

张洋,王美婷,尚新磊. 基于差分结构的地面核磁共振数据噪声压制技术. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1): 46-53. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230288.

Zhang Yang, Wang Meiting, Shang Xinlei. Noise Suppression Technique of Surface Nuclear Magnetic Resonance Data Based on Differential Structure. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (1): 46-53. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230288.

基于差分结构的地面核磁共振数据噪声压制技术

张洋^{1, 2}, 王美婷^{1, 2}, 尚新磊^{1, 2}

1. 地球信息探测仪器教育部重点实验室(吉林大学), 长春 130026

2. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130026

摘要: 地面核磁共振(surface nuclear magnetic resonance, SNMR)技术是一种可直接定性定量探测地下水的非侵害式地球物理方法,已广泛应用于资源勘探、地质灾害预警和环境检测等方面。但在实际应用中,复杂的环境噪声导致微弱的SNMR信号常常被淹没,很难获取有效的SNMR信号。针对这一问题,本文提出了一种基于差分结构的SNMR数据噪声压制技术,采用两个接收线圈等距设置在发射线圈上下位置。这种分布可以实时抵消大部分环境噪声以及消除收发线圈耦合影响。理论建模和仿真结果验证了新方法能够有效压制噪声,并可靠获取到早期自由感应衰减(free induction decay, FID)信号。

关键词: 地面核磁共振; 噪声压制; FID信号; 消除收发耦合

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20230288

中图分类号: TH762

文献标志码: A

Noise Suppression Technique of Surface Nuclear Magnetic Resonance Data Based on Differential Structure

Zhang Yang^{1, 2}, Wang Meiting^{1, 2}, Shang Xinlei^{1, 2}

1. Key Laboratory of Geophysical Exploration Equipment (Jilin University), Ministry of Education, Changchun 130026, China

2. College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Surface nuclear magnetic resonance (SNMR) emerges as a non-invasive geophysical method with widespread applications in the qualitative and quantitative detection of groundwater. Its utility extends to resource exploration, geological disaster warning, and environmental monitoring. However, the practical implementation of this method encounters challenges as weak SNMR signals

收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 张洋(1990—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地面核磁共振、电磁探测仪器及数据处理等方面研究, E-mail: zhangyang19@jlu.edu.cn

通信作者: 尚新磊(1981—), 男, 教授, 主要从事地面核磁共振探测仪器、电源技术等方面研究, E-mail: shangxinlei@jlu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0606903-1); 吉林省自然科学基金项目(2020122207JC)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFF0606903-1) and the Natural Science Foundation of Jilin Province (2020122207JC)

often contend with the pervasive noise in complex environments, hampering effective signal acquisition. In response to this issue, we propose a novel SNMR data noise suppression technique based on a differential structure. This method involves the strategic placement of two receiving coils equidistantly above and below the transmitting coil. This configuration can cancel out a significant portion of ambient noise and mitigates the effects of transceiver coil coupling in real time. Numerical experiments verify that the new method can achieve noise suppression and the reliable acquisition of free induction decay (FID) signals.

Key words: surface nuclear magnetic resonance; noise suppression; FID signal; eliminates transceiver coil coupling

0 引言

地面核磁共振 (surface nuclear magnetic resonance, SNMR) 是一种直接探测地下水的地球物理方法^[1], 与传统钻孔取样测量方式相比, SNMR 技术具有直接高效、信息量丰富、定量准确以及解释唯一的优点^[2-3]。传统 SNMR 线圈结构由 SNMR 主机、发射线圈和接收线圈构成。线圈通常采用方形或圆形, 并以重叠的方式平铺在地面进行地下水的探测。然而, 由于 SNMR 信号只有纳伏级, 十分微弱, 极易受到环境电磁干扰的影响, 信噪比极低。尤其是在工业区附近或者靠近居民生活的勘查区, 工频及其谐波噪声幅度可达到毫伏级, 远大于地下水产生的自由感应衰减 (free induction decay, FID) 信号, 易导致放大器饱和, 信号失真^[4]。另外, 由于收发线圈之间的耦合影响引发的死区时间也会导致早期 FID 信号的丢失。因此, 如何获取可靠完整的 SNMR 信号对于浅层水文信息探测具有十分重要的意义。

