



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

裴建国,张新军.基于瞬变电磁法发射线框通电时刻选取的研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):169-173. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.022

PEI Jianguo, ZHANG Xinjun. Study on electrifying time selection of transmit-loop for transient electromagnetic method[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 169-173. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.11.022

基于瞬变电磁法发射线框通电时刻选取的研究

裴建国¹, 张新军²

(1.山西省煤炭地质水文勘查研究院,山西 太原 030006;2.太原理工大学,山西 太原 030024)

摘要:对于瞬变电磁法,关心较多的是关断时间,通电时刻(建场时间)的重要性往往被忽略,常规采样方式是在设定足够观测时窗的采样频率下,赋予相同的激发建场时间,即对于正负极性观测时窗来说,正、负极性观测采样时窗和建场时间分别为固定的 1/4 周期。为研究并建立非对称式“发射-观测”时窗序列,以提高瞬变电磁法探测精度。从瞬变电磁法激发场电信号的傅里叶变换入手,通过对不同建场时间下的电磁信号频率组分进行大量理论推导和计算,并进行统计分析,并且绘制了不同建场时间的频谱平剖图,得出了不同建场时间条件下信号频率组分(频谱)的变化规律。研究结果表明:建场时间越长信号频率组分中高频成分缺失越多,进而影响了浅层信息,以高频信号反演深度不超过盲区为宜;而建场时间越短信号频率组分中低频成分集中越多,有利于深部信号强度,当然受限于探测能力(极限探测深度),更短的建场时间也是不必要的。然后又对该规律进行公式推导,得出了不同时刻建场电磁信号极大频率与时间的关联公式,进而得出了特定时刻的建场信号的频谱,最终提出了给瞬变电磁法设定若干非固定建场时间的设想,并将常规瞬变电磁法观测的合理建场时间范围锁定在发射线框通电后 $61.0\ \mu\text{s}\sim 12.7\ \text{ms}$,更为合理地满足常规 800 m 以浅的瞬变电磁探测任务,进一步建立占空比由 1:1 向 1:8 过度的若干个非对称式“发射-观测”时窗序列,实现 800 m 以浅针对不同深度区的探测任务更为优化时窗序列。

关键词:瞬变电磁法;建场时间;傅里叶变换;通电时刻;发射线框

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)11-0169-05

Study on electrifying time selection of transmit-loop for transient electromagnetic method

PEI Jianguo¹, ZHANG Xinjun²

(1. Shanxi Coal Geological Prospecting Institute of Hydrology, Taiyuan 030006, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: As for transient electromagnetic method (TEM), turn-off time got so much concern that the importance of electrifying time (excited-field build-up time) for transmit-loop is always neglected. Normally, setting certain sampling frequency which has enough observation time window, same build-up time is set. This thesis has been studying about building asymmetry “transmitting-observing” time window array, for improving accuracy of TEM. As for positive or negative polar observation time window, observation time window or build-up time was a quarter of period. This thesis mainly proceeds with Fourier transform of electric signal, then frequency spectrum of different build-up time was calculated accurately. Influence of build-up time to frequency spectrum was concluded by theoretical derivation and numerical calculation. The results suggest that high frequency components lost much with build-up time getting more, then shallow information was influenced, inversion depth of high frequency signal should not be more than shallow layer shadow depth definitely. Meanwhile, low frequency components gather much with build-up time getting shorter. limited by detection depth, shorter build-up time was unnecessary. Eventually, by quantized calculation, reasonable build-up time interval was concluded, that is build-up time of TEM should be limited between $61.0\ \mu\text{s}\sim 12.7\ \text{ms}$, and asymmetric building-observation time window between 1:1 from 1:8 were built.

收稿日期:2021-02-18;责任编辑:曾康生

基金项目:山西省自然科学基金面上资助项目(201901D11051)

作者简介:裴建国(1987—),男,山西太原人,工程师,硕士。E-mail:659381151@qq.com

Then, more appropriate time window was built for detecting different depth—no deeper than 800 m.

