

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.06.009

地铁隧道爆破振动测试及时频特征分析*

谢全民^① 黄小武^② 赵东华^① 年鑫喆^③
①陆军工程大学军械士官学校(湖北武汉,430075)
②武汉科技大学理学院(湖北武汉,430065)
③陕西中爆检测检验有限责任公司(陕西西安,710065)

[摘 要] 为确保某市地铁隧道安全、高效地爆破开挖,采用网络测振仪测试了隧道掘进爆破时周边建(构)筑物的爆破振速。基于频率切片小波变换开展时频特征分析,首先得到了测振信号的全频带时频分布特征,进而通过5个主成分频率切片区间更进一步精确提取了爆破振动信号时域、频域分布特征,并得到了相应频带内的爆破振动重构分量。实测数据时频特征分析表明,频率切片小波变换具备独特的信号分析优势,适用于地铁爆破振动信号时频特征提取;此次地铁隧道钻爆法开挖产生的质点峰值振速在0.07~0.85 cm/s之间,主频在13.3~68.9 Hz之间,爆破振速处于《爆破安全规程》规定的安全阈值范围内,爆破方案基本合理。

[关键词] 地铁隧道;爆破振动;时频特征;频率切片小波

[分类号] TD235.1

Analysis of Time-Frequency Characteristics in Blasting Vibration Test of Subway Tunnel

XIE Quanmin^①, HUANG Xiaowu^②, ZHAO Donghua^①, NIAN Xinzhe^③
①Ordnance NCO Academy, Army Engineering University (Hubei Wuhan, 430075)
②College of Science, Wuhan University of Science and Technology (Hubei Wuhan, 430065)
③Shaanxi China Blasting Inspection Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] To ensure safe and efficient blasting excavation of subway tunnel in a city, vibration velocity of surrounding buildings (structures) during tunnel excavation blasting was measured by network vibration meter. Time-frequency characteristic analysis based on frequency slice wavelet transform was carried out to obtain distribution characteristics of vibration signal for the whole band. Then, the time-domain and frequency-domain distribution characteristics of the blasting vibration signal were further accurately extracted through the main component frequency slice interval, and the reconstruction components of the blasting vibration in the corresponding frequency band were obtained. Time-frequency characteristic analysis of the measured data shows that the frequency slice wavelet transform has unique signal analysis advantages and is suitable for the extraction of the time-frequency characteristic of the blasting vibration signal of the subway. The particles produced by drilling and blasting excavation of subway tunnel are featured by a peak vibration velocity within the range of 0.07-0.85 cm/s, a main frequency among 13.3-68.9 Hz, and a blasting vibration in conformance to the safety threshold specified in *Blasting Safety Regulations*. The blasting scheme is basically reasonable.

[KEYWORDS] subway tunnel; blasting vibration; time-frequency characteristics; frequency slice wavelet

引言

近年来,随着我国城市规模逐步扩大,城市交通运输矛盾日益突出。因具有载客量大、运速快、节省

地面空间、减少噪音等优点,地铁、轻轨已逐渐发展成为现代化城市立体交通构架的重要组成部分^[1-2]。采用钻爆法开挖地铁隧道时,经常会面临新建隧道爆破施工对临近建(构)筑物结构安全影响的难题^[3-5]。如何控制爆破开挖产生的爆破振动危害

* 收稿日期:2020-05-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808554);湖北省重点研发计划项目(2020BCA084);国铁集团科技研究开发计划项目(K2019G056)
第一作者:谢全民(1983-),男,博士,讲师,主要从事爆破理论及爆破安全方面的科研工作。E-mail:xqmblast@163.com

效应对邻近建(构)筑物结构的影响,确保既有结构安全的同时保障在建隧道的高效施工,是地铁建设部门、施工单位、行政主管部门等多方共同面临的重大技术难题^[6-8]。为确保爆破施工安全,GB 6722—2014《爆破安全规程》^[9]中明确要求 D 级以上的爆破工程均需进行爆破振动监测。近年来,数字爆破测振技术在工程爆破领域得到了越来越广泛的应用^[2],为促进地铁隧道爆破安全管理起到了很好的促进作用。

