

地震预报中地电阻率高精度计算方法*

杜学彬 邹明武 陈宝智 康云生

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文利用回归分析、谐波分析和预测理论研究了从大地电位差(V_{sp})和人工电位差(ΔV)迭加的合成势差(E)中高精度分离 ΔV 的方法。实际计算表明:当 V_{sp} 变化规律较强时,该方法的精度比常规方法提高几倍至十几倍;当 V_{sp} 变化规律较弱时,该方法的精度一般高于或接近于常规方法的精度。

一、引 言

现在一般采用的计算地电阻率(ρ_s)的公式为:

$$\rho_s = k \frac{\Delta V}{I}。$$

利用该公式计算 ρ_s 的精度主要取决于怎样从 V_{sp} 与 ΔV 的合成场 $E(\Delta V + V_{sp})$ 中分离出 ΔV 。常规算法有三种:(1)计算单次供电波形(近似方波)的前沿电位差;(2)计算后沿电位差;(3)前、后沿电位差平均。它们均基于 V_{sp} 在短期内的变化是随机的及变化部分的均值为零的假设。但 V_{sp} 变化十分复杂,不同观测点、不同观测时间内显示不同的变化形态,常常迭加有十分强烈的趋势变化和(或)周期变化。因此很多情况下假设不成立,计算出的 ΔV 偏离真值太远,使得 ρ_s 测值误差较大。本文介绍了一种高精度的计算 ρ_s 的方法(简称HPMCER法)。

二、数学问题

数字地电仪的输出记录是一种等间隔的序列,供电前和断电后 V_{sp} 已知。从数学上可由已知的 V_{sp} 变化预测出供电间隔内的 V_{sp} 变化基值,然后从合成场 E 中分离出 ΔV 。

1. 数学模型

设 $x(n)$ 是长度为 N 的 V_{sp} 输出序列,则 V_{sp} 变化的数学模型为:

$$X(n) = C + B(n) + P_L(n) + S(n) \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

其中 C 为均值; $B(n)$ 表示趋势变化,由于 $x(n)$ 是有限长的,故用线性项近似 $B(n)$; $P_L(n)$ 为显周期成份; $S(n)$ 是随机成份。

$x(n)$ 的平稳性由下式检验⁽¹⁾:

$$\left. \begin{aligned} |\bar{x}_{i_1} - \bar{x}_{i_2}| &\leq 2.77\bar{\sigma}(\bar{x}_i) ; \\ |s_{i_1}^2 - s_{i_2}^2| &\leq 2.77\bar{\sigma}(s_i^2) ; \\ |r_{i_1}(\tau) - r_{i_2}(\tau)| &\leq 2.77\bar{\sigma}(r_i(\tau)) . \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$i_1 \neq i_2 ; \quad i_1, i_2 = 1, 2, \dots, K .$$

式中 K 为子序列个数; $\bar{x}_i$ 为子序列均值; s_i^2 为子序列方差; $r_i(\tau)$ 为子序列自相关函数; $\bar{\sigma}(\bar{x}_i)$ 、 $\bar{\sigma}(s_i^2)$ 和 $\bar{\sigma}(r_i(\tau))$ 分别是子序列均值、方差和自相关函数的理论方差; τ 为延迟时间。

如果(2)式成立,则 $x(n)$ 是平稳序列;若(2)式不成立,则 $x(n)$ 是非平稳序列。

2. $x(n)$ 为平稳序列时的预测模型及预测方程

此时不考虑趋势变化 $B(n)$ 和周期成份 $P_L(n)$, 由(1)式得:

$$S(n) = \dot{X}(n) - C \quad (n = 1, 2, \dots, N) . \quad (3)$$

我们期望由供电前 M_1 个已知的 $S(n)$ 预测出供电间隔 t_0 内的 $S(n)$ ($n = M_1 + 1, M_1 + 2, \dots, M_1 + t_0$), 故建立如下预测模型:

$$S(M_1 + \tau) = \sum_{n=1}^{M_1-1+\tau} C(n)S(M_1 - n + \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots, t_0) . \quad (4)$$

令 $\tau=1$ (即一步预测间隔), 并由 $S(n)$ 的平稳性质得到下式:

$$A \cdot C = B . \quad (5)$$

方程(5)是 M_1 阶 Toplis 方程。矩阵 A 和 B 的元素是平稳序列 $S(n)$ 的自相关函数 $r(n)$, 可由以下方法确定:

首先估计出最接近 $S(n)$ 真实功率谱的估值 $R(\omega)$ 。其公式为

$$R(\omega) = P_K / |1 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \exp(-j\omega\Delta t)|^2 \quad (6)$$

