

# 地面核磁共振找水信号中的奇异干扰抑制

王中兴, 荣亮亮, 林君

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130026)

**摘要:**首先分析了地面核磁共振信号的特征和奇异噪声的来源与特点,提出了相应的消除方法并进行了仿真研究。通过基于叠加消噪的三种改进方法的仿真与对比,确定了差阈值替代叠加方法是对奇异噪声进行削弱与抑制的有效方法,对信号参数的提取精度高。经过大量的野外实验证明了针对奇异噪声处理方法的可行性与实用性,获得的高信噪比、低噪声的地面核磁共振信号为地面核磁共振反演提供了精确的参数。

**关键词:**地面核磁共振; 噪声; 干扰; 奇异噪声; 叠加; 阈值; FID

**中图分类号:** TB53    **文献标识码:**A    **文章编号:**1671-5497(2009)05-1282-06

## Spike noise elimination from surface nuclear magnetic resonance signal for underground water

WANG Zhong-xing, RONG Liang-liang, LIN Jun

(College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** The features of Surface Nuclear Magnetic Resonance (SNMR) signal for underground water and the sources and characters of the spike noise distortion are analyzed. A method to eliminate the spike noise interference is proposed and program simulation is conducted. Three improved noise elimination methods based on stacking method are compared by simulation. It is shown that the D-value threshold-value substitution stacking method outperforms the other methods in terms of spike noise suppression and SNMR parameters extraction. Large-scale field measurements demonstrate the feasibility and practicability of the proposed spike noise elimination method. High Signal to Noise Ratio (SNR) and low noise signal are achieved and accurate parameters are obtained for the SNMR conversion.

**Key words:** SNMR; noise; interference; spike noise; stacking; threshold-value; FID

地面核磁共振(Surface nuclear magnetic resonance, SNMR)找水技术是当今物探领域寻找地下水源最先进、最直接的探测技术,核磁共振找水方法和仪器已在世界各地得到广泛应用<sup>[1]</sup>。地面核磁共振找水方法是利用水中氢质子被外磁

场激发产生的核磁共振现象及核弛豫特征<sup>[2]</sup>来获取地下水信息的方法。SNMR信号的特点是:信号极其微弱,信号初始幅度在10 nV~1 mV范围内,需通过多次叠加消噪获取高信噪比的SNMR信号;信号频率为1.3~3.4 kHz,大小与地磁场

收稿日期:2008-09-18.

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A23);教育部科学技术研究重点项目(106060).

作者简介:王中兴(1980-),男,博士研究生. 研究方向:地面核磁共振找水仪器与方法.

E-mail:jluwzx@yahoo.com.cn

通信作者:林君(1954-),男,教授,博士生导师. 研究方向:地学电磁法仪器及方法. E-mail:lin\_jun@jlu.edu.cn

成正比; 波形是按指数规律衰减的正弦信号, 衰减时间通常在 30~600 ms。由于这些特点, 地面核磁共振找水探测时信号易受工区各类环境电磁噪声的干扰。

根据噪声对 SNMR 信号的影响机理, 可将电磁噪声干扰分为平稳环境噪声干扰、工频谐波噪声干扰和奇异噪声干扰。其中奇异噪声干扰是由噪声源偶然产生, 且没有固定频率和规律的尖峰噪声。本文主要研究奇异噪声干扰对信号的影响与抑制技术。奇异噪声干扰的分布和幅度具有偶然性和随机性, 不能利用噪声的频率等特性进行滤除。目前国内外对奇异噪声的研究通常采用叠加、小波分析、平滑滤波等方法, 这些方法针对短时和奇异噪声幅值较小、奇异干扰较少的情况有效, 而奇异幅度较大时, 对核磁共振衰减信号进行处理易导致信号畸变, 且不适合现场对信号的实时处理。本文方法是在叠加消噪方法的基础上, 利用 SNMR 信号的特征和奇异噪声的特点, 对叠加方法优化所形成的消除奇异噪声的技术。

## 1 SNMR 信号奇异干扰分析

奇异噪声干扰源包括: 大气噪声干扰, 如雷电产生的火花放电, 属于脉冲宽带干扰, 其覆盖从几 Hz 到 100 MHz 以上; 太阳噪声干扰, 即太阳黑子的辐射噪声, 在太阳黑子活动期, 黑子爆发, 产生比平稳期高数千倍的强烈噪声; 工业设备, 如感应加热设备、高频电焊机等带来的干扰; 电力设备, 包括伺服电机、电钻、继电器等设备通断产生的电流剧变而引起的电磁干扰; 汽车、内燃机点火系统产生的宽带干扰<sup>[3]</sup>。