2019 年 7 月,某市地铁五号线隧道进行钻爆法开挖,为确保爆破安全,必须采用控制爆破方法施工,并加强地铁隧道爆破危害效应的实时监测。本次监测中采用了远程网络测振仪,对地铁隧道爆破导致周边保护目标的爆破振动危害效应进行了远程智能监测。通过监测数据分析,精确提取了地铁爆破振动信号的时频局部化特征。

1 工程概况

某市地铁五号线圆通公园站至翠湖站区间,矿山法隧道右线起点里程为右 DK5 + 633. 783,终点里程为右 DK5 + 764. 896,长度为 131. 113 m;左线起点里程为左 DK5 + 633. 783,终点里程为左 DK5 + 737. 534,长 103. 751 m;隧道开挖断面宽度为7 840 mm。整个矿山段区间位于圆通山下,隧道埋深 22. 14 ~ 44. 63 m,隧道穿越的岩土层主要为中等风化白云岩。

2 测点选择与布设

爆区周边环境较为复杂。根据现场踏勘,隧道穿越范围需保护建(构)筑物主要有位于隧道正上方的野猪馆、距离左洞 15. 0 m 的水上乐园、距离右洞 15. 0 m 的羊驼馆。圆通公园内有区级文物滇西抗战阵亡纪念碑,距离隧道最近处为 52. 1 m;有市级文物三石牌坊,距离隧道最近处为 104. 8 m。隧道南侧昆明动物园外是圆通禅寺,距离爆破点最近距离 150. 0 m。隧道入口紧临鼓楼路,入口距离施工围挡 12. 0 m,鼓楼路两侧分布燃气管道、交通信号管道、电信管道等地下管线。

根据现场环境及业主单位需求,共设 6 个测点,如图 1、表 1 所示。用石膏将中爆网络测振仪(CBSD-VM-M01)^[10]粘贴在各测点的指定位置。网络测振可以通过无线路由器与专用测振电脑之间实

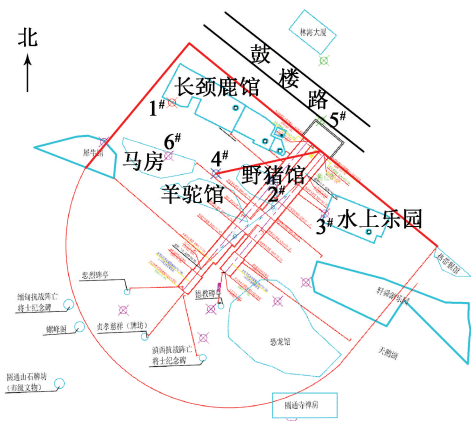


图 1 周边环境及测点位置
Fig. 1 Surrounding environment and measuring points location

表 1 爆破振动测点信息
Tab. 1 Information about blasting vibration measuring points

测点	位置	距爆区水平 距离/m	距洞顶 高程差/m	区域划分
1#	长颈鹿馆 南侧地面	95.0	20.6	动物园内
2#	野猪馆 墙根地面	18.0	26.4	动物园内
3#	水上乐园西侧 墙根地面	31.0	23.3	动物园内
4#	羊驼馆 墙根地面	48.0	31.1	动物园内
5#	鼓楼路边地面	67.0	13.0	动物园外
6#	马房墙根地面	82.0	20.5	动物园内

现互联,再通过 4G 网络与测振数据中心进行数据交换和大数据存储^[11]。

3 爆破振动测试结果及数据分析

3.1 测试结果

主要爆破参数为:孔数 50 个,孔深 150 cm,孔径 40 mm,孔距 0.8 m,排距 0.8 m,最大段药量 0.9 kg,总药量 30 kg,微差爆破。本次爆破时在周边建(构)筑物处产生的振动数据如表 2 所示。X 方向为水平径向,Y 方向为水平切向,Z 方向为垂直向。

分析表 2 可知,除去 1#、6#测点未触发,地铁隧道钻爆法开挖产生的质点峰值振速在 0. 07 ~ 0. 85 cm/s 之间,主频在 13. 3 ~ 68. 9 Hz 之间。测试数据分析表明,本次地铁隧道爆破工程产生的爆破振动危害效应均控制在 GB 6722—2014《爆破安全规程》规定的安全阈值范围内。公安主管部门、监理和业

