

文章编号: 1001-1986(2009)02-0051-04

瞬变电磁场探测中低阻屏蔽层影响的时-频分析

石显新^{1,2}, 闫述³, 傅君眉¹, 陈明生²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 煤炭科学研究总院西安研究院, 陕西 西安 710054;
3. 江苏大学计算机科学与通信工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 瞬变电磁法在低阻覆盖层地区施工时会受到低阻层的屏蔽影响。虽然观测数据如感应电动势有较大的数值, 但实际上探测深度却大大减小了。当有上覆低阻层存在时, 要探测同样的深度, 需要较长的观测时间。采用平滑伪 Wigner-Ville 分布和 Gabor 展开, 分别将典型的二层地电模型(D、G型)与三层地电模型(H、A、K、Q型)的感应电动势衰减曲线映射成为时间-频率平面上的二维信号, 通过对时-频能量谱的分析及模型之间的对比研究表明, 瞬变电磁场能量在低阻层中聚集和损耗, 尤其是对于描述我国华北型煤田的A型地电模型(地表为低阻层), 瞬变电磁场的能量在由地面向下扩散的过程中, 能量通过基底以上各低阻层的聚集和损耗, 到达最有观测意义的底层界面(奥灰与煤系的界面)时, 已经消耗殆尽。因此, 当在A型模型地层地区进行瞬变电磁勘探时, 应充分考虑低阻屏蔽层的影响, 在施工设计时应选择较长的观测时窗以保证探测深度, 并采用大功率仪器来提高信噪比。

关键词: 瞬变电磁场; 低阻屏蔽层; Wigner-Ville 分布; Gabor 展开; 时-频分析; 能量分布

中图分类号: P631.3 文献标识码: A

Time-frequency analysis on influence of low resistive shielding layer in the exploration of transient electromagnetic field

SHI Xianxin^{1,2}, YAN Shu³, FU Junmei¹, CHEN Mingsheng²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;

3. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The transient electromagnetic exploration method is often influenced by low resistive shielding layers, resulting in actual observation depth shallower and more time required. By adopting the smooth pseudo Wigner-Ville distribution and Gabor expansion, the paper expands the attenuation curves of induced electromotive force of the typical two-layer (D- and G-type) geo-electricity models and three-layer (H-, A-, K- and Q-type) geo-electricity models to the two-dimensional time-frequency plane. It is indicated by the study through comparing the analysis on time-frequency energy spectrum with the model that energy of the transient electromagnetic field really aggregates and is consumed in the low-resistivity layers; especially with respect to the A-type geo-electricity model (with earth's surface being the low-resistivity layer) describing the North China type coalfield; energy of the transient electromagnetic field is depleted when arriving at the bottom interface (interfaces of Ordovician limestone and coal measure) of the greatest observation significance due to aggregation and consumption in the low-resistivity layers above the base during the process of its propagation downwards from the ground surface. Therefore, during the transient electromagnetic exploration in areas of strata in A-type model, influence of the low resistive shielding layer shall be taken into full consideration, and relatively longer observing time window shall be selected to ensure the exploring depth and high-power instruments shall be adopted to increase the signal-noise ratio during the design.

Key words: transient electromagnetic field; low resistive shielding layer; Wigner-Ville distribution; Gabor expansion; time-frequency analysis; energy distribution

收稿日期: 2008-07-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB202207); 国家自然科学基金项目(40374052)

作者简介: 石显新(1967—), 男, 贵州湄潭人, 博士, 研究员, 从事科研管理工作.

