

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2010.01.009

瞬变电磁法多匝重叠小回线装置实验研究

张 华¹⁾ 曹 军²⁾ 孙 海¹⁾

1) 东华理工大学核工程技术学院, 抚州 344000

2) 桂林矿产地质研究院, 桂林 541004

摘 要 文中采用实验方法对瞬变电磁法多匝重叠小回线装置发射磁矩、关断时间、感应信号强度随发射线圈匝数及接收线圈匝数的变化分别进行了研究。对固定发射线圈匝数改变接收线圈匝数与固定接收线圈匝数改变发射线圈匝数这 2 种实验方式进行了对比,从而找出了更适合地质响应的发射与接收线圈的匝数。同时还分别采用线圈边长为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 与 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的线框进行了对比实验,通过分析发射磁矩、关断时间、感应信号强度随线圈边长、线圈匝数的变化,找到合理的重叠小回线装置。实验结果表明发射磁矩随线圈的边长与发射线圈匝数的增加而增加;关断时间随发射线圈匝数近乎呈正比增加,与接收线圈无关;感应信号强度与线圈匝数呈正比关系,但是相比之下,接收线圈匝数更占主导地位。

关键词 瞬变电磁法 重叠小回线 关断时间 发射磁矩

中图分类号: P631.3⁺25

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2010)01-0090-08

0 引言

随着地球物理勘探事业的发展,复杂地区的勘探日益增多,野外干扰因素也进一步加大,瞬变电磁法数据采集越来越受到工作区域条件的限制,特别是在隧道、井下超前探中,由于施工条件有限,回线边长不能太大,使得采集到的信号非常微弱,探测的深度大大降低,满足不了精细勘探的要求,因此研究高分辨率的数据采集装置是勘探成效好坏的关键所在,而重叠小回线数据采集装置的研究尤为重要(李实等,2001;阴建康等,2007;刘志新等,2009)。

目前对于多匝重叠小回线装置的分析研究相对较少,为此,本文借助于澳大利亚产的 Terra-TEM 瞬变电磁仪,采用重叠回线装置、边长为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 与 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的 2 种类型的线圈来进行本次的物理模拟实验。首先固定接收线圈匝数,依次改变发射线圈匝数,研究发射磁矩、关断时间、感应信号随发射线圈匝数的变化规律;再固定发射线圈匝数,依次改变接收线圈匝数,分析感应信号强度随接收线圈匝数的变化规律;最后将 2 种不同边长线圈的发射磁矩、关断时间、感应信号强度进行对比,从中找出规律,得到线圈匝数、边长与发射磁矩、关断时间、感应信号之间的关系,为瞬变电磁观测系统的合理选择与施工设计提供一定的理论依据(闫述等,2002;杨海燕等,2006;姜志海等,2007)。

〔收稿日期〕 2009-05-11 收稿,2010-02-08 改回。

〔基金项目〕 江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ10169)资助。

1 瞬变电磁法原理

在导电率为 σ 、导磁率为 μ 的均匀各向同性大地表面敷设面积为 S 的矩形发射回线,在回线中供以阶跃脉冲电流 I , I 满足以下条件:

$$I(t) = \begin{cases} I & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

在电流断开之前($t < 0$ 时),发射电流在回线周围与大地空间中建立起 1 个稳定的磁场;在 $t=0$ 时,将电流突然断开,由该电流产生的磁场也立即消失。一次磁场的这一剧烈变化通过空气和地下电介质传至回线周围的大地中,并在大地中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间的磁场不会即刻消失。

由于介质的欧姆损耗,这一感应电流将迅速衰减,由它产生的磁场也随之衰减,这种迅速衰减的磁场又在其周围的地下介质中感应出新的强度更弱的涡流。这一过程继续下去,直至大地的欧姆损耗将磁场能量消耗完毕为止,伴随这一过程存在的电磁场便是大地的瞬变电磁场(Nablghlan *et al.*, 1979; 蒋邦远, 1998; YU *et al.*, 2007),如图 1 所示。利用瞬变电磁场探测地球介质电导率特性的研究叫做瞬变电磁法。