表 2 振动信号测试结果
Tab.2 Signal test results

测点	方向	峰值振速/(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz
1 [#]	X	—	—
	Y	—	—
	Z	—	—
2 [#]	X	0.72	14.6
	Y	0.80	19.2
	Z	0.85	68.9
3 [#]	X	0.27	24.3
	Y	0.40	15.1
	Z	0.46	24.3
4 [#]	X	0.13	14.6
	Y	0.20	15.6
	Z	0.09	24.7
5 [#]	X	0.17	67.3
	Y	0.07	13.3
	Z	0.23	54.0
6 [#]	X	—	—
	Y	—	—
	Z	—	—

主可通过网络测振系统实时查阅该地铁隧道爆破单位工程项目的振动效应,实现危害效应在线实时监测,全天候工作,部分测点也可无人值守。

3.2 基于频率切片小波的爆破测振数据分析

3.2.1 频率切片小波算法

设爆破测振数据 $f(t) \in L^2(R)$, 其频率切片小波变换可按式(1)进行定义。

$$W(t,\omega,\lambda,\delta)=\frac{1}{2\pi}\lambda\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}(u)\hat{p}^*\left(\frac{u-\omega}{\delta}\right)e^{iut}du。(1)$$

式中: δ 为尺度因子, $\delta \neq 0$; λ 为能量系数, $\lambda \neq 0$; δ, λ 可为常数或 ω 和 t 的函数; $\hat{p}(u)$ 是母小波函数 $p(t)$ 的频域形式; $\hat{p}^*(\omega)$ 为 $\hat{p}(\omega)$ 的共轭函数, 小波函数 $\lambda\varphi(u-\omega)/\sigma$ 是其在频域伸缩平移的结果。通过引入 $\hat{p}^*(\cdot)$, 使传统傅里叶变换具备了时频分析的功能。

采用 Parseval 方程, 可将式(1)转换到时域:

$$W(t,\omega,\lambda,\delta)=\sigma\lambda e^{i\omega t}\int_{-\infty}^{\infty}f(\tau)p^*[\sigma(\tau-t)]d\tau。(2)$$

$\hat{p}(\omega)$ 定义为频率切片函数, 需满足以下条件:

- 1) $\hat{p}(0) \neq 0$, 或 $\hat{p}(0) = 1$;
- 2) $\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{p}(\omega)|^2 d\omega < \infty$;
- 3) $\hat{p}(\pm \infty) = 0$;
- 4) $|\hat{p}(\omega)| \leq \hat{p}(0)$, 或 $|p(t)| \leq p(0)$ 。

3.2.2 尺度因子选取

不失一般性, 令 $\lambda = 1$ 。根据 Morlet 小波变换原

理, $\delta \propto \omega$, 因此, 设尺度因子 $\delta = \omega/\kappa, \kappa > 0$, 则

$$W(t,\omega,\kappa)=\frac{1}{2\pi}\lambda\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}(u)\hat{p}^*\kappa\frac{(u-\omega)}{\omega}e^{iut}du。(3)$$

把 $\kappa(u-\omega)/\omega$ 引入频率切片函数, 其中, κ 与 ω, u 无关, 称之为时频分辨系数。则式(3)变为

$$W(t,\omega,\kappa)=\frac{1}{\kappa}\omega e^{i\omega t}\int_{-\infty}^{\infty}f(\tau)e^{i\omega\tau}p\left[\frac{\omega(\tau-t)}{\kappa}\right]d\tau。(4)$$

根据 Heisenberg 不确定性原理可知, 在时域和频域同时得到高分辨率是不可能的。对分析信号引入 2 个评价系数, 一是频率分辨率 η ^[12-14]:

$$\eta=\frac{\Delta\omega}{\omega};(5)$$

另一个是幅值期望响应比率 $v(0 < v \leq 1)$ ^[15], 通常取 $\sqrt{2}/2, 0.5, 0.025$ 等。

如果 $f(t) = e^{i\omega_0 t}$, 且其频率切片小波变换满足 $|W(t,\omega_0+\Delta\omega,\lambda,\sigma)|/|W(t,\omega_0,\lambda,\sigma)| \leq v$, 则

$$\left|\hat{p}\left(\frac{\Delta\omega}{\sigma}\right)\right|\leq v|\hat{p}(0)|。(6)$$

