

文章编号:1674-599X(2022)03-0079-07

基于小波变换时能密度法的爆破振动信号分析

范明浩¹,何文超²,凌同华²,刘贤俊²

(1. 浙江八咏公路工程有限公司,浙江 金华 321000; 2. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:当前,爆破振动信号分析以时频分析为主,尚未从能量的角度对信号进行研究。本研究基于小波变换时能密度法对爆破振动信号进行分析。先利用 Mallat 算法对信号的局部信息进行小波分解,再根据时能密度曲线得到各时刻的能量大小,然后统计各频带信号的能量密度随时间变化的数据,最后采用该方法对里岩垅坑2号双洞隧道的5组爆破振动信号进行了分析。研究结果表明:距离爆心越近,爆破释放的能量就越强。其中,小波分解频带为d2、d3区间的能量占爆破总能量的93.33%;最大能量比率的小波分解频带为d2,其对应的振速与频率均符合爆破安全规程的规定。该方法为爆破振动安全评估提供了新途径,也可为爆破振动机理的研究提供借鉴。

关键词:隧道工程;爆破振动信号;小波变换时能密度法;爆破安全评估

中图分类号:TD235.1

文献标志码:A

Analysis of blasting vibration characteristic signal based on time-energy density analysis of wavelet transform

FAN Minghao¹, HE Wenchao², LING Tonghua², LIU Xianjun²

(1. Zhejiang Bayong Highway Engineering Co., Ltd., Jinhua 321000, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The current research of blasting vibration signal is mainly focused on the time-frequency analysis, but not from the perspective of energy. In this paper, the blasting vibration signal was analyzed based on the time-energy density method of wavelet transform. Firstly, the Mallat algorithm was used to decompose the local information of the signal with wavelet, and then the energy of each moment was obtained according to the time-energy density curve. The time-varying of energy density of signal in each frequency band was counted. Finally, five groups of blasting vibration signals of the No.2 double-hole tunnel in the Liyanlongkeng were analyzed using the method. The results show that the closer the distance to the blasting center, the stronger the blasting energy is released. The energy coefficient ratio of wavelet decomposition frequency band d2 and d3 accounts for 93.33%. The maximum energy ratio of wavelet decomposition frequency band is d2, and the corresponding vibration velocity and frequency are utilized to judge with the blasting safety regulation. This method provides a new way for blasting vibration safety assessment from the perspective of energy, and that also has a theoretical guiding significance for the study of blasting vibration mechanism.

Key words: tunnel engineering; blasting vibration signal; time-energy density analysis of wavelet transform method; blasting safety assessment

目前,山岭隧道爆破施工主要以钻爆法为主。施工过程中,爆破产生的振动对隧道既有衬砌结构及围岩的稳定性会造成影响^[1-2]。因此,爆破振动信

号的处理与分析既是主动控制爆破振动危害的前提与基础,也是评估爆破振动安全性的有效途径^[3-4]。国内外对爆破振动信号的研究主要采用频

收稿日期:2021-03-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52078061);湖南省研究生科学创新项目(CX20200842)

作者简介:范明浩(1987—),男,浙江八咏公路工程有限公司高级工程师。

谱分析方法,如最常用的快速傅里叶变换方法,其通过将信号从时域转换到频域,识别信号主振频率的分布情况。但该方法只适用于分析平稳信号,对爆破工程中非平稳信号的分析效果欠佳,且无法对主振频率区间内的时间与能量密度分布情况进行统计。近年来,许多学者对隧道爆破振动信号进行了研究。管晓明等人^[5]研究了隧道爆破振动造成建筑结构损伤的问题,阐述了如何利用爆破振动信号得到结构振动反应特征的方法。傅洪贤等人^[6]研究了隧道爆破近区爆破振动的特征及规律。贾磊等人^[7]利用爆破振动特征信号,对邻近隧道衬砌安全进行了数值模拟分析。这些研究虽然对隧道爆破安全及设计具有工程指导意义,但研究的对象仍是爆破振动信号的频率及振幅。