其中 ω 是角频率; K 是预测误差滤波器阶数, 由 FPE 准则确定⁽²⁾; P_K 是 K 阶预测误差功率; α_k 是预测误差滤波器系数, 由 Levison—Burg 递推法⁽²⁾ 求出; Δt 是采样间隔。

把 $R(\omega)$ 按等频率间隔离散, 得到 M 个离散值, 由付氏理论求出 $r(n)$ 。其公式为:

$$r(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M R(m) e^{j2\pi mn} \quad (n = 1, 2, \dots, M) . \quad (7)$$

对(7)式的计算采用 FFT 算法。由于 $R(m)$ 是实偶函数, M 取值须满足如下条件:

$$M = 2^I \geq 2(M_1 + t_0 + \beta) . \quad (8)$$

其中 I 和 β 取正整数。

由于矩阵 A 是非负定的, 经白噪处理后(5)式的解一般是稳定的。关于(5)式有一套成熟的递推解法⁽³⁾。

解方程(5)求出 $C(n)$ 就可由(4)式计算出供电间隔内第一个随机值 $S(M_1 + 1)$ 。把 $S(M_1 + 1)$ 作为已知值, (5)式增加一阶, 解出长度为 $M_1 + 1$ 的一组 $C(n)$, 由(4)式又可计算出 $S(M_1 + 2)$, 依此类推, 逐次增加(5)式阶数, 直至 $M_1 + t_0$ 阶, 求出 $S(M_1 + t_0)$ 。

供电间隔内的 V_{sp} 由(1)式计算(此时 $B(n)$ 、 $P_L(n)$ 衡为零)。

3. $X(n)$ 是非平稳序列时的计算方法

首先要对非平稳序列 $X(n)$ 进行平稳处理。所谓平稳化处理是对 $X(n)$ 进行回归和谐波分析, 从中扣除 $B(n)$ 和(或) $P_L(n)$, 使剩余的残差序列满足(2)式, 并同时最佳确定供电间隔内的 $B(n)$ 和(或) $P_L(n)$ 。

求出回归系数后对回归效果进行 F 检验。如果在给定信度($\alpha=0.01$)下

$$P(F \geq F_\alpha) = \alpha, \quad (9)$$

则回归效果显著, 从 $X(n)$ 中扣除 $B(n)$ 得残差序列 $Y(n)$:

$$Y(n) = X(n) - B(n) - C \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (10)$$

否则回归效果不显著, 令(10)式中 $B(n) \equiv 0$ 。

由(2)式检验残差序列 $Y(n)$ 的平稳性。如(2)式不成立, 则从 $Y(n)$ 中扣除显周期成份 $P_L(n)$ 。

$$P_L(n) = \sum_{m=1}^L A_m \sin\left(\frac{2\pi m}{T_m} n + \varphi_m\right) \quad (n = 1, 2, \dots, N). \quad (11)$$

其中 L 是 $Y(n)$ 中所含显周期个数; A_m 、 T_m 和 φ_m 分别是第 m 个显周期的振幅、周期和初相, 可由实验确定。

实际在优选显周期的过程中每选出一个显周期分量都应进行可信性检验, 可采用随机概率检验法⁽⁴⁾。

从 $X(n)$ 中扣除 $B(n)$ 和(或) $P_L(n)$, 得到最终残差序列 $S(n)$:

$$S(n) = X(n) - [C + B(n) + \sum_{m=1}^L A_m \sin\left(\frac{2\pi m}{T_m} n + \varphi_m\right)] \quad (n = 1, 2, \dots, N).$$

由(3)~(8)式计算供电间隔内的 V_{sp} 的随机性变化。

外推 $B(n)$ 和(或) $P_L(n)$, 可分别得到供电间隔内 V_{sp} 的趋势变化和(或)周期变化。由(1)式计算供电间隔内 V_{sp} 。

三、具体计算方法

1. 单次供电

用 $x^p(M_1+1), \dots, x^p(M_1+t_0)$ 表示单次供电间隔内 V_{sp} 计算值。为避免 V_{sp} 复杂变化可能造成计算值偏离真值太远, 计算单次供电间隔内 V_{sp} 变化的同时, 计算出供电间隔前、后相邻的 2β 个已知 V_{sp} 值 $x^p(M_1+1-\beta), x^p(M_1+2-\beta), \dots, x^p(M_1)$ 和 $x^p(M_1+t_0+1), x^p(M_1+t_0+2), \dots, x^p(M_1+t_0+\beta)$, 由下式求出计算值偏离对应已知 V_{sp} 值的平均误差 e_β :

$$e_\beta = \frac{\sum_{t=1}^{\beta} [X(M_1 - \beta + t) - X^p(M_1 - \beta + t)] + \sum_{t=1}^{\beta} [X(M_1 + t_0 + t) - X^p(M_1 + t_0 + t)]}{2\beta}. \quad (13)$$