即

$$|\hat{p}(\kappa\eta)|\leq v|\hat{p}(0)|。(7)$$

对于脉冲函数 $f(t) = \sigma(t-t_0)$, 且其频率切片满足 $|W(t_0+\Delta t,\omega,\lambda,\sigma)|/|W(t_0,\omega,\lambda,\sigma)| \leq v$, 则

$$|p(\sigma\Delta t)|\leq v|p(0)|。(8)$$

即

$$\left|p\left(\frac{\mu}{\kappa\eta}\right)\right|\leq v|p(0)|。(9)$$

式中: $\mu = \Delta\omega\Delta t$ 。

当切片函数 $\hat{p}(\omega) = e^{-0.5\omega^2}$ 时, $\mu = 0.5$, 从式(7)和式(9)可以得到:

$$\frac{\sqrt{2\ln\frac{1}{v}}}{\eta}\leq\kappa\leq\frac{\mu}{\eta\sqrt{2\ln\frac{1}{v}}}。(10)$$

要使式(10)成立, 则 $v = e^{-0.5\mu}, \kappa = \sqrt{2}/2\eta$ 。

3.2.3 频率切片小波逆变换

重构信号可以直接用快速傅里叶变换算法求得, 频率切片小波逆变换为:

$$f(t)=\frac{1}{2\pi\lambda}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}W(\tau,\omega,\lambda,\sigma)d\tau d\sigma。(11)$$

3.2.4 测振数据分析

图 2 为地铁隧道爆破振动信号某炮次 2[#]、3[#]、4[#]、5[#]测点的垂向振动速度时程曲线。采样频率为 2 048 Hz, 依据采样定理^[15], 其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1 024 Hz。

根据式(10), 可取 $\kappa = \sqrt{2}/2\eta$, 且设 $v = 0.5, \eta =$

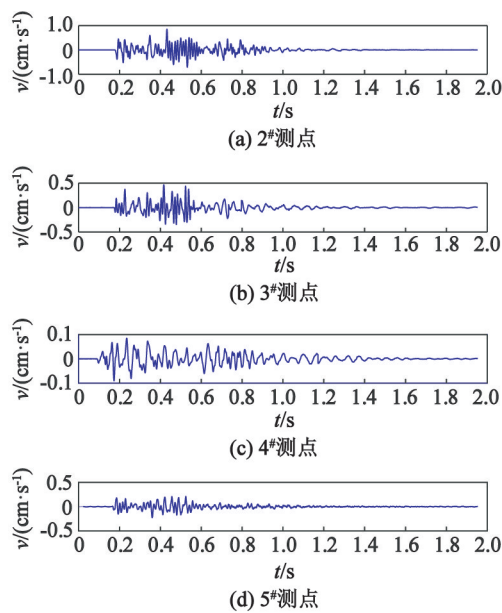


图2 爆破测振信号时域波形(垂向)

Fig. 2 Time domain waveform of measured blasting vibration signal (vertical)

0.025,则 $\kappa = 28.28$ 。因此,在地铁隧道爆破振动信号频率切片变换中可使用 $p(\omega) = e^{-0.5\omega^2}$ 、 $\lambda = 1$ 、 $\delta = \omega/\kappa$ 、 $\kappa = 28.28$ 。

在此基础上,可首先采用奈奎斯特频带区间 $[0,1\ 024]$ Hz 作为首次分析的频率切片区间,再采用 Matlab 2015b 按照式(1)~式(10)进行编程并运行程序后,可得到图2中4个垂向振动信号时频谱图。图3为采用奈奎斯特频带区间的全频带频率切片小波变换结果。时频图中呈现不同颜色分布,体现了爆破振动信号在时域和频域上的分布情况。本炮次地铁爆破振动信号4个垂向信号作为代表,振动信号频率成分主要分布在 $[0,200]$ Hz 频带区间内。可见,通过频率切片小波变换算法能够实现地铁爆破振动响应信号的时频分析,但在全频带条件下的时频分辨率较低,需要进一步开展精细化分析。

不失一般性,选取其中2#测点对该炮次的垂向振动速度信号开展进一步的时频特征分析。为聚焦主要频率成分,在 Matlab 程序中设定频率切片区间为 $[0,200]$ Hz 后,运行频率切片小波变换程序得到的结果如图4所示,时频幅值谱如图5所示。

