

核磁共振测井仪储能电路设计与应用研究^{*}

陈向新¹ 李仙枝² 程晶晶¹

(1. 华中科技大学自动化学院 武汉 430074; 2. 中海油田服务股份有限公司油田技术研究院 北京 101149)

摘要: 核磁共振测井仪通过发射高能量射频脉冲来实现氢核磁矩的翻转和重聚,并以此获取地层信息。受测井电缆瞬时功率传输能力限制,脉冲发射时直流高压大幅下降,使得翻转角和重聚角不满足要求,无法有效激发氢核。根据核磁共振测井仪射频脉冲特点,在其能量需求分析的基础上,利用负反馈原理设计一种储能电路,为射频脉冲提供足够功率及稳定的高压输出。在现场应用中,Phi_A及RATIO_B的实时曲线表明该电路能够为射频脉冲发射提供可靠保障。

关键词: 核磁共振测井仪;脉冲序列;储能电路;翻转角

中图分类号: TP23 TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and application of energy supply circuit for NMR logging tools

Chen Xiangxin¹ Li Xianzhi² Cheng Jingjing¹

(1. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China; 2. Well-Tech R&D Institutes, China Oilfield Service Limited, Beijing 101149, China)

Abstract: NMR well logging tools achieve the tipping and refocusing of magnetic moment of hydrogen nucleus through high-energy RF pulse and acquire formation information. Limited to the logging cable instantaneous power transfer capability, DC high voltage is sharply dropped while emitting pulse. So tip angle and flip angle aren't satisfactory, which makes it impossible to effectively excite hydrogen nucleus. According to the characteristics of RF pulse of NMR well logging tools, this thesis designs a kind of energy storage circuit to provide enough power and stable high-voltage output for RF pulse, based on the analysis of energy demand and the principle of negative feedback. In the field application, the real-time curve of Phi_A and RATIO_B show that the circuit successfully ensures the RF pulse emission.

Keywords: NMR well logging tools; pulse sequence; energy storage circuit; tip angle

1 引言

随着能源需求的不断增长,石油勘探技术面临新的挑战。核磁共振测井作为最新的测井方法,在地层物性测量方面比常规测井更具优势。从1946年发现核磁共振现象到现在,国外核磁共振测井技术不断发展,核磁共振测井仪种类繁多^[1]。其中,Halliburton公司的MRIL-Prime核磁共振测井仪、Schlumberger公司的CMR-Plus及MR Scanner核磁共振测井仪已在全球范围内推广使用^[2-3]。但是只能获得核磁共振测井服务,却无法自主使用核磁共振测井仪,这使得我国一些地区(比如南海)石油开采成为难题。在2012年,我国中海油

田服务股份有限公司(China Oilfield Services Limited, COSL)成功研制出国内首支多频核磁共振测井仪EM-RT(elis magnetic resonance tool)。到目前为止,该仪器已在渤海、南海、山西和伊拉克等油田得到推广使用,并取得了较好的应用效果^[4]。

为有效激发地层流体,核磁共振测井仪在工作过程中连续向地层发射满足一定功率条件的高压脉冲序列,其宽度从33~90 μs 不等,脉冲时间间隔最短可达0.2 ms。受限于地面系统瞬时功率输出能力和电缆电能传输能力,为了保证自旋回波质量,每个脉冲发射功率不能低于某一数值,因此核磁共振测井仪必须配备储能短节。储能短节所处的位置如图1所示。

收稿日期:2015-03

^{*} 基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20130142120065)项目

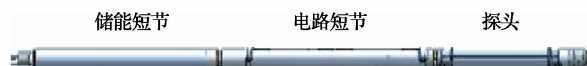


图1 核磁共振测井仪井下部分基本结构

储能短节的核心是储能电路对储能电容的充放电控制。该文以 EMRT 为例,根据脉冲序列扳转角对能量的要求,说明储能短节是核磁共振测井仪的必要组成部分,同时设计一种储能电路,提出储能电容容值计算方法。从现场测井曲线可看出,该设计方案能满足仪器正常工作要求。

