

# 从换能器技术的变化看声波测井技术的发展<sup>\*</sup>

乔文孝<sup>†</sup> 鞠晓东 车小花 卢俊强

(中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京市地球探测与信息技术重点实验室 北京 102249)

**摘要** 无论是在电缆测井还是在随钻测井方面,声波换能器结构和振动模式的变化导致了声波测井技术的进步和重大演化。文章以声波测井换能器技术的变化为主线,分析了声波测井技术的发展和进步以及我国在该技术领域取得的进步。单极子声波测井技术已经成为我国成熟的声波测井技术,包括非对称声源技术在内的多极子声波测井技术是我国刚刚攻克的先进声波测井技术并已经进入产业化进程,以井下声波的定向辐射和定向接收为最主要特征的相控声波测井技术是正在研发的新一代声波测井技术,我国在此领域也已经取得显著突破。

**关键词** 声波测井,换能器,单极子,偶极子,相控阵

## Transducers and acoustic well logging technology

QIAO Wen-Xiao<sup>†</sup> JU Xiao-Dong CHE Xiao-Hua LU Jun-Qiang

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

**Abstract** Improvements in the structure and vibration mode of acoustic transducers has led to remarkable progress in acoustic well logging technology both for wireline logging and logging while drilling. We analyze recent developments, particularly in China, along the acoustic transducer. Monopole acoustic well logging is mature in China. Furthermore, the more advanced multipole acoustic well logging technology in which an asymmetric acoustic source is used has already entered the production stage. The latest generation of acoustic logging, known as acoustic phased-array well logging and featuring directional acoustic radiation and receiving, is being developed, and significant achievements have already been made in China.

**Keywords** acoustic well-logging, transducer, monopole, dipole, phased-array

## 1 引言

声波测井技术是指在几千米深的充液井孔下布置声源并产生井孔中的多种模式波,通过对各种模式波的波速和衰减等声学信息的测量来评价井壁介质性质的一种石油工程技术。从声学上讲,声波测井的理论属于充液井孔中的波导理论问题。由声波测井技术测量的井孔中各种波动模式的声速、衰减是石油勘探、开发中的极其重要的参数<sup>[1]</sup>。岩石的纵、横波波速和密度等资料,可用来计算岩石的弹性参数(杨氏模量、体积弹性模量、泊松比等),计算岩石的非弹性参数(单轴抗压强度、地层张力等),估算最大、最小主应力,估算孔隙压力、破裂压力和坍塌压

力,计算地层孔隙度和进行储层评价及产能评估,估算地层孔隙内流体的弹性模量,从而形成独立于电学方法的、解释结果不依赖于矿化度的孔隙流体识别方法。岩石的纵、横波波速和密度等资料与斯通莱波波速、衰减资料相结合,可以用来估算地层的渗透率。此外,它还可以为地震勘探多波多分量问题、合成地震记录问题等提供输入参数等等。经过半个多世纪的发展,声波测井已经成为一个融声学理论、电子技术、计算机技术和信息处理技术等最新科技为一体的现代测量技术,并且这种技术仍在迅速发展

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:40874097)、高等学校博士学科专项科研基金(批准号:20070425028)、国家油气重大科技专项(课题号:2009ZX05009-005)资助项目

2010-08-30 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人。Email: qiaowx@cup.edu.cn

之中,声波测井在地层评价、石油工程、采油工程等  
领域发挥着越来越重要的作用.与电法测井和放射  
性测井方法并列,声波测井是最重要的测井方法之  
一.

声波测井技术的进步是多方面的.从声波测井  
中探头的个数来说,声波探头个数的不断增加提高  
了声波测量信息的冗余度,改善了声波测量的可靠  
性;从声波测井中探头的振动方式来说,声波探头经  
历了单极子振动方式、偶极子振动方式、四极子振  
动方式.另外,利用声波相控阵工作方式<sup>[1-3]</sup>,逐步  
满足了在任意地层井孔中测量地层的纵、横波波速,  
评价地层的各向异性和三维声波测井的需求.声波  
探头的相邻间距不断减小,而收发探头之间的距离(简  
称源距)在不断增大,这一方面提高了声波测井在井  
轴方向的测量分辨率,另一方面也提高了声波测井的  
径向探测深度.声波测井的主频逐步降低,工作频  
率范围在逐步向宽频带方向发展.数据采集的采样  
间隔不断变小而采样长度不断增加,从而为扩大声  
波测井的探测范围提供了保障.从声波测井中应用  
的电子技术来说,模拟电路、数字电路技术逐步发展  
为大规模可编程电路和内嵌中央处理器技术,实现  
了声波测井仪器的探头激励、数据采集、内部通讯、  
逻辑控制、数据传输等方面的智能化和集成化.可以  
预期,下一代声波测井仪器研制的关键技术之一是,  
研制能够控制声束指向性的基阵式换能器.应用相  
控阵换能器的最大优势就是增大空间某个方向的声  
辐射强度,使声波沿着预先设定好的方向辐射,从根  
本上增加有用信号的能量,提高信噪比和探测能  
力<sup>[3-5]</sup>.显然,声波探头结构和振动模态性质的变化  
直接导致了声波测井技术的进步.

