

用小波变换能量线性度方法识别 天然地震与爆破或塌方

刘希强¹, 沈 萍², 张 玲¹, 李永红¹

(1. 山东省地震局, 山东济南 250014; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 为了提取天然地震和爆破或塌方记录波形在震源深度、震源尺度、震源破裂机制、地震波传播途径、地震波衰减等方面的差异特征信息, 本文对山东数字化台网记录的天然地震和爆破或塌方波形进行了小波多分辨率的能量线性度特征分析, 提出了用小波变换能量线性度方法识别天然地震与爆破或塌方事件. 结果表明: 在精细结构小波分解信号“能量”线性度方面, 天然地震主要集中在 $-2.0 \sim 1.0$ 之间, 爆破或塌方主要集中在 $2.0 \sim 3.4$ 之间; 在精细结构小波分解信号“能量”最大值对应的小波分解尺度方面, 爆破或塌方主要集中在 $4 \sim 5$, 频段集中在 $0.7 \sim 3.1$ Hz 之间, 而天然地震主要集中在 $1 \sim 2$, 频段集中在 $6.25 \sim 25$ Hz 之间.

关键词: 小波变换; 能量线性度; 识别; 天然地震; 爆破或塌方

中图分类号: P315.3⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)03-0204-06

0 引言

核爆、人工爆破、塌方与天然地震事件的识别问题具有重要的国防意义、工程意义和地震应急意义. 自 20 世纪 50 年代开始, 国内外在地震与核爆识别方面进行了广泛深入的研究. 经过近五十年的工作, 人们基于地震波的辐射图形、地震波谱分析和震相特征提出了很多识别地下核爆破和地震的判据^[1,2], 主要包括初动符号分布、震源深度、体波震级 m_b 与面波震级 M_s 之比、P 波初动振幅与 P 波最大振幅比、勒夫波和瑞利波振幅比、P 波与 S 波谱振幅比、P 波谱振幅与勒夫波谱振幅比、瞬态谱等分析方法.

目前, 在构造地震和非构造地震识别方面, 我们遇到两个方面的新问题. 一是核爆破由大当量转为小当量, 且多采用隐蔽技术, 加之复杂的地质构造引起地震记录的多样性, 更增添了地震与核爆破模式识别的困难; 二是随着全国数字化地震台网和省级区域数字化台网的普及, 构造事件和非构造事件的监测能力有了大幅度提高, 而在地震速报中最常用的长短时平均及其改进方法^[3,4], 却不能进行地震模式识别. 增加了地震的误触发率, 也越来越明显地影响着地震速报时间和速报精度, 从而影响着地震应急的反应速度. 因此, 如何发展识别小当量的核爆与地震、地震与人工地震和塌方的有效识别方法, 从而建立起具有区域特点的指标体系是当前研究的前沿性课题.

本文用小波变换山东省数字化台网记录的地震、爆破或塌方进行了分析处理, 提出了一种识别地震、爆破或塌方的新方法, 为区域天然地震和爆破或塌方模式识别提供了新的有效判据.

1 基本思路与方法原理

1.1 基本思路

地震波记录(振幅、功率或者其它的性质)是多种因素(震源、传播介质、记录仪器等)叠加作用的结果,

收稿日期: 2002-07-16

基金项目: 地震科学联合基金(102035)、“十五”国家科技攻关项目(2001BA601B02-02-03-06)和济南市科技计划专项课题资助

作者简介: 刘希强(1964-), 男(汉族), 山东武城人, 博士, 研究员, 主要从事地震预报、各向异性和数字化地震波信息处理技术及应用研究.

在时间域中可用 $x(t)$ 表示. 用滤波的观点来描述 $x(t)$, 实际上是震源激发的地震波经大地系统滤波后, 被不同频率响应范围(短周期、中周期或长周期)的地震仪记录下来的、一定时间内各种性质的地震波(如纵波、横波和/或各种面波)叠加混合的信号. 可用级联式滤波器表示如下: 在时间域中

