

通用核磁共振测井脉冲序列发生器的逻辑设计

马维超 程晶晶 李学伟 张亚鹏
(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

摘要: 在测井领域,伴随着核磁共振技术广泛的应用和核磁共振技术的进步,新的核磁共振序列不断被提出,这对核磁共振测井仪的脉冲序列发生器提出了更多更复杂的要求。在此背景下,新型脉冲序列发生器须满足高精度、灵活的编程能力、良好的通用性要求。为了同时满足新的和传统的要求,在总结传统脉冲序列和新型脉冲序列的特征要素基础上,提出了一种可通过配置得到目标序列的脉冲序列发生器的逻辑设计,给出了关键的设计说明。最后通过可编程逻辑器件 FPGA 进行验证。该序列发生器可配置生成 CPMG、DE 等一系列脉冲序列,表现出较好的灵活性和通用性。

关键词: 核磁共振测井;脉冲序列发生器;逻辑设计;FPGA

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Logic design of a universal pulse programmer for NMR well logging

Ma Weichao Cheng Jingjing Li Xuewei Zhang Yapeng
(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In well logging area, along with the widely application and advancement of NMR technology, new pulse sequences have been proposed successively, which inspires more complicated demand for the pulse programmer of NMR well logging tools. In this context, the new pulse programmer must fulfill the requirements including high accuracy, flexible programmability and well generality. In order to meet the latest as well the traditional demand, based on the summary of the features of traditional pulse sequences and new pulse sequences, this paper proposes the logic design which can derive pulse sequences as desired by configuration. The key design specification is illustrated. Then it is verified by programmable logic device FPGA. This pulse programmer can generate CPMG, DE pulse sequence and other terms of pulse sequences, which performs well flexibility and universality.

Keywords: NMR well logging; pulse programmer; logic design; FPGA

1 引言

核磁共振(NMR)技术在 20 世纪 60 年代被成功引入测井行业,该测井技术能同时提供流体含量、流体特性、孔隙尺寸和孔隙度 3 类信息^[1],这使得该方法在解释孔隙度和渗透率等地层物理参数方面具有其他方法无法比拟的优势^[2]。目前的核磁共振测井仪器一般基于一维核磁共振技术^[3],二维核磁共振测井技术也已经出现并得到应用。与此同时,新的脉冲序列及其新的组合模式也不断被提出,这对脉冲序列发生器的设计提出新的要求。由于应用领域的限制,国内外对于脉冲序列发生器的研究多集中于核磁共振波谱仪和成像仪^[4-5],而对于测井领域的脉冲序列发生器的通用性、标准化研究较少。提出并设计了一种通用性较好、资源消耗低、配置灵活的脉冲序列发生器。

该脉冲序列发生器兼顾以往的技术,同时满足新型序列的实验要求,以期作为一种设计参考标准,并且能在传统的和最新的核磁共振测井仪器上获得应用。

2 核磁共振测井序列简介

由于研究对象的特殊性和测井环境的特殊性,井下核磁共振测井仪所处磁场环境为非均匀磁场。CPMG (carr-purcell-meiboom-gill)脉冲序列的提出解决了非均匀磁场下的核磁共振技术问题。在 CPMG 序列基础上,发展了测量纵向弛豫时间 T_1 、横向弛豫时间 T_2 、流体扩散系数 D 的二维图谱的二维测井 DE (Diffusion-Editing) 序列、 T_1 编辑序列 (T_1 -editing) 序列^[6];基于受激回波 (Stimulated Echo) 的序列也获得了研究成果^[6-7],它被证明适合测量扩散效应较弱的黏稠流体;

一种添加了反向 90° 的 CPMG 脉冲序列被提出^[8],它在理论上可以实现快速极化,提高测井仪器的纵向分辨率。随着核磁共振测井理论与技术的进步,将有更多新式的、满足更多需求的序列出现。

