

# 超低频电磁探测信号能量的计算及其地质应用

宋本钦<sup>1</sup> 李培军<sup>1</sup> 秦其明<sup>1</sup> 侯贵廷<sup>2</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 北京大学地球与空间科学学院地质系, 北京 100871)

**摘要:** 被动式超低频电磁探测技术是一种有效的探测地下地质体和资源的手段, 但采用现有的处理方法得到的探测曲线较容易受到各种噪声的干扰, 影响了对所获得的探测曲线的解释。笔者将信号能量引入到超低频电磁探测信号的处理中。首先根据信号能量计算原理, 计算不同深度的超低频探测信号的能量值, 获取能量曲线。同时, 根据具体应用目的, 分析其曲线特征, 并将信号能量曲线与现有的信号曲线, 如最大值曲线、最小值曲线等进行对比分析。结果表明, 与现有方法相比, 笔者所提出的信号能量曲线方法能更准确地反映地下岩层特征, 有利于曲线的地质解译。

**关键词:** 信号能量; 超低频电磁探测; 煤层气

**中图分类号:** TM153+.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2008)06-1315-07

## 1 引言

天然电磁场具有丰富的频谱和广域的覆盖, 通过对地表所观测的天然电磁场信号的处理与分析, 可获得地下地质体及资源的相关信息。被动式超低频电磁探测技术是利用天然的超低频电磁辐射进行地球内部结构探测以及地下资源勘探的技术。近年来, 这一技术日益受到关注, 并在许多方面(如资源勘察、灾害预测)获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

在应用超低频电磁探测信号分析地层构造和资源中, 有很多值得探讨的问题。其中, 如何有效地对超低频探测信号进行处理就是关键之一, 因为处理的结果将直接影响后续的地质解译。对超低频电磁探测所获得的原始信号进行处理, 可以得到一些特征曲线, 通过对这些曲线的分析可以得到有关地下地质体(岩层)和资源的信息。虽然运用现有处理方法所得到的曲线(如振幅最大值、最小值等)能较好地反映主要的地质信息, 但这些曲线在某些局部波动比较大, 还需要进一步改进。因此, 探索新的更为有效的信号处理方法, 对于超低频探测技术的地质

应用具有重要的意义。

笔者试图将信号能量谱引用到超低频电磁探测信号的处理中, 探索新的超低频电磁探测信号处理方法, 并通过与现有方法所获得的曲线进行分析比较, 来验证所提出方法的性能。

## 2 超低频电磁探测原理及信号特点

天然电磁场由不同的自然作用过程激励产生, 是不可控源场, 其源场强度和极化方向随时、空尺度而变化, 但这种变化是相对缓慢的。因此, 可利用天然超低频电磁辐射对地下地质构造及资源进行有效探测。

本研究采用北京大学研制的超低频电磁探测仪, 最新的 BD-6 型超低频电磁波探测仪已于 2003 年申请了专利, 其抗干扰能力强, 探测深度可达到 10000 m, 先后在国内许多地区进行了上万多次探测试验, 并取得了突破性进展, 已被用于地下深部含油层、含水层和天然气层等目的层的探测。

超低频电磁波探测仪的基本探测原理可概括为, 利用高灵敏度、高精度的传感器(探头)接受来自

收稿日期: 2008-11-05; 改回日期: 2008-11-12

基金项目: 国家“863”项目(2006AA06Z233)和国家“973”项目(2006CB403500)资助。

作者简介: 宋本钦, 男, 1984 生, 硕士生, 主要研究方向为遥感信息处理; E-mail: sbq43031@126.com。

于地下不同深度物质的超低频电磁波信号, 所获得的信号经前置放大器放大后, 通过数据采集和频-深转换系统进行数字化采集, 采集到的数据经过频谱分析后得到深度-振幅曲线, 曲线的横坐标为深度, 纵坐标为振幅, 这些曲线反映了接收到的超低频电磁波的相对能量随深度的变化。探测仪探测的频率范围为 3~3000Hz。探测仪仅由笔记本电脑作为操作平台, 实现现场实时自动采集、储存数据, 以及显示超低频电磁波的频谱曲线。