2 储能电路对扳转角的影响

核磁共振测井作业期间,仪器通过向底层发射 90° 或 180° 脉冲产生交变磁场 B_1 ,达到氢核总磁矩反转和重聚目的,扳转角 θ 由式(1)确定^[5]:

$$\theta = \gamma B_1 \tau \quad (1)$$

式中: γ 为氢核旋磁比, B_1 为交变磁场强度, τ 为磁场作用时间。对于 90° 扳转脉冲, $\theta = 90^\circ$ 为完全扳转, $\theta > 90^\circ$ 为过扳转, $\theta < 90^\circ$ 为欠扳转。同理,对于 180° 脉冲,有同样的定义。为准确获取地层信息,在误差允许范围内,要求扳转角必须达到 90° 或 180° ,这是保证回波质量的必要条件^[11]。从式(1)中可看出, θ 与磁场强度 B_1 、磁场作用时间 τ 均成正比关系,其中 B_1 与储能电路有直接关系。

通常,电流产生的感应磁场强度与电流大小成正比。针对 EMRT,当工作频率确定时,其天线负载等效阻抗是一定值,因此, B_1 与脉冲电压幅值成正比关系。因此有关系式 $B_1 \propto I \propto U$,故磁场强度 B_1 的大小与天线端电压成正比关系。

如引言所述,测井电缆的阻抗对 EMRT 测井仪脉冲发射有至关重要的影响。如图2所示,一个发射脉冲由发射初期和发射稳定期组成。在脉冲发射初期,天线电压需要在很短时间从0上升到直流高压值,若不采用储能电路,电缆等效电阻与天线电容会构成具有较大时间常数的阻容网络,导致脉冲在发射初期就无法快速达到直流高压值;同样,脉冲稳定发射期间可产生数安培的瞬时电流,该电流通过电缆阻抗形成较大压降。该压降直接导致天线两端电压幅度降低,发射功率不足。另外,电缆等效电感在高压通断变化过程中产生数倍过电压,损坏发射电路。在现场应用中,磁场作用时间 τ 预先确定,根据式(1)知,在特定工作频率下,扳转角 θ 完全由磁场强度 B_1 决定,在没有储能的情况下,欠扳转情况严重。

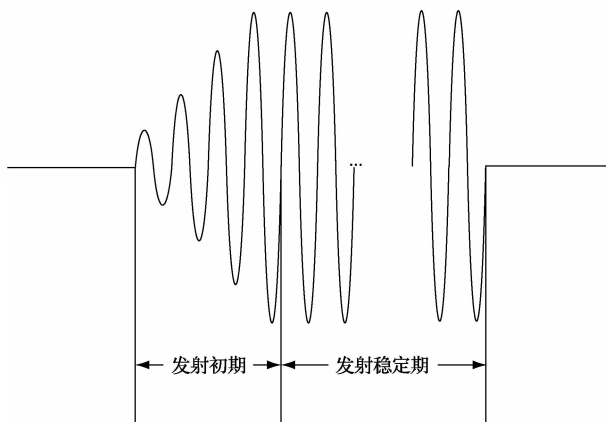


图2 发射脉冲组成

3 储能电路设计

图3是储能电路原理结构, U_{HV} 为储能电路输入端, $HV+$ 、 $HV-$ 通过测井电缆连接地面600V直流高压电源。 U_{CAP} 为储能电路输出端,输出电压范围为600V $\pm 5\%$ 。

