

文章编号:1001-1986(2007)03-0066-03

# 瞬变电磁法小发射回线探测装置及其应用

阴建康<sup>1</sup>, 闫述<sup>2</sup>, 陈明生<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074; 2. 江苏大学计算机科学与通信工程学院,  
江苏 镇江 212013; 3. 煤炭科学研究院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 瞬变电磁法的探测深度主要与观测时间有关。发射回线的尺寸主要是使信号具有一定的强度, 以满足接收机灵敏度和信噪比的要求。当对小发射回线装置供以大电流时, 同样可以得到和大发射回线相当的信号强度。大发射回线施工中的边缘效应是目前影响探测精度的原因之一, 小发射回线装置避免了这个缺陷。云南、湖南和邢台等地的实际探测结果表明, 小发射回线装置最大探测深度达 800 m, 资料解释结果与工程中的揭露、钻孔资料及地质资料一致。

**关键词:** 瞬变电磁法; 小发射回线; 大发射回线; 边缘效应; 信号强度

**中图分类号:**P631    **文献标识码:**A

## Small transmitter loop device and its application in transient electromagnetic method

YIN Jian-kang<sup>1</sup>, YAN Shu<sup>2</sup>, CHEN Ming-sheng<sup>3</sup>

(1. Graduate Faculty, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China; 2. College of Computer Science and Communication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In transient electromagnetic exploration, the depth of investigation is related to the observation time. The size of transmitter loop is mainly for strength of signal to satisfy receiver sensitivity and signal to noise ratio. When supplying a small transmitter loop device with power current, the strength of signal as same as that produced by a large transmitter loop can be obtained. At the present time, detecting precision is subject to the edge effect of large loop configuration and the small loop device avoids this objection. The practice prospecting results in Yunnan, Hunan and Xingtai show that the most deep depth of investigation is up to 800 m by small loop device and the interpretations are agreeable to the facts revealed in engineering, drill data and geological data very well.

**Key words:** transient electromagnetic method; small transmitter loop; large transmitter loop; edge effect; strength of signal

在煤田水文地质勘探中, 瞬变电磁(TEM)法, 由于对异常体敏感, 以及施工效率高、无接地问题, 在地球物理勘探中发挥着越来越大的作用。特别是当前, 随着煤田的深部开采, 陷落柱、导水通道等引发的突水事故越发严重, TEM 方法已经成为煤田水文地质勘探的首选方法。但是, 目前 TEM 勘探所用装置一般是边长为几百 m 的大发射回线, 在其中心三分之一区域进行探测。然而, 我国东部煤矿往往坐落在人烟稠密地区、西部煤矿位于地形起伏的山区, 这都不便于大回线装置的施工, 甚至无法施工。而且在大发射回线中心三分之一区域施工的方式, 是在假设此区域场是均匀的前提下, 为提高施工效率而采取的措施。实际上这样做将会引入一定的解释误差, 特别是在探测陷落柱等深度大、体积小的异常体时, 所引入的误差将是不可忽略的, 甚至造成误判。因此, 对施工场地适应性强、具有较高探测精度

的小发射回线装置受到了广泛关注。有色金属总公司、中国地质大学、西安物化探研究所研制的大功率 TEM 仪, 就是适合小发射回线装置的设备, 并在浅层探测中取得了良好的地质效果。但是, 小发射回线能否探测大的深度, 或者说探测深度与发射回线边长存在着怎么样的关系, 成为很长一个时期以来令人感兴趣的问题。中国科学院地质及地球物理所白登海、薛国强等人都对此问题做过探讨<sup>[1-2]</sup>。煤炭科学研究院西安分院陈明生利用小回线装置进行大深度探测, 取得了良好的地质效果, 并且在 2005 第 7 届中国地球电磁学讨论会上指出: TEM 的探测深度主要与观测时间有关, 大发射回线的主要作用是适应接收机灵敏度和满足一定的信噪比<sup>[3]</sup>。本文在这些工作的基础上, 分析了大、小发射回线之间信号强度的关系, 大发射回线中心三分之一处的观测误差, 以及利用小发射回线装置在云南、湖南、