## 2 单极子声波测井技术

声波测井仪器的声系一般由声波发射探头、隔  
声体和声波接收探头等部件构成.在井下采用单极  
子声源(对称声源)及单极子接收技术的声波测井技  
术称之为单极子声波测井技术或者为对称声波测井  
技术.一般来说,井下的单极子声源采用了如图 1  
(a)所示的圆管状结构的压电振子,其在沿径向膨胀  
和收缩的振动过程中始终保持圆管状的对称外形不  
变.当圆管状的压电振子所辐射声波的波长比压电  
振子的尺度大许多时,可以将圆管状的压电振子视  
为一个脉动球源,其辐射指向性近似为一个球面,其  
水平指向性曲线近似为图 1(b)所示的一个圆图.图

1(b)表明,井下的单极子声源可以向各个方向的井  
壁均匀辐射声波能量,显然,由单极子接收器接收  
到的声波信号携带了整个圆周上井壁介质性质的综  
合信息.

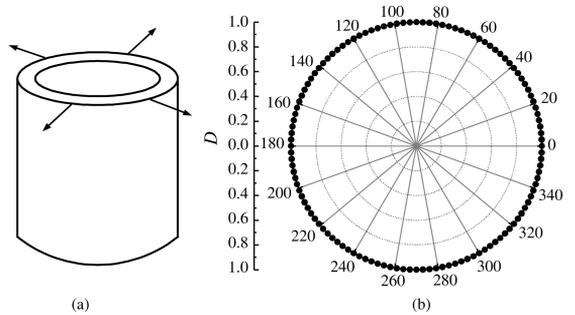


图 1 (a)单极子声源的示意图;(b)单极子声源的水平指向性  
曲线,其中 D 为指向性函数(下同)

如图 2(a)所示,假设在硬地层裸眼井孔中布置  
1 个单极子声源和 8 个单极子声波接收器,则 8 个  
声波接收器接收到的声波波列信号如图 2(b)所示.

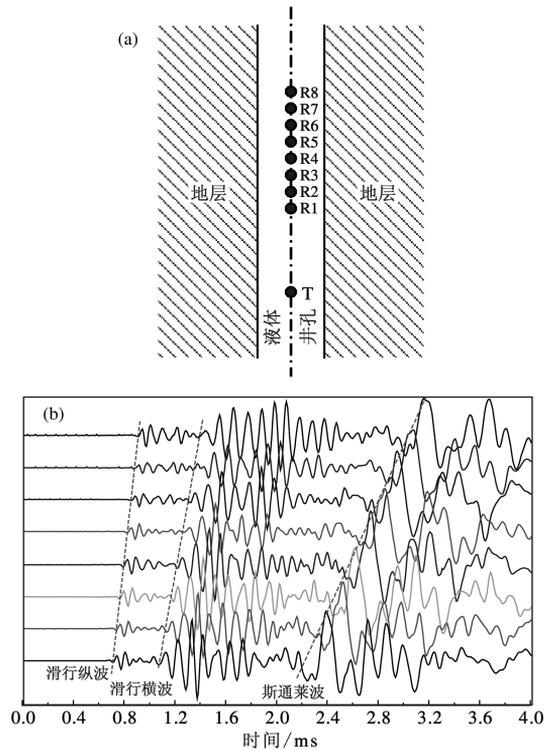


图 2 (a)在硬地层裸眼井孔中布置 1 个单极子声源和 8 个单  
极子声波接收器的示意图(图中字母 T 代表单极子声源,R1—  
R8 代表 8 个单极子声波接收器);(b)单极子声源在硬地层充  
液井孔中产生的声波波形

由图 2(b)可见,单极子声源在硬地层井孔中激  
发起以滑行纵波为首波、包括滑行横波、伪瑞利波和  
斯通莱波为先后顺序的全波列,其中滑行纵波、滑行  
横波、伪瑞利波和斯通莱波的幅度依次增大,而主频

则依次降低. 因为在软地层井孔中, 由于地层的横波波速小于井内液体的波速, 对称声源产生的波列中没有滑行横波模式波包<sup>[6]</sup>, 因而无法在软地层测量地层的横波信息.

单极子声波测井技术已经成功地应用于电缆声波测井(裸眼井和套管井)和随钻声波测井技术, 我国已经完全掌握了电缆单极子声波测井技术, 正在进行随钻单极子声波测井技术的研发.

### 3 多极子声波测井技术

由于在软地层充液井孔中利用单极子声波测井技术无法获得地层的横波波速, 而地层的横波波速对于地层评价和石油工程来说是一个至关重要的参数, 因此, 从 1980 年起, 人们着力于在井下应用包括偶极子声源和四极子声源在内的非对称声源进行声波测井的方法研究<sup>[7-9]</sup>. 偶极子声源和四极子声源的原理图和水平指向性曲线分别如图 3 和图 4 所示. 综合采用单极子声源、偶极子声源和四极子声源的声波测井仪器称之为多极子声波测井仪器.