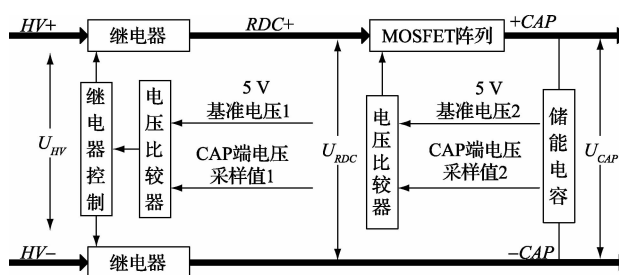


图3 储能电路原理结构

图4为储能电路板实物图;其对应的原理图如图5所示。

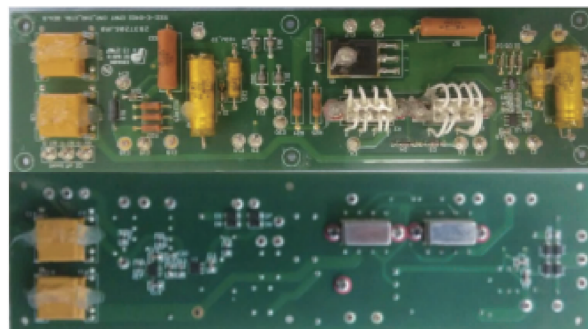


图4 储能电路板

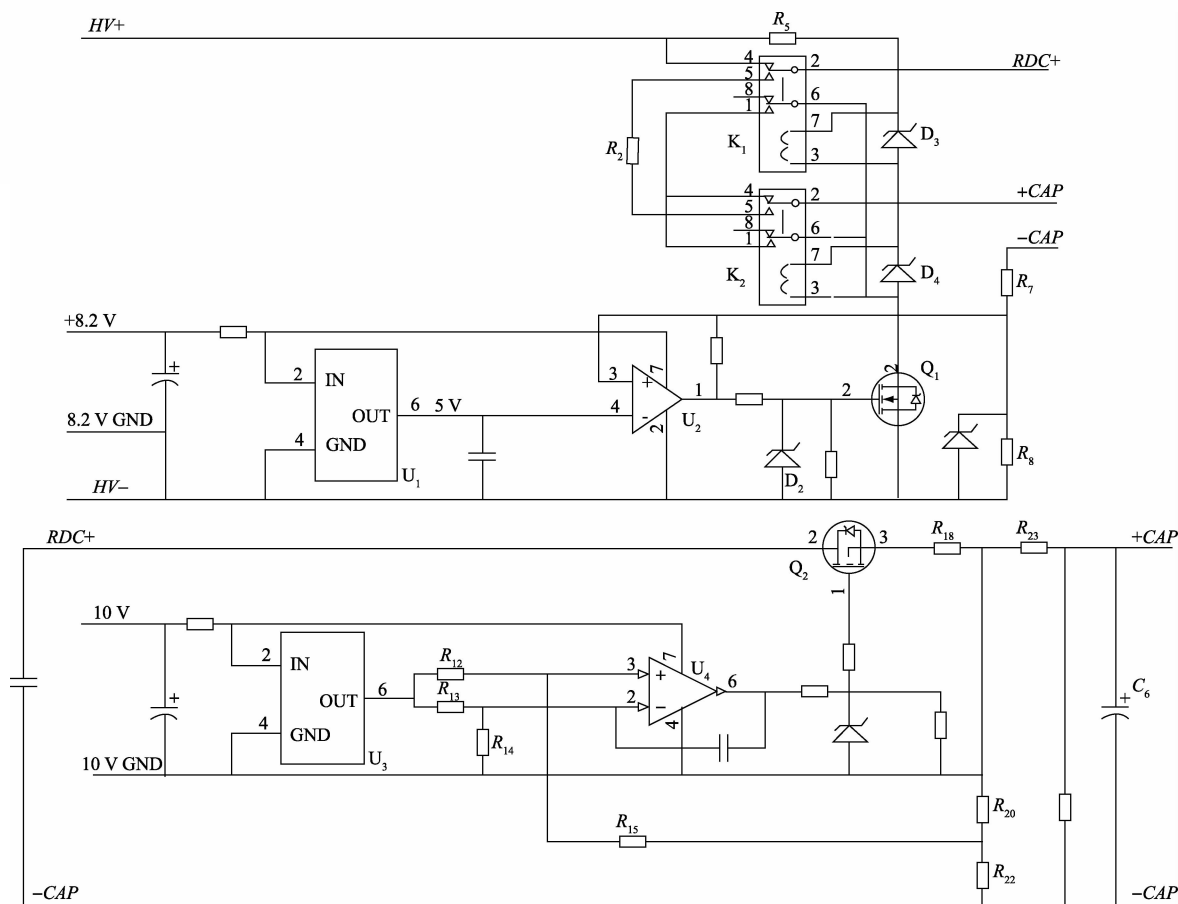


图5 储能电路原理

图5中, K_1 、 K_2 为继电器, U_1 、 U_3 为5 V稳压芯片, D_3 、 D_4 为稳压管, Q_1 为功率场效应管, Q_2 代表功率场效应管阵列, C_6 为等效储能电容, U_2 、 U_4 为电压比较器。 U_4 及其外围器件构成充电控制电路,其反相和同相输入电压计算方法分别如式(2)和式(3)所示。当 U_{CAP} 为600 V时, U_{4+} 和 U_{4-} 相等。

