

基于FSWT算法的某露天矿山边坡爆破振动传播规律研究

陈泓^{1,2}, 贾皓琦¹, 黄永辉³, 张智宇^{1,2}

- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
- 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093;
- 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)04-0029-12
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.004

摘要 为掌握露天矿山边坡在复杂条件下爆破振动信号的传播规律,以尖山磷矿边坡测得爆破振动数据为研究对象,采用频率切片小波变换技术(frequency slice wavelet transform, FSWT)、Hilbert-Huang变换(HHT)算法分析爆心距、边坡高程放大效应对振动波能量分布及传播规律的影响。结果表明:爆破振动波在传播距离较近时,能量上升而后会随着时间推移减小,且能量分布不密集;振动波在传播距离较远时,能量上升速度缓慢并且分布相对较集中。边坡底部振动能量主要集中在93.75~125 Hz 高频率段且含有大量高频能量,顶部振动能量主要集中在0~46.87 Hz 低频率段且含有大量低频能量。1972平台三号机在0~46.87 Hz 频率段能量占比平均为69.45%,而一和二号机分别为51.37%、42.55%,前者相较于后两者分别提高18.08、26.9个百分点。四号机爆心距比三号机更远,其低频能量大于三号机,但三号机在0~46.87 Hz 频率段的能量平均占比相较于四号机提高24.32个百分点,高程效应相较于爆心距的影响要更为明显,顶部相对底部高频能量表现为高程衰减效应,顶部相对底部低频能量表现为高程放大效应。

关键词 露天矿山边坡; 爆破; 频率切片小波; 振动传播规律; 振动能量; 高程效应

引言

爆破作为岩土开挖的主要施工手段,被广泛应用于矿业、交通及水电工程等领域^[1-2]。在矿山爆破开挖过程中,爆破引起的振动会对爆源附近的边坡造成影响,矿山爆破振动成为影响露天矿山边坡稳定性的重要因素之一。爆破振动波对边坡的影响,实际上是能量的传递与转化过程,容易受到振动波能量分布的影响^[3-4]。边坡岩体爆破开挖过程中,爆破振动的高程放大效应是边坡上振动速度传播规律的重要研究内容之一。迄今为止,我国国内学者对爆破动载荷作用下的边坡稳定性以及爆破振动信号做了大量的研究。陈明等人^[5]依托溪洛渡水电站右岸坝肩爆破工程,通过理论分析及数值模拟得到在边坡坡形骤变、坡度增大的坡段会产生显著的振动速度高程放大效应。王文才等^[6]针对高村露天铁矿爆破开挖生产过程对边坡的影响问题,进行了爆破振动信号监测与处理,针对

性地提出了高村露天矿有失稳倾向的边坡爆破振动波传播公式。彭亚雄等^[7]证明出非线性模型能更好适应水下爆破高程效应振动规律。韩宜康等^[8]根据现场调查结果得出边坡在45°时更容易发生高程放大效应。李祥龙等^[9]通过EMD算法分析爆破振动信号,得出振动信号能量主要集中在50 Hz、0.65 s以内。武旭^[10]通过对正负高差台阶地形条件下爆破地震波衰减规律的研究,最终提出了考虑高差在内的振动速度预测模型。阳声权等^[11]针对较大高程差推导出地形效应地震波预测模型。张耿城等^[12]通过现场监测与数值实验,分析了爆破振动规律与边坡受爆破振动作用下的动态响应特征,研究得出,测点的垂向速度远高于水平方向,爆破振动强度与正高程呈正相关。程小兵等^[13]采用HHT算法探究了二氧化碳爆破产生的能量分布。

目前,大部分学者通过对爆破振动监测及其能量分析,探索不同爆破参数、地形等多种因素对振动能量分布的影响。部分学者^[14-17]通过运用小波包变换和

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52064025、52164009); 云南省重大科技项目(202202AG050014)

作者简介: 陈泓(2000—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事爆破振动等方面的研究工作, E-mail: 1774929263@qq.com。

通信作者: 张智宇(1973—),男,广东韶关人,教授,博士生导师,主要从事工程爆破及岩石破碎等方面的研究工作, E-mail: 924221851@qq.com。

优化过的小波包算法以及分形理论等手段,对爆破振动信号在频率和能量分布方面的特性进行了深入探究,取得了显著成效。小波包变换相比小波变换将信号高频部分进一步分解,更加精细化,可依然存在缺陷,若对小波基和分解层数选择不当会导致分析结果错误。虽然后续学者对其进行优化,但这些优化过后的方法自身局限性依旧存在。频率切片小波变换(FSWT)算法吸取了短时傅里叶变换和小波变换的优点,继承了小波函数灵活的特征,且相比小波变换可以灵活地在时频域进行分割,通过重构分离出信号分量,更加准确。基于此,本文以现场爆破振动监测实验为研究对象,采用频率切片小波变换算法(FSWT)以爆破振动数据研究爆心距、边坡高程放大效应对振动能量传播分布的影响,为矿山爆破开挖设计与边坡稳定性监测提供依据。

1 算法理论基础

1.1 FSWT 算法^[18]

令 $L(R)$ 为有限向量空间(R 为实数合集),对任意信号 $f(t) \in L^2(R)$, $\hat{p}(\omega)$ 为频率切片函数 $p(t)$ 的傅里叶变换, $f(t)$ 的 FSWT 为:

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

式中: σ 为尺度因子 ($\sigma \neq 0$); σ 和 λ 为 ω 和 t 的函数或常数; i 为虚数单位; u 为评估频率; $\hat{p}^*(\omega)$ 为 $\hat{p}(\omega)$ 的共轭函数。

设尺度因子 $\sigma = \omega/k, k > 0$, 则:

