

## •煤田物探•

文章编号:1001-1986(2004)01-0048-03

## 有耗分层媒质上瞬变电磁测深的联合时—频解释

闫 述 (煤炭科学研究总院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**时—频分析是信号分析中非常有利的工具,近年来在处理非稳态信号方面获得了很大的成功。本文将联合时—频分析(JTFA)用于处理地球物理勘探中具有扩散性质的瞬变电磁场信号。首先用数字滤波和逆拉氏算法模拟了分层大地表面上中心回线装置的瞬变响应,然后用 Gabor 展开研究它们的时—频谱,结果将地层序列成功地区分出来,为瞬变电磁法勘探提供了新的解释手段。

**关键词:**瞬变电磁场;时—频分析;分层大地;信号分析与解释

**中图分类号:**P631.3<sup>+</sup>25 **文献标识码:**A

## 1 引言

瞬变电磁(TEM)场方法由于其高效和直接测量二次场的特点,在地球物理勘探中的应用日益广泛。但其信号的处理与解释还跟不上应用的发展,需要寻求新的方法。近年来,联合时—频分析<sup>[1]</sup>在分析具有振荡性质的信号<sup>[2~4]</sup>方面获得了成功。那么,当媒质是以导电率表征的有耗分层媒质,其信号是急剧衰减的非振荡的彼此十分相像的曲线,是否能得到期望的分辨结果呢?我们曾经用自适应短时 Fourier 变换对 TEM 测深信号做过初步分析,证明时—频分析可以应用于 TEM 资料解释<sup>[5]</sup>。

## 2 激发源频谱与有耗分层媒质表面上的 TEM 响应

TEM 场的激发方式有多种,对于导电的有耗媒质来说,由于存在趋肤效应,为获得媒质一定深度的信息,应使激发信号的频谱中有较多的低频成分。单位阶跃函数<sup>[6]</sup>:

$$U(t) = \begin{cases} I, & t < 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}, \quad (1)$$

的频谱为:  $F(\omega) = 1/j\omega$ 。 (2)

上式中  $t$  是时间,  $j$  为虚数单位,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  是频率。由此可见,阶跃函数频谱的特征是其幅度与频率成反比,而相位恒定。低频谐波在阶跃函数频谱中占主导地位,所以要使电磁能量达到相当大的探测深度,可以预计这种类型的激发场是一种有效的途径。

图 1 所示是 TEM 电磁测深的共圈装置,这种装置用阶跃函数的负沿激发。半径为  $\alpha$  供以稳恒电流  $I$  的回线置于层状介质表面上作为发射天线。在

$t=0$  时刻,断开电流,这时,此回线作为接收天线测量媒质中感应出的二次场信号。图 1 中  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$  为各层电导率,  $h_1, \dots, h_n$  为各层厚度。取柱坐标,根据文献<sup>[7]</sup>可导出频率域中  $n$  层媒质表面的电场  $E_\theta$ :

$$E_\theta = -\frac{j\omega\mu_0 I \alpha}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda \alpha) R_n(\lambda, \omega) J_1(\lambda \rho) d\lambda, \quad (3)$$

式中  $\mu_0$  是磁导率,  $I$  是发射电流,  $\alpha$  是发射线圈的半径,  $\lambda$  是 Hankel 变换的变量,  $\rho$  是源到场点的距离,  $J_1$  是一阶第一类 Bessel 函数,  $R_n$  是  $n$  层媒质上的反射系数。

$$R_n = (\lambda - Y_1) / (\lambda + Y_1),$$

$$Y_1 = u_1 [Y_2 + u_1 \tan h(u_1 h_1)] / [u_1 + Y_2 \tan h(u_1 h_1)],$$

$$Y_2 = u_2 [Y_3 + u_2 \tan h(u_2 h_2)] / [u_2 + Y_3 \tan h(u_2 h_2)],$$

.....

$$Y_{n-1} = u_{n-1} [u_n + u_{n-1} \tan h(u_{n-1} h_{n-1})] / [u_{n-1} + u_n \tan h(u_{n-1} h_{n-1})].$$

其中  $\tan h$  为  $u_i h_i$  的双曲正切函数,  $u_i = (\lambda^2 - k_i^2)^{1/2}$ , 波数  $k_i = (j\omega\mu_0 \sigma_i)^{1/2}$ ,  $i$  是地层层序。回线中的感应电动势为:

$$\epsilon(\omega) = \int_0^\infty F(\lambda \omega) \alpha^2 J_1^2(\lambda \alpha) d\lambda, \quad (4)$$

