

doi: 10.11720/wtyht.2022.1424

吴北辰, 潘洋润奕, 程久龙, 等. 瞬变电磁法超小线圈并联式发射回线设计实验[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 934-939. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1424>

Wu B C, Pan Y R Y, Cheng J L, et al. Design and test of the parallel ultra-small transmitter loop used in the transient electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 934-939. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1424>

瞬变电磁法超小线圈并联式发射回线设计实验

吴北辰, 潘洋润奕, 程久龙, 王辉, 姚娣, 庞肖颖

(中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对浅层或矿井瞬变电磁法探测中发射系统电源电压有限使发射磁矩受限, 而发射回线的寄生电感导致电流关断时间过长的的问题, 设计了瞬变电磁法超小线圈并联式发射回线, 通过线圈的并联来增大发射磁矩, 再通过外加电阻等方式减小关断时间。从理论上对常规发射线圈与并联式发射线圈建立了等效电路模型进行分析, 并对并联式发射线圈与常规发射线圈进行了实验对比测试。结果表明: 并联式发射线圈能有效增大发射磁矩, 进而减小关断时间。本设计对减少浅层或矿井瞬变电磁法勘探盲区、加大勘探深度具有指导意义。

关键词: 瞬变电磁法; 并联式发射回线; 关断时间; 发射磁矩; 超小线圈

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)04-0934-06

0 引言

瞬变电磁法(TEM)或称时间域电磁法, 具有探测深度较大、适应能力强、应用领域广等优点, 广泛用于资源调查、工程地质、水文地质、环境地质等领域^[1-3]。应用于浅层或矿井瞬变电磁法的超小线圈是一种便于在井下安装使用的、直径小于 10 cm 的空心线圈^[2], 但存在发射磁矩受限、关断时间过长等问题。瞬变电磁法仪器关断电流时存在的关断时间, 造成了浅层勘探的盲区^[4], 关断时间越短, 盲区范围越小^[5]。但从发射磁矩的角度看, 超小线圈需要较大的发射磁矩来保证探测深度和接收信号的强度, 由于存在电源电压等限制, 一般只能通过增加线圈匝数来增大发射磁矩, 而这又会导致关断时间的延长, 形成了超小线圈增大发射磁矩与减小关断时间两种技术要求的矛盾关系。

针对关断时间的问题, 赵海涛等设计了恒压钳位发射机电路^[6], 王广君等通过为线圈设计放电回路的方式减小关断时间^[7], 吴羽珩则进一步设计了关断时间控制电路, 以实现下降沿的稳定可控^[8]。此外, 等值反磁通等方法也正在逐渐得到应用^[9-10]。

综上所述, 瞬变电磁法超小线圈信号发射时, 通常要求能增大发射磁矩并减小关断时间^[11]。本文针对该发射要求, 提出并联式发射回线, 以提升瞬变电磁法超小线圈的发射效果。

1 常规发射线圈的等效电路模型

多匝线圈回路的基本等效电路如图 1 所示。 L 为总电感; R 为绕组交流电阻; C 为分布电容^[12], 由于其影响相对较小, 在下文分析中不予考虑。

可以将单个常规发射线圈看作由 n 个相同的子发射线圈串联而成^[13], 任一子线圈的大小和空间位置都和整个原线圈相同, 但匝数为原线圈的 $1/n$ 。子线圈等效为 LR 电路。建立如图 2 所示的线圈放电时的等效电路模型进行分析, 图中 $R_n = R$, 为子线圈交流电阻; $L_n = L$, 为子线圈电感; i 为线圈中的电流; U_c 为钳位电压。

设 M 为任意 2 个子线圈之间的互感系数, U 为电源电压, 则在分析其关断电流时, 可对等效回路列出如下方程:

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2022-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41974088); 中国矿业大学(北京)大学生创新训练项目(C202002180)

第一作者: 吴北辰(2000-), 男, 研究方向为瞬变电磁法。Email: bei_chen_wu@163.com

通讯作者: 程久龙(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事应用地球物理的科研和教学工作。Email: JLCheg@126.com