在场源稳定的情况下, 超低频电磁探测仪采集到的信号具有良好的重复性和稳定性。在具备一定先验知识的前提下, 通过对所获得的曲线特征的分析与解译, 可以识别地下主要的地质界面以及相关资源(如石油、水、煤层气等)的赋存。一般来说, 相对高密度、低空隙度的岩石具有较高的振幅特征, 例如: 玄武岩、灰岩; 而相对低密度、高空隙度的岩石具有较低的振幅特征, 如: 砂岩、砾岩和淋滤溶蚀的灰岩风化壳等。因此, 超长低频电磁探测仪所得到的振幅曲线反映了地下各种不同岩性之间相对的密度或空隙度等岩石物性的差别。这些频谱曲线振幅的显著变化反映的是主要的岩石物性界面。现有的探测结果表明: 一般断层、破碎带和煤层的电磁波频谱曲线振幅较低, 而天然气或煤层气富集层则表现为极高的振幅, 与它们的高阻特性一致<sup>[1]</sup>。

超低频电磁探测仪以一定步距(采样间隔)采集地下不同深度的超低频电磁辐射信号。对每个采样深度可获取 8 个波形和 16 个波形, 每个波形记录一个周期内所采集的数据, 用户可根据需求选择获取的波形数。通过对每个深度的所有波形进行处理, 可以得到每个深度的探测信号的振幅最大值、最小值及其他统计量, 然后对这些振幅曲线进行分析, 可得到地下底层和资源的信息。本文所涉及的实例采用的是每个探测深度获取 8 个波形。

### 3 方 法

#### 3.1 信号能量谱

所谓信号, 是带有信息的某种物理量, 如电信号、光信号、声音信号等。这些物理量可以随时间变化或随空间变化。在数学上, 信号可以用一个或几个独立变量的函数来表达, 也可以用函数的曲线图形, 即信号的波形来表示。

除了上述直观的信号表达方法以外, 还可以用

频谱和能量谱来描述信号。频谱(幅度谱)是在频域中描述信号特征的方法之一, 它反映了信号所含分量的幅度和相位随频率的分布的情况。能量谱是表示信号的能量密度在频域中随频率的变化情况, 它对研究信号的能量的分布, 决定信号所占有的频带等问题有着重要的作用, 特别对于随机信号, 无法用确定的时间函数表示, 也就不能用频谱来表示。在这种情况下, 往往用能量谱来描述它的频谱特性<sup>[2]</sup>。

对于连续信号, 因为能量有限信号  $f(t)$  的自相关函数是:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t-\tau) dt \quad (1)$$

所以

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (2)$$

由相关定理:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 e^{j\omega\tau} d\omega \quad (3)$$

所以

$$R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

这样, 得到下列关系:

$$\begin{aligned} R(0) &= \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |F_1(f)|^2 df \end{aligned} \quad (4)$$

若  $f(t)$  为实函数, 上式可写成:

$$\begin{aligned} R(0) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |F_1(f)|^2 df \end{aligned} \quad (5)$$

则信号能量等于:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |F_1(f)|^2 df \quad (6)$$

由式(5)中可以看出, 连续信号的能量就是信号幅值的平方在时间域内的积分。

而对于离散信号, 信号的能量定义为:

$$E = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |f(k)|^2 \quad (7)$$

式中,  $k$  为整数。

#### 3.2 超低频电磁信号能量谱的计算

尽管探测信号的能量有多种不同的定义, 但在本质上, 这些定义都只有数学上的意义, 而非发射信

号的真实物理能量<sup>6)</sup>。在实际应用中,通常也把信号的幅度的平方、事件的包络、持续时间的长短或事件包络的面积作为能量的参数。尽管超低频探测仪所获得的信号能量,不是物理意义上的能量,但对于衡量和评价地质体和资源所在深度却具有重要的意义。

在本文中,根据公式(7)将探测信号的能量定义为幅度的平方和。由于超低频电磁探测仪所探测的信号在每个深度都会有 8 个波形,而每个波形都代表一个周期,设这 8 个波形分别为  $f_1(x), f_2(x) \cdots f_8(x)$ 。由于每个波形在一个周期内有 100 个采样点,则每个波形在一个周期内的能量为:

$$E = \sum_{x=1}^{100} |f(x)|^2 \quad (8)$$

通过计算每个波形在这个周期内的能量,再求所获得的 8 个波形的能量的均值,作为该深度的能量值,即:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 E_k \quad (9)$$

最后以深度作为横坐标,能量值作为纵坐标,从而得到能量-深度曲线。由于根据公式(9)计算得到的能量数值一般比较大,本文将每个深度的能量值都除以所有深度的能量最大值,从而获得相对能量-深度曲线。