其中  $F(\lambda, \omega) = -j\omega\mu_0 I \pi R_n(\lambda, \omega)$ 。

对(4)式做逆拉氏变换,则得到时间域接收天线中的感生电动势:

$$\epsilon(t) = \int_0^\infty L^{-1}[F(\lambda \omega)] \alpha^2 J_1^2(\lambda \alpha) d\lambda. \quad (5)$$

上述积分具有振荡的性质,我们采用数字滤波算法<sup>[8]</sup>计算。对其中地层因子的逆拉氏变换:

$$f(\lambda, t) = L^{-1}[F(\lambda, \omega)]$$

本文采用了 Gaver—Stehfest 数值变换法<sup>[9]</sup>。

收稿日期:2003-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目资助(No. 49974026)

作者简介:闫 述(1953—),女,天津人,西安交通大学博士研究生,煤炭科学研究总院西安分院高级工程师,从事电磁法勘探研究工作。

在电磁测深中, 分层媒质按各层电导率值的相对大小分类<sup>[10]</sup>, 二层和三层媒质共有 6 种基本类型, 三层以上的媒质由三层媒质组合而成。为了有可比性, 取表 1 所列地层参数, 上述 TEM 响应曲线示于图 2, 观测时间 36 ms。

图中的 TEM 响应曲线携带了媒质的信息, 如何判读这些信息, 与解释方法有关。从 TEM 探测原理上来说, 当媒质的导电性较好时, 媒质中可产生较强的涡流场, 接收天线中的 TEM 响应强而衰减慢, 曲线形态较平缓; 当媒质的导电性差, 则涡流场较弱, TEM 响应衰减快, 曲线形态陡。对分层媒质来说, 与良导电层相应的响应曲线段应平缓, 对应于不良导电层的曲线段应较陡。但由于各层间的相互作用, 曲线段之间的这种变化不易分辨。如图 2 中的 D 型曲线与 K 型曲线几乎重合在一起, G 型曲线和 H 型曲线也是如此。传统上, 是通过将响应曲线转换成视电阻率曲线进行定性解释, 或由曲线拟合反演作定量解释。现从时-频分析的观点进行 TEM 测深的定性解释, 在时-频平面上研究 TF 谱与媒质分层的对应关系。

3 Gabor 展开

由图 2 可见, 有耗分层媒质表面上的 TEM 响应曲线形态与单边指数函数:

$$e^{-\alpha} \cdot U(t), \alpha > 0$$

相似。对于这种非振荡的衰减信号, 采用 Gabor 展开进行时-频表示是恰当的。

对于信号  $s(t)$  其 Gabor 展开的定义<sup>[11]</sup>为:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} h_{m,n}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{m,n} h(t-mT) \exp(jn\Omega t), \quad (6)$$

式中  $T$  和  $\Omega$  表示时间和频率采样间隔。当 Gabor 基本函数集  $\{h_{m,n}(t)\}$  完备时, 则必然存在一个对偶函数  $\gamma(t)$ 。这时, Gabor 系数可由通常的内积运算求得:

$$C_{m,n} = \int s(t) \gamma_{m,n}^*(t) dt = \int s(t) \gamma^*(t-mT) \exp(-jn\Omega t) dt. \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式则得到:

$$s(t) = \int s(t') \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_{m,n}^*(t') dt'.$$

从而可知 Gabor 展开存在的充要条件是:

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_{m,n}^*(t') h_{m,n}(t) = \delta(t-t')$$

式中  $\delta$  是 Dirac 函数。通过 Poisson 求和公式可将上式简化为 Wexler-Raz<sup>[12]</sup>恒等式:

$$\frac{T_0 \Omega_0}{2\pi} \int h_{m,n}(t) \gamma_{m,n}^*(t) dt = \delta(m) \delta(n)$$

表 1 三层地电断面的层参数

类型	层序	电 导 率/ $S \cdot m^{-1}$	层 厚/ $m$
D	第一层	$\sigma_1 = 0.01$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.1$	$h_2 = \infty$
G	第一层	$\sigma_1 = 0.1$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.01$	$h_2 = \infty$
H	第一层	$\sigma_1 = 0.01$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.1$	$h_2 = 100$
	第三层	$\sigma_3 = 0.01$	$h_3 = \infty$
A	第一层	$\sigma_1 = 0.1$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.01$	$h_2 = 100$
	第三层	$\sigma_3 = 0.001$	$h_3 = \infty$
K	第一层	$\sigma_1 = 0.1$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.01$	$h_2 = 100$
	第三层	$\sigma_3 = 0.1$	$h_3 = \infty$
Q	第一层	$\sigma_1 = 0.01$	$h_1 = 100$
	第二层	$\sigma_2 = 0.1$	$h_2 = 100$
	第三层	$\sigma_3 = 1.0$	$h_3 = \infty$

