

Che X H, Qiao W X. Acoustic field in formation generated by linear phased array transmitters in fluid-filled boreholes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 731 ~ 736

# 充液井孔中的相控线阵 声波辐射器在地层中产生的声场

车小花 乔文孝

石油大学资源与信息学院, 北京 102249

**摘要** 应用有限元法研究了充液井孔中的相控线阵声波辐射器在井外地层中产生的声场,探讨了增强声源向地层的某一特定方向辐射的声波能量的方法. 采用相控线阵声波辐射器并调节其参数可以控制由充液井孔向地层中辐射的声波能量的方向,使声源向地层中的某个特定方向辐射的纵波能量得到明显提高. 在井间地震勘探和反射声波成像测井等领域中应用相控线阵声波辐射器,将有利于增大探测深度、提高探测分辨率和接收信号的信噪比.

**关键词** 井孔 井外地层 相控线阵声波辐射器 声束角宽 偏转角 声场

**文章编号** 0001 - 5733(2004)04 - 0731 - 06 **中图分类号** P631 **收稿日期** 2003 - 05 - 06, 2004 - 03 - 24收修定稿

## ACOUSTIC FIELD IN FORMATION GENERATED BY LINEAR PHASED ARRAY TRANSMITTERS IN FLUID-FILLED BOREHOLES

CHE Xiao-Hua QIAO Wen-Xiao

*Faculty of Natural Resources & Information Technology, University of Petroleum, Beijing 102249, China*

**Abstract** Acoustic field in formation generated by linear phased array transmitters in fluid-filled boreholes, as well as the method to intensify the acoustic energy radiated from the source in the borehole to the formation, is investigated using the finite element method (FEM). The direction of the radiated energy to the formation generated by the source in the borehole can be steered by means of adjusting the parameters of the linear phased array transmitter, which can result in obviously intensified radiated energy of the compressional wave in certain direction in the formation. Therefore, the depth and resolution of investigation and signal-to-noise ratio of the received signal can be improved by employing linear phased array transmitters in the area of crosswell seismic survey and the new rising borehole acoustic reflection imaging.

**Key words** Borehole, Near-borehole formation, Linear phased array transmitter, Main lobe width, Steered angle, Acoustic field.

## 1 引言

当前的油气资源勘探形势迫切需求新一代测井

技术以便提高探测深度、增大探测范围,而对声波辐射方向进行控制是直接的影响因素. 目前在现场测量中使用的传统声波测井仪采用的声源的指向性类似于点声源的指向性,既无明显的指向性,也不能对

**基金项目** 国家自然科学基金(40374049)、CNPC 测井重点实验室资助项目.

**作者简介** 车小花,女,1976年生,2003年7月获石油大学工学博士学位,随后在中国科学院声学研究所做博士后研究工作,主要从事声波勘探的数值和物理模拟、超声应用等方面的研究工作. E-mail: chexiaohua@163.com

向井外辐射的声场进行自动控制. 这会导致只有很少的一部分能量是向接收探头一侧的地层中辐射而形成有用信号, 而大部分辐射能量将向与接收探头相反的方向辐射形成无用信号; 它还在井孔泥浆中激发起很强的斯通利波, 斯通利波往往是地层反射信号的干扰信号. 这种声源适用的声波测井仪器的探测深度很浅, 只能用来对井壁附近的岩石特性进行测量, 而不能对远离井轴几米至几十米远的地质结构进行声波成像<sup>[1]</sup>. 研究如何在充液井孔中控制声波向地层中辐射的能量的方向, 就有希望使得在地层中的某个方向上的声辐射强度最大, 从而有利于增大仪器探测深度和提高接收信号的信噪比. 国内外研究井孔声源在井外地层中产生的声场的文献相对较少, Dong W 等<sup>[2,3]</sup>采用边界元法模拟研究了典型的井下地震声源激励时的井外横向各向同性 (TI) 和周向分层介质中的声波传播, 但使用的声源无明显的指向性且激励频率较低. 乔文孝等人<sup>[4,5]</sup>研究了在充液井孔中使用相控线阵声波辐射器的应用效果, 但注重于对井内声场的分析. 薛梅等<sup>[6]</sup>提出一种探测深度可以达到 10~15m 的远探测声波反射波测井仪的整体设计方案, 也未涉及井外声场分布的研究. 由于有限元法 (FEM) 对复杂充液井孔声场问题进行的数值研究可以得到近似实验测量的结果<sup>[7,8]</sup>, 本文将采用有限元法研究充液井孔中的相控线阵声波辐射器在地层中产生的声场以及如何实现声波在井外地层中的定向辐射等问题.