$$x(t) = s(t) * h_1(t) * h_2(t) * \dots * h_n(t) * i(t) \quad (1)$$

在频率域中

$$X(f) = S(f)H_1(f)H_2(f)\dots H_n(f)I(f) \quad (2)$$

式(1)中 $*$ 表示褶积; $s(t)$ 是震源信号; $h_1(t) * h_2(t) * \dots * h_n(t)$ 是大地系统分成 n 级滤波器时各类滤波器的脉冲响应函数; $i(t)$ 是地震仪的响应函数. 式(2) 式中 $S(f), H_1(f), H_2(f), \dots, H_n(f)$ 则分别是震源信号、各级滤波器和地震仪的频谱与频响函数. 尽管实际大地系统为非线性系统, 而公式(1)、(2)是在假定大地系统为线性系统的前提下给出来的, 但我们从中仍可以得到这样有益的启示: $x(t)$ 是 $s(t)$ 经多次滤波后获得的测量信号, 这一过程颇类似于函数的迭代过程或多次影射操作. 函数迭代过程是一个动力学过程, 在这里, $s(t)$ 就是初值, $x(t)$ 是滤波迭代得到的最后结果. 因此, $s(t)$ 不同, 自然 $x(t)$ 也不同; 震源位置和台站位置不同, 则滤波迭代次数与滤波函数(即 $h_1(t) \dots h_n(t)$ 等)均不同, 自然 $x(t)$ 也不一样. 地震记录 $x(t)$ 包含了震源、传播路径和仪器响应的信息, 观测台站距离地震越近, 震源特性的差异信息就越能显现出来; 反之, 震源特性的差异信息越难以从介质特性的影响中分辨出来, 这正是利用区域地震台网记录的 $x(t)$ 来识别非构造地震和构造地震震源特性的地球物理前提.

1.2 方法原理

Mallat 基于多分辨率框架理论, 提出了塔式多分辨率与综合算法, 巧妙地将多分辨率分析与小波分析结合在一起. 利用小波作多分辨率分析, 实际上是将某一样本信号分解成不同尺度上的精细结构信号和不同尺度上的逼近信号, 它相当于对信号分别作低通和带通滤波. 假定信号 $x(t)$ 的频段为 $[f_1, f_2]$, 以最大分解尺度 n 为例, 当尺度等于 1 时, 分解信号对应的频段为 $[f_1, f_1 + (f_2 - f_1)/2^1], [f_1 + (f_2 - f_1)/2^1, f_1 + (f_2 - f_1)/2^0]$; 当尺度等于 2 时, 对频段为 $[f_1, f_1 + (f_2 - f_1)/2^1]$ 的信号进行进一步分解, 继续分解为两个频段的信号, 即 $[f_1, f_1 + (f_2 - f_1)/2^2]$ 和 $[f_1 + (f_2 - f_1)/2^2, f_1 + (f_2 - f_1)/2^1]$; 当尺度为 n 时, 依次类推. 小波变换中尺度因子越小, 分辨率高, 相当于延拓高度较小, 能反映出原始信号的细节; 尺度因子越大, 相当于延拓高度增大, 主要反映原始信号中的低频成分. 每分解一次, 就相当于向上延拓一次, 剥去原始信号中的一部分高频成分, 剥去的信息则构成细节部分, 即所谓精细结构信号. 象位场延拓一样, 不同尺度上的逼近信号和精细信号与尺度有密切关系. 正是基于这样的认识, 我们把不同尺度上的逼近信号和精细结构信号的“能量”当成分解尺度的函数, 进而求得相应的特征量. 具体计算过程如下:

(1) 对原始数据进行小波分解, 小波分解的公式如(3)所示:

$$CWT_x(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中 $x(t)$ 表示原始记录, 对于离散信号用 $x(n)$ 表示; a 是尺度因子; b 是位移因子; Ψ 是一个基小波

($\Psi \in L^2(\mathbb{R})$), 满足容许性条件 $c_\Psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 小波分析的时频窗为

$$(b + at^* - a\Delta\Psi, b + at^* + a\Delta\Psi) \times \left(\frac{\omega^*}{a} - \frac{1}{a}\Delta\Psi, \frac{\omega^*}{a} + \frac{1}{a}\Delta\Psi\right) \quad (4)$$

其中 t^* 和 ω^* 分别是基小波 Ψ 的时域中心和频域中心; $\Delta\Psi$ 和 $\Delta\Psi$ 分别是基小波 Ψ 的时域和频域半径. 随着尺度 a 的减小, 时域的分析窗宽变短, 频率域的分析窗宽变长. 本文选择 Db4 小波基进行二进小波变换.