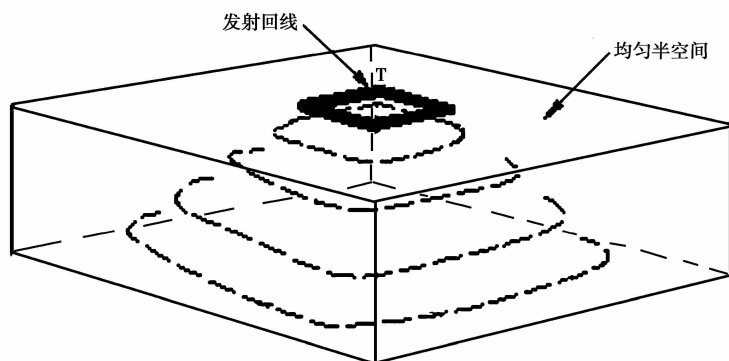


图 1 瞬变电磁法探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detection of TEM.

瞬变电磁法具有勘探深度大、容易穿透高阻层、抗干扰能力强,以及既可在远区观测,也可在近区观测,还可选择不同时窗进行观测以获得不同深度的地质信息等优点,广泛应用于金属矿产、油气、地下水和地热勘探、环境监测、工程勘察,以及市政工程等方面(Jiang *et al.*, 2007)。

2 实验步骤

2.1 仪器及参数选择

实验采用澳大利亚产的 Terra-TEM 型瞬变电磁仪,该仪器能够自动记录发射线圈总电阻、接收线圈电阻、发射电流、关断时间等参数,可进行中心回线、重叠回线、同一回线、分离回线等多种装置形式的数据采集工作。同时该仪器外接 24V 蓄电池作为供电电源,最大允许电流 10 A,因此,实验时要考虑发射线圈电阻不能太小,发射线圈的电阻可以用万用表量出,或者根据仪器记录的 2 次发射线圈的总电阻计算出发射线圈的电阻。

线圈边长采用 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 和 $1\text{m}\times1\text{m}$ 2 种规格分别进行实验研究,叠加次数为 512 次,高密度时间序列,重叠回线装置形式,各种匝数的线圈均使用同一规格的单股多丝电缆绕制而成,如图 2 所示,其中 2 个多匝线圈分别代表发射线圈与接收线圈。

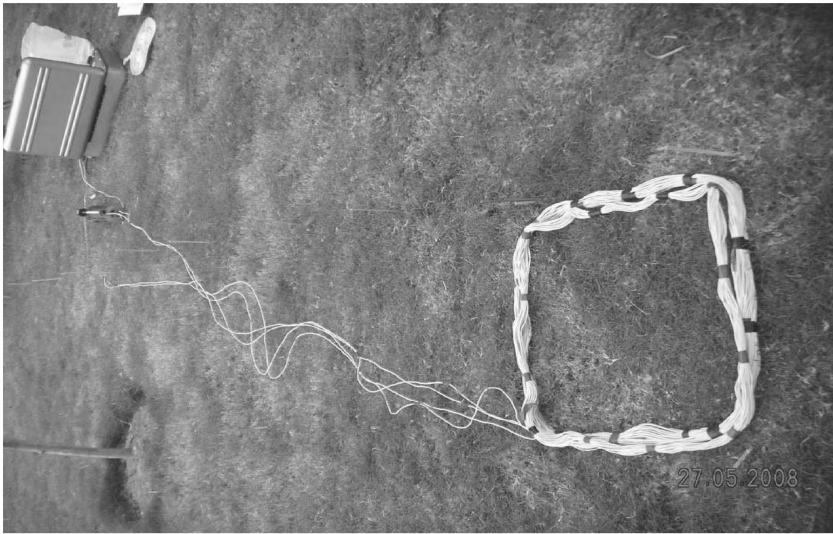


图 2 重叠回线实验装置图
Fig. 2 Coincident loop test device.