$$U_{4-} = 5 \frac{R_{14}}{R_{13} + R_{14}} \quad (2)$$

$$U_{4+} = 5 \frac{R_{15} + R_{20} // R_{22}}{R_{12} + R_{15} + R_{20} // R_{22}} - U_{CAP} \frac{R_{20} // (R_{12} + R_{15})}{R_{20} // (R_{12} + R_{15}) + R_{22} + R_{23}} \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{15}} \quad (3)$$

U_2 及其外围器件构成输出过电压保护电路,其反相输入端为5 V,同相输入端电压计算方法如式(4)所示。当 U_{CAP} 达到某一上限时, $U_{2+} = 5$ V。

$$U_{2+} = U_{CAP} \frac{R_8}{R_8 + R_7} \quad (4)$$

电路工作方式分为以下3种情况:

情况1: $U_{CAP} \leq U_{RDC} = U_{HV}$

此时, U_{2+} 电压小于5 V, Q_1 关断,继电器 K_1 、 K_2 闭合,功率场效应管 Q_2 的漏极与 $HV+$ 直接相连。电压比较器 U_4 同相端电压高于反相端电压,输出高电平,使 Q_2 导通,储能电容 C_6 处于充电状态, U_{CAP} 逐渐升高至600 V。

情况2: U_{CAP} 高于 U_{RDC} 且低于输出电压上限

此时,此时, U_{2+} 电压小于5 V, Q_1 关断,继电器 K_1 、 K_2 闭合, Q_2 的漏极与 $HV+$ 直接相连。电压比较器 U_4 同相端电压低于反相端电压,输出低电平,使 Q_2 关断。储能电容 C_6 通过与其并联的电阻网络缓慢放电, U_{CAP} 逐渐降低,直到 U_{CAP} 低于 U_{RDC} 。

情况3: U_{CAP} 高于输出电压上限

此时, U_4 输出低电平, Q_2 关断,但 Q_2 漏极和源极间的寄生二极管允许充电电流为负值。 U_{2+} 电压大于5 V, U_2 输出高电平, Q_1 导通,稳压管 D_3 、 D_4 端电压作用在继电器 K_1 、 K_2 线圈上,维持其断开状态,使 Q_1 漏极与 $HV-$ 直接相连,同时形成两条回路。回路1:地面高压 HV 经过 R_5 、 D_3 、 D_4 、 K_1 和 K_2 到达 $HV-$,为直流高压形成预充电通路,避免 K_1 、 K_2 闭合时引起电压振荡。由于电阻 R_5 承受600 V高压,因此 R_5 应选用大功率电阻。回路2:从 $+CAP$ 开始,经过 R_{18} 、 R_{23} 、 Q_2 、 R_2 、 $-CAP$ 形成储能电容快速放电回路,其时间常数主要由 R_2 和 C_6 决定。

4 储能电容容值计算

为准确估算储能短节储能电容总容值,脉冲序列发射期间,假设该过程储能电容电荷量的变化量为 ΔQ ,此过程

电荷量的变化将导致电容两端电压变化量为 ΔU , 两者关系用式(5):

$$\Delta Q = \Delta U C_E \quad (5)$$

式中: C_E 是储能短节等效电容。

脉冲序列发射前后, 储能电容最大允许电压差值 ΔU 约为 150 V, 因此若能估算一次脉冲序列发射过程储能电容提供的电荷量, 就能估算出 C_E 的大小。仪器发射一次脉冲序列时, 一方面从储能电容获得能量; 另一方面从地面高压电源获得能量, 由于发射的电荷量大于从地面获得的电荷量, 使得储能电容电压在发射前后存在电压差值, 与其对应的电荷量, 即储能电容损失的电荷量为:

$$\Delta Q = Q_t - Q_c \quad (6)$$

式中: Q_t 为一个脉冲序列发射消耗的电荷量; Q_c 为在此期间从直流高压获得的电荷量。

根据式(5)和(6)可以得出:

$$C_E = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{Q_t - Q_c}{\Delta U} \quad (7)$$

