

核磁共振宽配谐整周期发射技术研究

林婷婷^{1,2}, 李苏杭^{1,2}, 张洋^{1,2}

(1.地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春 130061; 2.吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 核磁共振技术现广泛应用于地下水资源勘探中。在进行地下水探测时, 传统探测方法常采用配谐电容与发射线圈串联的方式, 在欠阻尼状态进行发射, 这种方式关断时间长, 导致在仪器的死区阶段有效核磁信号损失严重, 影响探测效果。本文提出一种针对浅层探测的宽配谐整周期发射方法, 在发射时采用不配谐的线圈代替传统发射的配谐线圈, 发射整数周期代替传统发射固定时长的方式进行类三角波激发。仿真结果表明, 在发射电流为 10 A 的情况下, 关断到 1 A 时, 传统方式需要 7 ms, 而宽配谐整周期关断时间为零。实测结果表明, 宽配谐整周期发射关断时无可观测到的振荡现象, 验证了该发射方式能够有效缩短发射结束后的关断时间。

关键词: 核磁共振技术;宽配谐整周期发射;死区时间

Research on Magnetic Resonance Sounding wide tuning integer period transmission

Lin Tingting^{1,2}, Li Suhang^{1,2}, Zhang Yang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geophysical Exploration Equipment of Ministry of Education, Changchun of Jilin Prov. 130061, China; 2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun of Jilin Prov. 130061, China)

Abstract: Magnetic Resonance Sounding technology is widely used in groundwater resources exploration. When conducting groundwater detection, the traditional detection often uses a matching capacitor in series with the transmitter coil, and launch in an under-damped state. This method has a long shutdown time, it causes a loss of the effective nuclear magnetic signal in the dead time of the instrument, which seriously affects the detection effect. This paper proposed a wide tuning transmission for shallow detection, A non-coordinated coil is used to replace the traditional transmit coil, and an integer period is used instead of the traditional fix-time transmission to transmit triangle wave-like excitation. The simulation results show that when the

transmit current is 10A, the traditional method takes 7ms when the power is turned off to 1A, however the wide tuning integer period transmitter is zero. The experiment results show that there is no observable oscillation when the wide tuning integer period transmitter is turned off, and it is verified that the wide tuning integer period transmission can effectively shorten the turn-off time.

Key words: Magnetic Resonance Sounding; wide tuning integer period transmission; dead time

核磁共振探测技术(Magnetic Resonance Sounding, MRS)是一种基于核磁共振原理的非侵入式地下水直接探测技术,被广泛应用在地下水探测中。核磁共振系统进行地下水探测时,首先由发射机通过发射线圈发射一定时长的激发脉冲,将地下水中的氢质子激发,然后撤去该脉冲,接收机通过接收线圈接收感应到的自由感应衰减(Free Induction Decay, FID)信号,从而反演得出水文地质情况^[1,2,3]。核磁共振有效信号为 nV 级,因此接收系统满足弱信号采集系统的特点^[4,5]。由于线圈呈感性,发射时会存储大量能量,发射结束后直接开始接收不仅无法采集到有效核磁信号,更会烧毁接收机^[6,7]。因此,在激发脉冲结束后到信号开始接收前,需要一段时间用于线圈能量的释放,该时间称为能释时间,也叫仪器的死区时间。然而在激发信号撤去后,地下水中氢质子立刻开始释放 FID 信号,且该信号为指数衰减的形式,因此,在死区时间内,大量高幅值的有效核磁信号损失,使得接收到的信号信噪比降低^[8]。尤其在浅层探测应用中,信号本身幅度较低,经死区时间衰减后几乎完全淹没在噪声中,为后续数据处理及反演带来极大困难,严重影响探测效果。

1 MRS 地下水探测技术原理及发射关断时间分析

MRS 地下水探测发射回路原理如图 1 所示,主回路是基于开关逆变技术,产生核磁共振激发所需要的电流,其核心单元是由发射线圈和配谐电容组成的串联谐振回路,其中发射线圈可以等效为电感 L 和电阻 R 的串联。由四个 IGBT 构成的 H 桥路将单极性电源电压逆变为交流方波,加于串联谐振回路两端,通过发射线圈形成激发电流。