根据上述原理和公式,本文运用 Matlab 编程实现了超低频探测信号能量的计算<sup>7)</sup>。

### 4 结果与讨论

为了有效的评价将信号能量用于超低频探测信号处理的效果,笔者通过实际的超低频电磁探测实验,来验证和评价所提出的方法,将计算得到的探测信号能量曲线与现有的其他曲线进行对比分析。

(1)实例 1:山西晋城胡底煤矿 HD-010 的煤层气井剖面

该实验地点位于山西省晋城市胡底煤矿附近,主要目的是利用超低频探测仪探测含煤层气层的特征。实验区主要煤系地层为石炭系上统太原组、二叠系下统山西组和下盒子组,气源岩为 3# 煤层和 15# 号煤层,其中 3# 煤位于 454.26~459.52 m,15# 煤位于 543.8~546.5 m。该地区主要的储气层为煤层,顶底板为泥岩和非渗透的致密砂岩。

利用超低频探测仪在 HD-010 煤气井附近进行了数据采集。从图 1 中的 6 个曲线可以发现,信号

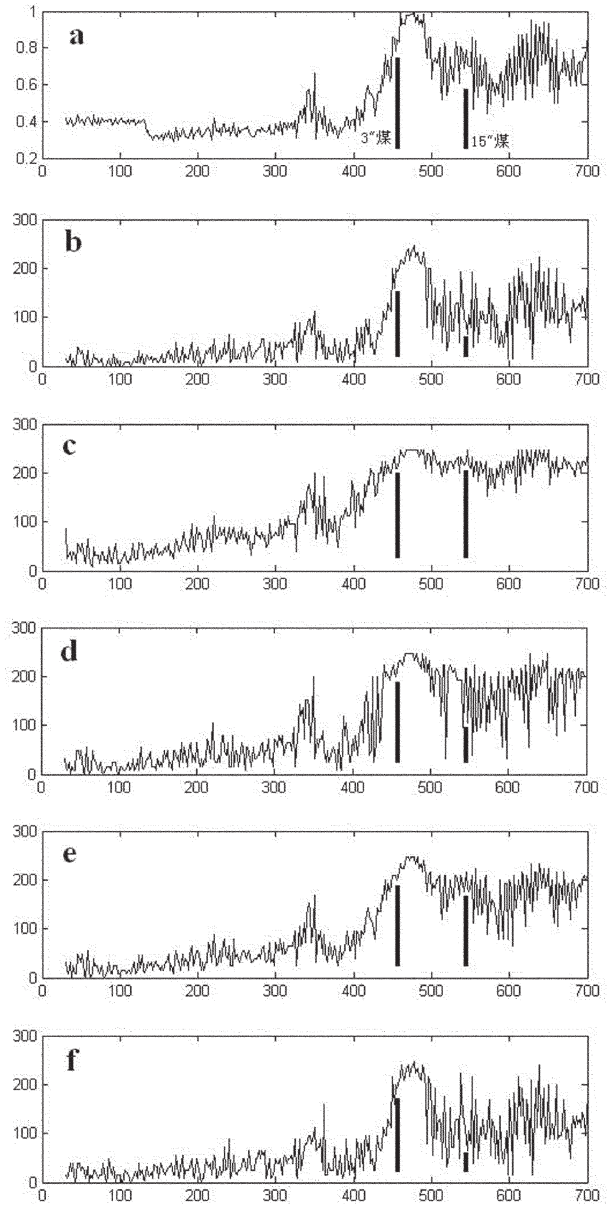


图 1 胡底煤矿附近 HD-010 煤层气井超低频电磁探测信号

a—能量-深度曲线 b—振幅最小值曲线;c—最大值曲线;  
d—众数值曲线;e—中间值曲线;f—少数值曲线  
(横轴为深度/m,纵轴为相对振幅)

Fig.1 The ULEM signal in the site of HD-010 coal-bed methane well in Hudi Coal Mine

(Horizontal axis represents the depth (in m), vertical represents relative magnitude)

a—the energy-depth curve; b— minimum curve;  
c—amplitude maximum curve; d—majority value curve;  
e—median curve; f—minority value curve