2.2 实验过程

在野外选择良好的实验场地,要求场地周围没有明显的铁质管线等干扰物的存在,然后再布置 1 条测线,测线长 7.5m ,共 16 个测点,点距 0.5m 。首先以边长为 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的线框作为研究对象,将接收线圈匝数固定为 20 匝,再依次改变发射线圈匝数,从 20 匝、30 匝、40 匝到 50 匝逐次改变进行数据的采集,每次都是在同一测线的 16 个固定测点重复进行观测,这样保证了数据的稳定性与可靠性。为了说明问题,我们选择其中 1 个点的数据进行研究,探讨发射磁矩、关断时间、信号强度等观测数据随发射线圈匝数的变化。

研究感应信号与接收线圈匝数的关系时,固定发射线圈匝数为 20 匝,接收线圈匝数依次为 20 匝、30 匝、40 匝和 50 匝,也在同一测线的 16 个固定测点重复进行数据的采集工作。

当发射线圈与接收线圈边长改为 $1\text{m}\times1\text{m}$ 时,采集数据的方式及参数设置与边长 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的发射线圈、接收线圈一样,都是在同一测线的 16 个测点中进行,匝数变化的关系与边长 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的线圈也一样,这样可以对观测数据进行纵向对比,以便研究发射磁矩、关断时间、信号强度与线圈边长之间的关系。

3 分析研究

3.1 发射线圈对参数的影响

通过对比分析线圈边长为 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 与 $1\text{m}\times1\text{m}$ 的 2 种观测系统对同一测线 16 个测点的实验数据,除了个别点受干扰之外,其余各测点的实验结果基本一致,表明实验数据准确可靠。限于篇幅,仅列出 1 个测点的实验参数,如表 1 所示。从中可以计算出线圈的电阻和仪器内阻,

其中仪器内阻为 1.3Ω ，线圈由于是按同一规格制作的，其电阻无疑随着匝数的增加而线性增大。随着线圈电阻的增大，在由发射机与发射线圈构成的回路中，发射线圈电阻与发射机内阻的比值增大，因而线圈上的加载电压将增大，如表 1 中线圈加载电压由 20 匝时的 16.32V 逐渐增加到 50 匝时的 20.16V。发射磁矩随线圈匝数的增加逐渐增大，但其增长幅度相对较小，表 1 中的发射磁矩由 20 匝时的 $29.15\text{A}\cdot\text{m}^2$ 增加到 50 匝时的 $36.00\text{A}\cdot\text{m}^2$ ，增加了 $6.85\text{A}\cdot\text{m}^2$ 。对于关断时间，由表 1 可知，20 匝时为 $38\mu\text{s}$ ，30 匝时为 $58\mu\text{s}$ ，40 匝时为 $76\mu\text{s}$ ，50 匝时为 $92\mu\text{s}$ ，匝数增加 1 倍，关断时间近似增加 1 倍，由此可以推断，关断时间与发射线圈匝数近似呈线性正比关系。

表 1 接收线圈匝数一定发射线圈匝数不同时的实验数据表

Table 1 The test data by changing transmitter coil turns based on fixed receiver coil

参数	线圈规格							
	边长 0.5m×0.5m 的发射线圈匝数				边长 1m×1m 的发射线圈匝数			
	20	30	40	50	20	30	40	50
总电阻/ Ω	4.1	5.5	6.9	8.3	6.9	9.8	12.7	15.5
线圈电阻/ Ω	2.8	4.2	5.6	7.0	5.6	8.5	11.4	14.2
线圈加载电流/A	5.83	4.34	3.44	2.88	3.37	2.38	1.84	1.50
线圈加载电压/V	16.32	18.23	19.26	20.16	18.87	20.23	20.98	21.3
线圈发射磁矩/ $\text{A}\cdot\text{m}^2$	29.15	32.55	34.40	36.00	67.4	71.4	73.6	75.00
关断时间/ μs	38	58	76	92	40	63	80	98

