

用二维谱技术研究相控线阵声波辐射器在充液井孔中产生的声场*

车小花^{1,2} 乔文孝¹ 鞠晓东¹ 张海澜²

1. 中国石油大学(北京)资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100080

摘要 采用二维谱技术对充液井孔中的相控线阵声波辐射器的辐射特性及其产生的声场进行了数值研究. 结果表明, 在频率波数域中可以清楚地把在时间空间域中难以分开的模式分辨开来. 相控线阵声波辐射器的阵元个数、阵元高度以及相邻阵元间激励信号的延迟时间等参数可以控制辐射声束的角宽和辐射声束的偏转角. 增大井孔中的相控线阵声波辐射器的相邻阵元间的激励信号的延迟时间, 可以使相控线阵辐射的声束入射于井壁上的指向角不断变大, 先后满足滑行纵波临界折射和滑行横波临界折射条件, 从而使充液井孔中的滑行纵波和滑行横波分别得到加强. 在井孔中采用相控阵声波辐射器可以提高声波勘探的空间分辨率和信噪比.

关键词 二维谱 相控线阵声波辐射器 偏转角 辐射特性

目前在现场测量中使用的传统声波测井仪采用的声源不能对向井外辐射的声场进行自动控制, 使用这种声源不可避免地导致了声波测井仪器的探测深度浅和空间测量分辨率低等问题. 当前油气资源勘探的需求之一是提高探测深度、增大探测范围, 提高对日趋小型化的复杂油气藏的勘探能力^[1], 而对声波辐射方向进行控制是直接的影响因素. Dong 等采用边界元法模拟研究了典型的井下地震声源激励时在井外横向各向同性和周向分层介质中的声波传播^[2,3], 但使用的声源无明显的指向性且激励频率较低. Tang 创造性地把偶极子仪器用于反射声波成像测井中, 获得了与井孔相交的地层界面的方位^[4], 但因依赖于偶极子声源的指向性来识别地层界面的方位, 因而, 其使用受到偶极子声源指向性的限制. 采用在医学、雷达和声呐技术中被广泛应用的相控阵技术来研究充液井孔中的声波辐射器的辐射特性, 有望从根本上改善声波辐射器的辐射声场, 从而提高对复杂油气藏勘探的可靠性和精确度. 张海澜等曾研究了井孔声学问

题^[5-7], 但未对多阵元辐射器产生的声场展开研究. 乔文孝等曾在充液井孔中使用相控线阵声波辐射器的可行性进行了分析^[8,9]. 车小花等采用有限元法研究了充液井孔中的多种声源在井外地层中产生的声场^[10], 指出了由井孔向井外地层中定向辐射声波的方法, 但由于受到计算条件的限制, 仅给出了定性的结果. 车小花等采用实轴积分方法定量地研究了相控线阵声波辐射器在井外地层中产生的声场和实现向井外地层中定向扫描辐射声场的方法^[11]. 本文采用二维谱技术^[5,12,13], 通过改变可能影响相控线阵声波辐射器的参数来寻找二维谱中相控线阵的特征, 理解和研究充液井孔中的相控线阵声波辐射器的辐射特性和在井孔中产生的声场, 为新一代相控声波测井仪器所使用的换能器的设计和应用提供理论依据.

1 模型和分析方法

1.1 数值计算模型

如图1所示, 对半径 a 为 10 cm 的无限长的圆

2005-09-14 收稿, 2006-01-23 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10534040)和国家自然科学基金项目(批准号: 40374049, 40574049)资助
E-mail: aclab@cup.edu.cn

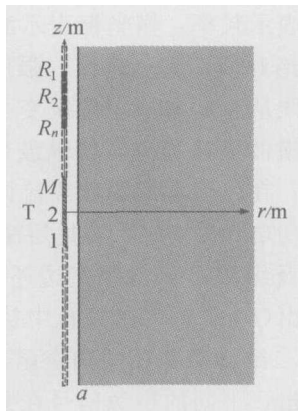


图1 数值计算模型示意图

井孔，建立 $r\theta z$ 柱坐标系，其 z 轴与井孔中心线重合， r 轴沿井的径向。井孔流体的纵波声速 v_l 和密度 ρ_0 分别是 1500 m/s 和 1000 kg/m^3 ；井外为均匀的无限大地层，其纵波声速 v_p 和横波声速 v_s 分别为 4500 m/s 和 2500 m/s ，密度 ρ 为 2300 kg/m^3 。由 M 个半径为