的相对能量-深度曲线在整个深度域中比较稳定,特别是深度小于 400 m 的地段,而且能量-深度曲



线在局部表现的非常平稳,而其他曲线的局部变化都比较大。图 1-a 中,3# 煤层和 15# 煤层所在的深度分别有两个明显的高能量带,这与煤层中煤层气的高含量直接相关。其他曲线中,这两个煤层所在的深度则表现不一,对于 3# 煤,所有的曲线都表现出高振幅的现象,但在 15# 煤的深度,振幅最小值(图 1-b)、少数值(图 1-f)则表现的不太明显,而振幅最大值(图 1-c)在 15# 煤层深度后还一直保持着高振幅,振幅众数值(图 1-d)、中间值(图 1-e)总体上对煤层气反映较好,但是曲线的局部波动与能量-深度曲线相比较大。

实例 2: 山西晋城胡底煤矿 HD-015 的煤层气井剖面

该试验地点也位于山西省晋城市胡底煤矿附近,与上述的 HD-010 井具有相似的地质特性。主要煤系地层为石炭系上统太原组、二叠系下统山西组和下盒子组,气源岩也为 3# 煤层和 15# 煤层,该井所在位置 3# 煤位于 507.62~512.82 m,15# 煤位于 597.73~600.23 m。储气层为煤层,顶底板为泥岩和非渗透的致密砂岩。

图 2 是煤层气井 HD-015 的超低频探测的不同探测曲线和图 1-a 相同,图 2-a 依旧保持着比较稳定的波形特征,说明信号能量方法较少受随机噪声的影响。

从图 2 中可以看出,能量-深度曲线在 3# 煤层和 15# 煤层附近形成了两个较显著的高能量带,这是由于煤层中煤层气的高含量引起的。相比之下,振幅最小值(图 2-b)、少数值(图 2-f)中的两个高振幅带虽也明显,但它们之间的波动则非常大,两个带内的过渡不是很清楚。振幅最大值(图 2-c)与图 1 中的相似,高振幅带之后的振幅依旧非常高。而其他曲线,振幅众数值(图 2-d)、中间值(图 2-e)虽可以分辨出两个高振幅带,但局部变化还是较大。

通过对山西晋城市胡底煤矿附近两个煤层气井剖面的分析,以及与现有的几个已知波形相比,可以看出,能量-深度曲线总体表现稳定,局部波动小;从对煤层气反映情况来看,能量-深度曲线则能更准确的反映煤层气的赋存深度。

(3)实例 3:静园地热井地质剖面

第二个探测试验地点位于北京大学内的静园地热井京热 119 井,该剖面有实际钻孔资料可进行对比。该剖面的主要地层及岩性特征可概括如下:

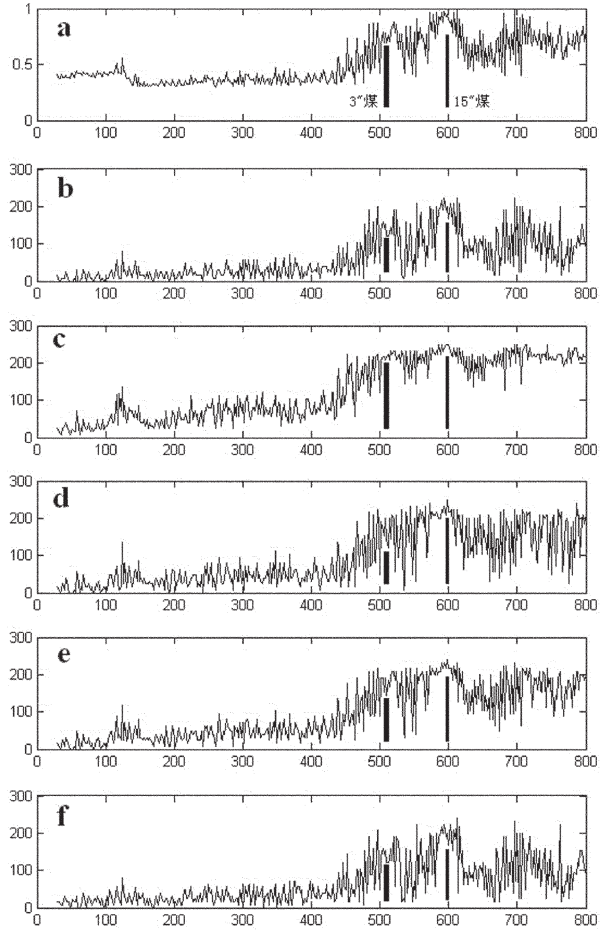


图 2 胡底煤矿附近 HD-015 煤层气井超低频电磁探测信号

a—能量-深度曲线;b—振幅最小值曲线;c—最大值曲线;d—众数值曲线;e—中间值曲线;f—少数值曲线  
(横轴为深度/m,纵轴为相对振幅)

