

爆破震动信号的多分辨小波分析

陈士海, 魏海霞, 杜荣强

(山东科技大学 土木建筑学院, 青岛 266510)

摘 要: 采用小波分析和快速傅立叶变换相结合的方法, 对工程案例的爆破震动近、中远区的实测原始信号进行小小波分解和重构, 得到重构后各子频带的时间信号及频谱, 在此基础上通过 Matlab 语言编写程序研究爆破地震波沿各分区信号的频谱及能量分布特征。指出: 爆破震动各分区的主频从大到小排序为: 近区>中区>远区; 随着比例距离的增加, 低频带能量所占信号总能量的比例升高, 高频带能量所占比例下降; 频率越低的频带信号, 持续时间越长; 除主频所在频带外, 在 0~2.441 5 Hz 频段 (比较接近建筑物的自振频率), 爆破震动信号在水平方向占有不小的能量比例, 故建筑物进行结构设计时考虑水平方向的抗震尤为重要。

关 键 词: 爆破; 爆破震动; 小波分析; 能量

中图分类号: O 381

文献标识码: A

Multi-resolution wavelet analysis of blasting vibration signals

CHEN Shi-hai, WEI Hai-xia, DU Rong-qiang

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: With the methods of wavelet analysis and fast Fourier transform, actual original signals from engineering project in near, medium and far zones of blasting vibration are separately decomposed and reconstructed; and time signals and spectra of all sub-frequencybands are obtained. On this basis, distribution characteristics of spectra and energy of blasting seismic waves along all zones are studied with Matlab; and it is pointed out, that the values of dominant frequency in blasting vibration zones is in attenuation sequence: near zone, medium zone, far zone; as the scaled distance increases, low frequency bands share higher proportion of total signal energy, while high frequency bands share lower; signals in lower frequency bands have longer duration; in addition to the frequency band that the dominant frequency locates in, when the band is from 0 to 2.441 5 Hz (close to the natural frequency of the buildings), blasting vibration signals in the horizontal direction occupy an assignable proportion of the energy; and thus the aseismic construction in horizontal direction is especially important for building structure designs.

Key words: blasting; blasting vibration; wavelet analysis; energy

1 引 言

爆破震动分析是研究爆破震动危害控制的基础, 也是控制爆破震动危害的前提。从众多爆破震动实地监测资料看, 爆破震动信号具有持时短、突变快等特点, 信号的结构包括频谱都是时变的, 属于典型的非平稳信号^[1-3]。长期以来囿于理论的发展, 人们研究它时, 将它简化为平稳信号 (伪平稳) 问题通过 Fourier 变换来处理^[4-6]。Fourier 变换是一种全局的变换, 要么完全在时域, 要么完全在频域,

因此无法表述信号的时域局部性质, 而这种性质恰恰是非平稳信号最根本和最关键的性质。

近年来, 随着科学技术的发展和进步特别是新的数学工具的出现, 信号的时频表示法已广泛应用于工程技术领域, 在数值信号分析中提出的小波分析方法克服了传统 Fourier 变换的不足, 为非平稳随机信号特征的提取提供了可能。小波分析是一种强有力的数学工具, 它在时域和频域都具有很好的局部化性质, 较好地解决了时间和频率分辨率地矛盾, 因此它是研究时频分析的重要工具。对于信号

的低频成分,可以采用宽时窗使得时域分辨率低而频域分辨率高,对于信号的高频成分,则可以采用窄时窗使得时域分辨率高而频域分辨率低。小波分析这种自适应分辨分析的优良性质,使它信号处理领域的许多方面获得成功的应用,其中已经开始在爆破震动问题中做了些有益的研究工作,这些工作包括应用小波分析方法对爆破震动信号时变频谱特征的提取^[7-8],不同频带上震动能量分布情况与爆破发生条件之间的关系^[9-10],以及小波分析方法在爆破震动安全性分析方面的应用^[11]。