3 核磁共振测井脉冲序列要素总结

3.1 脉冲类型

脉冲类型主要分为 90° 脉冲和 180° 脉冲,脉冲的作用时间决定了宏观磁化矢量的扳转角 θ (flip angle),脉冲类型是 90° 还是 180° 或者其他角度,都由扳转角决定,扳转角 θ 可以用式(1)表示,其中 ω_1 为质子在脉冲 B_1 场的进动频率, t_p 为脉冲作用时间。

$$\theta = \omega_1 t_p \quad (1)$$

3.2 脉冲个数及转移关系

CPMG 脉冲由一个 90° 脉冲和多个 180° 脉冲组成,其转移关系为 90° - 180° ,而受激回波脉冲序列则由 3 个 90° 脉冲与一系列 180° 脉冲组合而成,转移关系同样是 90° - 180° ,而 T_1 编辑序列的转移关系为 180° - 90° - 180° ,其他类型的序列转移关系在此不一一列举。

3.3 脉冲相位和接收相位

利用脉冲相位和接收相位可对目标回波信号实现相位循环(Phase Cycling)的相关操作,选择特定的相干转移路径(Coherence Transfer Pathway),从而屏蔽和消除不相关的信号。

从量子力学的角度理解,若只考虑单量子相干。相干等级为 p ,在相位为 ϕ 、旋转轴为 z 轴的量子系统中演化过程可以用式(2)表示^[9]:

$$\exp(-i\phi F_z)\sigma^{(p)}\exp(i\phi F_z) = \exp(-i\phi\phi)\sigma^{(p)} \quad (2)$$

式中: F_z 为宏观自旋角动量的 z 轴分量,式(2)说明系统实际上经历了一 ϕ 的相移。以相位为 ϕ 的射频脉冲 U_ϕ 作用于初始态相干等级为 p 的单量子相干系统,初始态用算符 $\sigma^{(p)}$ 表示,作用后的相干等级为 p' ,用算符 $\sigma^{(p')}$ 表示。若取 $\phi = 0$,其演化结果可以用式(3)表示:

$$U_0 + \sigma^{(p)}U_0^{-1} = \sigma^{(p')} + \text{其他相干等级} \quad (3)$$

式中: $\sigma^{(p')}$ 是需要研究的,故在分析中舍去其他相干等级分量而只关心 $\sigma^{(p')}$ 。而相位为 ϕ 的脉冲与零相位脉冲关系可以用式(4)表示:

$$U_\phi = \exp(-i\phi F_z)U_0\exp(i\phi F_z) \quad (4)$$

因此,当相位为 ϕ 的射频脉冲作用于该系统时,有:

$$U_\phi\sigma^{(p)}U_\phi^{-1} = \exp(-i\phi F_z)U_0\exp(i\phi F_z)\sigma^{(p)}\exp(-i\phi F_z)U_0^{-1}\exp(i\phi F_z)$$

代入式(2)、式(3)后,可以得到 $\sigma^{(p)}$ 系统和 $\sigma^{(p')}$ 系统的关系式:

$$U_\phi\sigma^{(p)}U_\phi^{-1} = \exp(-i\Delta p\phi)\sigma^{(p')} \quad (5)$$

式中: $\Delta p = p' - p$ 。

由式(5)可知,脉冲的作用理论上引起了目标系统的相移,相移的大小为 $\Delta p\phi$ 。对于特定序列,特定的相

干转移路径产生特定的相移,而其他转移路径会产生其他的相移,因此可以利用该相移的差异性,设计若干组不同相位的射频脉冲,设法在一次循环测量中,让需要屏蔽的路径生成正相位信号和对应的反相位信号,再通过求和去除这些信号。常见的应用是在 CPMG 序列、DE 序列中的一种方法—交替相位对(PAPS)方法。该方法如表 1 所示。反转恢复序列的相位循环步骤如表 2 所示。而涉及 4 种相位的受激回波序列的循环步骤在参考文献[6]中给出。

表 1 CPMG 序列相位循环

步骤	$90^\circ\phi_1$	$180^\circ\phi_2$	ϕ_{rec}
1	0	$\pi/2$	0
2	π	$-\pi/2$	π

表 2 反转恢复序列相位循环

步骤	$180^\circ\phi_1$	$90^\circ\phi_2$	$180^\circ\phi_3$	ϕ_{rec}
1	0	0	$\pi/2$	0
2	π	0	$\pi/2$	0
3	0	π	$\pi/2$	π
4	π	π	$\pi/2$	π