环境噪声与 SNMR 信号共同构成的原始数据动态范围较大, 从纳伏级到毫伏级, 直接进行放大采集易导致放大器饱和^[5]。针对这个问题, Lin 等^[6]提出了一种基于瞬时浮点放大技术的方法, 通过实时调节放大倍数来抑制放大器饱和; 但对于噪声幅度大的时刻由于整体放大倍数太小而导致 FID 信号不能被有效采集。对于噪声抑制方面, 很多学者也提出了滤波方法, 如自适应参考消噪^[7]、时频峰值滤波^[8]、深度学习^[9]等。但是, 这些方法属于后期软件滤波, 硬件采集数据已经发生的放大器饱和导致的信号失真不可恢复的。因此, 如何抑制 SNMR 装置结构收发线圈耦合和噪声导致的放大器饱和影响, 避免 SNMR 信号的早期数据失真, 是当前亟需解决的技术问题。

针对上述难题, 本文提出一种基于差分结构的 SNMR 数据噪声压制技术, 利用差分接收线圈与发射线圈的对称结构, 既在硬件端实时抑制远端环境噪声、防止放大器饱和, 又能够有效消除收发线圈耦合的影响。本文首先介绍 SNMR 信号和噪声的特征; 然后构建了基于差分结构的 SNMR 数学模型, 并开展仿真分析, 与传统重叠、分离线圈结构进行对比, 以验证新方法的有效性; 最后通过实测实验证明新方法具有实时噪声压制作用。

1 SNMR 原理与方法

1.1 SNMR 原理

传统核磁共振 (NMR) 探测地下水共分为 3 个过程, 如图 1 所示。首先, 在平衡状态下, 水中氢原子核在稳定地磁场 B_0 中自旋, 产生的 Larmor 频率^[10]为

$$f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{\gamma |B_0|}{2\pi} \quad (1)$$

式中: γ 为质子旋磁比; ω_L 为拉莫尔进动频率。其次, 当在发射线圈中通入一段时间的交变电流 (图 1 中蓝色曲线) 时, 所产生的磁场角频率 $\omega_0 = \omega_L$, 形成的电流^[11]为

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

式中: I_0 为发射电流, 它与电流持续时间 τ 的乘积表示激发脉冲矩 q ; t 为发射过程中的任意时刻, $0 \leq t \leq \tau$ 。理论上激发电流脉冲的包络线为矩形。最后快速关断电流, 恢复平衡状态, 在接收线圈中获取幅度呈指数级衰减的理想 FID 信号 (图 1 中红色和绿色曲线), 即自由感应电动势^[12]为

$$E(t, q) = E_0(q) \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: E_0 为 SNMR 信号的初始振幅, 用来表征单位体积的含水量 (有效孔隙度); T_2^* 为 SNMR 信号的

假设高度为 H 的电力线(噪声干扰源)被放置在对称接收线圈的周围,它到每个线圈中心的垂直距离均为 r ,其顶部到 R_1 、 R_2 中心的距离分别为 r_1 、 r_2 (图 2)。由式(7)可知,为了简化 $\iint_S \frac{1}{r} dS$ 的计算, $B(r, t)$ 可由线圈中心点处的磁感应强度近似代替,即 $\iint_S \frac{1}{r} dS \approx S/r$ 。因此, $E(t)$ 可以表示为

$$E(t) \approx \pm \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{S}{r} \cdot \frac{dI_h(t)}{dt} \quad (8)$$

由于 R_1 与 R_2 之间存在间距 $2h$,则 $r_2 < r_1$, R_2 中产生的感应电动势 $E_2(t)$ 略高于 R_1 中产生的感应电动势 $E_1(t)$ 。那么,差分结构的总感应电动势为

$$\begin{aligned} \Delta E(t) &= E_2(t) - E_1(t) = \\ & \pm \frac{\mu_0 S}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \frac{dI_h(t)}{dt} = \pm \frac{\mu_0 a^2}{2\pi} \cdot \\ & \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (H-h)^2}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + H^2}} \right) \frac{dI_h(t)}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