本文通过对爆破震动近区、中区、远区实测爆破震动信号的多分辨小波分析,来探讨爆破震动各分区内爆破震动信号的频谱及能量特征的变化规律。

2 工程概况

日照市某小区地基开挖工程爆破区域长约 260 m,宽 120 m,爆破开挖深度 1~6 m。场区地貌单元属黄海陆地域低山丘陵,地貌成因形态类型属构造剥蚀残丘。场区基岩为花岗岩和片麻岩石,经历了漫长的地质历史时期外营力地质作用的改造,从而使基岩自上而下形成不同程度的风化带。爆破主要采用浅孔扩壶爆破方法,钻孔直径 38 mm,孔距约 1.2 m,排距 1 m,孔深 1.6 m。

为准确确定爆破的震动强度、控制其在安全界限内,长期跟踪进行了现场爆破监测工作。监测设备采用 IDTS3850 爆破震动测试记录仪 2~3 台及配套三向传感器,采集了大量爆破震动信号。

3 爆破实测信号的多分辨小波分析

将萨道夫斯基爆破振动经验公式变形如下:

$$v = K(r/Q^{1/3})^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: v 为介质质点振动速度 (cm/s); K 、 α 为与爆破方式及场地条件等有关的系数; $r/Q^{1/3}$ 为比

例距离,其中 r 为爆心距 (m); Q 为最大段齐爆药量 (kg)。

研究表明:小于 12 的比例距离内,爆破震动速度的衰减异常迅速,称为爆破地震近区;12~22 的比例距离内,震动速度下降变慢,为爆破震动中区;大于 22 倍比例距离的爆区,震动速度衰减非常缓慢,为爆破震动远区。

在日照某小区爆破工程现场监测的数据中,根据上述对爆破震动近、中、远区的划分原则,在爆破震动近、中、远各取两个测点共计 6 组数据(见表 1),对每个测点在三方向(垂直方向、水平径向和水平切向)上分别进行多分辨小波分析。多分辨小波分析^[12]的作用是将信号分解成不同空间的部分,另外,它也提供了一种构造小波的统一框架,还能提供数字信号分解与重构的快速算法。多分辨分析只是对低频部分进行进一步分解,而高频部分则不予以考虑,使频率的分辨率变得越来越高。

在对此工程采集的爆破震动信号进行多分辨分析时,所选择的小波基函数为 Inrid Daubechies 构造的 dbN 小波系中的 db8。分解的层数取决于具体信号及采用的爆破震动测试记录仪的工作频带而定。本次测试设置的信号采样频率为 10 000 Hz,根据采样定理,则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 10 000/2=5 000 Hz。由于一般建筑物的自振频率位于 2~10 Hz 范围内,对各测点爆破震动信号在三方向上进行尺度为 11 的小波分解和重构,所对应 12 个频率带的取值分别为:0~2.441 Hz, 2.441~4.882 Hz, 4.882~9.765 Hz, 9.765~19.531 Hz, 19.531~39.062 Hz, 39.062~78.125 Hz, 78.125~156.25 Hz, 156.25~312.5 Hz, 312.5~625 Hz, 625~1 250 Hz, 1 250~2 500 Hz, 2 500~5 000 Hz。在每个子频带上的信号仍是速度关于时间变化的信号,再通过快速傅立叶变换转化成功率谱密度关于频率变化的信号。

表 1 近、中、远区所取典型测点监测数据
Table 1 Typical points data measured in near, medium and far zones

测点 序号	药量 /kg	距离 /m	比例 距离	爆破 分区	震速 /(cm/s)			频率 /Hz		
					垂直	水径	水切	垂直	水径	水切
2	4.5	8.5	5.1485	近区	2.338 1	3.084 3	1.968 1	123.291 0	48.828 1	347.900 4
3	6.5	15	8.0375	近区	2.698 7	3.608 0	2.375 6	122.680 7	169.067 4	323.486 3
33	29	48	15.6234	中区	0.819 1	1.242 6	0.770 0	59.204 1	58.593 8	45.776 4
45	10	36.9	17.1275	中区	0.623 5	0.349 2	0.802 2	43.945 3	50.659 2	50.659 2
99	11.5	121	53.6067	远区	0.083 1	0.173 5	0.070 7	26.855 5	28.076 2	21.972 7
109	11	173	77.7885	远区	0.113 4	0.202 9	0.157 7	28.076 2	28.076 2	15.869 1

