GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION

远参考大地电磁测深法应用研究

杨生¹ 鲍光淑¹ 张全胜²

(1.中南大学,湖南长沙 410083; 2.华东有色地质勘查局 814 队,江苏镇江 212005)

摘要:随着大地电磁法应用领域的不断扩大,勘探环境的干扰背景也越来越复杂,而采用远参考方法是压制干扰、 提高信噪比的一种有效方法。本文从信号检测的角度阐述了该方法的原理,并讨论了其在压制各种干扰方面所发 挥的作用。

关键词:远参考处理 信噪比 相关分析 阻抗方差

中图分类号:P631.32 文献标识码:A 文章编号:1000-8918(2002)01-0027-05

近年来,随着科学技术的进步,大地电磁测深法 (MT)不论在野外采集仪器,还是数据处理解释软件 方面,都得到了飞速发展,MT勘探量逐年增加,应用 领域不断扩大,特别是在石油和天然气的勘探中,已 成为配合、补充地震法的一个重要手段。随着我国 石油勘探的逐渐深入,一些城镇密集、人文干扰严重 的地区也开展了 MT 勘探工作,因此如何有效地提 高采集数据质量,成为目前工作中首先考虑的问题。

互功率谱法¹¹、有限频段的电磁信号对法²¹、 Robust 处理方法^{3,4]}等在消除电磁噪声、提高数据质 量方面均有一定的效果,但这些方法仅能抑制不相 关电磁噪声,对相关噪声是无能为力的。而作者所 讨论的远参考方法不仅可以消除不相关噪音,同时 也可消除相关噪音。特别是近年来开发出的新型大 地电磁测量系统,电、磁信号的采集站由过去的电缆 同步方式改为卫星时钟跟踪同步技术,使远参考方 法的实施变得十分容易。

1 常规方法张量阻抗估算中的噪音影响

在常规大地电磁测深法(单点测量,不设置远参考道)中,某一频率的张量阻抗是采用最小二乘法原理估算的,最终可以通过求解以下方程来实现⁵¹

 $E_{x}H_{x}^{*} = Z_{xx}H_{x}H_{x}^{*} + Z_{xy}H_{y}H_{x}^{*}$ $E_{x}H_{y}^{*} = Z_{xx}H_{x}H_{y}^{*} + Z_{xy}H_{y}H_{y}^{*}$ $E_{y}H_{x}^{*} = Z_{yx}H_{x}H_{x}^{*} + Z_{yy}H_{y}H_{x}^{*}$ $E_{y}H_{y}^{*} = Z_{yx}H_{x}H_{y}^{*} + Z_{yy}H_{y}H_{y}^{*}$ 式中 E_{i} , $H_{i}(i = x, y)$ 分别为电、磁场分量, $Z_{i}(i = x)$

x ,y ;j = *x ,y*)为张量阻抗元素 ,* 表示取共轭。若 令 :

> $E = \begin{bmatrix} E_x & E_y \end{bmatrix}^{\Gamma};$ $H = \begin{bmatrix} H_x & H_y \end{bmatrix}^{\Gamma};$ $H^* = \begin{bmatrix} H_x^* & H_y^* \end{bmatrix};$ $Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{yy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix},$

则(1)式写为矩阵形式为

$$[EH^*] = Z[HH^*], \qquad (2)$$

 所以有
 Z = [EH* [HH*]⁻¹。
 (3)

 由于各种噪音的存在,野外大地电磁资料实际观测

 值(E,H)是真实信号和干扰噪音之和,即

 $E = E_{s} + E_{n}$; $H = H_{s} + H_{n}$,

下标 s ,n 分别表示信号和噪音分量。

当参加平均的数据量足够大时,并假设电、磁干 扰噪音 *E*_n和 *H*_n不相关时,式(3)可分解为

$$Z = \frac{Z[H_{s}H_{s}^{*}]}{[H_{s}H_{s}^{*}] + [H_{n}H_{n}^{*}]}, \qquad (4)$$