Key words: transient electromagnetic method (TEM); field build-up time; Fourier transform; electrifying time; transmit-loop

0 引言

近年来,瞬变电磁法在我国地质勘探领域取得了很大的发展,尤其在金属矿勘探、煤田地质勘探、水文地质勘探、工程地质勘探等领域取得了广泛的应用^[1-3]。那么如何提高探测深度以及在极限探测深度范围内提高探测精度又开始成为亟待突破的问题。一直以来,对于瞬变电磁法,关断时间(以及采样延时)影响及校正的研究较多。于生宝等^[4]通过对发射电流关断时间影响瞬变电磁法探测结果的推导,对早期瞬变响应阶跃关断与线性关断的区别进行了分析。杨海燕等^[5]对斜阶跃影响校正进行了研究,结果显示,多匝小回线的匝数越多,反演深度可以扩展的范围越大,反演电阻率的精确性可通过减少匝数而提高。

研究普遍认为,发射线框中电流无法迅速关断,形成浅层探测盲区,关断时间持续越长,则形成的浅层探测盲区越大;不仅如此,接近关断时间尾部的信号也会受到关断效应的影响而产生畸变,当然,已有研究可通过校正基本消除该影响。白登海等^[6]提出可以通过设备记录的激发场完整衰变曲线,实现对线性和指数关断影响进行精确校正。杨云见等^[7]采用经典的马奎特法直接对包含斜阶跃关断时间效应的瞬变电磁资料进行反演,反演结果及计算速度均较为理想。杨海燕等^[8]对线性关断和半正弦关断2种关断模式进行了研究,得出,同一关断时间下这两种关断模式对二次场的影响主要表现在“早期”,随采样时间的增加而逐渐减弱。同时,关断时间越长,其影响越向“晚期”延伸;半正弦关断电流对二次场的影响大于线性关断电流。

采样时窗也引起广泛研究,冷胜友等^[9]研究认为瞬变电磁法观测时窗的选择与探测效果关系极大;对不同的目标体,选用不同的探测时窗,可取得较好的探测效果;而鲜有对建场时间的研究,或认为非阶跃通电时间对瞬变电磁探测的影响可忽略不计^[10]。事实究竟如何,笔者将从瞬变电磁法建场时间的角度对这一问题做详细的论述。通过分析,最终建议将瞬变电磁系统固定的建场时间模式,调整为若干个可选档位(或限定区间的人工输入模式),旨在通过在观测时窗中建立更为精细的激发时间序列,进一步提高瞬变电磁法的探测深度及提高采样效率。当然,影响瞬变电磁法观测效果的因

素众多,本文仅从建场时间的角度进行推导。导线通电并在其周围空间建立磁场是“瞬间”的过程,那么建立稳恒磁场又需要多少时间?稳恒磁场建立后何时开始“取样”?众所周知,为了便于对电信号分析,需要进行傅里叶变换^[11-12]。

1 傅立叶变换

电工学电气学中,常将周期为 $T(=2\pi/\omega)$ 的双极性矩形波函数用一系列以 T 为周期的正弦函数 $A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ 组成的级数表示为

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中: A_0 为初始振幅; A_n 为振幅; ω 为角频率,rad/s; φ_n 为相位,rad。

将双极性矩形波周期函数按式(1)展开的物理意义是很明确的,这就是把一个比较复杂的周期运动看成是许多不同频率的简谐振动的叠加,电工学上称之为谐波分析。其中常数项 A_0 称为 $f(t)$ 的直流分量 $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ 一次谐波(基波),则 $A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2)$, $A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3)$,……,依次称为二次谐波,三次谐波,……。

为了方便,把正弦函数 $A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$ 按三角公式展开为

$$A_n \sin \varphi_n \cos n\omega t + A_n \cos \varphi_n \sin n\omega t$$

令 $a_0/2 = A_0$, $a_n = A_n \sin \varphi_n$, $b_n = A_n \cos \varphi_n$, $\omega = \pi/l$ (即 $T = 2l$),则式(1)右端可改为

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \frac{n\pi t}{l} + b_n \sin \frac{n\pi t}{l}) \quad (2)$$