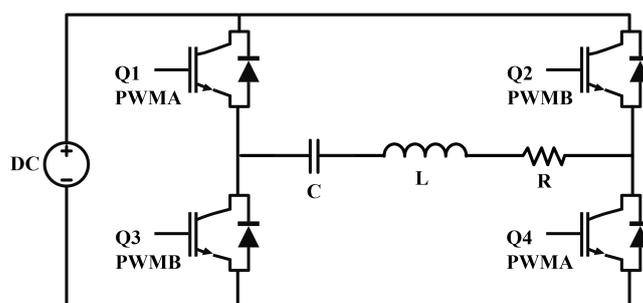


图 1 核磁共振发射主回路原理图

发射阶段该电路相当于二阶 RLC 串联回路在双极性脉冲作用下的响应。配谐电容的选择应当根据谐振频率(即拉莫尔频率 f_0)来选取, 应满足:

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (1)$$

对于 100 m*100 m 的线圈, 等效电阻为 1 Ω , 等效电感为 0.8 mH, 拉莫尔频率范围为 1278~2556 Hz, 于是有:

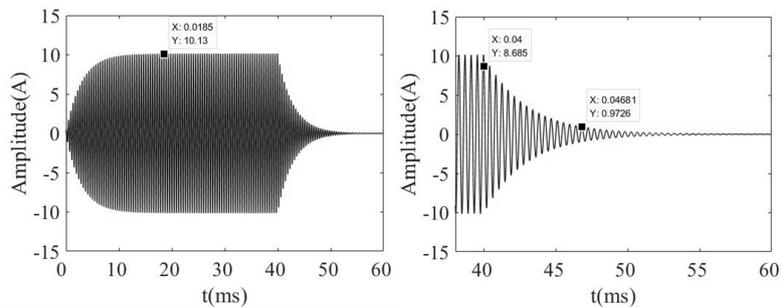
$$2\sqrt{\frac{L}{C}} = 4\pi f_0 L > R \quad (2)$$

因此, 发射回路处于欠阻尼状态。当发射结束撤去激发脉冲到配谐电容电压下降至与 DC 电压相等前, 可等效为一个二阶 RLC 串联回路欠阻尼状态下的零输入响应, 为震荡衰减的形式, 回路中的电流满足:

$$i(t) = A_m e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \quad (3)$$

其中, 振荡频率 ω 由线圈的等效参数 L 和 R 以及发射频率 f_0 决定, 参数 δ 决定了信号衰减的速度, 与等效电感成反比, 参数 β 决定了信号的相位, 二者均由线圈的等效参数确定。振幅 A_m 与关断时回路中的电流 I_0 和关断时配谐电容电压 U_0 成正比, 由发射电压和关断时刻确定, 一般发射关断时刻为确定值(40 ms), 因此, 发射电流越大, 振幅 A_m 越大。即, 随着线圈等效电感 L 和发射电流的增大, 关断后能释衰减速度变慢, 电流的震荡幅度变大, 需要的关断时间更长, 进而导致的信号损失更加严重。

在频率为 2330 Hz, 持续时间 40 ms 的双极性脉冲作用下, 发射电流幅值约为 10 A, 仿真结果如图 2(a)所示。随着激发电流以及线圈电感量的增加, 需要的时间更长。在关断后的能释阶段, 回路中的电流为幅度按照指数形式衰减的正弦信号, 关断到 1 A 以下需要约 7 ms, 如图 2(b)所示。



(a) 传统配谐发射整体波形

(b) 传统配谐发射关断波形

图 2 传统配谐核磁共振发射电流波形

2 宽配谐整周期发射技术

针对上述传统配谐发射关断后振荡衰减时间长的问题,本文提出一种宽配谐整周期发射技术。与传统发射方式相比,在进行激发时,发射线圈不配谐,直接作为负载接入回路,从而解决传统配谐振荡关断的问题。此外,在激发脉冲长度上,采用发射整数周期代替传统发射固定时长的方式,在电感电流为零时进行关断,从而进一步缩短能释时间。

