

文章编号: 1001-1986(2012)05-0086-03

# 中心回线 TEM 勘探设计中观测时间和信噪比估算

肖 勇<sup>1</sup>, 邱卫忠<sup>1</sup>, 杨小明<sup>2</sup>

(1. 山西省煤炭地质 115 勘查院, 山西 大同 037003;  
2. 陕西省地质矿产勘查开发局第二综合物探大队, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 收集探测深度范围内全套地层的电测井资料、正演感生电动势 EMF(Electromotive Force)衰减曲线和反演观测时间, 根据噪声电平和发射机最大输出电压及导线电阻, 确认与最大发射电流有关的发射回线边长, 是中心回线 TEM(Transient Electromagnetic)法勘探设计中的重要内容, 也是保证探测深度, 取得高质量数据, 完成地质任务的重要环节。山西王家岭工程表明, 在质量良好的实测曲线基础上, 可以获得地层层次分明、地质构造清晰的电性反演剖面。进一步指出, 取得各层位、井下各地段水样的电阻率值, 可以为水文地质地球物理探测前提的论证提供更充分的依据。

**关 键 词:** 中心回线 TEM; 勘探设计; 观测时间; 探测深度; 信噪比

**中图分类号:** P631    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2012.05.022

## Evaluation of measuring time and signal-noise ratio in central loop TEM design

XIAO Yong<sup>2</sup>, QIU Weizhong<sup>1</sup>, Yang Xiaoming<sup>2</sup>

(1. Shanxi Province 115 Coal Geological Exploration Institute, Datong 037003, China; 2. Second Geophysical Exploration Brigade, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources Development, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Evaluation of induced electromotive force by forward modeling based on collection of full set stratigraphic conductivity logs, and measuring time by inverse modeling, determination of loop size relative to maximum output current according to noise level, maximum voltage of transmitter and wire resistivity are important contents for designing transient electromagnetic sounding, ensuring detecting depth, acquisition of good data and completion of geological exploration. Wangjialing project in Shanxi Province shows that the electrical section with distinct stratification and structure would be obtained due to good data. Further more, to acquire resistivity of water sampled from varied layers in earth and zones in mine could provide more sufficient grounds for demonstration of geological prospecting in hydrological exploration.

**Key words:** central loop TEM; prospecting design; measuring time; depth of detection; signal noise ratio

中心回线 TEM 法观测时间和发射电流估算, 是勘探设计的重要内容。观测时间是能否探测到目的层、完成预定地质任务的关键; 而信噪比是取得质量良好的观测数据的关键。这些都是完成地质任务、取得良好地质效果的基础性工作。

通常, 在广泛搜集测区钻孔电测井资料、划分电性层之后, 应用中心回线 TEM 正演程序演算感生电动势(EMF)衰减曲线, 反演理论视电阻率值, 代入深度公式后, 确定观测时间。在计算 EMF 时, 可代入发射和接收回线尺寸, 同时估算信号强度; 通过施工前的试验, 验证或修正观测时间; 在无发射信号的情况下, 用接收机空采的方式获得测区噪声电平, 确定发射电流, 确定或修改装置参数。

本文以山西王家岭煤田水文地质和采空区积水

地震与 TEM 联合勘探(其中地震勘探确定主采 2 号煤和 10 号煤等高线; TEM 给出煤层顶底板含水区分布状况, 奥灰顶界面的含水区、带压区分布状况, 小煤窑采空区的分布范围、富水性及联通性, 断层、褶皱、陷落柱、煤层风化带构造的含水状况)为例, 阐述成套地层电测井资料搜集的必要性、与时间相关的深度公式的推导、装置参数和信号强度的关系。实测剖面结果表明, 勘探设计中的这种估算是否必要的, 是提高 TEM 探测精度、取得良好地质效果的重要环节。

