

doi: 10.11720/wtyht.2022.1259

张化鹏,钱卫,刘瑾,等.基于伪随机信号的磁电法渗漏模型试验[J].物探与化探,2022,46(1):198–205.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1259

Zhang H P, Qian W, Liu J, et al. Leakage model-based experimental study on magnetometric resistivity method combined with pseudo-random signal technology[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 198–205. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1259

基于伪随机信号的磁电法渗漏模型试验

张化鹏,钱卫,刘瑾,武立林,宋泽卓

(河海大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘 要: 磁电法是近些年在国内兴起的一种电磁勘探方法,该方法在探测地下渗流等长走向的良导地质体方面具有技术优势,但是其抗干扰能力差,易受外部噪声影响,一直未能推广。近年来,伪随机信号在物探领域开始广泛应用,该技术通过对冲激响应及阶跃响应进行卷积运算来达到降噪目的,可极大地提升抗干扰能力,因此,本文结合磁电法的勘探原理及伪随机辨识系统的辨识原理,提出将伪随机信号应用于磁电法中来提高其抗干扰能力,并通过渗漏模型试验来对其抗干扰情况进行分析,结合模拟计算结果验证其可行性。试验结果表明该方法降噪能力显著,可基本消除外部磁场干扰,在渗漏通道上方峰值处其相对误差小于 3%,具有极强的抗干扰能力,为今后相关探测仪器的开发奠定了基础。

关键词: 磁电法;伪随机信号;相关辨识;渗漏通道;模型试验

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0198-08

0 引言

磁测电阻率法(magnetometric resistivity method, MMR)是以地下地质体的电性差异为基础,根据电磁感应原理来观测地下电流所激发的一次磁场分量,通过异常场的分布来推断地下地质体的分布规律,从而达到寻找矿床、油气、地下水或解决其他地质问题的一种技术方法,简称磁电法。

磁电法的研究始于 20 世纪 70 年代^[1-5],由于该技术相对于传统的电阻率法在良导覆盖层下的异常体成像方面具有一定的优越性,因此得以迅速发展。在国内,磁激发极化法(magnetic induced polarization method, MIP)^[6]最先引起相关学者的关注,随后,磁电法(MMR)^[7-10]也逐渐进入人们的视野,该技术探测深度大、灵敏度高、适用范围广,是进行地质勘探的有效手段。由于该技术无接地电极,灵敏度高,受覆盖层影响较小,且在探测地下渗流等长走向的良导地质体方面具有技术优势,因此有相关学者提出

将之应用于坝基渗漏检测等工程领域。但该方法极易受到外部环境的影响,而堤坝等工程现场外部环境往往十分复杂,抗干扰能力弱成为其发展的掣肘。如何提高其抗干扰能力成为现阶段相关专家学者的重点研究方向。

近年来,无线通讯技术迅速发展,伪随机编码技术被运用于通讯行业中并获得了广泛应用。由于其强大的降噪功能,早在 1980 年即有相关学者将伪随机序列应用于电磁法勘探系统中。而进入 21 世纪后,越来越多的专家学者将目光聚集于此。2001 年,爱丁堡大学的 David Wright 提出 MTEM 系统,并于 2006 年首次将伪随机序列应用于此系统。随后在挪威 Peon 油气田,爱丁堡大学基于 MTEM 瞬变电磁系统进行了浅海勘探^[11-14],经过对比分析,证明了伪随机辨识技术可以有效提高其抗干扰能力。

在国内,柴治媛等^[15]通过数值模拟技术对可控震源技术中伪随机序列的应用效果进行了一系列的研究;张群英等^[16]将伪随机序列应用于探地雷达中,以此来提高信号的能量及分辨率;何继善院

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目“堰塞坝险情处置与开发利用保障技术与装备研发”(2018YFC1508501)

第一作者: 张化鹏(1997-),男,硕士,主要研究方向为地球物理。Email:593763490@qq.com

通讯作者: 钱卫(1963-),男,河海大学特聘教授,主要从事地球物理专业相关的教学和科研工作。Email:wei.geoserve@gmail.com

士^[17]发明了伪随机多频信号,并以此为基础创立了新型的电磁勘探方法“广域电磁法”;罗延钟等^[18-19]以维纳—何甫方程为基础发明了伪随机信号系统辨识的“第二方案”算法,并基于该算法研发了国内首款伪随机信号电法仪。

基于上述研究现状及研究背景,本文结合磁电法的勘探原理及伪随机系统辨识原理,提出将伪随机信号应用于磁电法中来提高其抗干扰能力,并通过一系列的渗漏模型试验对其可行性及抗干扰能力进行分析。