## 2 数值计算模型

### 2.1 模型的建立

采用大型有限元计算软件包 ANSYS, 所使用的轴对称二维模型如图 1 所示. 图 1 中井孔中心线  $z$  轴为模型的对称轴,  $x$  轴沿井孔径向, 模型井高 13m, 外径为 12m, 井孔直径为 20cm. 区域  $A_1$  为井孔流体, 其纵波声速  $V_f$  和密度分别为 1500m/s 和 1000kg/m<sup>3</sup>; 区域  $A_2$  为井旁地层, 其纵波声速  $V_p$  和横波声速  $V_s$  分别为 4500m/s 和 2650m/s, 密度为 2400kg/m<sup>3</sup>. 声波测井一般采用圆管状压电换能器, 在实际的声波测井工程中所采用的工作频率范围内其指向性非常接近于点声源的指向性函数<sup>[4]</sup>. 因此, 为计算方便, 本文把每个管状的发射换能器简化为点声源. 由  $m$  个点声源组成的相控线阵声波辐射器 T 位于井轴上距离模型底界面 6.5m 位置,  $n$  个二分量 (垂直于和平行于井轴方向) 位移接收器均匀

地分布在以 T 为中心、半径为 3.5m 的圆周上, 第  $j$  个接收器与辐射器 T 的中心的连线与  $x$  轴的夹角为  $\alpha_j$  ( $-90^\circ < \alpha_j < 90^\circ$ ), 相邻的两个接收器对 T 的张角为  $2^\circ$ . 计算时采用了不均匀网格划分方法, 其优点在于应力集中区域的网格划分可以比较致密. 井液的网格步长为 1cm, 共划分 8436 个节点; 地层的网格步长为 2cm, 共划分 191750 个节点. ANSYS 软件通过读取有限元模型及其上的载荷信息来建立联立方程, 然后, 使用不同的求解器进行计算.

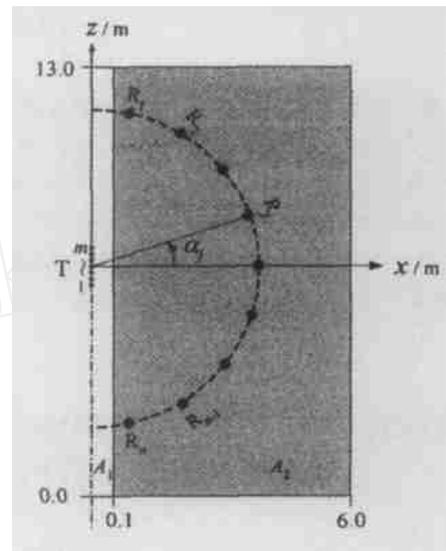


图 1 数值计算模型示意图

Fig. 1 Scheme of numerical modeling

### 2.2 激励源

使用了包括点源和相控线阵声波辐射器在内的 4 种声源, 第  $i$  个阵元的幅度加权因子  $a_i$ 、相邻阵元间距  $d$  等参数如表 1 所示. 点声源的幅度  $s_0$  与时间  $t$  的关系为

$$s_0(t) = a_0 400 t e^{(-t)} \sin(2 f_0 t), \quad (1)$$

其中信号的阻尼系数  $= 2.0$ ,  $f_0$  为信号的中心频率,  $a_0$  为点声源的幅度因子. 相控线阵声波辐射器的某一阵元的幅度  $s_i$  与时间  $t$  的关系为

$$s_i(t) = a_i 400 t e^{(-t)} \sin\{2 f_0 [t + (i - 1) \quad ]\}, \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m), \quad (2)$$