(2) 构造精细和逼近结构小波分解信号尺度图序列, 尺度图定义为小波变换 ($CWT(a, b)$), 模值的平方, 即

$$E(a, b) = |CWT(a, b)|^2 \quad (5)$$

(3) 求不同尺度下尺度图对应信号“能量”的线性分布特征

$$E(a,b)=a^{\beta}$$

(6)

对式(6)取对数,并将尺度 a 表示为二进小波变换 2^j (j 是正整数,代表尺度)的形式,则由式(6)得

表 1 山东数字化地震台网记录地震、爆破或塌方基本信息和模式识别对比表

序号	时间		地点	事件 类型	记录 台站	与台站 距离 / km	能量线 性度 ($DWEL$)	“能量”最 大值对 应尺度	“能量”最大 值对应频 段/ Hz
1	1999-10-25	18: 30	莱芜 3.2 级(36°29′N, 117°20′E)	地震	泰安	18. 33	0. 15±0. 08	3	[3. 13, 6. 25]
2	2000-07-30	15: 37	荣城 S—P=3.0 秒	地震	荣城	24. 00	0. 2±0. 06	2	[6. 25, 12. 50]
3	2000-08-07	23: 18	北黄海 3.0 级(37°53′N, 122°14′E)	地震	荣城	60. 93	0. 21±0. 10	3	[3. 13, 6. 25]
4	2000-08-14	18: 30	3.0 级(35°24′N, 122°53′E)	地震	荣城	371. 04	−0. 44±0. 60	3	[3. 13, 6. 25]
5	2001-09-19	16: 7	渤海 4.7 级(38°10′N, 119°28′E)	地震	莱阳	328. 61	−0. 25±0. 05	1	[12. 50, 25. 0]
6	2001-10-07	14: 5	乳山 2.9 级(36°53′N, 121°24′E)	地震	烟台	45. 36	−0. 384±0. 16	2	[6. 25, 12. 50]
7	2001-10-11	13: 0	3.5 级(38°02′N, 121°37′E)	地震	荣城	155. 21	0. 09±0. 11	1	[12. 50, 25. 0]
					烟台	37. 27	0. 05±0. 10	1	[12. 50, 25. 0]
					莱阳	210. 43	−0. 54±0. 04	2	[6. 25, 12. 50]
					莱阳	91. 70	−0. 96±0. 05	1	[12. 50, 25. 0]
8	2001-11-19	12: 4	黄海 1.7 级(37°53′N, 120°53′E)	地震	烟台	38. 79	−0. 45±0. 06	2	[6. 25, 12. 50]
9	2001-10-23	7: 1	蓬莱 2.6 级(37°49′N, 120°47′E)	地震	莱阳	76. 43	−0. 22±0. 005	1	[12. 50, 25. 0]
					烟台	45. 36	0. 43±0. 20	3	[3. 13, 6. 25]
10	2001-10-15	11: 25	蓬莱 2.5 级(35°58′N, 116°02′E)	地震	济南	157. 91	0. 02±0. 12	2	[6. 25, 12. 50]
					聊城	26. 08	1. 05±0. 05	4	[1. 56, 3. 13]
11	1999-09-07	1: 3	兖州东南 2.9 级(35°29′N, 116°54′E)	塌方	泰安	113. 04	0. 61±0. 07	3	[3. 13, 6. 25]
					泰安	66. 49	2. 68±0. 15	5	[0. 78, 1. 56]
12	2001-09-03	4: 57	济宁 2.4 级(35°16′N, 116°38′E)	塌方	泰安	122. 55	2. 15±0. 15	4	[1. 56, 3. 13]
13	2001-09-11	1: 49	枣庄 3.1 级(34°45′N, 117°40′E)	爆破或塌方	苍山	16. 03	4. 7±0. 06	5	[0. 78, 1. 56]
14	2001-09-14	3: 12	邹县 3.0 级(35°26′N, 116°52′E)	塌方	苍山	189. 09	2. 69±0. 08	5	[0. 78, 1. 56]
15	2001-10-23	17: 50	济南, 2.3 级(36°47′N, 117°01′E)	爆破	济南	2. 98	2. 98±0. 05	3	[3. 13, 6. 25]
16	2001-09-28	8: 5	安徽萧县 3.0 级(34°27′N, 116°51′E)	爆破	泰安	262. 79	2. 45±0. 09	4	[1. 56, 3. 13]
17	2001-103-1	7: 43	邹城 2.6 级(34°46′N, 117°09′E)	塌方	苍山	87. 47	2. 46±0. 03	6	[0. 39, 0. 78]
					泰安	247. 12	2. 88±0. 13	5	[0. 78, 1. 56]
18	2001-11-03	17: 6	荣城 2.4 级(36°44′N, 122°17′E)	爆破	荣城	22. 99	2. 95±0. 05	3	[3. 13, 6. 25]
19	2001-11-03	22: 57	泰安磁窑 2.6 级(35°46′N, 117°09′E)	爆破	申桥	307. 48	2. 44±0. 08	4	[1. 56, 3. 13]
					泰安	29. 53	2. 44±0. 09	4	[1. 56, 3. 13]
					聊城	194. 39	2. 62±0. 16	5	[0. 78, 1. 56]
20	2001-11-09	9: 36	济宁 3.2 级(35°23′N, 116°47′E)	爆破	泰安	88. 78	2. 32±0. 12	4, 5	[0. 78, 3. 13]
					申桥	512. 05	2. 21±0. 11	4, 5	[0. 78, 3. 13]
21	2001-11-10	14: 27	邹县 2.8 级(35°27′N, 116°56′E)	爆破	泰安	77. 35	2. 66±0. 01	3	[3. 13, 6. 25]
22	2001-11-18	1: 1	滕州西岗镇 2.6 级(34°56′N, 116°58′E)	爆破	苍山	123. 20	2. 02±0. 02	4	[1. 56, 3. 13]
					泰安	192. 89	3. 22±0. 10	5	[0. 78, 1. 56]