r_0 ，高度为 h 的刚性圆柱状阵元组成的相控线阵声波辐射器 T 的中心轴与井轴重合，辐射器 T 的中心位于 $z=0$ 。先激励辐射器的第 1 号阵元，然后依次激励第 2 号、第 3 号阵元……，相邻两阵元激励的延迟时间为 τ ，声源的激励波形是高斯包络调制的正弦波，带宽是中心频率的 0.4 倍。由 n 个半径为 r_0 的接收器组成的接收阵分布在井孔中，其中心轴也位于井轴上。本文只考虑轴对称问题。

1.2 理论分析方法

声源的二维谱是指把声源在时间空间域的位移分布作二维 Fourier 变换到频率波数域的声场表示。采用二维谱有两方面的优点，一是可以在频率波数域中把在时间空间域中难以分开的波动模式波分辨开来；二是为计算井内外声场作准备。

由 M 个阵元组成的声源表面的位移是

$$u_{r_0}(z, t) = \begin{cases} u_0(t - (l-1)\tau) & (l - \frac{M}{2} - 1)h \leq z \leq (l - \frac{M}{2})h, \\ 0 & \\ z < (l - \frac{M}{2} - 1)h, z > (l - \frac{M}{2})h, & l = 1, 2, \dots, M, \end{cases} \quad (1)$$

则可以得到声源的二维谱

$$U_{r_0}(k, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u_{r_0}(z, t) \cdot \exp(-ikz + i\omega t) dz dt. \quad (2)$$

(1)式是时间和空间的函数，对 $u_{r_0}(z, t)$ 作二维 Fourier 变换就可以得到声源在频率波数域的声场表示。

井内声场满足流体的声波方程，且流体中只有一个位移位 φ_l 为

$$\varphi_l(r, k, \omega) = D(k, \omega) H_0^{(1)}(\alpha_l r) + A(k, \omega) J_0(\alpha_l r), \quad (3)$$

式中的径向波数 α_l 满足 $\alpha_l^2 = \frac{\omega^2}{v_l^2} - k^2$ 。

井外地层中的声场满足弹性波方程，因井外地层里没有声源，介质中只有扩散波，再考虑到声场的对称性，可以引入位移位 φ 和 η 表示其中的位移和相应的应力， φ 和 η 分别为

$$\varphi(r, k, \omega) = B(k, \omega) H_0^{(1)}(\alpha r), \quad (4)$$

$$\eta(r, k, \omega) = C(k, \omega) H_0^{(1)}(\beta r), \quad (5)$$

两个位移位分别满足纵波和横波波方程。 $\alpha^2 = \frac{\omega^2}{v_p^2} - k^2$ ，

$\beta^2 = \frac{\omega^2}{v_s^2} - k^2$ 是径向波数， B, C 是 k 和 ω 的待定函数。

根据在井壁 $r=a$ 和在仪器表面 $r=r_0$ 处的边界条件解得

$$\varphi_l(r, k, \omega) = -U_{r_0}(k, \omega) \cdot \frac{H_0^{(1)}(\alpha_l r) + E(k, \omega) J_0(\alpha_l r)}{\alpha_l [H_1^{(1)}(\alpha_l r_0) + E(k, \omega) J_1(\alpha_l r_0)]}. \quad (6)$$

把(6)式代入到

$$\varphi_l(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_l(r, k, \omega) \exp(ikz - i\omega t) dk d\omega \quad (7)$$