而当发射线圈与接收线圈匝数不变，仅仅将线圈边长变为 $1\text{m}\times1\text{m}$ ，即单匝面积变为 1m^2 时，发现各参数的变化规律相似。但是将边长为 $1\text{m}\times1\text{m}$ 与 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的线圈对比可以看出，由于 $1\text{m}\times1\text{m}$ 的线圈的电阻为 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 线圈的 2 倍，而发射机内阻不变，因此电流近似为边长 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 线圈的一半。同理 $1\text{m}\times1\text{m}$ 线圈的发射磁矩近似为 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 线圈的 2 倍，但是从关断时间来看， $1\text{m}\times1\text{m}$ 线圈的关断时间并不是 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 线圈的 2 倍，而只是略大于 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 线圈，由此我们可以得出，线圈边长的变化对发射磁矩影响比较大，而对关断时间影响并不是很大，关断时间主要是由发射线圈的匝数决定的。

3.2 接收线圈对参数的影响

通过表 2 可以看出边长 $0.5\text{m}\times0.5\text{m}$ 的发射线圈固定为 20 匝，接收线圈从 20 匝变化到 50 匝时，关断时间分别为 $38\mu\text{s}$ ， $37\mu\text{s}$ ， $36\mu\text{s}$ ， $36\mu\text{s}$ ，不同接收线圈匝数的关断时间仅相差几个 μs ，没有太大的变化，而其中的差别可能是由于接收线圈的存在，线圈间的互感影响了发射线圈电阻的大小，导致关断时间略有不同，但这一点需要进一步的研究。可见，关断时间仅随发射线圈匝数的变化而变化，与接收线圈匝数基本没有关系，发射磁矩也满足同样的关系，但是当线圈边长加大 1 倍，而其他条件不变时，发现关断时间尽管增大了，但是增加量有限，并不是呈线性增加，而发射磁矩却几乎增加了 1 倍。因此如果我们想加大探测深度，除了增加发射线圈的匝数之外，还可以增加发射线圈的边长。但是在边长有限的情况下，我们只能增加发射线圈的匝数，以期达到瞬变电磁勘探的深度。

表 2 发射线圈匝数一定接收线圈匝数不同时的实验数据表

Table 2 The test data of varying receiver coil turns based on fixed transmitter coil

参 数	线圈规格							
	边长 0.5m×0.5m 的接收线圈匝数				边长 1m×1m 的接收线圈匝数			
	20	30	40	50	20	30	40	50
线圈发射磁矩/A·m ²	29.15	29.84	28.60	29.26	67.40	66.80	67.20	67.00
关断时间/μs	38	37	36	36	40	41	39	38

3.3 线圈匝数与信号的关系

图 3 为边长 0.5m×0.5m 的线圈,固定接收线圈匝数为 20 匝而改变发射线圈匝数,所测到的感应电动势曲线。图 4 为固定发射线圈匝数为 20 匝而改变接收线圈匝数时,所测到的感应电动势曲线。

从图 3 得出,接收线圈匝数一定时,随着发射线圈匝数的增加,关断时间也增加,造成早期接收数据严重畸变,不利于探测浅部地质信息,影响探测精度,这主要是因为发射、接收线圈之间存在互感,发射线圈自身存在自感,从而导致关断时间的增加。不过随着发射线圈匝数的增加,所接收到的感应电动势信号也增大。这主要是由于随着发射线圈匝数的增加,发射磁矩也随着增大,接收的信号幅值也增加,并且在有效数据部分感应电动势与发射线圈匝数之间几乎有线性增加关系。