$$\beta = \frac{\log_{10}(E(2^j, b))}{\log_{10}(2^j)} \tag{7}$$

β 值称为小波变换能量线性度. 这样, 通过对时域地震信号 $x(t)$ 的处理与分析, 提出了从地震波记录中提取用于识别天然地震与爆破或塌方的两类地震波特征参量, 一是精细和逼近结构小波分解信号“能量”线性度($DWEL$ 和 $AWEL$); 二是精细和逼近结构小波分解信号“能量”的极值点($DWEE$ 和 $AWEE$).

2 天然地震与爆破或塌方的鉴别

2.1 资料选取

本研究所使用资料取自山东数字化地震台网 16 个台站的垂向短周期和宽频带数字化速度型记录, 采样率为 50 点/秒. 选取台站记录波形资料需要同时满足以下原则: ① 选取高信噪比资料, 不经任何噪声滤波处理, 根据仪器频响, 只将数字换算成速度型记录; ② 事件与记录台站距离越近越好, 尽量减少介质传播路径的影响, 突出震源差异信息; ③ 所研究的波形长度为整个波列, 长度一般为 80 秒左右. 根据上述资料选取原则, 主要收集了 2001 年台网正式运行以来已知的 12 个爆破或塌方记录和 10 个天然地震记录(表 1).

2.2 处理结果

用上述方法对 10 个地震和 12 个爆破或塌方记录进行了处理, 线性度 $DWEL$ 和 $AWEL$ 、精细结构小波分解信号“能量”最大值对应尺度 $DWEE$ 和 $AWEE$ 和频段列于表 1. 图 1 和图 2 分别给出了对一个爆破和一个地震的波形记录($j = 1, 2, 3, \dots$)10 个小波尺度拟合得到的 $DWEL$ 和 $AWEL$ 及其误差、精细结构小波分解信号“能量”最大值(箭头标出)对应的小波尺度.