根据实际脉冲序列参数, 上式又可以写为:

$$C_E = \frac{\Delta Q}{\Delta U} = \frac{I_{\max} t_{180} NE - I_p \cdot TE \cdot NE}{\Delta U} \quad (8)$$

式中: $I_{\max}$ 为发射 180° 脉冲时天线上最大电流值; t_{180} 为 180° 脉冲作用时间; NE 为 180° 脉冲个数; I_p 为发射过程中地面电源的平均电流; TE 为回波间隔。通过式(8)即可估算储能电容容值大小。

5 实验室测试结果

图 6(a) 为使用储能电路时天线端电压波形; 图(b) 为未用储能电路时天线端电压波形。当天线端电压自由振荡到波峰或波谷时, 直流高压通过驱动电路施加在天线两端, 图(a)中可以看出, 带有储能电路时, 波峰波谷平滑, 波形很好, 峰-峰值接近直流高压, 满足发射要求; 图(b)中波峰波谷畸变, 且低于直流高压, 不满足发射要求。

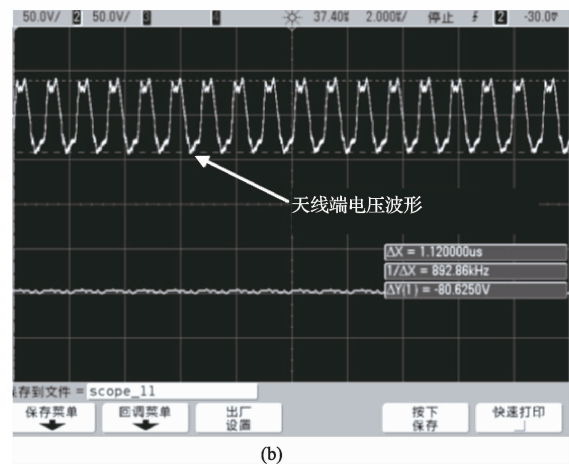
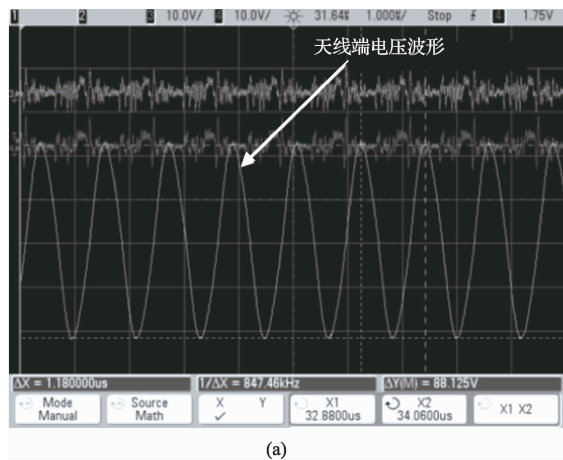


图 6 储能电路效果对比

6 现场应用效果

在 NMR 测井质量控制参数^[12]中, 用 $A\phi$ 表征 90° 脉冲发射质量, 用参数 BRatio 表征脉冲序列发射质量。后者定义为脉冲序列最后一个 180° 脉冲磁场能量与第一个 180° 脉冲磁场能量的比值。一般要求 BRatio 大于 0.95, 最低为 0.9。