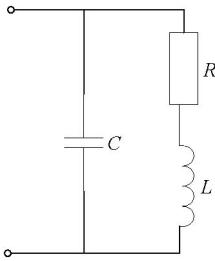


图 1 多匝线圈的基本等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of the multi-turn loop

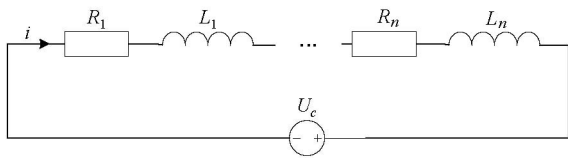


图 2 常规发射线圈等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of the common transmitter loop

$$\begin{cases} U_c + n[L + (n - 1)M] \frac{di}{dt} + nRi = 0, \\ i(0) = \frac{U}{nR}, \end{cases} \quad (1)$$

解得电流

$$i = -\frac{U_c}{nR} + \left(\frac{U}{nR} + \frac{U_c}{nR}\right)e^{-\frac{R}{L+(n-1)M}t}. \quad (2)$$

令 $i=0$, 得关断时间 t_{of} 和初始发射电流 I_0 为

$$t_{of} = \frac{L + (n - 1)M}{R} \ln \frac{U_c + U}{U_c}; \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{U}{nR}. \quad (4)$$

2 并联式发射线圈的等效电路模型

本文设计的并联式发射线圈,即是上述串联的 n 个子线圈改为并联, n 个子线圈作为一束线的 n 股子线共同缠绕在载体上。为控制各子线圈的线圈参数和空间位置等效,其线圈缠绕方式如图 3 所示。放电时的等效电路模型如图 4 所示。

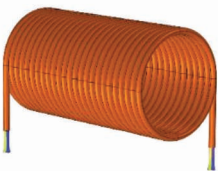


图 3 并联式发射线圈示意

Fig.3 Schematic diagram of parallel transmission loop

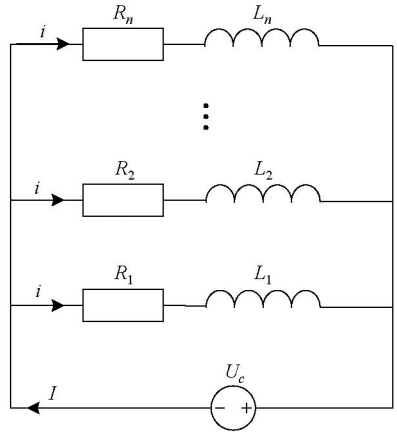


图 4 并联式发射线圈等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of the parallel transmitter loop

设 M 为任意 2 个子线圈之间的互感系数, U 为电源电压, I 为干路电流, 由于各子线圈参数和空间位置基本等效, 因此 2 个子线圈中的电流 i 也相等。同理, 对该等效回路列出如下方程:

$$\begin{cases} U_c + [L + (n - 1)M] \frac{di}{dt} + iR = 0, \\ i(0) = \frac{U}{R}, \end{cases} \quad (5)$$

解得电流

$$i = -\frac{U_c}{R} + \left(\frac{U}{R} + \frac{U_c}{R}\right)e^{-\frac{R}{L+(n-1)M}t}. \quad (6)$$

令 $i=0$, 得并联式线圈的关断时间 t'_{of} 及各线圈初始发射电流 I'_0 为:

$$t'_{of} = \frac{L + (n - 1)M}{R} \ln \frac{U_c + U}{U_c} = t_{of}; \quad (7)$$

$$I'_0 = i(0) = \frac{I(0)}{n} = \frac{U}{R} = nI_0. \quad (8)$$

以上分析表明: 并联式发射线圈的关断时间不变; 而初始发射电流将增大 n 倍, 控制子线圈相对空间位置保持不变, 则发射磁矩将增大为原线圈的 n 倍。需要注意的是, 初始干路电流将增大为原线圈的 n^2 倍。且由于并联式设计不改变线圈电感与电阻的比值, 故关断电流的线性度保持不变^[8]。