图 1 是实测雷电天气 10 点至 13 点的噪声变化。可以看出, 环境的平稳噪声幅度为 50 nV, 而图中突起的波形即为雷电引起的奇异干扰, 最大干扰幅度达 200 nV。因此, 在发生雷电时采集的

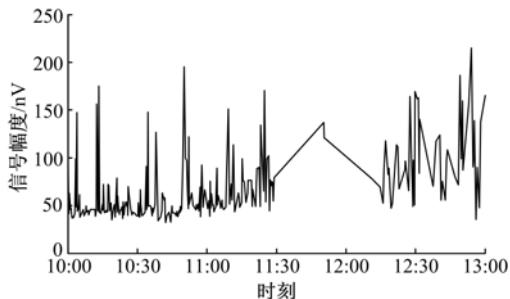


图 1 实测雷电天气噪声变化

Fig. 1 Actual measured noise of thunder weather

信号中会出现奇异噪声干扰, 如图 2 所示。测量到的信号中有两个较大奇异噪声, 幅度是信号初始幅度的 10 倍以上, 严重影响了信号质量。

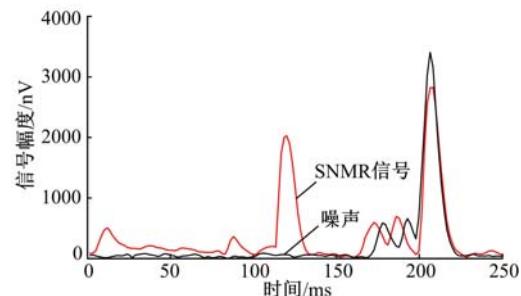


图 2 实测奇异干扰的 SNMR 信号

Fig. 2 Actual measured SNMR signal interfered by spike noise

奇异噪声干扰属于脉冲型游散电流噪声, 通常模拟为三角型脉冲、半正弦型脉冲、矩形脉冲三种类型。这三种脉冲干扰由于脉冲宽度小, 在经过窄带核磁共振带通放大器<sup>[4]</sup>后均被畸变为类半正弦干扰噪声。

为研究奇异噪声的干扰, 首先构造半正弦脉冲<sup>[5]</sup>, 设幅度为  $A_p$ , 干扰宽度为  $T_w$ , 且在极值两边对称, 构造的奇异干扰信号可表示为

$$f(t) = A_p \sin(\pi/T_w)t, 0 \leq t \leq T_w \quad (1)$$

其中, 频谱为

$$F(\omega) = \frac{\pi A_p T_w}{\pi^2 - (\omega T_w)^2} \{ [ (1 + \cos(\omega T_w)) ] - i \sin(\omega T_w) \}$$

振幅谱为

$$|F(\omega)| = \frac{\pi A_p T_w}{\pi^2 - (\omega T_w)^2} \cdot \cos \frac{\omega T_w}{2}$$

相位谱为

$$\Phi(\omega) = \omega T_w / 2$$

通过对大量实测信号分析发现, 经过地面核磁共振放大器所采集到的干扰脉冲宽度基本都在 25 ms 以内, 如图 2 的信号中有 2 个大幅度奇异干扰和 4 个小幅度奇异干扰, 6 个干扰脉冲的宽度均在 25 ms 以内。

## 2 SNMR 信号奇异干扰消除技术

设 SNMR 信号  $E(t)$  的表达式为

$$E(t) = E_0 \exp(-t/T_2^*) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为初始振幅, 表征含水量;  $T_2^*$  为横向弛豫时间, 表征空隙大小;  $\varphi_0$  为初始相位, 表征含水

层导电性;  $f_0$  为 Lamor 频率, 表达式为

$$f_0 = \gamma B_0 / (2\pi) \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为磁旋比;  $B_0$  为地磁场。