在图4、图5中可观察到A、B、C、D、E 5个能量相对较强的色带,将这5个色带对应频率区间作为开展爆破振动信号时频特征进一步分析的主成分频率切片区间。相应的在 $[12,20]$ Hz、 $[24,39]$ Hz、 $[51,58]$ Hz、 $[64,85]$ Hz、 $[95,116]$ Hz 内进行频率切片小波变换细化分析,得到图6中对应频率区间的时

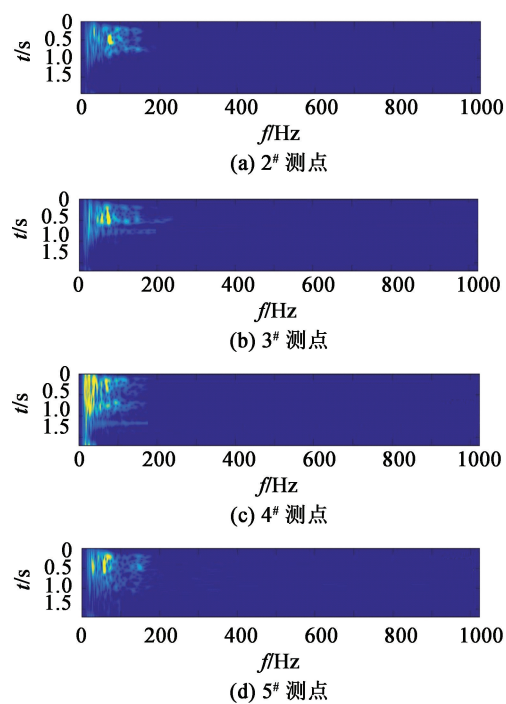


图3 全频带频率切片小波变换结果

Fig. 3 Wavelet transform results of frequency slice based on full frequency band

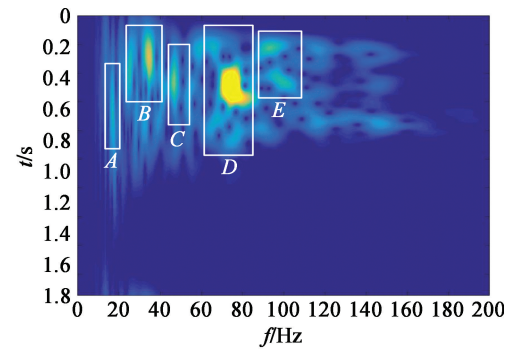


图4 $[0,200]$ Hz 频带的频率切片分析

Fig. 4 Analysis of $[0,200]$ Hz based on frequency slice wavelet transform

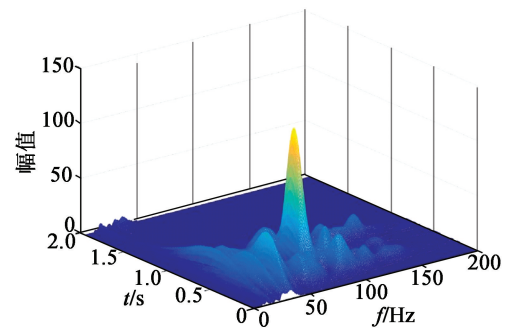


图5 $[0,200]$ Hz 频带的时频幅值谱

Fig. 5 Time-frequency amplitude spectrum of $[0,200]$ Hz based on frequency slice wavelet transform

