

文章编号:1673-5005(2006)03-0046-04

相控线阵声波辐射器阵元个数对充液井孔中 各种模式波的影响

陈雪莲¹, 乔文孝²

(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:利用有限元数值模拟研究了由点源组成的相控线阵声波测井辐射器对充液井孔中各种波动模式波的影响,重点分析了阵元个数对各种波动模式波响应幅度的影响。结果表明,随着阵元间延迟时间的增加,声束偏转角逐渐增加。控制声束偏转角分别满足相控线阵辐射声束在纵、横波临界角位置入射时,随相控线阵阵元个数增加,折射纵、横波响应幅度呈正比增加;在非临界角入射时,阵元个数的增加对折射纵、横波能量的增强效果不明显。当阵元个数不变时,随声束偏转角的增加,纵、横波声压值也开始逐渐增加,且在偏转角分别等于第一或第二临界角时达到最大;若偏转角再继续增加,声压值又会逐渐减弱。

关键词:相控线阵声波辐射器; 声波测井; 有限元法; 阵元个数; 偏转角

中图分类号:P 631.443

文献标识码:A

Effects of element number of linear phased array acoustic transmitter on waves of various modes in fluid-filled borehole

CHEN Xue-lian¹, QIAO Wen-xiao²

(1. College of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. School of Resource and Information Technology in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Effects of the acoustic logging transmitter of linear phased array composed of point source on waves of various modes in fluid-filled borehole were studied by finite element method (FEM). And the influence of element number of array on wave amplitude was mainly analyzed. The results show that the steered angle of acoustic arrays increases with the delay time increasing between the neighbour elements. When the angle of radiated acoustic beam steered to the critical angle of the compressional or shear wave, the amplitude of the compressional or shear wave can increase in direct ratio with the element number of the phased array. If the steered angle of radiated acoustic beam departs from the critical angle of the compressional or shear wave in other controlled delay time, the enhancement of the amplitudes is little. And when the element number is changeless, the amplitude of the compressional or shear wave can be strengthened gradually with the steered angle increasing. But when the steered angle exceeds the critical angle, the amplitude will be lowered with the steered angle increasing sequentially.

Key words: linear phased array acoustic transmitter; acoustic logging; finite element method; element number of array; steered angle

相控线阵的动态指向性和声束聚焦性在各行各业,尤其是在医学和超声探伤方面已经得到了广泛的应用^[1-3]。为了在井下狭窄空间条件下增加声波测井单极子发射探头的声波能量,提高声波探测深度,人们想到能够控制声束指向性的基阵式换能

器^[4-5]。应用相控阵列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发射,从根本上增加有用信号的能量,提高信噪比和探测能力。数值模拟和实验研究均说明了此方法的可行性^[4-7]。随着相邻阵元间激励信号延

收稿日期:2005-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40374049); 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,主要从事声波测井方法研究。

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;通过减小相控线阵的阵元间距或适当降低声波频率,可以明显地增大相控线阵辐射声束的角宽^[5-6]。本文中笔者在以往工作的基础上,重点分析充液井孔中各模式波的幅度随相控线阵阵元个数增加的变化情况。

1 数值模拟环境

ANSYS 大型有限元分析软件广泛应用于声学、机械制造、汽车等科学研究的各个领域^[8-9]。本文中应用此软件对相控线阵声波辐射器在充液井孔中的测井响应进行了模拟,如图1所示。数值计算模型采用高度为6 m,外径为5 m的轴对称圆柱形固体结构,中心圆柱形孔眼用来模拟充液井孔,其直径为20 cm,井眼中心轴线(z 轴)为对称轴。井眼内所充液体的纵波波速和密度分别为1500 m/s和1000 kg/m³。井壁介质的纵波波速为6200 m/s,横波波速为3080 m/s,密度为2700 kg/m³。

在进行数值模拟时,把发射和接收探头放置在井眼中心轴线上,模拟了1,2,3,4,5和7阵元组成的相控线阵作为声波发射器时的井孔声场,各个阵元的排列位置如图2所示。在模拟时,尽可能使不同个数阵元组成的相控线阵的几何中心位于 z 轴同一个位置,阵元沿着 z 轴向上依次编号为 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ 和 S_7 ,阵元间距均为4 cm。声源在井壁表面产生侧面波的两个入射角为14.0°和29.1°。

