

文章编号:1673-5005(2006)01-0042-05

相控线阵声波测井辐射器物理模拟实验波形分析

陈雪莲¹, 乔文孝², 孙建孟¹, 苏远大¹, 张秀梅¹

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要:以声波波形的两个最基本的特征振幅和频率为研究对象,分析了相控线阵声波测井辐射器做发射器时在模型井内测量的全波列波形,并考察了相控线阵的相邻阵元间激励信号的延迟时间、阵元个数等因素对测井波形的影响。实验结果表明,随着相邻阵元间激励信号延迟时间的增加,相控线阵的辐射声束指向角不断变大,先后满足滑行纵波临界折射和滑行横波临界折射条件,使充液井孔中的滑行纵波、滑行横波和斯通利波分别得到加强。随着相邻阵元间激励延迟时间的增加,纵、横波的主频值发生漂移,当满足滑行纵(横)波临界折射条件时,纵(横)波波包的主频值最高,幅度值最大。随着相控线阵工作阵元个数的增加,在近似满足同相位叠加时,纵、横波振幅得到明显的加强。

关键词:相控线阵; 声波测井; 辐射器; 波形; 主频值; 物理模拟; 特征分析

中图分类号:P 631.814 **文献标识码:**A

Analysis on waveform trains in physical simulation on acoustic logging with linear phased array transmitter

CHEN Xue-lian¹, QIAO Wen-xiao², SUN Jian-meng¹, SU Yuan-da¹, ZHANG Xiu-mei¹

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The waveform trains gotten by laboratory simulation on acoustic logging with phased array transmitter was studied by the amplitude and frequency of the waveforms. The influential factors of delay time exerted on neighboring elements and element number were analyzed. The experimental results show that by increasing delay time exerted on neighboring elements, steered radiation angle of the phased array becomes larger and larger, and generation conditions of the refracted compressional wave and the refracted shear wave are reached successively, and the refracted compressional wave, refracted shear wave and Stoneley wave are strengthened respectively. And simultaneity the dominant frequency of compressional or shear wave reaches to the highest value. By increasing the number of the elements, the amplitudes of compressional wave and shear wave are enhanced in the generation condition.

Key words: linear phased array; acoustic logging; emitter; waveform; main frequency; physical simulation; characteristic analysis

相控线阵声波测井辐射器是一种能够控制声束指向性的基阵式换能器。相控线阵声波测井数值模拟和物理模拟实验均说明了随着相邻阵元间信号延迟时间的增加,相控线阵的辐射声束指向角不断变大,先后满足滑行纵、横波临界折射条件,使充液井孔中的滑行纵、横波和斯通利波分别得到加强^[1,2]。在此基础上,笔者以相控线阵声波辐射器

做发射器,对物理模拟实验得到的声波波形从时域波形幅度和主频偏移两个方面进行分析,分析结果将对相控线阵声波辐射器应用于实际测井以及对采集的声波波列进行处理和综合解释具有指导意义。

1 相控线阵声波测井物理模拟实验

根据声场的相干原理,当空间两列波在某点同

收稿日期:2005-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40374049)和CNPC测井重点实验室资助项目

作者简介:陈雪莲(1976-),女(汉族),河北衡水人,博士研究生,主要从事应用地球物理研究。

相位叠加时,会使其振动始终加强。控制线阵列上每个阵元的电压相位就可控制线阵在空间辐射声波能量的分布,使空间介质中在某些点的振动加强,另外一些点的振动减弱。因此,通过改变阵元上激励信号的相位就可以改变声束偏转的方向。这种通过给每个阵元加一个移相器,用以获得线阵辐射波束的偏转,从而使相控阵具有可以控制的空间辐射指向性和主瓣宽度的技术称为相控阵技术^[3,4]。