对于测井序列,本文中设计的序列发生器将最小相位增量设计成 $\pi/4$,可满足目前测井回波序列的处理要求。

4 脉冲序列发生器的设计

4.1 总体结构图

该文设计的脉冲序列发生器核心控制部分的总体结构如图 1 所示。基于 DSP 和 FPGA 的系统适合应用于数字信号处理系统^[10]。FPGA 具有丰富的门电路和触发器,内部自带多种硬件资源,丰富的输出端口,强大的并行执行能力,便捷的逻辑综合能力,对于多输出、高精度且时序逻辑关系复杂的数字系统非常适用^[11-12]。因此该序列发生器以 FPGA 作为验证平台。

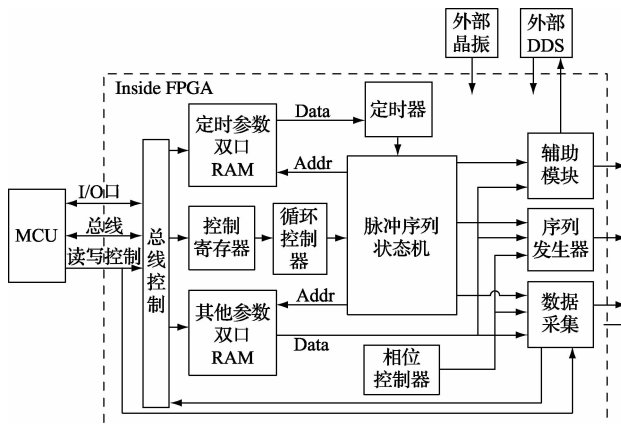


图 1 通用脉冲序列发生器总体结构

该设计充分利用 FPGA 内置的 RAM 来存储脉冲序列所需的数据,节省寄存器资源。一次发射所需的所有的控制命令、所有的参数,均存在存储区域,并按序列类型的不同分区存储,脉冲序列状态机工作时对参数进行基地址+偏移地址的方式进行寻址。外部晶振提供的时钟信号经内部锁相环倍频成 100 MHz 时钟后作为系统时钟,实现 10 ns 的定时精度。DDS 可以配置成不同的频率,实现多种拉莫尔频率脉冲发射。数据采集中心负责回波信号的采集,生成采集时钟,存储回波信号。其他辅助模块主要包括 DDS 配置,能量泄放等操作。系统的几个关键部分单独说明。

4.2 控制寄存器与循环控制器

控制寄存器由多个控制字组成,通过上位机写入。包含了系统控制字和多个脉冲控制字,控制着序列的类型、启动命令、接收相位、脉冲类型、脉冲个数、脉冲相位等,循环控制器根据控制字和对脉冲序列状态机的脉冲计数来进行逻辑判断,产生脉冲序列状态机参数寻址的偏移地址,并控制脉冲序列状态机的状态转移。

4.3 脉冲序列状态机

脉冲序列状态机是脉冲序列发生器的核心,其主要工作为输出特定时序关系、高精度的控制信号,使整个仪器在发射间期有序工作。该状态机的几个主要的工作状态如图 2 所示。

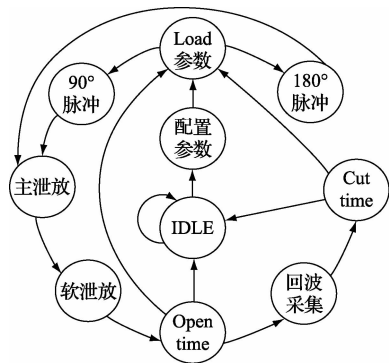


图2 脉冲序列状态机状态转移

当序列发生器检测到启动命令后,通过初始化操作配置 DDS,寻址模块参数、复位相关电路以及选择相关通路。在读取参数阶段,参数由 RAM 数据端读入各个模块,之后根据循环控制模块的命令发射 90° 或者 180° 脉冲,每次发射需要泄放天线上残余能量,再经过 Opentime 延时过渡(180° 脉冲过后还需采集回波和 Cuttime 延时),随后转移到下一个脉冲的发射初始阶段或结束发射回到 IDLE 状态。

4.4 相位控制器

相位控制器由多个分频器组成,对外部 DDS 时钟(32 倍拉莫尔频率)按不同的相位进行 32 分频,分别得到相位

为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 的拉莫尔频率时钟信号,射频脉冲发生器以及数据采集模块则以对应相位的时钟作为触发,发射特定相位的射频脉冲或者以特定相位开始采集数据。