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

式中: k 与 ω, u 无关, k 是时频分辨系数,是一种用于调整变换对频率或时间灵敏度的参数,通过引入时频分辨系数 k , 避免时域和频域分辨率相同。

为了实现最佳的时频分辨能力。使用两个系数评估分析信号:一个是频率分辨率 η 、一个是幅值期望响应比率 ν 。

$$\eta = \frac{\Delta\omega}{\omega} \quad (3)$$

对于 $f(t) = e^{i\omega_0 t}$, 若 $|W(t, \omega_0 + \Delta\omega, \lambda, \sigma)| / |W(t, \omega_0, \lambda, \sigma)| \leq \nu$, 则:

$$|\hat{p}(k\eta)| \leq |\hat{p}(0)| \quad (4)$$

对于 $f(t) = \delta(t - t_0)$, 若 $|W(t_0 + \Delta t, \omega, \lambda, \sigma)| / |W(t_0, \omega, \lambda, \sigma)| \leq \nu$, 则:

$$|\hat{p}\left(\frac{\mu}{k\eta}\right)| \leq \nu |p(0)| \quad (5)$$

式中: $\mu = \Delta\omega \Delta t$ 。若取 $\hat{p}(\omega) = e^{-0.5\omega^2}$, $\mu = 0.5$, 可得解为 $\nu = e^{-0.5\mu}, k = 0.707\eta$ 。

FSWT 的时频分析结果呈现出冗余性。从理论

角度看,它的逆变换可以有多种方式,其中最基础的逆变换是:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\tau, \omega, k) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega \quad (6)$$

(6) 式表明逆变换只与 k 有关,与函数 $p(\omega)$ 无关,当 k 给定时, (6) 式为傅里叶逆变换。

若信号 $f(t)$ 的 FSWT 变换为 $W(t, \omega, \sigma)$, 则在时频区域 $(t_1, t_2, \omega_1, \omega_2)$ 的信号分量为:

$$f_x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_2}^{\omega_1} \int_{t_1}^{t_2} W(\tau, \omega, \sigma) e^{i\omega(t-\tau)} d\tau d\omega \quad (7)$$

在 $f(t)$ 的 FSWT 时频范围内,时频范围 $(t_1, t_2, \omega_1, \omega_2)$ 可以自由选择时频区域的即时时频切片,这使得能够在时频空间中自由提取所需的信号成分。

1.2 HHT 算法

HHT 算法在信号处理和故障诊断中被广泛应用,该方法由小波包分解和希尔伯特-黄变换两部分组成。希尔伯特变换是对非稳态爆破振动信号做时频分析的一种方法^[19],突破了傅里叶变换分析方法的局限性。

$$x_i(t) = c_i(t) \quad (8)$$

$$Y_i(t) = \frac{1}{\pi} PV \int_R \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (9)$$

式中: $x_i(t)$ 代表爆破振动的分量; $c_i(t)$ 为振动信号的第一个分量; PV 为柯西主分量。

将振幅 $H(\omega, t)$ 对时间 t 积分,得到 Hilbert 的边际谱 $h(\omega)$, 如(10)式所示:

$$h(\omega) = \int_{\omega}^T H(\omega, t) dt \quad (10)$$

式中: ω 为频率; $H(\omega, t)$ 为爆破振动信号的振幅。

Hilbert 的瞬时能量 $IE(t)$ 是将振幅 $H(\omega, t)$ 的平方对频率积分得到,具体的表达式如(11)式所示:

$$IE(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (11)$$

2 爆破振动信号监测及分析

2.1 爆破区域概况

云南磷化矿区处于侵蚀溶蚀中山地貌区,区域内表现为残留夷平面、单斜山和断层崖。山地顶部溶沟、石芽、岩溶洼地等岩溶形态发育,其上覆盖有厚层残积红黏土。褶皱开阔,岩层平缓,相对高差 200~400 m,坡度一般介于 20°~35°之间,较陡地段达 45°。

2.2 测点布置及监测结果

为了分析爆心距、高程效应对爆破振动传播规律以及能量分布的影响,选取尖山北扩 1950 平台排土场进行三个不同日期的爆破振动测试,并记录了爆破参数,见表 1。

表 1 爆破参数表

Table 1 Table of blasting parameters

爆破日期	总孔数/个	平均孔深/m	总孔长/m	最大单段药量/kg
2023.07.30	111	9.6	1 065.6	95
2023.08.27	117	9.3	1 088.1	90
2023.09.23	115	9.3	1 069.3	87

本次现场爆破振动监测中,采用的传感器为低频三向振动速度传感器,其与 TC-4850 爆破测振仪相结合使用,之后将采集到的数据导入计算机中进行处理。总共布置四台爆破振动测试仪,分别位于水平线 1903、1945、1972、2001 平台,传感器 X 轴方向对准爆区,整体布置情况如图 1,具体振动波形见图 2~图 4,具体测振详细数据见表 2~表 4。

从表 2~表 4 可以明显看出,三个不同日期三号测点 Z 轴速度分别为 0.156、0.093、0.118 cm/s,二号测点 Z 轴速度分别为 0.101、0.080、0.103 cm/s,三号测点 Z 轴速度均要大于二号测点 Z 轴速度,由此推断出三号测点可能发生高程放大效应。

2.3 FSWT 分解

FSWT 算法可以将信号分解成多个子带,从而获取模态分量 IMF(intrinsic mode function)。IMF 是原始信号的本征模态,可以反映出信号的局部特征。采用 FSWT 算法对三个不同日期的振动波形进行分解,选