2.1 宽配谐整周期发射方法

发射阶段的工作时序示意图如图3所示。图3(a)示出了PWM控制器产生PWM信号的工作机理,三角波最大值为 U_P ,比较值为 U_M ,二者进行比较从而产生PWM信号,图3(b)和图3(c)为两路PWM控制信号,用于驱动两组构成桥路的IGBT,因此产生的PWM波形占空比 $d = (U_M/U_P)/2$ 。图3(d)为发射阶段发射线圈两端的电压 V_{AC} 的波形,幅度为激发电压 U_S 。

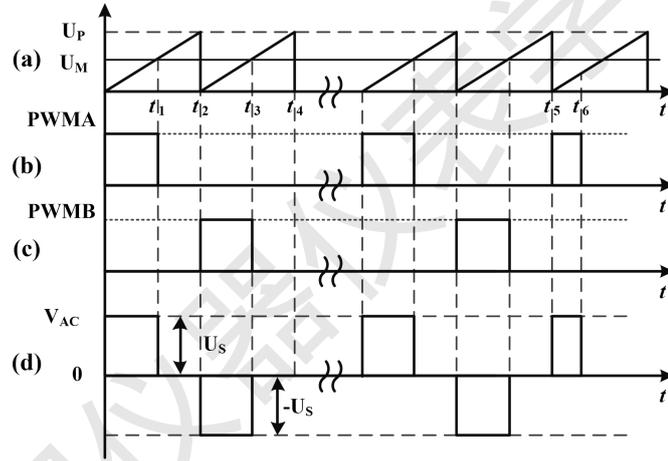


图3 宽配谐发射工作时序

(1)在 $t = 0$ 至 $t = t_1$ 期间, PWMA信号有效, PWMB信号无效, Q1、Q4导通,回路可等效为一阶RL回路在幅度为 U_S 的DC源激励下的零状态响应。回路中的电流满足:

$$i(t) = \frac{U_S}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (4)$$

激发频率为 f_0 时,可求得激发电流:

$$I_m = \frac{U_S}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L} \frac{d}{f_0}} \right) \quad (5)$$

(2)在 $t = t_1$ 至 $t = t_2$ 期间, PWMA、PWMB信号均无效,进入正向能释阶段,发射线圈与IGBT器件Q2和Q3的续流二极管D2、D3以及DC电源构成能释回路。由于电阻对电压的影响微弱,忽略不计,电源电压为固定值 U_S ,因此在这一阶段,电感以恒压钳位的方

式放电，电流 i 以固定斜率随时间线性变化，满足：

$$\begin{cases} \Delta i = \frac{U_s}{L} \Delta t \\ \Delta i = I_m - 0 \\ \Delta t = t_2 - t_1 \end{cases} \quad (6)$$

(3)在 $t = t_2$ 至 $t = t_3$ 期间，PWMB信号有效，PWMA信号无效，Q2、Q3导通，回路中的响应与PWMA信号有效阶段类似，也为一阶RL回路的零状态响应，应注意，此时电流方向与(1)阶段相反。

(4)在 $t = t_3$ 至 $t = t_4$ 期间，PWMA、PWMB信号均无效，进入反向能释阶段，与正向能释阶段类似，发射线圈与续流二极管D1、D4以及DC电源构成能释回路。