随着数字信号分析领域理论与方法的更新迭代,小波分析常应用于分析爆破振动信号。付晓强等人^[8-10]利用小波分析理论,研究了爆破振动信号的能量密度分布,为爆破工程提供了技术指导。实践表明:小波分析的理论及方法能较好地处理爆破振动这类非平稳随机信号。该方法在提取信号的高、低频分量时,具有良好的时域、频域分辨率,是一种能将时域-频域结合的信号分析方法,已被广

泛应用于其他工程领域^[11-14]。因此,本研究依据小波分析理论,拟将小波变换时能密度法用于识别爆破振动信号的能量突变特征,对爆破振动信号的时能密度曲线的最大能量比率进行统计分析,并将该方法应用于里岩垄坑2号隧道爆破的安全分析。

1 工程概况

里岩垄坑2号隧道位于浙江省金华市,隧道全长为864.0 m,设计净宽为16.8 m,净高为10.6 m,其中最大埋深约为180.0 m。该隧道基岩为白垩系下统茶湾组凝灰岩,局部夹凝灰质砂岩,具有层状构造,以青灰色、灰紫色为主,局部层间有火山碎屑软弱夹层。洞室位于中微风化凝灰岩中,岩芯以柱状为主,岩质新鲜,较坚硬,完整性较好。围岩呈块状体结构,以Ⅲ级围岩为主。采用上、下台阶法对其进行爆破,选取典型断面进行爆破振动监测。针对隧道的上台阶爆破进行振动监测(下台阶炸药量相对较少,可忽略不计)。由于Ⅲ级围岩的岩石较完整,考虑施工速度等因素,增加爆破开挖量,采用直孔楔形掏槽,每个循环进尺控制在3~4 m,隧道施工现场炮眼布置如图1所示。

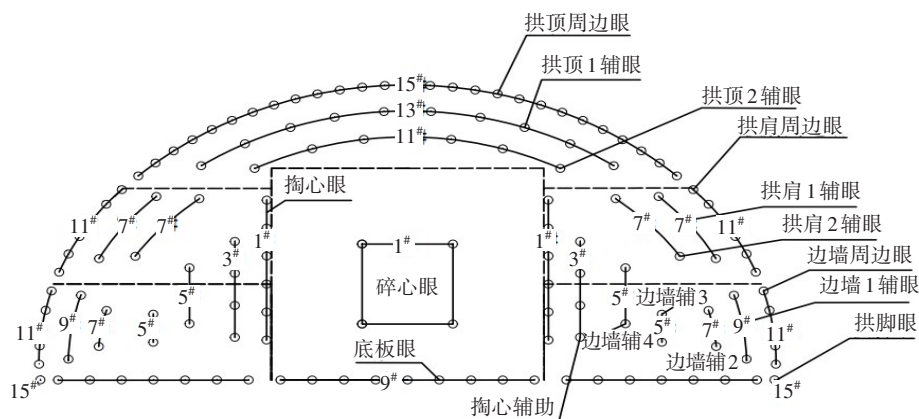


图1 Ⅲ级围岩炮眼布置

Fig.1 Blast hole arrangement of the level surrounding rock

爆破监测设备采用 Minimate Blaste TM 型爆破测振仪,仪器由现场采集记录仪、三向矢量传感器和分析处理软件组成。隧道爆破掘进采用2号岩石乳化炸药,药卷直径为32 mm,雷管采用毫秒导爆管雷管1~15段。隧道循环进度为3 m,最大单响药量为59.1 kg,掘进炸药与雷管的具体用量见表1。

2 爆破测点的布置与信号采集

为获取真实有效的爆破振动信号,①要保证爆破测振仪的正确安装,测点布置要兼顾安全性与有效性;②三向矢量传感器需布置在基岩上且监测方向指向爆源。因此,在距爆源40~70 m的基岩处设置测