1 磁电法技术原理及伪随机系统辨识原理

1.1 磁电法技术原理

磁测电阻率法是一种三维空间电磁勘探技术,装置主要包括电流发射机与三分量磁通门磁力仪两部分,观测测量的数据主要是地下电流所激发的一次磁场分量。其具体原理是在目标地质体附近埋置电极,利用电流发射机产生电流,与大地系统构成闭合回路,由于目标地质体与周围岩体存在电性差异,因此地下电流分布存在异常,从而在空间产生异常磁场。此时在地表利用磁通门磁力仪对空间磁场进行探测,即可获得在空间范围的磁感应强度 B 。

在磁测电阻率法中,测量得到的磁感应强度 B 通常由 3 部分组成:

$$B = B_c + B_n + B_g, \tag{1}$$

式中: B 表示测量总磁感应强度的大小; B_c 表示导线中电流激发的磁场; B_n 表示磁场背景值; B_g 表示地下电流变化所引起的异常场(图 1)。其中,背景值 B_n 可另行测得,导线所激发的磁感应强度 B_c 可使用毕奥—萨伐尔定律计算解析解:

$$B_c = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\beta - \cos\alpha), \tag{2}$$

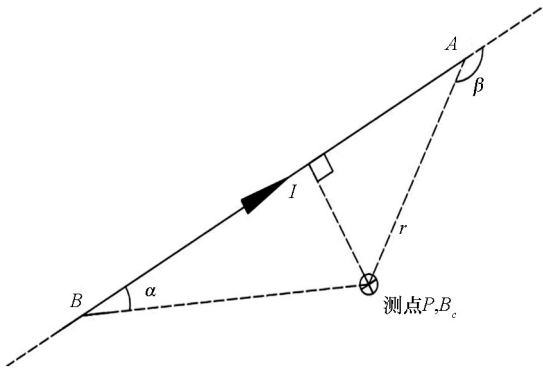


图 1 线电流磁场计算

Fig.1 Calculation of line current magnetic field

式中: μ_0 为真空磁导率; I 为电流大小; α, β 分别为导线两端点与测点之间的夹角; r 为测点到导线的距离,磁场方向符合右手定则。

通过测量可得总磁感应强度 B 与背景值 B_n ,再经过计算可得导线所激发的磁感应强度 B_c 的解析解,由此即可计算目标地质体所产生的异常场大小。

电磁勘探技术优势明显,该技术在磁场测量时其磁场接收装置不需接地,因此受沙漠、沼泽和冰川等复杂地质条件的影响较小,使得空间磁场的测量更加简单,在一些无法接地的地区进行电磁勘探成为可能。同时,由于不用接地,也避免了电极与大地接触导致的电化学反应产生的影响,且受地表覆盖层的影响较小,勘探结果更加精确。基于上述几点技术优势,该方法满足地下渗流检测、坝基渗漏检测等工程应用。

但另一方面,由于其信号相对较弱,可见磁场强度一般只有几纳特,对仪器设备的要求较高,发射系统往往需要大功率的电流发射机。且在地面进行的测量深度分辨能力不足,在实际的工程应用中具有一定的局限性^[4-5]。为克服上述缺点,本文提出将伪随机相关辨识技术应用于磁电法中,使用伪随机电流来代替传统电流,通过对冲激响应及阶跃响应进行卷积运算来达到降噪目的,极大地提高了该方法的抗干扰能力,使其适用范围大大增加。

1.2 伪随机辨识原理

伪随机系统辨识原理是根据输入、输出时间函数与系统的特点来确定系统冲激响应,进而计算其阶跃响应的一种方法。大地系统通常可看成线性时不变系统(LIT),故在该系统中,若我们人工施加电场信号为 $I(t)$,磁力仪观测计算所得的磁场强度变化为输出信号 $\Delta B(t)$, $I(t)$ 作为时间 t 的函数会随时间变化,而此时 $\Delta B(t)$ 也会相应发生变化。

对于线性时不变系统而言,此时有:

$$B(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} b(\tau) I(t - \tau) d\tau = b(t) * I(t), \tag{3}$$

式中: $b(t)$ 为该系统的冲激响应,即供电电流为单位冲击函数时该系统的相应;* 为卷积运算符号,此时通过反卷积运算可得冲激响应 $b(t)$,对 $b(t)$ 进一步进行积分即可得到大地系统的阶跃响应 $B(t)$ 。

利用上述计算可对任意给定信号的输入信号进行计算,但计算繁杂且常存在系统误差。为简化上述步骤并提高计算精度,可采用 m 序列变化的供电电流源 $I(t)$ 进行供电,使用自相关及互相关辨识计算与傅里叶变换进行降噪计算。其计算步骤如图 2,其中, $I(t)$ 为供电电流, $H(t)$ 为异常磁场, $n(t)$ 为