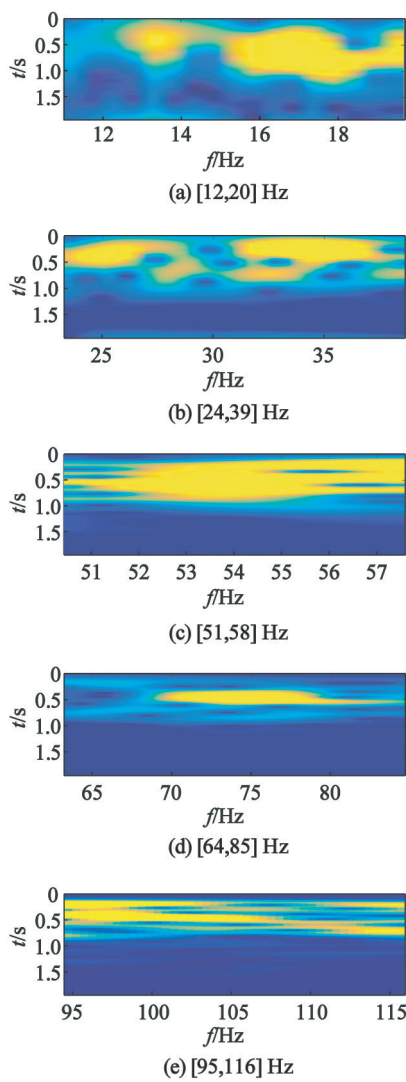


图 6 基于主成分频率切片区间的时频分布
Fig. 6 Time-frequency distribution based on slice interval of main component and division frequency

频分布。根据式(11)编写频率切片小波逆变换的计算程序,分别得到 5 个主成分频率切片区间对应频率范围内的重构信号,如图 7 所示。

综合图 2、图 4、图 6 可观察到 5 个特征切片内的时频特征窄而强、且间歇出现,充分表征出地铁爆破振动响应实测信号具有短时、非平稳的特性。图 7 为主成分频率切片区间对应的重构信号,分别按照频率切片得出了不同频段内爆破振动响应信号的时域信息。可见,频率切片小波变换可以根据需要,较为方便地选取有意义的频率切片作为细化分析的区间,一方面可准确掌握振动信号的时域、频域分布状况,另外一方面还可以基于上述具有特定意义下的频率区间重构得到相应的振动分量。假设基于任意 $[n-1,n+1]$ Hz 区间进行频率切片逆变换,可单

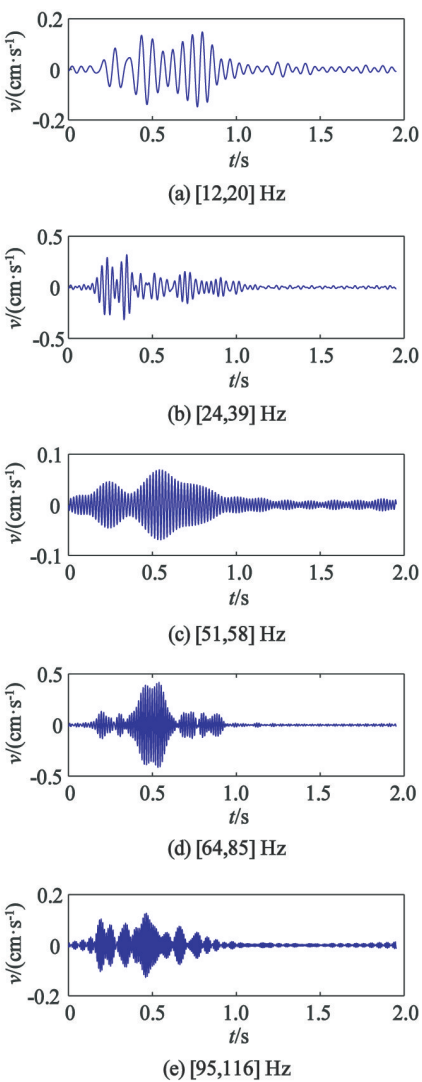


图 7 基于主成分频率切片区间的重构信号
Fig. 7 Reconstruction signal based on slice interval of main component and division frequency

独得到原测试信号中频率为 n Hz 的特征振动分量,有利于精确提取地铁爆破振动响应信号特征。

通过地铁隧道爆破振动时域波形的振动幅值、时频特征分析结果,可指导爆破作业单位对爆破方案、爆破参数进行调整优化,在确保爆破安全的前提下最大限度地提高爆破作业效率。

4 结论

1) 通过网络测振仪对某市地铁五号线圆通公园站至翠湖站区间矿山法地铁隧道爆破振动进行实时监测,此次地铁隧道钻爆法开挖产生的质点峰值振速在 0.07 ~ 0.85 cm/s 之间,主频在 13.3 ~ 68.9 Hz 之间,均处于 GB6722—2014《爆破安全规程》规定的安全阈值范围内。实测数据表明,爆破作业单