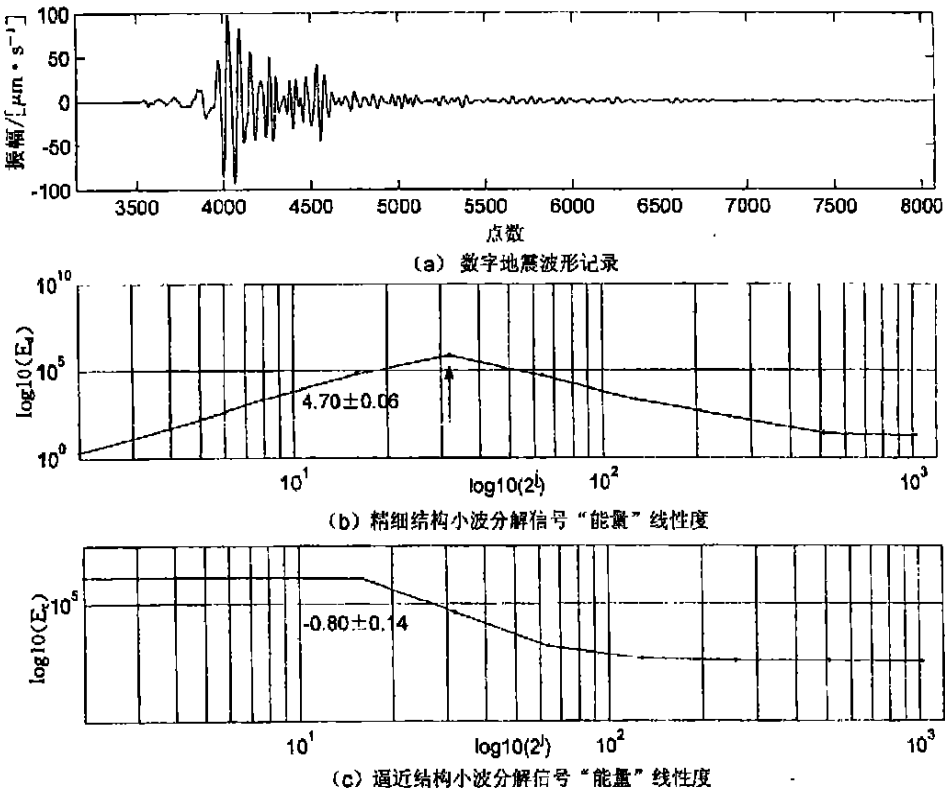


图 1 2001 年 9 月 11 日 苍山台 爆破记录(震级 3.1)及能量线性度变化特征

Fig. 1 Explosion record at Cangshan station ($M=3.1$) on Nov. 11, 2001 and its energy linearity characteristics.

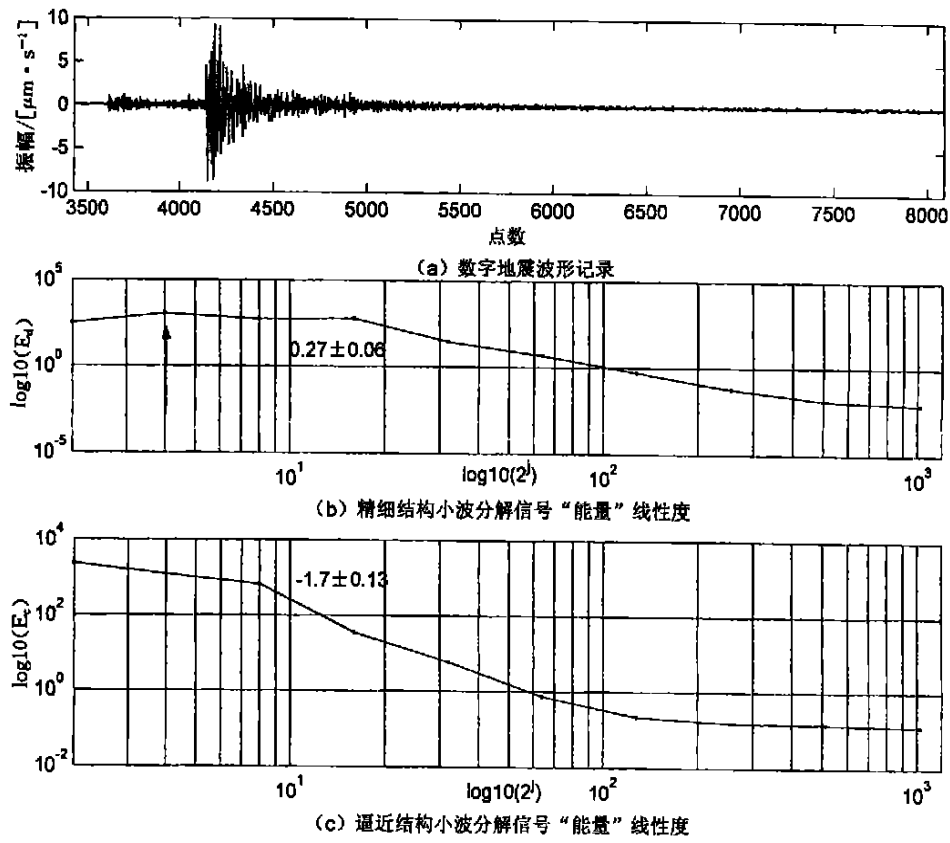


图 2 2001 年 7 月 30 日荣城台地震记录及能量线性度变化特征
Fig. 2 Earthquake record at Rongcheng station ($M=3.1$) on July 30, 2001 and its energy linearity characteristics.