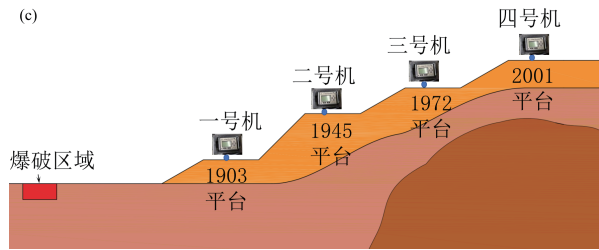
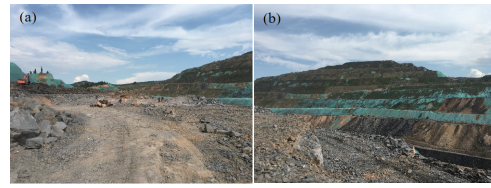


图 1 现场示意图 (a—现场装药; b—尖山露天边坡; c—爆破监测点布置图)

Fig. 1 On-site schematic diagram (a—On-site charge; b—Jianshan open-pit slope; c—Blasting monitoring point layout)

取日期为 2023.08.27 分解出的模态分量和频谱图进行展示,如图 5~图 6 所示。

由图 5 分析可知,第一个模态分量是由 FSWT 分解得到的,它具有最高的频率和最短的波长,其主要特征是信号中的白噪声或高频成分。第二个模态分量是低频成分,其特征向量在整个频带内表现出一定程度上与原始信息相似或近似相同的特性,且具有较强的镜像能力。随着分解流程的深入,IMF 的频率持续上升,其镜像的效果也变得越来突出。同时各分

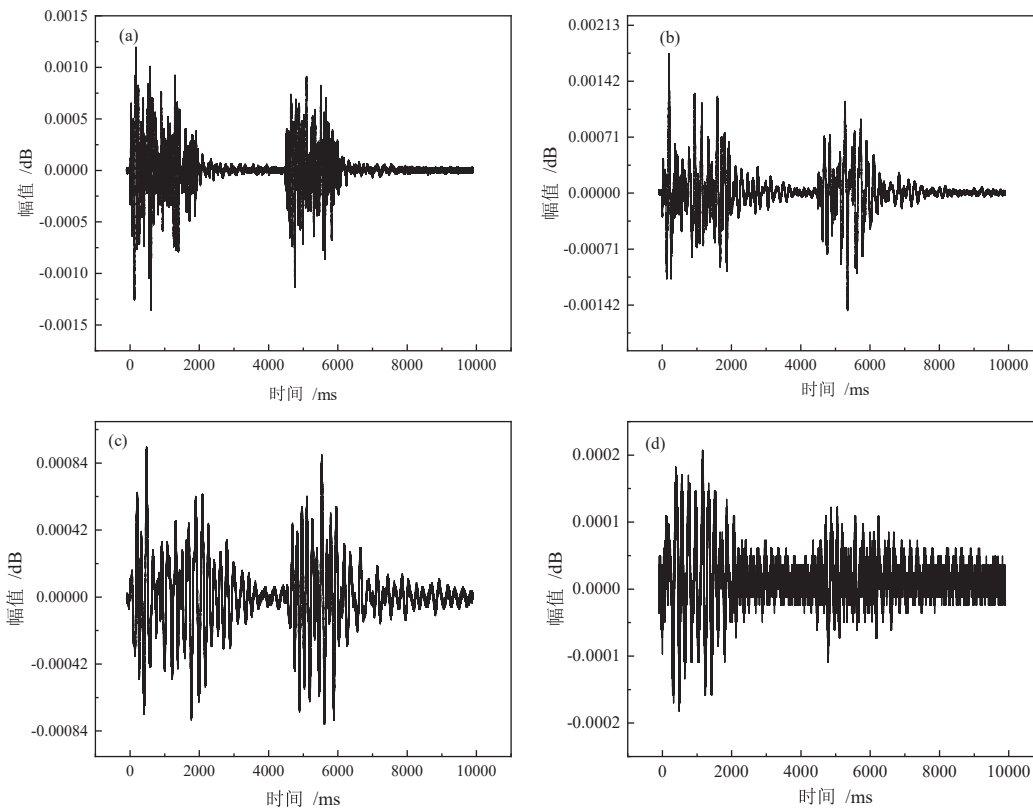


图 2 2023.07.30 爆破振动波形监测结果 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)

Fig. 2 2023.07.30 Blasting vibration waveform monitoring results (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