表 1 激励源参数表

Table 1 Parameters of the sources

标号	$m$	$d/cm$	$a_i$	$f_0/kHz$
7e-weig	7	10	4, 3, 3, 2, 3, 3, 4	10
5e-even	5	10	1, 1, 1, 1, 1	10
5e-weig	5	10	1, 3, 3, 3, 1	10
1e-source	1	-	4	10

其中  $\Delta t$  为相控线阵声波辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间,  $m$  为相控线阵声波辐射器的阵元总数,  $i$  为阵元序号.

### 3 点声源在井外地层中产生的声场

图 2(a, b) 分别是井孔中的点声源在井外地层中产生的水平(沿  $x$  轴)和垂直(沿  $z$  轴)方向的位移波形. 可以看出水平方向的纵波的幅度随着  $|\alpha_j|$  的增大而降低; 而垂直方向的纵波的幅度在  $\alpha_j = 0^\circ$  时几乎为零,  $|\alpha_j| > 0$  时的位移幅度较大. 另

外, 首波到达时间以  $\alpha_j = 0^\circ$  为中心随着  $|\alpha_j|$  的增大逐渐向后推移, 这是由于声波在井液中传播的声程增大所致. 对纵波 P 和横波 S 分别开窗可以计算得到纵波能量  $E_P$  和横波能量  $E_S$  为

$$E_K(\alpha_j) = \frac{E_{Kj}(\alpha_j)}{E_{Kmax}} = \frac{M_{K2}}{M_{K1}} \frac{[u_{xK}^2(\alpha_j, ii) + u_{zK}^2(\alpha_j, ii)]}{E_{Kmax}}, \quad j = 1, 2, \dots, n; K = P, S, \quad (3)$$

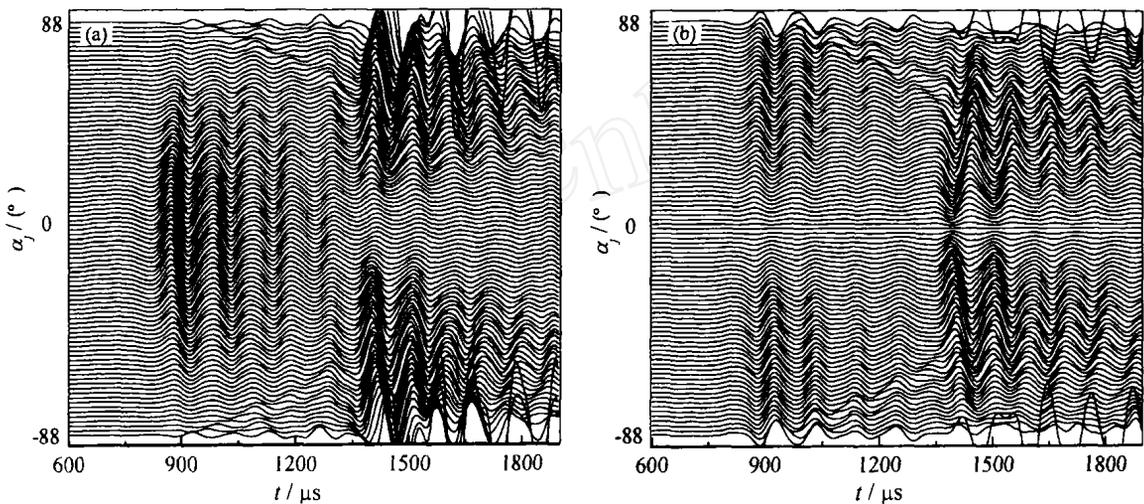


图 2 井孔中的点声源在井外地层中产生的 (a) 水平和 (b) 垂直方向的位移波形

Fig. 2 (a) Horizontal and (b) vertical displacements in the formation when a point source is in the borehole

其中  $K$  为纵波或横波角标,  $j$  为接收器序号,  $E_{Kj}(\alpha_j)$  为第  $j$  个接收器接收到的能量,  $ii$  为数据点序号,  $n$  为接收器总数,  $u_{xK}(\alpha_j, ii)$ 、 $u_{zK}(\alpha_j, ii)$  分别为  $x$ 、 $z$  方向的位移,  $M_{K1}$ 、 $M_{K2}$  分别为开窗起始、终止数据点序号,  $E_{Kmax}$  为  $E_{Kj}(\alpha_j)$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 中的最大值.