其中 , $Z_s = [E_s H_s^*] / [H_s H_s^*]$,为真正的大地电 磁阻抗响应。

如果电场噪音 *E*_n和磁场噪音 *H*_n是同源的,两 者相关,则式(3)的分解形式应为

$$Z = \frac{\left[\frac{E_{s}H_{s}^{*}}{H_{s}H_{s}^{*}}\right] + \left[\frac{E_{n}H_{n}^{*}}{H_{n}H_{n}^{*}}\right]}{\left[\frac{H_{s}H_{s}^{*}}{H_{s}H_{s}^{*}}\right] + \left[\frac{H_{n}H_{n}^{*}}{H_{n}H_{n}^{*}}\right]}$$
$$= \frac{Z\left[\frac{H_{s}H_{s}^{*}}{H_{s}H_{s}^{*}}\right] + Z\left[\frac{H_{n}H_{n}^{*}}{H_{n}H_{n}^{*}}\right]}{\left[\frac{H_{s}H_{s}^{*}}{H_{s}H_{n}^{*}}\right] + \left[\frac{H_{n}H_{n}^{*}}{H_{n}H_{n}^{*}}\right]}, \quad (5)$$

其中 ,Z_n =[*E_sH_s**]/[*H_nH_n**], 为电磁噪声之间 的响应关系。

(5)式说明常规大地电磁测深法由方程 1)所求 出的张量阻抗 $Z \in Z_s$ 和 Z_n 的加权平均 ,为有偏估 计 ,仅当 $H_n = 0$ 时 ,Z 才为真实的大地电磁张量阻 抗。

2 远参考方法原理

采用最小二乘法,由方程式(1)对张量阻抗估 算,就信号分析的角度而言,实质上是以磁道 H 作 为参考信号,实行相关检测。但是,由于所用的参考 信号同时又是被检测的磁道信号的关系式中出现自 相关项,所以相关检测难以将噪音消除。假如能再 观测1个与原来的信号相关而噪音不相关的参考信 号,就可以使关系式中不出现自相关项。

远参考方法正是基于上述的认识提出的,即另 设1个信号观测道——远参考道 R,与实测点资料 进行相关处理,以获得真正的大地电磁响应。

实际上从系统分析的角度来研究大地电磁信号 间的关系时,可将大地看成1个滤波器,磁场 h 为 输入信号,电场 e 为输出信号, z(t)为大地系统的 传输函数,则有

$$\boldsymbol{e}_{s}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{z}(\tau) \boldsymbol{h}_{s}(t-\tau) \mathrm{d}\tau \quad , \qquad (6)$$

显然由于各种干扰的存在,我们无法获得 $e_{s}(t)$ 和 $h_{s}(t)$,实测的电磁场[e(t),h(t)]实际是真实信号 [$e_{s}(t)$, $h_{s}(t)$]和干扰噪音[$e_{n}(t)$, $h_{n}(t)$]之和,则 (6)式改写为

$$\boldsymbol{e}(t) - \boldsymbol{e}_{\mathrm{i}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{z}(\tau) \boldsymbol{h}(t-\tau) - \boldsymbol{h}_{\mathrm{i}}(t-\tau) \mathrm{d}\tau ,$$

为了消除式中的噪音项,可用远参考信号 r(t)与上 式两端进行相关运算,由于噪音和信号、噪音和噪音 不相关,所以有

$$\int_{-\infty}^{\infty} [e(\xi) - e_{n}(\xi)] r(\xi + t) - r_{n}(\xi + t)] d\xi$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} e(\xi) r(\xi + t) d\xi ;$$

$$\int_{-\infty-\infty} \int_{-\infty} f(\xi - \tau) - h_{t}(\xi - \tau) \operatorname{H} \tau \left(r(\xi + t) - r_{t}(\xi + t) \right) \mathrm{d} \xi$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} z(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi - \tau) r(\xi + t) d\xi d\tau ,$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}(\xi) (\xi_{t+1}) d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}(\tau) \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{h}(\xi - \tau) (\xi + t) d\xi d\tau$$

$$ER^* = ZHR^*$$
,

如果将多次观测取平均 ,有

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}\mathbf{R}^* & \mathbf{I} \mathbf{H}\mathbf{R}^* & \mathbf{1}^1 \end{bmatrix}$$
(7)