限定 $\delta > 0$, 如果

$$|e_\beta| < \delta \quad (14)$$

不成立, 则删除本次计算结果, 否则接受本次计算结果, 并由下式修正:

$$X'(M_1 + \tau) = X^p(M_1 + \tau) + \varepsilon_p \quad (\tau = 1, 2, \dots, t_0) \quad (15)$$

修正后的 $X'(M_1+1), \dots, X'(M_1+t_0)$ 就是单次供电间隔内的 V_{sp} 。

至此讨论的计算方法称为正向计算。还可以把序列 $X(n)$ 顺序颠倒后计算,称为反向计算,用 $X''(M_1+1), \dots, X''(M_1+t_0)$ 表示计算结果,则正反向平均计算结果为:

$$X(M_1 + \tau) = [X'(M_1 + \tau) + X''(M_1 + \tau)]/2.0 \quad (\tau = 1, 2, \dots, t_0) \quad (16)$$

实际计算表明,正反向平均计算结果偏离实测 V_{sp} 的误差小,单向计算误差较大。

计算出单次供电间隔内 V_{sp} 后,由下式计算单次供电电位差:

$$\Delta V = \sum_{\tau=t_1+1}^{t_0-t_1} [E(\tau) - X(M_1 + \tau)] / (t_0 - 2t_1) \quad (17)$$

式中 $E(\tau)$ 为供电期间第 τ 个合成场离散值; t_1 是开始供电至合成场 E 稳定后的持续时间,介质不同,观测装置不同则 t_1 也不同。

2. 多次供电

设一组观测中单次供电次数为 m ,由(17)式得到 m 个 ΔV 。计算 $\bar{\rho}_s$ 的公式为:

$$\bar{\rho}_s = (K \frac{\Delta V_1}{I_1} + K \frac{\Delta V_2}{I_2} + \dots + K \frac{\Delta V_m}{I_m}) / m \quad (18)$$

如果一定精度内 $I_1=I_2=\dots=I_m$,则

$$\bar{\rho}_s = K \frac{\Delta \bar{V}}{I} \quad (19)$$

为尽可能求得 $\Delta \bar{V}$ 的真值,由(17)式计算出 m 个 ΔV 后,求其均值 $\Delta \bar{V}_m$ 和均方差 δ_{m-1} ,删除 $|\Delta V_i - \Delta \bar{V}_m| \geq 2\delta_{m-1}$ 的 ΔV ,再计算剩余的 r 个 ΔV 的 $\Delta \bar{V}_r$ 和 δ_{r-1} ,删除 $|\Delta V_i - \Delta \bar{V}_r| \geq 2\delta_{r-1}$ 的 ΔV ,依此类推,直至再无符合上述条件的 ΔV 时为止。此时的 $\Delta \bar{V}$ 比较接近真值。累积误差(单次供电误差相加)越小, $\Delta \bar{V}$ 越接近真值,由于 $\bar{\rho}_s$ 正比于 $\Delta \bar{V}$,故 $\bar{\rho}_s$ 越精确。

如果 $I_1 \neq I_2 \neq \dots \neq I_m$,则由(17)式计算出 m 个 ΔV ,再计算 m 个单次供电的 ρ_{si} ,逐次删除 $|\rho_{si} - \bar{\rho}_s| \geq 2\delta_{i-1}$ ($j=m, r, \dots, n, i=1, 2, \dots, j$)的 ρ_{si} ,此时 $\bar{\rho}_s = \bar{\rho}_m$ 。实际上由于 ΔV_i 正比于 ρ_{si} , $\Delta \bar{V}$ 的累积误差和 $\bar{\rho}_s$ 的累积误差成正比关系。

四、实例计算及讨论

用本文提出的方法和3种常规方法计算了1988年3月在甘肃丰城堡进行定点大偶极距观测时的实测 V_{sp} 值。为真实地反映各种方法的误差,选用未加入人工电位差的原始记录(供电间隔内 V_{sp} 已知,相当于 $\Delta V=0, E=V_{sp}$)。仪器采样间隔 $\Delta t \approx 1$ 秒,图1a、b分别是3月28日16点02分至16点07分和29日12点05分至12点10分PZ-40地电仪的记录。