数值模拟中,声源激励源函数的幅度与时间之间的变化关系为

$$s(t) = 400at \exp(-at) \sin(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

其中

$$f_0 = 20 \text{ kHz}, \alpha = 4.5 f_0.$$

α 值取值稍大,使激励源的频带变宽,减少各种

波动模式的振动周期数。

当对相控线阵声波辐射器的相邻阵元实施延迟时间激励时,总是使 z 轴最下端的阵元先被激励,相邻阵元依次被激发。只要给各个阵元施加的激励信号有一定的延迟时间,就可以使相控线阵辐射声束的方向发生偏转,从而增加有用信号的能量。相控线阵的偏转角公式^[1]为

$$\tau = \frac{d \sin \theta_s}{v_p}. \quad (2)$$

式中, d 为相邻阵元之间的距离; v_p 为声源所在介质的纵波波速; τ 为相邻阵元所加激励信号的延迟时间; θ_s 为相控辐射器声束主瓣的偏转角。

图3显示了相邻阵元激励延迟时间为12.8 μs 的5道激励源的时域波形图。当相邻阵元间延迟时间分别为0,6.4,12.8,19.2 μs 时,相控线阵辐射主瓣的偏转角 θ_s 分别为0°,14.0°,29.0°,46.0°。可见,当阵元间延迟时间为6.4 μs 时,声束偏转角恰好满足纵波临界折射条件;阵元间延迟时间为12.8 μs 时,声束偏转角恰好满足横波临界折射条件。

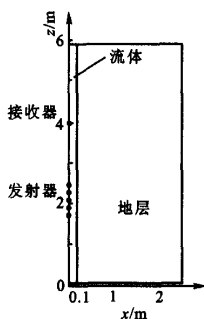


图1 数值模拟模型结构示意图

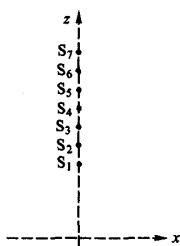


图2 阵元排列示意图

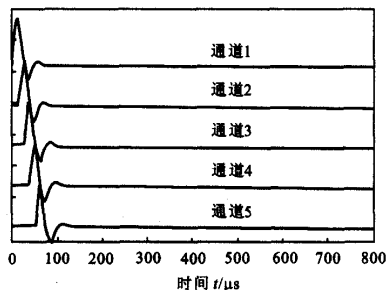


图3 5通道激励源的时域波形图

2 数值模拟结果

对由1,2,3,4,5和7阵元组成的相控线阵声波辐射器在井孔中激发的声场进行了模拟。相邻阵元间延迟时间分别选择为0,6.4,12.8,19.2 μs 。

2.1 数值模拟的时域波形分析

图4显示了一个点声源和5阵元相控线阵作为辐射器时在源距2 m处井轴上接收的声波全波列波形。从时域波形图上清晰可见,在延迟时间为6.4 μs 时折射纵波得到了加强,延迟时间为12.8 μs 时折射横波得到了加强,斯通利波能量随着延迟时间增加也在逐渐增强。类似地,对2,3,4和7阵元组成的相控线阵作为声波辐射器的情况也进行了数值模拟,图5显示了该相控线阵在频率为20 kHz时在 x - z 平面上的指向性图。由图5看出,随着阵元个

数的增加,声束主瓣角越来越窄,能量分布越来越集中。从2,3,4,5和7阵元相控线阵作为辐射器时在源距2 m处并轴上接收的声波全波列波形也可以看到类似的现象。当阵元个数不变时,随着延迟时间的增加,纵、横波声压值也逐渐增加,在分别满足同相位叠加时其声压值加强到最大,若延迟时间再继续增加,声压值又会逐渐减弱;斯通利波能量随着延迟时间增加而逐渐增强。

