

# 地层流体核磁测井仪扫频方法研究

胡力立 马双宝

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

**摘要:**井下地层流体核磁测井仪探头内部磁场强度会随环境温度变化而变化,从而导致核磁共振频率发生变化。确定工作环境下核磁共振频率,即发射天线的最佳高压脉冲发射频率,对获取信噪比较高的回波信号十分重要,也是流体核磁共振测井需要确定的参数之一。设计并实现了一种 DSP 和 FPGA 联合控制 DDS 芯片来完成频率快速准确切换的扫频电路来完成不同频率高压脉冲的发射及确定不同温度下核磁共振频率。实验表明,电路发射高压脉冲频率范围为 4~5 MHz,能确定不同环境温度下最佳高压脉冲频率,频率精度为 10 kHz。

**关键词:**流体核磁测井;核磁共振频率;扫频电路;DDS

**中图分类号:** TN741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Study on sweeping method of nuclear magnetic logging tool for formation fluid

Hu Lili Ma Shuangbao

(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The magnetic field intensity of the probe in the borehole fluid magnetic logging tool varies with the ambient temperature, resulting in a change in the nuclear magnetic resonance frequency. Determining the preferred high-voltage pulse frequency for the transmitting antenna in the operating environment is important for obtaining a high signal to noise ratio of the echo signal and is one of the identified parameters required for fluid NMR logging. Designing and achieving a DSP and FPGA jointly control the DDS chip of the sweep circuit which can complete the frequency of fast and accurate switching and determine the nuclear magnetic resonance frequencies at different temperatures. Experiments show: The circuit emits high-voltage pulse frequency in the range of 4 MHz to 5 MHz and can determine the best high-voltage pulse frequency at different ambient temperatures with frequency accuracy of 10 kHz.

**Keywords:** fluid nuclear magnetic logging; nuclear magnetic resonance frequency; sweep circuit; DDS

### 1 引言

在油气勘探过程中,识别地层流体的性质对成功开采油气藏是至关重要的。了解储层流体的性质最直接手段是测量井下流体相关参数,如横向弛豫时间、纵向弛豫时间、自由扩散系数、含氢指数等,这些参数与流体的粘度、汽油比等性质有着直接的关系。传统地层流体的分析方法是采集地层流体,存于密封容器送至实验室确定流体 PVT 性能。其存在产品数量受限、流体相位会发生变化等问题。井下地层流体核磁分析仪器,可实时评估流体的汽油比和粘度等参数,是一种对地层油气资源评价做出正确合理预测的重要方法<sup>[1]</sup>。井下地层环境恶劣,温度与地面差异大,流体探测仪内部磁场温度变化会导致氢核共振

频率变化。若不能准确地确定工作环境下的氢核共振频率,将导致核磁共振仪器接收到的回波信号很微弱甚至无回波信号。因此,设计出扫频电路来确定拉莫尔频率是十分必要的。本设计是通过编写程序和设计硬件电路控制发射天线发射出同幅值不同频率的高压脉冲序列<sup>[2]</sup>信号,对接收到的回波信号进行处理,比较幅值大小确定出当前环境下的拉莫尔频率。

### 2 扫频电路设计

#### 2.1 原理介绍

由核磁共振原理可知,当外加交变磁场的频率和拉莫尔频率(式(1)<sup>[3]</sup>)一致时,原子核(一般为氢核)才会产生共振。对于核磁测井而言就是要求发射天线发射的高压

脉冲频率和拉莫尔频率基本一致,接收天线才能接收到较好回波信号。

$$f = \frac{rB_0}{2\pi} \quad (1)$$

式中: $r$ 为旋磁比,对于氢核 $\frac{r}{2\pi} = 42.58 \text{ MHz/T}$ ;  $B_0$ 为当前静磁场的磁场强度; $f$ 为氢核进动频率也称为拉莫尔频率。由上式可知,当共振原子核确定后,拉莫尔频率的变化仅与当前环境温度有关。

随钻测井和一维测井等较为传统的核磁测井采用的静磁场都是梯度磁场<sup>[4]</sup>,故当发射天线发射一定频率范围的高压脉冲信号时,接收天线都能接收到较好的回波信号,其设计的扫频是判断不同温度下回波接收电路的放大模块在哪个频率点能获得最佳的放大倍数。流体核磁测井采用的磁场为恒定的静磁场,其磁场强度只会随温度变化而变化,且流体核磁测井探头温度会跟随井下温度变化,故确定当前温度下的拉莫尔频率十分关键。