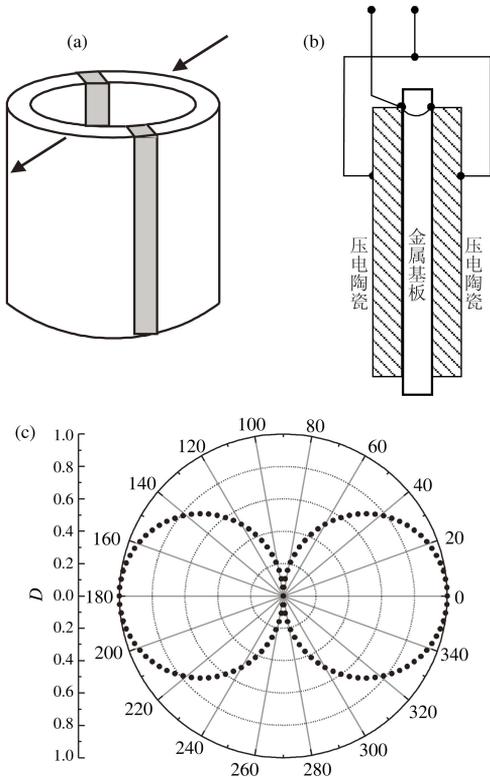


图 3 (a)偶极子声源的原理图;(b)偶极子声源的结构示意图;  
(c)偶极子声源的水平指向性曲线

研究表明, 在充液井孔中应用偶极子声源或四极子声源技术, 可以分别在充液井孔中激励起弯曲波(偶极子波)和螺旋波(四极子波). 一般来说,

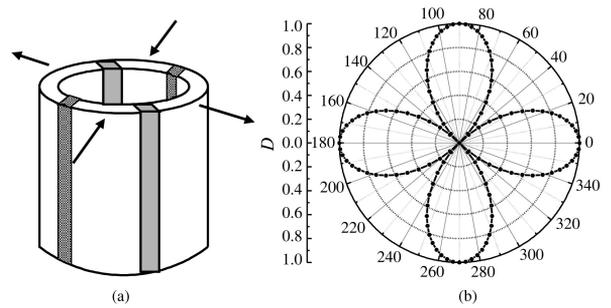


图 4 (a)四极子声源的原理图;(b)四极子声源的水平指向性曲线

弯曲波和螺旋波都是频散波, 其波速略小于地层的横波波速, 但各自的截止频率处的弯曲波和螺旋波的波速接近于地层的横波波速. 1984 年美国 Mobil 公司推出了用于石油测井的偶极子横波测井仪<sup>[9]</sup>后, 人们在理论上更加深入研究了多极子声波在充液井孔中的传播, 同时加紧进行非对称声波测井仪器的研制. 到 1990 年, 以斯伦贝谢公司的 DSI 为代表的偶极子横波测井仪已投入市场, 偶极子横波测井仪不断在现场获得良好资料<sup>[2]</sup>. 使用多极子声波测井仪器可以直接测量而不是估算出地层的横波波速, 这对于地层评价和地应力分析都具有十分重要的意义. 另外, 利用正交偶极子声波测井技术可以评价地层的各向异性, 这成为在井眼中评价地层水平主应力和垂直裂缝的最直接、最准确的技术手段. 因此可以说, 偶极子和四极子声波测井技术的出现是声波测井技术的一次重大技术进步.

中国石油大学(北京)与中国石油天然气集团公司合作研发的多极子阵列声波测井仪(MPAL)具有充液井孔中单极子、正交偶极子和四极子声波测井功能, 可以在任意地层井孔中测量地层的纵、横波时差, 地层的各向异性, 地层的渗透率等地层评价信息, 是一种具有 21 世纪初国际先进水平和完全知识产权的新一代声波成像测井仪器. 图 5 和图 6 是 MPAL 的测量成果图. 在图 5 中可以看出, 深度为 900m 附近和 925m 附近的地层是软地层, 在这两个井段的单极子声波测井波列中, 仅仅观察到滑行纵波和斯通莱波而看不到滑行横波波包, 因此, 依据这两个井段的单极子声波测井波形无法准确测量地层的横波波速. 然而, 在这两个井段中, 偶极子声波测井波形良好, 从而可以获得准确的偶极子波速, 可以将其近似为地层的横波波速. 图 6 是在同一个井段分别利用 MPAL 和国外同类仪器(XMAC)的测井资料评价地层各向异性的对比成果图. 由图 6 可见, 无论地层快、慢横波时差的数值, 各向异性参数的数