形如式(2)的级数称之为三角级数,其中, a_0 , a_n , b_n ($n = 1, 2, 3, \dots$)都是常数。

令 $\pi t/l = x$,则式(2)化为

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$$

这就将以 $2l$ 为周期的三角级数 $f(t)$ 转换成以 2π 为周期的三角级数 $f(x)$,即

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$

据三角函数系 $(1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \sin 2x, \dots, \cos nx, \sin nx, \dots)$ 中任意2个不相同的函数的乘积在 $[-\pi, \pi]$ 区间积分为零的基本原理,仅保留 $k = n$ 的分式, a_n 和 b_n 表达式计算结果如下:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \quad (n = 1, 2, \dots)$$

2 谐波分析

先以特定的矩形波为例:设 $g(t)$ 是周期为 T 的周期函数,它在 $[-T, T)$ 上的表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T/4, \\ -1, & 2T/4 \leq t < 3T/4 \end{cases}$$

其函数图形如图1所示。

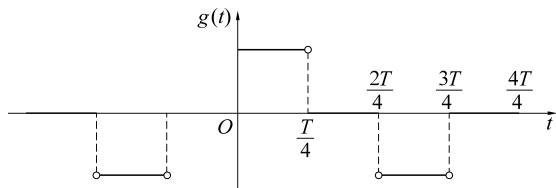


图1 矩形波周期函数

Fig.1 Functional of rectangular periodic wave

经计算得到 $g(t)$ 的傅立叶级数展开式为

$$g(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin t + \frac{1}{3} \sin 3t + \dots + \frac{1}{2k-1} \sin(2k-1)t + \dots \right] = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin(2k-1)t$$

$$(-\infty < t < +\infty; t \neq 0, t = \pm kT/4, \dots)$$

上式表明:矩形波是由一系列不同频率的正弦波叠加而成,这些正弦波的频率依次为基波频率的奇数倍^[15-16]。以各型号仪器常用采样频率 $f = 6.25 \text{ Hz}$ 为例,则 $T = 0.16 \text{ s} = \pi/20 \text{ s}$, 则 $T/4 = \pi/80 \text{ s}$ 。

在正极性 $(0, T/4)$ 的时域内,对采样起始时间 t

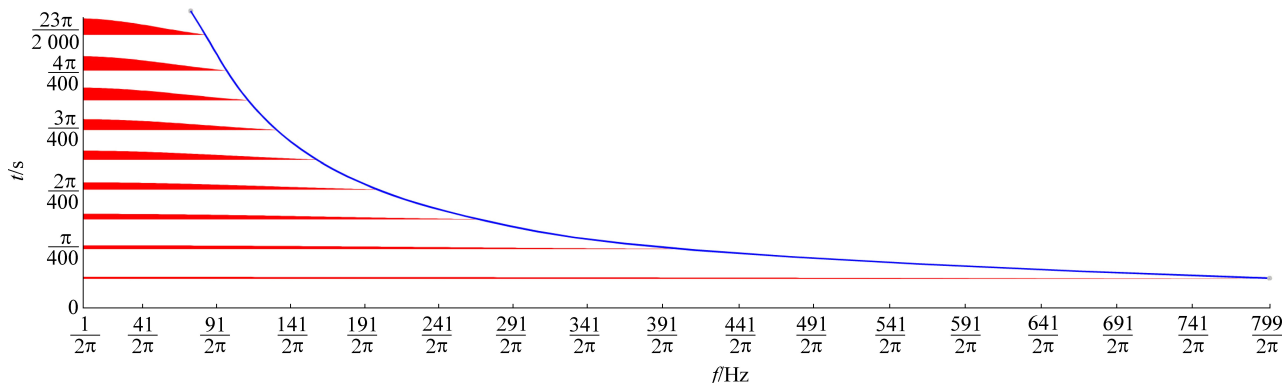


图2 特定建场时刻频谱平剖面

Fig.2 Plane profile of spectrum at certain build-up time

由图2明可知,建场时刻函数与频率极大值呈减函数对应关系,即建场时间越长,频谱中最大频率

分别赋值进行计算。分别赋值为 $t = \frac{\pi}{800}, \frac{\pi}{400}, \frac{\pi}{200},$

$\frac{3\pi}{400}, \frac{\pi}{100}, \frac{23\pi}{2000} \text{ s}$ 进行计算, $g(t)$ 的傅立叶级数展开式简化为

$$g(t) \approx \frac{4}{\pi} \left[\sin t + \frac{1}{3} \sin 3t + \frac{1}{5} \sin 5t + \frac{1}{7} \sin 7t + \frac{1}{9} \sin 9t + \frac{1}{11} \sin 11t \right]$$