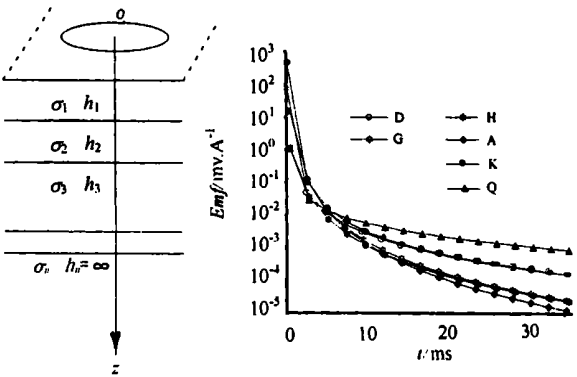


图 1 模型与圆柱坐标 图 2 典型地电断面 TEM 响应曲线

其中  $\gamma_{m,n}^0(t) = \gamma(t-mT_0) \exp(jn\Omega_0 t)$ ,  $T_0 = 2\pi/\Omega, \Omega_0 = 2\pi/T$ 。

该式在过采样情况下, 即  $\gamma_{m,n}(t) \neq \gamma_{m,n}^0(t)$  时, 用于计算对偶函数。

在解释时, 须在上述 Gabor 展开的基础上, 导出离散 Gabor 展开公式<sup>[13,14]</sup>用于 TEM 测深数据。

4 TEM 响应的时-频解释

二层媒质的 TF 谱分别示于图 3 的(a)和(b)。在时-频平面上, 很清楚地表现出低阻层中激发的涡流场大于高阻层中的涡流场, 即在图 3(a)中, 由于 D 型媒质的基底为低阻层, 其 TF 谱中能量分布持续时间较长; 而 G 型媒质能量大部份分布在与低阻表层相对应的 TF 谱的早期时间段, 在对应晚期时间段的高阻层中激发的涡流场就很小了。

图 4 是三层媒质的 TF 谱。首先, 三层媒质的 TF 谱与二层媒质的 TF 谱之间有着明显的差别。特别是在图 2 中无法分辨的 D 与 K 型以及 G 与 H 型在 TF 谱中被分辨开来了。其次, 按能量集中在低阻层中的原则, 能容易地将 H A K Q 4 种类型分开

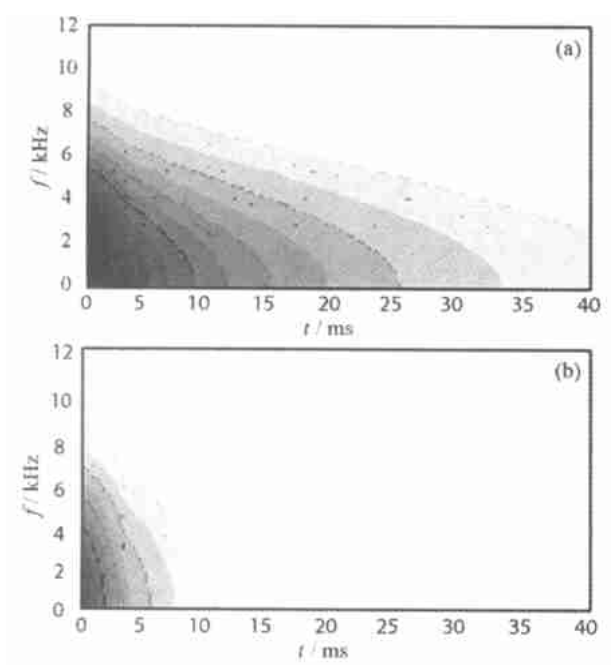


图 3 二层地电断面的时—频谱  
(a)—D 型断面; (b)—G 型断面

如 H 型, 电阻率值从上至下为高一低一高的排列, 它的能量比 A 型的低—高—更高的排列持续时间长, 但比 K 型的低—高—低的排列短; 在 TF 谱中, Q 型煤质的能量持续时间最长, 这是因为它的电阻率排列是高—低—更低, 能量在电阻率最低的基底层中仍然比较强。

前面是固定了媒质层厚的情况, 现将 H 型第二层厚度由 100 m 增加到 200 m, 其 TF 谱示于图 5。与图 4(c)相比, 中间高阻层变厚, TF 图上低能量带加宽, 反映出了层厚的变化。可见 TF 谱同时具有较强的定厚能力。