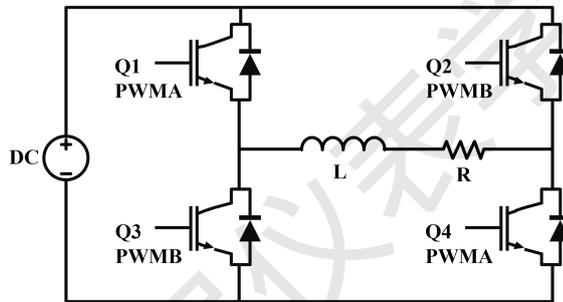


图4 宽配谐发射主回路工作原理图

发射阶段按照上述过程重复工作，在传统的MRS探测中，采用发射固定时长激发脉冲的方式，发射一定时长后采用硬开关关断，然而这种方式在关断时，电感中仍有能量存在。如图3所示，在 $t = t_5$ 至 $t = t_6$ 阶段存在一个较短的激发脉冲，在这个脉冲的作用下，电感存储能量，在 $t = t_6$ 时进行关断，电感需一段时间将这部分能量释放。针对这个问题，本文提出一种整周期发射方式，发射固定周期个数代替发射固定时长的激发脉冲，在电感电流为零时进行关断，进一步缩短能释时间。

2.2 仿真结果

为验证宽配谐发射关断无振荡现象以及整周期能够避免电感能释，在激发频率 $f_0 = 2330$ Hz，占空比为25%的条件下对发射电流进行仿真。当发射固定时长情况时，如果发射持续时间为40 ms，则发射周期个数为93.2。如图5(a)所示，有效激发电流为10.59 A。在40 ms时进行关断，关断时期的波形如图5(b)所示，可以看出，在关断时，回路中存在8.482 A的电流，在关断后，需要一段时间使得电流从8.482 A下降至零。因此，在非整数周期进行关断，电感的能释会影响实际关断时间。此外，因有较大电流存在，关断瞬间易引起较