瞬变电磁法勘探的显著优点之一是能够穿透高阻屏蔽层, 对高阻屏蔽层下伏地层或构造有较好的分辨能力。但在有低阻层, 特别是地表为低阻覆盖层的地区施工时, 由于可以在地面上观测到较强的信号, 往往忽视了低阻层对瞬变电磁勘探的影响。在煤田电磁法勘探中, 勘探目的层或目标体上方往往存在低阻层, 尤其是在我国华北型煤田, 大部分地表都被低阻的第四系沉积层覆盖, 且沉积层厚度较大, 一般在 100 m, 有些地区可达 400~600 m。当前, 华北型煤田大多进入或即将进入深部开采, 深部奥陶系灰岩中的陷落柱、导水小断层等是这些地区煤田水文物探的主要探测对象, 要求勘探深度达 800~1200 m, 所采用方法能否达到勘探深度至关重要。因此, 研究低阻覆盖层与电磁场之间的相互作用关系, 对于在该地区采用电磁勘探中进行施工设计、参数选择, 确保勘探深度, 提高探测精度等都具有重要意义。作者曾经采用时域有限差分法探讨了低阻层对瞬变电磁场的屏蔽作用、减速作用等规律^[1-2]。本文仍然以在煤田水文地质勘探中应用较为广泛的瞬变电磁(TEM)法为例, 用时-频分析的方法分析电磁场能量在低阻层中的聚集与损耗, 从时-频分析的角度对低阻层的屏蔽作用给出物理解释。

1 时-频分析中的 Wigner-Ville 分布与 Gabor 展开

实际应用中许多信号的参量是时变的, 其频谱结构是随着时间而变的, 因此, 诞生了时变谱的另外一种分析工具, 这就是信号的时-频分析技术。虽然现在流行的说法是, 时频分析的起源是为了改善谱图或短时 Fourier 变换方法, 然而其实际动机却是为了弄清楚时变谱的物理意义和数学解释^[3]。时频分析的基本思想是设计时间和频率的联合函数, 用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度。时间和频率的这种联合函数简称时频分布。将一维时域信号映射成为时间-频率平面上的二维信号, 其性质与应用非常令人感兴趣。当前, 时-频分析在信号处理中占有越来越重要的地位。

TEM 信号是在有耗媒质(大地)表面上的二次涡流场响应 $V(t)$, 利用联合时-频分析方法可将一维时域信号拓展成以时间和频率为变量的二维函数, 即联合时-频分布函数 $P(t, \omega)$ 。可以构造各种时-频分布或表示, 在这里, 用描述非平稳随机信号比较成功的 Wigner-Ville 分布(WVD), Gabor 展开对 TEM 信号进行分析。

1.1 Wigner-Ville 分布

信号 $s(t)$ 的 Wigner-Ville 分布是一种最基本, 也是应用最多的时频分布。下面就是信号 $z(t)$ 的 Wigner-Ville 分布^[4-5]:

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t + \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\tau f} d\tau, \quad (1)$$

式中 t, f 分别表示时间和频率; $z(t)$ 是 $s(t)$ 的解析信号, 上标*表示取共轭; τ 为积分变量。正如许多文献^[3-5]指出的, Wigner-Ville 分布的时频聚集性较好, 但存在交叉项是这种分布的主要缺陷。如何减小交叉项而又不破坏其优异的时频分析特性就成了改善这种分布性能的主要目标。研究表明, 平滑伪 Wigner-Ville 分布(SPWVD)处理 TEM 信号有较好的效果^[6]:

$$SPWVD_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(u)h(\tau) z\left(t - u + \frac{\tau}{2}\right) \cdot z^*\left(t - u - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi\tau f} du d\tau, \quad (2)$$

式中 $g(u)$ 和 $h(\tau)$ 是两个实的偶窗函数, 且 $g(0) = h(0) = 1$ 。

1.2 Gabor 展开

Gabor 展开和 Gabor 变换已被公认是通信和信号处理中信号表示尤其是图像表示的最好方法之一^[7]。Gabor 展开可以通过对基函数 $g_{mn}(t)$ 的选择, 使其对时间和频率都有比较好的局域化性能。矩形函数和高斯函数常用来构造 Gabor 基函数。下面是采用高斯基函数的过采样 Gabor 展开:

$$\phi(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} g_{mn}(t), \quad (3)$$