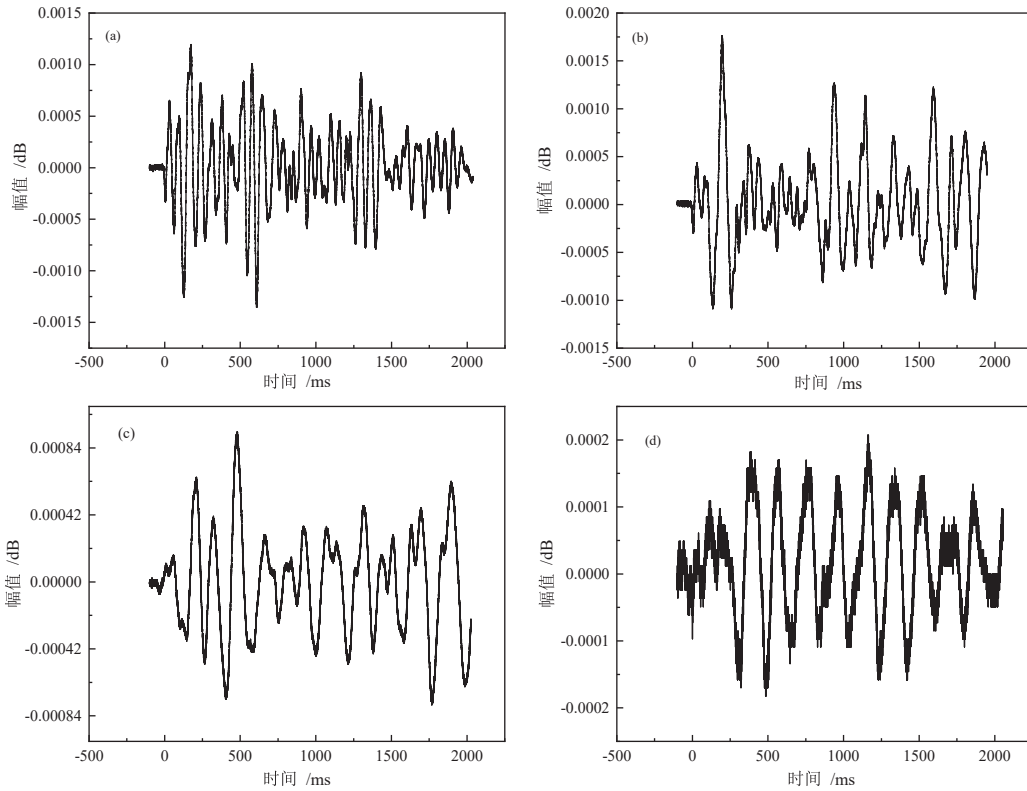


图 3 2023.08.27 爆破振动波形监测结果 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)
 Fig. 3 2023.08.27 Blasting vibration waveform monitoring results (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

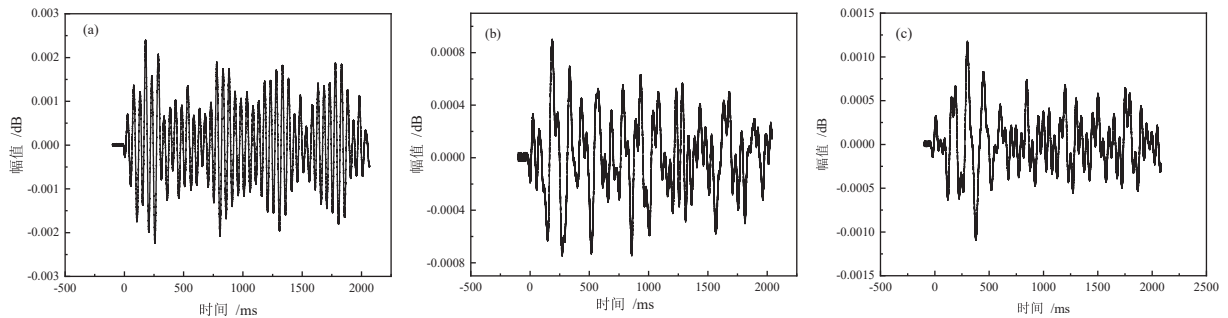


图 4 2023.09.23 爆破振动波形监测结果 (a—一号机; b—二号机; c—三号机)
 Fig. 4 2023.09.23 Blasting vibration waveform monitoring results (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3)

表 2 2023.07.30 爆破振动监测结果汇总

Table 2 2023.07.30 Blasting vibration monitoring results summary

测点编号	爆心距离/m	最大振动速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	主振频率/Hz	备注
1	238	0.185	9.98	水平径向
		0.190	7.75	水平切向
		0.135	15.90	垂直
2	342	0.159	5.38	水平径向
		0.268	7.59	水平切向
		0.101	7.71	垂直
3	479	0.152	5.76	水平径向
		0.075	5.09	水平切向
		0.156	5.95	垂直
4	769	0.034	5.07	水平径向
		0.027	5.63	水平切向
		0.021	5.46	垂直

表 3 2023.08.27 爆破振动监测结果汇总

Table 3 2023.08.27 Blasting vibration monitoring results summary

测点编号	爆心距离/m	最大振动速度/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	主振频率/Hz	备注
1	228	0.098	10.54	水平径向
		0.092	9.67	水平切向
		0.097	18.35	垂直
2	327	0.115	5.18	水平径向
		0.107	6.91	水平切向
		0.080	6.90	垂直
3	458	0.090	5.95	水平径向
		0.070	4.14	水平切向
		0.093	8.34	垂直
4	558	0.051	5.95	水平径向
		0.044	5.65	水平切向
		0.029	8.39	垂直

表 4 2023.09.23 爆破振动监测结果汇总

Table 4 2023.09.23 Blasting vibration monitoring results summary

测点编号	爆心距离/m	最大振动速度/(cm·s ⁻¹)	主振频率/Hz	备注
1	197	0.159	15.47	水平径向
		0.169	10.64	水平切向
		0.302	17.32	垂直
2	314	0.115	5.61	水平径向
		0.094	6.54	水平切向
		0.103	7.33	垂直
3	392	0.194	7.23	水平径向
		0.081	7.31	水平切向
		0.118	7.35	垂直

