

最小交叉熵谱在矿震井水位资料中的应用*

赵明 黄积刚^① 郑治真

(国家地震局地球物理所, 北京 100081)

摘要 文中简述了最小交叉熵谱原理,并用模拟资料检验了最小交叉熵谱计算程序,最后用最小交叉熵谱方法分析了矿震井水位资料。结果表明,矿震井水位资料的最小交叉熵谱中,除了日变化的 $2H_z$ 以外,在震前几小时到几天中均出现 $8H_z$ 的高频分量,这是一般的谱分析方法无法得到的。本文提出的方法为矿震预测提供了新的路径。

关键词: 最小交叉熵谱; 岩爆; 岩爆前兆

1 前言

矿井水位的变化,能反应矿区地应力的变化。研究表明矿区水位资料有水位同震效应,而井水位资料是否含有矿震前兆,是有关专家正在研究的问题。

陶庄矿是我国煤矿中,冲击地压较严重的地区之一。位于矿区的鲁15井,水位变化具有较强的反映地壳应力应变的能力,一般地,气压系数为 3mm/hpa 。鲁15井的水位资料在矿震的前后有非日变化的分量,特别是在震前几小时到几天的过程中,出现这种异常。由于这种非日变化的周期与日变化的周期相差较小,特别是其幅度与日变化相比很小,所以一般的谱分析方法难于提取该异常信息。我们用最小交叉熵谱的方法提取了矿井水位在矿震前的异常变化,为预测矿震提供一种新的途径。

2 最小交叉熵谱

2.1 理论及公式

Shore于1981年在最小互熵原理的基础上,提出了最小交叉熵谱(Minimum Cross Entropy Spectrum),与最大熵谱比较,进一步提高了分辨率,并且,可用于多信号的信号组的分析,被认为是谱估计技术的一次突破性进展。

最小交叉熵谱方程组如下:

* 国家自然科学基金资助
^① 枣庄地办

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min}H(p, q) = \int q(x) \ln \frac{q(x)}{p(x)} dx \\ \int [\sum_{k=1}^N C_{\gamma k} x_k] q(x) dx = R_{\gamma} \quad \gamma = 0, 1, 2, \dots, M \\ \int q(x) dx = 1 \\ T_k = \int x_k q(x) dx \\ p(x) = \prod_{k=1}^N \frac{1}{s_k} e^{-\frac{x_k}{s_k}} \end{array} \right.$$

上式中 $H(p, q)$ 为信息增益, $q(x)$ 是功率谱 x 的概率分布, $p(x)$ 是 $q(x)$ 的先验估计, s 是功率谱 x 的先验估计。

这时有
$$q(x) = p(x) \exp[-\lambda - \sum_{\gamma=0}^M \beta_{\gamma} \sum_{k=1}^N x_k C_{\gamma k}]$$

$$p(x) = \prod_{k=1}^N \frac{1}{s_k} \exp(-x_k/s_k)$$

将 $p(x)$ 代入, 并用约束条件 $\int q(x) dx = 1$ 确定系数 λ , 则有

$$q(x) = \prod_{k=1}^N (u_k + \frac{1}{s_k}) \exp[-(u_k + \frac{1}{s_k})x_k]$$

其中
$$u_k = \sum_{\gamma=0}^M \beta_{\gamma} C_{\gamma k}$$

因而功率谱 T_k 为

$$T_k = \int q(x) x_k dx = \frac{s_k}{1 + s_k u_k} = \frac{1}{\frac{1}{s_k} + \sum_{\gamma=0}^M \beta_{\gamma} C_{\gamma k}}$$