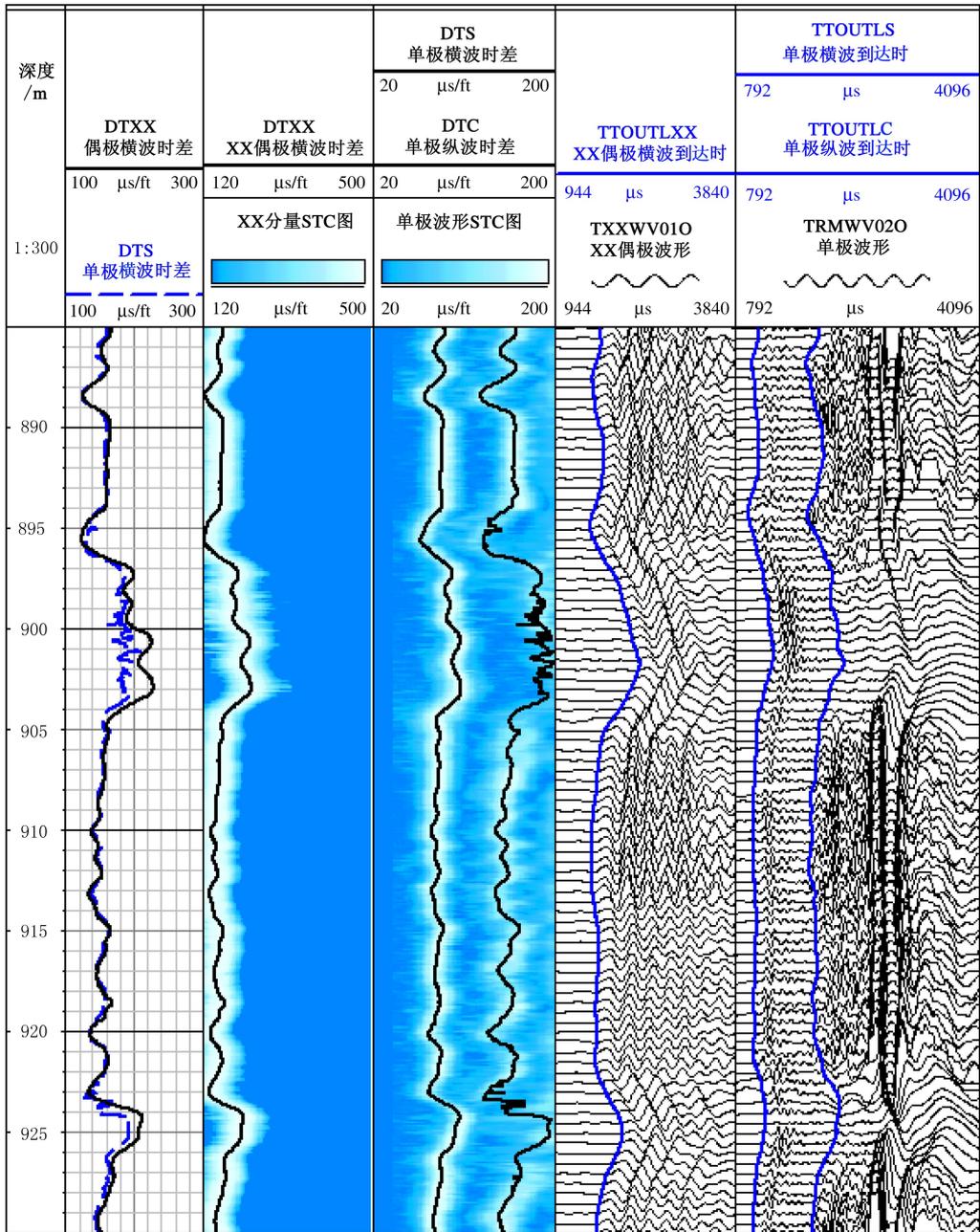


图5 软地层井孔中MPAL的测量结果

值以及地层快横波面的方位角等,国产仪器与进口仪器的测量结果都有良好的可比性. MPAL 已经在我国的油田开发、地层评价等方面得到了不断应用,同时也取得了良好的应用效果<sup>[10-14]</sup>.

MPAL 在各种测量模式下的测量结果都与国外同类仪器的测量结果有良好的可比性,无论是在测量功能方面还是在测井效果方面,MPAL 都达到了现有国外先进声波测井仪器的水平,彻底打破了国外在此领域对我国的封锁. MPAL 在储层评价、井壁地层力学性质评价、地层压裂效果评价等方面具有良好的应用前景,它的成功开发对于我国在声

波测井技术领域赶超世界先进水平、摆脱国外的技术垄断、装备我国测井队伍和在国外进行高水平声波测井技术服务等方面都具有重大意义.

已有的研究工作表明,对于电缆声波测井技术而言,应用偶极子声波技术既可以解决在任意地层充液井孔中测量地层横波波速的问题,又可以评价地层的各向异性,而四极子声波测井技术没有显示出更多的优越性.但是,对于在随钻条件下测量地层的横波波速而言,应用四极子声波测井技术显然要比应用偶极子声波测井技术要好得多<sup>[15]</sup>.