综上所述, 并联式发射线圈能在不改变电源电压等其他条件的前提下, 增大线圈的发射磁矩。从理论分析来看, 由于 n 的取值可变, 且各子线圈间的连接方式可在电路上灵活设计和控制, 因此并联式发射回线的发射磁矩非常便于调节。特别地, 对于瞬变电磁法超小线圈在矿井下使用时, 由于干路电流存在上限, 并联支路数 n 一般只能取 2。

3 关断时间的减小方法

并联式发射线圈的设计提供了增大发射磁矩的方案,在此基础上,基于瞬变电磁法发射磁矩与关断时间的一般关系,对于发射机关断时间随线圈参数改变的瞬变电磁系统,本文对并联式发射线圈进一步设计了如下 3 种方法来减小关断时间。

方法一:改变线圈设计。一般而言,超小线圈的发射磁矩和关断时间都与单匝发射线圈的面积、线圈匝数呈正比。因此,当有足够大的发射磁矩时,可以在线圈设计时,通过减小单匝发射线圈的面积和线圈匝数来减小关断时间(同时会减小发射磁矩)。

方法二:在线圈的放电回路中外加入电阻 R_0 , 如图 5 所示。

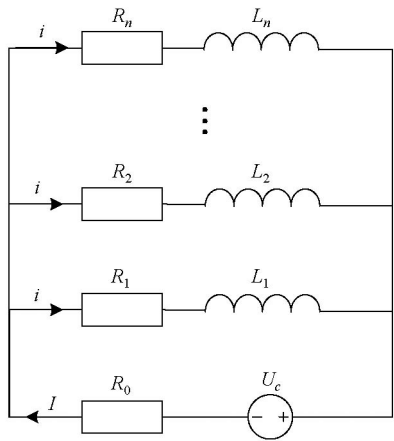


图 5 加入电阻后的并联式发射线圈等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of the parallel transmitter loop with added resistance

设：
$$R_0 = \frac{k-1}{n}R \quad (k \geq 1), \tag{9}$$

类似列式计算可得按方法二所得关断时间：

$$t_{\text{of}}^{(1)} = \frac{L + (n - 1)M}{kR} \ln \frac{U_c + kU}{U_c} = \frac{1}{\alpha} t_{\text{of}}, \tag{10}$$
$$\alpha = k \log \left(\frac{U_c + kU}{U_c} \right) \left(\frac{U_c + U}{U_c} \right).$$

由焦耳定律可知,在放电回路中外加的电阻增大了回路的电阻值,从而提高了电流关断期间线圈磁场能量耗散的速度^[7],所以在其他条件维持不变的前提下,使关断时间减小为之前的 $\frac{1}{\alpha}$ 。需要注意的是,关断电流的线性度也会有所下降^[8]。对于超小线圈而言,关断时间过长是其严重的技术瓶颈,因此,该方法是解决其关断时间问题的一种可行方案。

方法三:直接在线圈上外接入电阻 R_0 ,或调大子线圈电阻 R 。同理,当 k 满足式(8)假设条件时,可按方法三计算得到关断时间 $t_{\text{of}}^{(2)}$ 和各线圈的初始发射电流 $I_0^{(2)}$ ：

$$t_{\text{of}}^{(2)} = \frac{L + (n - 1)M}{R + nR_0} \ln \frac{U_c + U}{U_c} = \frac{1}{k} t_{\text{of}}, \tag{11}$$

$$I_0^{(2)} = \frac{U}{R + nR_0} = \frac{n}{k} I_0. \tag{12}$$

即该设计能使关断时间减小为之前的 $\frac{1}{k}$,但发射电流只增大 $\frac{n}{k}$ 倍。

该设计是在发射机外部电路直接加入电阻,比只在线圈的放电回路中设计电阻更加方便灵活,且发射电流随加入电阻阻值变化,因此连续可变。该设计主要针对于需要灵活调节关断时间与发射磁矩的应用场合。

