

# 考虑关断时间效应的瞬变电磁一维反演

杨云见<sup>1</sup>, 王绪本<sup>1</sup>, 何展翔<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 东方地球物理公司, 河北 涿州 072751)

摘要: 为克服因关断时间校正而带来的误差, 尝试直接对包含关断时间效应的瞬变电磁资料进行反演。正演采用将斜阶跃波离散为多个阶跃波之和的方法, 反演采用经典的马奎特法。对模型试算的结果表明, 采用该方法直接对斜阶跃响应进行反演, 结果比较理想, 计算速度也可以接受。

关键词: 瞬变电磁法; 关断时间; 一维反演

中图分类号: P631.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2005)03-0234-03

瞬变电磁法(TEM)是利用接地导线或不接地回线向地下发送一次脉冲电磁场, 在一次脉冲电磁场的间歇期间(断电), 通过观测与研究二次涡流场的变化规律来探测介电性的物探方法。由于该方法观测的是纯二次场, 可在近区观测, 具有分层能力强、精度高等特点, 近年来在矿产勘查、水文环境等领域得到了广泛的应用。但由于正演计算较复杂、计算量大等原因, 目前实际工作中瞬变电磁法的处理解释还主要是采用以基于阶跃响应的一维反演或是“烟圈”法等近似反演。由于实际观测的资料均是含有斜阶跃效应, 因此瞬变电磁资料的处理解释需要作关断时间校正, 关断时间校正的误差就直接影响着反演解释的精度。笔者针对当前使用最广的中心回线法, 尝试对观测资料不作关断时间校正, 直接对斜阶跃响应进行一维反演, 以克服因关断时间校正而带来的误差。

## 1 斜阶跃响应的一维正演

当前斜阶跃响应的计算方法较多, 笔者采取将斜阶跃波分割为  $n$  个小电流元, 每一小电流元用阶跃波来代替斜阶跃波的方法, 随着  $n$  取值的增大, 离散的阶跃波就逼近斜阶跃波, 如图1所示。这种方法计算简单, 且可计算任意关断波形的响应。图2是在供电电流 10 A、圆回线半径 200 m、半空间电阻率为  $100 \Omega \cdot \text{m}$  条件下, 阶跃响应与  $n$  分别取 50 及 500, 关断时间为  $50 \mu\text{s}$  的斜阶跃响应的正演计算结果。图2中  $n$  取 50 及 500 的斜阶跃响应曲线几乎重合, 说明将斜阶跃波分割为  $n$  个小阶跃波的计算方法是可行的; 另一方面也说明当关断时间为  $50 \mu\text{s}$

时, 斜阶跃波分割为 50 个小阶跃波的计算精度是足够的。在计算量上, 由于仍是只需计算 1 组汉克尔变换, 再加上  $n$  次正弦变换, 因此与阶跃响应的计算相比, 计算量增加不大。

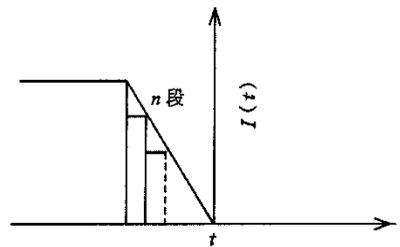


图1 斜阶跃波离散为阶跃波示意

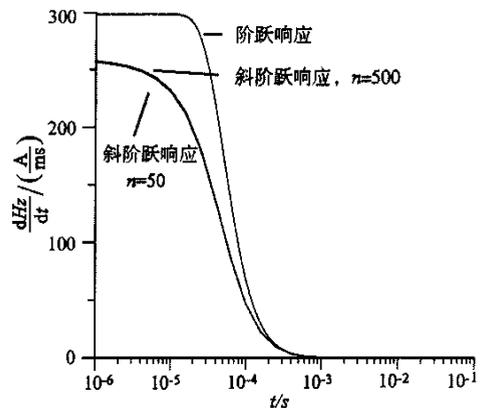


图2 斜阶跃响应与阶跃响应

对于阶跃瞬变响应, 笔者采用数字滤波计算汉克尔变换, 将反富式变换转化为正弦变换的计算方法。计算分 2 步: 先由汉克尔变换计算频率域的响应, 再由正弦变换计算时间域的响应。(1) 式为频率域中求解  $H_z$  的汉克尔变换式, 滤波系数采用参考文献 [2] 中的汉克尔变换滤波系数 (2) 式为从频率