4.5 射频脉冲发生器

射频脉冲发生器产生特定频率、脉宽、相位的射频脉冲。射频脉冲发生器由状态机实现,如图 3 所示。

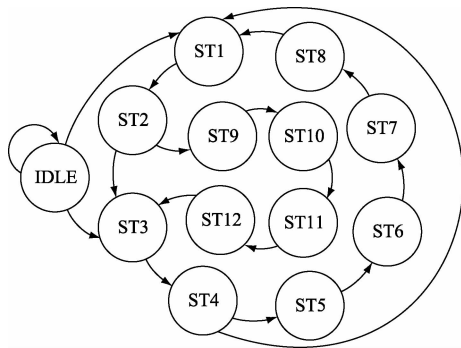


图3 射频脉冲发生器状态转移

发射脉冲的相位可通过相位控制器控制,脉宽由状态机输出信号启动的定时模块来控制。该状态机每个状态转移间隔为 $1/4$ 个拉莫尔周期。仪器在发射初期为了起振需要以半频发射,后期转为全频发射。正相(脉冲相位 $\phi=0$)全频循环过程为 ST1-ST2-ST3-ST4,半频过程为 ST1-ST2-ST9-ST10-ST11-ST12-ST3-ST4;反相(脉冲相位 $\phi=\pi$)全频过程为 ST3-ST4-ST1-ST2,半频过程为 ST3-ST4-ST5-ST6-ST7-ST8-ST1-ST2,通过相位控制器还可发射其他相位的脉冲。

5 仿真及测试结果

为了验证该序列发射器逻辑的通用性能,以及脉冲序列发生器输出信号的时序、逻辑关系的正确性,用 ModelSim 仿真工具进行了功能仿真。配置了 3 种脉冲序列模式。以 CPMG 序列为对比,DE 序列前两个 180° 脉冲为可变 TE 脉冲,反向 90° 的 CPMG 序列在 180° 脉冲序列后再发射一个 90° 脉冲。设置发射频率 886 kHz (对应拉莫尔周期 $T=1\,128.668\text{ ns}$),NE 个数 5。图中 PulseStart 为脉冲序列状态机到射频脉冲发生器的脉冲启动信号,K1K2~K7K8 为射频脉冲发生器输出的射频信号,其他为输出的控制信号和采集相关信号。图 4~6 分别实现了 3 种不同类型的脉冲序列。图 7 为图 1 的第一个 90° 和 180° 脉冲局部放大视图。通过光标可以读出仿真得到的射频脉冲周期为 $1\,128.676\text{ ns}$, 90° 脉冲与 180° 脉冲时间间隔为 $204\,580\text{ ns}$,计算等于 $(181+0.25)T$,符合 $\pi/2$ 相位差关系。另外,脉冲宽度、脉冲的转移关系、以及仪器的各部分控制信号的时序关系和逻辑关系均与预设一致。