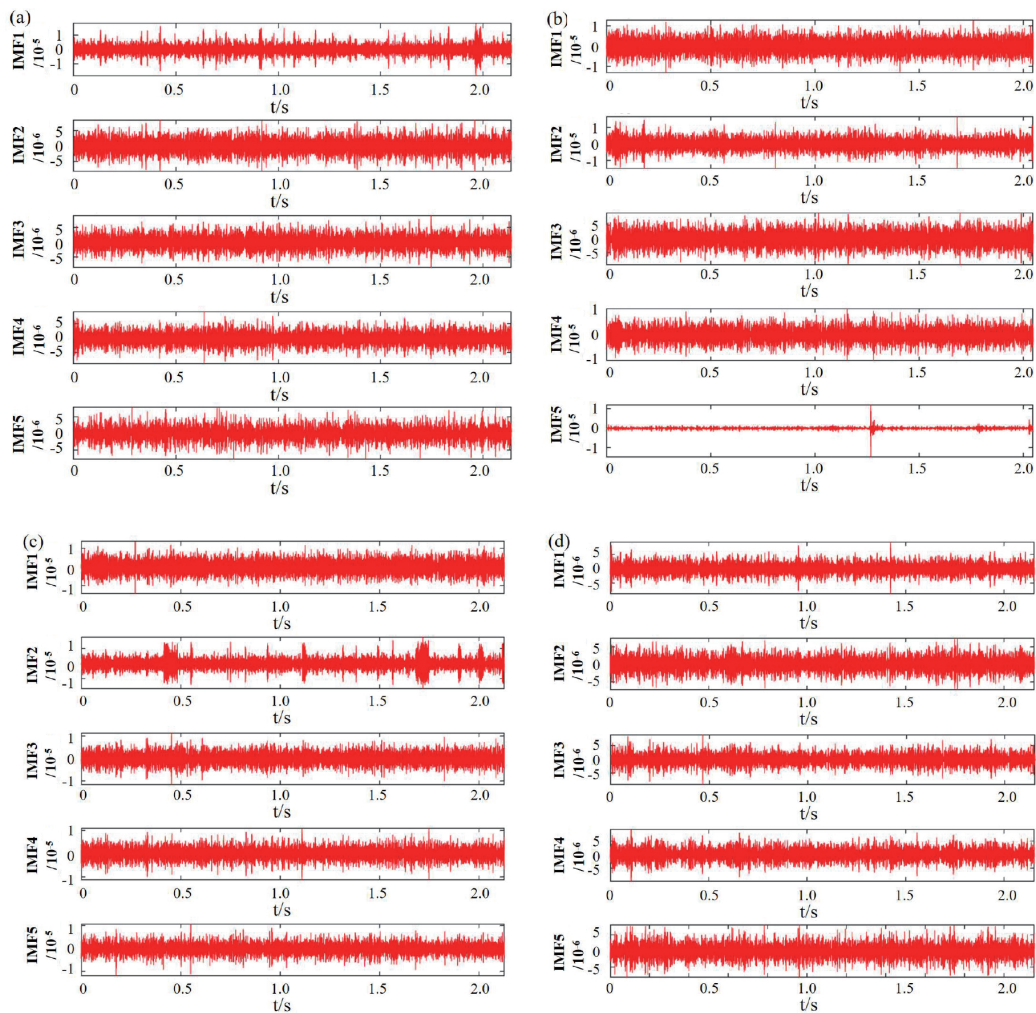


图 5 2023.08.27 模态分量曲线 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)

Fig. 5 2023.08.27 Modal component curve (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

量在整个时间段都具有完整的周期, 这些成分是原始信号在复杂环境监测条件下受到噪声干扰的重要组成部分, 这充分证明 FSWT 算法能够有效地反映信号的局部性特征。IMF 分量低频段存在大多数能量, 对爆破振动信号分析具有十分重要的作用。低频带是初始振动信号中的主导频率段, 其波形的能量主要集

中在低频范围内。

边坡岩体稳定性与由爆破引发的振动破坏效应之间存在着紧密的联系, 对爆破产生的振动特性进行研究, 对于深入理解爆破的工作原理具有至关重要的作用。爆破产生的振动破坏效果与振动的频率密切相关, 这主要是由低频部分导致的, 随着振动波传播