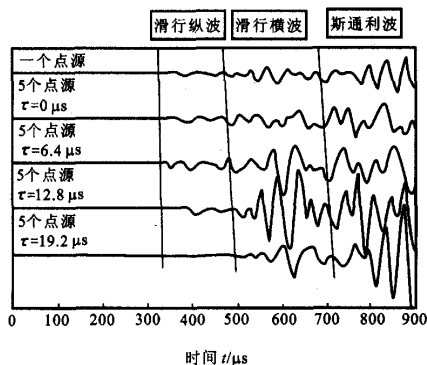


图4 1个点源和5阵元相控线阵辐射器源距为2 m位置的接收波形

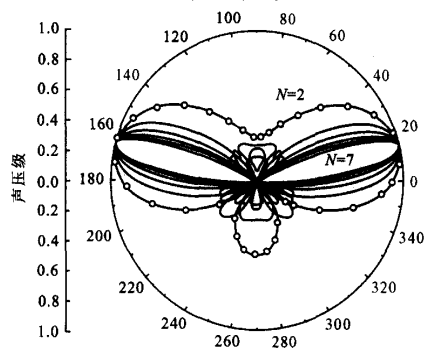


图5 延迟时间为6.4 μs时不同阵元个数的相控线阵的指向性图(N为阵元个数)

2.2 阵元个数对各种波动模式波声压振幅的影响

为了研究相控线阵阵元个数的变化对充液井眼中各种模式波幅度的影响,在接收波形中针对各种模式波设置不同的窗口并统计该窗口内声压振幅峰值的变化趋势。保持相控线阵声波辐射器相邻阵元间的延迟时间不变,随着阵元个数的增加,各种波动模式波的变化趋势也不尽相同。图6显示了随着阵元个数的增加折射纵波、折射横波和斯通利波波包声压振幅峰值的变化趋势。折射纵波、折射横波和斯通利波声压振幅峰值均与一个点源工作时接收到的折射纵波、折射横波和斯通利波的声压振

幅峰值做了归一化处理。

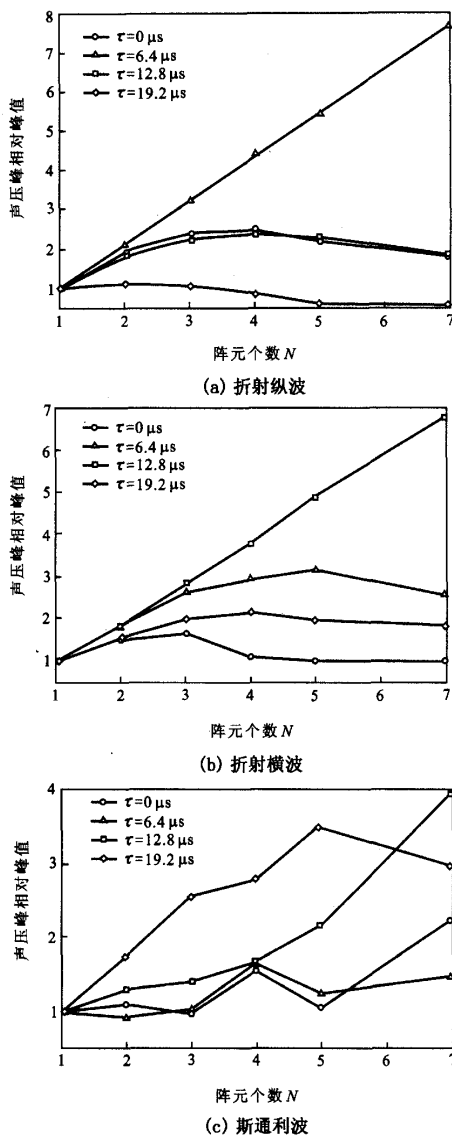


图6 折射纵、横波和斯通利波声压振幅峰值随阵元个数和阵元间延迟时间的变化趋势

由图6可见,当阵元间延迟时间为6.4 μs时,恰好满足折射纵波同相位叠加,此时折射纵波波包声压振幅峰值与阵元个数N近似呈线性关系(相当于纵波能量增强了 N^2 倍);当阵元间延迟时间为12.8 μs时,恰好满足折射横波同相位叠加,此时折射横波波包声压振幅峰值与阵元个数N也呈线性关系(相当于横波能量增强了 N^2 倍);当不满足折射纵、横波同相位叠加时,随着阵元个数的增加,其声压振幅增加不明显。在可控范围内的任一延迟