收稿日期:2007-03-07

作者简介:阴建康(1964—), 男, 河南省开封人, 高级工程师, 博士研究生, 从事安全生产工程与技术、安全生产管理科学研究工作。

邢台进行大深度探测的实例。

## 1 不同尺寸发射回线激发的信号强度分析

在确定了探测深度与观测时间有关之后, 主要问题是小发射回线能否达到所需要的信号强度。根据文献[4], 有回线—中心探头装置的感应电动势公式

$$enf = -i\omega\mu_0 I(\omega)\pi ar \int_0^\infty J_1(\lambda a) J_1(\lambda r) R_n(\lambda, \omega) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $\mu_0$  是磁导率;  $I$  是发射电流;  $R_n$  是  $n$  层大地表面上的反射系数;  $J_1$  是第一类 Bessel 函数;  $\lambda$  是积分变量;  $a$  是发射回线半径;  $r$  是场点至发射中心的距离。经由拉氏变换后, 计算结果列于表 1。

表 1 不同尺寸发射回线的信号强度

Table 1 Strength of signal of different-sized transmitter loop

观测时间 /ms	大发射回线信号 / $\mu\text{VA}^{-1}$	小发射回线信号 10 m/ $\mu\text{VA}^{-1}$
1	$4.76 \times 10^1$	$4.25 \times 10^0$
2	$2.02 \times 10^1$	$7.51 \times 10^{-1}$
4	$7.21 \times 10^0$	$1.26 \times 10^{-1}$
6	$3.26 \times 10^0$	$4.14 \times 10^{-2}$
8	$1.69 \times 10^0$	$1.81 \times 10^{-2}$
10	$9.72 \times 10^{-1}$	$9.36 \times 10^{-3}$
12	$6.00 \times 10^{-1}$	$5.40 \times 10^{-3}$
14	$3.92 \times 10^{-1}$	$3.37 \times 10^{-3}$
16	$2.69 \times 10^{-1}$	$2.22 \times 10^{-3}$
18	$1.91 \times 10^{-1}$	$1.54 \times 10^{-3}$
20	$1.40 \times 10^{-1}$	$1.10 \times 10^{-3}$

注: 地电模型:  $\rho_1 = 10 \Omega\text{m}$ ,  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ,  $h_1 = 100 \text{ m}$ 。

大回线装置参数: 发射边长 600 m, 接收线圈等效面积 100  $\text{m}^2$ 。

小回线装置参数: 发射回线 10 m, 接收线圈等效面积 2 500  $\text{m}^2$ 。

由表 1 可见, 大、小发射回线信号强度随观测时间的增加而增大。例如, 观测时间为 20 ms 时, 边长为 600 m 线框信号是边长 10 m 发射线框的 127 倍。一般 TEM 发射机在大回线时, 可发射出的电流在 10 A 左右, 那么为了达到与大发射回线相当强度的信号, 小发射回线需供以 1 200 A 的电流。前述国内单位生产的大功率小回线仪器都可达到这个指标。

对于更短的观测时间和地表高阻的地层, 对小发射回线供以 400~800 A 的电流就可得到有足够的信号。

## 2 探测精度与大发射回线装置的边缘效应

为了提高大发射回线装置的施工效率, 假设场在发射线框中心的三分之一区域中是均匀的(有时为加快施工速度, 还超过了这个范围)。但是这个均匀程度究竟如何, 对探测精度有什么样的影响, 需要探讨。对公式(1), 当取非零偏移距时, 将积分区域的一部分用差商代替求导, 一部分用折线化余弦变换, 算出当测点偏移中心点 80 m 时, 即有 15% 的误差。而目前 TEM 回线装置的视电阻率公式是建立在零偏移距基础上的, 由野外观测带来的误差必然带来解释误差。这种误差, 在进行大构造勘探时可以忽略不计, 但当探测小地质体, 如陷落柱等, 由于视电阻率异常的显示本身就很微弱, 由此造成的误差不仅不可忽略, 而且可能造成解释错误。而小发射回线装置每测量一个点, 发一收线框都是一起移动的, 接收线圈始终处于发射线框中心, 没有视电阻率转换过程中带来的误差。