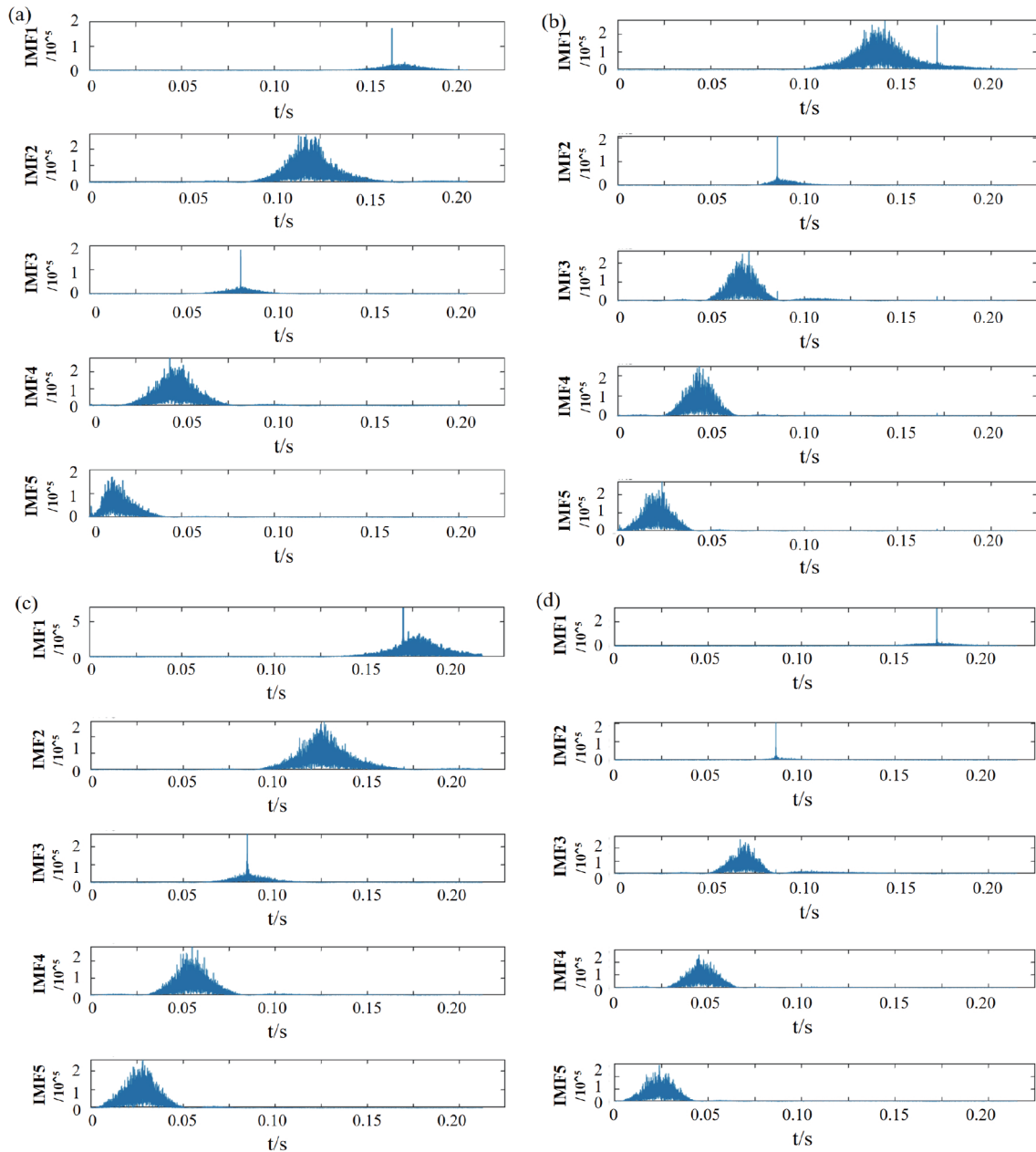


图 6 2023.08.27 模态分量频谱图 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)

Fig. 6 2023.08.27 Modal component spectrum diagram (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

时间和衰减速度的增加,其影响逐渐减小,在爆破振动信号中,不同的低频部分对边坡岩石造成的损害程度是有所区别的。

由图 6 可知,随着振动波的传播距离逐步扩大,其频谱的振幅逐步下降,而随着高程差的增大,频带的范围也逐步扩大。在相同条件下,不同位置处各测试点之间存在较大差异。与一号和二号机相比,三号机的爆破振动信号频谱呈现出逐步扩大的模式,而四号机的频率则显示出与三号机相比逐步缩小的趋势。在进行爆破设计时需要考虑不同因素对振动波频谱特性产生的影响,从而为工程实际提供理论依据。当振动波的传播距离增大时,频谱的振幅会逐步下降,而随着高程差的扩大,频带的范围也会逐步扩大,不

同监测点之间存在较大差异,且与振动波能量分布情况有关。

2.4 爆破振动信号能量分析

2.4.1 爆破振动信号能量分解

当爆破振动信号频率超出爆破振动测试仪的最小工作频率后,则可能引起信号失真。因此,当采用 FSWT 算法对爆破振动信号进行分解时,其分解层数要根据爆破振动测试仪的工作频带来确定。本次爆破振动测试仪工作频率为 16 kHz,为了进一步开展爆破振动能量衰减研究,运用 FSWT 算法对爆破振动信号进行九层分解,选用 db8 作为本次分析的小波基,

根据 Nyquist 定理,其频率为 8 kHz,最低频带为 0~15.62 Hz。根据 FSWT 算法,把三个日期的振动波形

分别分解成 8 个频率段,每个频率段的能量占比见表 5~表 7。

表 5 2023.07.30 不同频率段能量占比情况

Table 5 2023.07.30 Energy proportion of different frequency bands

频率段序号	频率段/Hz	一号机能量占比/%	二号机能量占比/%	三号机能量占比/%	四号机能量占比/%
1	0~15.62	26.43	14.09	24.45	8.98
2	15.62~31.20	16.42	13.13	22.58	10.59
3	31.2~46.87	13.97	12.33	12.04	14
4	46.87~62.50	9.87	11.3	10.72	10.1
5	62.5~78.12	9.24	9.24	9.31	12.59
6	78.12~93.75	8.47	14.61	6.33	10.77
7	93.75~109.37	7.38	11.16	7.29	15.16
8	109.37~125	6.86	14.13	7.28	17.01

表 6 2023.08.27 不同频率段能量占比情况

Table 6 2023.08.27 Energy proportion of different frequency bands

频率段序号	频率段/Hz	一号机能量占比/%	二号机能量占比/%	三号机能量占比/%	四号机能量占比/%
1	0~15.62	13.35	9.78	27.3	9.41
2	15.62~31.20	16.25	10.86	19.91	20.4
3	31.2~46.87	13.37	12.17	19.1	13.37
4	46.87~62.50	10.37	16.05	12.17	9.68
5	62.5~78.12	20.54	17.63	12.04	10.9
6	78.12~93.75	10.35	15.02	13.18	13.13
7	93.75~109.37	9.17	10.73	7.57	12.37
8	109.37~125	6.6	7.76	4.74	10.75

表 7 2023.09.23 不同频率段能量占比情况

Table 7 2023.09.23 Energy proportion of different frequency bands

频率段序号	频率段/Hz	一号机能量占比/%	二号机能量占比/%	三号机能量占比/%
1	0~15.62	22.24	20.09	19.32
2	15.62~31.20	19.71	22.55	48.66
3	31.2~46.87	12.47	12.47	14.98
4	46.87~62.50	11.97	11.93	6.77
5	62.5~78.12	8.55	8.39	2.04
6	78.12~93.75	8.1	8.45	1.83
7	93.75~109.37	9.1	8.75	3.55
8	109.37~125	11.17	7.36	2.85

1972 平台三号机在 0~46.87 Hz 频率段能量占比平均为 69.45%,而一、二号机分别为 51.37%、42.55%,前者比后两者分别提高 18.08、26.9 百分点。由图 7 可以看出爆心距对于振动波能量分布及传播规律具有一定影响,当爆破振动波在传播距离较近时,能量上升而后会随着时间推移减小,且能量分布不密集;振动波在传播距离较远时,能量上升速度缓慢并且分布相对较集中。按照此规律,四号机爆心距比三号机要远,其低频能量应该要大于三号机,但三号机在