式中 $g_{mn}(t) = g(t - mT_1) e^{jnt\Omega_1}$, T_1 和 Ω_1 是过采样的时频网格间隔, 且 $T_1 \Omega_1 < 2\pi$; a_{mn} 是展开系数, 可以利用对偶函数 $\gamma(t)$ 写成:

$$a_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) Y^*(t - mT_1) e^{-jnt\Omega_1} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) Y_{mn}^*(t) dt. \quad (4)$$

这就是过采样 Gabor 变换。过采样使得信号的 Gabor 展开具有一定的冗余性, 可以在一定程度上提高信号 Gabor 展开的稳定性。过采样 Gabor 变换的计算归结为如何根据基函数 $g(t)$ 确定对偶函数 $\gamma(t)$ 。

2 典型地电模型的时-频分析

2.1 二层大地的 SPWVD 分析

首先描述二层的 D、G 型地电断面, 参数列于表 1, 相应模型的 TF 谱分别示于图 1a 和图 1b。其中 G 型是具有上覆低阻层的模型。

表1 二层地电模型的地电参数

Table 1 Geo-electric parameters of two-layer geo-electricity models

地电模型	第一层电阻率	第二层电阻率	第一层厚度
	$\rho_1/\Omega\cdot\text{m}$	$\rho_2/\Omega\cdot\text{m}$	h_1/m
D	500	5	100
G	5	500	100

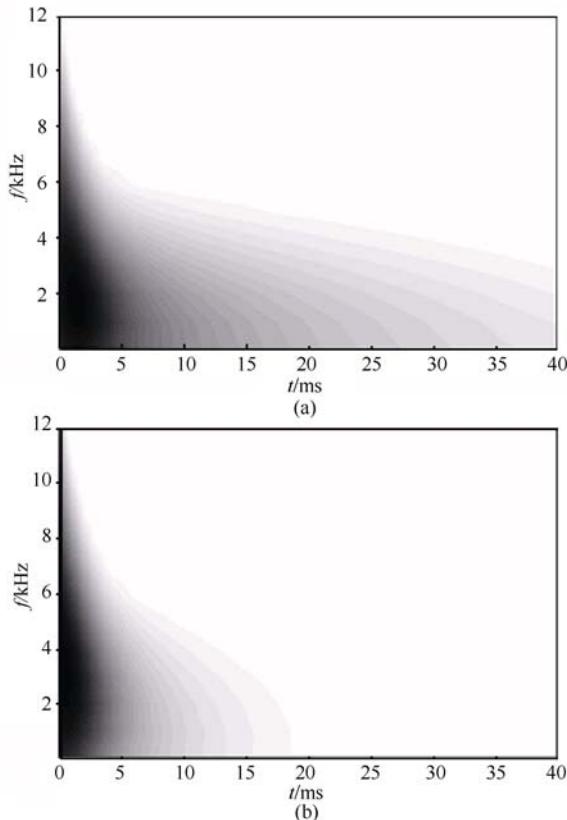


图1 二层地电断面的SPWVD图

Fig. 1 SPWVD diagram of two-layer geo-electric sections
a—D型; b—G型

众所周知,不同地电模型的 TEM 感应电动势都是随时间呈指数衰减的曲线,只是随模型地电参数的不同,曲线下降的速率不同。那么反映到 SPWVD 分布平面上(图 1),D、G 模型的曲线将会显示出什么样的性状呢?

