

可相控声波高压激励系统设计^①

李丰波^{②*} 陆黄生* 李根生** 张卫*

(* 中国石化石油工程技术研究院页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室 北京 100101)

(** 中国石油大学 北京 102249)

摘 要 针对随钻声波具有方位性的可相控声系结构研究的迫切需求,提出了一种可相控激励声波高压激励系统设计方案。系统采用 CPLD 作为逻辑控制器,可以实现多通道单独激励,产生高达千伏以上的高压激励脉冲,并且对通道间激励延迟时间和脉冲宽度可以精确控制,可调节范围达 200μs。可以根据换能器主频和声束偏转角度来合理选择高压激励信号工作参数,本文研究能很好地满足科研及实际应用需求。

关键词 高压激励,随钻声波,相控阵,换能器

0 引 言

随钻声波测井技术是将发射及接收换能器布置在钻铤上,在井筒中激发产生多种模式波,通过对各种模式波的波速及衰减等可反映地层岩石物理参数的声学信息的测量,从而评价井旁地层地质特性及岩石物理性质的一种应用地球物理技术,也是一种有效的石油工程技术。

随着储层条件变得越来越复杂,目前随钻地质导向技术在油气勘探中得到了广泛的应用,对随钻测井技术的需求越来越多,随钻声波测井技术在国内却进展缓慢。由于随钻声波测井在方法及仪器研究方面存在较大的难度以及国外技术封锁等原因,国内多家单位虽已相继开展研究,但尚未见到较为成熟的仪器及应用。

目前对随钻声波的研究主要集中在理论方法研究^[1-4],换能器研究^[5,6],隔声体研究^[7,8],仪器电路系统研究^[9,10]以及实验研究^[11]等方面。声波换能器(传感器技术)是随钻声波测井技术的关键技术之一。随着声波测井技术的发展,声源工作模式由

单极到多极,振动方式由对称式到非对称式,辐射声场也相应地由对称式朝非对称式的方向发展。同时,随着井下地质条件变得越来越复杂,需要声波测井仪器具有方位分辨能力^[12,13],那么需要从声源结构入手,提出新的能向井周不同方位辐射和接收声波信号,具有一定方位分辨能力的相控阵换能器声系结构^[14,15]。

所以必然对声波换能器高压激励系统提出新的要求,其既要能够产生及控制高达千伏级高压激励脉冲,以便利用压电换能器的逆压电效应激发出足够强的声波信号,又要能够精确控制高压激励脉冲宽度以及延迟激励时间,以便对声波辐射方向进行控制,实现定向发射功能。

因此,针对声波测井技术新要求,本文提出一种可相控激励的高压激励系统设计方案,并对其关键技术进行了有益的探索。

1 相控式换能器激励原理

相控式换能器工作原理跟相控阵雷达工作原理具有一定相似性。以单极子声波换能器为例,如

① 国家科技重大专项(2016ZX05021-002)资助项目。
② 男,1985 年生,博士;研究方向:随钻测控技术及装备;联系人,E-mail: lifb.sripe@sinopec.com
(收稿日期:2018-01-05)

图 1 所示,在空间声场中,每个单极子声波换能器可以视为一个点声源。点声源会向整个空间辐射声场,当空间两列波在某一点满足同相位叠加,则会使其振动加强,声压值达到最大。所以在激励这些单极子发射换能器时,可以通过给相应换能器的激励信号增加延迟时间的方法来补偿其相位差,使其满足同相叠加的条件。不同的激励信号延迟时间可以控制声发射换能器阵列辐射声束的偏转角,如果改变阵元个数及激励脉冲的能量,还可以增大辐射声束的主瓣角,减小旁瓣,使能量更为集中。相控线阵声源能够控制辐射声束在轴向上的垂直指向性和主瓣角,使发射探头辐射的声波能量更多地偏向接收探头一侧。

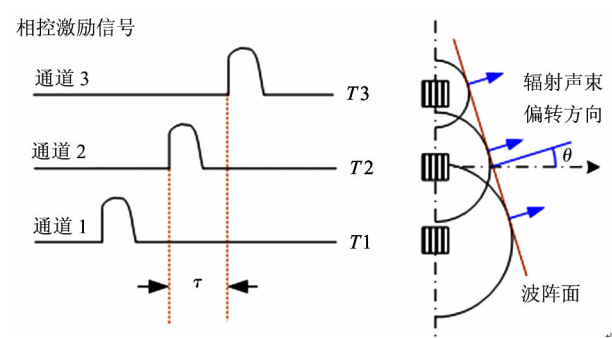


图 1 相控阵列式发射声系原理示意图

声发射换能器阵列辐射声束的偏转角 θ 与相邻阵元激励信号的延迟时间 τ 之间的关系为

$$\tau = d\sin\theta/c$$

式中, d 为相邻阵元的中心间距, c 为介质的声速。

本文以 3 个换能器为研究测试对象,在轴向上

可以等效为 3 个阵元的相控线阵声波辐射器,阵元间距为 d 。把先开始激励的换能器的时刻标记为 0 时刻,到 τ 时刻再激励其他换能器,则两次激励信号间的延迟时间为 τ 。