中，计算(7)式一类的积分就可以得到井孔中声场的

位移。

2 数值模拟结果与分析

图2所示的是图1所示模型的充液井孔中的二

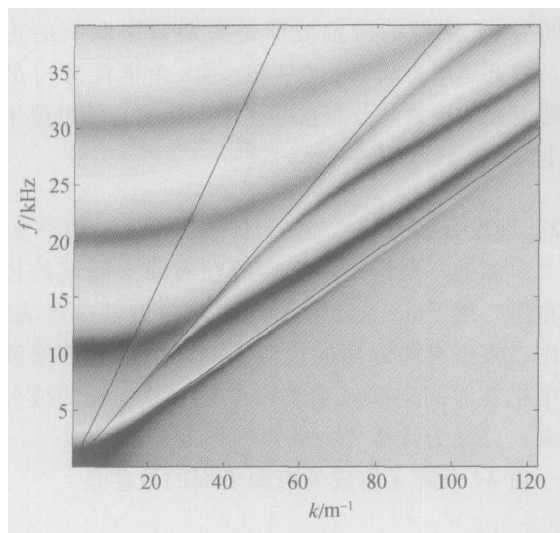


图2 充液井孔中的二维谱

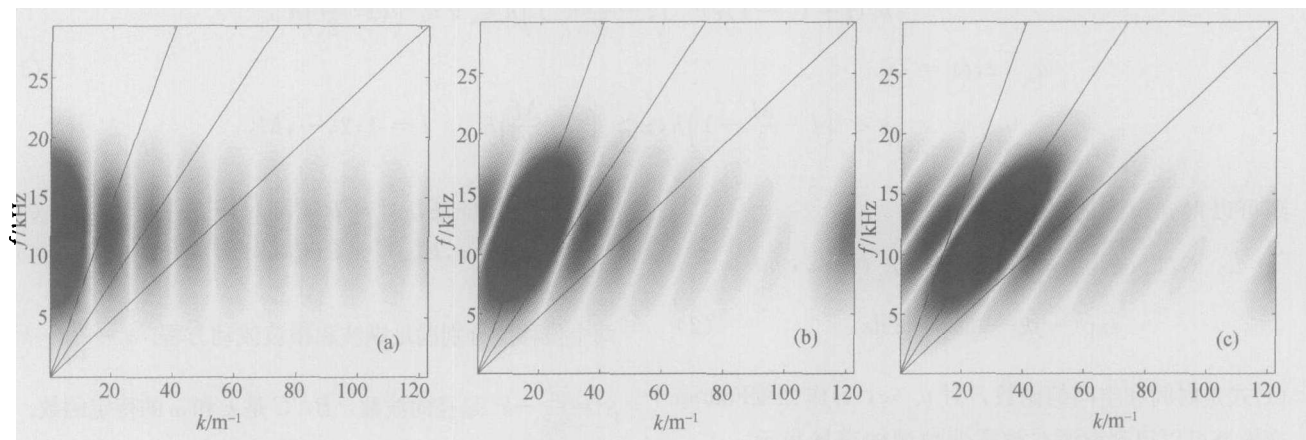


图3 相邻阵元间激励信号的延迟时间 τ 变化时辐射器的二维谱

(a) τ 为 $0\ \mu\text{s}$; (b) τ 为 $13.333\ \mu\text{s}$; (c) τ 为 $24.0\ \mu\text{s}$

(a, b, c)所示的是相邻阵元间激励信号的延迟时间 τ 分别为0, 13.333和24.0 μs 时辐射器的二维谱,声束主瓣分别偏转向地层纵波和地层横波的方向.图4(a, b)所示的分别是辐射器的垂直指向性曲线^[14]和在源距为3.0m条件下在井孔中产生的声波波形.从图4(a)可以看出,随着 τ 的不断增大,辐射器产生的声束的偏转角逐渐增大,当 τ 为13.333 μs 时,辐射声束的主瓣偏转角为第一临界角 19.47° ,而当 τ 为24.0 μs 时,辐射声束的主瓣偏转角为第二临界角 36.87° .图4(b)中到达时间约在

二维谱,纵坐标表示频率,横坐标表示波数,用灰阶表示二维谱的绝对值,颜色越深,强度越大.图中的3条黑色斜线从左向右斜率依次变小,分别表示地层的纵波、横波声速和流体的纵波声速.最右边的是斯通利波,在代表地层横波和流体声波波速的斜线之间的是伪瑞利波,在代表地层横波和纵波声速斜线之间以及纵波声速斜线左边还有两组模式,它们是漏模.由(6)式知,在井孔中接收信号的二维谱是声源的二维谱和井孔的响应函数的乘积,而从图2可以看出,不同的声源信号在井孔响应函数的二维谱中有不同的位置,当声源的二维谱在某些信号对应的位置比较强时,接收波形中的这些信号就得到加强,因而,改善声源的二维谱就有可能改善井孔中接收信号的质量.