在实验室内研究相控阵声波测井辐射器的指向特性制作了两个缩小比例的相控线阵,用做发射器的相控线阵由 4 个小压电圆管(阵元)构成,其编号分别为 4/8/6/8/1 和 4/8/6/4/1 阵,结构示意图如图 1 所示。理论计算 4/8/6/8/1 阵在 125 kHz 时的垂直面指向性图见图 2。随着延迟时间的增加,声束偏转角不断增大^[1],相控线阵辐射声束主瓣的偏转角 θ 与相控线阵参数和相邻阵元激励信号的延迟时间 $\Delta\tau$ 之间的关系为

$$\Delta\tau = \frac{d \sin \theta}{c}$$

式中, d 为相邻阵元的中心间距; c 为介质的声速。

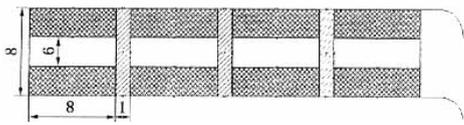


图 1 4/8/6/8/1 相控线阵声波辐射器结构图
(单位:mm)

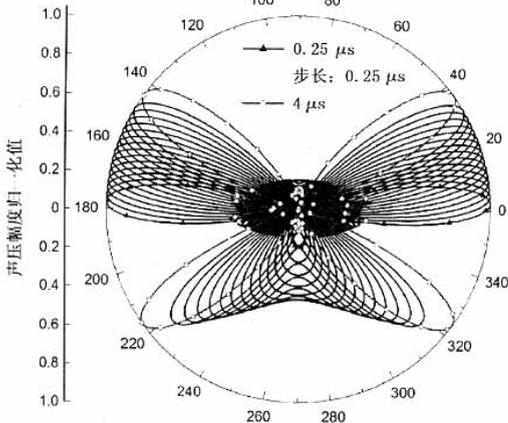


图 2 4/8/6/8/1 阵在 125 kHz 频率点下的垂直指向性图

在充液的小模型井并眼中进行了声波测井的物理模拟实验并对采集的声波全波列波形进行了分析。实验测量系统主要由 VXI 数据采集系统、自制的多通道脉冲信号源和计算机等组成。分别把自行制作的相控线阵声波辐射器 4/8/6/8/1,4/8/6/4/1

和 B&K8103 型接收换能器置于充液微型铝质模型井和混凝土模型井中,并一同置于尺度为 1 m×1 m×1.5 m 的消声池中进行了声波测井模型实验。铝质模型井模块的纵波速度测量值 v_p 为 6 224 m/s,横波速度 v_s 为 3 223 m/s,水的速度 v_w 为 1 480 m/s,计算得声波测井的第一临界角 θ_{1c} 为 13.756°,第二临界角 θ_{2c} 为 27.335°。

类似地,对于实验中使用的混凝土模型井模块,其纵波速度测量值 v_p 为 4 200 m/s,横波速度测量值 v_s 为 2 400 m/s,可以计算出模拟声波测井的第一临界角 θ_{1m} 为 20.6°,第二临界角 θ_{2m} 为 38.1°。

自制 4 通道脉冲源发生器可以输出 4 个通道脉冲信号,相邻通道脉冲信号的延迟时间取值以及与其对应的两个相控阵辐射声束的偏转角如表 1 所示。表中 φ_{868} 和 φ_{864} 分别表示 4/8/6/8/1 阵和 4/8/6/4/1 阵的辐射声束主瓣的偏转角。由表 1 可见,两个相控线阵辐射声束的偏转角范围均包含所用模型井声波测井的两个临界角。

表 1 两个相控线阵主瓣偏转角与相邻阵元驱动信号延迟时间的关系

延迟时间 $\Delta\tau/\mu\text{s}$	偏转角 $\varphi_{868}/(^{\circ})$	偏转角 $\varphi_{864}/(^{\circ})$	延迟时间 $\Delta\tau/\mu\text{s}$	偏转角 $\varphi_{868}/(^{\circ})$	偏转角 $\varphi_{864}/(^{\circ})$
0.25	2.4	4.2	2.25	21.7	41.8
0.5	4.7	8.5	2.5	24.3	47.7
0.75	7.1	12.8	2.75	26.9	54.5
1.0	9.5	17.2	3.0	29.6	62.6
1.25	11.9	21.7	3.25	32.3	74.2
1.5	14.3	26.4	3.5	35.1	
1.75	16.7	31.2	3.75	38.1	
2.0	19.2	36.3	4.0	41.1	