对 $t = \frac{\pi}{400} \text{ s}$, 进行信号强度采取率计算,得

$g(\frac{\pi}{400})$ 各项分布如下

$$g(\frac{\pi}{400}) \approx \frac{4}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{400} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi}{400} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi}{400} + \frac{\pi}{7} \sin \frac{7\pi}{400} + \dots + \frac{1}{399} \sin \frac{399\pi}{400} \right) = \frac{4}{\pi} (0.0078539 + 0.00785325 + 0.00785196 + 0.0078503 + \dots + 0.00001968)$$

同理,当 $t = \frac{\pi}{800}, \frac{\pi}{200}, \frac{3\pi}{400}, \frac{\pi}{100}, \frac{23\pi}{2000} \text{ s}$ 时,计算得 $f(t)$

各项分布,将上述计算结果见表1,将不同建场时刻的频谱图绘制成剖面平面图(图2)。

表1 不同建场时刻信号成分极大频率分布

Table 1 Maximum frequency distribution of signal components at different building-field time

f/Hz	$\frac{799}{2\pi}$	$\frac{399}{2\pi}$	$\frac{199}{2\pi}$	$\frac{131}{2\pi}$	$\frac{99}{2\pi}$	$\frac{85}{2\pi}$
t/s	$\frac{\pi}{800}$	$\frac{\pi}{400}$	$\frac{2\pi}{400}$	$\frac{3\pi}{400}$	$\frac{4\pi}{400}$	$\frac{23\pi}{2000}$

注:由公式 $f = 1/T, T = 2\pi/\omega$ 对角频率 ω 和频率 f 进行了转换。

越小(频带越窄)。对该函数进行推导,令 x 轴为频率 f 分布、 y 轴为建场时刻,可得

$$\begin{cases} x = 1/(2k-1) \sin(2k-1)t & (3) \\ y = t & (4) \end{cases}$$

由图 2 可以看出,各时刻的信号幅值,在频谱带上,由低频到高频逐渐变小,最大频率为该频率信号幅值接近 0 且 k 取整的对应位置处,即式(3)为 0,则式中 $\sin(2k-1)t$ 项须为 0,则 $(2k-1)t$ 为最接近 π 的 k 取整位置处,可令 $(2k-1)t = \pi$,可得 $k = \pi/(2t) + 1/2$,进一步得 $f_{\max} = \omega/(2\pi) = (2k-1)/(2\pi) = 1/(2t)$,则最终可得频率极值和建场时间的对应函数关系式为

$$f_{\max} = 1/(2t) = 0.5 t^{-1} \quad (5)$$

显然,式(5)为幂函数,绘制有效建场时段内,频率极值随建场时间的变化曲线,如图 3 所示。

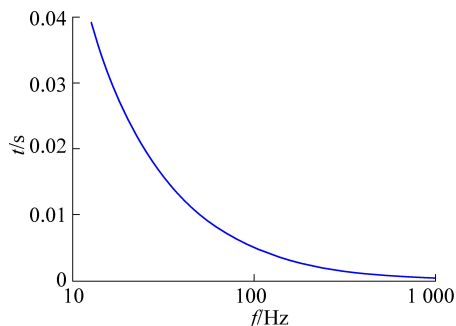


图 3 频率极值随建场时间的变化曲线

Fig.3 Function curve of maximum frequency changing with building-field time

进一步推导,在有效建场时域内,特定时刻频谱频率幅值随频率变化的函数关系,令 x 轴为频率分布, y 轴为信号幅值,列出如下函数关系为

$$x = (2k-1)/(2\pi) \quad (6)$$

$$y = 1/(2k-1) \sin(2k-1)t \quad (7)$$

式(6)、式(7)联立可得

$$y = \frac{1}{2\pi x} \sin(2\pi x)t, x \in \left(0, \frac{1}{2t}\right) \quad (8)$$

