

瞬变电磁测深早期数据的修正

薛国强¹, 李 貅²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 西安 710054)

摘 要 通过时间-频率转换关系, TEM 数据可以转换成平面波场测深数据, 从而可以对 TEM 资料进行拟平面波场处理解释。在对瞬变电磁视电阻率数据向平面波场测深视电阻率数据转换时, 发现由于瞬变电磁使用晚期计算公式及装置问题, 使测深曲线早期数据发生畸变。文中建立了视电阻率曲线进入晚期所满足的关系式, 从理论上给出不同情况下瞬变电磁测深视电阻率曲线进入晚期的临界点。以瞬变电磁、大地电磁、CSAMT 为例, 对大量的模型进行正演计算, 对计算结果进行对比分析, 建立不同地表电性结构、不同时间延迟情况下, 瞬变电磁早期数据误差的校正量板。

关键词 瞬变电磁法, 视电阻率, 早期数据, 修正

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0220-05

Correction of TEM Early -Time sounding date

XUE Guo-qiang¹, LI Xiu²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Geology and Survey, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract According to the relationship between time and frequency, TEM sounding data can be transformed into plane-wave sounding data, for the purpose to process TEM data as MT. During the study of transformation from TEM diffusion field sounding data to plane-wave electromagnetic sounding data, it has been discovered that there exist distortions in early-time data because of using late-time calculating formula in all time delay and configuration. In this paper, the formula of late-time apparent resistivity curve has been constructed. Theoretically, the late-time point of different configuration and geo-electric structure has been given. After a lot of calculation of models and theoretical analysis, according to different time-delay, survey configuration, geo-electric structure, a revised method of TEM early-time field data has been given.

Keywords transient electromagnetic method, apparent-resistivity, early-time data, revise

0 引 言

瞬变电磁法(TEM)具有勘探深度大、穿透高阻层能力强、随机干扰小等特点。可以在远区观测,亦可以在近区观测。选择不同时间窗进行观测,可以获得不同深度的地质信息等优点。回线源瞬变电磁法是 TEM 的一种近区装置方法。它是使用边长较大的矩形或正方形发送回线,在回线内进行测量,它是一种可以使用较大发射功率的装置,这种场源具有发送磁矩大、场均匀等特点,适合于勘查精度要求较高的工

程及资源、矿产勘查工作。瞬变电磁法广泛应用于金属矿勘探^[1]、油气田勘探^[2]和煤田地质勘探^[3~6]

瞬变电磁场分为早期和晚期场数据,对早期信号的响应特性研究相对较少,文献^[7]从计算线圈自感的影响上分析早期信号的响应特性,文献^[8]从仪器线路设计上研究早期信号的检测方法。常规瞬变电磁观测是按照晚期公式计算视电阻率数据的,这样就会使测深曲线首枝发生一定的失真。

在简单地质情况下,MT 和 TEM 测深视电阻率曲线具有相似性,大地电磁的观测波频和瞬变电

收稿日期 2007-07-10; 修回日期 2007-11-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(50539080,40774066)联合资助.

作者简介 薛国强,男,1966年生,山西临猗人,副研究员,2002年长安大学获硕士学位,2005年西安交通大学获得博士学位,研究方向为电磁探测理论与应用。(E-mail:ppxueguoqiang@163.com)

磁的时间延迟具有简单的变换关系,文献^[9]利用 MT 视电阻率数据和相位之间的关系,对瞬变电磁进行了转换相位研究;文献^[10,11]根据 TEM 时间与 MT 频率之间的转换关系: $194 f^{-1} = t$,利用 TEM 消除大地电磁测深的静态效应影响。

作者在对瞬变电磁视电阻率数据向平面波场测深视电阻率数据转换时,发现由于瞬变电磁使用晚期计算公式,使测深曲线早期数据发生畸变。通过大量模型计算结果分析对比,发现瞬变电磁早期视电阻率值与平面波场数据的偏差。提出早期数据向波场数据转换时的波场修正方法,给出不同情况下的修正参照量。

1 瞬变电磁测深数据分析

对于回线源装置的瞬变电磁测深勘探,在满足信噪比,保证观测精度的条件下,可以不计电流的影响。但是回线边长大小对视电阻率值大小有影响。

为了对比不同发送回线边长的瞬变电磁正演数据的大小,(发送电流为 10 A;发送边长为: $L_1=20$ m, $L_2=50$ m, $L_3=100$ m, $L_4=200$ m, $L_5=500$ m)设计了一个 G 型地电断面。并分别进行同一电性结构情况下的正演计算。采样时间道序列与加拿大 GEONICS 公司的 EM-37 仪器,长沙智通的 SD-1 仪器一致。并把计算结果绘在同一坐标系下。如图 1 所示,图中坐标采用双对数数制,横坐标为采样时间延迟,单位为 ms;纵坐标为视电阻率值,单位为 $\Omega \cdot m$ 。