从有耗分层媒质的 TEM 响应曲线(图 2)和时—频表示(图 3~5)可知, 虽然时域曲线含有分层媒质特征的大量信息, 但其形状通常对剖面上的电导率随深度的变化欠敏感, 而时—频表示则敏感得多。另外, 在 TEM 的过渡过程中, 早期高频能量集中, 而后随着时间的推移, 高频成分被导电媒质吸收, 从而低频成分占主导地位。这个 TEM 场的基本规律在 TF 谱中也很好得到了体现。

5 结论与讨论

时—频分析是一种有效的定性分析手段。还可预期通过 TEM 测深数据的某种时—频变换做媒质分类。一种直接的方法是将得到的图形与一组预先定义或存储的图形(参考模块)进行比较, 如果图形与参考模块中的某个类具有最高的相关度, 则图形被识别为该类。这样可望将联合时—频分析由定性

解释推进到定量解释。

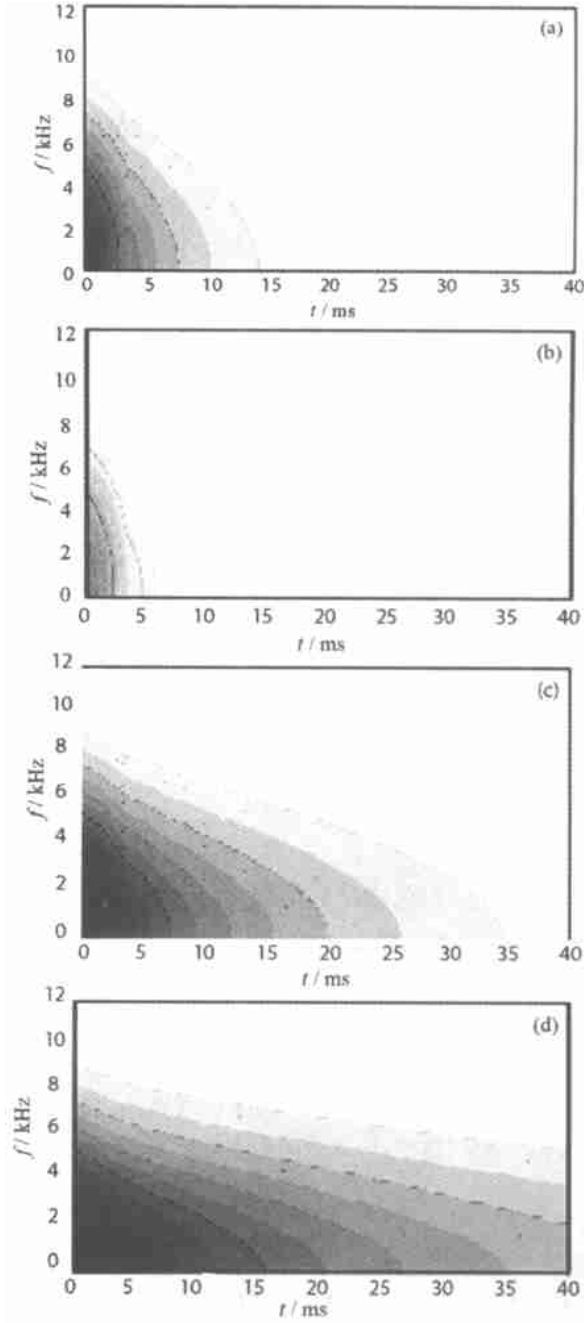


图 4 三层地电断面的时—频谱  
(a)—H 型断面; (b)—A 型断面; (c)—K 型断面; (d)—Q 型断面

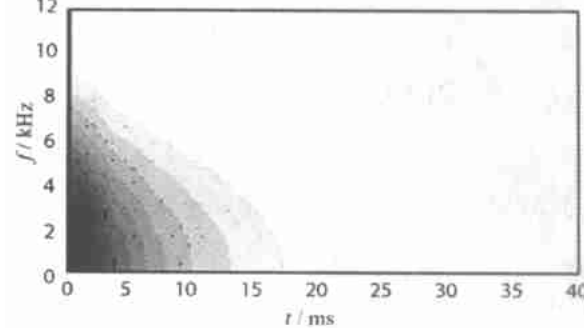


图 5 改变第二层厚度的 H 型断面的时—频谱

文章编号: 1001-1986(2004) 01-0051-04

# 瞬变电磁法仪器研制中的噪声抑制问题

梁 爽 (煤炭科学研究总院西安分院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 归纳了瞬变电磁法仪器研制中所涉及的几种主要干扰类型。针对各类噪声的特点, 分析了 50 Hz 工频电噪声、本机噪声及高值噪声的抑制方法。特别指出了适度性原则下, 采样率、观测时间及衰减窗口的匹配关系。