Fig.2 The ULEM signal in the site of HD-015 coal-bed methane well in Hudi Coal Mine

Horizontal axis represents the depth (in m), vertical represents relative magnitude

a-The energy-depth curve;b-minimum amplitude curve;c-amplitude maximum curve;d-majority value curve;e- median curve; f-minority value curve

第四系:深度为 0~217.44 m,主要为松散沉积物,包括砂、砂砾卵石夹粘土和粘土含砾。

奥陶系:马家沟组:深度 217.44~495 m,主要岩性为灰岩、白云质灰岩,其中在 241.84 m、250.23 m、275~295 m、335 m、365 m 等多处裂隙发育;亮甲山组:深度 495~663 m,主要岩性为灰岩、白云质灰岩;冶里组:深度 663~754 m,主要岩性灰岩、白云质灰岩,泥质灰岩和薄层鲕状灰岩。

寒武系:炒米店组:深度在 754~940 m,主要岩性棕黄色灰岩、灰绿色泥岩、白云质灰岩和灰色鲕状灰岩。张夏组:深度在 940~1000 m,主要岩性棕黄色灰岩、灰绿色泥岩、泥质灰岩和灰色鲕状灰岩。

从图 3 中可以看出能量-深度曲线相比其他曲线波动较小,且地层界面较清楚,较容易分辨,每个深度段所代表的地层具有不同的变化规律,如在 217.44~495 m(马家沟组)振幅变化较小,只是图 3-a 在 400 m 附近有干扰;到 495~663 m(亮甲山组)振

幅变化开始变的较大;在 663~754 m(冶里组)中则变的更大,而且波形的振动频率也开始加大;到了 754~940 m(炒米店组)振幅变化开始变得缓和;最后在 940~1000 m(张夏组)强度又一次开始加强。能量-深度曲线总体稳定性比较好,较好地反映不同地层的的信息。但是其他参数波形中这些变化则不是很容易分辨,如图 3-d、f 在 500 m 后振幅变化一直很大,很难从中分出 495~663 m(亮甲山组)、663~754 m(冶里组)、754~940 m(炒米店组)、940~1000 m(张夏组)。图 3-b、c 虽然可以比较勉强的把亮甲山组(495~663 m)、冶里组(663~754 m)分辨出来,

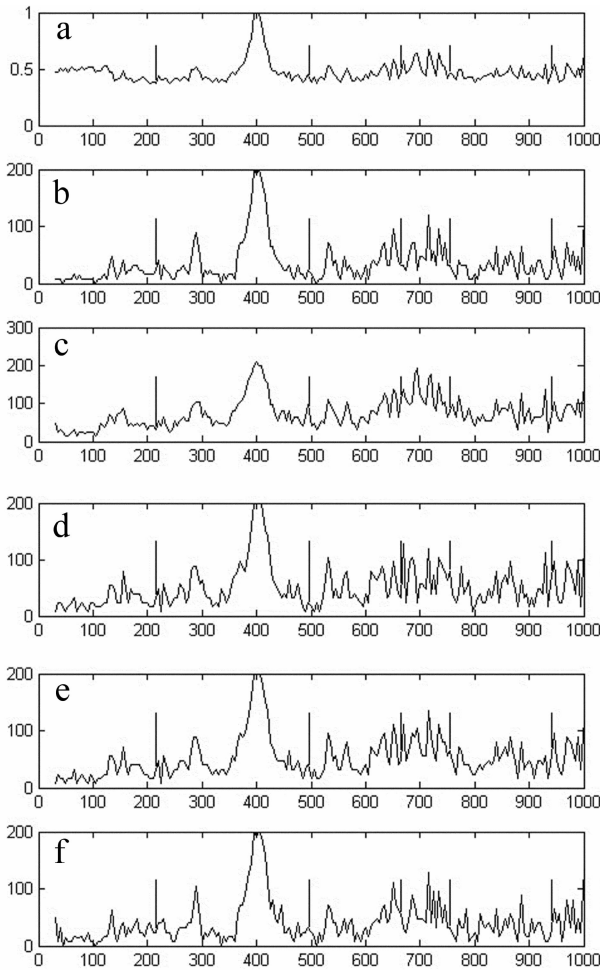


图 3 静园京热 119 井超低频电磁探测信号  
a—能量-深度曲线;b—最小值曲线;c—振幅最大值曲线;  
d—众数值曲线;e—中间值曲线;f—少数值曲线  
(横轴为深度/m,纵轴为相对振幅)