### 1 观测时间与探测深度

#### 1.1 电测井资料的搜集

在 TEM 观测时间估算中, 搜集目的层及以下地

层的完整钻孔电测井资料是必要的。在工程实践中，有的钻孔在最后一层煤终孔，有的测井资料仅仅给出了主采煤层的电阻率曲线，这些是不够的。地面电磁勘探，从地面到预定目的深度要通过所有地层，各层位电性对场的性态都有影响，可见地面电磁勘探至少应有从地表到目的层的电测井资料，如有可能，搜集到目的层以下的资料，对需要一定背景进行解释的电磁法探测更为有利。实际上，井下顶、底板探测也同样需要一定范围内的这些资料，即使是侧帮和超前探测，了解更大范围围岩的电性将对数据的解释提供更多的参考信息。所以，资料搜集应尽可能地使地层电性资料完整。

除了钻孔测井深度问题以外，上覆地层、特别是较厚的低阻覆盖层，会对 TEM 场形成屏蔽作用<sup>[1]</sup>，不仅影响探测深度、还会减弱下伏目标体的异常反映，这些都是在勘探设计和论证阶段不可忽视的。缺失的表层电阻率数据可通过实测得到，如直流电法的视电阻率公式确定性较强，可用小极距的四极法测出。

表 1 是王家岭测区两个钻孔测井资料的地层电性列表，是观测时间和信噪比估算的基础资料。

表 1 勘探区地层与地层电阻率  
Table 1 Strata and resistivity of survey area

地 层		电阻 $\rho/\Omega \cdot m$	厚度/ m	序号
系	组			
第四系		25	100	1
		50	100	2
	上石盒子组	150	5	3
		50	60	4
		100	15	5
二叠系	下石盒子组			
		70	100	6
		125	20	7
		300	10	8
		125	25	9
石炭系	太原组	350	20	10
		200	15	11
	本溪组	140	15	12
奥陶系	马家沟组	500(估计)	终孔	13
地层总厚度(奥陶顶界面深度) 485 m				

注：据王家岭井田一区 1064 号钻孔，其中第四系和上石盒子组上部据 1058 号钻孔。

## 1.2 深度估算公式

深度估算公式，是指 TEM 半定量解释中的视深度公式。和频率域中以平面电磁波定义趋肤深度相似，在时间域中设有  $xOy$  平面于  $t=0$  时刻激发出一

薄层  $x$  方向的均匀电流，此电流在  $\pm z$  方向产生瞬态均匀平面波，那么平面波的电场仅有  $x$  分量，磁场仅有  $y$  分量。频域电场分量  $E_x$  满足方程：

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) E_x(z, \omega) = 0 \quad (1)$$

其中  $k^2 = -i \mu \sigma$ ，是准静态条件下的波数； $\sigma$ 、 $\mu$ 、 $\epsilon$  分别为大地磁导率、介电常数和电导率，当大地为非磁性物质时  $\mu=\mu_0$ 。对上式进行逆 Laplace 变换后，有时域电场分量  $e_x$  的解：

$$e_x = -\frac{I}{2} \exp\left(-\frac{\mu_0 \sigma_1}{4t} z^2\right) u(t) \quad (2)$$

保持式(2)中的  $z$  不变，令对时间的导数等于 0，便得到某一深度处任意时间电场的最大值，以此作为阶跃脉冲到达的标志：

$$\delta_{TD} = \sqrt{\frac{2t}{\mu_0 \sigma}} \quad (3)$$

这就是 Spies<sup>[2-3]</sup> 定义的 TEM 场的“扩散深度”，是给定时间  $t$  内 TEM 阶跃脉冲向地下单向传播到达的深度。要探测地下某一深度的目标体，还需要返回时间，此双向传播时间至少为  $2t$ 。这是因为，阶跃脉冲在导电大地中传播一段距离后，高频成分衰减，脉冲前沿变得平缓，大地的色散作用又使低频成分逐渐占优的脉冲群速度变慢。此外，文献[2]的解析分析和其后的直接时域数值分析<sup>[4]</sup>表明，当携带地质信息的场刚刚返回到地面时，以目前的 TEM 方法和仪器的观测体制，还不能分辨出以极大值为代表的反射脉冲到达的时刻，还需要在分离时间之后延迟一段时间，达到可分辨时间，以分离异常。在综合上述因素后，将  $2t$  时间加倍，取观测时间为：