位采用的钻爆参数基本合理,确保了爆破安全。

2) 对地铁隧道爆破振动响应信号进行全频带范围内的频率切片小波变换,能够得到测振信号总体时频分布特征,但分辨率不高;通过主成分频率切片区间,可以精确掌握爆破振动信号时域、频域分布特征,且可以重构得到相应的爆破振动分量。频率切片小波变换具备独特的信号分析优势,适用于地铁爆破振动信号时频特征提取。

参 考 文 献

[1] 王晓荣. 轨道交通与大城市形态互动演化关系研究: 基于时空经济学视角[D]. 北京:北京交通大学,2018.
WANG X R. Analysis of the relationship between rail-transit and urbanform; based on time-space economics [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[2] 李智宏. 快速公交系统的适应性分析与实践研究 [D]. 成都:西南交通大学,2006.
LI Z H. Adaptability analysis and practice research of the bus rapic transit systems [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.

[3] 钟冬望,吴亮,余刚. 邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J]. 爆炸与冲击,2010,30(5):456-462.
ZHONG D W, WU L, YU G. Effect of tunneling blasting on an existing adjacent tunnel[J]. Explosion and Shock Waves,2010,30(5):456-462.

[4] 蒋楠,周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J]. 中国铁道科学,2011,32(6):63-68.
JIANG N,ZHOU C B. Dynamic Response characteristic of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration[J]. China Railway Science, 2011,32(6):63-68.

[5] 刘冬,高文学,孙宝平,等. 既有隧道扩建爆破振动数值模拟研究[J]. 岩土力学,2016,37(10):3011-3016.
LIU D, GAO W X,SUN B P, et al. Numerical simulation of blasting vibration on existing tunnel extension [J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(10):3011-3016.

[6] 吴亮,钟冬望. 不同布置条件下邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J]. 煤炭学报,2009,34(10):1339-1343.
WU L,ZHONG D W. Effect of tunneling blasting on the existing adjacent tunnel under different conditions [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(10):1339-1343.

[7] 杨明宇,王晓宇,江凯. 新建隧道爆破开挖对既有隧道影响及控制技术研究[J]. 北方交通,2019(1):77-80.
YANG M Y, WANG X Y, GANG K. Research on in-

fluence and construction technology of newly-built tunnel blasting excavation on existing tunnel[J]. Beifang Jiaotong, 2019(1):77-80.

[8] 叶培旭,杨新安,凌保林,等. 近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响[J]. 岩土力学,2011,32(2):537-541.
YE P X,YANG X A,LING B L, et al. Vibration effects on existing tunnel induced by blasting of an adjacent cross tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(2):537-541.

[9] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
State Administration of Work Safe. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: China Standard Press,2015.

[10] 曲广建,谢全民,朱振海,等. 工程爆破远程测振系统 [J]. 工程爆破,2015,21(5):58-62.
QU G J, XIE Q M, ZHU Z H, et al. Remote vibration measuring system of engineering blasting [J]. Engineering Blasting,2015,21(5):58-62.

[11] 徐洋,谢全民,梅比,等. 远程测振系统在群楼拆除爆破振动监测中的应用[J]. 工程爆破,2019,25(6):80-84.
XU Y,XIE Q M,MEI B, et al. Application of remote vibration measurement system in monitoring the hazard of demolition blasting of groups-buildings [J]. Engineering Blasting,2019,25(6):80-84.

[12] YAN Z H, MIYAMOTO A, JIANG Z W. Frequency slice wavelet transform for transient vibration response analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5):1474-1489.

[13] YAN Z H, MIYAMOTO A, JIANG Z W, et al. An overall theoretical description of frequency slice wavelet transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing 2010,24(2):491-507.

[14] YAN Z H, MIYAMOTO A, JIANG Z W. Frequency slice algorithm for modal signal separation and damping identification [J]. Computers and Structures,2011,89(1/2):14-26.

[15] 郭涛,方向,谢全民,等. 频率切片小波变换在爆破振动信号时频特征精确提取中应用[J]. 振动与冲击, 2013,32(22):73-78.
GUO T, FANG X, XIE Q M, et al. Application of FSWT in time-frequency feature accurate extraction of blasting vibration signals [J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(22):73-78.