板的长度,降低了功耗,同时增加了线路的可靠性和耐温性能,为增加通道数,提高仪器的检测能力创造了条件。

电路部分包括多通道的发射和接收以及采集电路。发射部分由程序控制,可以分别驱动换能器按两个方向的偶极声源或单极子声源工作,也可以激发专用的斯通利波换能器,得到比较纯净的斯通利波。

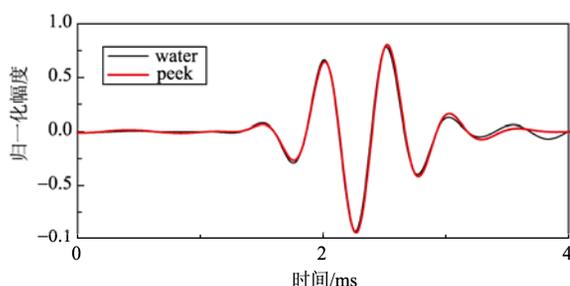


图8 单极子源在硬地层井孔中换能器上无透声材料(黑线)及有透声材料时(红线)的声场波形。其中声源的主频为2 kHz,源距为3.0m

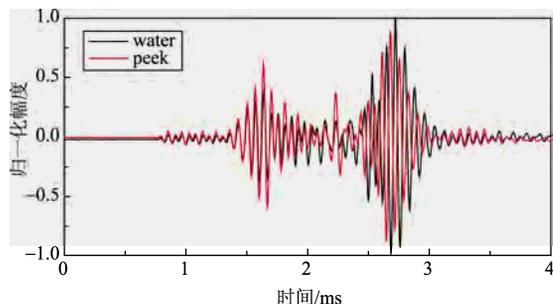


图9 单极子源在硬地层井孔中换能器上无透声材料(黑线)及有透声材料时(红线)的声场波形。其中声源的主频为15 kHz,源距为3.0m

接收电路有 16 个独立的通道，可以同时接收，有程控自动增益和带通滤波的功能。16 通道的接收可以在一次偶极发射时同时接收两个方向的偶极波形，得到同一深度的交叉偶极信号，以便处理解释，并且减少了发射次数，提高了测井速度。

采集电路也有 16 个通道，采用 16 位 AD，可实现 2:1 数据压缩功能，高阶数字滤波，可以实现 UART 通信、CAN 通信、曼彻斯特码通信功能。接收和采集电路的高性能可以提供充足的数据，为后续的解释应用创造了条件。

仪器总装完成后，分别进行了 140 MPa 高压和 175 °C 高温实验，实验表明，仪器达到了设计指标要求，满足了下井测试的条件。

### 5 现场试验结果分析

仪器经过实验室整体调试和水池测试及必要的温度压力试验后，在现场进行了多口井的对比测试，测试结果表明，仪器的一致性和重复性都达到了测井资料验收标准，同时和进口仪器也吻合较好。

图 10 是某口井重复性提取的时差结果对比图，表 2 是 2 支仪器共 5 口井的重复性误差统计结果。

表 2 研发仪器重复性绝对误差分析表（时差，单位 μs/ft）

	纵波	横波	斯通利波（单极）	斯通利波（低频）
研发仪器（#1）	1.2	2.7	1.4	1.2
研发仪器（#2）	1.4	3.3	1.6	1.9
标准绝对误差	2.0	4.0	4.0	4.0