实际上若用 R^{*} 取代(3)式中的 H^{*},可得与上式同 样的结果。

如果将 R 也表示为信号和噪音之和时 则

$$R = R_{s} + R_{n} ,$$

$$Z = \frac{Z[H_{s}R_{s}^{*}] + Z_{n}[H_{n}R_{n}^{*}]}{[H_{s}R_{s}^{*}] + [H_{n}R_{n}^{*}]} , \quad (8)$$

由刊 $H_n R_n^*$]=0,有 $Z = Z_s$ 。

所以采用远参考处理方法可以消除电、磁噪音 影响,获得张量阻抗的无偏估计。

3 应用实例

3.1 高频数据的改善

由于 MT 高频勘探范围小 ,高频段资料(称为首 支) ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 两条曲线的首支应当重合(或平行),理 想的首支曲线应趋于 1 条水平渐近线 ,但由于天然 信号在高频较弱 ,人文干扰强 ,信噪比小 ,采用常规 方法得出的高频资料往往出现下掉现象。如图 1a , ρ_{xy} 的曲线在 320 Hz ,240 Hz 和 160 Hz 处的数据明显 偏低。图 1b 为采用远参考处理后所得资料 ,参考距 (实测点与远参考道之间的距离)为 10 km ,高频 3 个 频 率 的 数 据 增 大 , ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 曲 线 在 首 支 重合 ,所以短距离的远参考处理可使高频资料得到

图 1 远参考处理对高频数据的改善 a—常规处理 ρ_s 曲线; b—远参考处理后 ρ_s 曲线。图 1~图 4 同。





图 2 远参考处理对畸变曲线的校正

改善 增强了资料的可靠性。(图 1b 的远参考处理 实际是采用互参考方式实现的,即借用同一测区其 它点同时观测的磁场资料,作为参考信号。)

3.2 畸变曲线的校正

当测点附近存在恒定干扰源时,常常使实测曲 线发生畸变(如45°抬升或某段数据突变),特别是由 于干扰源所产生的电、磁场噪音是相关的,畸变段数 据的离差很小,单以离差界定数据品质时,这种资料 往往是 I 级点。图 2a 所示的曲线,在 0.6~0.06 Hz 间的数据出现变异,是典型的畸变曲线;图 2b 为远 参考处理后的资料(参考距为 80 km),曲线形态发 生了较大的变化,消除了恒定干扰源的电、磁场相关 噪音,使 0.6~0.06 Hz 间的数据得以校正,曲线变 得合理。

3.3 弱信号资料的恢复

在天然电磁场中,1~0.1 Hz 频带间的信号很 弱,磁场振幅一般只有 10^{-3} nT,有时甚至更弱;由于 有用信号可能比干扰噪音小很多,使信噪比变得很 低,实测曲线在该频段出现"塌陷"现象(图 3a)。由 于远参考处理方法具有较强的弱信号检测能力,使 实测资料中的干扰噪音相关趋于0,使资料恢复正 常。图 3b 是远参考处理后的结果(参考距为 100 km),1~0.1 Hz 间的'塌陷"现象明显消失。

3.4 整体曲线质量的提高

由于大地电磁测深法是一种体积勘探方法,所以 相邻频率间的数据相关性很强,整条曲线应是连续变 化的。图4的实例说明,经远参考处理,消除了由于 干扰引起的数据蹦跳现象,使曲线的连续性明显优