$$T = 4t \quad (4)$$

带入式(3)中，并用  $H$  代替  $\delta_{TD}$  后，有探测深度  $H$  与观测时间  $T$  的关系：

$$H = \sqrt{\frac{T \rho}{2 \mu_0}} \quad (5)$$

根据表 1 给出的电性层，利用中心回线 TEM 正演公式，得到感生 EMF 后换算视电阻率，带入式(5)，即可估算探测目的层需要的观测时间。

将实际使用的发射回线和接收线圈尺寸代入正演计算程序中<sup>[5]</sup>，算出信号强度，噪声经实测得到，由此估算信噪比。

## 2 信噪比与装置参数

为提高工作效率，中心回线 TEM 实测时，往往在发射回线中心  $1/3$  处进行<sup>[6]</sup>，一般  $600 m \times 600 m$  的发射回线比较便于施工。如采用 V8 仪器，接收线圈是固定值为  $100 m^2$ ，当取脉冲频率  $8.333 Hz$  时，根

据表 1 地层电性算出的观测时间  $t$ 、感生电动势 EMF 和探测深度  $H$  列于表 2。地质任务要求查明奥灰顶界面的含水区、带压区分布状况, 可知此界面埋深 485 m(表 1), 最大探测深度应向界面以下延伸 100~200 m, 即 585~685 m。V8 仪器在 MulTEM 中提供的可选波形有 25 Hz、8.333 Hz、5 Hz、2.5 Hz、1 Hz, 其中 25 Hz 允许的最晚时间道为 6.28 ms, 显然不能满足探测深度要求。表 2 所示 8.333 Hz 的最晚时间道(第 20 道)探测深度近 800 m, 故实际施工时应选择该档进行观测。

信噪比、装置和发射电流, 应根据 V8 的最大输出电压/电流和发射回线电阻确定。例如直径 4.5 mm 的发射回线、导线电阻  $0.4 \Omega \cdot \text{m} / \text{hm}$ , 边长 600 m 的回线总长为 2 400 m, 总电阻约  $10 \Omega \cdot \text{m}$ 。V8 仪器 TEM 发射机最高输出电压 130 V, 如此可以输出 10 A 以上的电流(最大输出电流 40 A), 21 ms 时的信号强度可达  $1.319798 \times 10^{-8} \text{VA}^{-1} \times 10 \text{A} \approx 132 \text{nV}$ 。测区试验测量噪声电平一般  $< 10 \text{nV}$ , 信噪比完全满足要求, 预期可以获得良好的观测数据。

### 3 实测 TEM 剖面与探测效果

正式施工前的试验确认了观测时间、发射回线边长、发射电流的估算结果。叠加次数通过试验先确定基本数值, 在施工过程中, 通过密切观察实测曲线的光滑程度, 再根据不同情况随时调整。经试验王家岭项目叠加次数为 256 次。

图 1 为王家岭 II 测区 240 线 282 号测点实测 EMF 衰减曲线, 可见实测 EMF 衰减曲线光滑, 在最后一个时间道的误差棒都很小。当然, 高质量数据的获得还与测区噪声水平等多种因素有关。但是, 整体工程质量是通过对每个环节的精心设计、认真操作得到保证的。以测区地层电性资料为基础, 通过理论曲线的正反演对观测时间和信噪比的估算, 就是其中的一个重要步骤。