点,每次爆破可同时在先行洞与后行洞进行布点,每组仪器的2个传感器相隔10 m,测点布置如图2所示。

表1 爆破钻孔参数表

Table 1 Blasting borehole parameters

部位	炮孔类别	炮数/个	单孔药量/kg	总药量/kg
拱顶	周边眼	27	0.6	16.2
	辅眼1	10	1.2	12.0
	辅眼2	6	1.5	9.0
两侧拱肩	周边眼	12	0.9	10.8
	辅眼1	6	1.2	7.2
	辅眼2	6	1.5	9.0
两侧边墙	周边眼	10	1.2	12.0
	辅眼1	6	1.8	10.8
	辅眼2	4	2.1	8.4
	辅眼3	4	2.1	8.4
	辅眼4	6	2.1	12.6
	主掏槽	12	3.3	39.6
掏槽	掏槽眼	8	2.7	21.6
	碎心眼	4	0.9	3.6
底板眼	底板眼	23	2.1	48.3
	拱脚眼	2	2.4	4.8
合计		146	27.6	234.3

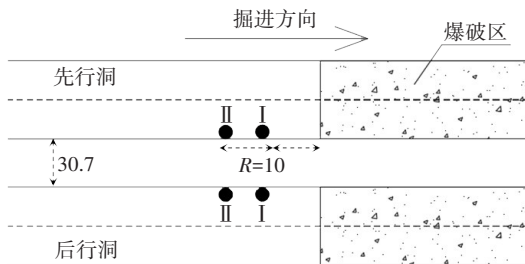


图2 测点布置示意(单位:m)

Fig. 2 Layout of the measurement point(unit: m)

为尽可能提高信号稳定性与数据完整性,共监测5组数据,每组布置2个测点,分别采集横向、纵向和径向3个方向的质点速度波形数据。其中,组号为1、3和4的监测点布置在先行洞,组号为2、5的监测点布置在后行洞,爆破振动监测数据见表2。表中 R 为爆心距; Q 为总装药量; S 为单段最大药量; V 为质点振动速度峰值。

3 基于小波变换时能密度法分析爆破振动特征信号

3.1 小波变换时能密度法原理

若有 $\psi(t) \in L^2(R) \cap L(R)$,且 $\tilde{\psi}(0) = 0$,那么函数族 $\{\psi_{a,b}(t)\}$ 可以由公式(1)得到。

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-(1/2)} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a, b \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

表2 爆破振动监测数据

Table 2 Monitoring data of blasting vibration

组号	测点	R/m	Q/g	S/kg	$V/(mm \cdot s^{-1})$		
					横向	纵向	径向
1	1	40.96	234.3	59.1	26.80	25.32	29.22
	2	70.55	234.3	59.1	10.21	9.34	11.18
2	1	71.31	234.3	59.1	14.48	12.13	18.43
	2	79.90	234.3	59.1	6.88	7.74	6.47
3	1	63.12	234.3	59.1	12.43	10.20	8.83
	2	40.96	234.3	59.1	25.37	26.55	28.34
4	1	57.00	234.3	59.1	12.74	15.23	14.22
	2	54.12	234.3	59.1	24.54	20.83	23.50
5	1	61.55	234.3	59.1	18.22	10.09	18.52
	2	65.53	234.3	59.1	19.70	20.12	20.47

式中: t 为时间; $L(R)$ 为绝对可积空间; $L^2(R)$ 为平方可积空间; $\psi_{a,b}(t)$ 为连续小波或分析小波; $\psi(t)$ 为小波基或母小波; $\tilde{\psi}(\omega)$ 是 $\tilde{\psi}(t)$ 的傅里叶变换形式; a 、 b 分别为尺度因子、时间因子^[15]。假设一个函数 $f(t) \in L^2(R)$ 是有限能量,则函数 $f(t)$ 的连续小波变换可定义为:

$$W_f(a, b) = [f(t), \psi_{a,b}(t)] \\ = |a|^{-(1/2)} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式(2)表示小波变换是等距的,由于 $f(t)$ 的小波变换能量是守恒的,故可以得到:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \iint_{RR} |W_f(a, b)|^2 \frac{da db}{a^2} \quad (3)$$

其中, $C_\psi = \int \frac{|\tilde{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 为容许条件。从小波的等距特征可以得到:

$$[f(t), f(t)] = \int_R |f(t)|^2 dt \\ = \frac{1}{C_\psi} \int_R a^{-2} da \int_R |W_f(a, b)|^2 db \quad (4)$$