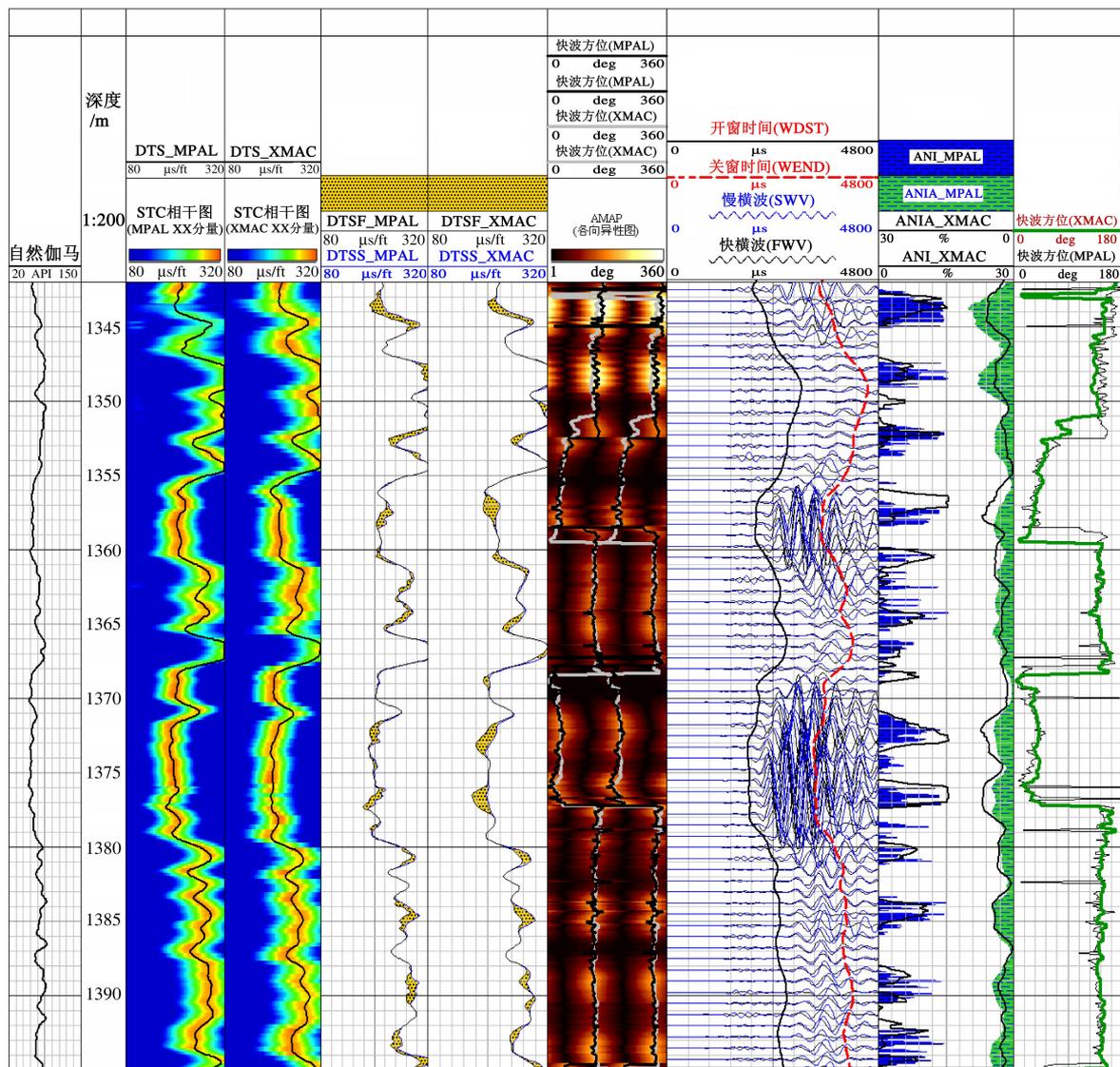


图6 利用MPAL和XMAC评价地层各向异性的对比成果图(图中API, DTSF, DTSS, ANI, ANIA分别为美国石油学会所定义的地层的放射性计数率指标、快横波慢度、慢横波慢度、地层各向异性指数和平均地层各向异性指数)

#### 4 相控声波测井技术

随着复杂油气藏的勘探开发,人们对方位声波测井技术和三维声波测井技术的需求日益迫切.在裸眼井中进行具有方位分辨能力的声波测井,可以评价地层的非均质性和各向异性;在套管井中进行具有方位分辨能力的声波测井,可以大大地提高水泥胶结质量评价的准确度;在井眼中进行方位反射声波测井,不但可以评价井旁有无裂缝、层理及其离井轴的距离,还可以测定其方位角,这对于水平井、大斜度井的地层评价,井旁地层裂缝和界面评价以及定向钻井、定向射孔等石油工程都具有重大意义.方位声波测井技术的实现有可能形成我国具有自主知识产权的、原创性的新

一代声波测井技术.井下声波的定向辐射和定向接收技术可以从根本上解决方位测量分辨率、非均质和各向异性地层评价、提高信噪比和提高探测能力方面的难题,是方位声波测井的关键技术.而方位声波测井技术的实现关键是在井下实现相控声波技术.与传统的声波辐射器不同,相控阵声波辐射器是由多个振动元件(简称阵元)构成,各个阵元可以分布在一条线上、一个平面上或一个立体曲面上,对各个阵元施加一定规则的激励信号(相位控制和幅度控制)即可实现声波的定向辐射<sup>[4]</sup>.根据同样的原理可以实现声波的定向接收.人们在相控阵列辐射器方面已经做过大量工作,积累了丰富的经验,在许多领域有大量成功的案例<sup>[5]</sup>.相控阵的动态指向性和声束聚焦特性可应用于许多行业,尤其是在医学、无损检测、军事等领域上得到了极其广泛的应用.