利用 $R_{\gamma} = \sum_{k=1}^N T_k C_{\gamma k}$ 确定系数 β_{γ}

$$R_{\gamma} = \sum_{k=1}^N \frac{C_{\gamma k}}{\frac{1}{s_k} + u_k}$$

令
$$e_k = \frac{1}{\frac{1}{s_k} + u_k}, \quad E = [e_k]_{N \times 1}$$

表示为矩阵形式:
$$CE = R$$

其中,

$$e_k = \frac{1}{\frac{1}{s_k} + \sum_{\gamma=0}^M \beta_{\gamma} C_{\gamma k}}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

$$\sum_{\gamma=0}^M \beta_{\gamma} C_{\gamma k} = \frac{1}{e_k} - \frac{1}{s_k}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

令

$$B = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M)'$$

$$C = [C_{rk}]_{(M+1) \times N}$$

$$K = [\frac{1}{e_k} - \frac{1}{s_k}]_{N \times 1}$$

则有 $C'B = K$

求解 B , 则得 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_M$, 进而可求得 T_k 。

2.2 模拟实验

为了检验我们的最小交叉熵谱程序, 取函数:

$$f(t) = A_1 \cos 2\pi f_1 t + A_2 \cos 2\pi f_2 t$$

其中, $A_1 = 5.1, A_2 = 5.2; f_1 = 1.10 Hz, f_2 = 1.21 Hz$,

取时间间隔 $\Delta t = 0.05s$, 频率间隔 $\Delta f = 0.01 Hz$, 采样点数 $N = 50$ 。

如图 1 给出 $f(t)$ 理论谱、功率谱、最大熵谱和最小交叉熵谱, 由图看出功率谱不能分辨出双峰结构, 最小交叉熵谱的双峰大小的比值比最大熵谱更近合理, 表明最小交叉熵谱计算程序是正确的。

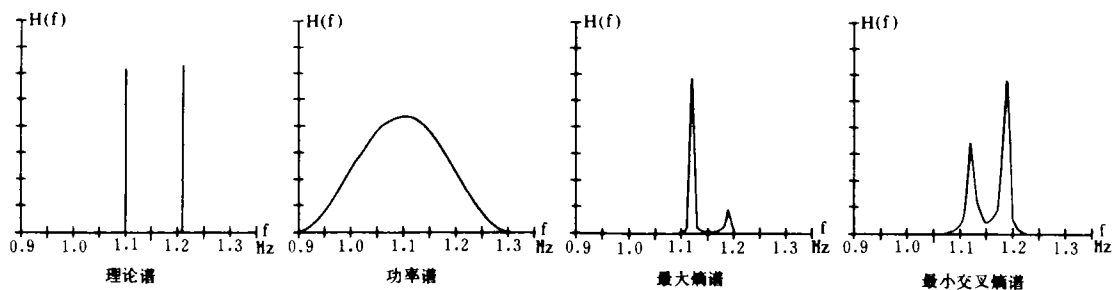


图 1 模拟实验的各种理论谱

Fig. 1 Theoretical spectrum in simulating experiment.

3 矿震井水位资料

我们对表 1 中鲁 15 号井记录的 4 组矿震井水位资料进行分析。矿震井水位资料的采样率为每小时一个点。

表 1

No	第一矿震时间	震级 (M_L)	第二矿震时间	震级 (M_L)
1	1980-11-05	1.5		
2	1981-08-26	1.6	1981-08-27	1.7
3	1990-11-10	2.3	1990-11-11	2.7
4	1991-02-07	2.6		