因此,该结构得到的总感应电动势 $\Delta E(t)$ 的值很小,起到抑制效果。

2.2 消除耦合

在发射线圈中加入交变电流 $I(t)$,形成激发磁场 B_T ,使氢质子 H^1 的旋转轴偏离原方向。垂直于地磁场 B_0 的激发磁场垂直分量 B_T^\perp 使氢质子偏离沿地磁场方向平衡位置的角度,称为扳倒角 θ 。激发停止之后在 R_1 和 R_2 中均感应到相同的磁通量为

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_2 = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} B_T(x, y, h, t) dx dy = \\ & NC \frac{\mu_0}{4\pi} I(t) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $B_T(x, y, h, t)$ 为 t 时刻在 R_1 与 R_2 各自平面内任意一点产生的磁感应强度; C 为积分后的结果,在确定了线圈各参数之后为常数。进一步,通过法拉第电磁感应定律亦能够得到 $E_1(t)$ 和 $E_2(t)$ 。理论上,将 $E_1(t)$ 减去 $E_2(t)$,二者即可相互抵消,从而有效抑制重叠线圈收发耦合的影响。

接收线圈在拾取 FID 信号过程中,当 $t=0$ 时, NMR 响应信号的初始振幅 $E_0(q)$ 由含水量 $w(r)$ 决定,其表达式为

$$E_0(q) = \int w(r) K(q, r) dr \quad (11)$$

式中: $w(r)$ 为地下空间 r 处的含水量,它的取值范

围为 $[0, 1]$; $K(q, r)$ 为灵敏度核函数。差分结构的灵敏度核函数可表示为

$$K(q, r) = K_1(q, r) - K_2(q, r) \quad (12)$$

式中: $K_1(q, r)$ 为 R_1 产生的核函数; $K_2(q, r)$ 为 R_2 产生的核函数。它们的表达式分别为

$$\begin{cases} K_1(q, r) = -2\omega_L M_0 \sin(\gamma q | B_{T^+}(r, d) | \cdot \\ | B_{R_1^-}(r, d) | \exp\{i[\zeta_T(r) + \zeta_{R_1}(r)]\} \cdot \\ [b_{R_1}^\perp(r) \cdot b_{T^+}^\perp(r) + i b_0 \cdot b_{R_1}^\perp(r) \times b_{T^+}^\perp(r)]; \\ K_2(q, r) = -2\omega_L M_0 \sin(\gamma q | B_{T^+}(r, d) | \cdot \\ | B_{R_2^-}(r, d) | \exp\{i[\zeta_T(r) + \zeta_{R_2}(r)]\} \cdot \\ [b_{R_2}^\perp(r) \cdot b_{T^+}^\perp(r) + i b_0 \cdot b_{R_2}^\perp(r) \times b_{T^+}^\perp(r)]. \end{cases} \quad (13)$$