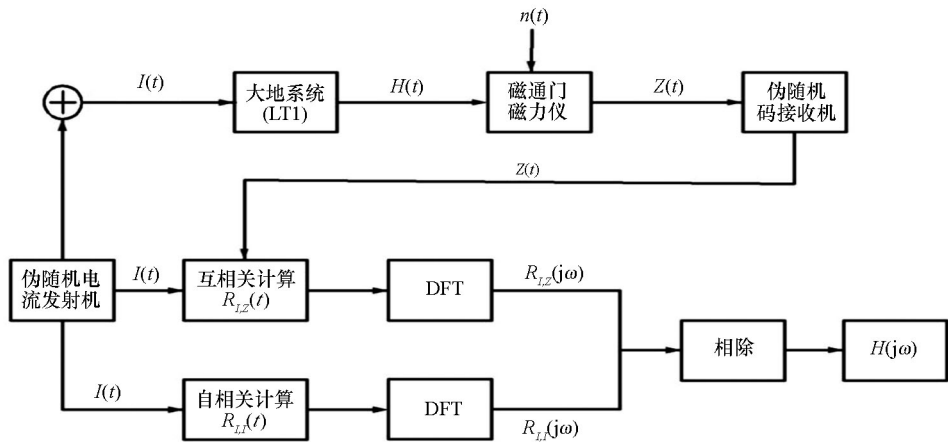


图 2 伪随机系统辨识计算步骤

Fig.2 Identification calculation steps of pseudo random system

外部噪声, $Z(t)$ 为总磁场大小, $R_{I,I}(t)$ 为发射电流的自相关函数, $R_{I,Z}(t)$ 为发射电流 $I(t)$ 与 $Z(t)$ 的互相关函数, $H(j\omega)$ 为异常磁场的频谱密度。

2 渗漏模型试验

2.1 试验仪器及装置

为检验伪随机相关辨识系统在磁电勘探技术应用中的可行性, 现进行水槽渗漏模型对比试验。本

次模型试验使用仪器由 KGR—1b 型伪随机电法仪改装而来, 主要包括伪随机电流发射机、伪随机码接收机以及磁通门磁力仪等(图 3)。

本次试验使用水槽模型进行实际模拟, 在两水槽之间设置渗漏通道来模拟良导体, 待测区域为两水槽之间 1/2 区域, 装置布置如图 4 所示。

试验所使用水槽尺寸为 0.65 m×0.45 m×0.4 m, 两水槽之间设置渗漏通道(如图 4b), 渗漏通道长度为 0.85m, 距水槽底部 0.2m; 电极位置位于两



图 3 伪随机磁电仪

Fig.3 Pseudorandom magnetoelectric meter

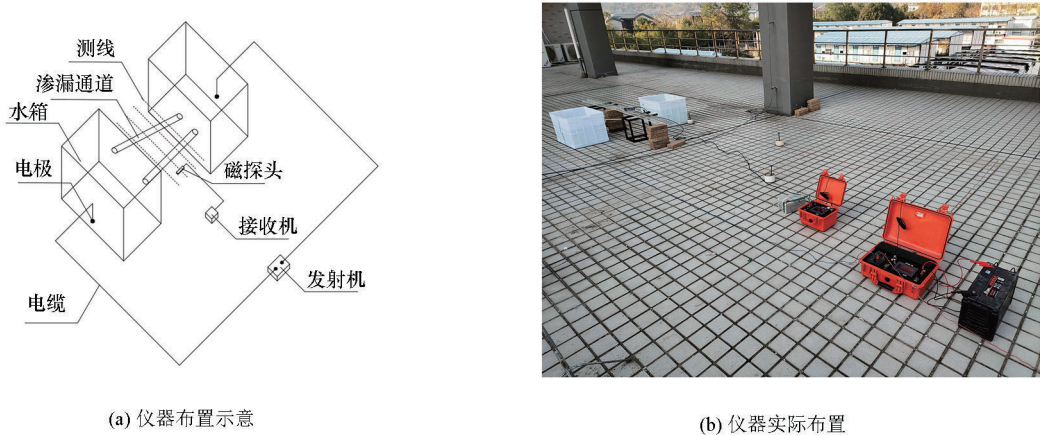


图 4 水槽渗漏模型对比试验装置布置

Fig.4 Arrangement of comparative test equipment for flume leakage model

水槽远离渗漏通道一侧底部(如图 3 所示),电缆呈半框型布置,以方便后期的模拟计算及降噪处理;测量区域位于渗漏通道中部 0.4 m×0.8 m,测线方向垂直于两电极连线方向(如图 5 所示),测线高度为渗漏通道上方 0.05 m 处,每条测线上设置测点 21 个,