由海森堡的测不准原理^[16]可知,不能将 $|W_f(a, b)|^2 / C_\psi a^2$ 看作瞬时密度,但是可以看作时间尺度平面上的能量密度函数,即 $|W_f(a, b)|^2 / C_\psi a^2$ 可以看作以尺度间隔 Δa 和时间间隔 Δb 为中心的能量。根据能量密度分布的概念,可以将公式(4)改写成:

$$\int_R |f(t)|^2 da = \int_R E(b) db \quad (5)$$

$$E(b) = \frac{1}{C_\psi} \int_0^{+\infty} \frac{|W_f(s, b)|^2}{s^2} ds \quad (6)$$

式中: s 为某种情况下信号的频率; b 为信号的能量随时间变化的所有频带; $E(b)$ 为时能密度函数。

3.2 爆破振动信号采集结果

运用三向矢量传感器,采集横向、垂向和径向的爆破振动信号,通过仪器主机对采集的信号进行存储与分析,计算出该次爆破振动的波速(以下称振速)与振幅,再采用专业软件分析所得数据,得到其在三个方向上的振速与振幅的规律。本研究以第1组测

点1的数据作为分析对象,其爆破振动原始信号如图3所示。

从图3可以看出,原始爆破振动信号在三个方向上振速与振幅的大致范围。如三个方向上的振速随时间变化的有效范围为0~3 s,振幅随频率变化的范围为0~512 Hz。但无法知道在某一具体频带上能量的变化情况及对应的振幅和时间。因此,可从爆破振动所释放的能量分析爆破振动特征信号的变化。