被激发的 SNMR 信号通过模拟正交和低通滤波器后, 转换为自由感应衰减信号(Free induction decay, FID)的 I、Q 两分量, 即利用采集系统采集的是地面核磁共振 FID 信号的两正交分量。设采集的两分量序列分别为  $I(k)$ 、 $Q(k)$  ( $k = 1, 2, \dots, p$ ),  $p$  为采样的总点数, 则采集的 FID 信号序列为

$$S_F(k) = \sqrt{I^2(k) + Q^2(k)} \quad (4)$$

受到奇异噪声干扰和环境噪声干扰的 SNMR 信号可表示为

$$S(t) = E(t) + N_{\text{pul}}(t) + N(t) \quad (5)$$

式中:  $N_{\text{pul}}(t)$  为奇异噪声;  $N(t)$  为其他平稳环境噪声。

信号中的奇异噪声根据式(1)表示为

$$N_{\text{pul}}(t) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \text{ 或 } t > t_0 + T_w \\ A_p \sin[(t - t_0)\pi/T_w], & t_0 < t < t_0 + T_w \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $t_0$  为奇异噪声起始时刻;  $T_w$  为奇异噪声脉冲宽度;  $A_p$  为奇异噪声脉冲幅度。

图 3 是仿真含奇异噪声干扰的 SNMR 信号, 其中初始振幅  $E_0 = 100$  nV, 弛豫时间  $T_2^* = 400$  ms,  $f_0 = 2320$  Hz,  $\varphi_0 = 0$ ,  $A_p = 200$  nV,  $T_w = 15$  ms,  $t_0 = 92$  ms,  $N(t)$  为高斯白噪声, 最大幅度为信号幅度的 0.1 倍。通过线性拟合<sup>[6]</sup>求得信号参数为:  $E_0 = 96.98$  nV,  $T_2^* = 369.4$  ms。拟合所得信号参数与标准信号有偏差,  $T_2^*$  的偏差较大, 其原因是信号中有平稳噪声和奇异噪声的影响。

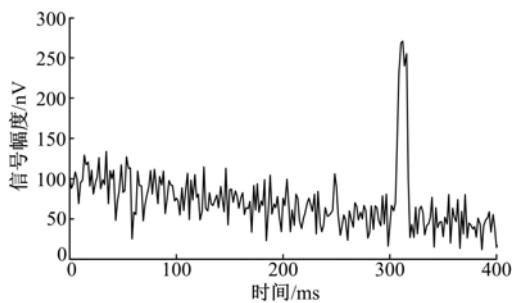


图 3 奇异噪声干扰的 FID 信号仿真

Fig. 3 Simulated FID signal interfered by spike noise

## 2.1 无阈值叠加消除技术

无阈值叠加消噪<sup>[7]</sup>是消除噪声最常用的一种方法, 本文简称 M1 法, 即将测量的  $N$  次信号全

部叠加。对由正交方法拾取的 FID 信号而言, 则将 I、Q 分量分别相叠加后, 再合成 FID 信号

$$S_{\text{FID}}(k) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N I_i(k)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N Q_i(k)\right)^2} / N \quad (7)$$

式中:  $S_{\text{FID}}(k)$  为第  $k$  点 FID 信号的大小;  $I_i(k)$  为第  $i$  次测量第  $k$  点 FID 信号的 I 分量;  $Q_i(k)$  为第  $i$  次测量第  $k$  点 FID 信号的 Q 分量;  $N$  为测量的总次数;  $i$  为测量次数序号。

首先, 利用式(5)的构造方法, 构造 32 个含奇异噪声的信号, 其中奇异噪声起始时刻  $t_0$  随机变化, 其余参数与图 3 信号参数相同。采用叠加的方法对 32 个信号进行无阈值叠加, 所得仿真结果如图 4 所示。信号中的奇异噪声被削弱, 无明显奇异噪声出现, 利用线性拟合得到的信号参数为:  $E_0 = 99.00$  nV,  $T_2^* = 419.9$  ms。采用 M1 法所求得的信号参数更接近于标准信号, 无阈值叠加效果明显。

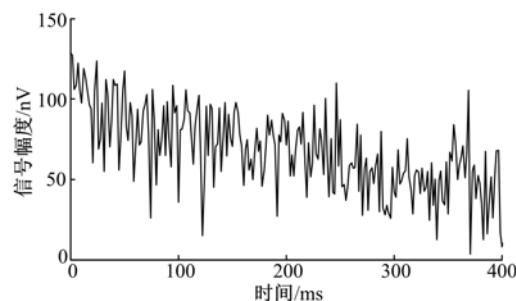


图 4 无阈值叠加法抑制 FID 信号中奇异噪声的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of stacking method for suppressing the spike noise of FID signal