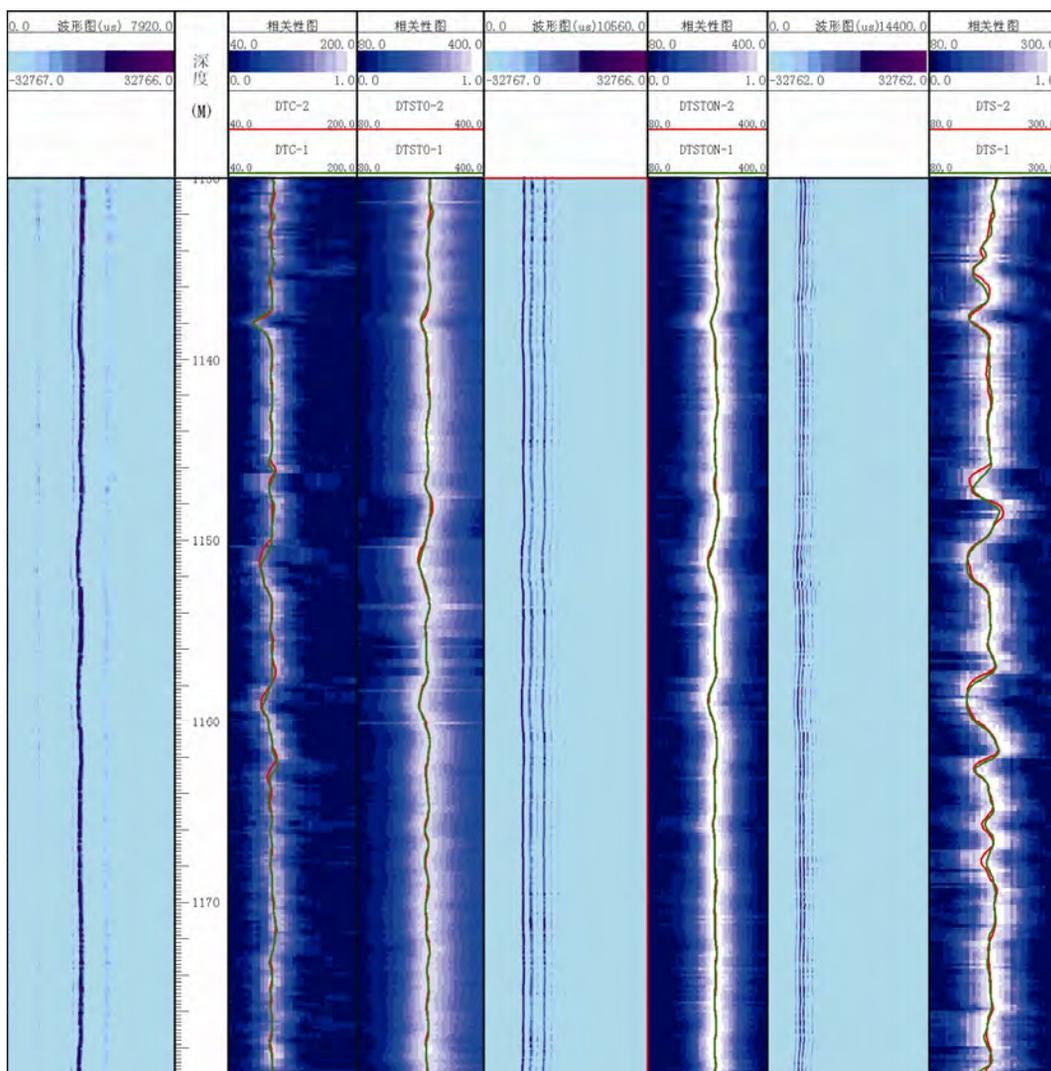


图 10 某井一号仪器提取分波重复性对比图

结果表明仪器的重复性误差达到了相关资料验收标准。

图 11 是研制的 2 支仪器与进口仪器在同一口井的对比结果,表 3 是 5 口井 2 支仪器与进口仪器总体对比结果。

图 12 是 2 支仪器的各向异性处理结果与进口仪器的对比图。由于测量井深较浅,且各向异性主要是由井孔不规则造成,整体较弱。3 支仪器反演的各向异性大小总体是上半段较弱,下半段较强。

**表 3 研发仪器与在用 XMAC 仪器一致性绝对误差分析表(时差,单位 $\mu\text{s}/\text{ft}$ )**

	纵波	横波	斯通利波
研发仪器 (#1&#2)	1.3	2.6	1.9
研发仪器 (#1)&XMAC	1.7	4.0	5.4
研发仪器 (#2)&XMAC	1.7	4.2	4.0

## 6 结论与展望

非常规油气的勘探开发给声波测井带来机遇和挑战,面向国家能源战略需求,在原有的理论基础上,针对阵列声波成像测井仪器的关键技术,我们通过团队的艰苦攻关,终于研制了具有自己特色、可以满足现场应用需求的整装仪器和配套的资料处理软件,从而打破了国外对高端声波测井技术的长期垄断,推动了深部钻测仪器装备研发技术的发展,为深部钻测仪器参与国际竞争提供了保障。