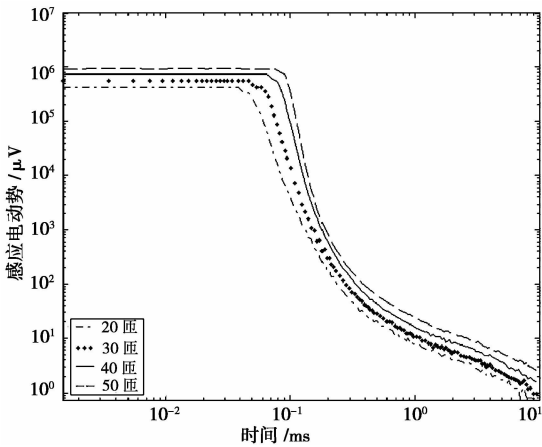


图 3 不同发射线圈匝数的感应电动势曲线
Fig. 3 The induced EMF curves with different transmitter loops.

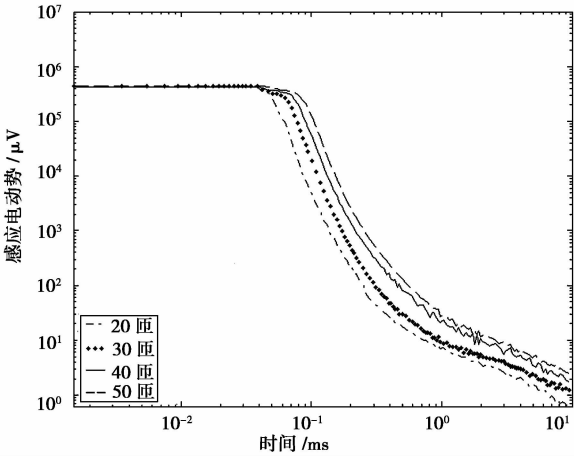


图 4 不同接收线圈匝数的感应电动势曲线
Fig.4 The induced EMF curves with receiver loops.

由 3.2 的分析可知,关断时间主要由发射线圈决定,与接收线圈无关,并且从图 4 可以看出,发射线圈匝数一定时,随着接收线圈匝数的增加,其关断时间基本不变,接收到的有效数据的时间也基本一致,即具有近乎相同的暂态过程。并且随着接收线圈匝数的增加,感应电动势增大,即感应信号的强度随接收线圈匝数的增加而增强,而且增强的幅度比较大,在有效数据部分两者之间几乎有近线性的关系,因此这对于野外施工空间有限,干扰因素比较大,而又想得到信噪比高的资料时非常有利。

3.4 线圈边长与信号的关系

下面来分析一下线圈边长的变化与感应信号之间的关系,图5与图6分别为发射与接收匝数相同而边长不同的线圈所接收到的信号曲线图。由3.2的分析可知,1m×1m线圈的关断时间比0.5m×0.5m线圈的关断时间增加,但是增加量比较小,从图中也可以得出以上结论。而1m×1m线圈所接收到的信号强度比0.5m×0.5m线圈所接收到的信号强度大。因此边长越大,其探测深度显然也越大,能够获得的深层信息也就越多,因此如果工作条件允许,尽量用边长大的线圈进行探测工作。图6的变化关系与图5一致,由于图6的接收线圈为20匝,尽管发射线圈比图5多10匝,但是接收的晚期信号却比图5弱,因此我们可以得出,在未受到暂态过程影响的晚期数据的接收中,接收线圈匝数相对于发射线圈匝数来讲,更占主导地位。在对其他匝数的发射线圈和接收线圈的感应电动势信号作分析对比之后,也得出了与上述结论类似的结果,这里不做赘述了。