## 2.2 阈值叠加消除技术

利用无阈值叠加的方法可以抑制奇异噪声对信号的影响, M1 法仿真参数的奇异噪声幅度  $A_p$  仅为信号幅度的 2 倍, 叠加次数较多时, 能把奇异噪声削弱。实际中奇异噪声可达到信号幅度的十几倍, 且各单次测量信号中的奇异噪声幅度随机分布。为深入研究, 构造变奇异幅值的核磁共振信号,  $A_p$  在 0~1500 nV 中随机生成, 利用 M1 法叠加 32 次的信号曲线如图 5 所示。由图可知, 此时并不能有效地消除奇异噪声对信号的影响, 且叠加后信号质量更差, 原因是某个单次数据受到的奇异噪声影响较大。如果使受奇异噪声影响较大的信号也参与叠加, 由于其随机性, 会导致叠加后的信号出现更多的奇异干扰。线性拟合结果

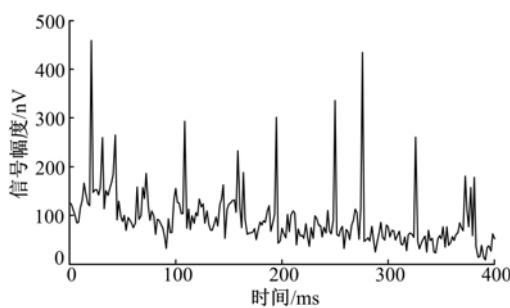


图 5 无阈值叠加法抑制 FID 信号中强奇异噪声的仿真结果

Fig.5 Simulation results of stacking method for suppressing the high spike noise of FID signal

为:  $E_0=126.00 \text{ nV}$ ,  $T_2^*=416.0 \text{ ms}$ , 信号幅度与实际相差较大。

阈值叠加法是设定合理的阈值  $V_1$ , 将所有小于阈值的单次测量信号叠加而削弱噪声的方法, 本文简称 M2 法。单次测量信号最大值小于阈值时, 称该次测量信号为有效测量信号, 而大于阈值的测量信号为无效测量信号。即该方法的叠加条件为

$$\text{Max}(S_F(k)) < V_1, k = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

图 6 是将图 5 的 32 个仿真信号采用阈值叠加方法获得的信号曲线, 其中取阈值  $V_1 = 500 \text{ nV}$ , 可以看出, M2 法消除了 M1 法叠加后信号曲线中出现更多奇异尖峰的缺点, 拟合结果为:  $E_0 = 107.69 \text{ nV}$ ,  $T_2^* = 404.0 \text{ ms}$ , 与标准信号参数更接近。

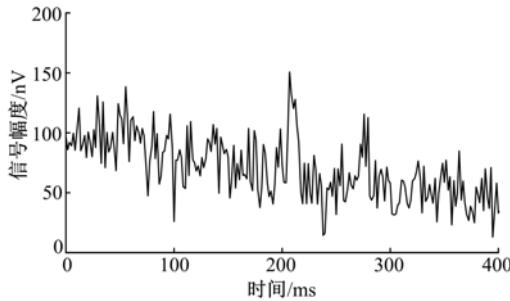


图 6 阈值叠加法抑制奇异噪声的仿真结果

Fig.6 Simulation results of threshold-value stacking method for suppressing the spike noise

### 2.3 阈值替代叠加消除技术

由前文可知, 奇异噪声干扰在 25 ms 内, 奇异噪声干扰仅影响信号的某一小部分, 将无效测量信号数据完全舍弃是不合理的。针对此缺点, 本文提出阈值替代叠加法, 简称 M3 法, 即将无效测量信号数据未干扰数据参与到叠加运算中。阈值

替代叠加法的原理是先将有效测量信号数据进行叠加后, 视为标准信号序列, 记为  $I_e(k)$ 、 $Q_e(k)$ 、 $S_e(k)$ , 然后再对无效测量信号数据设定阈值  $V_2$ , 对每一个无效测量信号各点数据判断, 超出阈值  $V_2$  的数据用标准信号替代, 未超出阈值的数据则叠加, 设坏点个数为  $n$ , 叠加步骤为

$$I_1(k) = \begin{cases} I_e(k) + I_{b1}(k), \text{Max}(S_{bf1}(k)) \leqslant V_2 \\ I_e(k) + I_e(k), \text{Max}(S_{bf1}(k)) > V_2 \end{cases}$$

$$I_2(k) = \begin{cases} I_1(k) + I_{b2}(k), \text{Max}(S_{bf2}(k)) \leqslant V_2 \\ I_1(k) + I_e(k), \text{Max}(S_{bf2}(k)) > V_2 \end{cases}$$