图 4 远参考处理对整体曲线质量的提高 于常规处理结果(图4a),提高了整体曲线的质量。

4 几个问题的讨论

4.1 满足噪音不相关的距离

实际上噪音和信号的划分是相对的。在大地电磁法中将不满足平面波特征的电磁波归为噪音。在可控源音频大地电磁法(CSAMT)中,由近场和远场(平面波场)划分的数值模拟结果^[6]可知:如果噪音源距测点大于5倍趋肤深度(δ)时,则噪音源的电磁场传到测点时可认为是平面波,也就是说,距观测点5δ以内的干扰源所产生的电磁场可认为是噪音 5δ 以外的干扰源可认为是信号源,所以如果远

· 29 ·

参考点和测点相距 10∂ 时,则两点的干扰信号可以 认为是不相关的。

又由 Bostick 反演公式知,趋肤深度 ∂ 和勘探深 度 D 具有以下关系 ∂ =√2 D,所以,远参考点距离选 择为 14 倍勘探目标层深度时,可满足噪音不相关这 一条件。

4.2 满足信号相关的条件

实际上电磁场信号总场为一次场与二次场之 和 ,同时又由于二次场是一次场激励的 ,所以有

 $E_{s} = E_{1} + E_{2} = (I + C_{e})E_{1};$

 $H_{\rm s} = H_1 + H_2 = (I + C_{\rm h})H_1$,

其中下标 1,2 分别表示一次场和二次场, I 为单位 矩阵, C_{e} , C_{b} 和下面的 C_{e} 为对角矩阵。

同样参考点的磁场也满足 $R_s = R_1(I + C_r)$,由此 Z_s 可写为

 $Z_{s} = \frac{(I + C_{e} \mathbb{D} E_{1} R_{1}^{*} \mathbb{D} I + C_{r})}{(I + C_{h} \mathbb{D} H_{1} R_{1}^{*} \mathbb{D} I + C_{r})} = \frac{(I + C_{e} \mathbb{D} E_{1} R_{1}^{*}]}{(I + C_{h} \mathbb{D} H_{1} R_{1}^{*}]^{\circ}}$

上式说明,只要实测点和参考点的一次场相关就可 满足信号相关的条件,而与参考道所处地下地质特 征无关。

4.3 远参考点信噪比对资料的影响

由(8)式可知,理论上讲参考道噪音不影响数据 质量,代价是参加平均的数据量应足够大,这一点在 低频段是难以满足的;但由于参考点的选择具有相 对灵活性,如果尽量避开干扰源,使 $R_n \rightarrow 0$,即使在 有限的数据量条件下,也能使噪音相关接近于零,从 而改善数据质量。

4.4 参考道布极方位的任意性

在野外的 MT 勘探中,电磁场的测量布设方位 是由各测点的地形情况、干扰因素等客观条件决定 的,这样有可能出现参考道磁场的测量方位和测点 磁场的测量方位不一致的情况。

设两者的方位差为 θ,以 R'表示参考点实测磁 场, R 表示和测点同方位的参考磁场,则 R'和 R 具 有如下关系

$$R' = RT$$
; $T = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$.

当以 R'作为参考磁场时,由式(7)有

$$Z = \begin{bmatrix} ER' * \end{bmatrix} HR' *]^1 = \begin{bmatrix} ER * T \end{bmatrix} HR * T]^1$$
$$= \begin{bmatrix} ER * \end{bmatrix} HR *]^1,$$

这说明 Z 并没有因为参考磁场测量方位发生变化而 变化 也就是说 参考道的测量方位可以是任意的。

4.5 磁参考与电参考

理论生存的睡场和磁场均可作为远参考信号。

图 5 是同一测点采用磁场作为参考信号(图 5b)和 采用电场作为参考信号(图 5c)的处理结果比较(参 考距为 100 km),两者均明显地使原始资料得到了 改善,所得的曲线形态是一致的,但电场参考的结果 在频率为 1 Hz 左右的数据离差较大,曲线形态不如 磁参考结果清晰,同时大量的实测资料表明,磁场的 信噪比要明显好于电场的,所以多用磁场作为参考 信号。