以中区测点 33 垂直方向信号为例, 爆破震动原始信号及各子频带重构信号的速度幅值图及功率谱图见图 1~5。爆破震动近、中、远区各测点三方向信号经多分辨小波分析后的各子频带的主频、峰值速度及能量比例结果见表 2~7。

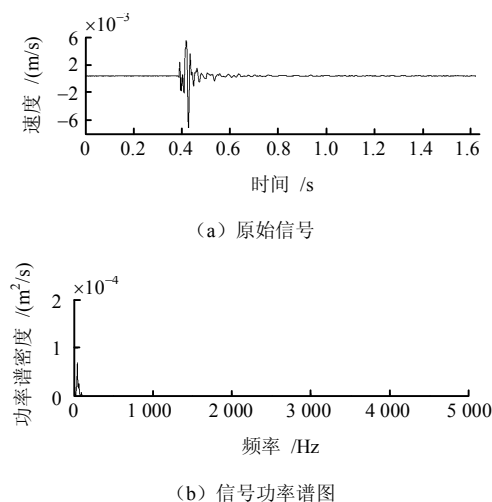


图 1 中区测点 33 垂直方向原始信号及功率谱图
Fig.1 Figures of original singal and power spectrum in the vertical direction of piont 33 in medium zone

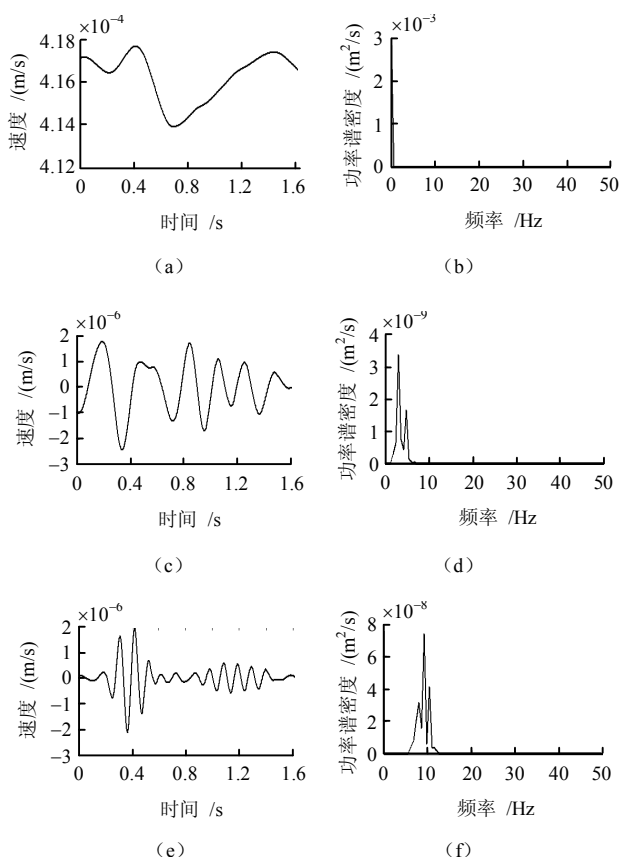


图 2 中区测点 33 垂直方向尺度 11 上低频、尺度 11、10 上高频重构信号及功率谱图
Fig.2 Figures of reconstructed singals and power spectra in low frequency in the vertical dimension of 11 and high frequency in dimensions of 11, 10 of piont 33 in medium zone