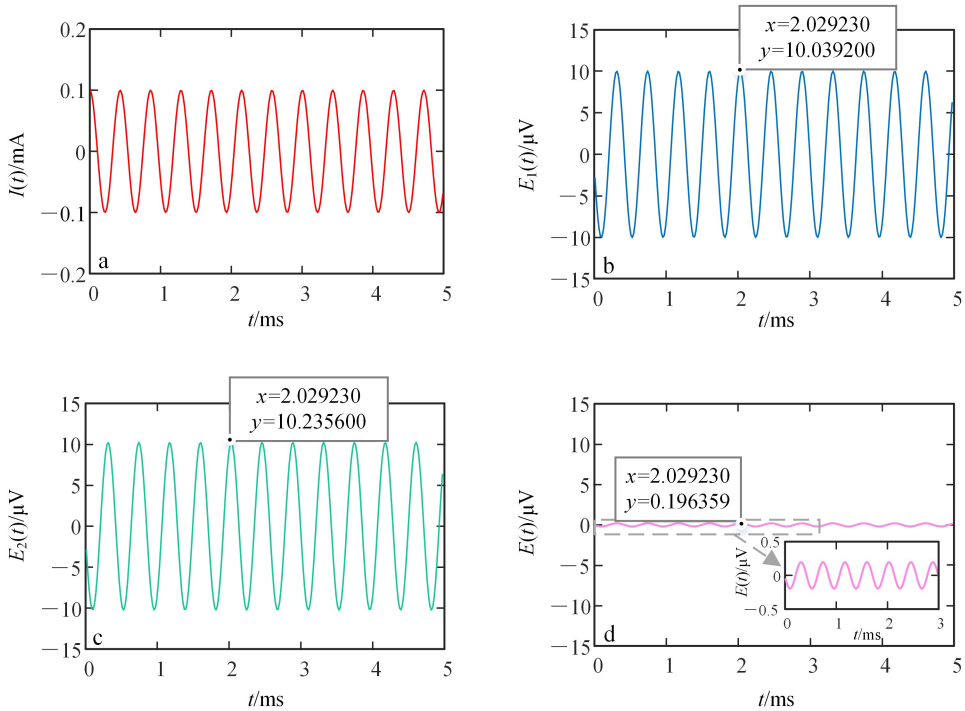
式中: M_0 为地下水的净磁化强度; $B_{T^+}(r, d)$ 为 B_T^\perp 的顺时针旋转分量; $B_{R_1^-}(r, d)$ 和 $B_{R_2^-}(r, d)$ 分别为单位电流通入 R_1 和 R_2 产生的垂直于地磁场的逆时针旋转分量; $\zeta_T(r)$ 、 $\zeta_{R_1}(r)$ 和 $\zeta_{R_2}(r)$ 分别为发射线圈 T、接收线圈 R_1 和 R_2 的相位; b_0 、 $b_{R_1}^\perp(r)$ 和 $b_{R_2}^\perp(r)$ 分别为地磁场、激发磁场、接收磁场 1 和 2 的单位向量。

3 仿真分析

3.1 噪声抑制模拟实验

为了定量分析差分线圈在抑制谐波噪声方面的优势,通过对电动势的数值模拟探究距离对信号振幅的影响。设频率为 2 330 Hz,相位为 0 rad,各谐波电流的振幅为 0.1 mA(图 3a)。采用 $a=2$ m 的方形线圈, $h=0.5$ m, $H=10$ m。以 $r=20$ m 为例,通过几何定理分别求得 r_1 与 r_2 的数值。 $E_1(t)$ 随时间的变化曲线如图 3b 所示,其振幅为 10.039 200 μ V。 $E_2(t)$ 随时间的变化曲线如图 3c 所示,其振幅为 10.235 600 μ V。 $E(t)$ 随时间的变化曲线如图 3d 所示,其振幅仅为 0.196 359 μ V。明显地,与单一接收线圈相比,本文提出的差分结构线圈能够将噪声振幅从传统单一线圈的 10.039 200 μ V 降到 0.196 359 μ V,噪声振幅降低到原来的 1/51。

进一步,我们探究噪声源与 SNMR 装置垂直距离和差分系统抑制噪声性能的关系, r 取值范围为 2~100 m。重复上述过程可以求出 $E(t)$ 随 r 的变化曲线图,如图 4 所示。结果表明, $E(t)$ 的变化不仅符合随着距离的增加而减小的规律,并且 $E(t)$ 呈指数形式快速衰减。因此,当噪声源距离 SNMR 装置更远时,新方法抑制噪声效果更好。本文提出的



a. 谐波电流; b. 垂直距离为 20 m 时接收线圈 R_1 的感应电动势; c. 垂直距离为 20 m 时接收线圈 R_2 的感应电动势; d. 整体感应电动势。

图 3 基于差分结构的噪声压制效果

Fig.3 Noise suppression effect based on differential structure

差分结构能够实时抑制噪声干扰,防止放大器饱和和引发的信号失真问题,在硬件端改善信噪比。

3.2 SNMR 去耦性能分析

根据之前介绍的线圈探测原理,本节利用数值模拟的方法将差分线圈结构与重叠线圈、分离线圈结构进行对比仿真。通过 COMSOL Multiphysics

软件设置模型,计算有限元磁场,得到的结果与式 (12)(13)一同编入 MATLAB 中,运行得到仿真实验结果。

重叠线圈、分离线圈和差分线圈的结构如图 5a、b、c 所示。为了便于比较,将重叠线圈整体抬高至距离地面为 h 的位置;分离线圈的接收线圈放置地面上,发射线圈距离地面为 h ;差分线圈在分离线圈上方增加另一个接收线圈 R_2 ,其间距也为 h 。