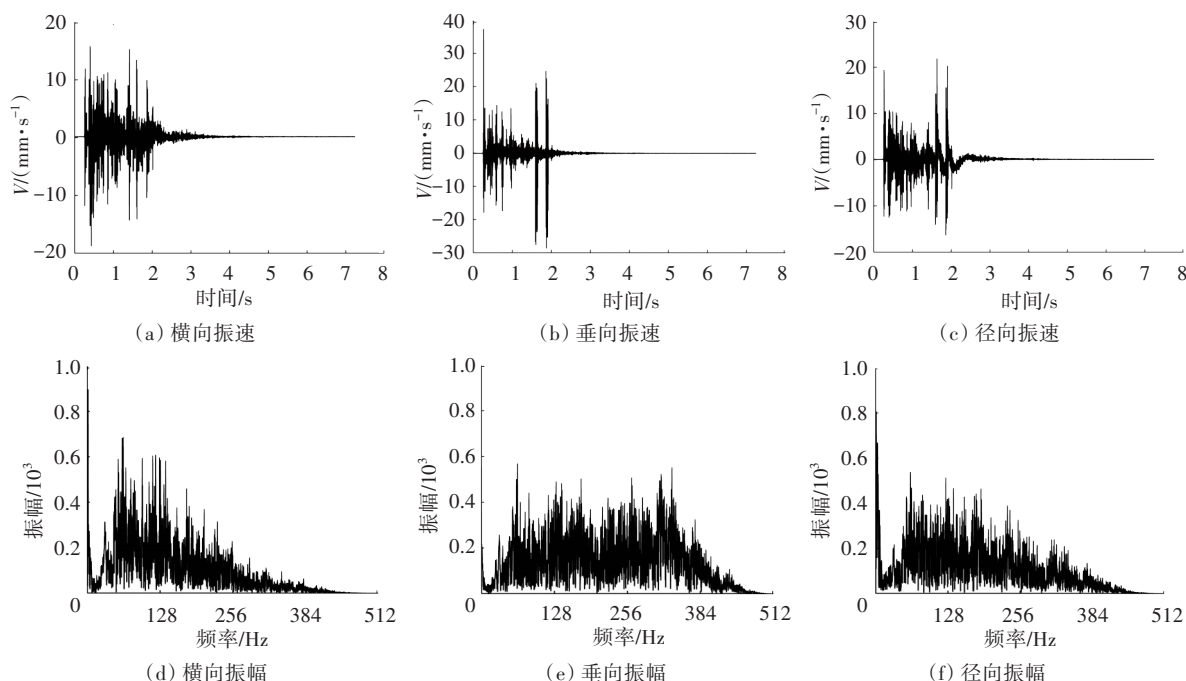
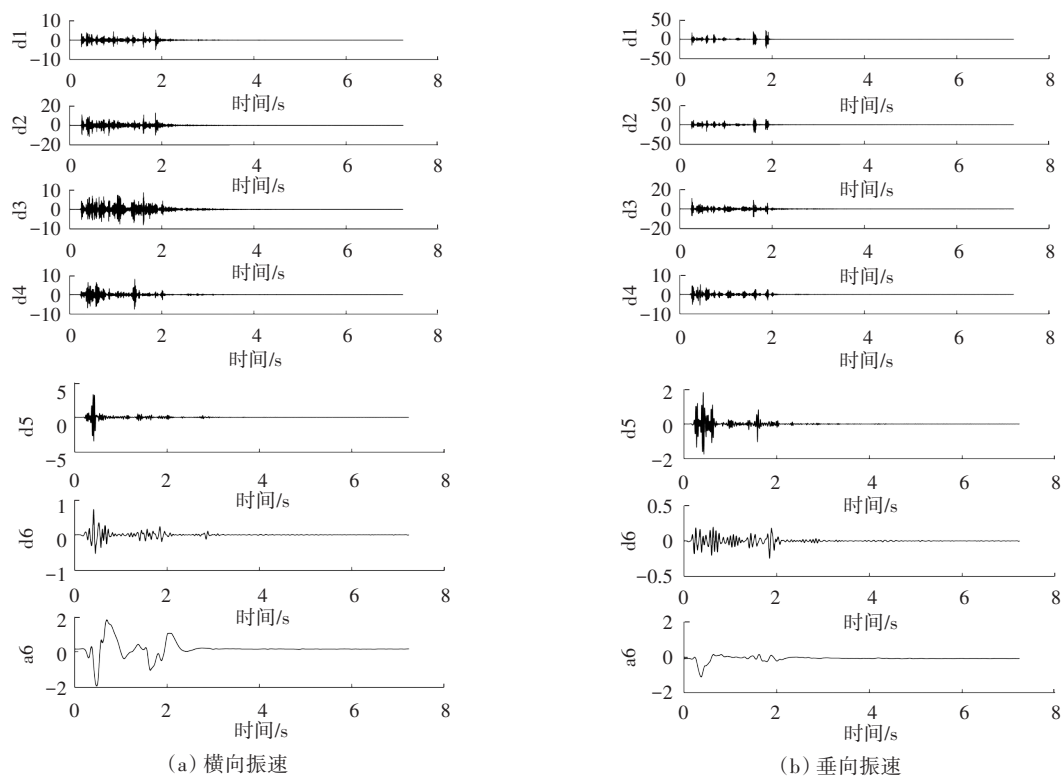


图3 爆破振动原始信号(测点1)

Fig.3 Original signal of blasting vibration (the measuring point 1)