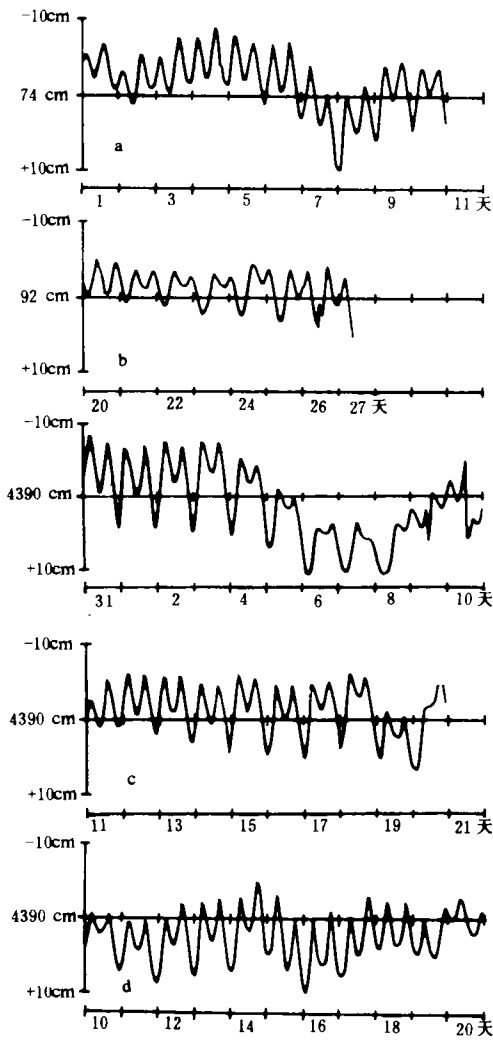


图2 矿震井水位观测图

Fig. 2 The hour variation of well water level before and after mining shocks.

有 2H_z , 又有 8H_z 的成分(图 4c)。

1990年11月10日 $M_L=2.3$ 矿震震前9天的谱中只有 2H_z 成分(图 5a), 震前5天出现了 8H_z 成分(图 5b), 震前3天的井水位较平常有很大变化, 此时, 谱的低频部分与平常情况下有较明显的不同, 高频部分有很弱的 10H_z 成分(图 5c), 该次矿震由于包含两个较大的矿震, 因此, 震时谱的成分很复杂。

1991年2月15日 $M_L=2.6$ 矿震震前8天的谱中只有 2H_z 成分(图 6a), 震前4天和

图 2.1~2.4 中给出了这4组数据的变化情况, 由图看出, 在震前除日变化外, 似乎有短周期(几小时)或长周期(几天)变化, 这种矿井水位中的变化在一般的研究中不能量化, 人们称之为固体潮周期变化, 即固体潮周期被调制。本文的目的是采用最小交叉熵谱来提取这种调制周期。

4 矿震井水位资料最小交叉熵谱分析

做最小交叉熵谱时, 水位资料的长度取50个点, 即约两天。取矿震前后的4组数据来分析(表2), 图3—图6给出了4次矿震的井水位资料的最小交叉熵谱。

由于主频段($0.24-3.6\text{H}_z$)的幅度比高频段($3.84-10.8\text{H}_z$)的幅度大4—5个量级, 最小交叉熵谱的波形分为两段画出。起始频率为 0.0H_z , 横坐标间隔为 0.24H_z , 主值为 2H_z 左右, 表明其为日变化。

由图3—图6可以看出:

1980年11月5日 $M_L=1.5$ 矿震前4天, 井水位资料最小交叉熵谱只有 2H_z 成分(图 3a), 震前5天出现了很弱的 8H_z 的成分(图 3b), 矿震时的谱中即有 2H_z , 又有 8H_z 的成分(图 3c)。

1981年8月26日 $M_L=1.6$ 矿震震前6天, 井水位资料最小交叉熵谱, 只有 2H_z 成分(图 4a), 震前2天出现了 8H_z 的高频成分(图 4b), 矿震时即

表 2

No	矿震时间	最小交叉熵谱采样日期			
		(a)	(b)	(c)	(d)
1	1980—11—05	1—2	3—4	5—6	
2	1981—08—26	20—21	24—25	26—27	
3	1990—11—10	1—2	5—6	7—8	10—11
4	1991—02—15	7—8	11—12	13—14	15—16