重叠线圈、分离线圈和差分线圈结构的灵敏度核函数如图 5d、e、f 所示。针对小尺寸线圈结构,过多增加线圈的匝数会影响传感器带宽,而线圈匝数变化过小很难对探测效果有明显的变化。因此,设置仿真参数如下: $q = 0 \sim 0.6 \text{ A} \cdot \text{s}$, $a = 2 \text{ m}$, $h = 0.5 \text{ m}$, $N = 8$, $n = 64$ 。从图 5d、e、f 中可以看出:当探测深度距离地下 5 m 时,分离线圈的脉冲矩范围明显大于其他线圈,表明分离线圈探深能力更强;当激发脉冲矩为 $0.1 \text{ A} \cdot \text{s}$ 时,差分线圈的灵敏度厚度明显小于其他线圈,表明差分线圈的薄层含水层的分辨率更高。因此,对于浅层探测地下水,如果想要探测到更深的信号,可以选用分离线圈,而差分线圈更适用于薄层的高分辨率探测。

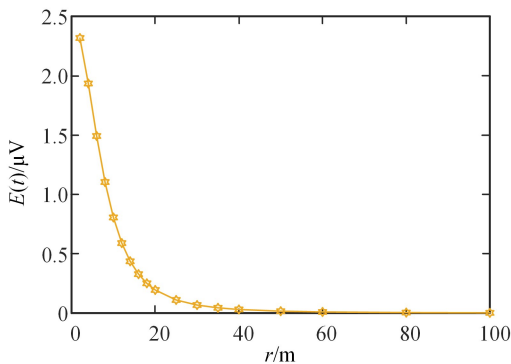
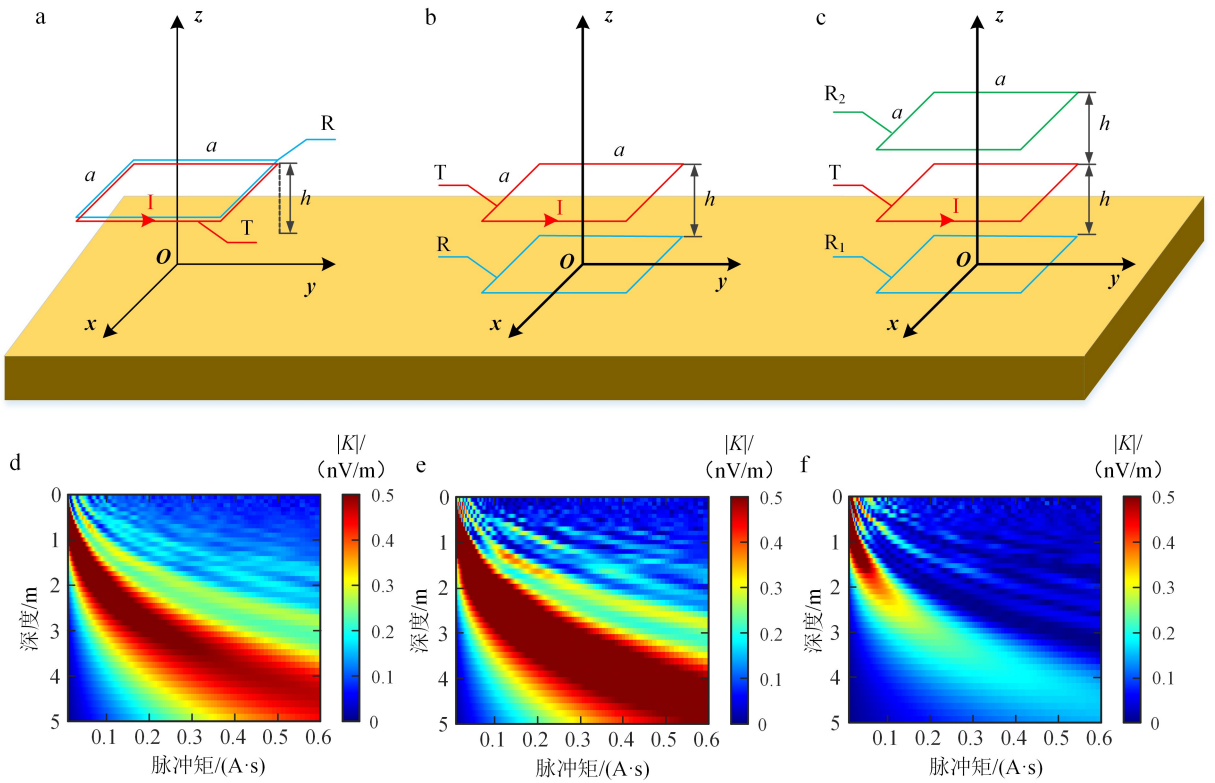