可以看出在 SPWVD 平面上,早期 D 和 G 都有较强的能量分布,这是 TEM 场随时间衰减普遍的性质所决定的。但在随后的时间里,随着时间的流逝,TEM 场向地下扩散的过程中,由于 D 型断面基底为低阻层,其 TF 谱中能量分布强且持续时间长;

而 G 型断面大部分能量集中于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,这表明 TEM 场的能量在低阻层中聚集并消耗。尽管在 G 型模型表面上会观测到较大数值的感应电动势,但并不表示此时有较大的穿透深度。

2.2 三层大地的 SPWVD 分析

用 Gabor 展开对三层模型进行能量谱分析。具体的三层地电断面 H、A、K、Q 模型的地电参数列于表 2, TEM 响应曲线的 Gabor 展开示于图 2。

从图 2 所示的 Gabor 展开可见,在总能量随时间递减的背景下,能量集中于低阻层。如图 2a 中的 H 型断面,其电阻率从上至下为高、低、高的分布,TF 谱能量比图 2b 中电阻率低、高、更高排布的 A 型断面持续时间长,但比图 2c 中低、高、低的 K 型断面持续时间短,因为 K 型断面的基底是低阻层。在这些 TF 谱中,图 2d 中 Q 型断面能量最强,持续时间最长,这是因为其电阻率自上而下为高、低、更低的分布,有利于在深部形成二次涡流,甚至在基底中涡流仍然比较强。因此,当下伏目的层为低阻层时,TEM 法较一般方法更为灵敏。但是在欲探测目的层上面覆盖有低阻层时,则对 TEM 法探测不利,上覆低阻层会对 TEM 场形成屏蔽。这种情况在我国华北型煤田的水文地质探测中最为常见。华北型煤田的地层层序由新到老一般为:第四系,间或有新近系和古近系,三叠系,二叠系,石炭系,奥陶系,其地层电阻率从上往下的大致变化趋势是低(新地层)、高(煤系)、更高(奥灰基底),从大的层位看属于 A 型地电断面,瞬变电磁场能量主要集中在表层并在其中损耗。这就是为什么在华北型煤田进行 TEM 勘探时能够观测到较强的 TEM 信号而探测深度却较浅的原因。因此,在华北型煤田开展瞬变电磁勘探,应充分考虑低阻屏蔽层的影响,为达到预计的勘探深度并采集到足够信噪比的信号,在施工中应选择较长的观测时窗、采用大功率的仪器。

3 结论

TEM 信号是瞬态信号,适于采用联合时-频分析进行解释。TEM 信号的时-频分布能展现信号的时-频特征,能提供更全面、细微的地电信息,为 TEM

表2 三层地电断面的地层参数

Table 2 Geo-electric parameters of three-layer geoelectric cross sections

地电断面类型	第一层电阻率	第二层电阻率	第三层电阻率	第一层厚度	第二层厚度
	$\rho_1/\Omega\cdot\text{m}$	$\rho_2/\Omega\cdot\text{m}$	$\rho_3/\Omega\cdot\text{m}$	h_1/m	h_2/m
H型	100	10	100	100	100
A型	10	100	1 000	100	100
K型	10	100	10	100	100
Q型	100	10	1	100	100