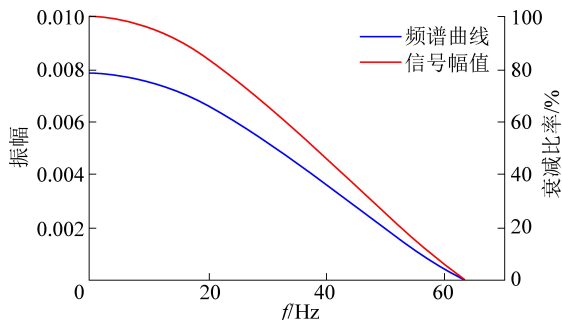


图 4 $t = \pi/400$ s 时刻频谱曲线和信号幅值衰减比率曲线

Fig.4 Function curves of frequency spectrum and signal amplitude decay ratio at certain time $t = \pi/400$ s

在有效建场时段,给定任意时刻,可算出频率幅值随频率的频谱分布曲线,对式(8)以 $t = \pi/400$ s

时刻为例,绘制曲线如图 4 所示。

3 建场时段计算

关于“时段”,即分为最早时刻和最晚时刻,最早时刻计算如下:

趋肤深度 $\delta = 503 \sqrt{\rho/f}$, 平均电阻率 ρ 以 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 计,以频率域测深法中可控源音频大地电磁法的常用最大频率 8 192 Hz 为例^[17],计算得,其对应的趋肤深度为 56 m,该深度已经与常规地面瞬变电磁法浅层盲区覆盖深度^[18-20]相近(这里不做精确计算),所以不必再追求更大频率。由式(5)计算得,该频率对应时刻为 61.0 μs 。同理,最晚时刻计算如下:以 800 m 为常规瞬变电磁探测较大深度计,平均平均电阻率 ρ 同样以 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 计,计算可得频率为 39.5 Hz,进一步由式(5)计算得,该频率对应时刻为 12.7 ms。

由上述计算可得,常规瞬变电磁勘探可根据不同的探测深度要求将建场时段选在 61.0 μs ~ 12.7 ms,受限于瞬变电磁法浅层盲区,不必为了获取更丰富的频率组分而追求低于 61.0 μs 的建场时间;同样,受限于常规瞬变电磁勘探深度的能力,亦不必将建场时间选择高于 12.7 ms。

4 结 论

1) 在 $(0, T/4)$ 的有效建场时段内,发射线框始终保持恒定的激发场,这个激发场是由若干个不同频率所给出不同幅值的信号叠加而成,不同时刻频谱具备如下规律:建场时间越长,频带越窄,且向低频集中,将无法满浅层探测;反之,建场时间越短,频带越宽,理论上可以达到无限宽,但受限于仪器发展水平,无法在无穷短的时间内建立稳恒电流。当然也并不追求无穷短的建场时间,因为虽然频带极宽,但各频率对应信号幅值均极小,由浅到深均无法起到激发的作用。通过量化计算,最终将建场时刻锁定在通电后 61.0 μs ~ 12.7 ms。

2) 有效建场时段的任意时刻,各频率信号幅值随着频率的增高而逐渐减小,前 1/3 的低频段内,信号幅值衰减到极大值的 83%;前 2/3 的频段内,信号幅值衰减到极大值的 47%。

3) 将建场从特定采样频率(对称式 1:1“占空比”)中分离出来,建立占空比由 1:1 向 1:8 过度的若干个非对称式“发射-观测”序列,设想生产非对称式“占空比”采样模式的样机,以实现更合理高效的瞬变电磁数据采集。

参考文献(References):