油田对测井专业不断提出更高的要求,国外也不断推出新的仪器和新的应用方案,我们必须在现有的工作基础上,不断发展,为我国的能源事业作出新的贡献。

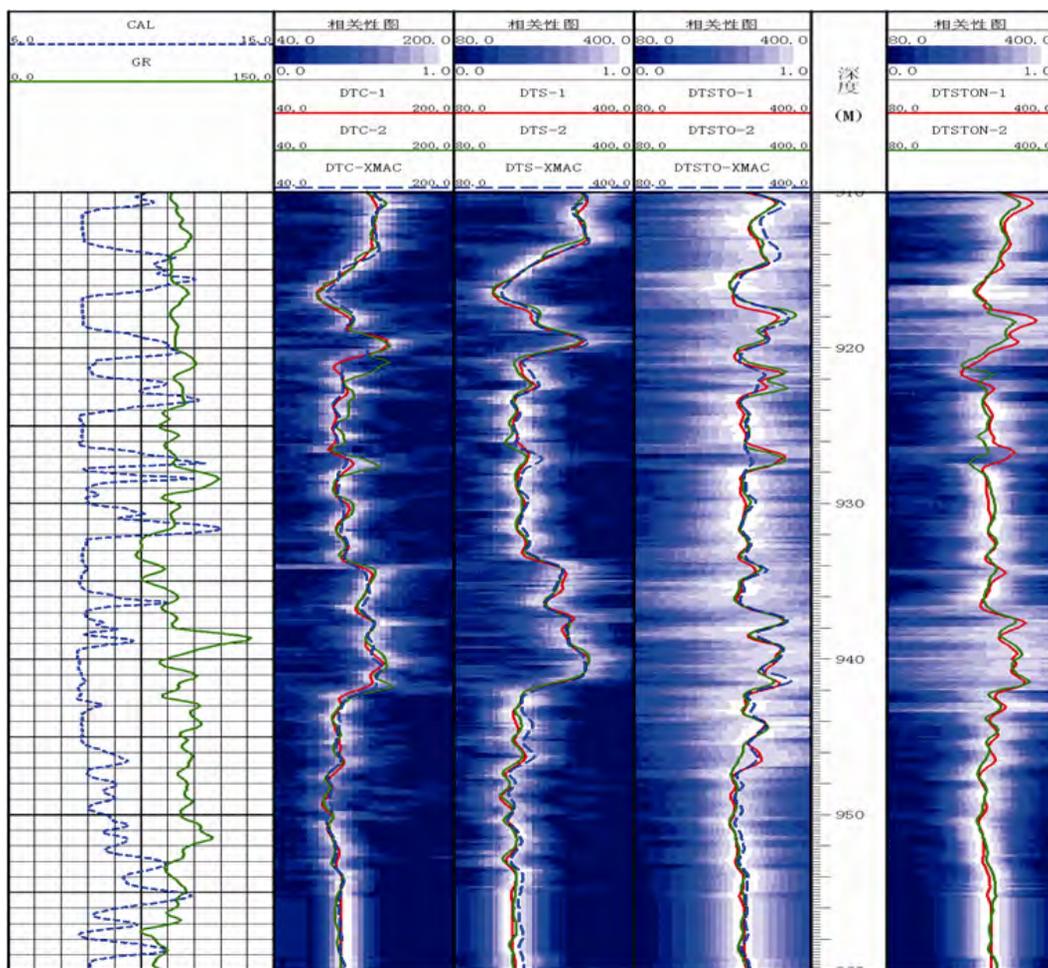


图 11 某井 2 支仪器与在用进口仪器一致性对比图

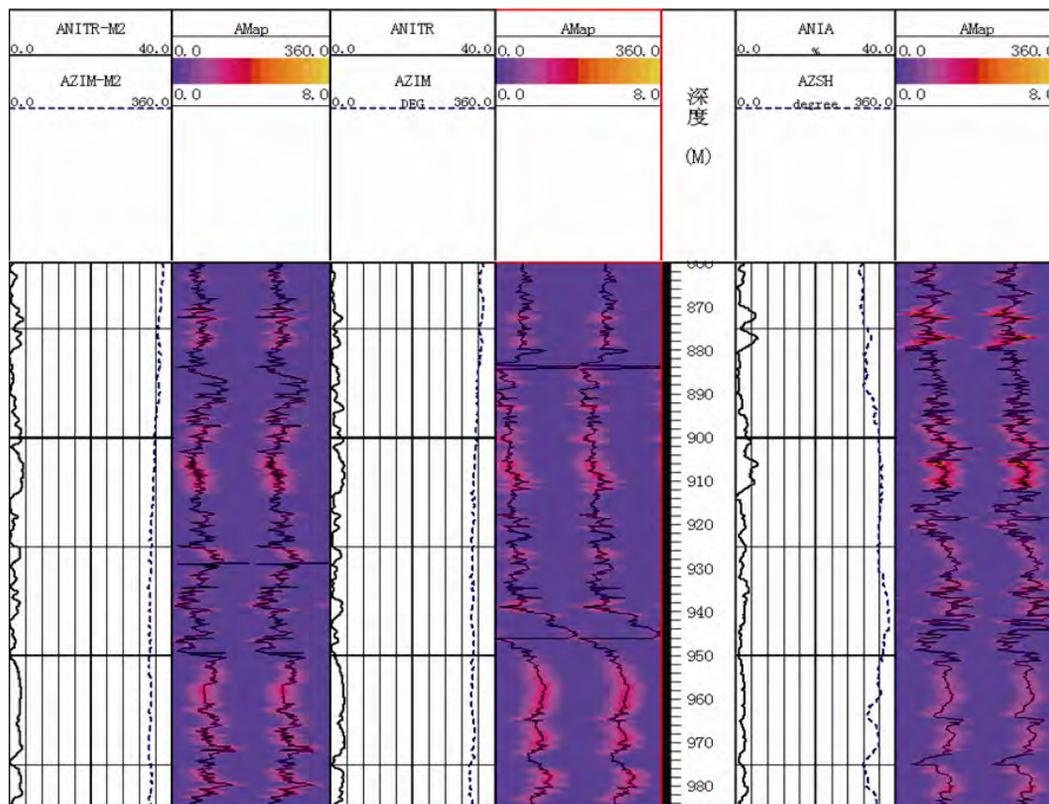


图 12 各向异性对比图

**致谢** 中国科学院声学研究所的丛健生、陈德华、魏倩、贺洪斌、林伟军、戴郁郁、车承轩、黄宝华、张秀梅等人参加了研究工作；中石油大庆钻探、中石油长城钻探和中海油服等公司给予了支持和帮助。在此一并致谢！

### 参 考 文 献

- [1] 张海澜, 王秀明, 张碧星. 井孔的声场和波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] ZEMANEK J, ANGONA F A, WILLIAMS D M, et al. Continuous acoustic shear wave logging[C]. Trans. SPWLA 25th Ann. Logging Symp, 1984.
- [3] ALAIN B, MICHAEL C M, DANIEL C, et al. New Directions in Sonic Logging[J]. Oilfield Review, 1998, Spring 40-55.
- [4] SCHMITT, D P. Shear wave logging in elastic formations[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1988, 2215-2229.
- [5] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 赵晓敏, 译. 北京, 石油工业出版社, 2004.
- [6] 唐晓明, 魏周拓. 声波测井技术的重要进展——偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 10-17.
- [7] WANG X M, ZHANG H L, YING C F. Representation and isolation of head waves in a borehole[C]. In: 64th Annual meeting SEG Meeting, 1994.
- [8] 张秀梅, 张海澜, 王秀明. 充液井孔中偶极子源激发的模式和分波[J]. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39(5): 709-718.
- [9] 马明明, 陈浩, 何晓, 等. 基于偶极弯曲波频散的横波慢度径向分布反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 2077-2087.
- [10] 陈浩, 王秀明, 赵立新. 交叉偶极子声测井多频率反演地层三阶弹性常数和地应力研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1663-1674.
- [11] CHEN H, HE X, YANG Y B. The Continuous Simulation Software for Multipole Sonic Logging in Layered Formations[C]. 20th International Congress on Sound and Vibration, 2013.
- [12] 王东, 刘西恩、陈宏海, 等. 油田用正交偶极声波测井换能器仿真和测试[J]. 声学技术, 2008, 27(5) Pt:250-252.