由表 1 并结合图 1 和图 2 可知: (1)爆破或塌方的线性度 $DWEL$ 变化范围主要分布在 2.0 ~ 3.4 之间,最大值为 4.7,地震在 -2.0 ~ 1.0 之间; (2)爆破或塌方的精细结构小波分解信号“能量”最大值对应的小波分解尺度主要集中在 4 和 5,地震主要集中在 1 和 2; (3)爆破或塌方的精细结构小波分解信号“能量”最大值对应频段主要集中在 0.7 ~ 3.1 Hz 之间,地震主要集中在 6.25 ~ 25 Hz 之间; (4)天然地震与爆破和塌方之间的线性度 $AWEL$ 无明显差异特性变化。

对有限样本的研究结果表明,用精细结构小波分解信号“能量”线性度 $DWEL$ 识别天然地震与爆破或塌方事件是非常有效的。

3 结果与讨论

(1)天然地震与爆破或塌方之间的线性度 $DWEL$ 差异显著,识别准确率高.爆破或塌方的线性度 $DWEL$ 较高,变化范围较窄,主要集中在 2.0 ~ 3.4 之间;天然地震的线性度 $DWEL$ 较低,变化范围较宽,在 -2.0 ~ 1.0 之间.天然地震的各频段信号“能量”的最大值变化范围较大,集中在 6.25 ~ 25 Hz 之间;而爆破或塌方变化范围较小,集中在 0.7 ~ 3.1 Hz 之间.分析认为,这些识别特征量间的差异与天然地震和爆破或塌方在震源深度、震源尺度、震源破裂机制、地震波传播途径、地震波衰减等方面的特性有关。

(2)本文研究的对象是每个台站记录到的包括 P 波、S 波及面波在内的整个波列.分别加强对 P 波、S 波和面波记录波段的差异特性研究可能会得到更多、更详尽和更有意义的信息。

(3)本文尽量选取信噪比高的波形资料,但背景噪声对研究结果仍然会产生影响.如何进行有效滤波,而又尽量减少由于滤波带来的信息畸变,是今后研究的一个课题。

(4) 一个地区资料的结果可能不完全适合于另一地区, 加强不同地区构造地震和非构造地震模式识别的对比研究也是需要深入探讨的课题.

[参考文献]

- [1] 沈萍, 郑治真. 瞬态谱在地震与核爆识别中的应用[J]. 地球物理学报, 1999, **42**(2): 233—240.
- [2] 吴忠良, 陈运泰, 牟其铎. 核爆炸地震学概要[M]. 北京: 地震出版社, 1994. 83—93.
- [3] Allen R. Automatic earthquake recognition and timing from single trace[J]. Bull Seism Soc Amer, 1978, **68**: 1521—1532.
- [4] Bear M, Kradolfer A. An automatic phase picker for local and teleseismic event[J]. Bull Seism Soc Amer, 1987, **77**: 1437—1445.

USING METHOD OF ENERGY LINEARITY IN WAVELET TRANSFORM TO DISTINGUISH EXPLOSION OR COLLAPSE FROM NATURE EARTHQUAKE

LIU Xi-qiang¹, SHEN Ping², ZHANG Ling¹, LI Yong-hong¹

(1. Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014 China;

2. Institute of Geophysics, CSB, Beijing 100081)

Abstract: In order to extract the difference information from the recorded waveforms of naturerual earthquake and explosion or collapse in seismic focus depth, seismic focus scale, seismic focus break mechanism, seismic wave travel path and seismic wave attenuation, the energy linearity characteristics of wavelet multiresolution from the records of some nature earthquakes, explosions and collapses in Digital Seismic Network of Shang-dong prov. are analysed, and a new method of energy linearity in wavelet transform is put forward to distinguish explosion or collapse from nature earthquake. The result indicates that in energy linearity of fine structure wavelet decomposition signal, the range of nature earthquake is from -2.0 to 1.0 , but the range of explosion or collapse is from 2.0 to 3.4 ; in wavelet decomposition scale corresponding to maximum energy of fine structure wavelet decomposition signal, the range of nature earthquake is from 1 to 2 and the frequency is from 6.25 to 25 Hz respectively, but the range of explosion or collapse is from 4 to 5 and the frequency is from 0.7 to 3.1 Hz.

Key words: Wavelet transform; Energy linearity; Distinguishing; Explosion or collapse; Nature earthquake