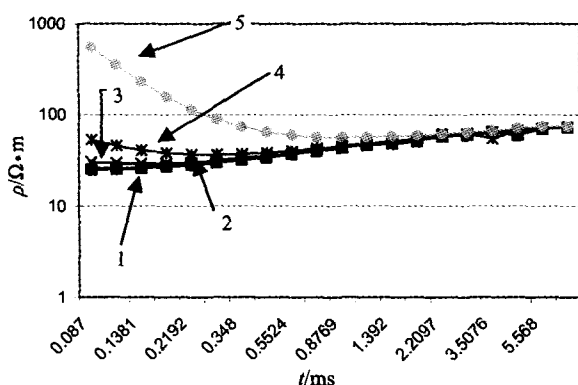


图 1 不同回线边长时 TEM 正演视电阻率曲线

1. $L=20$ m; 2. $L=50$ m; 3. $L=100$ m; 4. $L=200$ m; 5. $L=500$ m

$\rho_1=25 \Omega \cdot m$, $h_1=50$ m, $\rho_2=100 \Omega \cdot m$

Fig. 1 TEM forward apparent-resistivity curve of different loop size

从图 1 可以明显看出,TEM 视电阻率曲线及数据的大小与发送回线尺寸有关。在晚期时间道,视电

阻率值及曲线相差较小,曲线基本重合。这说明晚期视电阻率值与回线边长的尺寸关系不大。这是由于进入晚期以后,电磁场扩散深度较大,发送回线边长与扩散深度的比值较小,相对于较大探测深度的瞬变电磁勘探,不同尺寸的回线源都可以近似看作点源,同一点源在地下传播特性是一样的,所以视电阻率值基本一致。

而在早期时间道,不同发送回线边长的视电阻率值不同。发送回线边长较大的视电阻率值较大,发送回线较小的视电阻率值较小。这是由于,瞬变电磁测深正演计算及野外观测都是以晚期观测、计算为依据,较小回线边长的测深数据进入晚期较早,而较大回线边长的测深数据进入晚期较迟,进入晚期之前的数据按照晚期公式计算视电阻率值,必然引进较大的误差。

回线边长不同,视电阻率数据不同。在采用晚期视电阻率公式计算的情况下,回线边长与探测目标层位深度相当时,视电阻率值与真实地层电阻率最接近。回线边长特别大时,曲线的首枝与真实地层电阻率值相差较大。回线较小时,曲线首枝与真实地层电阻率值相差不大。这一现象也是由于场源及装置不同引起的,是瞬变电磁方法本身的特性。所以,在野外工作时,并不是回线边长越大越好,而是选择与探测层深度相当的边长尺寸即可。

2 临界关系式的给定

对于上述由不同线图装置而引起的测深视电阻率早期数据畸变,必须进行校正,但是首先要找到造成这种畸变的因素及量的关系。

在均匀半空间,回线源形成的瞬变电磁场表达式为^[13,14,15]:

$$\dot{B} = \frac{3I\rho}{a^3} \left[\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{1}{3} u^2 \right) e^{-\frac{u^2}{2}} \right], \quad (1)$$

a 为回线边长, ρ 为均匀大地电阻率, $\Phi(u)$ 为概率积分。

$$u = \frac{2\pi a}{\tau}, \quad \tau = \sqrt{2\pi\rho t} \times 10^7.$$

由(1)式不可能给出简单而且唯一的视电阻率转换公式,但可以给出晚期或者早期视电阻率表达式。

在晚期情况下,由磁场的微分量定义的视电阻率公式为:

$$\rho_r(\dot{B}) = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left[\frac{2\pi I_0 a^2 \mu_0}{5t\dot{B}} \right]^{\frac{2}{3}}. \quad (2)$$

将(1)代入(2),即可得均匀半空间下晚期归一

化视电阻率公式:

$$\frac{\rho_t(B)}{\rho} = 64.74 \left[\Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{1}{3} u^2 \right) e^{-\frac{u^2}{2}} \right]^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{a}{\tau} \right)^{\frac{10}{3}}. \quad (3)$$

文献[1]对晚期视电阻率进行计算,得到视电阻率曲线(图3),发现当 $\frac{\tau}{a} \geq 16$ 时,视电阻率值趋近于均匀半空间实际电阻率值.两者误差小于5%.当 $\frac{\tau}{a} \geq 9$ 时,两者误差小于10%.即在一定条件下, $\rho_t \rightarrow \rho$.