2.1 相邻阵元间激励信号的延迟时间

辐射器T由8个阵元组成,阵元高为60mm,直径为50mm,声源的中心频率为12.0kHz.图3

0.67ms、幅度最低的波为滑行纵波,到达时间约在1.2ms的波为滑行横波,随后到达的是伪瑞利波和斯通利波.结合图3和图4分析可知,当辐射声束的主瓣偏转角接近于第一临界角时,滑行纵波的幅度得到明显加强;而当辐射声束的主瓣偏转角接近于第二临界角时,滑行横波的幅度得到明显加强.

2.2 阵元个数

图5(a, b)所示的是相控线阵辐射器的阵元个数分别为4, 14时辐射器的二维谱,其中阵元直径

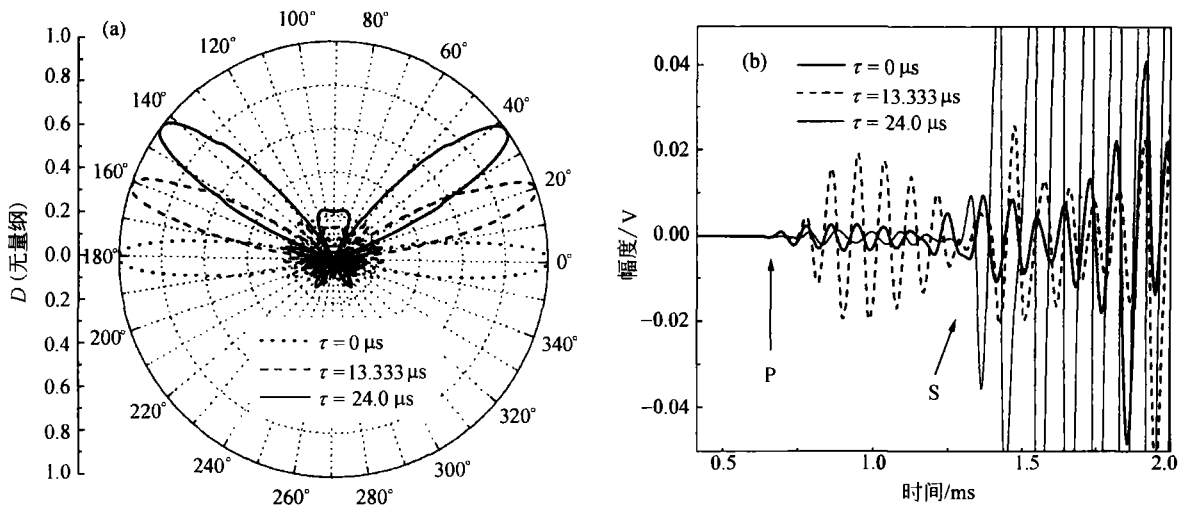


图4 辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间 τ 分别为 0, 13.333 和 24.0 μs 时的计算结果