## 2.2 方案设计

从式(1)中可得,流体核磁测井确定当前环境下的拉莫尔频率可以通过找出静磁场磁场强度与温度的关系,再确定当前温度,就能得到当前环境下的拉莫尔频率。在实际项目而言,磁场强度随温度的变化较为复杂,且磁体在探头内部,测量整个磁体的温度不好实现且磁体的各个部位的温度不一定是一致的,故采用此种方法可行性不太好。

参考磁感应法<sup>[5]</sup>寻找拉莫尔频率可知,当交变磁场的频率与拉莫尔频率越接近,接收线圈接收到的回波信号就会越大。此项目中采用的正是发射幅值相同频率不同的高压脉冲序列信号,接收并判断回波信号的幅值大小来确定最佳高压脉冲发射频率。

扫频电路是在流体测井电路的基础上添加频率合成电路形成的,其整体设计如图1所示。上位机下达扫频命令后,DSP和FPGA配合控制频率合成电路产生期望的时钟频率送入FPGA内部控制功放滤波电路产生期望频率的高压脉冲信号送到探头内部的发射天线,接收天线就会接收回波信号。在一定范围内改变发射天线的发射高压脉冲频率,接收处理这些回波,并对其幅值大小进行比较就可以得到当前环境下最佳的高压脉冲发射频率。

扫频电路的关键点是频率合成电路能实时产生任意频率(一定频率范围内)的时钟信号,时钟信号控制产生频率变化的高压脉冲信号。频率合成方法可分为直接式、间接式、直接数字式和混合式频率合成器<sup>[6]</sup>。直接数字式具有频率转换时间短、频率分辨率高和相位噪声低、稳定度高、控制方式灵活简单等特点,且考虑到需要的为数字电路中的时钟信号,故采用DDS技术来完成此项频率合成。

基于DDS的频率合成原理可以采用两种方式来完成:基于FPGA的查找表配合DAC电路来产生;直接采

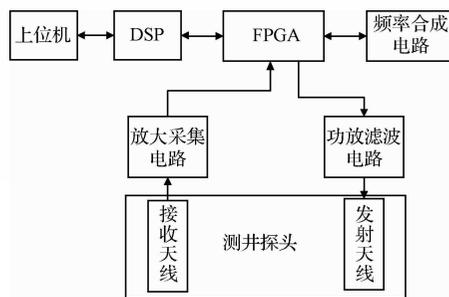


图1 扫频电路结构

用DDS芯片加外围的滤波电路来产生。考虑到采用基于FPGA的查找表形式占用了太多FPGA内部资源,同时本项目中的FPGA已经使用了较多的资源,故最终采用DSP控制FPGA输出频率控制字给DDS芯片,再经过滤波电路和比较电路产生所需频率的时钟信号。

## 2.3 关键电路设计

根据实际需求,电路中对时钟信号频率有严格要求的主要为两个地方:一个是高压脉冲控制信号的时钟频率范围在4~5 MHz范围内实时可控;另一个是回波采集控制信号频率在32~40 MHz范围内实时可控。根据采样定律,DDS最高输出时钟频率不能超过系统时钟频率的一半,一般是不超过40%<sup>[7]</sup>。结合目前FPGA中所用时钟频率,故DDS采用的系统时钟为100 MHz,输出最高频率为40 MHz,满足项目需要。

结合上面的设计,具体的频率合成电路如图2所示。



图2 频率合成电路

DSP计算出需要发给DDS的频率控制字,再传递给FPGA。FPGA在执行整个测量模式时,在需要发射高压脉冲控制信号和回波采集控制信号的前一时刻将频率控制字下发给DDS,考虑到DDS内部带有高速高精度的DAC,所以在DDS输出电路后面加一个低通滤波电路即可满足要求。

其实际电路如图3所示。



图3 扫频电路实物

DDS芯片选用的是AD公司的低功耗AD9851芯片,其分辨率能达到0.04 Hz。通过DSP和FPGA的联合控制,频率字和参考时钟可以准确的下发给AD9851芯片。