图 3 示出了点声源在地层中产生的纵波和横波能量分布曲线. 定义 3dB 角宽为

$$\Delta\alpha_{3dB} = \alpha_2 - \alpha_1, \quad (4)$$

其中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为从声波能量的主瓣最大值下降 3dB 时所对应的两个角度值. 从图 3 可以看出点声源的无明显指向性导致其向井外地层中辐射的纵波能量无明显的指向性, 其 3dB 角宽为  $72.2^\circ$ .

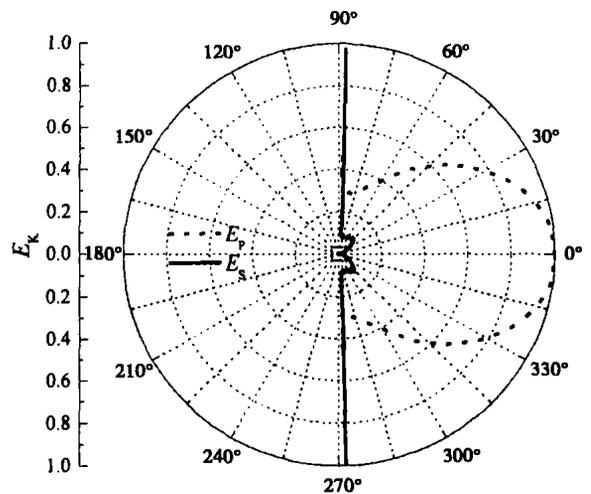


图 3 井孔中的点声源在地层中产生的纵波和横波能量分布曲线

Fig. 3 Energy of compressional and shear waves in the formation when the point source is in the borehole

### 4 井外声场的控制技术

当声源的辐射声束主瓣的偏转角小于第一临界角  $\theta_{1c}$  时才能使井内声源辐射的声波进入井旁地层,这就要求相控线阵声波辐射器的辐射声束的主瓣角宽要窄且要满足合适的偏转角. 在本文中

$$\theta_{1c} = \arcsin\left(\frac{V_f}{V_p}\right) \quad 19.47^\circ$$

#### 4.1 辐射声束角宽

数值计算表明,如表 1 所示的阵元个数和幅度加权因子等参数明显影响激励源的辐射声束的角宽. 根据文献[9]中对声源指向性的定义,计算了点声源 1e-source 和 5 阵元相控均匀线阵辐射器 5e-even 的垂直指向性,如图 4 所示,其中 5e-even 的  $\Delta\tau = 0.0\mu s$ . 图 5 (a, b) 分别示出了点声源 1e-source 和相控均匀线阵 5e-even 在井外地层中产生的纵、横波能量分布曲线. 可以看出与无明显指向性的点声源相比,相控均匀线阵的辐射声束的角宽明显变窄,导

致由充液井孔向井外地层辐射的声波的声束角宽也随之变窄. 从图 5b 可以看出地层中的横波能量主要沿着井轴方向传播;井孔中声源的辐射声束的角宽变窄时井外地层中沿径向传播的横波能量增强.