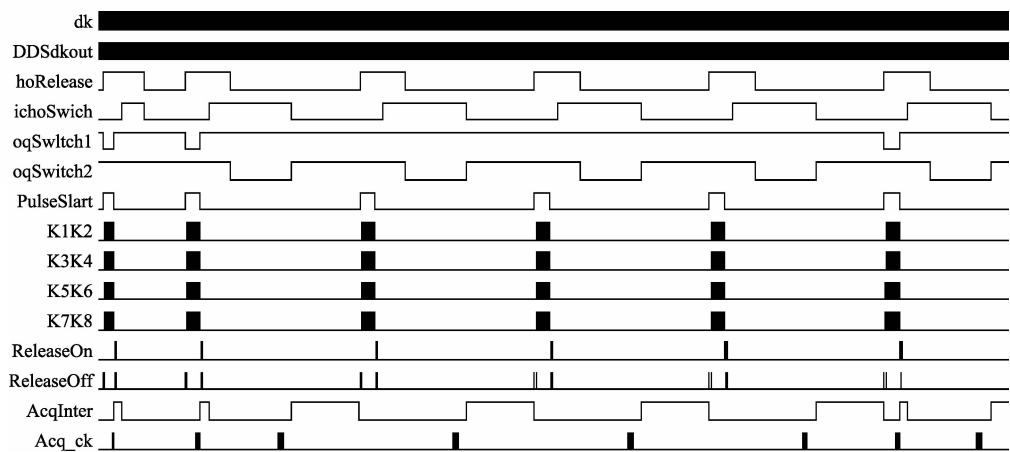


图4 CPMG序列仿真结果

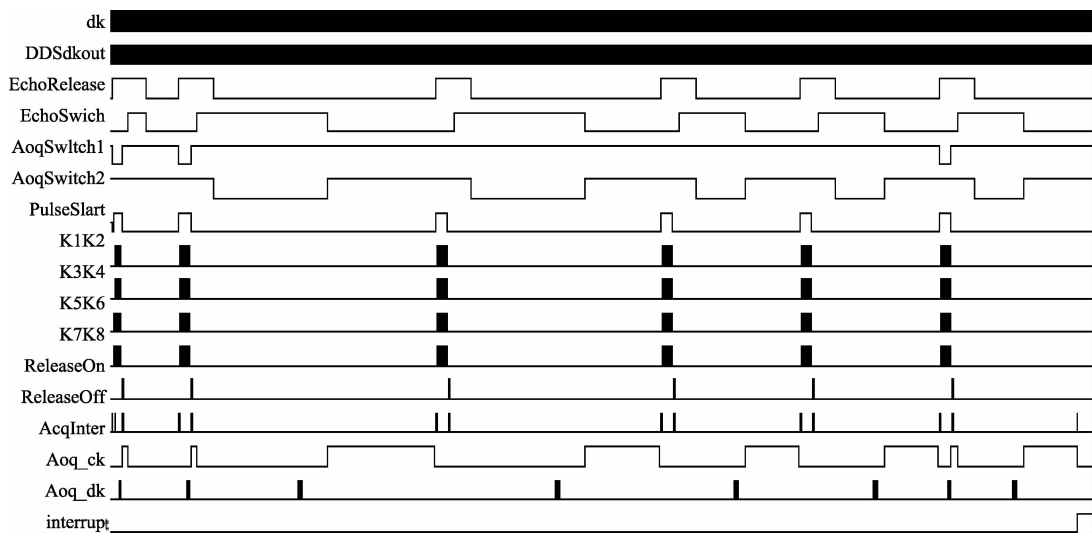


图5 DE序列仿真结果

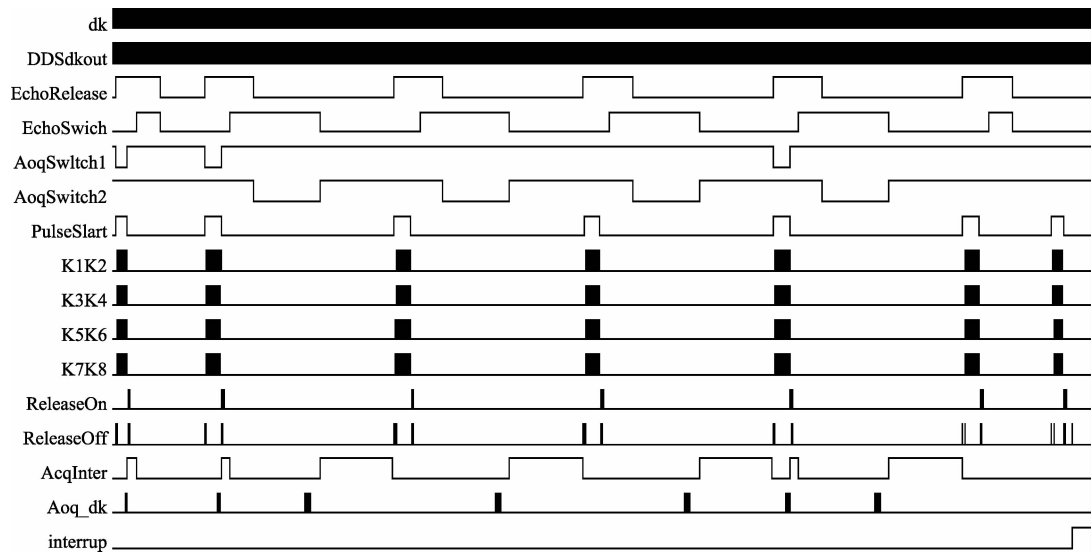


图6 反向 90°CPMG序列仿真结果

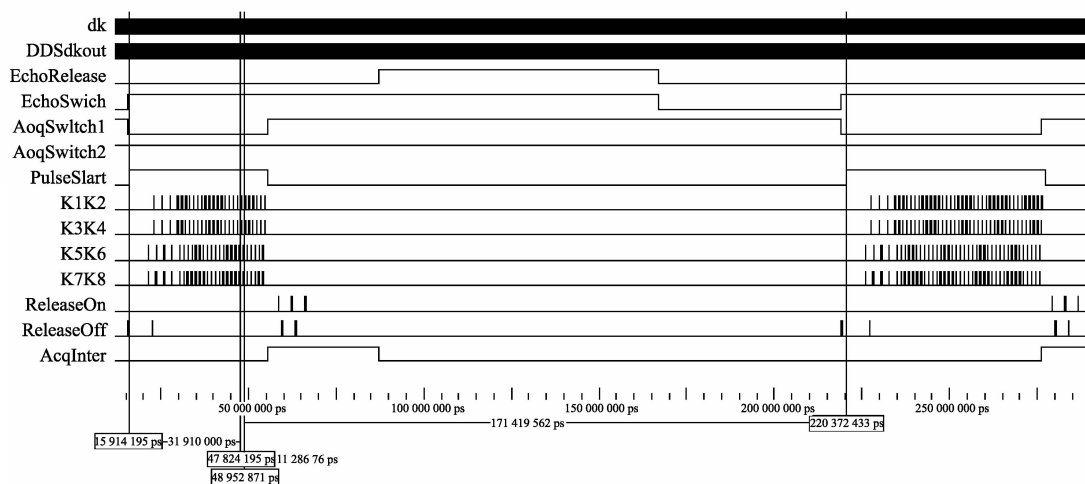


图7 序列仿真的局部视图

该脉冲序列发生器的硬件平台如图7所示,平台的FPGA采用Actel公司A3P1000芯片,微控制器采用德州仪器的TMS320F2812,DDS芯片采用AD公司的AD9851,外加电源、信号采集、驱动等外围电路组成。

用安捷伦示波器抓取的,利用该硬件平台生成的CPMG序列、DE序列和反向 90° CPMG序列,分别如图8~11所示,其中示波器表笔1~表笔4分别接EchoRelease、EchoSwitch、PulseStart、K1K2信号,NE=5,发射频率886 kHz。