0~46.87 Hz 频率段的能量平均占比相较于四号机提高 24.32 百分点。由此可见,1972 平台在爆破振动传播时发生了高程放大效应,高程放大效应要更明显。顶部振动能量主要集中在 0~46.87 Hz 低频率段,能量占比要高于底部测点。边坡爆破振动高程放大效应在一定的条件下产生,与边坡坡度、边坡岩性、相邻台阶高差、地形地貌、爆破振动荷载特性等因素相关,台阶处产生鞭梢效应使台阶爆破的高程发生放大效应。

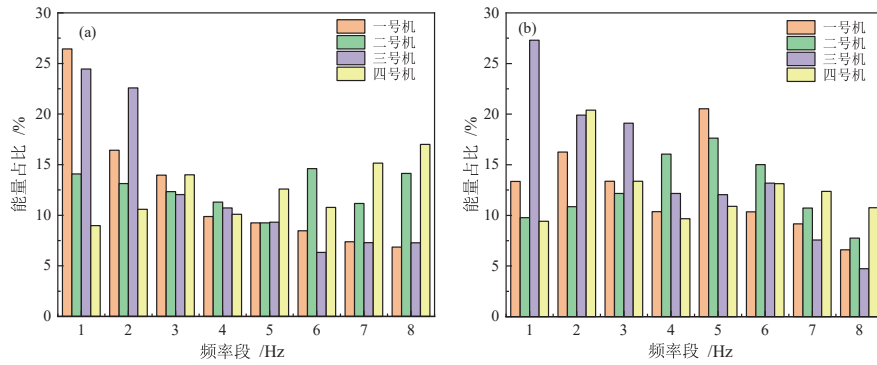


图7 不同日期振动波形能量占比 (a—2023.07.30 能量占比; b—2023.08.27 能量占比)
 Fig. 7 Energy ratio of vibration waveforms on different dates (a—2023.07.30 energy share bar; b—2023.08.27 energy share bar)

2.5 振动波 HHT 频谱分析

幅值, 进一步分析其时变性和频域特征, 三个日期变换结果如图8~图10所示。

2.5.1 希尔伯特-黄变换

希尔伯特-黄变换可以将 IMF 转换成瞬时频率和

通过图8~图9可知, 三号机边际谱幅值在 $0\sim 2.5 \times 10^{-4}$ dB、 $0\sim 1.5 \times 10^{-4}$ dB, 二号机边际谱幅值在 $0\sim 2 \times 10^{-4}$

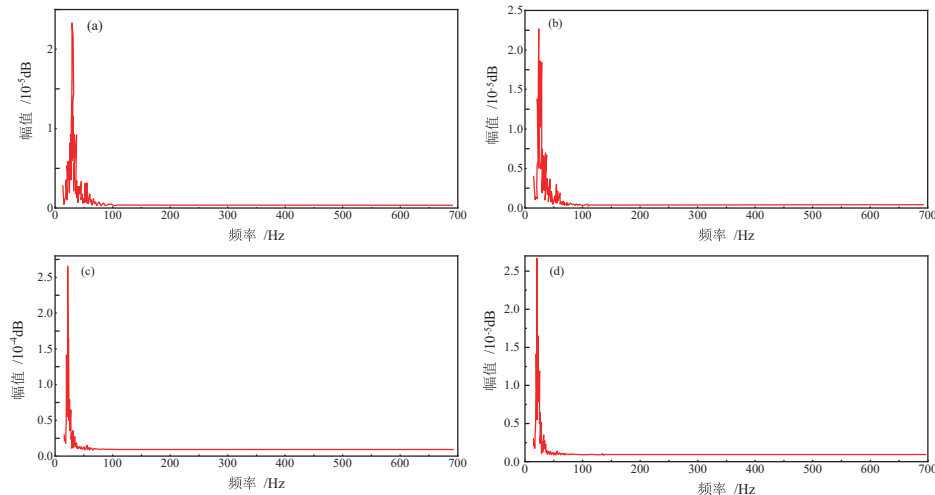


图8 2023.07.30 振动波形边际谱 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)
 Fig. 8 2023.07.30 Marginal spectrum of vibration waveform (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

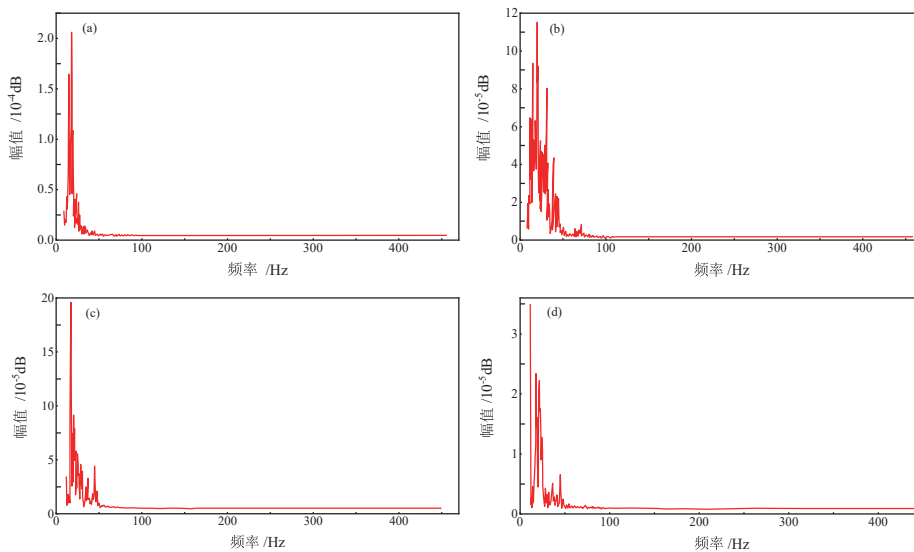


图9 2023.08.27 振动波形边际谱 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)
 Fig. 9 2023.08.27 Marginal spectrum of vibration waveform (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