(a) 垂直指向性曲线; (b) 在源距为 3.0m 条件下在井孔中产生的声波波形

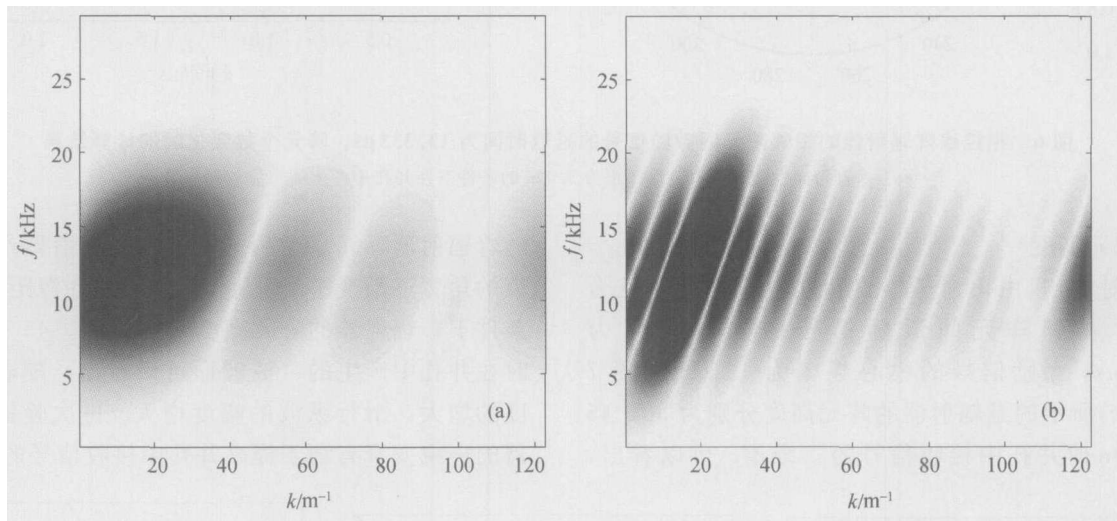


图5 相邻阵元间激励信号的延迟时间为 13.333 μs , 阵元个数变化时辐射器的二维谱

(a) 阵元个数为 4; (b) 阵元个数为 14

为 50 mm, 高为 60 mm, 声源的中心频率为 12 kHz, 相邻阵元间激励信号的延迟时间为 13.333 μs . 结合图 3(b) 可以看出, 随着相控线阵声波辐射器的阵元个数的增多, 二维谱上显示的声源的主瓣由宽逐渐变窄, 而旁瓣的个数却由少逐渐增多, 且主瓣发生了非常明显的偏转. 经核算知主瓣的斜率恰好为相控线阵的相邻阵元的间距 h 与相邻阵元间激励信号的延迟时间 τ 的比值. 若记相控线阵的辐射声束主瓣的偏转角为 θ_s , 则有如下关系:

$$\frac{h}{\tau} = \frac{v_t}{\sin\theta_s}$$

图 6(a), (b) 所示的分别是辐射器的垂直指向性曲线和在源距为 3.0 m 的条件下, 辐射器的阵元个数分别为 1, 4, 8 和 14 时在井孔中产生的声波波形. 从指向性曲线上可以看出, 随着辐射器的阵元个数的不断增多, 辐射器产生的声束的角宽逐渐变窄, 而旁瓣个数增多, 与从二维谱上观察到的现象一致. 因辐射器产生的声束的偏转角接近于第一临

界角, 在井孔中接收到的纵波的幅度得到明显增强. 另外, 纵波的幅度随着辐射器阵元个数的增多而增大. 可见, 与一个阵元声源相比, 采用由多个阵元组成的相控线阵声波辐射器的优势之一在于,

可以通过优化设计使辐射声束的角宽变窄, 以提高探测的分辨率和接收信号的信噪比. 更为重要的是, 通过控制辐射器的参数实现向井外地层中定向扫描辐射声场, 将提高对复杂地质构造的分辨能力.