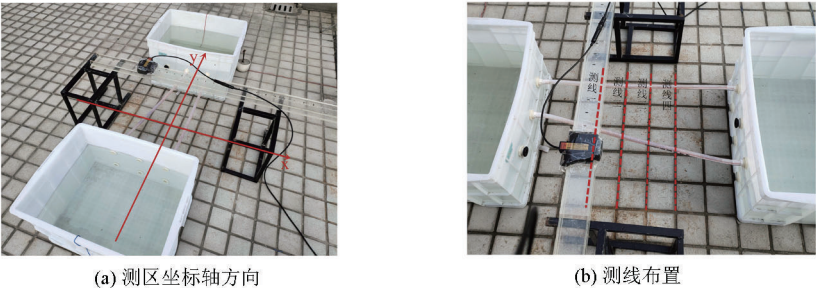


图 5 测量区域

2.2 试验步骤及注意事项

试验步骤为:① 按照上述要求布置试验模型,检查确保各仪器可正常使用;② 按要求连接仪器,打开伪随机电流发射机与接收机,使用 GPS 定位仪将发射机与接收机连接,选择 100 V 电压档,发射大小为 0.1 A 的随机交变电流;③ 按要求将三分量磁通门磁力仪与伪随机接收机相连接,磁力仪置于测点上;④ 按预先布置的测点逐点进行测量,每个测点测量两次,若两次测量结果相差小于 5%,即可进行下一点的测量;⑤ 测量完成后将接收机内数据导出,整理计算。

3 试验模拟计算及实测结果

3.1 均匀场模拟结果

现假设两水槽之间为均匀介质,建立如图 2 所示坐标系,则其 x 轴方向符合以下磁场分布公式:

$$H_n = 100I \left[\frac{y+l}{x^2 + (y+l)^2} - \frac{y-l}{x^2 + (y-l)^2} \right], (4)$$

式中: I 为供电电流大小,为 0.1 A; l 为半电极距大

4 条测线共 84 个测点;供电电压为 100 V,电流为 0.1 A 随机交变电流;测量时需尽量保证磁通门磁力仪保持水平以减少误差,且每个测点需至少测量两次以减少误差。

小,实验中为 0.875 m; x, y 为平面坐标系中任意点的坐标,坐标系如图 2 所示,经计算后绘制磁场等值线图,其磁感应强度大小如图 6 所示。

在均匀场中,其 x 轴方向磁感应强度大小关于原点对称,磁场变化均匀,具体表现为两边高、中间低,由两侧边缘向中间缓慢降低,反映在等值线图上表现为中间等值线稀疏,边缘处等值线密集;其最大值出现在测区边缘处,为 30 nT,而最小值出现在原点处,为 24 nT。

3.2 渗漏通道试验模拟结果

由于渗漏通道的存在,上述正常均匀场会遭到破坏,在渗漏通道处形成电流集中,产生磁异常。此时可根据毕奥—萨法尔定律计算其 x 轴磁场大小分布情况,根据计算结果绘制磁场等值线图(图 7)。

经计算可知,在测量区域内越靠近渗漏通道位置,其磁场值越大,越远离渗漏通道位置,其磁场值越小。与均匀场(图 6)相比,在测区边缘处几个测点上其磁感应强度相对减小,减小值为 10~20 nT;而在渗漏通道上方,其磁感应强度值迅速增大,最大值为均匀场的 7 倍左右,反映在图 7 上表现为渗漏