因此, 小发射回线不仅是施工方便的需要, 更重要的是它具有较高的探测精度。

## 3 小发射回线的探测实例

山西中条山、湖南云阳工区均为山区, 大发射回线的铺设极其困难, 只能采用小回线方式施工; 河北邢台虽然地形平坦, 但地表建筑密集、施工场地狭小, 也只能用小回线装置。在施工中, 为保证足够的信号强度, 发射电流一般情况下不低于 400 A。图 1 是边长为 5 m 的发射回线在中条山的探测结果。

山西中条山 5 m 边长小发射回线的探测深度为 300 m, 如果按照以往的观点, 则只有 10 m 的探测能力。但是在图 1 的视电阻率—深度剖面上, 花岗岩矿脉反映清楚。探测结果已被开采证实。

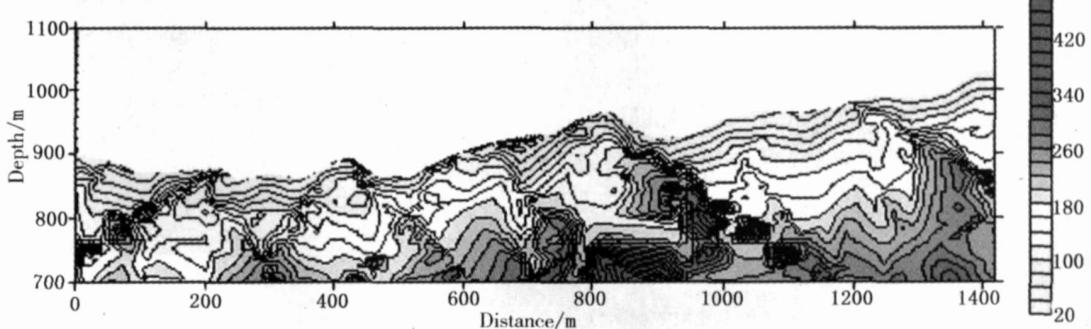


图 1 山西中条山花岗岩矿脉 TEM 小发射回线探测视电阻率—深度剖面

Fig. 1 Apparent resistance-depth profile of granite vein tested with TEM small transmitter loop Zhongtiao Mountain

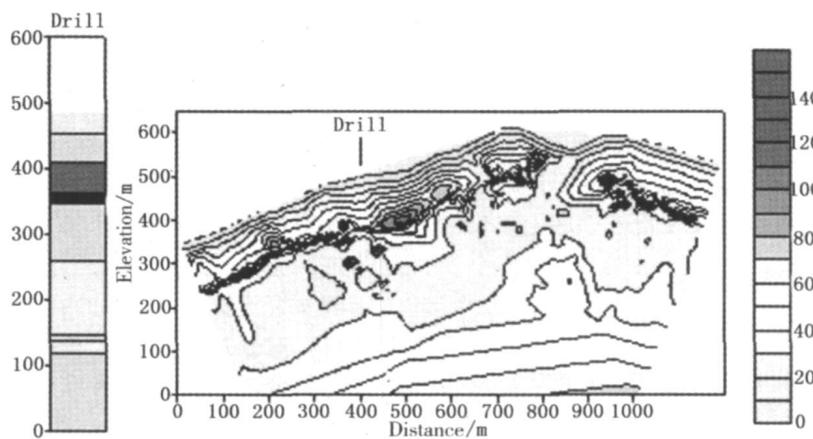


图 2 湖南云阳隧道工程 TEM 小发射回线探测视电阻率—深度剖面

Fig. 2 Apparent resistance—depth profile of tunnel engineering tested by TEM small transmitter loop, Yunyang in Hunan