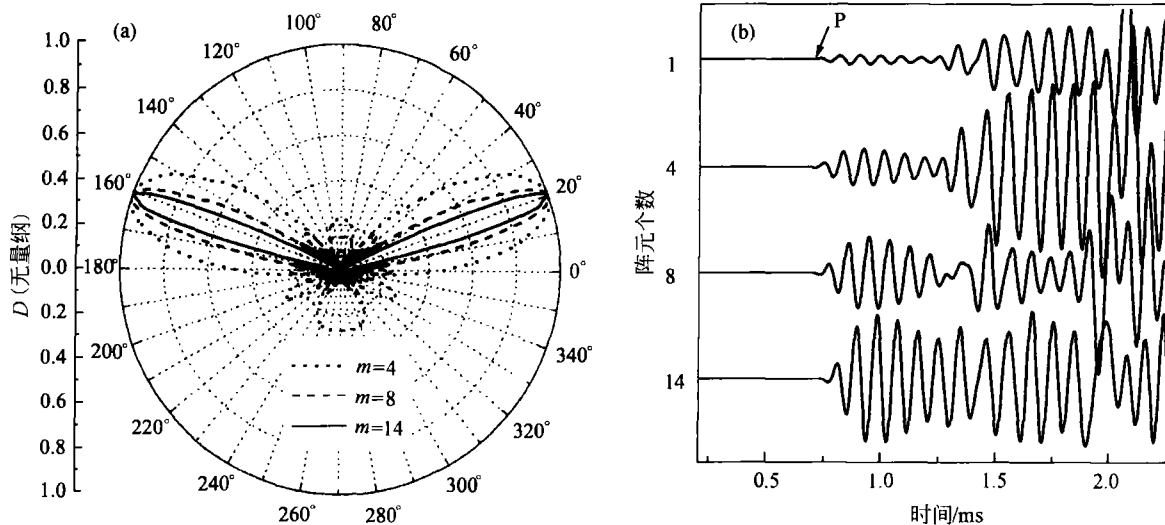


图6 相控线阵辐射器的相邻阵元间激励信号的延迟时间为 $13.333 \mu\text{s}$, 阵元个数变化时的计算结果

(a) 垂直指向性曲线; (b) 在源距为 3.0 m 的条件下在井孔中产生的声波波形

2.3 阵元高度

辐射器 T 由 8 个阵元组成, 阵元的直径为 50 mm, 相邻阵元间激励信号的延迟时间为 $13.333 \mu\text{s}$, 激励信号的中心频率为 12 kHz. 图 7 (a, b, c) 所示的是辐射器的阵元高度分别为 30, 45 和 60 mm 时井孔中接收信号的二维谱. 可以看出,

随着辐射器阵元高度的不断增大, 辐射器产生的声束的角宽逐渐变窄. 而从图 8 所示的在源距为 3.0 m 条件下, 辐射器的阵元高度分别为 30, 45 和 60 mm 时在井孔中产生的声波波形可以看出, 随着阵元高度的增大, 滑行纵波的幅度增大. 再次验证了辐射器的声束变窄有利于提高井孔中接收信号的幅度.