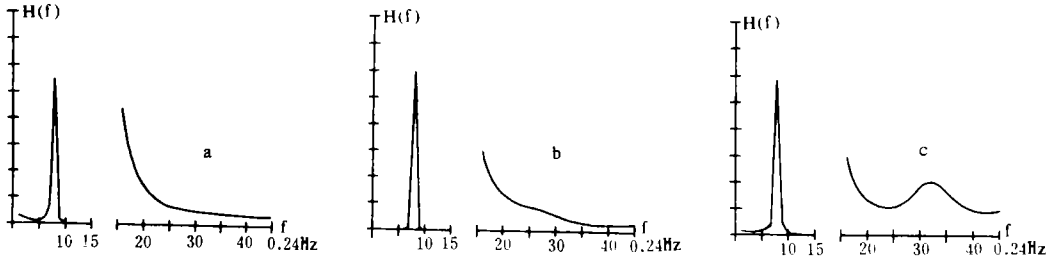


图 3 1980 年 11 月 5 日矿震井水位资料最小交叉熵谱

Fig. 3 Minimum cross entropy spectrum of well water level data of rock blast on Nov. 5, 1980.

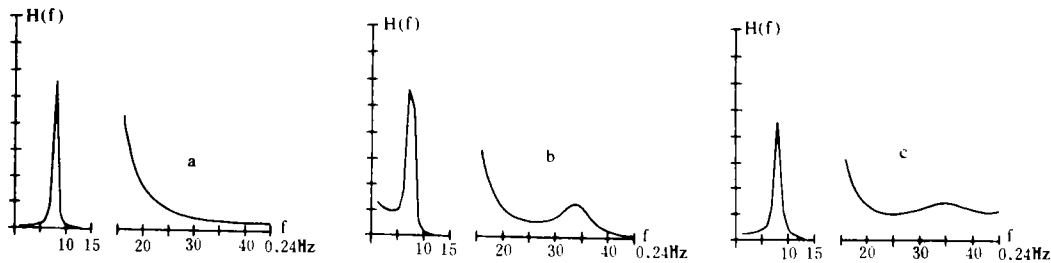


图 4 1981 年 8 月 26 日矿震井水位资料最小交叉熵谱

Fig. 4 Minimum cross entropy spectrum of well water level data of rock blast on Aug. 26, 1981.

震前 2 天的谱中先出现很弱的 10Hz 成分,后又出现明显的 8Hz 成分(图 6b,c),矿震时的谱中即有 2Hz,又有 8Hz 的成分(图 6d)。

5 结语

我们用最小交叉熵谱的方法提取矿井水位的异常变化,为预测矿震提供一种新的途径。矿震井水位资料的采样率为每小时取一个点,做最小交叉熵谱时,水位资料的长度取两天。结果表明,从矿震发生前几天到矿震当日,矿井水位的最小交叉熵谱有明显的变化:

(1)在正常情况下,矿井水位的最小交叉熵谱只有一个半日周期的峰值,其周期小于半日周期的部分单调衰减。

(2)在矿震前几小时到几天的时间内,矿井水位的最小交叉熵谱除了半日周期的主峰值

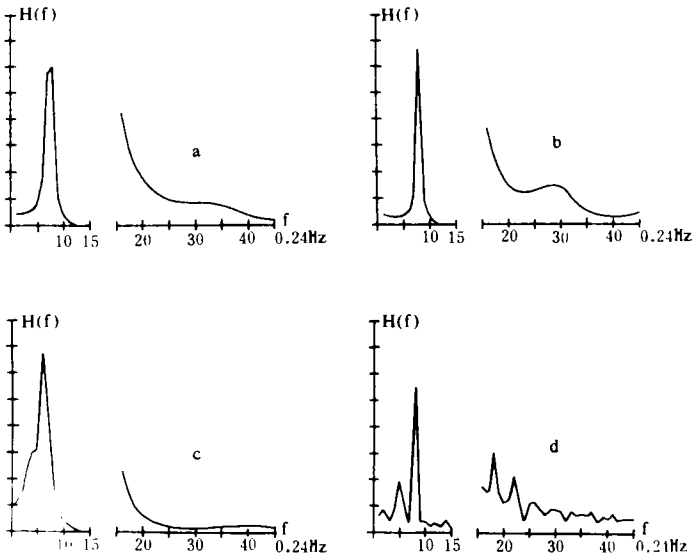


图 5 1990 年 11 月 10 日矿震井水位资料最小交叉熵谱
 Fig. 5 Minimum cross entropy spectrum of well water level data of rock blast on Nov. 10, 1990.