域到时间域求取  $H_z$  时间导数的正弦变换式,滤波系数由(3)式的正弦变换对求取。

$$H_z = I_0 a \int_0^\infty \frac{\lambda z^{(1)}}{z^{(1)} + z_0} J_1(\lambda a) d\lambda, \quad (1)$$

$$H'_z(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im}H(\omega) \cdot \sin(\omega t) d\omega, \quad (2)$$

$$\int_0^\infty g e^{-g} \sin(gb) dg = \frac{1}{b} \left[ \frac{2}{1+b^2} - \frac{2}{(1+b^2)^2} \right] \quad (3)$$

式中  $z^{(1)}$ 、 $z_0$  为地层阻抗函数,  $J_1(\lambda a)$  为 1 阶贝塞尔函数,  $a$  为圆回线半径,  $I_0$  为供电电流,  $H'_z(t)$  表示  $H_z(t)$  的时间导数。

### 2 斜阶跃响应的一维反演

基于阶跃响应的一维反演常常用视电阻率来建立目标函数,但斜阶跃响应定义视电阻率较复杂,因此在对斜阶跃响应的作一维反演时,采取直接拟合观测值的方法,这种方法另一个优点是可同时拟合全期段的数据,而不是仅拟合某一期段。由于观测值幅值变化大,通常达到几个数量级,因此在反演中对观测值取对数,在对数域进行拟合。反演采用经典的马奎特法,该方法具有较快的收敛速度,又能确保迭代收敛。根据马奎特法的原理,可得到法方程

$$(A^T A + \alpha I) \Delta X = A^T B, \quad (4)$$

式中  $A$  为雅可比矩阵,  $\alpha$  为阻尼因子,  $I$  为单位矩阵,  $\Delta X$  为模型修正量,  $B$  为观测值与初始模型正演值之间的残差。

给出初始模型  $X_0$ , 即可由(4)式求出模型修正量  $\Delta X$ , 得到一次迭代解  $X_1 = X_0 + \Delta X$ , 将本次迭代解作为下次迭代的初值,即可得到新的迭代解。如此迭代计算,即可得到最小二乘意义下的最佳模型。

由于线性反演的结果与初始模型关系很大,所以要求所给的初始模型不要偏离太大。文中反演计算以关断时间校正后的“烟圈”法近似反演的结果作初始模型,以使初始模型尽可能地靠近真实的地电结构。反演计算中采用差分方法求取偏导数,计算速度相对较慢,但对于一维反演而言,由于反演参数较少,这种做法是可以接受的。

### 3 算例分析

我们通过几个算例来分析上述基于斜阶跃响应的一维反演的有效性、可行性。

(1)取层数为 3 层的一维层状均匀模型,设回线半径 100 m,供电电流 10 A,电流关断时间 50  $\mu$ s。对此模型斜阶跃正演的结果采用上述方法作反演。

经马奎特法 20 次迭代,得到的反演结果几乎重现了正演模型(表 1)。此结果表明 3 层模型的反演效果很理想。此实验在主频 1.4 GHz 的 P4 微机上反演计算时间约为 20 min,计算速度也较快。

表 1 3 层模型的反演结果

	$h_1/\rho_s^1$	$h_2/\rho_s^2$	$\rho_s^3$
正演模型参数	100/200	20/20	200
反演初始模型参数	150/100	50/100	100
反演结果	99.9/200.1	20.2/20.2	200

注  $h_i$ 、 $\rho_s^i$  分别为第  $i$  层层厚(m)和视电阻率( $\Omega \cdot m$ )。表 2 同。

(2)取层数为 5 层的层状均匀模型,设回线半径 200 m,供电电流 10 A,电流关断时间 50  $\mu$ s。对此模型斜阶跃正演的结果同样采用上述方法作反演。经马奎特法 20 次迭代的反演结果,与真实模型吻合较好,相对于“烟圈法”近似反演,其结果更为准确(表 2)。此结果说明 5 层模型的反演效果也比较好,但由于反演参数增多,多解性增强,5 层模型的反演效果不如 3 层模型的好。此实验在主频 1.4 G 的 P4 微机上反演计算耗时近 40 min,计算速度基本上可以接受。

表 2 5 层模型的反演结果

	$h_1/\rho_s^1$	$h_2/\rho_s^2$	$h_3/\rho_s^3$	$h_4/\rho_s^4$	$\rho_s^5$
正演模型参数	100/100	15/10	185/100	50/10	100
“烟圈法”近似反演	80/100	70/30	130/60	70/30	60
马奎特法反演	95.2/100.4	31.2/17.1	157.3/135.2	76.2/13.8	100.3

从上述算例可以看到,基于斜阶跃响应反演的效果较好,耗时也可以接受。当然,所给的初始模型层数越多,耗时越长,多解性也越强。对于反演多解性的问题,生产中可采用约束反演的方法。

### 4 结论

采用上述方法直接对斜阶跃数据进行反演,效果较好,计算速度也可以接受,因此是可行的。由于直接对斜阶跃数据进行反演,不需要做关断时间校正,克服了因关断时间校正而带来的误差,可提高瞬变电磁资料处理的精度。此外文中所述的正演方法可对任何关断波形进行正演模拟。

### 参考文献:

[1] 方文藻,李予国,李貅.瞬变电磁测深法原理[M].西安:西北工业大学出版社,1993.