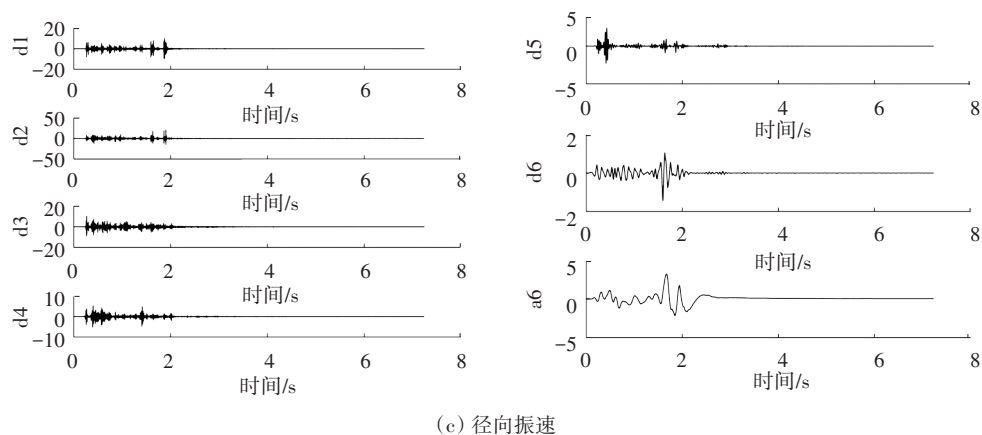


图4 爆破振动信号三矢量方向上的小波分解

Fig.4 Wavelet decomposition of blasting vibration signal in three vector direction

3.3 小波变换时能密度法分析特征信号

根据 Mallat 分解算法,每一尺度的小波分解结果都将其与构造的低通滤波器进行卷积计算,因此,信号被分解为不同的频率成分。这表明:基于 Mallat 算法的小波分析方法对信号的局部时频分析是通过把信号分解成不同范围内的时域信号分量来实现的。反映了低频的局部信息表现在分解尺度较高的分解分量中,反映了高频的局部信息表现在分解尺度较低的分解分量中。本研究采用的小波基函数为 Daubechies (Db),选定的小波分解尺度为 6,计算各个小波分解尺度上信号分量的能谱系数值。以测点 1 的爆破振动信号的三矢量方向分析数据为例,分解结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出,三矢量方向上的信号共被分解为 6 个有效子频带信号,随着分解层数增多,子信号的振速细节逐渐凸显,爆破振动特征信号随之显现。以横向方向上的 d3 频带信号分析为例,从子频带中提取 d3 为能量密度分析对象,在小波基库中选取与该子频带信号相匹配的 Db4 作为小波变换时能密度法的小波基,编写基于小波变换时能密度法的 MATLAB 算法,分析结果如图 5 所示。该爆破振动信号的频率和振幅随时间的变化情况如图 6 所示。

从图 5 中测点 1 在横向上爆破振动信号的最大释放能量和时间尺度上对应的能量值可以看出,爆破振动信号在某一时刻的能量释放情况。从图 6 可以看出该信号在最高能量释放时所对应的频率与振幅,据此可以统计在该方向上各小波分解子带

的能量谱值系数以及对应的频率范围。测点 1 的三方向矢量上的小波能量谱值系数对应的频率如图 7 所示。同理,根据该计算流程,可以得到 5 组数据在其他测点各方向上的最大能量比率所对应分解层的频率范围,数据统计见表 3。

表 3 最大能量比率对应频率范围

Table 3 Frequency range of the maximum energy ratio

组号	测点	最大能量比率对应分解层		
		横向	垂向	径向
1	I	d3	d1	d2
	II	d3	d3	d2
2	I	d3	d1	d3
	II	d3	d2	d2
3	I	d2	d2	d2
	II	d2	d2	d2
4	I	d2	d2	d3
	II	d2	d2	d2
5	I	d2	d2	d2
	II	d2	d2	d2

由表 3 可知,5 组数据中小波频带为 d2、d3 的能量系数比率的总占比为 93.33%,该子频带所对应的频率范围为 64~256 Hz。依据国家爆破标准《爆破安全规程》(GB6722—2014),交通隧道爆破振动频率大于 50 Hz 时,其安全允许振动速度为 150~200 mm/s。由表 2 可知,仪器监测的最大爆破振动速度出现在组号 1、测点 1 的垂向方向,该方向上最大能量比率对应的分解层为 d2,相应的频率范围为 128~256 Hz,对应的最大振速为 29.22 mm/s,远小于《爆破安全规程》(GB6722—2014)规定的安全允许振动速度,因此里岩堑坑 2 号的隧道爆破符合安全规范要求。

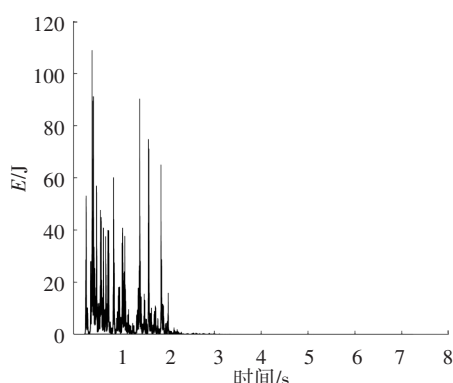


图5 小波时能密度分布曲线(d6频带)