考虑到 AD9851 输出的是采样信号,由采用定理可知,输出波形中存在杂波。故在其输出加上截止频率为 70 MHz 的 7 阶低通椭圆滤波器,既滤除了高频杂波,又保证了输出信号的相位基本和输入一致。输出期望频率正弦信号经过 DDS 内部的比较电路就可以得到期望频率的方波信号。

### 2.4 软件程序设计

扫频电路的最终目的是确定当前温度下的拉莫尔频率,关键的软件设计有两个方面:一是控制 DDS 输出期望频率时钟信号的程序的编写;二是对接收的回波信号处理程序的编写。扫频电路程序运行的流程图如下:

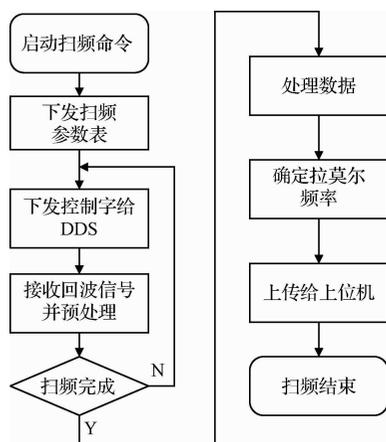


图 4 扫频电路程序流程

给 DDS 下发控制字的命令是由 DSP 和 FPGA 配合执行的。DSP 将需要下发的控制字计算好后传给 FPGA, FPGA 将 40 位控制字采用状态机的模式串行传输给 DDS。串行传输既节约了 FPGA 的资源,同时保证了传输时序的精确性和稳定性。DDS 产生的时钟信号需要送到 FPGA 内部作为其产生部分控制信号的参考时钟,考虑到 FPGA 内部本身存在由 PLL 产生的时钟用作部分控制信号的时钟,故存在跨时钟域带来的亚稳态、采样丢失、控制逻辑错误的风险。亚稳态不能从根本上消除,但可以通过采取一定的措施使其对电路造成的影响降低<sup>[8]</sup>。一般的实际设计中,要尽可能减少出现亚稳态的可能性,其次是尽可能减少出现亚稳态给系统带来危害的可能性,常采用的是异步时钟同步法中的双锁存器法和结绳法。在此项目中,采用的方法是借鉴双锁存器法让异步时钟不会出现在同一个程序模块中。当两个时钟需要交互时,在交互的位置加上一个缓冲器。经过实验验证,此种方法是可行的。

回波信号的处理是 DSP 控制 FPGA 完成的,一定频率下放大的回波信号经过 ADC 采集传给 FPGA 中完成累加经由 DSP 的 DPSD 算法处理以及计算回波的相位角<sup>[9]</sup>,可以得到当前频率下回波的衰减曲线。回波衰减曲线上的点是由一系列回波串上每个回波的幅值构成的,对

曲线上前 50 个点进行累加和平均,然后比较不同频率下的计算值,最大值所对应的发射频率即当前环境下的最佳拉莫尔频率。

## 3 实验验证

### 3.1 合成频率测试

将期望 DDS 输出时钟频率和示波器测量的 DDS 输出时钟频率进行比较,考虑到要求 DDS 输出频率范围为 32~40 MHz,在这个范围内均匀取点进行测试,结果如表 1 所示。

表 1 合成频率准确度测试

期望时钟频率/MHz	32.0	33.6	35.2	36.8	38.4	40.0
实际时钟频率/MHz	32.0	33.6	35.2	36.8	38.4	40.0

### 3.2 扫频电路测试

设计扫频电路的目的是要保证在实际电路系统中能够确定当前环境下的拉莫尔频率。本次采用硅油作为实验样品,仪器按照 CPMG<sup>[10]</sup>模式完成一次测井,在仅改变探头温度情况下,观察扫频电路是否能找出不同温度下的最佳高压脉冲频率,即拉莫尔频率。

表 2 CPMG 时序参数表

参数(Parameter)	值(Value)	参数(Parameter)	值(Value)
工作频率/kHz	4 320	回波个数 NE	1 500
90°脉宽/ $\mu$ s	22	等待时间 TW/ms	3 000
180°宽度/ $\mu$ s	44	直流高压 HV/V	120
回波间隔 TE/ $\mu$ s	600	PAPS 个数	10