⋮

$$I_n(k) = \begin{cases} I_{n-1}(k) + I_{bn}(k), \text{Max}(S_{bfn}(k)) \leqslant V_2 \\ I_{n-1}(k) + I_e(k), \text{Max}(S_{bfn}(k)) > V_2 \end{cases}$$

式中:  $I_{bi}(k)$  为第  $i$  个坏点的  $I$  分量序列;  $S_{bfi}(k)$  为第  $i$  个坏点的 FID 序列。

同理可获得  $Q_n(k)$ , 则 M3 法的 FID 信号为

$$S_{FID}(k) = \frac{\sqrt{(I_n(k))^2 + (Q_n(k))^2}}{n+1} \quad (9)$$

图 7 是阈值替代叠加法对图 6 的 32 个仿真信号重新处理后的信号波形, 阈值  $V_2 = 250 \text{ nV}$ , 信号较前两种方法得到明显改善, 曲线更平滑, 纹波较小。

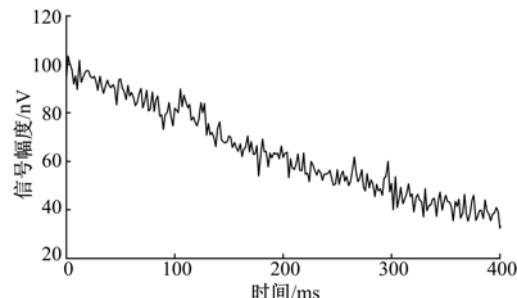


图 7 阈值替代叠加法抑制奇异噪声仿真结果

Fig.7 Simulation results of threshold-value substitution stacking method of suppressing the spike noise

表 1 为仿真 5 次阈值叠加与阈值替代叠加法叠加拟合后的信号参数比较, 可以看出, 阈值替代

表 1 两种方法消噪后拟合信号参数对比

Table 1 Simulated FID signal parameters comparison of suppressing spike noise between two methods

序号	阈值叠加法		阈值替代叠加法	
	$E/\text{nV}$	$T_2/\text{ms}$	$E/\text{nV}$	$T_2/\text{ms}$
1	107.66	404.32	101.08	398.07
2	107.67	402.77	100.93	398.83
3	107.08	406.66	101.08	397.10
4	107.20	405.76	100.96	398.31
5	108.32	404.00	101.16	397.36

叠加法获得信号的参数与标准信号误差仅为 1% 左右。

#### 2.4 差阈值替代叠加消除技术

利用阈值替代叠加方法所设定的阈值  $V_2$  必须比信号初始振幅大,否则所有信号都不符合叠加条件。因此,信号尾部出现的较小奇异噪声并不能够消除,而在核磁共振信号中,尾部的信噪比对于信号的拟合,求取信号参数十分关键,因信号微弱,也易受到幅度较小奇异噪声的干扰。差阈值替代叠加法是将无效测量信号数据与标准信号序列  $S_e(k)$  作差,设定合理差阈值  $V_3$ ,当差值超出  $V_3$  时,则用标准信号代替,本文简称 M4 法。该法叠加步骤与阈值替代叠加方法相同,只是阈值条件改变为

$$\text{Max}(|S_{bf}(k) - S_e(k)|) \leq V_3 \quad (10)$$

仿真是在图 6 的 32 个仿真信号基础上,在信号 200~400 ms 处再随机加入  $A_p$  在 0~100 nV 范围内的奇异干扰,仿真拟合后的信号参数如表 2 所示。

表 2 三种方法消噪后拟合信号参数对比

Table 2 Simulated FID signal parameters comparison of suppressing spike noise among three methods

次数	阈值叠加法		阈值替代叠加法		差阈值替代叠加法	
	E/nV	T <sub>2</sub> /ms	E/nV	T <sub>2</sub> /ms	E/nV	T <sub>2</sub> /ms
1	106.75	431.10	101.52	408.89	101.08	402.15
2	105.69	432.26	101.39	409.93	100.95	403.77
3	105.93	431.55	101.21	410.42	100.79	403.81
4	105.92	433.92	101.39	410.87	100.97	404.34
5	107.30	419.73	101.43	408.82	101.09	402.20