2 相控线阵声波测井波形特征

2.1 相邻阵元间延迟时间的影响

当加载到相控阵相邻阵元之间的激励延迟时间依次从 0 开始增加时,相控线阵的辐射声束的主瓣角也随着发生偏转并由井内液体入射于井壁。当主瓣角的偏转方向满足第一临界角时,各阵元在井壁激起的滑行纵波波包同相位叠加,从而使滑行纵波能量得到最大加强;当主瓣角的偏转方向满足第二临界角时,各阵元在井壁激起的滑行横波波包同相位叠加,使滑行横波能量得到最大加强(见图 3)。

图 3 中每道波形包含滑行纵波、滑行横波和斯通利波 3 种波动模式。利用开窗技术分别提取其每道波形的 3 种波动模式,每种模式波取其最大与最小幅度值的差作为此道波形此种模式波的振幅峰峰值。随着相邻阵元间延迟时间的增大,纵、横波和斯通利波振幅峰峰值的变化趋势如图 4 所示。

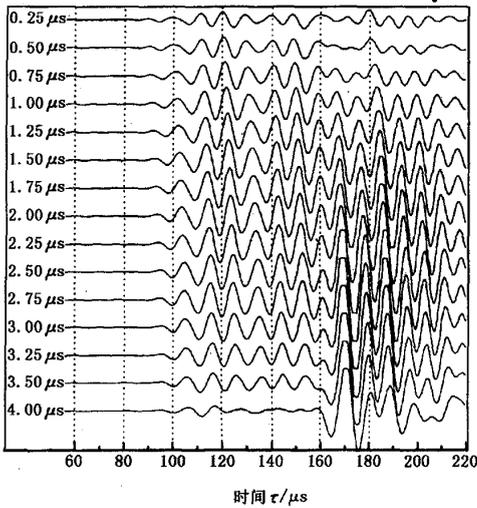


图3 4/8/6/4/1阵在不同延迟时间下在水泥模型井中测得的全波列波形

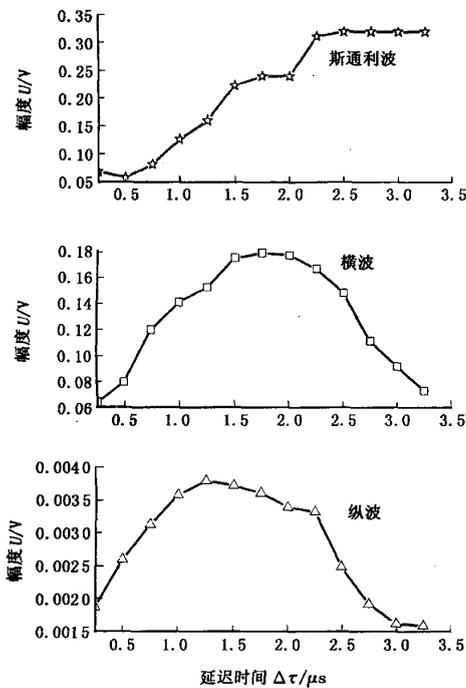


图4 振幅峰值随相邻阵元间延迟时间的变化关系

延迟时间为 $1.25 \mu s$ 和 $1.5 \mu s$ 时, 滑行纵波波包幅度最强, 此时相控线阵辐射声束的偏转角基本满足第一临界角的条件, 各个阵元激发的滑行纵波能够近似同相位叠加; 延迟时间为 $1.75 \mu s$ 和 $2 \mu s$ 时, 滑行横波波包得到了明显的增强, 此时相控线阵辐射声束的偏转角近似满足第二临界角的条件; 延迟时间逐渐增加时, 斯通利波波包幅度逐渐增强, 此时相控线阵辐射声束的偏转角逐渐变大而使得沿井