Fig.5 Distribution curve of wavelet time-energy density (d6 band)

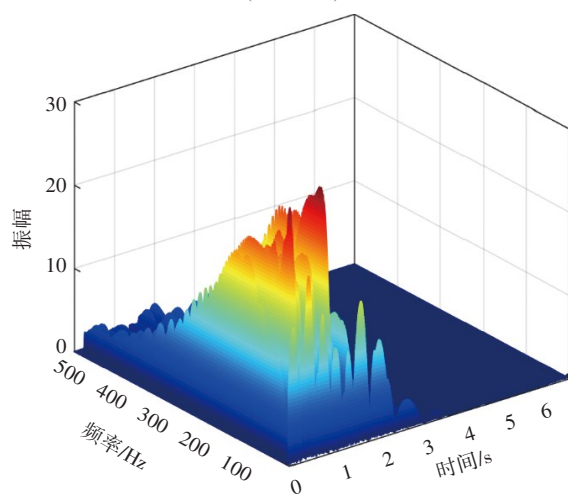


图6 小波分解的三维时频分布

Fig.6 Three-dimensional time-frequency distribution of wavelet decomposition

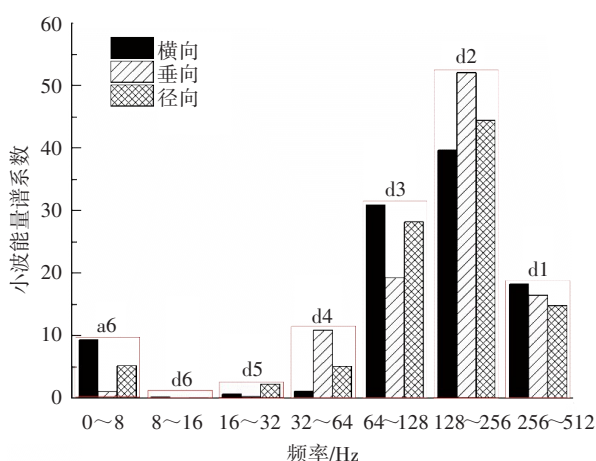


图7 小波能量谱系数(测点1)

Fig.7 Coefficient of wavelet energy spectrum (measuring point 1)

4 结论

本研究基于小波变换时能密度法,对爆破振动

信号进行了能量密度分析,并结合双洞隧道爆破工程实例,得出结论:

1) 通过监测里岩垄坑2号隧道爆破工程,得到10个测点的5组爆破振动信号数据。经过分析发现,三矢量方向上的振速与振幅随时间变化情况无法有效表示爆破振动特征信号,因此,需要对信号在不同频段上作进一步地子带分解。

2) 基于Mallat理论的小波分解方法,通过信号分解成不同范围内的时域信号分量,选取适合爆破振动信号的匹配小波基,调用小波变换时能密度法程序分析爆破振动信号,统计信号在不同频率段的最大能量比率。本研究从最大能量比率对应的分解层频率范围得到,里岩垄坑2号双洞隧道的爆破振速与频率都符合国家爆破安全规程的要求。

3) 小波变换时能密度法具有能分析非平稳信号与突出特征信号的优势。本研究通过对爆破信号进行小波分解与能量密度分布统计,掌握了隧道衬砌结构与爆破振动之间的关系,为评估爆破振动安全提供了技术指导。

参考文献(References):