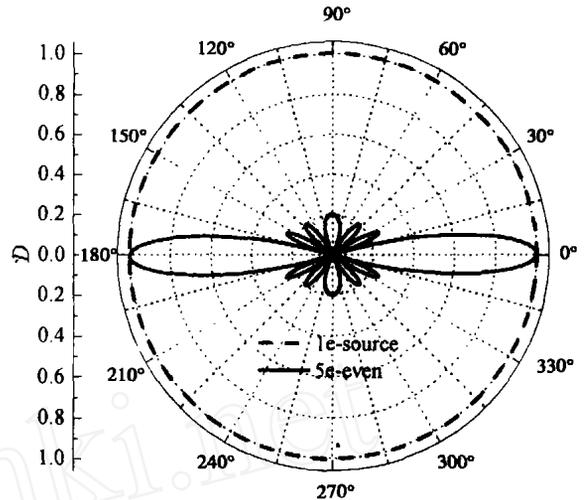


图 4 点声源 1e-source 和相控均匀线阵 5e-even 的指向性图 (D 为指向性系数,量纲为 1)

Fig. 4 Directivity of a point source and an even linear phased array

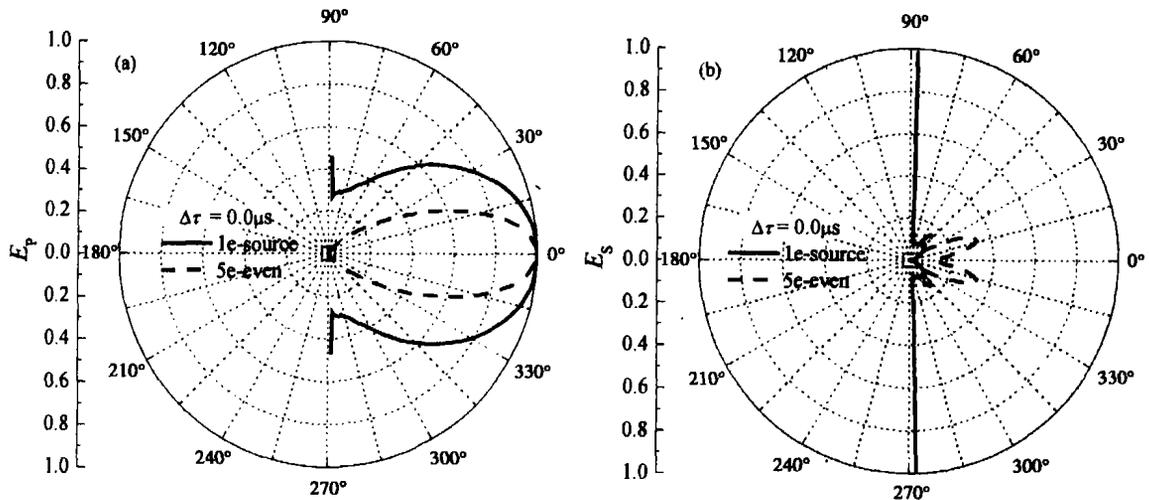


图 5 井孔中的点声源和五阵元相控阵 5e-even 分别在地层中产生的 (a)纵波和(b)横波能量分布曲线

Fig. 5 Energy of (a) compressional and (b) shear waves in the formation when the point source or 5e-even source is in the borehole respectively

#### 4.2 声波辐射方向

调节相控线阵声波辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间  $\Delta\tau$  可以改变声源的辐射声束主瓣的偏转角,从而可以控制声源由充液井孔向地层中辐射的声波能量的方向. 图 6 示出了 6 阵元相控线阵声波辐射器 7e-weig 的  $\Delta\tau$  分别为  $0.0\mu s$ 、 $16.5\mu s$  和

$22.0\mu s$  时的垂直指向性图,可以看出随着  $\Delta\tau$  的逐渐增大,声源的辐射声束主瓣的偏转角逐渐增大.

图 7(a, b) 分别是  $\Delta\tau = 16.5\mu s$  时相控线阵辐射器 7e-weig 在井外地层中产生的水平和垂直方向的位移波形. 可以看出声波能量明显向  $\theta_j > 0$  的方向偏转,而向  $\theta_j < 0$  的方向辐射的声波能量较弱.