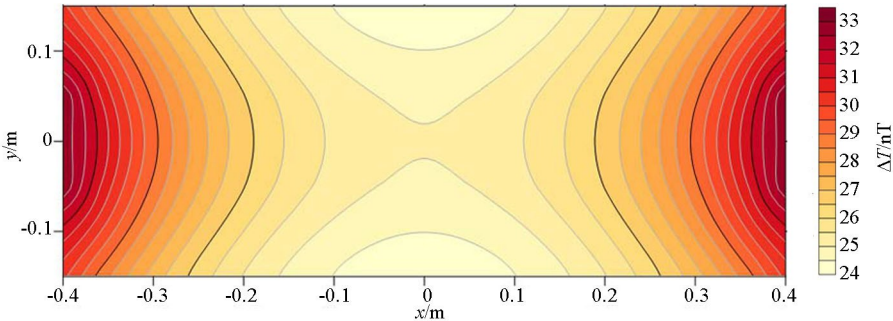


图 6 均匀场磁场等值线

Fig.6 Contour map of uniform magnetic field

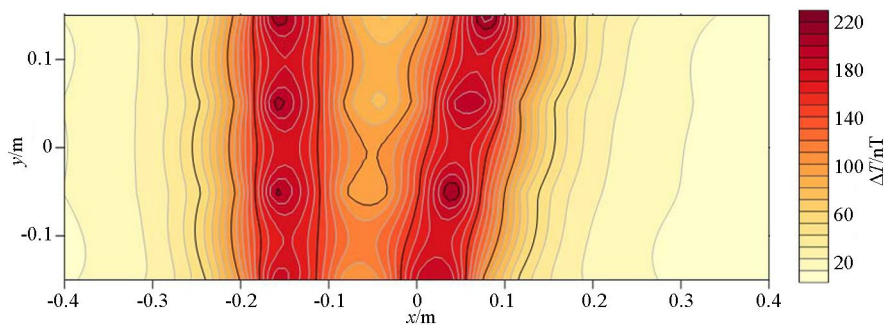


图 7 模拟场磁场等值线

Fig.7 Contour map of simulated magnetic field

通道上方磁场等值线密集,测区测量边缘处迅速变得稀疏;每条测线上均可见两处峰值,一处峰谷,两处峰值的大小大致相同,峰谷位置位于两峰值之间,将磁场等值线图与实际渗漏通道位置图进行拟合(图 8)可知,其磁场 8 处峰值位置均位于渗漏通道正上方,峰谷位置为两渗漏通道之间。

3.3 实际测量结果

按照上述要求及步骤进行试验,对数据进行处

理后绘制磁场等值线图,其结果如图 9 所示。在实际的测量结果中,磁场大小变化趋势与模拟计算结果完全一致,越靠近渗漏通道位置,其磁场值越大,越远离渗漏通道位置,其磁场值越小,磁感应强度大小由渗漏通道上方向两侧迅速降低。其磁感应强度峰值位置分别为测点 7、12、28、33、49、55、70、77,峰谷位置分别为测点 9、31、52、73,与模拟计算结果基本一致,其磁感应强度大小也基本一致。将测量结