图 4 总感应电动势与噪声源和仪器之间垂直距离的函数关系

Fig.4 Total induced electromotive force as a function of the vertical distance between the noise source and the apparatus



a. 重叠线圈结构;b. 分离线圈结构;c. 差分线圈结构;d. 重叠线圈的核函数图;e. 分离线圈的核函数图;f. 差分线圈的核函数图。

图 5 3 种线圈结构及灵敏度核函数图

Fig.5 Three coil structures and sensitivity kernel function plots

4 实验结果

为了验证差分线圈结构具有实时抑制噪声能力,本节开展新方法与分离线圈结构的实测实验。

我们在实验室搭建了如图 6 所示的原理样机,其中,发射线圈 T 与接收线圈 R₁ 可以构成分离线圈结构,再加入接收线圈 R₂ 构成差分线圈结构。实验时两种线圈结构均采用 a=2 m,h=0.5 m,N=10,n=64。

分别将两种线圈结构所感应到的噪声经过放大器后采集,通过示波器(SIGLENT SDS 1104X-C)进行观测,分离线圈结构和差分线圈结构的实验结果如图 7a,b 所示。分离线圈接收到的环境噪声幅度约为 3 V,而差分线圈接收的环境噪声幅度仅为 1 V,将噪声压制为原来的 1/3,大大削弱了环境噪声对于 SNMR 信号的影响。

在 R₁(蓝色线)上缠绕一圈 FID 信号发生线圈(红色线),通过触发信号发生器(Tektronix AFG3102C)产生一个 FID 信号用于模拟实际地下

水的 NMR 响应信号。FID 信号频率为 2 330 Hz,弛豫时间为 5 ms,信号幅度为 5 mV。分离线圈结构和差分线圈结构的实验结果如图 7c,d 所示。分离线圈结构完全淹没在噪声中无法获取有效信