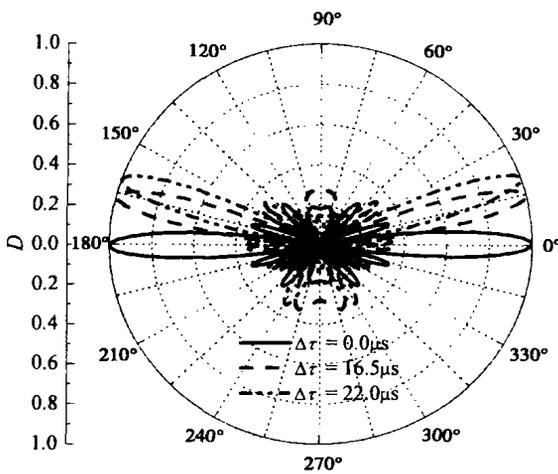


图 6 相控线阵辐射器  $7e\text{-weig}$  的变化时的指向性图 ( $D$  为指向性系数, 量纲为 1)

Fig. 6 Directivity of the linear phased array transmitter  $7e\text{-weig}$  when  $\Delta\tau$  is varied

图 8(a, b) 为相控线阵声波辐射器  $7e\text{-weig}$  的变化时井外地层中的纵、横波能量分布曲线. 可以看出, 随着相控线阵辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间的增大, 声波能量的主瓣的偏转角逐渐增大, 并且横波和沿着井壁传播的导波的相对能量也在增大.

### 4.3 声束角宽和辐射方向的综合控制

当相控线阵声波辐射器的激励频率和阵元尺寸不变时应用幅度加权技术或者增加阵元个数可以使声源的辐射声束的角宽变窄; 调节相控声波辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间则可以控制由充液井孔向地层中辐射的声波能量的方向. 对声源的辐射声束的角宽和声波辐射方向进行综合控制就可以使向地层中的某个特定方向辐射的声波能量得到增强. 图 9(a, b) 分别是表 1 中的 3 种相控线阵声波辐射器的  $\Delta\tau = 16.5\mu\text{s}$  时在井外地层中产生的纵、横

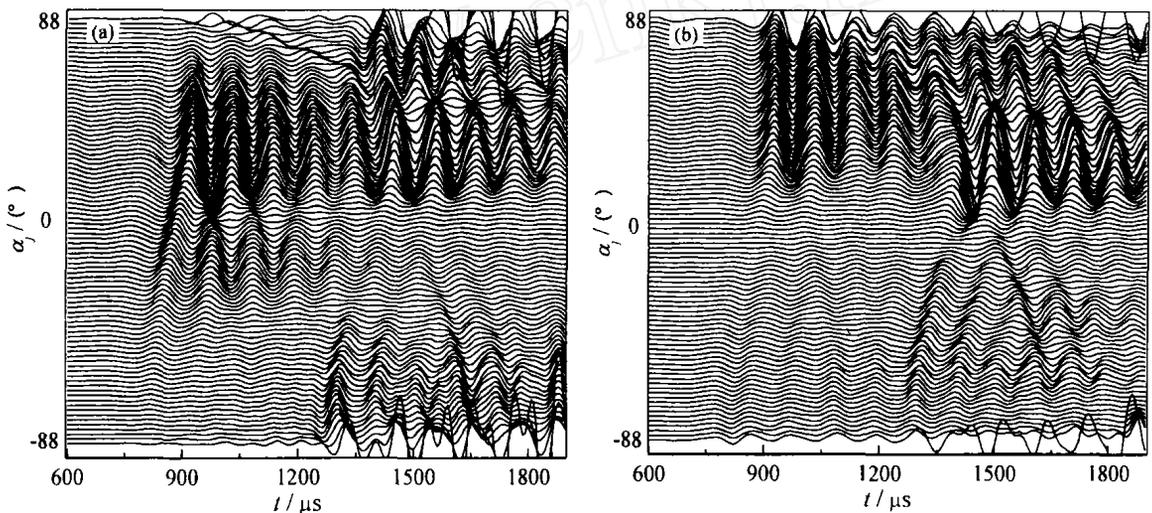


图 7  $\Delta\tau = 16.5\mu\text{s}$  时井内的辐射器  $7e\text{-weig}$  在井外地层中产生的 (a) 水平和 (b) 垂直方向的位移