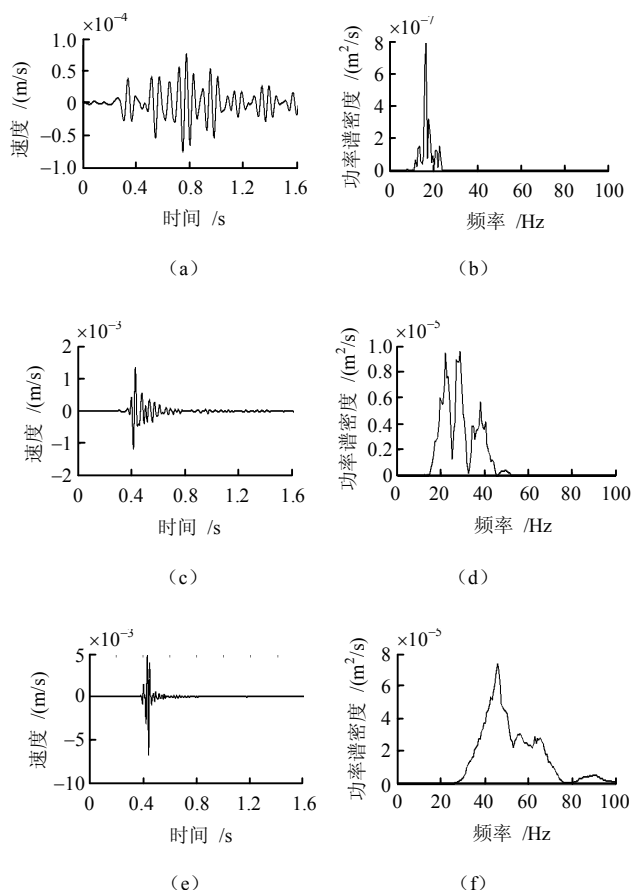


图 3 中区测点 33 垂直方向尺度 9、8、7 上高频重构信号及功率谱图

Fig.3 Figures of reconstructed singal and power spectra in high frequency in the vertical dimensions of 9, 8, 7 of piont 33 in medium zone

表 2 近区测点 2 三方向上各频带的主频、峰值速度及能量比例列表

Table 2 Table of dominant frequency, peak velocity and the ratio of energy of each frequency range in three directions of piont 2 in near zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	1.8	0.02	0.67	1.8	0.03	5.31	1.8	0.05	20.88
2.441 5~ 4.882 9	3.7	0.01	0.33	4.3	0.01	0.02	4.3	0.02	0.42
4.882 9~ 9.765 7	5.5	0.02	0.32	8.5	0.04	0.46	6.7	0.03	0.44
9.765 7~ 19.531 3	12.8	0.03	0.41	13.4	0.09	1.12	10.4	0.03	0.47
19.531 3~ 39.062 5	24.4	0.06	0.89	25.0	0.17	2.71	24.4	0.05	0.28
39.062 5~ 78.125	67.7	0.51	19.14	47.6	0.98	24.66	55.5	0.14	0.96
78.125~56.25	123.3	1.03	51.50	97.0	0.75	10.68	136.7	0.40	4.58
156.25~312.5	194.1	0.53	7.64	181.9	2.03	37.74	287.5	1.10	20.97
312.5~625	427.2	0.86	14.36	354.0	1.21	16.90	349.7	1.48	50.22
625~1 250	1 192.6	0.68	4.07	886.8	0.17	0.22	898.4	0.26	0.67
1 250~2 500	1 351.9	0.24	0.65	1 403.8	0.25	0.16	1 270.8	0.11	0.11
2 500~5 000	3 854.4	0.06	0.03	3 111.6	0.07	0.01	3 169.6	0.03	0.01