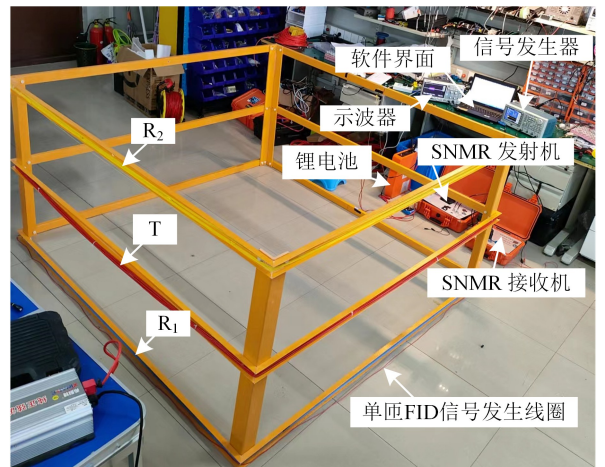
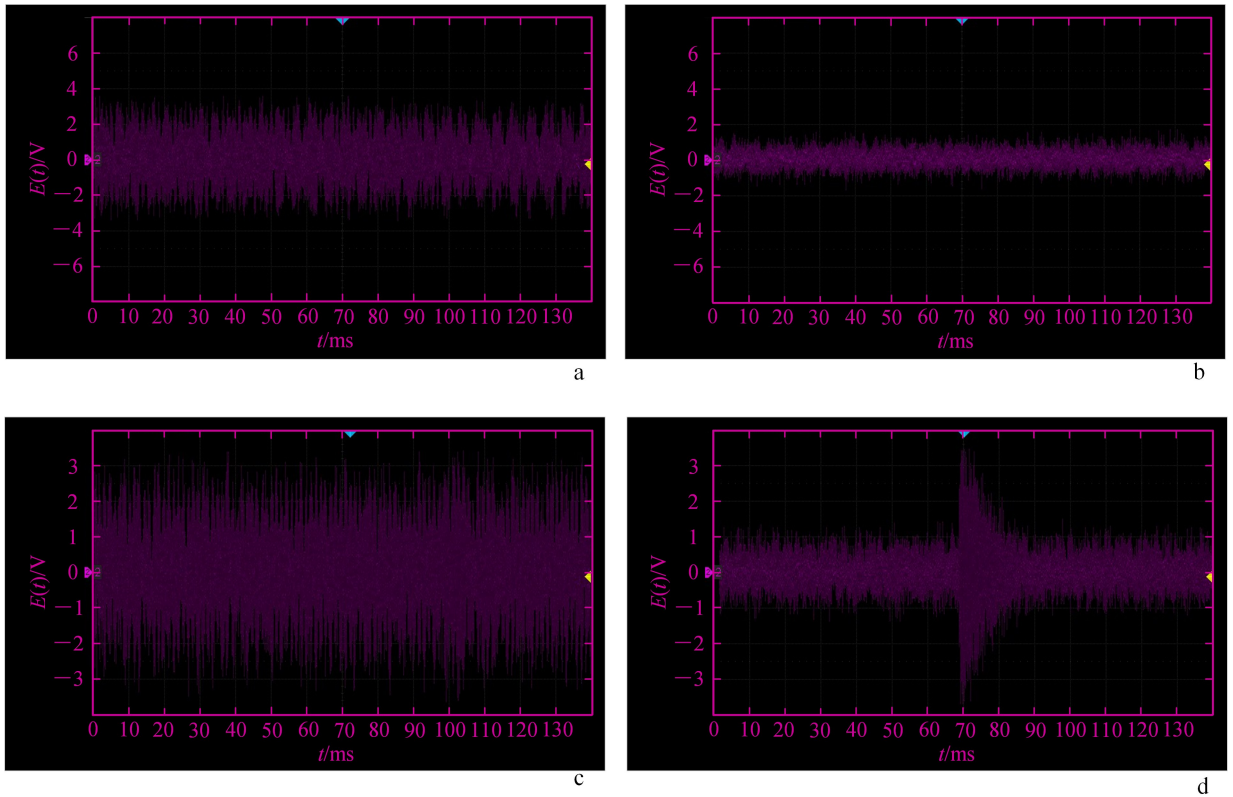


图 6 实验测试现场图

Fig.6 Experimental test site diagram



a. 分离线圈结构纯噪声数据;b. 差分线圈结构纯噪声数据;c. 分离线圈结构含噪信号;d. 差分线圈结构含噪信号。

图7 实验测试结果

Fig.7 Experimental test results

号,而差分线圈结构在噪声被压制后能够清晰地观测到FID信号。

5 结论

1)本文提出的差分结构本身对谐波噪声具有实时抑制作用,可以改善噪声幅度大导致放大器饱和问题,提高信噪比。

2)对比于重叠线圈、分离线圈结构,差分线圈结构在激发过程中感应电动势相互抵消,达到消除收发线圈耦合的目的,从而缩短死区时间,实现对浅薄层地下水的高分辨率探测。

3)通过室内实测数据验证,得到了和仿真实验相同的结论,证明此方法在实际应用中的价值。

参考文献(References):

- [1] 林君,蒋川东,林婷婷,等. 地下工程灾害水源的磁共振探测研究[J]. 地球物理学报,2013,56(11): 10-14.
Lin Jun, Jiang Chuandong, Lin Tingting, et al. Research on Magnetic Resonance Detection of Disaster Water Sources in Underground Engineering [J].

Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 10-14.

- [2] 林君,蒋川东,段清明,等. 复杂条件下地下水磁共振探测与灾害水源探查研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(5): 1560-1570.

Lin Jun, Jiang Chuandong, Duan Qingming, et al. The Situation and Progress of Magnetic Resonance Sounding for Groundwater Investigations and Underground Applications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1560-1570.

- [3] 蒋川东,林君,秦胜武,等. 磁共振方法在堤坝渗漏探测中的实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3): 858-863.

Jiang Chuandong, Lin Jun, Qin Shengwu, et al. Experiment on Dam Leakage Detection with Magnetic Resonance Sounding [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 858-863.

- [4] Lin T T, Zhou K, Zhao H, et al. Surface Magnetic-Field Enhancement Technology with a Double-Polarization Coil for Urban Hydrology Quantitative

- Survey [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-11.
- [5] 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, 37 (12): 2657-2670.
- Lin Jun, Zhang Yang. Research Status and Expectation of Surface Nuclear Magnetic Resonance Technique for Groundwater Detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (12): 2657-2670.
- [6] Lin J, Zhang Y, Yang Y J, et al. Anti-Saturation System for Surface Nuclear Magnetic Resonance in Efficient Groundwater Detection [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88 (6): 064702.
- [7] Xie R H, Wu Y B, Liu K, et al. Using Wavelet-Domain Adaptive Filtering to Improve Signal-to-Noise Ratio of Nuclear Magnetic Resonance Log Data from Tight Gas Sands [J]. *Geophysical Prospecting*, 2016, 64 (3): 689-699.
- [8] Zhang Y, Yu S J, Wan L, et al. Processing of Underground Nuclear Magnetic Resonance Data for Underground River Detection: A Case Study in Doumo Tunnel, Guizhou, China [J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2020, 25 (3): 315-323.
- [9] Jiang C D, Miao R X, Li B, et al. Multitype Noise Suppression in Magnetic Resonance Sounding Data Based on a Time-Frequency Fully Convolutional Neural Network [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-11.
- [10] Behroozmand A A, Keating K, Auken E. A Review of the Principles and Applications of the NMR Technique for Near-Surface Characterization [J]. *Surveys in Geophysics*, 2015, 36 (1): 27-85.
- [11] Legchenko A, Valla P. Removal of Power-Line Harmonics from Proton Magnetic Resonance Measurements [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 53 (2): 103-120.
- [12] 林婷婷,李玥,李苏杭,等. 基于相关建模检测的磁共振探水同频消噪方法[J]. *地球物理学报*, 2020, 63 (8): 3144-3153.
- Lin Tingting, Li Yue, Li Suhang, et al. Co-Frequency Harmonic Attenuation from SNMR Data Based on Correlation Modeling Detection Technology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63 (8): 3144-3153.
- [13] Lin T T, Li S H, Wang M T. Acquisition and Correction for Early Surface Nuclear Magnetic Resonance Signal Based on Multi-Turn Small Air-Core Coil Sensors [J]. *Measurement*, 2023, 219: 112902.
- [14] Lu K, Li F, Pan J W, et al. Using Electrical Resistivity Tomography and Surface Nuclear Magnetic Resonance to Investigate Cultural Relic Preservation in Leitai, China [J]. *Engineering Geology*, 2021, 285: 106042.
- [15] 李邦,蒋川东,王远,等. 基于卷积神经网络的地下水磁共振数据随机噪声压制方法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52 (3): 775-784.
- Li Bang, Jiang Chuandong, Wang Yuan, et al. Random Noise Suppression for Groundwater Magnetic Resonance Sounding Data Based on Convolutional Neural Network [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52 (3): 775-784.
- [16] Kjær-Rasmussen A, Griffiths M P, Grombacher D, et al. Fast Removal of Powerline Harmonic Noise from Surface NMR Datasets Using a Projection-Based Approach on Graphical Processing Units [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.