Fig. 7 (a) Horizontal and (b) vertical displacements in the formation when  $\Delta\tau$  of  $7e\text{-weig}$  in the borehole equals  $16.5\mu\text{s}$

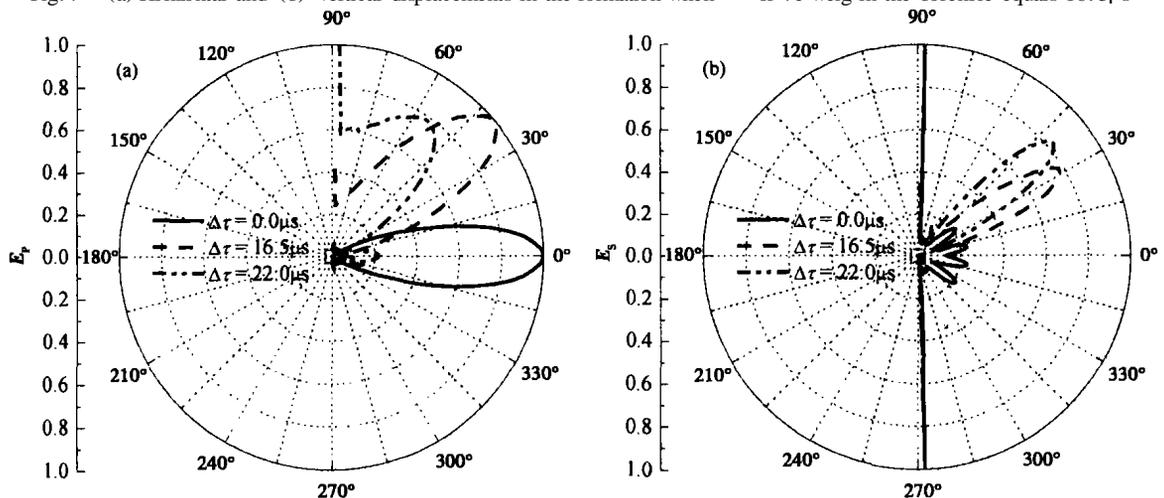


图 8 变化时井内的辐射器  $7e\text{-weig}$  在井外地层中产生的 (a) 纵波和 (b) 横波能量的分布曲线

Fig. 8 Energy of (a) compressional and (b) shear waves in the formation when  $\Delta\tau$  of  $7e\text{-weig}$  is varied

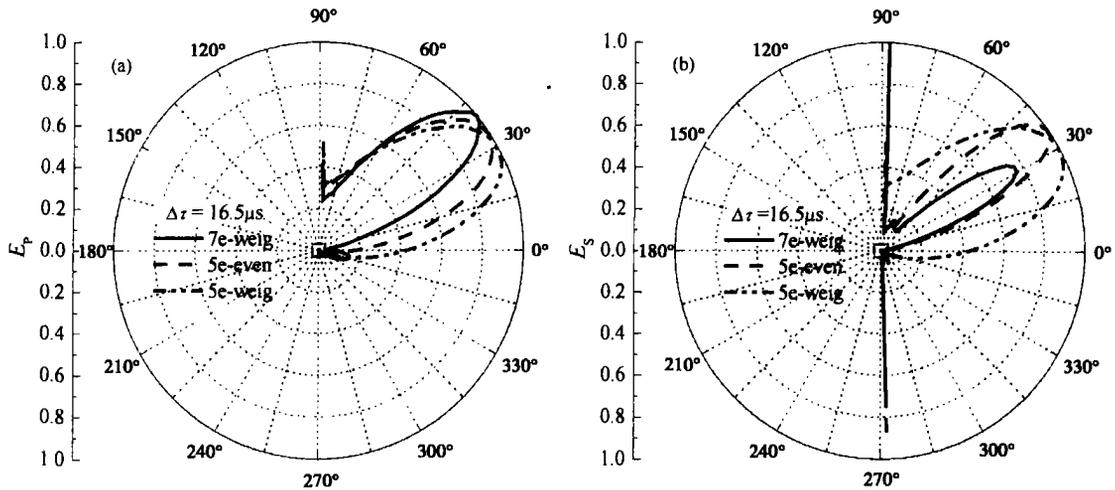


图9 为  $16.5\mu\text{s}$  时内的不同相控辐射器在井外地层中产生的 (a) 纵波和 (b) 横波能量分布曲线

Fig. 9 Energy of (a) compressional and (b) shear waves in the formation when of different transmitters in the borehole equals  $16.5\mu\text{s}$