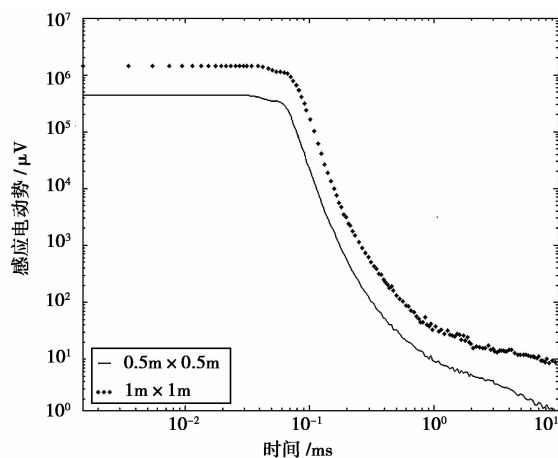


图5 发射线圈20匝,接收线圈30匝的感应电动势

Fig. 5 The induced EMF with 20T and 30R.

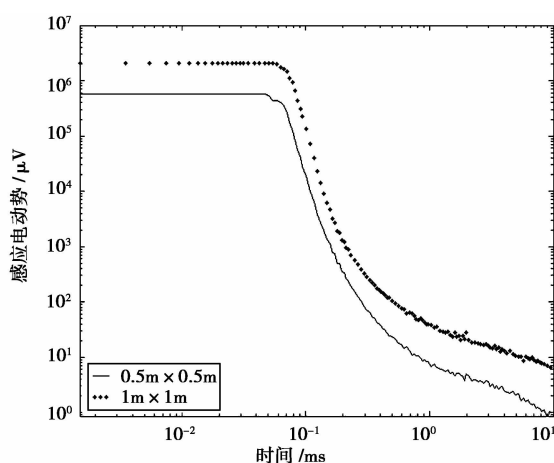


图6 发射线圈30匝,接收线圈20匝的感应电动势

Fig. 6 The induced EMF with 30T and 20R.

发射磁矩决定着瞬变电磁的探测深度,较大的发射磁矩有利于增强感应信号的幅值,提高信噪比,进而增加探测深度;关断时间的长短决定着瞬变电磁对于浅部的探测能力,过长的关断时间会造成较长时间段内早期接收数据的严重畸变,以致于无法分辨浅层地质信息,进而丧失对浅层的分辨能力。因此在野外施工中,要从发射磁矩、关断时间、线圈携带方便等多种因素综合考虑,发射线圈匝数并不是越多越好,线圈多了,重量也增加了,不利于施工。当不太关心浅层地质信息时可以选择稍多的线圈匝数,当对浅层分辨率要求较高时,应选择较少的发射线圈匝数,在条件允许的情况下,尽量选择边长大的线圈进行工作。

4 结论

通过以上对实验数据的分析对比,得出以下结论:

(1)当采用同一规格的电缆绕制发射线圈时,在供电电源一定的情况下,发射磁矩随发射线圈匝数、边长的增大而增加,而与接收线圈没有关系;

(2)关断时间受发射线圈匝数的影响最大,近乎呈线性正比关系,而与接收线圈匝数基本

没有关系,但会随着线圈边长的变化而变化,只是变化量不大;