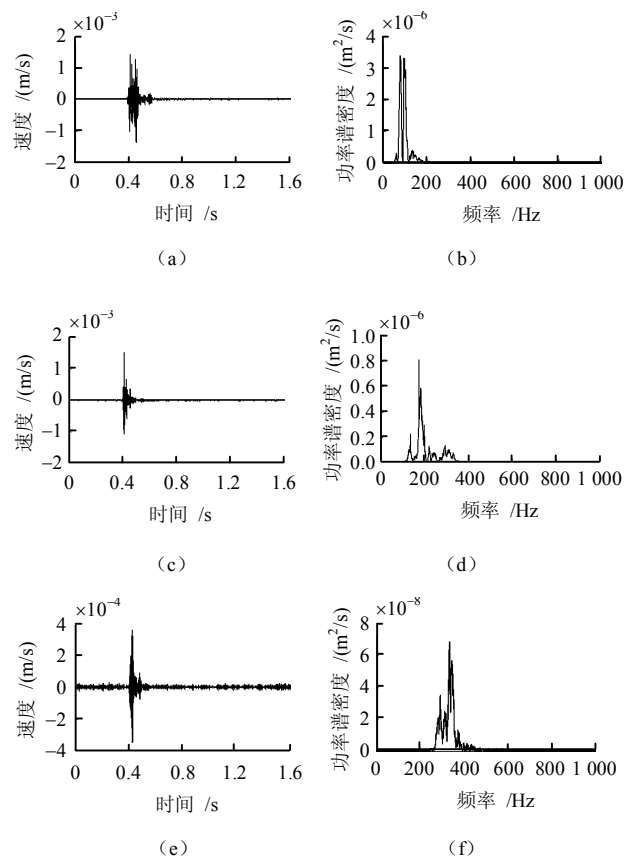


图 4 中区测点 33 垂直方向尺度 6、5、4 上
高频重构信号及功率谱图

Fig.4 Figures of reconstructed singals and power spectra
in high frequency in the vertical dimensions of
6, 5, 4 of piont 33 in medium zone

表 3 近区测点 3 三方向上各频带的主频、峰值速度
及能量比例表

Table 3 Table of dominant frequency, peak velocity and
the ratio of energy of each frequency range in three
directions of piont 3 in near zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	1.8	0.01	0.11	1.8	0.03	3.94	1.8	0.05	9.53
2.441 5~ 4.882 9	4.3	0.00	0.02	3.1	0.00	0.00	3.7	0.01	0.11
4.882 9~ 9.765 7	6.7	0.01	0.03	6.1	0.00	0.00	6.1	0.03	0.21
9.765 7~ 19.531 3	11.0	0.02	0.06	15.3	0.01	0.01	12.8	0.03	0.19
19.531 3~ 39.062 5	26.9	0.05	0.19	30.5	0.08	0.27	28.1	0.04	0.18
39.062 5~ 78.125	74.5	0.26	2.96	68.4	0.09	0.19	72.0	0.30	3.01
78.125~56.25	122.7	1.94	68.74	151.4	1.49	24.69	149.5	0.30	1.61
156.25~312.5	164.2	1.29	19.24	199.0	2.88	65.88	305.8	1.79	63.83
312.5~625	396.7	0.82	7.47	314.3	0.74	4.66	331.4	0.99	20.84
625~1 250	1 119.4	0.46	0.94	966.8	0.19	0.12	904.5	0.21	0.44
1 250~2 500	1 305.5	0.19	0.24	1 301.3	0.30	0.24	1 361.7	0.09	0.05
2 500~5 000	2 774.0	0.03	0.01	3 050.5	0.02	0.00	2 774.0	0.03	0.00

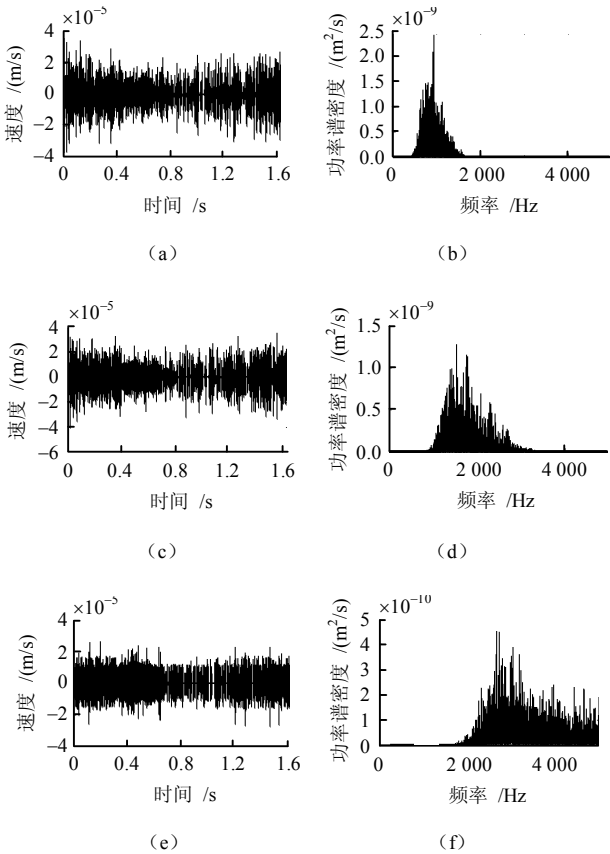


图 5 中区测点 33 垂直方向尺度 3、2、1 上
高频重构信号及功率谱图

Fig.5 Figures of reconstructed singals and power spectra
in high frequency in the vertical dimensions of
3, 2, 1 of piont 33 in medium zone