波能量分布曲线。可以看出声源的辐射声束的角宽变窄可在井外地层中产生的纵、横波能量的声束的角宽变窄,从而有利于提高对井外介质的探测分辨率。

## 5 结 论

本文应用有限元法研究了充液井孔中的相控线阵声波辐射器在井外地层中产生的声场,探讨了控制充液井孔中声源向井外地层辐射的声波能量的方向和增强声源向地层中辐射的声波能量的方法,即通过使声源的辐射声束发生偏转和使声源的辐射声束的角宽变窄。采用相控线阵声波辐射器可以使声源的辐射声束的角宽变窄,若同时应用幅度加权技术或者增加阵元个数可进一步使声源的辐射声束的角宽变窄。调节相控线阵声波辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间可以控制由充液井孔向地层中辐射的声波能量的方向、增强向地层中的某一特定方向辐射的声波能量。当声源的辐射声束角宽较窄且声源的辐射声束主瓣的偏转角不大于第一临界角时,声源向地层中的某个特定方向辐射的纵波能量可以得到明显提高。

## 参考文献

- [ 1 ] Chang C, Hoyle D, Watanabe S, et al. Localized maps of the subsurface. *Oilfield Review*, 1998, **10**(1): 56 ~ 66
- [ 2 ] Dong W, Toksoz M N. Borehole seismic-source radiation pattern in

transversely isotropic media. *Geophysics*, 1995, **60**(1): 29 ~ 42

- [ 3 ] Dong W, Bouchon M, Toksoz M N. Borehole seismic-source radiation in layered isotropic and anisotropic media: boundary element modeling. *Geophysics*, 1995, **60**(3): 735 ~ 747
- [ 4 ] 乔文孝,杜光升,陈雪莲. 相控线阵声波辐射器在声波测井中应用的可行性分析. *地球物理学报*, 2002, **45**(5): 714 ~ 722
- Qiao W X, Du G S, Chen X L. Feasibility of application of linear phased array acoustic transmitters to acoustic well-logging. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, **45**(5): 714 ~ 722
- [ 5 ] Qiao W X, Chen X L, Du G S, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter. *Chinese Journal of Acoustics*, 2003, **22**(4): 33 ~ 38
- [ 6 ] 薛梅,楚泽涵,边环玲等. 远探测声波反射波测井方法及声系设计方案. *测井技术*, 2002, **26**(1): 35 ~ 39
- Xue M, Chu Z H, Bian H L, et al. Remote exploration acoustic reflection well logging device and its sonde design. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2002, **26**(1): 35 ~ 39
- [ 7 ] 杜光升,乔文孝,王耀俊. 用有限元法计算井中水平裂缝的反射斯通利波. *石油大学学报*, 2000, **24**(1): 95 ~ 97
- Du G S, Qiao W X, Wang Y J. Computation of reflected Stoneley wave at horizontal fracture using finite element method. *Journal of the University of Petroleum* (in Chinese), 2000, **24**(1): 95 ~ 97
- [ 8 ] 杜光升,乔文孝,王耀俊. 井孔附近垂直裂缝对纵波的反射. *测井技术*, 2000, **24**(3): 203 ~ 206
- Du G S, Qiao W X, Wang Y J. Compressional wave reflection from vertical fracture near-borehole. *Well Logging Technology* (in Chinese), 2000, **24**(3): 203 ~ 206
- [ 9 ] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵. 北京:北京大学出版社, 1990
- Luan G D, Zhang J D, Wang R G. Piezoelectric Transducer and Array (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 1990