轴方向传播的能量增加。由图4还可以看出, 在声束偏转角的可控范围内, 其他因素不变仅改变激励信号的延迟时间, 纵、横波波包同相位叠加可以使电压幅度增强近2.786倍, 因为声强随声波幅度的平方变化, 所以能量将增强7.76倍。

2.2 相邻阵元间延迟时间对纵、横波主频的影响

利用4/8/6/8/1阵和B&K8103在水泥模型井中测量了相邻阵元间延迟时间从 $0.25 \sim 4.00 \mu s$ 时的全波列波形, 步长为 $0.25 \mu s$, 结果见图5。利用开窗技术分别提取图5中每道波形的纵波波包和图3中每道波形的横波波包进行快速傅里叶分析。图6显示了随着延迟时间的增加, 纵、横波波动模式的幅度谱特征。

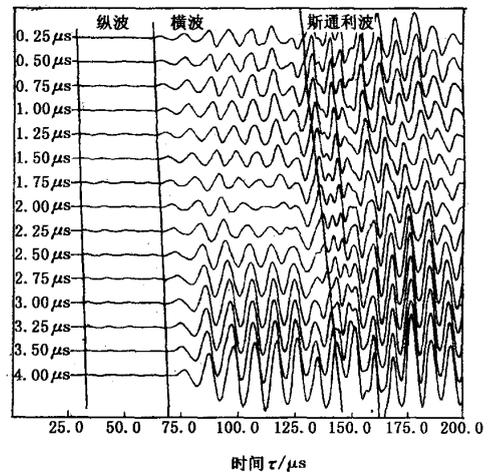


图5 4/8/6/8/1阵在不同延迟时间下在水泥模型井中测得的全波列波形

从图6(a)可以看出, 随着延迟时间的增加, 纵波波包的幅度值和主频值均在延迟时间为 $2.0 \mu s$ 和 $2.25 \mu s$ 时取得最大, 此时主瓣偏转角恰好近似为滑行纵波临界折射角。从图6(b)可以看出, 随着延迟时间的增加, 横波波包的幅度值和主频值均在延迟时间为 $1.75 \mu s$ 和 $2.0 \mu s$ 时取得最大, 此时主瓣偏转角恰好满足滑行横波临界折射角条件。由此看出, 随着阵元间延迟时间的增加, 相控线阵的辐射声束指向角不断变大。当满足滑行纵(横)波临界折射条件时, 纵(横)波波包的主频值最高, 谱幅度值最大。因此, 对于多道有限长的波在液-固界面以不同的相位反射叠加时, 波的主频值会发生漂移, 所以在利用相控线阵进行连续声波测井时最好不要改变相邻阵元间的相位差, 以保证波形频率特征的变化只包含地层的信息。

对编号为4/8/6/4/1阵在水泥模型井内进行了

相同的物理模拟实验,对采集的波形进行了分析,得

到了同样的结论,这里不再赘述。

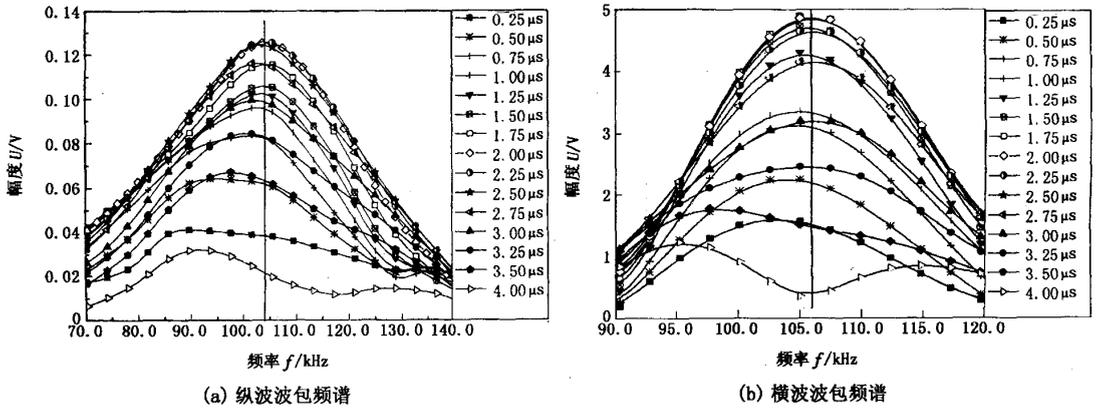


图6 物理模拟实验相控线阵声波测井波形频谱分析

2.3 工作阵元个数对波形振幅的影响

在相控线阵阵元间距、激励频率和延迟时间等参数不变的情况下,随着阵元个数的增加,相控线阵的辐射主瓣角宽会不断变窄。4/8/6/4/1阵在125 kHz下的指向性图见图7。