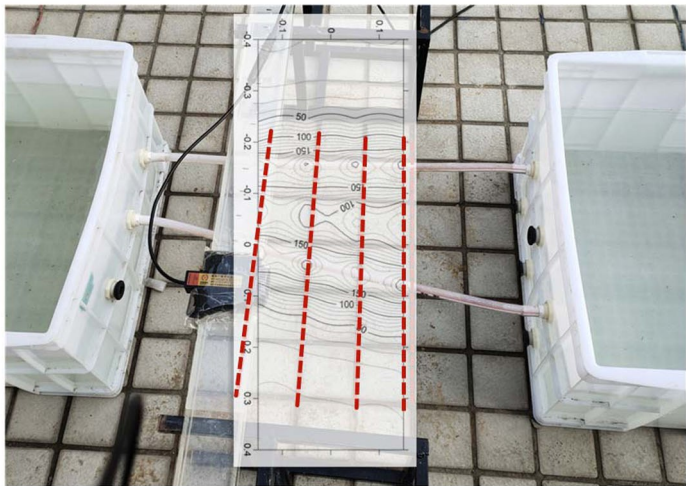


图 8 模拟拟合

Fig.8 Simulation fitting diagram

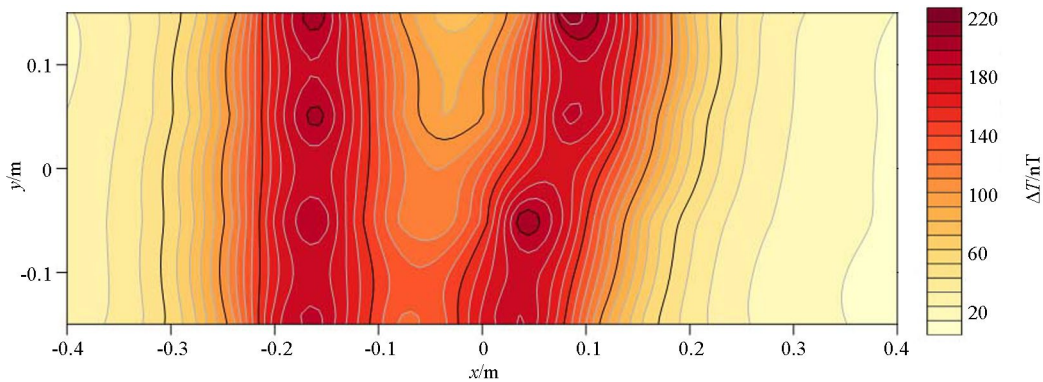


图 9 实测磁场等值线

Fig.9 Contour map of measured magnetic field

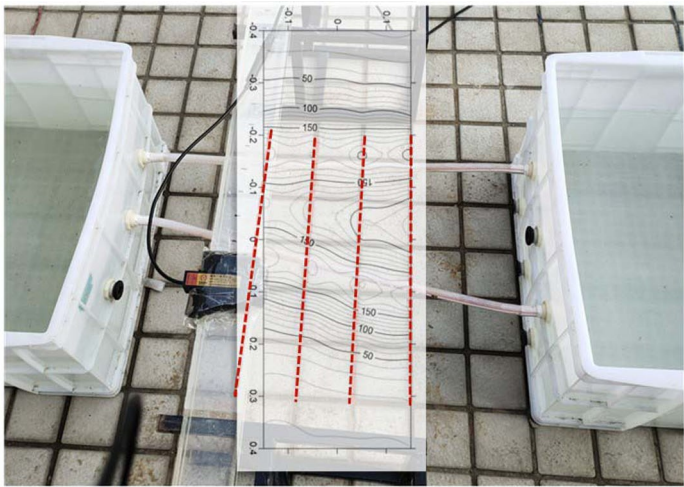


图 10 实测拟合

Fig.10 Actual measurement fitting diagram

果与实际渗漏通道位置进行拟合,其结果如图 10 所示。

3.4 结果对比分析

通过图 7 与图 9 中磁场等值线的形态对比以及图 8 与图 10 中磁感应强度峰值位置及衰减情况的对比可以看出,实际的测量结果与进行的模拟计算结果大致相同,变化趋势基本一致。为更直观地比

较均匀场、模拟场及实测场的磁感应强度变化趋势,现根据计算及测量结果绘制 4 条测线的磁感应强度变化图(图 11)。

由 4 条测线的磁感应强度变化趋势可知,与均匀场相比,当存在渗漏通道(电流集中)时其磁感应强度会剧烈变化,具体表现为在远离渗漏通道位置的地方,其磁感应强度会相对减小,而在靠近渗漏通

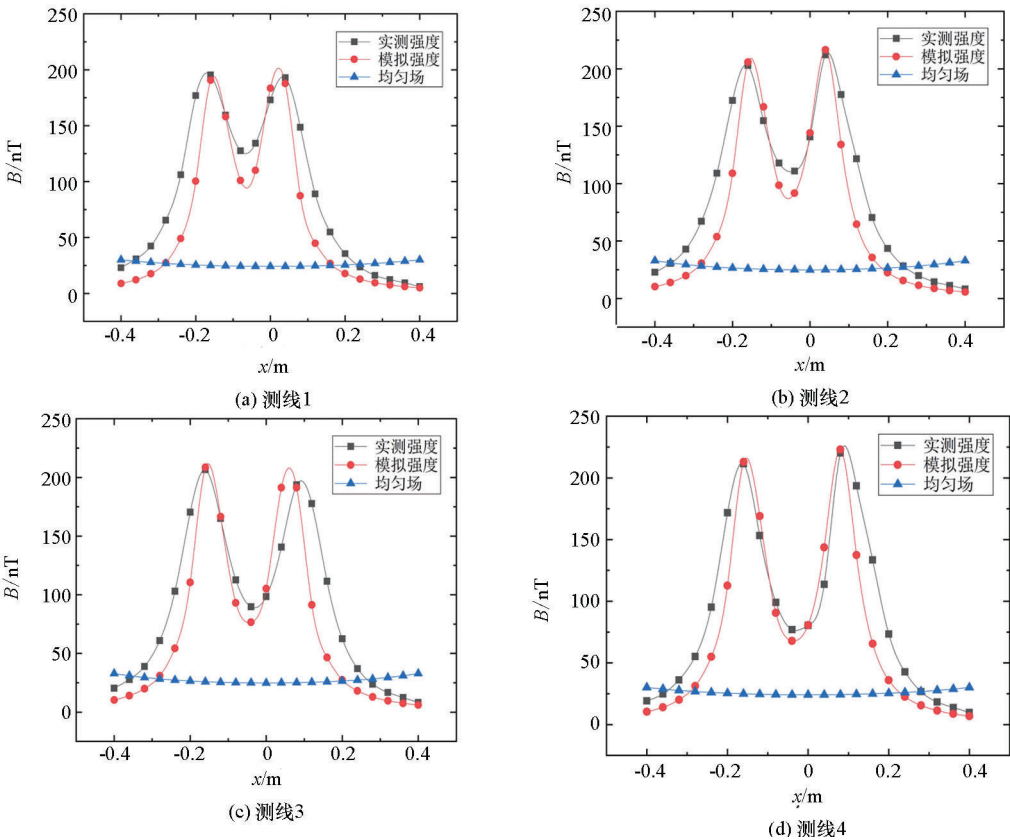


图 11 磁感应强度变化曲线

Fig.11 Variation curve of magnetic induction intensity

道位置的时候,其磁感应强度会迅速增加,在两渗漏通道上方达到峰值;与模拟场相比,实测场的变化趋势与模拟场基本相同,但数值上仍存在一定误差,具体表现为在远离渗漏通道位置的地方,实测强度会比模拟强度普遍偏大,越靠近渗漏通道位置,其误差越小,而在渗漏通道位置正上方,其误差达到最小,两者基本相同。