图 5 常规、磁参考与电参考处理视电阻率曲线对比

4.6 不同参考距资料分析

为了分析不同参考距对资料的改善程度,我们 对 N63~324 测点分别进行了参考距为 100 km(图 5b),400 km(图 6a)和 2 000 km(图 6b)的处理计算, 结果说明参考距为 100 km 和 400 km 时曲线形态没 有明显差异,参考距为 2 000 km 时,高频部分曲线失 去形态,其原因是由于参考距太大,有用信号也不相 关了。本来想象的在参考距为 2 000 km 时低频资料 会得到很好的改善,但并没有这样的结果,其原因是 低频的数据量太少;参加平均的数据量足够大"这 一假设不满足。实际上大量的观测资料证明,在相 同数据量的条件下,低频资料的质量要优于高



图 6 不同磁参考距处理结果比较

频的,所以改善低频资料的关键是增加数据量,即观 测时间要足够长。

3 种参考距的处理结果说明,参考距不宜选择 太大,否则不仅影响高频资料的质量,而且提高勘探 成本。

4.7 远参考处理后阻抗方差的改变

参考文献 7 和目前的商用软件中,常规处理的 阻抗方差 Var[Z^H]计算和参考处理的阻抗方差 Var [Z^R]计算分别为

$$\operatorname{Vaf} \mathbf{Z}^{\mathrm{H}} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} \left| \mathbf{E}_{i} - \mathbf{Z}^{\mathrm{H}} \mathbf{H}_{i} \right|^{2} \left(\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\mathbf{H}_{i}^{*}}{\mathbf{H} \mathbf{H}^{*}} \right|^{2} \right) \right)$$

$$(9)$$

$$\operatorname{Vaf} \mathbf{Z}^{\mathrm{R}} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} \left| \mathbf{E}_{i} - \mathbf{Z}^{\mathrm{R}} \mathbf{H}_{i} \right|^{2} \left(\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\mathbf{R}_{i}^{*}}{\mathbf{H} \mathbf{R}^{*}} \right|^{2} \right) \right)$$

$$(10)$$

式中 N 为叠加次数。由于 Z^{H} 是采用最小二乘法使 其满足 $\sum_{i=1}^{N} |E_i - Z^{H}H_i|^2$ 为极小的条件而计算出的, 所以下列关系式恒成立,

$$\sum_{i=1}^{N} \left| \boldsymbol{E}_{i} - \boldsymbol{Z}^{\mathrm{R}} \boldsymbol{H}_{i} \right|^{2} \ge \sum_{i=1}^{N} \left| \boldsymbol{E}_{i} - \boldsymbol{Z}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{H}_{i} \right|^{2}, \quad (11)$$

只有当 $Z^{R} = Z^{H}$ 时上式相等的情况才会出现。

另一方面 ,由于

$$\sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\boldsymbol{R}_{i}^{*}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{R}^{*}} \right|^{2} \ge \sum_{i=1}^{N} \left| \frac{\boldsymbol{H}_{i}^{*}}{\boldsymbol{H}\boldsymbol{H}^{*}} \right|^{2}, \quad (12)$$

由(11) 式和(12) 式可得

Van[$Z^{
m H}$] \leqslant Van[$Z^{
m R}$] ,

由此可得:

1.由了无鞭 10 武做离差估算时,同一测点远

参考处理后资料的离差大于等于常规处理的离差。

2.(10) 武计算的离差主要反映的是测点电磁场 的信噪比情况及磁场信号与参考信号的相关程度, 即信噪比越小离差越大,参考距越大离差越大。

3.以(9) 武和(10) 武所计算的离差大小来衡量远 参考处理结果的好坏是不合理的,应以视电阻率、相 位曲线的连续性、合理性来评价远参考处理的效果。

5 结语

1.远参考处理是提高大地电磁法实测资料质量 的一种有效方法,远参考处理不仅可以消除不相关的 电磁噪音,同时也消除了同源相关的电、磁噪音。

2.参考道距离的选择是一个比较实际的问题, 太近起不到消除噪音的作用,太远则会使有用信号 相关变小。建议在保证噪音不相关的条件下尽量靠 近实测点。

3.远参考点应选择在干扰较小的地段,以保证 在有限的叠加次数情况下,噪音间的互功率谱也接 近零值。

4.参考道的布极方位可以是任意的,方位角θ
 不影响参考处理结果。

5.在参考处理方法中 处理结果与参考点处的地 质特征无关。虽然电场信号对地质特征反映敏感 但 也可作为参考道信号。参考道信号是选择电场还是 磁场 应根据参考点两者的信噪比大小来确定。