- [1] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007:13-15.
- [2] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社, 1998:9-12.
- [3] DZT 0187-2016, 地面瞬磁性源瞬变电磁法技术规程[S].
- [4] 于生宝,王 忠,嵇艳鞠,等.瞬变电磁法浅层探测技术[J].电波科学学报,2006,21(2):284-287.
YU Shengbao, WANG Zhong, JI Yanju, *et al.* Time domain transient electromagnetic shallow prospecting[J]. The Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(2): 284-287.
- [5] 杨海燕,岳建华,李锋平.斜阶跃电流激励下多匝小回线瞬变电磁场延时特征[J].地球物理学报,2019,62(9):3615-3628.
YANG Haiyan, YUE Jianhua, LI Fengping. The decay characteristics of transient electromagnetic fields stimulated by ramp step current in multi-turn small coil[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(9): 3615-3628.
- [6] 白登海, MAXWELL Meju. 瞬变电磁法中两种关断电流对响应函数的影响及其应对策略[J].地震地质, 2001, 23(2): 245-251.
BAI Denghai, MAXWELL Meju. The effect of two types of turn-off current on TEM responses and the correction techniques[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(2): 245-251.
- [7] 杨云见,王绪本,何展翔.考虑关断时间效应的瞬变电磁一维反演[J].物探与化探,2005,29(3):234-236.
YANG Yunjian, WANG Xuben, HE Zhanxiang. 1D inversion of TEM data in consideration of ramp time effect[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 29(3): 234-236.
- [8] 杨海燕,岳建华.瞬变电磁法中关断电流的响应计算与校正方法研究[J].地球物理学进展,2008,23(6):1947-1952.
YANG Haiyan, YUE Jianhua. Research on response calculation and correction technique of turn-off current in the transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(6): 1947-1952.
- [9] 冷胜友,闫 述.煤田水文地质勘探中瞬变电磁法的观测时窗和观测区域[J].煤田地质与勘探,2005,33(S1):184-186.
LENG Shengyou, YAN Shu. Observation time window and area in transient electromagnetic field method for coalfield hydro-geologic exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(S1): 184-186.
- [10] 冯晓兰.可实现 TEM 发射电流下降沿的线性及稳定性技术[J].地质与勘探,2002,38(S1):126-128.
FENG Xiaolan. Realizing TEM emission current back edge's linear & stability technology[J]. Geology and Exploration, 2002, 38(S1): 126-128.
- [11] 陈明生.关于频率电磁测深几个问题的探讨(八):频率电磁测深与瞬变电磁测深的关系[J].煤田地质与勘探,2015,43(1):81-85.
CHEN Mingsheng. On the relationship between the frequency electromagnetic sounding with the transient electromagnetic sounding(part 8)[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(1): 81-85.
- [12] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1983:6-8.
- [13] 李 貅,宋建平,马 宇,等.基于小波分析的 TEM 信号提取[J].煤田地质与勘探,2005,33(2):72-75.
LI Xiu, SONG Jianping, MA Yu, *et al.* The abstract of TEM signal based on the wavelet analysis[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(2): 72-75.
- [14] MCNEIL J D. Geonics Limited Technical Note TN-7: application of transient electromagnetic techniques[R]. Mississauga: Electromagnetic Geophysical Instrument, 1980:13-15.
- [15] 王 忠,嵇艳鞠,林 君,等.全程瞬变电磁系统的浅层探测实验研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(S1):95-98.
WANG Zhong, JI Yanju, LIN Jun, *et al.* Study of the experiments of all-time transient electromagnetic system for shallow survey[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2005, 35(S1): 95-98.
- [16] Enterprise Technical Cente. Geox SIROTEM- II system operation manual[R]. Post Wakefield: Geex Pty Ltd, 1980.
- [17] 薛国强.论瞬变电磁测深法的探测深度[J].石油地球物理勘探,2004,39(5):575-578.
XUE Guoqiang. On surveying depth by transient electromagnetic sounding method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2004, 39(5): 575-578.
- [18] 薛国强,宋建平,阎仕农,等.大回线源瞬变电磁法最小探测深度的分析与估算[J].工程勘察,2004(2):63-65.
XUO Guoqiang, SONG Jianping, YAN Shinng, *et al.* Study and calculation on the minimum detecting depth with method of large-loop transient electromagnet[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(2): 63-65.
- [19] PATRA H P, MALLICK K. Time-varying geo-electric soundings[R]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1980.
- [20] 岳建华,杨海燕,邓居智.层状介质中地下瞬变电磁场全空间效应[J].地球物理学进展,2012,27(4):1385-1392.
YUE Jianhua, YANG Haiyan, DEGN Juzhi. Whole-space effect on underground transient electromagnetic field in layered media[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1385-1392.