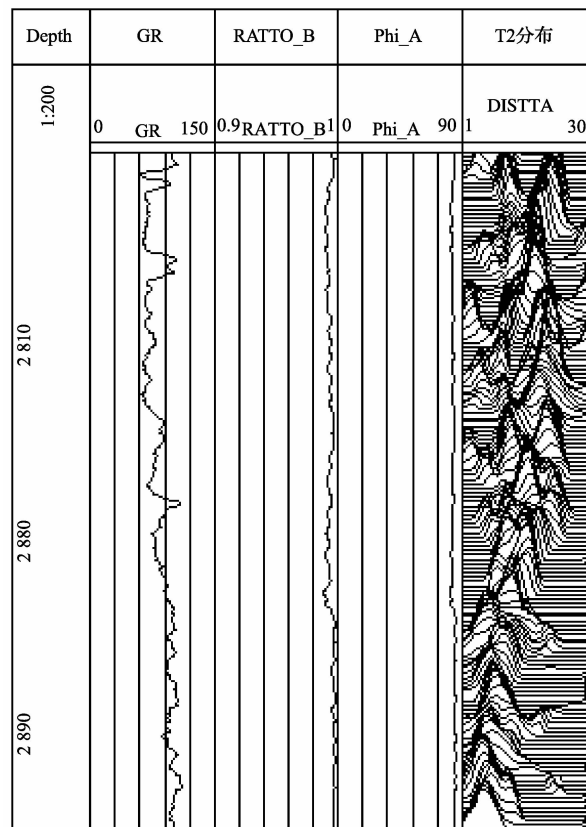


图 7 某井质量控制参数与解释成果

图7为EMRT在某井某段的测井曲线。图中,第1道为深度,第2道为GR曲线,第3道为 B_{Ratio} 曲线,第4道为 90° 脉冲扳转角 θ 曲线,第5道为T2谱分布。可以看出,在该井段, B_{Ratio} 基本保持在0.95以上,偏差控制在10%以内; 90° 脉冲扳转角在 $81^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,偏差控制在10%以内,说明该储能电路可以保证高质量脉冲序列发射。

7 结 论

根据脉冲扳转角、射频场及发射电压幅值间的关系,说明储能电路是核磁共振测井仪必不可少的组成部分,并设计一种可应用于井下高温环境的储能电路,提供储能电容容值计算方法。从EMRT的现场测井质量控制曲线可以看出,该电路有效实现高质量脉冲序列发射。

参 考 文 献

- [1] 于会媛,宋公仆,蔡池渊,等.核磁共振测井仪器现状及展望[J].国外测井技术,2012(2):14-17.
- [2] 原福堂.P型核磁测井研究及在辽河油田的应用[D].吉林:吉林大学,2007:54-58.
- [3] 张海全,刘正峰,韩红珍,等.核磁共振成像(MREX)测井仪及其应用[J].石油仪器,2007,21(1):54-58.
- [4] 李仙枝,宋公仆,张向林,等.EMRT核磁共振测井仪及其应用[J].石油仪器,2014,28(3):42-44.
- [5] COATES G R, XIAO L ZH, PRAMMER M G. NMR Logging Principles & Applications [M]. Houston: Halliburton Energy Services, 1999:38.
- [6] TIAN G Y, ZHOU X Y, ADEWALE I D. Pulsed electromagnetic non-destructive evaluation and applications[J]. Instrumentation, 2014,1(1):15-28.
- [7] 易晓峰,林君,段清明.基于双匝线圈的轻便式核磁共振找水仪研制[J].仪器仪表学报,2013,34(1):1-10.
- [8] 阳松波,李仙芝,程晶晶.核磁共振测井仪接收机设计与实现[J].国外电子测量技术,2014,33(4):54-57.
- [9] 吴红斌,顾细,赵波,等.蓄电池充放电管理的全过程仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(8):843-849.
- [10] 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.
- [11] 李新,肖立志,刘化冰,等.优化重聚脉冲提高梯度场核磁共振信号强度[J].物理学报,2013,62(14):461-467.
- [12] 余峰,宋公仆,李仙枝,等.EMRT测井质量控制及应用分析[J].地球物理学进展,2014,29(1):248-253.

作 者 简 介

陈向新,1987年出生,硕士研究生。主要研究方向为核磁共振测井仪器研制。

E-mail:chenxiangxin0719@163.com

李仙枝,1980年出生,硕士研究生,工程师。主要研究方向为测井数据处理解释方法。

E-mail:lixzh@cosl.com.cn

程晶晶,1977年出生,博士,讲师。主要研究方向为低场核磁共振测量技术。

E-mail:chengjj@hust.edu.cn