图 2 表明, 在较高质量实测数据基础上得到的

地层剖面, 层次分明、构造清晰, 与同测线地震剖面反映的地层趋势一致, 探测深度满足了要求。

表 2 观测时间与探测深度  
Table 2 Measurement time and detection depth

道号	观测时间/ ms	感生电动势* / ( $\text{VA}^{-1}$ )	探测深度 / m
1	0.268 247	$2.161421 \times 10^{-4}$	135.3
2	0.337 703	$1.646149 \times 10^{-4}$	137.2
3	0.425 143	$1.246896 \times 10^{-4}$	139.4
4	0.535 224	$9.330004 \times 10^{-5}$	142.2
5	0.673 807	$6.851896 \times 10^{-5}$	145.9
6	0.848 273	$4.907616 \times 10^{-5}$	151.1
7	0.106 791 $\times 10$	$3.408490 \times 10^{-5}$	158.0
8	0.134 442 $\times 10$	$2.284665 \times 10^{-5}$	167.2
9	0.169 253 $\times 10$	$1.473110 \times 10^{-5}$	179.2
10	0.213 076 $\times 10$	$9.126543 \times 10^{-6}$	194.7
11	0.268 247 $\times 10$	$5.432405 \times 10^{-6}$	214.4
12	0.337 703 $\times 10$	$3.112031 \times 10^{-6}$	239.1
13	0.425 143 $\times 10$	$1.719917 \times 10^{-6}$	269.8
14	0.535 224 $\times 10$	$9.204476 \times 10^{-7}$	307.7
15	0.673 807 $\times 10$	$4.782921 \times 10^{-7}$	354.5
16	0.848 273 $\times 10$	$2.422921 \times 10^{-7}$	411.8
17	0.106 791 $\times 10^2$	$1.199389 \times 10^{-7}$	482.2
18	0.134 442 $\times 10^2$	$5.825676 \times 10^{-8}$	568.1
19	0.169 253 $\times 10^2$	$2.791396 \times 10^{-8}$	672.3
20	0.213 076 $\times 10^2$	$1.319798 \times 10^{-8}$	799.3

\*为归一化的感生电动势。

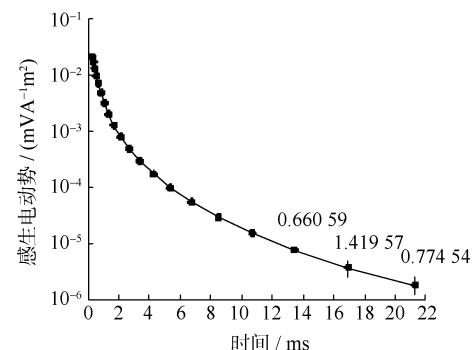


图 1 西王家岭 II 测区 204 线 282 点实测 EMF 曲线  
(图中数字为最后 3 道的误差棒值)

Fig. 1 Observed EMF curve of station 282 at line 204 of survey zone II in Wangjialing, Shanxi Province

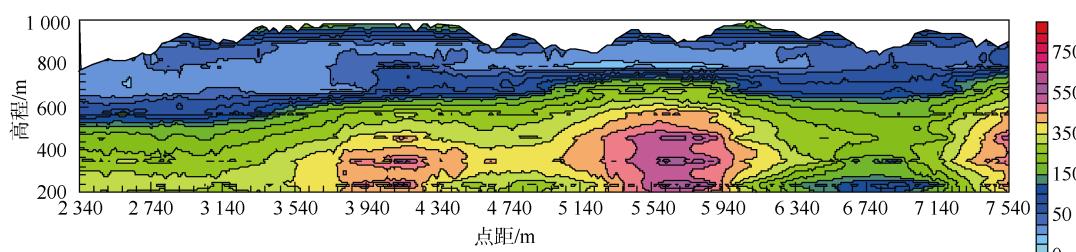
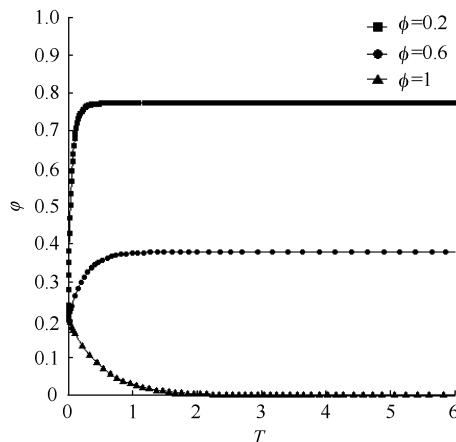
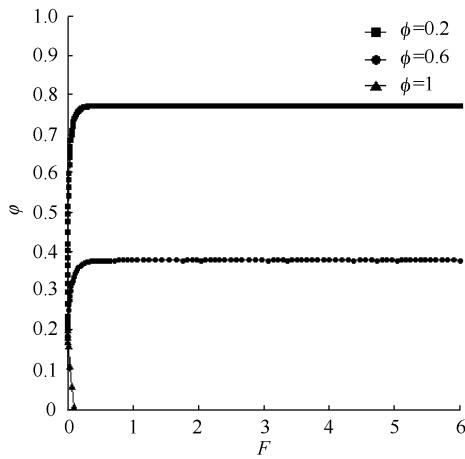