从表 2 可以看出,差阈值替代叠加法对强奇异干扰和对多个奇异干扰的情况,尤其是信号尾部受到干扰时,处理后拟合所得的地面核磁共振信号参数与标准信号参数误差最小,  $T_2^*$  的误差较 M2、M3 方法有了明显的提高。M4 法提高了 SNMR 信号参数的提取精度。在实际测量中,信号会受到多个奇异噪声干扰,信号尾部奇异噪声多,因此,M4 法对解决实际奇异噪声干扰问题效果更为明显。

### 3 野外试验结果对比

图 8 是 2008 年 7 月 11 日在内蒙古四子王旗测点 No. 1 的实测信号,测量时阴天并伴有雷电。测量参数为:发射电流 40 A,发射频率 2363 Hz,测量 16 次(C1~C16)。图中横坐标是信号时间

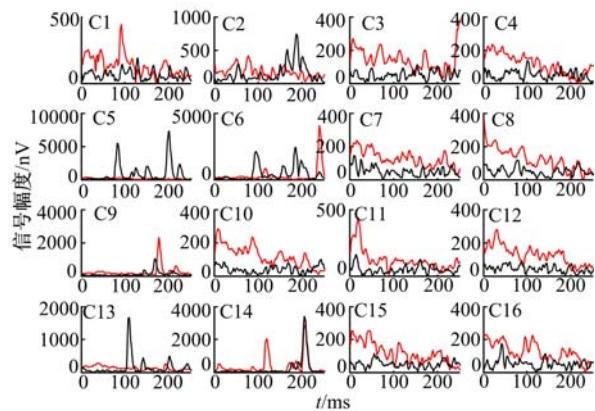


图 8 内蒙古 No. 1 发射电流 40 A 时的 16 次测量信号

Fig. 8 16 signals transmitting 40 A at No. 1 of Inner Mongolia

(ms),纵坐标是信号幅度(nV),实线为实测信号,虚线为实测噪声。由图可以看出,有 9 次测量信号受到了较大奇异噪声的干扰。

图 9 是采用 4 种消除奇异噪声方法处理的结果。M1 图、M2 图、M3 图、M4 图分别为叠加法、阈值叠加法、阈值替代叠加法、差阈值替代叠加法消噪后的信号。

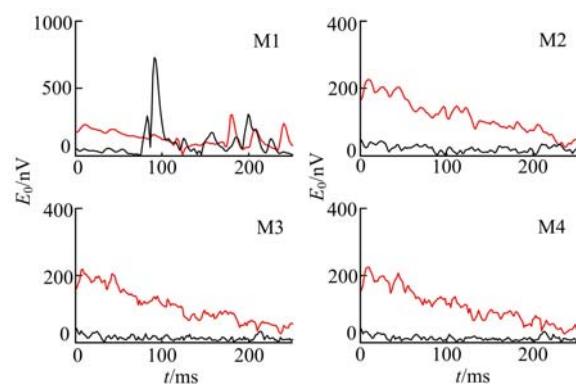


图 9 No. 1 发射电流 40 A 时 4 种消噪方法的信号对比

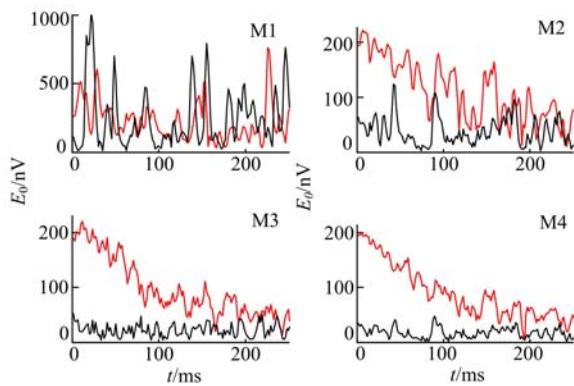
Fig. 9 Four method result comparison of suppressing the spike noise at No. 1 transmitting 40 A

从图 9 可以看出,M4 图信号平滑度最好。由于工区实际信号参数值无法得到,而求取信号参数主要受噪声及信噪比影响<sup>[8]</sup>,因此本文给出处理后的噪声和信噪比的对比,如表 3 所示。由表 3 可知,差阈值替代叠加法在压制噪声和提高信噪比方面效果最好。