满足同相位叠加(阵元间的延迟时间近似为 $2 \mu\text{s}$)时,纵波波包的电压响应幅度得到了明显的增强,见图8(a);当横波波包同相位叠加(阵元间的延迟时间近似为 $3 \mu\text{s}$)时,横波波包的电压响应幅度得到了明显的增强,见图8(b)。图9是利用开窗技术分别求取阵元个数变化时每道波形中纵、横波波包峰值的变化曲线。

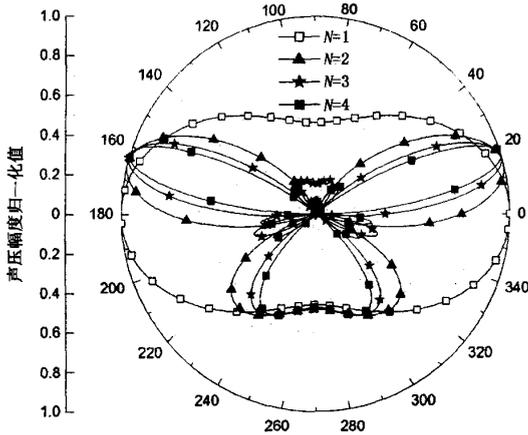


图7 阵元个数 N 变化对指向性图的影响
当工作阵元个数从1增加到4时,在纵波波包

利用相控阵技术,对线列阵而言,随着工作阵元个数的增加,最大加强位置的声压值应该与阵元个数 N 呈线性关系,与换能器宽度和波长之比呈辛克函数($\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$)关系,但是由于实际使用的阵元不是严格意义上的点源,由于扩散损耗和外部损耗,最大加强位置的声压值与阵元个数 N 近似呈线性关系。由图9计算可知,4个阵元组成的相控线阵在同相位叠加时纵波波包电压峰峰值是单个阵元工作时的3.1倍(相当于能量增强了9倍),横波波包的电压峰峰值是单个阵元工作时的2.4倍(相当于能量增强了近6倍)。

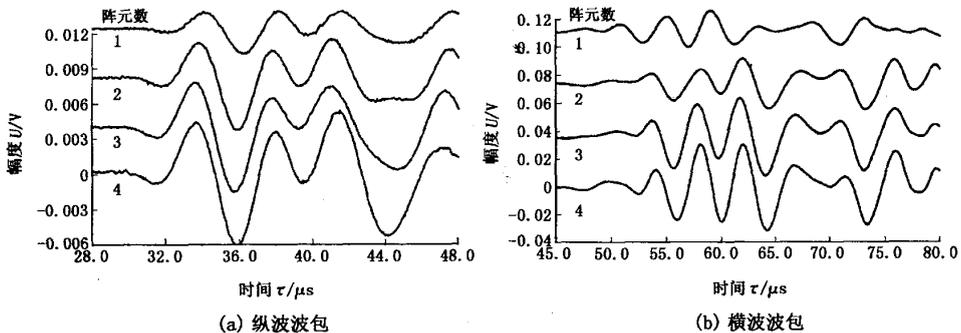


图8 纵、横波波形幅度随时间的变化曲线

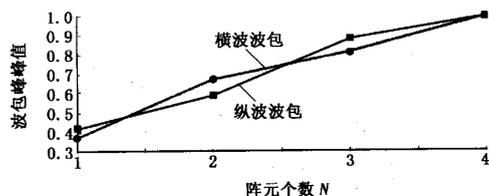


图9 不同阵元个数对纵、横波波包的影响曲线

3 结论

(1) 随着相邻阵元间激励信号的延迟时间的增加,声束偏转角不断增大,在满足纵(横)波同相位叠加时,纵(横)波波包得到了最大加强,且纵(横)波主频值最高。

(2) 在满足同相位叠加时,随着相控线阵工作阵元个数的增加,纵、横波波包的振幅有了明显的增强。

参考文献:

[1] 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[J].地球物理学报,2002,45(5):714-722.