### 4.1 声波测井相控线阵技术

将若干个圆管状声波换能器按直线排列就形成了可以用于井下的声波相控线阵. 已有的研究工作表明, 声波测井相控线阵的辐射指向性明显优于单个圆管状换能器的指向性, 前者可以使声波能量向着接收探头一侧辐射, 相控线阵大大增加了有用的声波辐射能量, 提高了探测能力和信噪比, 在现有声波测井仪器改造和新一代声波测井仪器研制中有广泛应用价值. 声波测井相控线阵的实验结果表明, 随着施加于相邻阵元激励信号的延迟时间的增加, 相控线阵的声束指向角不断变大, 先后分别满足纵波临界折射和横波临界折射条件, 使充液井孔中的滑行纵波、滑行横波和斯通莱波分别得到加强, 而斯通莱波的幅度随着延迟时间的增加而单调增加. 实验测量结果与用有限元数值模拟的结果有良好的一致性<sup>[16-18]</sup>. 图 7(a) 是一个 4 阵元相控线阵声波辐射器的结构示意图, 当对其各个阵元施加不同延迟时间的激励信号时, 该相控线阵的声波辐射指向性如图 7(b) 所示.

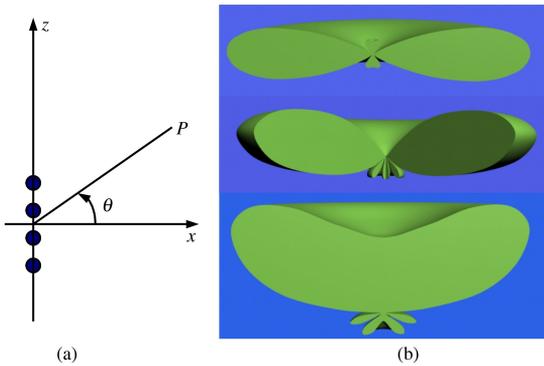


图 7 (a) 4 阵元相控线阵的结构示意图; (b) 4 阵元相控线阵的声波辐射指向性图

### 4.2 声波测井相控圆弧阵技术

将若干个压电振子声波换能器按一个圆周排列就形成了可以用于井下的相控声波圆弧阵<sup>[19,20]</sup>. 图 8 表示一个 28 阵元相控声波圆弧阵的结构示意图. 我们选取如图 9 所示圆弧阵的一段圆弧上的 9 个阵元组合成一个子阵, 对该子阵的各个阵元进行相位延迟激励, 可以实现声波辐射周向指向性的控制. 以图 9 所示的标号为 3—11 的圆弧上的 9 个阵元工作为例, 若以 7 号阵元为中心, 从两侧对称地向 7 号阵元依次施加某一延迟时间的激励信号, 则可以形成一个等效的以 7 号阵元为中心的 9 阵元相控线阵, 其各个阵元相当于沿着与  $y$  轴平行的直线  $AB$  分布. 具体来说, 若假设各个阵元的波阵面传播到直线  $AB$  的时间分别用  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  表示, 最先激励 3 号和 11 号阵元, 并标记此时刻为 0 时刻; 到  $(\tau_4 - \tau_3)$

时刻时, 激励 4 号和 10 号阵元; 到  $(\tau_4 - \tau_2)$  时刻时, 激励 5 号和 9 号阵元; 到  $(\tau_4 - \tau_1)$  时刻时, 激励 6 号和 8 号阵元; 最后, 到  $\tau_4$  时刻时激励 7 号阵元. 这样,  $\tau_4$  时刻时子阵各个工作阵元的波阵面便同时与直线  $AB$  相切. 若在某一时刻选择 3—11 号阵元工作并形成以 7 号阵元为中心的辐射声束, 而在下一时刻选择 2—10 号阵元工作, 形成以 6 号阵元为中心的辐射声束, 依次循环选择不同的阵元工作, 就可以分别在圆周方向的不同方位上形成辐射声束, 从而可以实现周向扫描辐射. 其实, 通过适当的相控激励, 图 8 所示的相控声波圆弧阵可以实现单极子、偶极子和四极子声波辐射器的功能<sup>[21]</sup>.