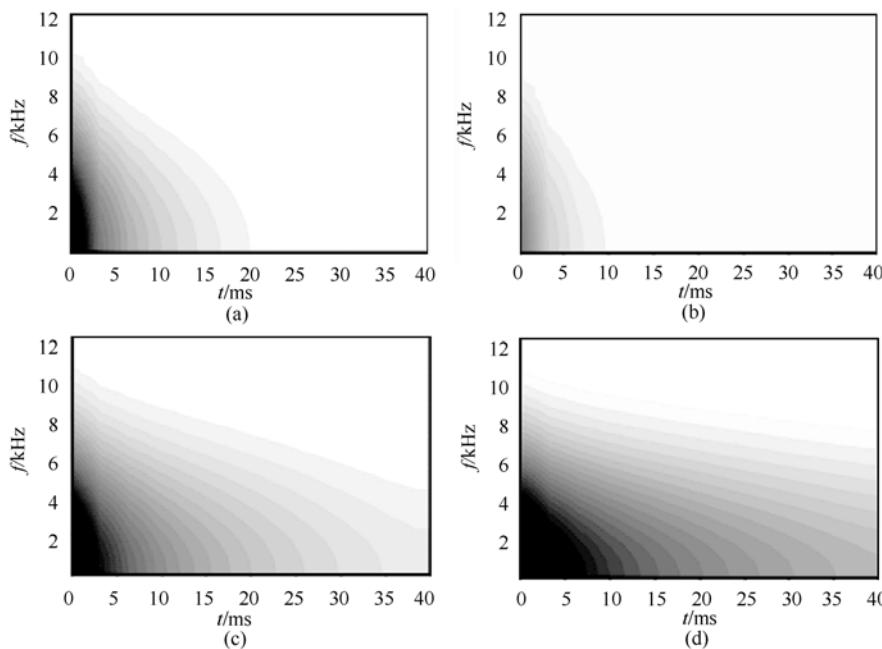


图 2 三层地电断面 TEM 响应的 Gabor 展开

Fig. 2 Gabor expansions of TEM response curves of three-layer geoelectric cross sections
a—H型; b—A型; c—K型; d—Q型

法提供更多的解释依据。

TEM 信号的联合时-频分布特征和地质结构的电性特征有着明显的对应关系, 时-频分布的能量变化反映 TEM 二次涡流场分布状态, 其强度随时间延迟而衰减, 且高频成份减弱更快。能量衰减梯度变化与地电结构有关, 地层电阻率低、厚度大, 变化慢; 反之, 能量弱, 变化快。这些都有明确的物理意义, 形象地显示出低阻层屏蔽作用的实质, 有利于 TEM 信号的定性分析与定量解释。

A 型模型大部分电磁场能量在表层聚集和损耗。在此类地电模型地层地区进行瞬变电磁勘探时, 应充分考虑低阻屏蔽层的影响, 在施工设计时应选择较长的观测时窗以保证探测深度并采用大功率的仪器来提高信噪比。

(上接第 50 页)

b. 地热矿区松散层较厚, 岩性主要为粘性土及砂土, 粘性土保温条件较好, 下部热量损失较少。

c. 灰质白云岩的裂隙及断层破碎带是地下热水的储存空间和上涌通道, 断裂构造对地下水的形成和运动起到了重要的作用。

d. 本区地下热水系深循环成因的浅埋型中低温地下热水资源, 热储温度 46.7~60 ; 偏硅酸含量达 52.86~66.60 mg/L, 为医疗矿水, 具有很高的开发价值。

参考文献

- [1] 石显新. 瞬变电磁法勘探中的低阻屏蔽层问题研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2005.
- [2] 石显新, 闫述, 陈明生. 瞬变电磁勘探中的低阻层屏蔽问题[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 160~163.
- [3] COHEN L. Time-frequency distributions—A review[J]. Proc. IEEE, 1989, 77 : 941~981.
- [4] 科恩 L. 时-频分析: 理论与应用[M]. 白居宪, 译. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- [5] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 闫述, 陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时-频分析[J]. 地球物理学报, 2005, 48 (1) : 203~208.
- [7] 王宏禹, 邱天爽, 陈喆. 非平稳随机信号分析与处理 [M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2008.

参考文献

- [1] 江苏省地质矿产局第二水文地质工程地质大队. 中华人民共和国区域水文地质普查报告 1: 20 万(盱眙幅)[R]. 1984.
- [2] 江苏省水文地质工程地质勘察院. 江苏省洪泽县老子山地区地热井勘查评价报告[R]. 2001.
- [3] 李学礼, 刘金辉, 史维浚, 等. 新疆准噶尔盆地北部天然水的同位素研究及其应用[J]. 地球学报, 2000, 21(4): 403~404.
- [4] 江苏省水文地质工程地质勘察院. 江苏省洪泽县老子山地区 T1、T3、T4 井地下热水资源开发利用方案[R]. 2005.