外,会出现 8Hz 左右的高频分量。

(3)在矿震时,由于矿震本身的复杂性,矿井水位的最小交叉熵谱在高频和低频部分,与震前和正常情况时有明显的不同。

由于在震前几小时到几天之间,矿井水位的最小交叉熵谱比在正常情况下会多出现一个高频分量,这种新的方法为预报矿震提供了新的途径。应当指出,这种由最小交叉熵谱方法得到的结果是别的方法所不能得到的。

(本文 1993 年 12 月 26 日收到)

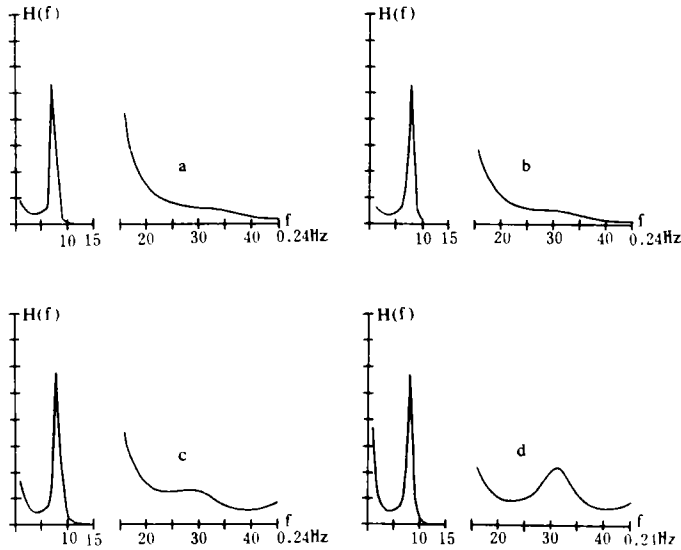


图 6 1991 年 2 月 15 日矿震井水位资料最小交叉熵谱
 Fig. 6 Minimum cross entropy spectrum of well water level data of rock blast on Feb. 15, 1991.

参考文献

- 1 Shore J E Minimum Cross Entropy Spectrum Analysis IEEE Tran. ASSP, 1981, 29: 230—237.
- 2 郑治真. 瞬态谱估计理论及其应用. 北京:地震出版社, 1993.

**APPLICATION OF MINIMUM CROSS ENTROPY SPECTRUM TO WATER
LEVEL DATA OF ROCK BLAST**

Zhao Ming, Huang Jigang, Zheng Zhizhen
(*Institute of Geophysics, SSB, Beijing 100081*)

Abstract

The theory of minimum cross entropy spectrum was briefly introduced. One experimental data was used to examine the program of minimum cross entropy spectrum, and we used the method of minimum cross entropy spectrum to analyse water level data of rock blast. Besides the day change of 0.98Hz, the results show that there would appear high frequency of 1.2Hz several days before some rock blasts. This result can not be obtained by ordinary methods. The new method provides a new path of rock blast forecast.

Key Words: Minimum cross entropy spectrum; Rock blast; Precursor of rock blast;
Mining earthquake

(接 49 页)

**APPLICATION OF OUTGOING LONG-WAVE RADIATION
TO EARTHQUAKE PREDICTION**

Sun Wulin
(*Meteorological Observatory of Qinghai Province, Xining 810001*)

Abstract

By using the data of outgoing long-wave radiation (OLR), received by the satellite, this paper calculated the anomalous variation of OLR before several earthquakes. The results show that the effect of cloud layer on the monthly mean value of OLR is only a little; the OLR value can reflect the heat state of the ground; before the earthquakes, the OLR value rises obviously. Therefore, the anomalous variation of OLR is of applied prospect for short-impending earthquake prediction.

Key Words: Outgoing long-wave radiation; Short-impending prediction; Qinghai;
Earthquake precursor