[2] 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.

[3] 蒋邦远.瞬变电磁法勘探[M].北京:地质出版社,1998.

[4] 米萨克 N 纳比吉安.勘查地球物理—电磁法[M].赵经祥译.北京:地质出版社,1992.

[5] 严良俊,胡文宝.瞬变电磁测深—一维反演及结果分析[J].江汉

石油学院学报,1994,16(增刊).

[6] 林长佑. 瞬变电磁晚期场资料的一维反演[J]. 西北地震学报, 1994,16(2).

[7] 苏朱刘, 胡文宝. 中心回线方式瞬变电磁测深虚拟全区视电阻率和一维反演方法[J]. 石油物探 2002,41(2).

[8] 白登海. 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.

[9] Anseron W L. Computer program numerical integration of related hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering [J]. Geophysics,1979,44(7).

## 1D INVERSION OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC DATA IN CONSIDERATION OF RAMP TIME EFFECT

YANG Yun-jian<sup>1</sup>, WANG Xu-ben<sup>1</sup>, HE Zhan-xiang<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. BGP Inc., Zhuozhou 072751, China)

**Abstract:** This paper tries to conduct a direct inversion of the transient electromagnetic data, in which the ramp time effect is considered so that error correction of ramp time effect can be avoided. Ramp current is replaced by a series of transient currents during the forward procedure. Considering the main purpose of this paper, the authors have chosen a typical inversion method Marquardt. The results obtained are coincident well with the theoretical model, and the cost of time is acceptable.

**Key words:** transient electromagnetic method; ramp time; 1D inversion

**作者简介:** 杨云见(1975 - )男, 成都理工大学在读硕士研究生, 专业: 固体地球物理, 研究方向: 地球物理数据处理。



### 上接 219 页

[4] 朱有光, 蒋敬业. 金矿地球化学找矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.

[5] 李惠, 张文华, 刘宝林. 中国主要类型金矿床的原生晕轴向分带系列研究应用准则[J]. 地质与勘探, 1999, 35(1).

[6] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[7] 徐勇. 浅论矿集区的资源潜力与勘查评价[J]. 中国地质, 2002, 29(3).

[8] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.

[9] 谢学锦. 勘查地球化学: 发展史·现状·展望[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6).

[10] 刘玉民, 魏连喜, 陈淑娟. 黑龙江省老柞山金矿综合找矿标志探

讨[J]. 黑龙江地质, 2001, 12(1).

[11] 何宝林. 老柞山金矿床特征及成因探讨[J]. 黑龙江地质, 2002, 13(2).

[12] 马家骏, 王英杰. 黑龙江省东部岩金成矿作用探讨[J]. 黑龙江地质, 1990, 2(1).

[13] 任天祥, 伍宗华, 姜荣生. 区域化探异常筛选与查证的方法技术[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[14] 孙文珂, 黄崇轲. 区域物探资料在研究区域构造和成矿、控矿构造方面的作用[A]. 孙文珂, 黄崇轲, 丁鹏飞, 等. 重点成矿区带的区域构造和成矿构造文集[C]. 北京: 地质出版社, 2001.

[15] 吴尚全. 黑龙江省团结沟斑岩金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

## AN ANALYSIS OF GOLD METALLOGENIC PROSPECTS OF YUNSHAN ANAOMALY AREA

SUN Zhong-ren<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue-juan<sup>2</sup>, LU Chang-sheng<sup>3</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China; 3. Heilongjiang Institute of Geophysical Exploration, Harbin 150036, China)

**Abstract:** Based on a study of regional structures and geological conditions of Yunshan anomaly area and an analysis of geophysical and geochemical data, the authors hold that this area deserves much attention in future. It is pointed out that the study of the geological cause for the magnetic anomalies in the anomaly area will probably bring a favorable turn in the analysis of these anomalies.

**Key words:** magnetic anomaly; gold metallogenic prospects; Yunshan anomaly area

**作者简介:** 孙中任(1963 - )男, 中国地质大学在读博士, 教授级高级工程师, 现主要从事地质勘查中物、化、遥的应用研究工作。  
万方数据