需要注意的是,此时关断电流的线性度会有所下降,并且直接加入的电阻在电源供电期间产生的焦耳热会导致关断电流形态大小的不稳定。根据焦耳定律,在发射电流等其他条件相同时,由于等效电阻为常规发射线圈的 k 倍,该设计的线圈上产生的焦耳热为常规发射线圈的 k 倍。因此,该方案只能在小范围内调高电阻(一般 $k \leq 2$),在线圈的散热问题上还有待改进。

4 实验测试

为了验证上文分析的正确性,验证并联式发射线圈的实际效果,进行了线圈发射实验测试。实验工作场景如图 6 所示。

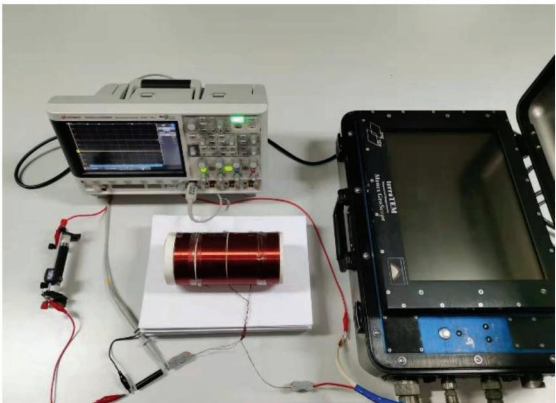


图 6 实验工作场景

Fig.6 Test scenario

使用澳大利亚 Terra-TEM 瞬变电磁仪进行发射,图 6 中右下方为发射机的线圈接线端。采用 Keysight DSOX3034T 示波器,使用电压探头检测和记录发射电流波形,通过测量图中定值电阻上的电压来测量电流。滑动变阻器用来控制外加电阻值。中央为超小线圈,以左右 2 个对称的绕组线圈为线圈参数基本相同的子线圈。此时,2 个子线圈相对空间位置同样等效,当线圈整体空间形态相同时,对其进行同样的等效电路分析可知,与上文的多股缠绕方式没有区别,且缠绕方式更简单,但该线圈缠绕方式仅可在只有 2 条并联支路的时候采用。测试时,线圈离仪器和桌面都保持一定距离,以确保线圈周围没有低阻体等因素影响关断时间。

实测具体测试条件为:单匝线圈面积为 65 cm²,导线直径为 0.49 mm,导线电阻约为 73 Ω/km,测试电流波形时示波器的带宽为 350 MHz、采样速率为 5 GSa/s,采用直流耦合。

4.1 增大发射磁矩效果测试

首先测试无外加电阻的并联式发射回线(并联支路数 $n = 2$) 对发射磁矩的增大效果。由式(7)、(8)可知,此时并联式发射线圈的关断时间与原线圈相等,而初始发射电流将增大为原线圈电流值的 2 倍。当子线圈电感值 $L = 1.58$ mH,电阻值 $R = 11.52$ Ω,线圈面积为 1.3 m² 时,测得 2 种线圈的关断电流波形及对比如图 7 所示。

如图 7a、b 右侧数据所示,ΔX 与 ΔY 分别为关断时间和定值电阻上的电压值,原线圈关断时间约为 112 μs,初始发射电流经计算约为 0.944 A;并联后关断时间约为 101 μs,初始发射电流经计算约为 1.77 A。关断电流对比如图 7c 所示,可以看出:并联式发射线圈的发射电流约为常规发射线圈的 2 倍,且 2 个子线圈中的关断电流波形曲线完全重合,保证了线圈的实际发射效果。

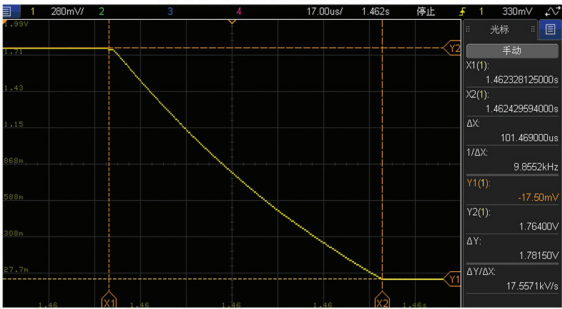
继续更换不同电感、电阻值的子线圈,分别组成上述并联式发射线圈和常规发射线圈,并测量其初始发射电流值及关断时间,结果见表 1。