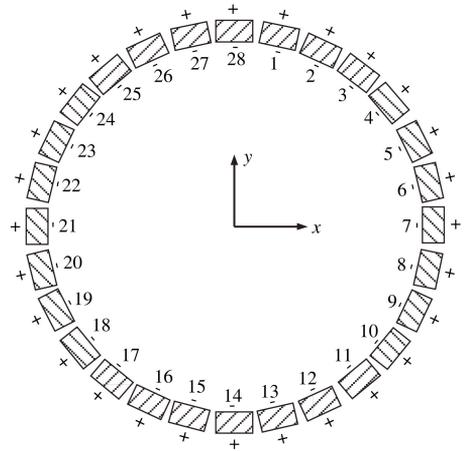


图 8 28 阵元相控声波圆弧阵的结构示意图

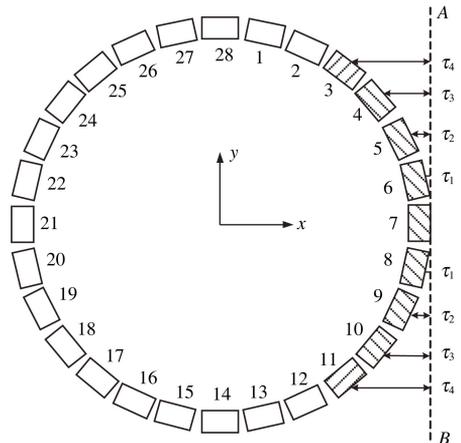


图 9 相控声波圆弧阵工作的原理示意图

将若干个如图 8 所示的相控声波圆弧阵沿轴线排列, 就形成了如图 10 所示的相控声波组合圆弧阵<sup>[22]</sup>. 我们课题组制作了可以应用于井下的相控声波组合圆弧阵, 图 11 表示相控组合圆弧阵辐射声场的水平指向性曲线和垂直指向性曲线. 由图 11 可见, 采用相控声波组合圆弧阵技术之后, 可以使井下声波辐射器辐射主声束的角宽(水平面 3dB 角宽约  $45^\circ$ , 垂直面 3dB 角

宽小于  $20^\circ$ ) 得以控制, 偏转方向得以调节. 我们课题组开发的基于相控声波组合圆弧阵技术的方位固井质量声波评价仪已经成功地进行了 7 口井的现场试验, 初步展现出显著的技术优势和良好的应用前景.

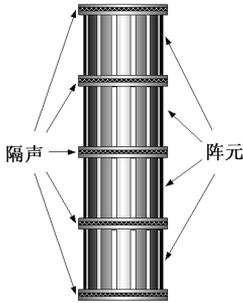


图 10 相控声波组合圆弧阵结构示意图

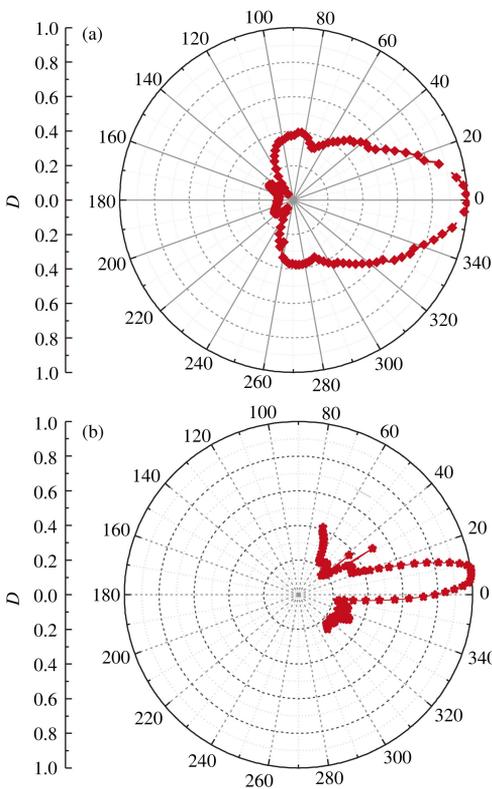


图 11 (a) 相控声波组合圆弧阵的水平指向性曲线; (b) 相控声波组合圆弧阵的垂直指向性曲线

### 4.3 相控声波测井技术的应用展望

在裸眼井进行的常规声速测井、阵列声波测井和多极子声波测井技术, 基本满足了地层产能评价、任意地层横波波速测量、地层各向异性评价、压裂效果评价等工程需求. 这些测井技术可以称之为 1 维(井轴方向)或 1.5 维(井轴方向一维和周向方向半维)声波测井技术. 3 维(井轴、周向和径向)声波测井技术可以用于评价井壁附近地层和远离井轴地层的周向和径向的不均匀性, 其测量结果对于储层评价、井壁力学性质评价、钻井中安全泥浆窗口的计

算、定向射孔、定向钻井和在井旁地层界面评价以及在水平井和大斜度井中评价储层厚度都具有重要的意义. 显然, 3 维声波测井技术是声波测井技术的发展方向和前沿技术. 斯伦贝谢公司开发出的 SonicScanner 就是一种准 3 维声波测井技术<sup>[23]</sup>, 国内在相控声波测井技术方面的研究作为开发 3 维声波测井技术奠定了良好的基础.

在井下进行的反射声波测井方面, 当前国内外研究的一个重要不足是, 利用对称声源的反射声波技术<sup>[24,25]</sup>对井旁介质的成像没有周向分辨能力, 在测量结果中无法准确说明井旁地质结构的方位信息. 利用多极子声波测井技术中的正交偶极子声源进行的反射声波测井方法<sup>[26,27]</sup>, 在一定程度上解决了测量结果的方位分辨率的问题, 但严格来说, 其结果仍然具有多解性. 在井下应用相控声波技术是从根本上实现 3 维反射声波成像测井的希望. 而只有实现水平面指向性(周向指向性)和垂直指向性的定向声波辐射、定向声波接收和控制, 才有可能实现 3 维反射声波成像测井. 相控声波测井技术有望应用于裸眼井和套管井的声波测井以及反射声波测井、随钻声波测井和随钻地层界面探测等新兴声波测井技术以及井间声波勘探等声波勘探技术<sup>[28-30]</sup>.