表 4 中区测点 33 三方向上各频带的主频、峰值速度
及能量比例表

Table 4 Table of dominant frequency, peak velocity and
the ratio of energy of each frequency range in three
directions of piont 33 in medium zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	0.6	0.01	0.24	0.6	0.03	8.47	0.6	0.04	35.04
2.441 5~ 4.882 9	3.7	0.00	0.00	2.4	0.00	0.00	3.1	0.00	0.00
4.882 9~ 9.765 7	8.5	0.01	0.04	8.5	0.00	0.00	9.2	0.00	0.01
9.765 7~ 19.531 3	17.1	0.02	0.20	15.3	0.02	0.08	16.5	0.01	0.08
19.531 3~ 39.062 5	29.9	0.18	5.15	29.9	0.27	7.99	28.7	0.13	4.87
39.062 5~ 78.125	59.2	0.71	82.73	41.5	0.98	74.36	45.8	0.67	55.23
78.125~56.25	83.0	0.27	10.03	95.8	0.36	8.64	78.1	0.14	3.77
156.25~312.5	180.7	0.18	1.58	169.7	0.11	0.41	175.8	0.15	0.87
312.5~625	323.5	0.03	0.03	334.5	0.04	0.04	334.5	0.04	0.11
625~1 250	1 017.5	0.00	0.00	925.9	0.00	0.00	935.7	0.00	0.01
1 250~2 500	1 522.2	0.00	0.00	1 534.4	0.00	0.00	1 542.4	0.00	0.01
2 500~5 000	2 974.2	0.00	0.00	2 746.6	0.00	0.00	2 674.6	0.00	0.00

表 5 中区测点 45 三方向上各频带的主频、峰值速度及能量比例表

Table 5 Table of dominant frequency, peak velocity and the ratio of energy of each frequency range in three directions of piont 45 in medium zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	1.8	0.00	0.63	0.6	0.01	13.19	0.6	0.00	0.25
2.441 5~ 4.882 9	4.3	0.00	0.01	3.7	0.00	0.00	4.3	0.00	0.00
4.882 9~ 9.765 7	8.5	0.01	0.13	9.2	0.00	0.01	7.3	0.00	0.00
9.765 7~ 19.531 3	14.6	0.02	0.38	17.1	0.01	0.52	15.3	0.02	0.28
19.531 3~ 39.062 5	33.6	0.23	26.20	32.3	0.09	10.50	38.5	0.21	16.31
39.062 5~ 78.125	52.5	0.46	56.88	51.3	0.19	57.23	50.7	0.59	80.63
78.125~56.25	98.3	0.28	15.20	95.2	0.17	17.42	109.9	0.14	2.33
156.25~312.5	177.0	0.05	0.56	191.7	0.05	1.05	177.6	0.03	0.16
312.5~625	370.5	0.01	0.01	366.2	0.01	0.04	332.6	0.01	0.02
625~1 250	809.9	0.00	0.00	903.3	0.00	0.01	748.3	0.00	0.00
1 250~2 500	1 720.0	0.00	0.00	2 150.9	0.00	0.01	2 150.9	0.00	0.00
2 500~5 000	3 265.4	0.00	0.00	2 849.1	0.00	0.01	2 849.1	0.00	0.00