**关键词:** 瞬变电磁法; 噪声抑制; 适度性; 采样率; 衰减窗口; 匹配

**中图分类号:** P631.3<sup>+</sup>25 **文献标识码:** A

## 1 引言

瞬变电磁法的显著特点是能获取纯二次场信号。这是一个随时间衰减的信号, 有着很大的动态范围, 有时可跨越 6 个级次, 因此往往受到来自仪器本身和外部的电磁噪声的干扰, 直接影响了观测数据的质量及反演解释计算的顺利进行。所以, 研究瞬变场信号测量的各种干扰的规律和抑制的方法, 是仪器研制的关键问题之一。但是, 由于工作原理不同, 使得瞬变电磁法仪的去噪有别于频率域的仪器, 需特殊处理。

## 2 瞬变电磁法勘探中的干扰类型<sup>[1]</sup>

瞬变电磁法勘探中对二次电磁场信号的干扰主要来自两个方面, 一方面是来自瞬变场仪自身的干扰, 这种干扰也称为本机噪声; 另一方面是来自外部的电磁噪声的干扰, 其中最主要的、干扰电平最大的是工业 50 Hz 干扰, 这是各类(包括频率域仪器在内的)电磁法勘探仪器都要解决的问题。此外, 还有矿山或工业用电的干扰、有线广播网干扰、无线电发送波的干扰等人文干扰。来自自然界的干扰有地磁微脉动引起的干扰、天电噪声干扰。在瞬变电磁法仪

收稿日期: 2003-05-20

作者简介: 梁 爽(1969—), 男, 陕西礼泉人, 煤炭科学研究总院西安分院工程师, 勘查地球物理专业。

## 参考文献

- [1] Cohen L. Time-Frequency Analysis[M]. Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [2] Dong X, Liang Y, Wang W. The TF characteristics of pulse propagation through plasma[J]. J. Syst. Eng. Electron., 2000, 11: 55—60.
- [3] Dong X, Jiang Y, Wang W. The time-frequency interpretation for transient evolution of wave propagation through dispersive medium[J]. IEEE, Microwave and Wireless Components Letter, 2001, 11: 267—269.
- [4] Arev A, Heyman E, Stenberg B-Z. A mixed time-frequency-scale analysis of the hybrid wavefront-resonance representation[J]. Ultra-Wide-band Short-Pulse Electromagnetics, 1999, 4: 361—370.
- [5] 陈明生, 李正斌等. 瞬变电磁法资料的联合时—频分析初探[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(3): 55—57.
- [6] 陈明生. 电偶源瞬变电磁测深研究(一)—基本原理[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(1): 55—59.

- [7] Lee T, Lewis R. Transient EM response of a large loop on a layered ground[J]. Geophysical Prospecting, 1974, 22: 430—444.
- [8] Gultasama D, Singh B. New digital linear filters for Hankel  $J_0$  and  $J_1$  transforms[J]. Geophysical Prospecting, 1997, 45: 745—762.
- [9] Knight J G, Raiche A P. Ransient Electromagnetic Calculations Using the Gaver-Stehfest Inverse Laplace Transform Method[J]. Geophysics, 1982, 47: 47—50.
- [10] Kaufman A A, Keller G V. Frequency and transient soundings[M]. New York: Elsevier, 1983, 465, 487, 509, 517, 533.
- [11] Qian S, Chen D. Joint time-frequency analysis[M]. Prentice-Hall, 1996.
- [12] Wexler J, Raz S. Discrete Gabor Expansions[J]. Signal Processing, 1990, 21: 207—221.
- [13] Lu Y, Morris M. Fast computation of Gabor function[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1996, 3: 75—78.
- [14] Zihulski M, Zeevi Y Y. Oversampling in the Gabor scheme[J]. IEEE Trans. On Signal Processing, 1993, 41: 2679—2687.

## The joint time-frequency interpretation of transient sounding signal on the lossy layered earth

YAN Shu (Xi'an Branch, CCRI, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Time-frequency analysis is a powerful tool of signal processing, which has been used successfully in non-stationary signals recently. This paper uses joint time-frequency analysis (JTFA) for processing transient electromagnetic (TEM) field signals that have diffuse feature in geophysical exploration. First, the transient electromagnetic response on the layered earth excited by a step pulse is simulated using digital filtering and Gaver-Stehfest; and then their time-frequency characteristics are investigated with Gabor expansion. The sequences of the earth are distinguished successfully, which provides a new interpreting method for TEM prospecting.

**Key words** transient electromagnetic field; time-frequency analysis; layered earth; signal analysis and interpretation