计算时,对4种方法均取相同的供电间隔($t_0=10$)。考虑到计算量和实际观测要求,用本文的方法计算时,取 $N=15t_0$ 。本文仅给出利用4种方法对3月28日16点至16点10分的记录(图1a为其中的一部分)的计算结果。各算法的单次误差和累积误差见图2和图3。本文方法的单次供电误差取 t_0 个 V_{sp} 的计算值与实测值偏差的平均值。

由图2、图3可以看出:

1. 本文的方法比3种常规算法单次误差小。其单次误差仅是3种常规算法的几分之一到

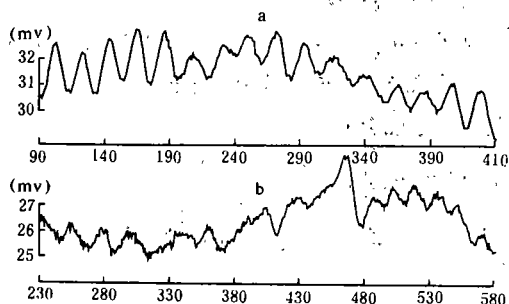


图1 实测大地电位差曲线

Fig. 1 Curves of geoelectric potential difference recorded

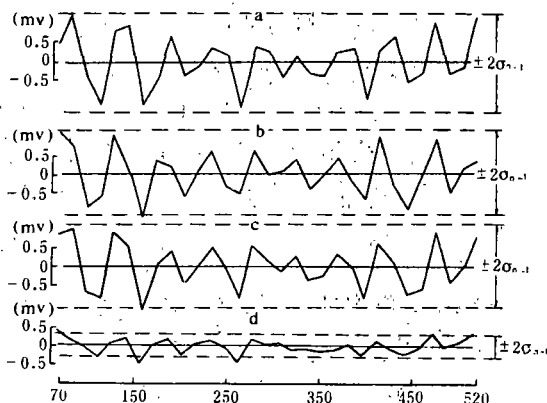


图2 4种方法计算结果的单次供电误差

a. 前沿算法 b. 后沿算法 c. 平均算法 d. 本文方法

Fig. 2 Single group errors by means of three common methods and the method in the paper

十几分之一(图2)。平均算法是3种常规算法中最普遍使用的,本文方法的单次误差的均方差 δ_{n-1} 大约仅是平均算法的 $\frac{1}{4}$ (图2c—d)。

2. 无论那一种常规算法其单次误差总是不稳定,时大时小,而本文方法的误差基本上都在零基线附近摆动(图2)。

3. 在4种算法中本文方法计算的累积误差最小,在零基线附近摆动。其累积误差仅是平均算法累积误差的几分之一到十几分之一(图3)。

4. 本文的方法特别适用于 V_{sp} 变化规律性强的情况,如果 V_{sp} 规律性弱,该算法误差有接近平均算法误差的趋势。图1b所示的 V_{sp} 变化规律显然比图1a所示的弱,图4a是对图1b所示实测 V_{sp} 的计算结果。从图4a中可以看出,本文方法计算误差与平均算法的差别不甚明显,(但前者的 δ_{n-1} 仍小于后者)。

5. 如果 N 与 t_0 的比值增大,用本文方法计算的误差将进一步减小。图4b是 $t_0=6$ 时,用本文方法和平均算法对图1a所示的实测 V_{sp} 的计算结果的单次误差。用本文方法计算时,取 $N=25t_0$ 。由图4b可见,本文方法的单次误差比图2d所示的变化幅度小,本文方法的单次误差的 δ_{n-1} 仅是平均算法的 $\frac{1}{5}$ 。一般在 $6 \leq t_0 \leq 10$ 时,取 $N=15t_0$ 。

四、结束语

本文提出的计算方法即考虑了 V_{sp} 测值中的趋势变化,又考虑了随机性变化,而三种常规算法基于 V_{sp} 变化是完全随机的,且均值为0的假计,实际计算表明,本文方法的计算精度优于常规算法。

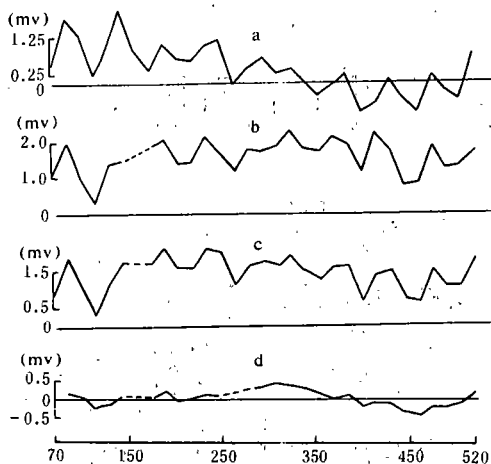


图3 4种方法计算结果的累积误差
a. 前沿算法 b. 后沿算法 c. 平均算法
e. 本文方法

Fig. 3 Accumulated errors by means of three common methods and the method in the paper