## 5 结束语

本文以声波测井换器的发展变化为主线, 评述了声波测井技术的发展和变化. 我们认为, 声波测井换器技术的变化恰恰是声波测井技术更新换代的最主要的特征. 我国在发展自己的声波测井技术方面遵循着引进、消化、吸收和再创新的路线, 单极子声波测井技术已经成为我国成熟的声波测井技术, 包括非对称声源技术在内的多极子声波测井技术是我国刚刚攻克的先进声波测井技术并已经进入产业化进程, 而以井下声波的定向辐射和定向接收为最主要特征的相控声波测井技术是正在研发的新一代声波测井技术, 我国在此领域已经取得了显著突破.

### 参考文献

- [1] Paillet F L *et al.* The Log Analyst, 1991, 32(3):185
- [2] Brie A *et al.* Oilfield Review, 1998, 10(1):40
- [3] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花. 声学技术, 2005, 24(增): 11 [Qiao W X, Ju X D, Che X H. Technical Acoustics, 2005, 24 (z1):11(in Chinese)]
- [4] 栾桂冬等. 压电换能器和换能器阵. 北京: 北京大学出版社, 1990
- [5] Woo Shi-Chang *et al.* J. Acoust. Soc. Am., 1999, 105(6):3275
- [6] Haldorsen J, Linton Johnson D, Plona T *et al.* Oilfield Re-

- view, 2006, 18(1): 34
- [ 7 ] Kitsunezaki C. *Geophysics*, 1980, 45(10): 1489
- [ 8 ] Chen S T. *Geophysics*, 1989, 54(5): 590
- [ 9 ] Winbow G A, Rice J A. 54th Ann. Internat. Mtg. ,Sot. Expl. Geophys. ,1984, Expanded Abstracts: 37
- [10] 朱爱民, 熊孝云, 丛培栋等. 测井技术, 2010, 34(3): 293 [Zhu A M, Xiong X Y, Cong P D *et al.* *Well Logging Technology*, 2010, 34(3): 293 (in Chinese)]
- [11] 乔文孝, 王瑞甲, 车小花等. 声学技术, 2008, 27(5): 270 [Qiao W X, Wang R J, Che X H *et al.* *Technical Acoustics*, 2008, 27(5): 270 (in Chinese)]
- [12] 王瑞甲, 乔文孝, 鞠晓东等. 声学技术, 2008, 27(5): 272 [Wang R J, Qiao W X, Ju X D *et al.* *Technical Acoustics*, 2008, 27(5): 272 (in Chinese)]
- [13] 王瑞甲, 乔文孝, 车小花. 声学技术, 2009, 28(2): 17 [Wang R J, Qiao W X, Che X H. *Technical Acoustics*, 2009, 28(2): 17 (in Chinese)]
- [14] Che X H, Qiao W X, Wang R J. MPAL Cross-Dipole Array Acoustic Logging Data Processing. 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin, 2009. 1097
- [15] Tang X M, Dubinsky V, Patterson D. Development of a Low-Frequency Quadrupole Shear-Wave Technology To Improve Quality of LWD Shear Velocity Measurement. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, 2006. 102335
- [16] Qiao W X, Du G S, Chen X L. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(5): 755
- [17] Che X H, Qiao W X. Progress in Borehole Acoustic Reflection Imaging. 2002 China-Japan Joint Conference on Acoustics (JCA2002). Nanjing, 2002
- [18] Qiao W X, Chen X L, Du G S *et al.* *Chinese Journal of Acoustics*, 2003, 22(4): 33
- [19] 乔文孝, 车小花, 鞠晓东等. 地球物理学报, 2008, 51(3): 939 [QIAO W X, Che X H, Ju X D *et al.* *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3): 939 (in Chinese)]
- [20] 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, 中国发明专利, ZL 03137596. 0, 2006
- [21] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花等. 中国石油大学学报, 2006, 30(5): 33 [Qiao W X, Ju X D, Che X H *et al.* *Journal of China University of Petroleum*, 2006, 30(5): 33 (in Chinese)]
- [22] 乔文孝, 鞠晓东, 陈雪莲. 一种任意指向性可控井下声波辐射器, 中国发明专利, ZL 20031011 5236. 1, 2006
- [23] Pistre V, Kinoshita T, Endo T *et al.* A Modular Wireline Sonic Tool for Measurements of 3D (Azimuthal, Radial, and Axial) Formation Acoustic Properties. SPWLA 46th Annual Logging Symposium. United States, 2005
- [24] Hornby B E. Imaging of Near-Borehole Structure with the Array Sonic Tool. 58th SEG Annual International Meeting and Exposition. Anaheim, 1988. 124
- [25] 柴细元, 张文瑞, 王贵清等. 测井技术, 2009, 33(6): 539 [Chai X Y, Zhang W R, Wang G Q *et al.* *Well Logging Technology*, 2009, 33(6): 539 (in Chinese)]
- [26] Tang X M. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1378
- [27] Tang X M, Patterson Douglas J. *Geophysics*, 2009, 74(6): WCA211
- [28] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花. 方位反射声波测井方法, 中国发明专利, ZL 200610144243. 8, 2009
- [29] 鞠晓东, 乔文孝, 车小花. 方位井间地震勘探方法, 中国发明专利, ZL 200610144242. 3, 2009
- [30] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花. 裸眼井方位声波测井方法, 中国发明专利, ZL 200610144244. 2, 2010