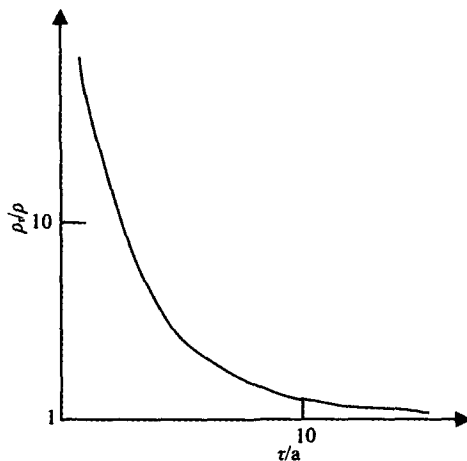


图2 按晚期公式计算的视电阻率

Fig. 2 Apparent resistivity calculated with late time formula

从图2也可以看出:满足一定的条件时,视电阻率值与真实电阻率值比较接近,否则两个值相差较

大.这一差别大小与回线边长,地面电阻率,观测时间有关.在满足精度要求的情况下,当 $\frac{\tau}{a} \geq 9$ 时,视电阻率值才与地下真实电阻率值相等.

把 $\tau = \sqrt{2\pi\rho t} \times 10^7$ 代入 $\frac{\tau}{a} \geq 9$ 得:

$$\rho t \geq \frac{81a^2}{2\pi \times 10^7}, \quad (4)$$

t 的单位为 s, a 的单位为 m. 即:

$$\rho t \geq 1289a^2. \quad (5)$$

t 的单位为 ms, a 的单位为 km.

由式(4)可以看出:当 ρt 越大时,上式越容易满足,当 a 越大时,上式越不容易满足.定义满足 $\rho t = 1289a^2$ 的电阻率值,观测时间,回线边长为测深曲线进入晚期的临界值.这些值不是一个定值,但是在给定两个值时,另外一个值必然是个定值.

下面给出电阻率和发送回线边长一定情况下的测深曲线晚期时间临界值(表1),表中值对野外生产具有一定的指导意义,还可以作为测深曲线特性分析时的判断依据.也可以作为后面要进行的测深曲线早期数据校正终止时间参照.表中回线边长的单位为 km,时间的单位为 ms.电阻率的单位为 $\Omega \cdot m$.从此表的计算结果可以看出:表层视电阻率值越大,回线边长越小,进入晚期的临界时间就越早;回线边长越大,表层电阻率值越小,回线边长越大,进入晚期的时间越晚.在生产工作中,根据勘探目标深度,会选择一定长度的发送回线,而实际地面电阻率是一个定值,这样瞬变电磁测深曲线进入晚期的临界时间就成了一个定值.

表1 给定发送回线及电阻率情况下的晚期临界时间值(单位 ms)

Table 1 Late time list of the given loop size and resistivity

边长 a	表层电阻率								
	$\rho=10$	$\rho=20$	$\rho=30$	$\rho=50$	$\rho=80$	$\rho=100$	$\rho=200$	$\rho=400$	$\rho=600$
0.1	1.289	0.64	0.43	0.258	0.161	0.129	0.064	0.032	0.021
0.2	5.156	2.57	1.717	1.031	0.644	0.516	0.258	0.129	0.086
0.3	11.601	5.8	3.867	2.32	1.45	1.16	0.58	0.29	0.19
0.5	32.225	16.11	10.74	6.445	4.028	3.223	1.611	0.806	0.537
0.8	82.496	41.25	27.5	16.5	10.31	8.25	4.125	2.062	1.375
1	128.9	64.45	42.97	25.78	16.11	12.89	6.445	3.223	2.148
1.2	185.61	92.81	61.87	37.12	23.2	18.56	9.281	4.64	3.094

3 校正方法

为了对临界点之前的数据进行校正,必须了解此位置前的数据误差情况,通过计算大量的模型数据,分析由这些数据所绘成的视电阻率曲线,采用如下的相对误差计算公式,

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{tem} - \rho_{mt}}{\rho_{tem}} \times 100\%,$$