表 1 不同发射线圈的初始发射电流值对比
Table 1 Comparison of initial current of different transmitting loops

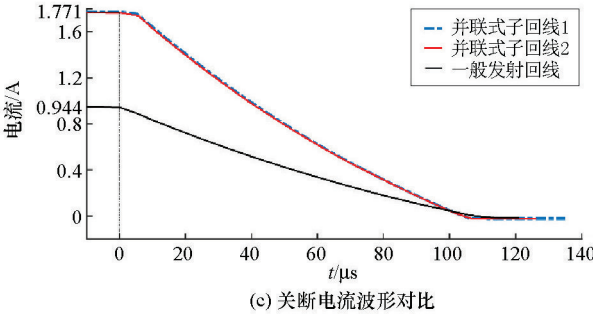
子回线参数		一般发射回线发射电流值 I_0/A	并联式发射回线发射电流值 I_0'/A	I_0/I_0'
L/mH	R/Ω			
1.58	10.34	1.043	1.910	55%
7.98	6.30	1.776	3.065	58%
7.98	5.30	2.064	3.601	57%
1.58	11.52	0.953	1.782	53%



(a) 实测关断电流波形(原线圈)



(b) 实测关断电流波形(并联后)



(c) 关断电流波形对比

图 7 关断电流波形及对比

Fig.7 Turn-off current waveform and comparison

如表 1 所示,初始电流比值与理论值(1/2)的相对误差约为 10%,同时,实验中并联后的关断时间也稍小于理论值。考虑到散热导致线圈电阻等参数的变化、等效电路模型的模型误差以及实验测量瞬变电磁仪电源电压的变化等因素的影响,以上误差均在可接受的范围内。

4.2 关断时间减小效果测试

考虑到本文所提出关断时间的减小方法在原理上较为简单,因此只对上节的第三种关断时间减小方法进行测试。取 $k = 2(n = 2)$,由式(11)、(12)可知,此时并联式发射线圈的关断时间将减小为原线圈的 1/2,而初始发射电流维持不变。

当子线圈电感 $L = 1.58$ mH,电阻 $R = 5.76$ Ω,线圈面积为 1.3 m² 时,测得 2 种线圈的关断电流波形及对比如图 8 所示。

如图 8a、b 所示,原线圈关断时间约为 200 μs,初始发射电流约为 1.83 A。并联后关断时间约为 101 μs,初始发射电流约为 1.78 A,即并联式发射线