Fig.3 The ULEM signal in Jingyuan Beijing Hot 119 wells  
(Horizontal axis represents the depth (in m),  
vertical represents relative magnitude)

a—the energy-depth curve;b—minimum curve;c—amplitude maximum curve;d—majority value curve;e—median curve;  
f—minority value curve

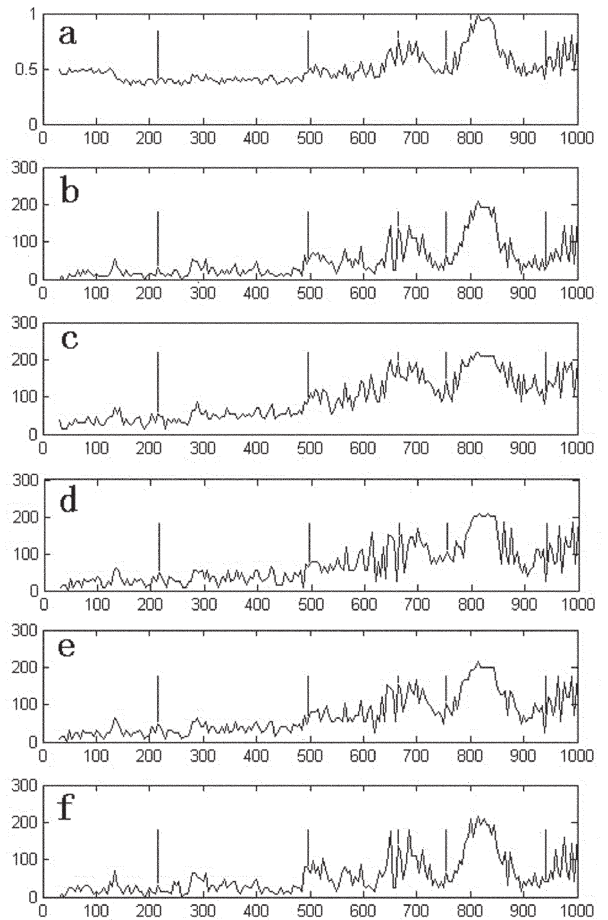


图 4 静园京热 119 井实验点超低频电磁探测信号  
a—能量-深度曲线;b—振幅最小值曲线;c—最大值曲线;  
d—众数值曲线;e—中间值曲线;f—少数值曲线  
(横轴为深度/m,纵轴为相对振幅)

Fig.4 The ULEM signal in Jingyuan Beijing Hot 119 wells  
(Horizontal axis represents the depth (in m),  
vertical represents relative magnitude)

a—the energy-depth curve;b—minimum curve;c—amplitude maximum curve;d—majority value curve;e—median curve;  
f—minority value curve

但后面的炒米店组(754~940 m)、张夏组(940~1000 m)又很难再次分辨。而且图 3-b、f 的波形中局部波动较大,相比较而言能量-深度曲线则较稳定,且在相同组中波形振幅变化的强度、密集度都保持很好的一致性。

从图 4 可以看出,能量-深度曲线依旧保持着很好的稳定性,每个深度段所代表的地层具有不同的变化规律,如在 217.44~495 m(马家沟组)中振幅变化较小;至 495~663 m(亮甲山组)开始加大;在 663~754 m(冶里组)中振幅变化再次加大而且变化频率也随之变大;到 754~940 m(炒米店组)又开始变得缓和,只是在 820 m 左右深度受到一次干扰;最后在 940~1000 m(张夏组)变化幅度和变化频率都很大。图 4-b、c、d、e、f 中的 5 个波形要比图 3 中对应的曲线表现更好,基本都能将不同深度组分辨出来。但与能量-深度曲线相比,这些曲线在局部的波动较大,特征不如能量-深度曲线明显。