ρ_{tem} 为按经验公式转换后的瞬变电阻率数据, ρ_{mt} 为大地电磁视电阻率数据,计算了不同地面电阻率情况下,两种场源电磁测深数据在每一个时间所对应的误差,然后画成如下的曲线图。图中横坐标为表层电阻率值,纵坐标为误差百分比。图中 $t_1=0.087$ ms, $t_2=0.138$ ms, $t_3=0.219$ ms, $t_4=0.348$ ms, $t_5=0.552$ ms, $t_6=0.878$ ms, $t_7=1.392$ ms, $t_8=2.2$ ms, $t_9=3.5$ ms。从图中看出:在早期时间道,两种场源数据相差较大,最大误差达 44%,当地表电阻率增大时,百分比差值在减小。随着时间推移,不同地表电阻率的两种值场误差百分比在整体下降。从地表电性角度考虑,误差较大的区域主要分布在地表电阻率 $10 \Omega \cdot m \sim 50 \Omega \cdot m$,并且误差随地表电阻率值的增大而减小。

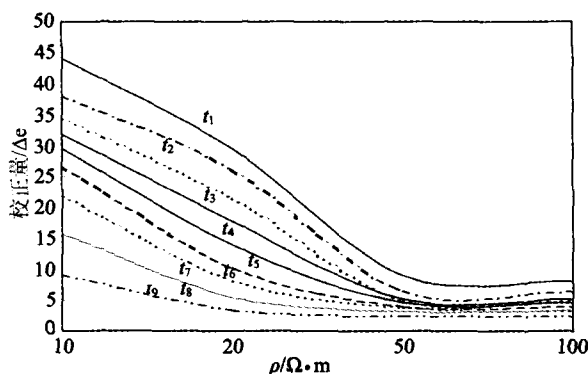


图 3 早期视电阻率修正曲线

Fig. 3 Reviving curve of TEM early-time resistivity

下面给出按照图 3 所示修正量板对早期数据的修正结果。图 4 和图 6 分别显示的是修正前的 TEM 测深曲线与 MT 曲线对比。图 5 和图 7 分别显示的是按照图 3 所示时时板修正后的 TEM 曲线与 MT 曲线对比图。可以看出,经过修正后的曲线的首枝接近平面波场测深曲线,这样,经过修正后的曲线可以进行拟地震处理。限于篇幅,不再讨论这一问题。