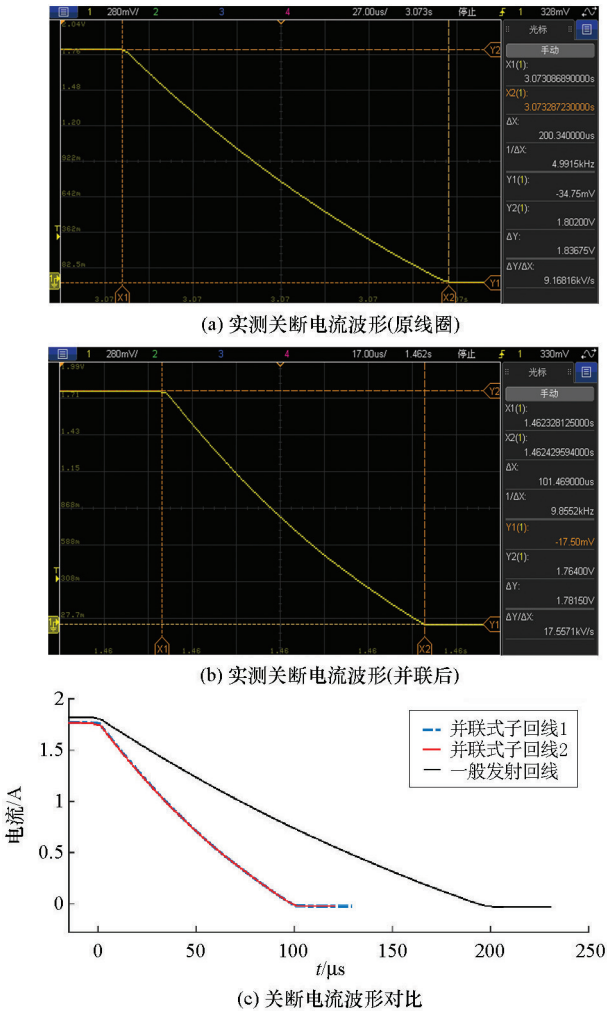


图 8 关断电流波形及对比

Fig.8 Turn-off current waveform and comparison

圈的关断时间约为常规发射线圈关断时间的 1/2。关断电流对比如图 8c 所示。

继续更换不同电感、电阻值的子线圈,分别组成上述并联式发射线圈和常规发射线圈,并测量其关断时间。汇总结果(表 2)显示:关断时间比值与理论值(1/2)的相对误差在 10% 以下;并联后发射线圈的发射电流初始值与理论值的相对误差在 5% 以下。考虑散热导致线圈电阻等参数变化等因素的影响,以上误差在可接受的范围内。

表 2 不同发射线圈的关断时间对比

Table 2 Comparison of turn-off time of different transmitting loops

子回线参数		一般发射回线关断时间	并联式发射回线关断时间	t'/t'
L/mH	R/Ω	$t/\mu\text{s}$	$t'/\mu\text{s}$	
1.58	5.76	201	101	50%
1.58	4.17	221	115	52%
7.98	3.15	2272	1051	46%
7.98	2.65	2641	1239	47%

5 结论及讨论

针对瞬变电磁法超小发射线圈,设计了并联式发射线圈,从理论上对常规发射线圈和并联式发射线圈建立了等效电路模型进行分析,得到了并联式发射线圈能在不改变电源电压等其他条件的前提下,增大线圈的发射磁矩,并能通过改变线圈设计和加入外加电阻等方法进而减小关断时间的结论。分别针对并联式发射线圈增大发射磁矩和减小关断时间的效果,将其与常规发射线圈进行了对比测试,结果表明并联式发射线圈能有效增大发射磁矩和减小关断时间。从理论分析来看,针对不同情况下对发射线圈的发射磁矩和关断时间的要求,可以通过在电路上控制并联的子线圈数、调节外加电阻值数量、改变线圈设计等来加以调节。因此,对于浅层或矿井瞬变电磁仪超小发射线圈发射效果的提升具有重要的指导意义。

针对干路电流过大的问题,并联式线圈还需要进行改进。为使子线圈中的关断电流相同,并联式线圈的规格要求较严格,子线圈间线圈电阻值误差要求限制在 $\pm 0.1\ \Omega$ 以内。

通过线圈并联来提升发射电流的设计,对于其他瞬变电磁法发射回线发射效果的提升也有一定的借鉴意义。

致谢:感谢中国科学院空天信息创新研究院刘丽华研究员为本文电路原理分析等部分给出的指导建议。

参考文献(References):

[1] 牛之珏.时间域电磁法原理[M].长沙:中南大学出版社,2007.
Niu Z L. The theory of time-domain electromagnetic methods [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2007.

[2] 程久龙,温来福,贾吉哲,等.矿井瞬变电磁小线圈发射和接收波场特征分析与应用[C]//中国地球科学联合学术年会论文集(三十),2016:5-8.
Cheng J L, Weng L F, Jia J Z, et al. Analysis and application of transmitting and receiving wave field characteristics of mine transient electromagnetic small coil [C]//Proceedings of China Geosciences Joint Academic Conference (30), 2016:5-8.

[3] 张莹莹.电性源瞬变电磁法综述[J].物探与化探,2021,45(4): 809-823.
Zhang Y Y. Review on the study of grounded-source transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 809-823.