具体实验结果如图 5 所示。

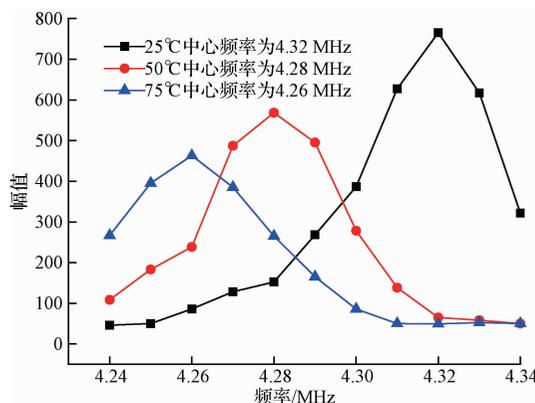


图 5 不同温度下扫频电路测得拉莫尔频率

从上图可以看出当探头工作在不同温度下,该电路都能准确找到核磁共振拉莫尔频率,即最佳的高压脉冲发射频率。

#### 4 结论

本文介绍了扫频电路的设计背景,论述了扫频电路的设计思路及设计方案,并通过对探头的温度实验证实了扫频电路能够较为准确的确定工作环境下的高压脉冲发射频率,满足流体测井仪的工作需求,为进一步实现地层流体测井仪研制提供良好基础。

#### 参考文献

- [1] 吴保松,肖立志. 井下核磁共振流体分析实验室及其应用[J]. 波谱学杂志, 2011, 28(2):228-236.
- [2] 陈向新,李仙枝,程晶晶. 核磁共振测井仪储能电路设计与应用研究[J]. 国外电子测量技术, 2015(8): 61-65.
- [3] 王应吉,林君,荣亮亮,等. 地面核磁共振找水仪放大器设计[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1627-1632.
- [4] 张嘉伟. 随钻核磁共振测井测量模式及脉冲序列设计与分析[J]. 硅谷, 2014, 24(9):69-70.
- [5] 孙德元,于德江,陈冲,等. 脉冲电磁场测量方法研究[J]. 电子技术与软件工程, 2015(14):121-123.
- [6] 陈科,叶建芳. 基于 DDS+PLL 技术频率合成器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(4): 43-47.
- [7] 杨远望. 高性能频率合成技术研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [8] 徐翼,郑建宏. 异步时钟域的亚稳态问题和同步时钟域[J]. 微计算机信息, 2008, 24(2):271-272.
- [9] 江玉龙. P 型核磁测井解释处理方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [10] ANDRADE F D D, NETTO A M, COLNAGO L A. Qualitative analysis by online, nuclear magnetic resonance using Carr-Purcell-Meiboom-Gill sequence with low refocusing flip angles[J]. Talanta, 2011, 84(1): 84-88.
- [11] ABDELFAATTAH R, NICOLAS J M, WOLDAI T, et al. Mixture model for the segmentation of the InSAR coherence map [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2010, 12(1):S138-S144.
- [12] ZHANG Y, SUN X, THIELE A, et al. Stochastic geometrical model and Monte Carlo optimization methods for building reconstruction from InSAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2015, 108:49-61.
- [13] 王刚,刘智,王番,等. 基于 KL 距离的 SAR 影像变化检测[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(1):59-63.
- [14] 李恒恒,郁文贤. 基于混合 Gamma 建模与 MRF 的 SAR 图像分割方法[J]. 信息技术, 2017(1):80-84.
- [15] 程江华,高贵,库锡树,等. 基于 MRF 的高分辨率 SAR 图像道路网自动提取[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(7):1377-1381.

#### 作者简介

胡力立, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为流体核磁测井仪器研制。

E-mail: hlldeyouxiang@126.com

马双宝(通讯作者) 1979 年出生, 副教授, 博士后, 主要研究方向为低场核磁共振应用技术。

E-mail: mashuangbao@126.com

#### 作者简介

张跃, 1990 年出生, 中国科学院电子学研究所信号与信息处理专业, 博士, 主要研究方向为合成孔径雷达图像处理与 SAR 图像应用。

E-mail: 908719967@qq.com

孙显, 1983 年出生, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机视觉与模式识别。

E-mail: sunxian@mail.ie.ac.cn

(上接第 39 页)