为统计与量化实测结果与模拟计算结果之间的误差,现使用相对误差公式及均方根误差公式对 8 处峰值磁感应强度进行计算分析:

$$\delta = \frac{\eta_{ai} - \eta'_{ai}}{\eta'_{ai}} \times 100\%, \tag{5}$$

$$M = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\eta_{ai} - \eta'_{ai})^2}, \tag{6}$$

式中: δ 为相对误差; M 为均方根误差; N 为参加统计计算的测点数量; η_{ai} 为第 i 个点的测量所得磁感应强度值; η'_{ai} 为模拟计算所得磁感应强度值。经统计计算,在 8 处峰值处的数据及相对误差如表 1 所示(磁感应强度 B 一栏中左侧为测量结果 η_{ai} ,右侧为计算结果 η'_{ai})。

表 1 峰值处磁感应强度数据

Table 1 Magnetic induction data at peak value

测点	B/nT		相对误差 $\delta/\%$
	测量结果 η_{ai}	计算结果 η'_{ai}	
7	195	190	2.63%
12	192	187	2.67
28	202	205	-1.46
33	212	216	-1.85
49	206	208	-0.96
55	193	191	1.05
70	211	212	0.47
77	220	223	1.35

由表 1 数据计算可得:

$$M_{\max} = 3.64,$$

即 8 处峰值的测量结果与计算结果的均方根误差为 3.64。

由 8 处峰值处的计算分析可知,在 8 处峰值处测量所得的磁感应强度与模拟计算所得的磁感应强度均方根误差为 3.64,其相对误差均在 3% 以内,证明了伪随机信号可应用于磁电法中,且降噪能力显著。但在远离峰值(渗漏通道)位置处,其误差较大,现分析原因如下:

1) 电缆中电流的干扰,采用伪随机信号可排除外界电磁干扰,但电缆内的供电电流变化规律与渗

漏通道中的电流完全一致,不能屏蔽;

2) 磁力仪探头放置时未保证与测点完全重合;

3) 其他原因,外部可能存在的与试验电流频率一致的磁场干扰。

4 结 论

本文基于磁电法的勘探原理及伪随机系统辨识原理设计了一系列的渗漏模型试验,并通过渗漏模型试验对其可行性及抗干扰情况进行了分析,得出以下结论:

1) 通过水槽渗漏模型试验验证了伪随机信号应用于磁电法中的可行性,试验结果表明该方法降噪能力显著,可基本屏蔽外界电磁场的干扰;

2) 实际的测量结果与模拟计算的结果基本相同,将磁场等值线图与渗漏通道位置进行拟合,其峰值位置与渗漏通道位置完全吻合;对峰值处的模拟计算结果与实际测量结果进行均方差计算,其误差小于 3%,证明该方法完全满足相关工程要求,为相关仪器的开发奠定了基础;

3) 伪随机信号可基本消除外部磁场干扰,具有极强的抗干扰能力,但该技术不能屏蔽供电电缆内部电流所产生的磁场,因此在实际的试验及生产过程中应将供电电缆成半框型布置,在测量完成后需通过计算来去除电缆自身所带来的影响,以提高精度。

参考文献(References):

[1] Nabighian M N, Oppliger G L, Edwards R N, et al. Cross-hole magnetometric resistivity (MMR) [J]. The Leading Edge, 1984, 49(8): 1313-1326.

[2] Fathianpour N, Heinson G, White A. The total field magnetometric resistivity (TFMMR) method: Part 1: Theory and 2.5D forward modelling [J]. Exploration Geophysics, 2005, 36(2): 181-188.

[3] Edwards R N. The cross-hole magnetometric resistivity (MMR) response of a disc conductor [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 32(5): 955-969.

[4] Edwards R N, Lee H, Nabighian M N. On the theory of magnetometric resistivity (MMR) methods [J]. Geophysics, 2012, 43(6): 1176-1203.

[5] Butler S L, Zhang Z. Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using Comsol [J]. Computers and Geosciences, 2016, 87(2): 1-10.

[6] 励宝恒,王式铭.磁激发极化法[J].物探与化探,1979,3(4):68-73.