表 6 远区测点 99 三方向上各频带的主频、峰值速度及能量比例表

Table 6 Table of dominant frequency, peak velocity and the ratio of energy of each frequency range in three directions of piont 99 in far zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	0.6	0.00	0.22	0.6	0.01	9.52	2.4	0.01	28.16
2.441 5~ 4.882 9	3.7	0.00	0.00	3.1	0.00	0.00	3.1	0.00	0.01
4.882 9~ 9.765 7	6.1	0.00	0.04	7.9	0.00	0.15	7.3	0.00	0.06
9.765 7~ 19.531 3	17.7	0.02	7.48	17.1	0.05	20.97	16.5	0.04	20.33
19.531 3~ 39.062 5	26.9	0.05	58.27	28.1	0.15	64.30	23.2	0.04	19.69
39.062 5~ 78.125	49.4	0.06	31.98	43.3	0.04	3.66	43.3	0.06	28.07
78.125~56.25	96.4	0.01	1.79	92.8	0.03	1.37	97.7	0.04	3.62
156.25~312.5	163.6	0.01	0.17	181.9	0.00	0.02	197.8	0.00	0.04
312.5~625	411.4	0.00	0.01	434.0	0.00	0.00	363.8	0.00	0.01
625~1 250	836.8	0.00	0.01	849.0	0.00	0.00	741.0	0.00	0.01
1 250~2 500	1 696.2	0.00	0.01	1 654.7	0.00	0.00	1 732.8	0.00	0.01
2 500~5 000	3 267.2	0.00	0.01	3 267.2	0.00	0.00	3 267.2	0.00	0.00

4 结 论

通过研究以上对爆破震动近、中、远区各测点信号的小波分析结果,可得出以下结论:

表 7 远区测点 109 三方向上各频带的主频、峰值速度及能量比例表

Table 7 Table of dominant frequency, peak velocity and the ratio of energy of each frequency range in three directions of piont 109 in far zone

频段 /Hz	垂直方向			水平径向			水平切向		
	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%	主频 /Hz	峰值 速度 /(cm/s)	能量 比例 /%
0~2.441 5	0.6	0.00	0.22	0.6	0.00	2.74	2.4	0.00	0.11
2.441 5~ 4.882 9	3.7	0.00	0.00	4.3	0.00	0.00	4.9	0.00	0.01
4.882 9~ 9.765 7	9.2	0.00	0.04	7.9	0.00	0.17	8.5	0.00	0.13
9.765 7~ 19.531 3	15.3	0.01	1.83	19.5	0.04	8.31	15.9	0.11	59.97
19.531 3~ 39.062 5	28.1	0.09	71.83	28.1	0.15	79.08	20.8	0.08	20.75
39.062 5~ 78.125	50.0	0.06	24.32	50.0	0.08	8.79	45.8	0.09	18.22
78.125~56.25	79.3	0.01	1.70	87.9	0.02	0.89	95.2	0.02	0.79
156.25~312.5	184.3	0.00	0.05	187.4	0.00	0.02	160.5	0.00	0.01
312.5~625	403.4	0.00	0.00	335.7	0.00	0.00	431.5	0.00	0.00
625~1 250	1 005.9	0.00	0.00	896.0	0.00	0.00	813.6	0.00	0.00
1 250~2 500	2 015.4	0.00	0.00	2 015.4	0.00	0.00	2 015.4	0.00	0.00
2 500~5 000	2 984.6	0.00	0.00	2 984.6	0.00	0.00	2 984.6	0.00	0.00

(1) 爆破震动各分区的主频从大到小排序为:近区>中区>远区。

(2) 随着比例距离的增加,低频带能量所占信号总能量的比例升高,高频带能量所占比例下降。当比例距离增大到一定值时,78.125 Hz 以后的频带所占能量完全可以忽略不计。

(3) 抛去高频带噪声的干扰,频率越低的频带信号,持续时间越长。故分析建筑物的爆破地震作用下的结构响应时,除峰值速度和主频外,爆破震动持续时间也是一个重要的评判参数。

(4) 除主频所在频带外,在 0~2.441 5 Hz 频段(比较接近建筑物的自振频率),爆破震动信号在水平方向(水平径向和水平切向)占有不小的能量比例,故建筑物进行结构设计时水平方向的抗震尤为重要。

参 考 文 献

- [1] CHUI C K. An introduction to wavelets[M]. New York: Academic Press, 1992: 297—333.
- [2] 胡昌华,张军波. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2000: 265—266.
- [3] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 12—20.