图 10 为 2008 年 7 月 6 日在内蒙古四子王旗测点 No. 6 发射电流 40 A,发射频率 2372 Hz,测量 64 次获得的信号,测量时雷电干扰较大。其中 M1 法处理后,没有任何 FID 信号,噪声和信号被奇异噪声严重干扰;M2 法处理后的信号质量较

**表3 No. 1 发射电流 40 A 时的噪声和信噪比**  
**Table 3 Noise and SNR comparison at No. 1 transmitting 40 A**

方法	噪声/nV			信噪比		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
叠加法	726.04	2.80	97.76	38.30	0.08	3.79
阈值叠加法	45.88	2.42	21.04	58.17	0.95	7.42
阈值替代法	41.23	1.12	13.74	66.95	1.39	10.07
差阈值替代法	39.41	1.10	12.80	107.60	1.39	11.30



**图10 No. 6 发射电流 40 A 时 4 种消噪方法的信号对比**

**Fig. 10 Four method result comparison of suppressing the spike noise at No. 6 transmitting 40 A**

M1 法有所改善,初期信噪比较高,但尾部信号较差;M3 法处理后的信噪比和平滑度较 M2 法明显提高;M4 图的信号曲线最为平滑,波动较小,FID 信号理想。

表 4 是 4 种方法对 No. 6 数据处理后噪声和信噪比的对比结果,差阈值替代叠加法平均信噪比达到了 7.95,噪声均值为 17.34 nV,有效地抑制了奇异噪声干扰,为 SNMR 信号参数拟合提供了可靠数据。

**表4 No. 6 发射电流 40 A 时的噪声和信噪比**

**Table 4 Noise and SNR comparison at No. 6 transmitting 40 A**

方法	噪声/nV			信噪比		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
叠加法	1044.21	10.08	245.46	32.60	0.07	2.57
阈值叠加法	123.87	5.44	38.19	41.95	0.36	4.72
阈值替代法	52.26	3.81	22.05	47.05	0.65	6.21
差阈值替代	48.15	0.84	17.34	89.68	1.12	7.95

## 4 结束语

本文针对由雷电等干扰源所引起的奇异噪声,利用叠加的基本原理,根据信号的特征与奇异噪声的随机性等特点,研究了阈值替代叠加法和差阈值替代叠加法,将信号从强奇异噪声干扰中

提取出来,获得了较高信噪比的 FID 信号,适合现场实时处理。通过多次与国外仪器野外试验对比发现,国外仪器需 32~56 次叠加才能够获得可靠信号,而利用本文消噪方法所设计的 JLNMR-I 型地面核磁共振找水仪叠加 6~24 次就可获得理想的 FID 信号。因此,本研究提高了仪器测量速度和 SNMR 信号参数的提取精度,增强了核磁共振找水仪器抗恶劣电磁干扰的能力,降低了对测量环境的要求,也为对地下水资源的精确反演提供了可靠的信号参数。

## 参考文献:

- [1] Anatoly L, Pierre V. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(12): 3-19.
- [2] Anatoly L, Jean-Michel B. Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(12): 21-46.
- [3] 孙洁,晋光文,白登海. 大地电磁测深资料的噪声干扰 [J]. 物探与化探, 2000, 24(2): 119-127.
- [4] Sun Jie, Jin Guang-wen, Bai Deng-hai. The noise interference of magnetotelluric sounding data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(2): 119-127.
- [5] 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.
- [6] Wang Ying-ji, Lin Jun, Rong Liang-liang, et al. Amplifier design for the surface nuclear magnetic resonance instrument for underground water investigation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8): 1627-1632.
- [7] 娄源清,李伟. 大地电磁测量中的奇异干扰抑制问题 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(1): 493-500.
- [8] Lou Yuan-qing, Li Wei. Suppression of spike interference in magnetotelluric survey [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(1): 493-500.
- [9] Anatoly L, Pierre V. Processing of surface proton magnetic resonance signals using non-linear fitting [J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 39(2): 77-83.
- [10] Anatoly L, Pierre V. Removal of power-line harmonics from proton magnetic resonance measurements [J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 53(2-3): 103-120.
- [11] Schirov M D, Rojkowski A D. On the accuracy of parameters determination from SNMR measurements [J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 50(12): 207-216.