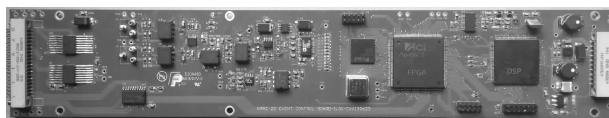


图8 硬件平台实物

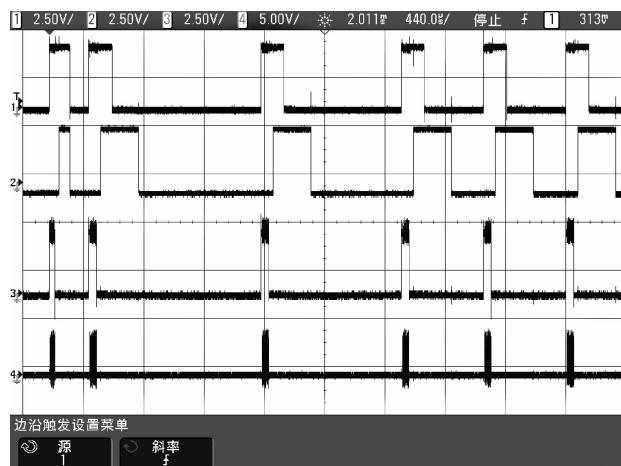


图10 DE序列

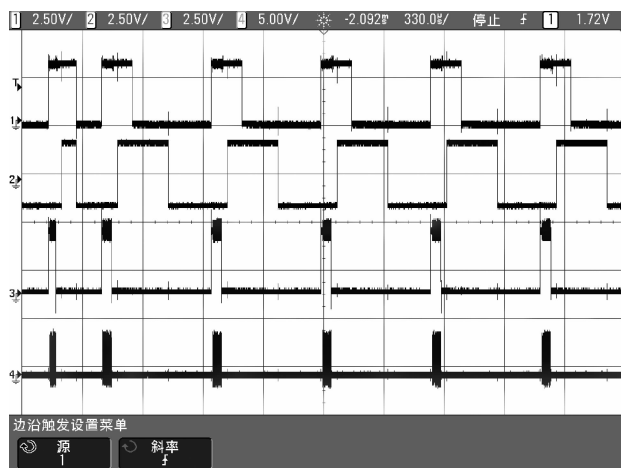
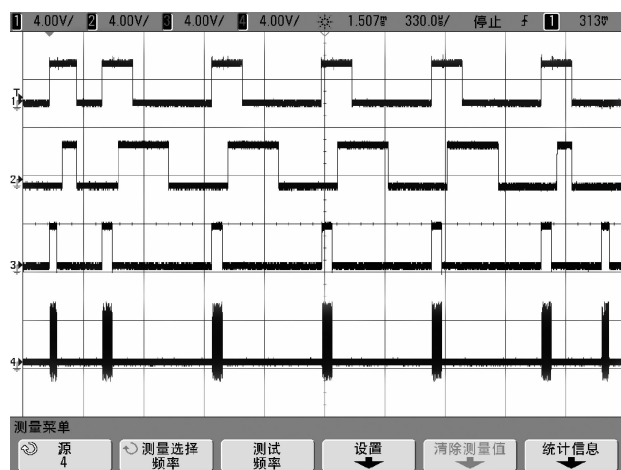


图9 CPMG序列

图11 反向 90° CPMG序列

6 结 论

讨论了一些基本的核磁共振脉冲序列和新进提出的新型序列的特征,设计了一种可通过较简单的配置即可完成多种序列发射的脉冲序列发生器,满足灵活性和通用性的设计要求,在实际应用中既能满足多种传统测井的作业需求,也可满足实验室对于新型序列的研究需求。由于FPGA逻辑可非常方便地移植,因此该序列发生器能够方便应用到新型核磁仪器上,作为设计参考或者直接应用,缩短开发周期。

参 考 文 献

- [1] 肖立志. 核磁共振成像测井与岩石核磁共振及其应用[M].北京:科学出版社,1998:11-17.
- [2] 毕林锐. 核磁共振测井技术的最新若干进展[J]. 工程地球物理学报,2007,4(4):370-374.
- [3] COATES G R, XIAO L Z, PRAMMER M G. NMR logging principles and applications [M]. Houston: Halliburton Energy Services,1999.
- [4] 张志. 核磁共振脉冲序列发生器研究进展[J]. 波谱学杂志,2012,29(3):340-345.
- [5] BELMONTEI S B, SARTHOUR R S, OLIVEIRA I S, et al. A field-programmable gate-array-based high-resolution pulse programmer[J]. Measurement Science & Technology, 2003,14(1):N1-N4.
- [6] HÜRLIMANN M D, VENKATARAMANAN L. Quantitative measurement of two dimensional distribution functions of diffusion and relaxation in grossly inhomogeneous fields[J]. Journal of Magnetic Resonance, 2002(157): 31-42.
- [7] MERBOLDT K, HANICKE W, FRAHM J. Self-Diffusion NMR imaging Using Stimulated echoes[J]. Journal of Magnetic Resonance, 1985 (64): 479-486.
- [8] CHE W H, ZHANG Y M, XIA P CH. An improved measuring pulse sequence for NMR logging[J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance,2000,17(3):177-182.
- [9] KEELER J. Understanding NMR spectroscopy[M]. London: University of Cambridge, 2002.
- [10] 彭宇,姜红兰,杨智明,等. 基于DSP和FPGA的通用数字信号处理系统设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(1):17-21.
- [11] 周辉来,郑振耀,倪祖荣,等. 基于FPGA的核磁共振谱仪发射脉冲波形的设计[J]. 电子测量技术,2013,36(5):91-96.
- [12] 张黎明. 高性能数字接收机FPGA设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(5):479-483.

作 者 简 介

马维超,1989年出生,硕士研究生。主要研究方向为核磁共振测井仪数字电路设计。
E-mail:hijack_er@126.com