- [1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展40年[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 537-544. (YAN Jinxiu. Achievements and challenges of tunneling technology in China over past 40 years [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 537-544. (in Chinese))
- [2] 李兴华, 龙源, 纪冲, 等. 爆破地震波作用下既有圆形隧道衬砌动应力集中系数分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2218-2224. (LI Xinghua, LONG Yuan, JI Chong, et al. Analysis of dynamic stress concentration factor for existing circular tunnel lining under blasting seismic wave [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2218-2224. (in Chinese))
- [3] TANG H X, LONG S G, LI T. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis [J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116762.
- [4] 王路, 张庆彬. 邻近双洞隧道衬砌结构的爆破动力响应规律分析[J]. 公路与汽运, 2018(1): 169-173, 182. (WANG Lu, ZHANG Qingbin. Analysis of blasting dynamic response law of lining structure of adjacent double-tunnel [J]. Highways & Automotive Applications, 2018(1): 169-173, 182. (in Chinese))
- [5] 管晓明, 聂庆科, 李华伟, 等. 隧道爆破振动下既有建筑结构动力响应及损伤研究综述[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 151-158. (GUAN Xiaoming, NIE Qingke, LI Huawei, et al. Research overview on

- dynamic response and damage of existing structure under tunnel blasting vibration [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 151-158. (in Chinese))
- [6] 傅洪贤,赵勇,谢晋水,等. 隧道爆破近区爆破振动测试研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011, 30(2): 335-340. (FU Hongxian, ZHAO Yong, XIE Jinshui, et al. Study of blasting vibration test of area near tunnel blasting source [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 335-340. (in Chinese))
- [7] 贾磊,解咏平,李慎奎. 爆破振动对邻近隧道衬砌安全的数值模拟分析[J]. 振动与冲击,2015, 34(11): 173-177, 211. (JIA Lei, XIE Yongping, LI Shenkui. Numerical simulation for impact of blasting vibration on near by tunnel lining safety [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(11): 173-177, 211. (in Chinese))
- [8] 付晓强,刘纪峰,崔秀琴,等. 基于TQWT能量选择算法隧道爆破信号特征提取分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020, 17(2): 405-412. (FU Xiaoqiang, LIU Jifeng, CUI Xiuqin, et al. Extraction and analysis of tunnel blasting signal characteristics based on TQWT energy selection algorithms [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(2): 405-412. (in Chinese))
- [9] 凌同华,李夕兵. 基于小波变换的时-能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J]. 岩石力学与工程学报,2004, 23(13): 2266-2270. (LING Tonghua, LI Xibing. Time-energy analysis based on wavelet transform for identifying real delay time in millisecond blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2266-2270. (in Chinese))
- [10] 费鸿禄,曾翔宇,杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析[J]. 爆炸与冲击,2017, 37(1): 77-83. (FEI Honglu, ZENG Xiangyu, YANG Zhiguang. Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's surface based on wavelet packet analysis [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(1): 77-83. (in Chinese))
- [11] WANG C, YANG R X, YU Q Q. Wavelet transform based energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles considering temperature uncertainty [J]. Applied Energy, 2019, 256: 113928.
- [12] 刘唐利,凌同华,陈增辉,等. 爆破振动对既有隧道影响的数值模拟分析[J]. 交通科学与工程,2019, 35(3): 79-84. (LIU Tangli, LING Tonghua, CHEN Zenghui, et al. Numerical analysis of the effect of blasting vibration on existing tunnels [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(3): 79-84. (in Chinese))
- [13] 凌同华,曹峰,张胜,等. 分岔隧道过渡段的爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击,2018, 37(2): 43-50. (LING Tonghua, CAO Feng, ZHANG Sheng, et al. Blast vibration characteristics of transition segment of a branch tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 43-50. (in Chinese))
- [14] 张胜,何文超,黎永索,等. 基于小波变换时能密度法的隧道空洞充填物识别[J]. 煤炭学报,2019, 44(11): 3504-3514. (ZHANG Sheng, HE Wenchao, LI Yongsuo, et al. Identification of tunnel cavity fillings by time-energy density analysis based on wavelet transform [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3504-3514. (in Chinese))
- [15] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社,1998. (ZHANG Xianda, BAO Zheng. Nonstationary signal analysis and processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese))
- [16] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社,1999. (YANG Fusheng. Engineering analysis and application of wavelet transform [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese))
- (责任编辑:李脉;校对:罗容 欧兆虎;英文编辑:陈璐)