图 2 王家岭 II 测区 240 线 Bostick 反演视电阻率-深度剖面

Fig. 2 Apparent resistivity-depth section of line 240 of survey zone II in Wanfjialing, Shanxi Province

(下转第 92 页)

图 5 不同  $\phi$  下  $\varphi$  随时间变化Fig. 5 Variation of  $\varphi$  with time under different  $\phi$ 图 7 不同  $\phi$  下  $\varphi$  随位移变化Fig. 7 Variation of  $\varphi$  with displacement under different  $\phi$ 

(上接第 88 页)

#### 4 结语

以探测理论为指导对观测时间、信噪比进行估算，可以减少设计和施工中的脉冲频率、发射回线边长、发射电流等参数选择的盲目性，但是，在同样需要了解地质体电性的地球物理前提的论证中发现，还缺少地下水电阻率更详尽的资料。目前煤田水文地质勘探中水的电阻率一般采用的是教科书或电磁法勘探专著中长期沿袭下来的数据<sup>[7-8]</sup>。实际上，水的电阻率因所含矿物质、化学成分不同变化范围很大。从书中提供的 $>1000 \Omega\cdot m$  的雨水到 $0.1 \sim 1 \Omega\cdot m$  的深成盐渍水变化幅度达3~4个数量级。虽然也有地下水 $<100 \Omega\cdot m$  和矿井水 $1 \sim 10 \Omega\cdot m$  这样的数值，但没有指明是什么地区、什么层位的地下水，也没有说明是什么样的矿井、需要多长时间或什么样条件造成了低电阻率的地下水，而仅仅认为水是低阻物质是不够的，还需要获得具体环境中的确切数值。尤其是在水文地质勘探中，应该有更详尽的不同水体的实测电阻率资料。

#### 4 结论

a. 将气力输送理论应用于潜孔锤反循环钻井携屑问题，从动力学角度建立潜孔锤反循环钻井中心通道内岩屑运移数学模型，并通过编程计算求出岩屑在不同初始条件下速度随时间、空间变化特性。

b. 岩屑以不同初速度进入中心通道内时，均进入加速段，经过变加速或变减速运动，岩屑颗粒速度最终都趋于同一个稳定值，在稳定阶段，与岩屑颗粒的初速度无关。

c. 当初始气固速度比固定时，随着岩屑颗粒尺寸的增大，岩屑颗粒稳定后的速度值降低；当颗粒初始速度小于岩屑悬浮速度时，作减速运动，最终静止。

#### 参考文献

- [1] 邹永生. 全球矿产资源勘查形势及中国矿业的未来发展[J]. 中国矿业, 2005, 14(10): 5-7.
- [2] 王文龙, 王禹, 李永哲, 等. 贯通式潜孔锤反循环连续取心(样)钻进工艺在新疆某矿区复杂地层中的应用试验[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006(2): 54-56.
- [3] 博坤, 殷琨, 王茂森. 贯通式潜孔锤反循环钻进技术在矿区勘探中的应用研究[J]. 金属矿山, 2009(3): 133-136.
- [4] 张祖培, 殷琨, 蒋荣庆, 等. 岩土钻掘工程新技术[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- [5] 连桂森. 多相流动基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [6] 上潼真贞. 粉粒体的空气输送[M]. 阮少明, 徐尚宏, 译. 北京: 电力工业出版社, 2003.
- [7] 林江. 气力输送系统中加速区气固两相流动特性的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(7): 893-898.

#### 参考文献

- [1] 石显新, 闫述, 陈明生. 瞬变电磁勘探中的低阻屏蔽层问题[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 160-163.
- [2] SPIES B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods[J]. Geophysics, 1989, 54(7): 872-888.
- [3] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题[M]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1583-1591.
- [4] 闫述, 陈明生, 傅君眉. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002, 45(2): 275-284.
- [5] 石显新. 瞬变电磁法勘探中的低阻屏蔽层问题研究[D]. 西安: 中煤科工集团西安研究院, 2005.
- [6] 石显新, 闫述, 傅君眉, 等. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1931-1936.
- [7] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [8] 帕拉奇 G J. 地质靶体的电阻率特征[M]//米萨克 N 纳比吉安. 勘查地球物理: 电磁法理论. 第一卷. 北京: 地质出版社, 1992.