大冲击，易损伤开关器件。

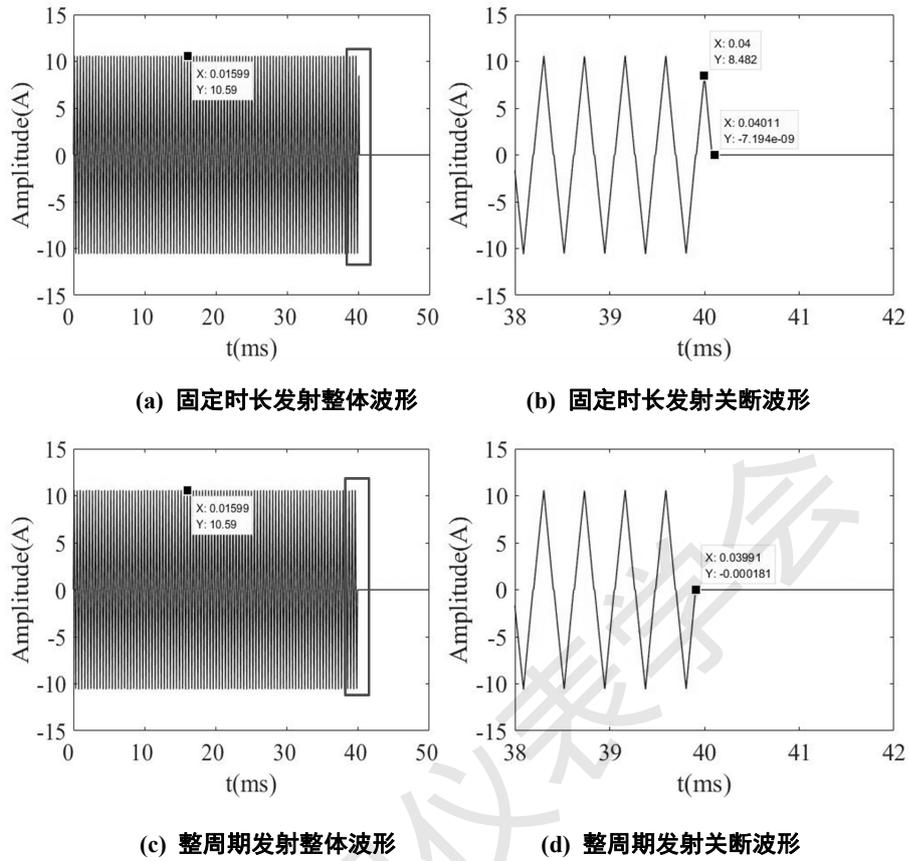


图5 宽配谐核磁共振发射仿真波形

将发射40 ms的脉冲替换为发射93个周期的脉冲，进行宽配谐整周期发射仿真，则实际发射时间约为39.91 ms。如图3(a)所示，当 $t = t_5$ 时，第93个周期的反向能释阶段结束，此时撤去激发脉冲，结束发射。如图5(c)和图5(d)所示，发射电流为10.59 A的类三角波，关断波形可以看出，在39.91 ms时回路中的电流为0，此时进行关断，既无振荡现象，又能够避免电感能释引起的死区。因此，仿真结果表明，宽配谐整周期发射方式在理论上可以做到零死区关断。

3 实验与分析

实验采用发射线圈等效电感 $L = 267.1 \mu\text{H}$ ，等效电阻 $R = 151.5 \text{ m}\Omega$ ，分别对传统配谐和宽配谐两种发射方式进行测试，发射电流波形分别如图6和图7所示。测试采用激发脉冲频率 $f_0 = 2330 \text{ Hz}$ ，发射93个周期脉冲，即发射时间 t_p 约为39.9 ms。采用电流钳测量发射电流，选择档位为1 mV对应10 mA。