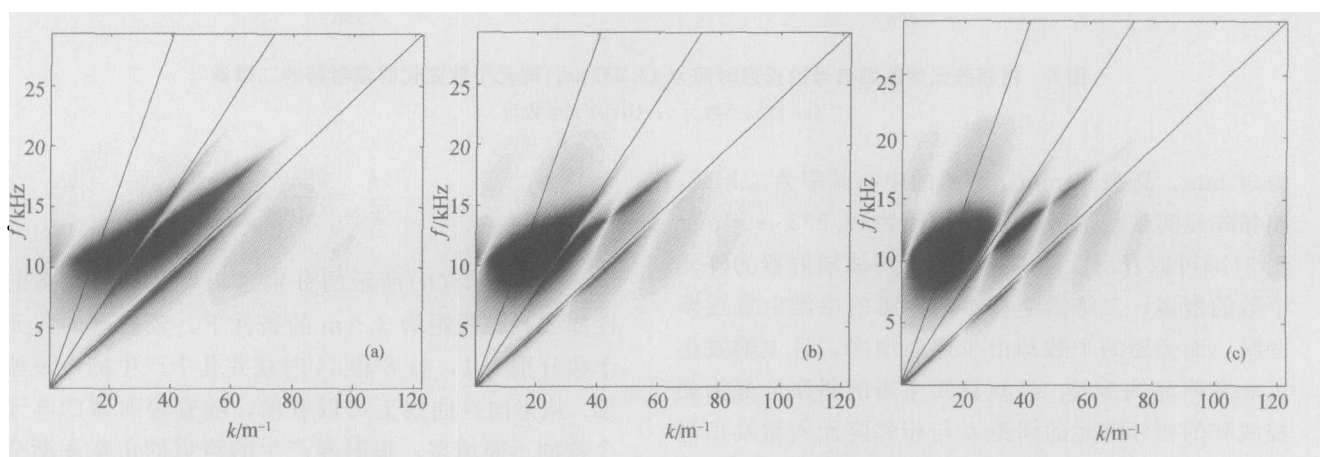


图7 辐射器的阵元高度变化时井孔中接收信号的二维谱

(a) 阵元高度为 30 mm; (b) 阵元高度为 45 mm; (c) 阵元高度为 60 mm

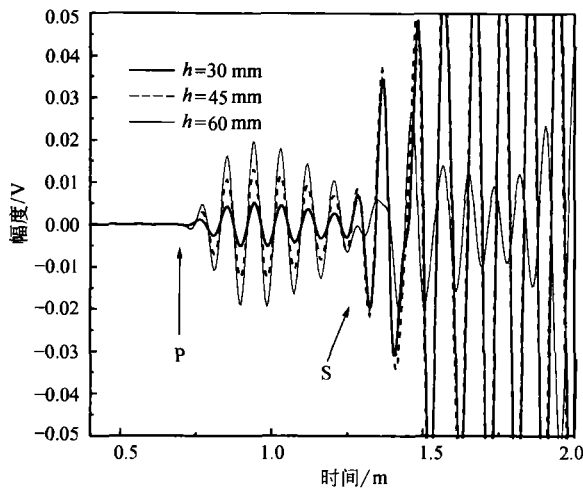


图8 在源距为3.0 m条件下阵元高度分别为30, 45和60 mm时辐射器在井孔中产生的声波波形

3 结论

传统的单阵元声源的辐射声束角宽很宽,且在声源的物理尺寸确定之后其辐射特性不可控制,而要从根本上改变声波勘探仪器的辐射特性,最好的办法就是采用相控阵声源。

本文采用二维谱技术对充液井孔中的相控线阵声波辐射器的辐射效果进行了研究,更容易从本质上来分析和控制充液井孔中的相控线阵声波辐射器的辐射特性,从而把声源及其产生的声场在频率波数域和时间空间中建立起了联系。随着相控线阵声波辐射器的阵元个数的不断增多、阵元高度的增高,无论是从指向性曲线还是从二维谱上均可以看出辐射声束的主瓣的角宽变窄;同时,井孔中接收到的声波幅度明显增大。在对特定的问题进行研究时可根据具体要求,选择合适的相控线阵声波辐射器参数。从二维谱计算结果中还可以看出,调节辐射器相邻阵元间激励信号的延迟时间可以使辐射器产生的声束的主瓣发生偏转,使相控线阵辐射的声束入射于井壁上的指向角不断变大,先后满足滑行纵波临界折射和滑行横波临界折射条件,从而使充液井孔中的滑行纵波和滑行横波分别得到加强。

数值研究结果表明,在研制声波勘探仪器时,采用相控阵技术来设计和控制声源的辐射特性,有可能达到既增大探测深度,又提高测量资料信噪比和测量分辨率的效果,提高对井外地层构造和复杂油气藏勘探的可靠性和精确度。

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, Toksöz M N. Borehole seismic-source radiation pattern in transversely isotropic media. *Geophysics*, 1995, 60(1): 29—42
- 3 Dong W, Bouchon M, Toksöz M N. Borehole seismic-source radiation in layered isotropic and anisotropic media; Boundary element modeling. *Geophysics*, 1995, 60(3): 735—747
- 4 Tang X M. Imaging near-borehole structure using directional acoustic-wave measurement. *Geophysics*, 2004, 69(6): 1378—1386
- 5 张海澜,王秀明,张碧星. 井孔的声场和波. 北京: 科学出版社, 2004, 6—81
- 6 张海澜,萧柏助. 测井仪器对井孔声场影响的数值研究. *声学学报*, 2000, 25(5): 435—439
- 7 张海澜,王秀明,应崇福. 弹性介质中充液井孔的漏模和井孔声场中的分波计算. *中国科学, A辑*, 1995, 25(7): 742—752
- 8 Qiao W X, Du G H, Chen X L. Feasibility of application of linear phased array acoustic transmitters to acoustic well-logging. *Chinese J Geophys*, 2002, 45(5): 755—763
- 9 Qiao W X, Chen X L, Du G S, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter. *Acta Acustica*, 2003, 22(4): 329—338
- 10 Che X H, Qiao W X. Acoustic field in formation generated by linear phased array transmitters in fluid-filled boreholes. *Chinese J Geophys*, 2004, 47(4): 830—836
- 11 Che X H, Zhang H L, Qiao W X, et al. Numerical study on scanning radiation acoustic field in formations generated from a borehole. *Science in China, Ser G*, 2005, 48(2): 247—256
- 12 Schmitt D P, Bouchon M. Full-wave acoustic logging: Synthetic microseismograms and frequency-wavenumber analysis. *Geophysics*, 1985, 50(11): 1756—1778
- 13 刘继生. 用频率—波数域分析研究声波测井全波列的各波相. *测井技术*, 2000, 24(3): 198—202
- 14 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, 129—165