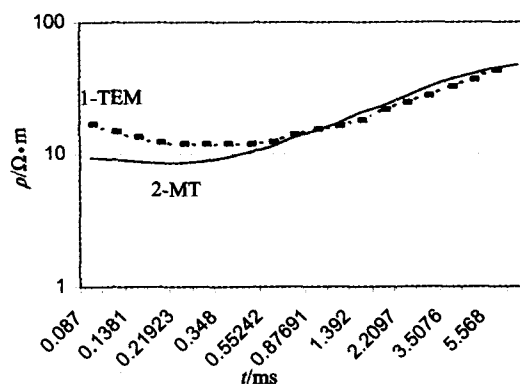


图 4 修正之前的 TEM 测深曲线与 MT 曲线对比

$\rho_1 = 10 \Omega \cdot m, \rho_2 = 200 \Omega \cdot m, h_1 = 50 m$

Fig. 4 TEM sounding curve before reviving and MT curve

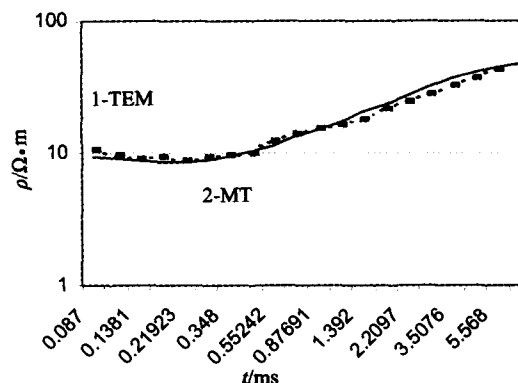


图 5 修正后的 TEM 曲线与 MT 曲线对比

$\rho_1 = 10 \Omega \cdot m, \rho_2 = 200 \Omega \cdot m, h_1 = 50 m$

Fig. 5 TEM sounding curve after reviving and MT curve

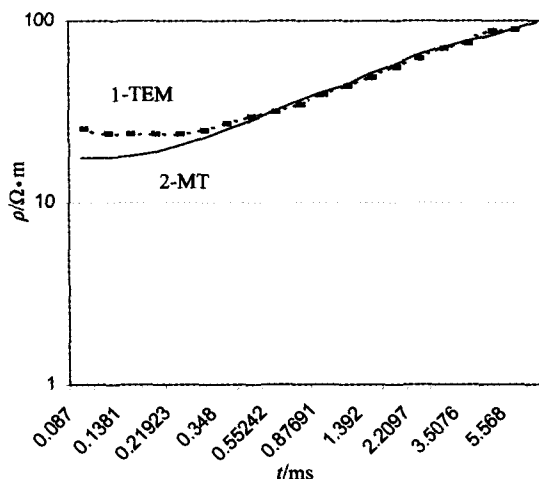


图 6 修正前 TEM 测深曲线与 MT 曲线对比

$\rho_1 = 20 \Omega \cdot m, \rho_2 = 200 \Omega \cdot m, h_1 = 50 m$

Fig. 6 TEM sounding curve before reviving and MT curve

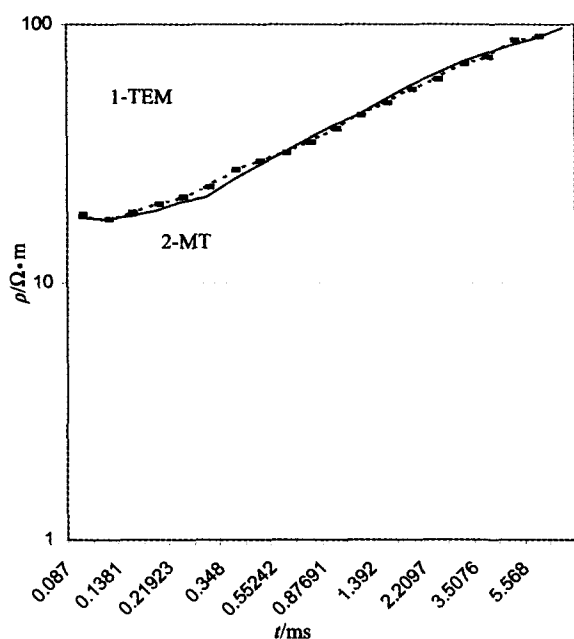


图7 修正后 TEM 测深曲线与 MT 曲线对比

$$\rho_1 = 20 \Omega \cdot \text{m}, \rho_2 = 200 \Omega \cdot \text{m}, h_1 = 50 \text{ m}$$

Fig. 7 TEM sounding curve after reviving and MT curve

4 结 论

在均匀半空间下,建立了曲线进入晚期所满足的关系式,为了从模型正演上验证瞬变电磁场数据与平面波场数据的一致性,设计了不同的层状地电模型,以瞬变电磁测深数据为例分析扩散场的视电阻率曲线,以大地电磁测深数据测深数据为例分析平面波场视电阻率曲线.计算不同发送边长情况下瞬变电磁正演计算结果,再计算相同模型时的大地电磁,找到并发现早期瞬变电磁测深数据的不一致

性.结合大量模型处理结果对这一结论做不同地表电阻率、不同采样时间下的修正.给出修正参照量板.并对理论模型进行了修正.

参 考 文 献 (References):

- [1] 柳建新,刘春明,童艳光.强场源瞬变电磁仪及在某铜矿的试验性应用[J].物探与化探,2004,28(2):130~132.
- [2] 唐新功,胡文宝,严良俊,郑佳奎.瞬变电磁法油藏动态监测模拟[J].石油物探,2004,43(2):192~196.
- [3] 周韬,等.瞬变电磁法在煤矿水害防治的应用[J].中国煤田地,2004,16(2):44~46.
- [4] 叶剑湘.瞬变电磁测深法找煤效果研究[J].中国煤田地,2000,12(4):71~74.
- [5] 王惠亮.应用瞬变电磁法探测煤层风氧化带[J].采矿技术,2004,4(2):61~62.
- [6] 路军臣,苏维涛,张济怀.瞬变电磁法在探测小窑采空区中的应用[J].河北煤炭,2002,2:39~40.
- [7] F. Kamenetsky and Chr. Oelsner Distortions of EM transients in coincident loops at short-time-delay[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(6):983~993.
- [8] 李创社,李实,宋建平,唐天同.瞬变电磁勘探中早期信号的检测方法研究[J].煤田地与勘探,1994,27(2):58.
- [9] Maxwell A. Meju a new method of transient electromagnetic data analysis[J]. Geophysics, 1998, 61(2):405~410.
- [10] Ben K S, James C W, Louise P. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic sounding[J]. Geophysic, 1988, 53(11):1459~1468.
- [11] Maxwell A M. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings; Some effective practical considerations[J]. Geophysic, 1996, 61(1):56~65.
- [12] 李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [13] 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.
- [14] 牛之琰.时间域电磁法原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1993.