图6(a)为传统配谐发射整体波形，配谐电容选择17 μF ，发射电流约为10A，关断时期的波形如图6(b)所示，在发射完成关断后，仍有可识别的振荡出现。

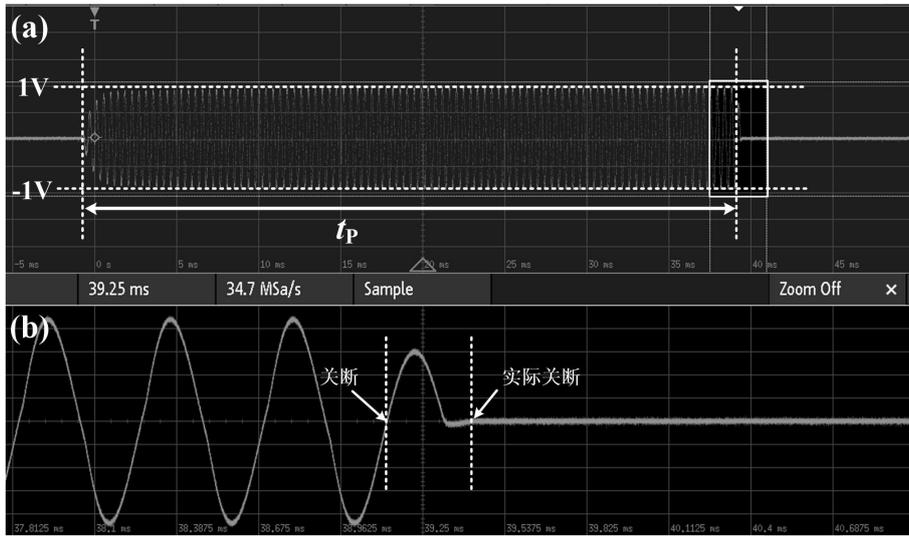


图6 传统配谐核磁共振发射电流实测波形

宽配谐发射电流整体波形如图7(a)所示，图7(b)为关断时期波形。宽配谐发射波形为类三角波，在93个周期发射结束后进行关断，无可识别的振荡现象出现。

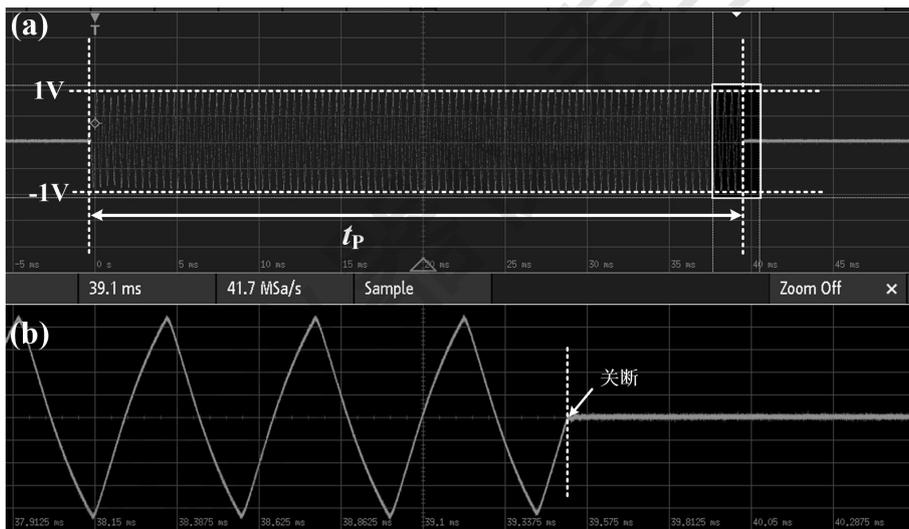


图7 宽配谐核磁共振发射电流实测波形

实验结果表明，在同等发射电流大小下，宽配谐整周期发射方式关断所需时间明显小于传统配谐方式，能够有效避免发射结束后关断振荡时间长的现象，从而缩短发射关断导致的死区时间。但宽配谐整周期发射方式所需的发射电压值更大，因此在大脉冲激发应用上存在困难，尽管该缺点可以通过提高激发能量源的功率来改善，但受多方面技术制约，很难实现，因此，宽配谐发射方式更适用于浅层探测。

4 结论

本文提出一种宽配谐核磁共振发射方法，通过对发射等效模型及工作过程的分析，证明了宽配谐发射方式能够从原理上避免传统配谐发射关断后振荡导致的死区，且在整周期

发射方式下, 关断时间可以缩短至零。仿真结果表明, 在10 A的发射电流下, 传统配谐方式关断到1 A时需要7 ms, 而宽配谐整周期发射方式为零关断。实测结果验证了该方法的有效性, 较传统配谐发射方式, 宽配谐整周期发射能够有效缩短发射关断时间, 对核磁共振浅层探测具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] M.Schirov;A.Legchenko and G.Creer.A new direct non-invasive groundwater detection technology for Australia[J].Exploration Geophysics,1991,Vol.22: 333-338
- [2] Ahmad A. Behroozmand ;Kristina Keating ;Esben Auken.A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization[J].Surveys in Geophysics,2015,Vol.36(1): 27-85
- [3] 林君, 张洋.地面磁共振探水技术的研究现状与展望[J].仪器仪表学报,2016,第 37 卷(12): 2657-2670
- [4] Lin J;Zhang Y;Yang Y;Sun Y;Lin T.Anti-saturation system for surface nuclear magnetic resonance in efficient groundwater detection.[J].The Review Of Scientific Instruments,2017,Vol.88(6): 064702
- [5] Lin J;Zhang Y;Yang Y;Sun Y;Lin T.Anti-saturation system for surface nuclear magnetic resonance in efficient groundwater detection.[J].The Review Of Scientific Instruments,2017,Vol.88(6): 064702
- [6] Liu, L.;Grombacher, D.;Auken, E.;Juul Larsen, J..Apsu: A wireless multichannel receiver system for surface nuclear magnetic resonance groundwater investigations(Article)[J].Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems,2019,Vol.8(1): 1-11
- [7] Tong Li;Li-Bo Feng;Qing-Ming Duan;Jun Lin;Xiao-Feng Yi;Chuan-Dong Jiang;Shuang-Yang Li.Research and Realization of Short Dead-Time Surface Nuclear Magnetic Resonance for Groundwater Exploration[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2015,Vol.64(1): 278-287
- [8] Walsh, DO;Grunewald, ED;Turner, P;Hinnell, A;Ferre, TPA.Surface NMR instrumentation and methods for detecting and characterizing water in the vadose zone[J].NEAR SURFACE GEOPHYSICS,2014,Vol.12(2): 271-284