对于三阵元阵列换能器而言,如果需要调整发射换能器阵列的辐射声速偏转方向,以便适合某一地层的最佳入射角度进入井壁地层,则一般以第一个换能器为参照,该换能器先开始激励并将此时刻作为参考时刻(0 时刻),根据辐射声束的偏转角 θ 与相邻阵元的中心间距 d 计算出延迟时间 τ ,然后依次延迟 τ 后激励其它换能器。

如果需要增强发射换能器阵列的激发能量,一般将中间换能器看作中心换能器,中间换能器先开始激励并将此时刻作为参考时刻(0 时刻),相邻两个换能器延迟 τ 后再开始激励,使其振动加强,激发能量到达最大。

2 可相控激励系统电路设计与测试

对于相控阵列式声系,一般需要多通道激励信号,并且相邻激励通道的延迟时间可调整。激发脉冲的宽度需要按照换能器的主频率进行选择。换能器与激发电路共同构成激发回路,激发脉冲的宽度需大于换能器的主频所确定的周期,以保证激发的能量比较大。可相控声波激励系统原理框图如图 2 所示,主要由逻辑控制电路,驱动电路,高压储能电路以及总线接口电路等部分组成。

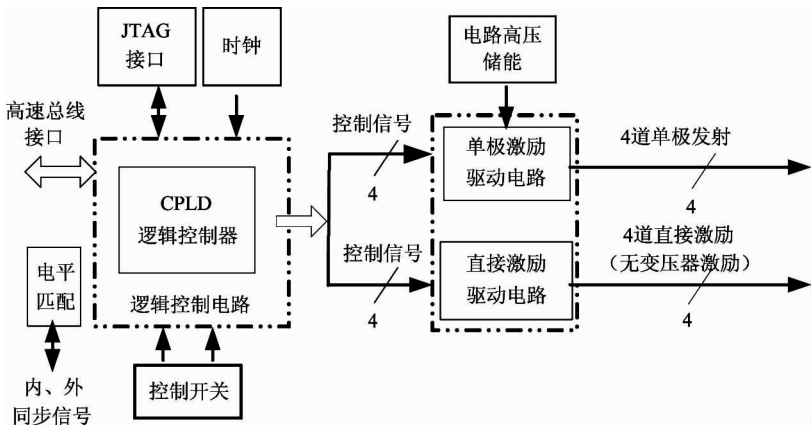


图 2 相控激励电路原理图

激励系统采用 Altera 公司 MAX II 系列 CPLD (complex programmable logic device) 复杂可编程逻辑器件芯片作为发射电路板的接口及逻辑控制器,系统时钟为 20MHz。用户可以基于 CPLD 使用硬件描述语言 VHDL 或 Verilog HDL 来实现不同数字逻辑功能模块的设计。

CPLD 的核心数字逻辑模块包括总线接口模块、激发控制模块、相控延迟模块、脉宽控制模块。通过总线接口模块实现与高速总线通讯功能;通过激发控制模块控制激励系统的开始激发时间;通过相控延迟模块可精确设置相控延迟时间;通过脉宽控制模块可精确设置高压激励脉冲的脉冲宽度,以更好地与换能器主频相匹配。

CPLD 逻辑控制器的功能仿真部分时序图如



图 3 CPLD 控制逻辑功能仿真时序图

通过总线接口,激励系统可以在主控系统的控制下工作,CPLD 对接收到的发射控制命令进行译码,并按照仪器串行命令协议解析出相应的控制命令以及发射换能器组延迟激励时间、激励脉冲宽度等工作参数,控制激励系统工作。

本文设计的声波激励系统包括 4 道独立的激励通道,可以实现 4 道同时激励(阵列式换能器),也可以使相邻激励信号间存在一定延迟时间 τ ,实现相控阵方式激励。

高压激励系统设计研制完成后,对其进行了测试,实际测试过程中的一道高压激励脉冲波形图如图 4 所示,CH1 为高压激励脉冲波形,CH2 为激励驱动信号波形。CH2 虽然存在一定干扰,但仍然呈现一个很好的高压脉冲驱动信号。CH1 电压峰峰值可达 2.24kV,脉宽会随着激励驱动信号的调整而相应调整。

激励系统的激励模式,激励信号脉宽以及相邻通道延迟时间等工作参数也通过相应的控制开关设

图 3 所示,激励控制信号 $c1$ 、 $c2$ 、 $c3$ 间存在延迟,为相控激励模式,当激励控制信号 $c1$ 、 $c2$ 、 $c3$ 间不存在延迟时(即同时激励)则为非相控模式。以三阵元相控阵列换能器为例, $T2$ 换能器为中心换能器,若要使阵列的辐射声束方向主要朝着中心换能器 $T2$ 的主方向,那么, $T1$ 、 $T3$ 换能器需要一个相同的延迟激励时间,即 $T2$ 先开始激励,标记此时为 0 时刻,到 τ 时刻再激励 $T1$ 、 $T3$,两次激励信号间的延迟时间为 τ 。各个通道激励信号可独立控制,系统激励延迟时间和脉冲宽度的精度可达 50ns,可调节范围为 0 ~ 200 μ s。可以根据换能器的主频选择适合的脉冲宽度,以实现大能量的换能器激发。此外,还可以根据辐射声束需要的偏转角度来选择相应的延迟激励时间,以控制声束辐射的方向。