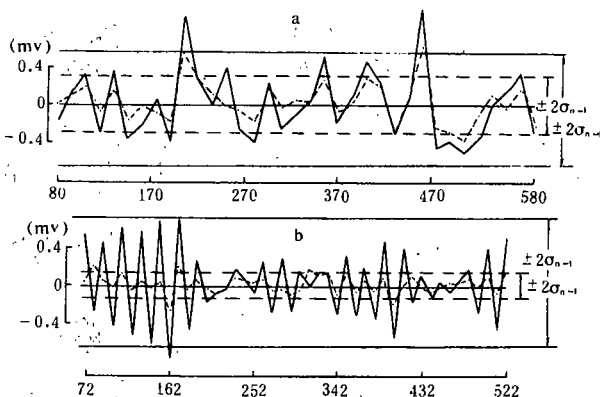


图4 平均算法(实线)和本文算法(虚线)的单次误差

Fig. 4 Single group errors by means of the average method and the method in the paper

本文方法用 FORTRAN 语言设计,在 VAX-750 计算机上计算。供电间隔 $t_0=10$ 时,计算单次供电间隔内 V_{sp} 需 CPU 时间为 20—30 秒; $t_0=6$ 时,需 10—20 秒。对该方法可改用其它语言在 IBM-286 等微型机上计算。

该方法要求一组观测中两单次供电之间记录足够长的 V_{sp} ,并且把一组观测中的所有记录都存储在磁盘上,计算时由计算机调入。否则人工输入数据工作量太大。最好对观测仪器实行自动控制,实时处理。

参考文献

- (1)冯 康,数值计算方法,国防工业出版社,1978.
- (2)何振亚,数字信号处理的理论与应用,人民邮电出版社,1983.
- (3)程乾生,数字信号处理的数学原理,石油工业出版社,1979.
- (4)黄忠恕,波谱分析方法及其在水文气象中的应用,气象出版社,1983.

A HIGH PRECISE METHOD OF CALCULATING EARTH-RESISTIVITY FOR EARTHQUAKE PREDICTION

Du Xuebin, Zou Mingwu, Chen Baozhi, Kang Yunsheng

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

(下转63页)

6. 在已划定的地震危险区内进行多台测震学方法的动态跟踪观测,将能有效地提高预报准确率。

(本文 1991 年 11 月 1 日收到)

参考文献

[1] 冯德益,地震波速异常,地震出版社,1981.

[2] 冯德益,近地震 S、P 波振幅比异常与地震预报,地球物理学报,Vol. 17, No. 3, 1974.

STUDY ON THE PARAMETER ANOMALY OF SEISMIC WAVE BEFORE MODERATELY STRONG EARTHQUAKES

Wang Xiaorong . Wang Haitao.

Wei Ruoping . Su Jian

(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, China)

Abstract

This paper studies the change features of onset sign of seismic wave, amplitude ratio, duration time ratio of coda, and attenuation coefficient of coda before and after the Kuerle Ms5. 2 earthquake on May 26, 1988, the Keping Ms6. 5 earthquake on Feb. 25, 1991. It is found that before the two earthquakes the parameters above—mentioned are of anomalies in various degrees. Before the earthquakes, the stronger the coincidence of P wave onset is, the longer the duration time is, the larger the magnitude of coming earthquake is; the sudden jump of amplitude ratio is the obvious sign of earthquake that will occur soon; the station in which the anomaly of attenuation coefficient of coda first appears is close to the epicenter of coming earthquake. Based on the anomaly features of the parameters, we have successfully predicted the Hejing Ms5. 2 earthquake on June 6, 1991.

~~~~~  
(上接57页)

### Abstract

This paper studied a high precise method separating artificial potential difference  $\Delta v$  from the potential difference  $E$  which is synthesized with the geoelectric potential difference ( $V_{sp}$ ) and  $\Delta v$  on a basis of regressive analysis, harmonic analysis and prediction theory. Lots of the calculation result show: If the changes in  $V_{sp}$  are more regular, the calculation precision through the method is obviously higher than that through the conventional methods; If the changes in  $V_{sp}$  are less regular, the precision through the method is higher than (or close to) that through the conventional methods.