时间斯通利波声压振幅峰峰值随着阵元个数的增加总呈上升趋势;当阵元个数不变,随着延迟时间的增加,其振幅峰峰值也在增加,但其最大增强幅度比折射纵、横波模式波的要低。

3 结 论

(1)在相控线阵阵元间延迟时间恰好满足折射纵波(或折射横波)同相位叠加时,折射纵波(或折射横波)的声压值与相控线阵的阵元个数 N 近似呈线性关系,也即利用相控阵技术。 N 个阵元组成的相控线阵辐射器工作时可以使接收到的折射纵波(或横波)声压值是单个阵元工作时的 N 倍,能量变为原来的 N^2 倍。

(2)当阵元间延迟时间不满足同相位叠加时,随着阵元个数的增加,折射纵、横波的声压值增加不明显。只是单纯地增加换能器个数,不采用相控阵技术,换能器的利用效率会降低。

(3)在可控范围内的任一延迟时间,斯通利波模式波声压振幅随着阵元个数的增加总是呈上升趋势。

(4)当阵元个数不变时,随着延迟时间的增加,纵、横波声压值也逐渐增加,当分别满足同相位叠加时,其声压值最大,若延迟时间再继续增加,声压值又会逐渐减弱;斯通利波声压值随延迟时间的增加而逐渐增加。

参考文献:

- [1] WOOH Shi-chang, SHI Yi-jun. Three-dimensional beam directivity of phased-steered ultrasound[J]. J Acoust Soc Am, 1999, 105(6):3275-3283.
- [2] BILL Dragoset. Introduction to air guns and air-gun arrays[J]. The Leading EDGE, 2000, 19(8):892-897.
- [3] CATHERINE H Frazier. Acoustic imaging of objects buried in soil[J]. J Acoustic Soc Am, 2000, 108(1):147-156.
- [4] LIN Fa, JOHN P Castagna, ROBERTO Suarez-Rivera, et al. An acoustic-logging transmission-network model (continued): addition and multiplication ALTNs[J]. Journal Acoustic Soc Am, 2003, 113(5):2698-2703.
- [5] 乔文孝,杜光升,陈雪莲. 相控线阵声波辐射器在声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 linear phased array acoustic transmitters to acoustic well-logging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5):714-722.
- [6] 乔文孝,陈雪莲,房军,等. 相控声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]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 28(2):116-122.
- [7] 车小花,乔文孝,闫相祯. 相控线阵声波辐射器技术在反射声测井中的应用探讨[J]. 测井技术, 2004, 28(2):108-111.
- CHE Xiao-hua, QIAO Wen-xiao, YAN Xiang-zhen. The effectivity of applying linear phased array transmitter in borehole acoustic reflection logging[J]. Well Logging Technology, 2004, 28(2):108-111.
- [8] 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[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2000, 24(1):94-97.
- DU Guang-sheng, QIAO Wen-xiao, WANG Yao-jun. Computation of reflected stoneley wave at a horizontal fractures using finite element method[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 4(1):94-97.
- [9] 张亚萍,阎向宏. 充液井孔内电脉冲仪声场的有限元模拟[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2003, 27(5):125-128.
- ZHANG Ya-ping, YAN Xiang-hong. Simulation of a-coustic field of electric impulse equipment in well bore filling liquid with finite element method[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2003, 27(5):125-128.

(编辑 刘艳荣)

中国石油大学(华东)承担一项国家“973 计划”项目子课题

“数学机械化方法及其在信息技术中的应用”是首席科学家高小山负责的国家“973 计划”项目(项目编号:2004CB318000)。中国石油大学(华东)信息与控制工程学院李树荣教授参加并承担其中的一项子课题“基于网络计算的数学机械化软件编制”。这一子课题是“十五”期间“973”项目的延伸。

(摘自中国石油大学(华东)校园网)