在湖南云阳隧道工程地质条件探测中,利用同样的装置将探测深度增加到了 600 m(图 2)。得到的视电阻率—深度剖面上地层电性有显著变化,可推断出地层和构造。图中地层的特征和钻孔柱状图对比后,可以发现,两者吻合得很好。

图 3 是河北邢台 TEM 小发射回线探测剖面,探测深度达 800 m。剖面自地表向下电阻率由低到高变化,这是华北型煤田的地电特点。剖面反映出有一断层深入到奥陶系灰岩中,以及断层附近的岩溶异常,这些都是可能的导水通道和陷落柱发育的条件。在煤矿的深部开采中已经观察到了这些迹象。

按以往的观点,TEM 法探测时应取回线边长等于或略大于 0.5 倍探测深度。这就是说,如探测 100 m 深,回线边长应取 50 m。在上述实际应用中,小回线装的探测深度远远超过了这个限制,所取得的地质效果表明,小发射回线装置确实达到了预定深度,探测精度完全达到了要求。

#### 4 结语

回线装置的 TEM 法探测深度,主要与观测时间有关。当使用大功率 TEM 仪器时,小发射回线装置能够达到与大发射回线相比拟的信号强度。探测实例表明,小发射回线目前最大达到了 800 m 的探测深度。由于避免了大回线的边缘效应,地质效果显著。这种装置的灵活轻便,使施工效率大大提高。地面小发射回线装置探测的成功,也为井下大距离超前探测提供了依据。

#### 参考文献

- [1] 白登海 MAXWELL M 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略[J]. 地震地质, 2001, 23(2): 245—251.

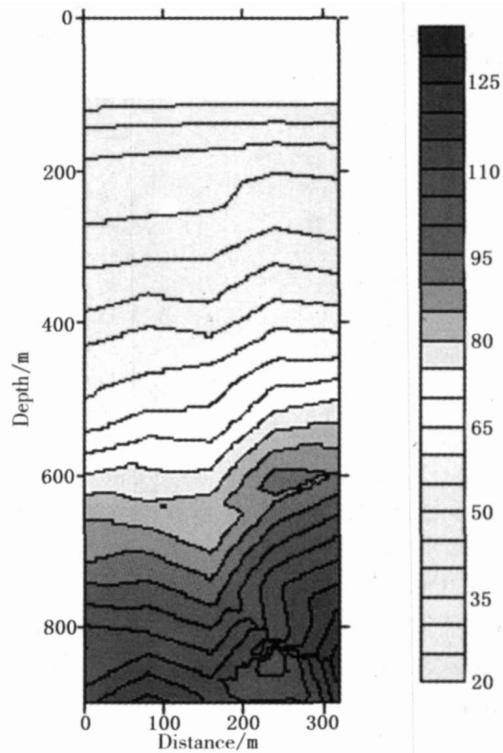


图 3 河北邢台煤田水文地质 TEM 小发射回线探测视电阻率—深度剖面

Fig. 3 Apparent resistance—depth profile tested by TEM small transmitter loop for hydrogeology investigation of Xingtai coalfield, Hebei

- [2] 薛国强. 论瞬变电磁测深法的探测深度[J]. 石油地球物理学报, 2004, 39(5): 575—578.
- [3] 陈明生, 闫述, 石显新. TEM 法的小发射回线探测大深度问题 [C]. 第七届中国地球电磁学讨论会(成都), 2005, 11: 24—30.
- [4] 闫述, 陈明生. 有耗分层媒质上瞬变电磁测深的联合时频分析 [J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(1): 56—60.
- [5] 华军. 一维瞬变电磁法正反演研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003: 53—