通过对上面的实例分析可以看出,与其他已知曲线相比,能量-深度曲线在保持曲线稳定性的基础上,能更准确的反映地下资源以及地层特征信息。

## 5 结 论

利用超低频电磁探测技术进行地下资源及地质结构的探测与分析,是近年来新兴的技术,而其中信号的处理直接关系到后续的分析和地质解译。笔者运用信号能量方法计算超低频电磁探测信号的能量谱曲线,以更有效地反映地质信息。通过实际探测实验以及与现有方法的比较,分析评价方法的效果。结果表明,与现有方法相比,运用信号能量进行超低频探测信号的处理与分析,可更准确地反映地层以及地层下面的煤层气的位置。

**致谢:**数据采集过程中得到了方爱民、李百寿、张泽勋以及山西省晋城矿务局胡底矿崔永杰矿长和胡总工程师的大力支持与帮助,在此表示感谢。本文第三作者系南京大学地球科学系矿床专业毕业生,

在校期间聆听著名矿床学家胡受奚先生授课,受益匪浅,谨以此文祝贺胡受奚教授 80 华诞。

## 参考文献 (Refenercea):

- [1] 侯贵廷, 农学磊, 钱祥麟, 等. 超长电磁波遥测技术在渤海深部油气勘探中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 81-86.  
Hou Guiting, Yi Xuelei, Qian Xianglin, et al. The Application of ultra-long electromagnetic wave remote sensing to deep petroleum exploration under Bohai Sea [J]. Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Pekinesis, 2001, 37 (1):81-86 (in Chinese with English abstract).
- [2] 岳棋柱. 天然电磁辐射探测技术的应用 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4):873-879.  
Yue Qizhu. Application of natural electromagnetic sounding technique [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19 (4):873-879 (in Chinese with English abstract).
- [3] 岳棋柱. 天然电磁辐射探测技术工作机理的定性解释 [J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4):1281-1284.  
Yue Qizhu. A qualitative interpretation on the mechanism of the technique of electromagnetic radiation sounding [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4):1281-1284(in Chinese with English abstract).
- [4] 李建, 丁美莲. 超低频地质遥感探测装置在瓦斯气探测中的应用 [J]. 中国煤田地质, 2005, 17(4):54-56.  
Li jian, Ding Meilian. Application of ULF geological remote sensing device in gas detection[J]. Coal Geology of China, 2005, 17(4):54-56(in Chinese with English abstract).
- [5] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:349-353.  
Zheng Junli, Ying Qiheng, Yang Weili. Signal and System [M]. Beijing:Higher Education Press, 2000:349-353 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王更峰, 汤庆荣. 岩石声发射信号能量的小波包分析 [J]. 工程勘察, 2007, 8:69-72.  
Wang Gengfeng, Tang Qingrong. The wavelet packet analysis of rock acoustic emission signal energy [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2007, 8:69-72(in Chinese with English abstract).
- [7] 葛哲学. 精通 MATLAB[M]. 北京:电子工业出版社, 2008:29-179.  
Ge Zhexue. Proficient in MATLAB[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2008:29-179(in Chinese with English abstract).

## The calculation of ultra-low electromagnetic signal energy and its geological applications

SONG Ben-qin<sup>1</sup>, LI Pei-jun<sup>1</sup>, QIN Qi-ming<sup>1</sup>, HOU Gui-ting<sup>2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and GIS, School of earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Department of Geology, School of earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Passive ultra-low electromagnetic (ULEM) detection technique is one of the effective means for detection of subsurface and deep geological bodies and resources. However, the curves of ULEM detection obtained using the existing processing methods is sensitive to the noises, which could hamper the correct interpretation of resulting detection signal curves. In this paper, the signal energy was introduced to the processing of the detection signal. Firstly, according to the calculating principle of the signal energy, the energy value of the ultra-low electromagnetic signal for each sampling depth was calculated, and the energy curve was then generated. The obtained energy curve was analyzed and compared with the existing detection curves, such as the maximum and minimum of the magnitude, for some specific applications. The experimental results showed that compared with existing methods, the proposed signal energy method can more accurately reflect the characteristics of the rocks. The proposed method could facilitate the geological interpretation of the resulting curves.

**Key words:** Signal energy; ultra-low electromagnetic detection; Coal-bed methane

---

**About the first author:** SONG Ben-qin, male, born in 1984, Master candidate, Engages in the study of remote sensing information processing; E-mail: sbq43031@126.com.