Li B H, Wang S M. Magnetic induced polarization method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1979, 3(4): 68-73.

[7] 傅良魁.磁电勘探法原理[M].北京:地质出版社,1984.
Fu L K. Principle of magnetoelectric exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.

[8] 杨建文.起伏地形点电源地下传导电流磁场表达式:磁电阻率法地形改正[J].桂林冶金地质学院学报,1991,11(1):77-87.
Yang J W. Expression of magnetic field of underground conduction current of ups and downs point power supply: terrain correction by magnetoresistance method [J]. Journal of Guilin Institute of Metallurgical Geology, 1991, 11(1): 77-87.

[9] 邓靖武.磁电法正演理论研究[D].北京:中国地质大学(北京),2005.
Deng J W. Forward theory study of magnetoelectric resistivity and induced polarization method [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2005.

[10] 翁爱华,李斯睿,杨悦,等.磁电法基本原理、发展现状及前景展望[J].吉林大学学报:地球科学版,2017,47(6):1838-1854.
Weng A H, Li S R, Yang Y, et al. Basic principle, current status and prospect of magnetoelectric resistivity [J]. Journal of Jilin University:Geoscience Edition, 2017, 47(6): 1838-1854.

[11] Ziolkowski A, Wright D. Removal of the airwave in shallow-marine transient EM data [J]. Seg Technical Program Expanded Abstracts, 2007, 26(1): 534.

[12] Ziolkowski A, Hobbs B A, Wright D. Multitransient electromagnetic demonstration survey in France [J]. Geophysics, 2007, 72(4): F197-F209.

[13] Ziolkowski A, Parr R, Wright D, et al. Multitransient electromagnetic repeatability experiment over the North Sea Harding field [J]. Geophysical Prospecting, 2010, 58(6): 1159-1176.

[14] Ziolkowski A. Wiener estimation of the Green's function [J]. Geophysics, 2013, 78(5): W31-W44.

[15] 柴治媛.可控震源伪随机扫描方法与地震响应的数值模拟[D].长春:吉林大学,2007.
Chai Z Y. Pseudo-random sweeping method and numerical simulation for seismic response based on a vibrator [D]. Changchun: Jilin University, 2007.

[16] 张群英,方广有.伪随机序列编码脉冲信号在探地雷达中的应用研究[J].电子与信息学报,2011,33(2):424-428.
Zhang Q F, Fang G Y. The study of pseudo random sequence's application to GPR [J]. Journal of Electronics and Information, 2011, 33(2): 424-428.

[17] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010.
He J S. Wide area electromagnetic method and pseudo random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[18] 罗延钟,陆占国,孙国良,等.伪随机信号电法仪器的“第二方案”算法[J].地球物理学进展,2016,31(6):2604-2608.
Luo Y Z, Lu Z G, Sun G L, et al. Algorithms of second solution for instruments of electrical and electromagnetic prospecting using pseudo random signal [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2604-2608.

[19] 罗延钟,陆占国,孙国良,等.相关辨识抗干扰性的再认识[J].地球物理学进展,2020,35(2):760-766.
Luo Y Z, Lu Z G, Sun G L, et al. Recognition of the anti-interference of correlation identification [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 760-766.

Leakage model-based experimental study on magnetometric resistivity method combined with pseudo-random signal technology

ZHANG Hua-Peng, WEI Qian, LIU Jin, WU Li-Lin, SONG Ze-Zhuo
(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The magnetoelectric resistivity (MMR) method is a type of electromagnetic exploration method popular in China in recent years. It enjoys technical advantages in detecting long highly conductive geological bodies such as underground seepages. However, it is yet to be widely applied since it suffers poor anti-interference ability and is liable to be affected by external noises. In recent years, the pseudo-random signal technology has been widely used in the field of geophysical exploration. It allows noises to be reduced through the convolution operation of impulse and step responses, thus greatly improving the anti-interference ability. Based on the exploration principle of the magnetoelectric resistivity method and the principle of the pseudo-random identification system, this paper proposes the method of applying the pseudo-random signal technology to the magnetoelectric resistivity method to improve the anti-interference ability of the latter. Meanwhile, it analyzes the anti-interference effects through leakage model-based experiments, which have verified the feasibility of the proposed method. As indicated by the experimental results, the proposed method has remarkable noise reduction ability and can roughly eliminate the interference of external magnetic fields. Meanwhile, the relative errors at peaks above the leakage channel were less than 3%, indicating extremely strong anti-interference ability. This study lays a basis for the future development of related detection instruments.

Key words: magnetoelectric resistivity (MMR) method; pseudo random signal; correlation identification; leakage passage; model-based test

(本文编辑:王萌)