(3)未受到暂态过程影响的晚期数据,感应信号强度随发射线圈匝数、接收线圈匝数的增加而增强,但接收线圈的匝数更占主导地位,同时感应信号强度也会随边长的增加而增强。

参 考 文 献

- 蒋邦远. 1998. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- JIANG Bang-yuan. 1998. Applied Near-zone Magnetic Source Transient Electromagnetic Exploration [M]. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 姜志海, 岳建华, 刘树才. 2007. 多匝重叠小回线装置的矿井瞬变电磁观测系统 [J]. 煤炭学报, 32(11): 1152—1156.
- JIANG Zhi-hai, YUE Jian-hua, LIU Shu-cai. 2007. Mine transient electromagnetic observation system of small multi-turn coincident configuration [J]. Journal of China Coal Society, 32(11): 1152—1156 (in Chinese).
- 李实, 李创社, 张彦鹏. 2001. 工程勘探瞬变电磁仪关键技术研究 [J]. 煤田地质与勘探, 29(1): 55—58.
- LI Shi, LI Chuang-she, ZHANG Yan-peng. 2001. Study of the key technology in TEM instrument [J]. Coal Geology & Exploration, 29(1): 55—58 (in Chinese).
- 刘志新, 刘树才, 刘仰光. 2009. 矿井富水体的瞬变电磁场物理模型实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 28(2): 259—266.
- LIU Zhi-xin, LIU Shu-cai, LIU Yang-guang. 2009. Research of transient electromagnetic field of mine water-bearing structure by physical model experiment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(2): 259—266 (in Chinese).
- 杨海燕, 岳建华, 刘志新. 2006. 矿井瞬变电磁法多匝小回线装置电感效应的理论研究 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(增刊): 168—171.
- YANG Hai-yan, YUE Jian-hua, LIU Zhi-xin. 2006. Theoretical study of inductance effect with multi axial coils for TEM in underground mine [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 36(suppl): 168—171 (in Chinese).
- 闫述, 陈明生. 2002. 瞬变电磁场的直接进域数据分析 [J]. 地球物理学报, 45(2): 275—284.
- YAN Shu, CHEN Ming-sheng. 2002. Direct time-domain numerical analysis of transient electromagnetic fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 45(2): 275—284 (in Chinese).
- 阴建康, 闫述, 陈明生. 2007. 瞬变电磁法小发射回线探测装置及其应用 [J]. 煤田地质与勘探, 35(3): 66—68.
- YIN Jian-kang, YAN Shu, CHEN Ming-sheng. 2007. Small transmitter loop device and its application in transient electromagnetic method [J]. Coal Geology & Exploration, 35(3): 66—68 (in Chinese).
- Jiang Z H, Yue J H, Liu S C. 2007. Prediction technology of buried water-bearing structures in coal mines using transient electromagnetic method [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 17(2): 164—167.
- Nabighian M N, Macnae J. 1979. Quasi-static transient response of a conducting half-space; an approximate representation [J]. Geophysics, 44(10): 1700—1705.
- Yu J C, Liu Z X, Tang J Y. 2007. Research on full space transient electromagnetism technique for detecting water damage in coal mines [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 17(1): 58—62.

THE ANALYSIS AND RESEARCH OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC CONFIGURATION OF SMALL MULTI-TURN COINCIDENT LOOP

ZHANG-Hua¹⁾ CAO-Jun²⁾ SUN Hai¹⁾

1) *College of Nuclear Engineering and Technology, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China*

2) *Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, China*

Abstract

Using experimental techniques, the paper investigates the transmitted magnetic moment, the turn-off time, and the change of induced signal with the turns of the transmitter and receiver loops of multi-turn small coincident configuration, respectively. Comparison is made between the two experimental methods, i. e. changing the receiver loop turns with fixed transmitter loop turns and vice versa, to find out the turns more suitable to geological response. Meanwhile, comparative test is done using the wire frame of loop length of 0.5m×0.5m and 1m×1m, respectively. Through the analyses on the transmitted magnetic moment, the turn-off time, the relations of induced signal intensity with the loop turns and the length, we find the reasonable small multi-turn coincident loop configuration. The result indicates that the transmitted magnetic moment increases with the increased transmitter loop turns and length; the turn-off time increases proportionally with the transmitter loop turns, but has nothing to do with the receiver loop; and the induced signal intensity has a proportional relation with loop turns, with the receiver loop turn to be dominant, comparatively.

Key words Transient Electromagnetic Method, small coincident loop, turn-off time, transmitted magnetic moment

[作者简介] 张华,男,1979年出生,2007年毕业于中国矿业大学,获硕士学位,讲师,从事地球物理勘探的研究,电话:13755952215, E-mail: hzhang@ecit.cn。