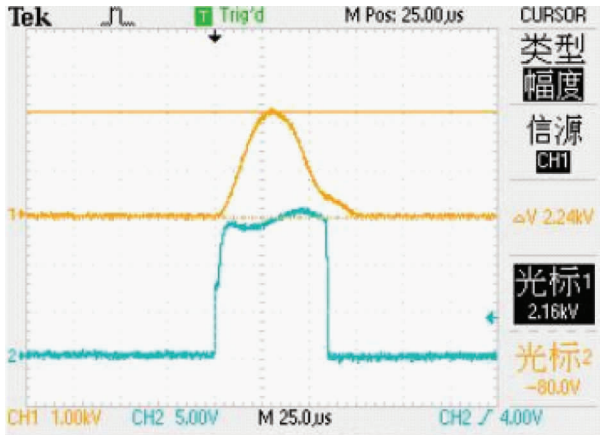


图 4 高压激励脉冲波形图

置,操作简便,实现了一个简单的人机交互功能。该系统设计了两种同步模式,可通过选择开关进行选择。当内部自行触发时,同时对外输出一个同步信号,如可以向外部数据采集系统输出一个同步信号,通知采集系统开始采集;当外部触发时(如外部数据采集系统),可以由外部系统控制其工作周期。

3 结 论

本文提出的一种可相控声波高压激励系统可以满足新型可相控声系激励的要求,各激励脉冲通道可以独立控制,能产生高达千伏以上的高压激励脉冲。同时,采用 CPLD 复杂可编程逻辑器件作为系统的逻辑控制器,可以精确地控制相控延时时间和激励脉冲宽度,精度可达 50ns,可调节范围为 0~200μs,可以满足不同主频换能器的激发需求,以及不同声束辐射方向的控制。本文研究工作对随钻声波仪器新型声系结构的研究与测试奠定了重要基础。

参考文献

[1] 孔凡童, 庄春喜, 苏远大, 等. 随钻四极横波测量的数据驱动频散处理方法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12):4398-4944

[2] 谭宝海, 到唐晓明, 魏周拓, 等. 随钻偶极横波远探测优势频带及反射声场[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1152-1158 + 1178

[3] 丁浩然, 崔志文, 吕伟国, 等. 双声源激发随钻测井声电耦合波理论模拟[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9):3524-3532

[4] 张博, 唐晓明, 苏远大, 等. 一种利用双源反激的随钻声波测井方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(3): 1151-1160

[5] 陈俊圆, 唐晓明, 苏远大, 等. 随钻方位声波发射换

能器性能数值模拟分析[J]. 测井技术, 2017, 41(3): 256-259

[6] 陈勇, 尚海燕, 秦琼. 随钻声波传输中换能器声源功率匹配实验研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(5):123-126

[7] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明, 等. 一种刻槽式随钻声波测井隔声体的理论与实验研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(12):4521-4528

[8] 朱祖扬, 吴海燕, 李永杰, 等. 钻铤结构对随钻声波测井响应的影响[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 117-122

[9] 张利伟, 叶朝辉, 刘西恩, 等. SoC FPGA 在声波测井仪器中的软硬件协同设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18(4):24-27 + 38

[10] 仇傲, 刘西恩, 陈洪海, 等. 随钻声波测井仪电路系统设计及关键技术实现[J]. 石油仪器, 2015(1): 23-26

[11] 王军, Zhu Zhenya, 郑晓波. 多极源随钻声波测井实验分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(5):1909-1919

[12] 甘甜, 邢德键, 仵杰. 声波测井圆环阵指向性设计[J]. 测控技术, 2018, 37(01):101-106

[13] 刘玉凯, 李振, 苏远大. 随钻声波测井多极子发射换能器指向性分析[C]. 见:中国声学学会第十届青年学术会议, 中国重庆, 2013. 281-282

[14] 车小花, 乔文孝. 充液井孔中的相控线阵声波辐射器在地层中产生的声场[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4):731-736

[15] 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

Research on acoustic phased excitation system

Li Fengbo^{***}, Lu Huangsheng^{*}, Li Gensheng^{**}, Zhang Wei^{*}

(^{*} Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100101)

(^{**} China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract

In order to meet the need of research on the azimuthal phased array sonde architecture, a design of a phase-controlled high voltage acoustic excitation system is proposed in this work. The system adopts CPLD(complex programmable logic device) as a logic controller, which could realize multi-channel independent excitation and generate high voltage excitation pulse up to a thousand volts. Moreover, the excitation delay time and pulse width between channels could be precisely controlled, and the adjustable range is up to 200μs. The operating parameters of the high voltage excitation signal could be reasonably selected according to the main frequency of the transducer and the sound beam deflection angle. The research in this paper could meet the need of scientific research and practical application.

Key words: high voltage excitation, acoustic logging while drilling, phased array, transducer