[4] 杨海燕,岳建华.矿井瞬变电磁法理论与技术研究[M].北京:科学出版社,2015.
Yang H Y, Yue J H. The theory and technique of mine transient e-

electromagnetic method [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[5] 刘丽华,吴凯,耿智,等.有源恒压钳位瞬变电磁发射机技术[J].地球物理学进展,2016,31(1):449-454.

Liu L H, Wu K, Geng Z, et al. Active constant voltage clamping technology for transient electromagnetic transmitter [J]. Progress in Geophysics, 2016,31(1):449-454.

[6] 赵海涛,刘丽华,吴凯,等.恒压钳位高速关断瞬变电磁发射系统[J].仪器仪表学报,2013,34(4):803-808.

Zhao H T, Liu L H, Wu K, et al. Voltage stabilized clamping and fast turn-off transient electromagnetic transmitting system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,34(4):803-808.

[7] 王广君,闵德顺.一种新型瞬变电磁发射机快速关断电路设计[J].工矿自动化,2016,42(11):77-80.

Wang G J, Min D S. Design of a novel fast turn-off circuit of transient electromagnetic transmitter [J]. Industry and Mine Automatic, 2016, 42(11):77-80.

[8] 吴羽珩.瞬变电磁发射电流可控及采集关键技术研究[D].长春:吉林大学,2020.

Wu Y H. Research on key technologies of transient electromagnetic emission current controllability and acquisition [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[9] 刘杰,段炜,王俊,等.等值反磁通瞬变电磁法在公路隧道塌陷区的探测应用[J].物探与化探,2020,44(6):1470-1475.

Liu J, Duan W, Wang J, et al. The application of opposing coils transient electromagnetic method to the detection of underground collapse in highway tunnel under construction [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6):1470-1475.

[10] 杨建明,王洪昌,沙椿.基于等值反磁通瞬变电磁法的岩溶探测分析[J].物探与化探,2018,42(4):846-850.

Yang J M, Wang H C, Sha C. An analysis of karst exploration based on opposing coils transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4):846-850.

[11] 古文锋,武玉梁,王强.关断时间效应及其瞬变电磁场响应特征探析[J].中国煤炭地质,2017,29(1):73-78.

Zhan W F, Wu Y L, Wang Q. Study on turn-off time effect and its transient electromagnetic field response characteristics [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(1):73-78.

[12] Sternberg B K, Dvorak S L, Feng W. Design and verification of large-moment transmitter loops for geophysical applications [J]. Journal of Applied Geophysics, 2017, 136:211-218.

[13] Kamenetsky F, Oelsner C. Distortions of EM transients in coincident loops at short-time-delays [J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(6):983-993.

Design and test of the parallel ultra-small transmitter loop used in the transient electromagnetic method

WU Bei-Chen, PAN Yang-Run-Yi, CHENG Jiu-Long, WANG Hui, YAO Di, PANG Xiao-Yin
(School of Geosciences & Surveying Engineering, Chinese University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the shallow or mine prospecting using the transient electromagnetic method (TEM), the transmitting magnetic moment is limited by the limited supply voltage of the transmitting system, and the stray inductance of the transmitter loop causes a long turn-off time. To solve these problems, this study designed a parallel transmitter loop of ultra-small coils used in TEM. Using these coils, the transmitting magnetic moment can be increased by the parallel connection of the coils, and the turn-off time can be reduced by additional resistance. The equivalent circuit models of the conventional transmitter coils and the parallel transmitter coils were established and analyzed theoretically. Moreover, the comparative test between the parallel transmitter coils and the conventional transmitter coils were carried out. The results show that the parallel transmitter coils can effectively increase the magnetic moment and reduce the turn-off time. Therefore, this design is greatly significant for reducing the blind area and increasing the prospecting depth in shallow or mine prospecting using TEM.

Key words: TEM; parallel transmitter loop; turn-off time; transmitting magnetic moment; ultra-small coil

(本文编辑:沈效群)