QIAO Wen-xiao, DU Guang-sheng, CHEN Xue-lian. Feasibility of application of phased array in acoustic well-logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5):714-722.

[2] 乔文孝,陈雪莲,房军,等.相控声波测井的模拟实验研究[J].声学学报,2003,28(2):116-122.

QIAO Wen-xiao, CHEN Xue-lian, FANG Jun, et al. Laboratory simulation on acoustic well-logging with phased array transmitter[J]. Acta Acustica, 2003, 28(2):116-122.

[3] 栾桂冬,张金铨,王仁乾.压电换能器和换能器阵[M].北京:北京大学出版社,1990.

[4] WOOH Shi-chang, SHI Yi-jun. Three-dimensional beam directivity of phased-steered ultrasound[J]. Journal Acoust Soc Am, 1999, 105(6):3275-3283.

(编辑 刘艳荣)

(上接第41页)

P-S转换波反射系数变化最大可超过20%。模拟数据表明,利用时移地震AVO响应在X油田是有价值的,特别是利用P-S转换波AVO响应确定油藏有效压力变化将十分有效。此外,油藏含油饱和度变化时,储层顶反射P-P波AVO曲线变化明显,而P-S转换波AVO曲线变化很小;油藏有效压力变化时,储层顶反射P-P波AVO曲线在入射角较小($\theta < 20^\circ$)时变化明显,而P-S转换波AVO曲线在入射角度中等($30^\circ < \theta < 50^\circ$)时变化明显。总之,X油田时移地震AVO正演模拟对分析X油田时移地震是可行的。

3 结束语

高孔低胶结砂岩油藏速度对含油饱和度和压力变化比相同孔隙度的固结岩石有更高的敏感性,利用岩石物理参数计算和时移地震AVO正演模拟分析这类油田时移地震是可行的。X油田油藏含油饱和度和压力变化时,油藏纵、横波速度和P-P波和P-S转换波AVO曲线有不同变化规律,区分油藏含油饱和度和压力变化,进一步提高时移地震油藏监测技术精度与可信度,对真正实现时移地震定量解释和有效地确定剩余油分布规律都具有重要意义。

参考文献:

[1] ZOU Y, BENTLEY L. Time-lapse well log analysis,

fluid substitution and AVO[C]/Expanded Abstract of 72nd Annual Internat SEG Mtg, 2002:1719-1722.

[2] LANDRO M. Discrimination between pressure and fluid saturation changes from time-lapse seismic data[J]. Geophysics, 2001,66(3):836-844.

[3] LANDRO M, VEIRE H H, DUFFAUT K, et al. Discrimination between pressure and fluid saturation changes from marine multicomponent time-lapse seismic data[J]. Geophysics, 2003,68(5):1592-1599.

[4] BATZLE M, WANG Z. Seismic properties of pore fluids[J]. Geophysics, 1992,57(11):1396-1408.

[5] DVORKIN J, NUR A. Elasticity of high-porosity sandstones: theory for two North Sea data sets[J]. Geophysics, 1996,61(5):1363-1370.

[6] GASSMANN F. Elastic waves through a packing of spheres[J]. Geophysics, 1951,16:673-685.

[7] HILL R. The elastic behavior of crystalline aggregate [M]. London: Proceeding Physical Society, 1952:349-354.

[8] WOOD A M. A textbook of sound[M]. New York: The Macmillan Company, 1955:360-360.

[9] AKI K I, RICHARDS P G. Quantitative seismology [M]. New York: W. H. Freeman and Company, 1980:226-308.

(编辑 刘艳荣)