参考文献:

- [1] 邓前辉,白改先.互功率谱法在大地电磁阻抗张量估算中的应 用[J].石油地球物理勘探,1982,4,57-64.
- [2] 晋光文,王家映,王天生.一种大地电磁张量阻抗的计算方法 [J].地球物理学报,1982,25(增刊)650-559.
- [3] Sutarno D , Vozoff K , Robust M. Estimation of magnetotelluric impedance tensors [J]. Expl. Geophys , 1989 , 22 383 – 398.
- [4] 江钊,刘国栋,孙洁,等. Robust估计及其在大地电磁资料处理 中的初步应用[A].见:刘国栋主编.电磁方法研究与勘探[C]. 北京 地震出版社,1993.
- [5] 陈乐寿,王光锷,大地电磁测深法[M],北京 地质出版社, 1990.
- [6] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业大学出版 社,1990.
- [7] Gamble T D , Goubau W M , Clarke J. Error analysis for remote reference magnetotellurid J]. Geophysics ,1979 A4 959 – 968.

(下转49页)

THE APPLICATION OF KIRCHHOFF THREE-DIMENSIONAL DMO STACKING TO THE PROCESSING OF SEISMIC DATA

NING Jun-rei, ZHANG Ya-qin, FAN Jia-fang

(Beijing Computation Center , China National Star Petroleum Corporation , Beijing 100083 , China)

Abstract : The amplitude values at a certain moment in a seismic record received at a shotpoint and a detection point might come from reflections of various points on an underground ellipsoid, which has the shotpoint and the detection point as its focuses, and the connected line of the shotpoint point and the detection point as its major axis. When stacking is performed, such amplitude values should be added at various points on the ellipsoid instead of being merely added at the CMP. Of course, the amplitude values are different at different points. The utilization of such a stacking method can realize the stacking of common reflection points, and is hence conducive to the stacking image formation and also to the improvement of resolution power and the signal-to-noise ratio.

Key words : seismic data ; DMO stacking ; common reflection point ; Kirchhoff summation process.

作者简介 : 宁俊瑞(1964 –),男,山西省稷山县人。1986 年毕业于成都地质学院应用地球物理系地震专业。现任中石化石油 勘探开发研究院计算中心副主任,高级工程师,主要从事地震资料的处理和研究工作,个人及合作在国内外学术刊物上发表 论文 10 余篇。

A STUDY ON THE APPLICATION OF REMOTE REFERENCE MAGNETOTELLURIC SOUNDING TECHNIQUE

YANG Sheng¹ ,BAO Guang-shu¹ ,ZHANG Quan-sheng²

(1. Central South University, Changsha 410083, China; 2. No. 814 Party, East China Bureau of Geological Exploration for Nonferrous Resources, Zhenjiang 212005, China)

Abstract: With the extension of the application of magnetotelluric method, the interference background of the prospecting environment becomes more and more complex. How to obtain the data which can really reflect the geological characteristics and fully dispel noises is becoming an increasingly important problem. Remote reference is one of the best methods for suppressing the noise and improving the signal-to-noise ratio. This paper describes the theory of remote reference from the angle of signal detection and discusses its application in suppressing various sorts of noises.

Key words : remote reference ; signal ; noise ; correlation analysis ; impedance error

作者简介:杨生(1959-),男,中国地球物理学会理事,现就读中南大学应用地球物理专业博士,主要从事电法勘探,特别是大 地电磁测深法的理论研究及应用。