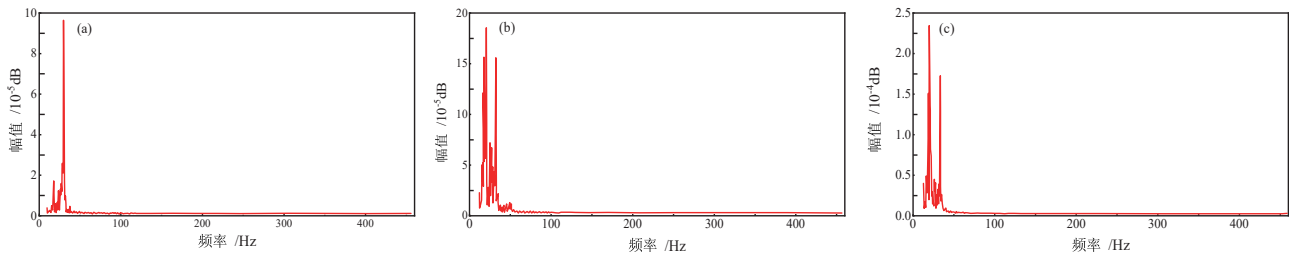


图 10 2023.09.23 振动波形边际谱 (a—一号机; b—二号机; c—三号机)
 Fig. 10 2023.09.23 Marginal spectrum of vibration waveform (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3)

dB、 $0\sim 0.5\times 10^{-4}$ dB, 四号机边际谱幅值在 $0\sim 0.6\times 10^{-4}$ dB、 $0\sim 0.3\times 10^{-4}$ dB, 三号机能量幅值要大于二号机能量幅值, 四号机能量幅值要小于三号机能量幅值; 由图 10 可知, 二号机能量边际谱幅值在 $0\sim 1.5\times 10^{-4}$ dB, 三号机能量边际谱幅值在 $0\sim 2\times 10^{-4}$ dB, 证明在三号机处发生高程放大效应, 而在四号机处发生高程衰减效应。

2.5.2 爆破振动信号时频能量分析

为了进一步探索 1972 平台高程放大效应对爆破振动传播规律的影响, 采用 HHT 三维能量图对其进

行分析。

由图 11~图 13 可知, 在 1972 平台三号机的振动能量三维图能量幅值均大于二号机、四号机, 这也对应边缘谱所分析出的结果, 进一步说明 1972 平台发生了高程放大效应。通过对三个不同日期台阶爆破所产生的振动波时频能量三维图进行分析, 可知低平台振动波所产生的能量大部分为高频能量, 时间主要集中在 1~2 s 之间; 随着高程增加, 高平台振动波所产生的能量大部分为低频能量, 时间集中在 0~0.5 s 之间。

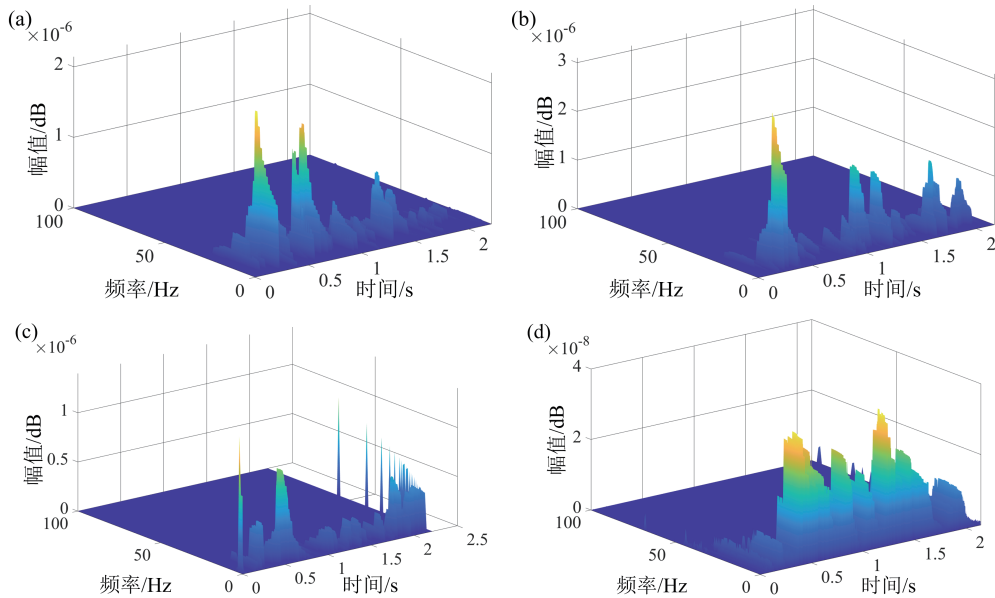


图 11 2023.07.30 振动能量三维图 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)
 Fig. 11 2023.07.30 Vibration energy three-dimensional diagram (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

3 结论

(1)通过 FSWT 算法对振动信号进行分析可知, 1972 平台三号机在 $0\sim 46.87$ Hz 频率段能量占比平均为 69.45%, 而一和二号机分别为 51.37%、42.55%, 三号机相较于一和二号机分别提高 18.08、26.9 百分点。当爆破振动波在传播距离较近时, 能量上升而后会随着时间推移减小, 且能量分布不密集; 振动波在传播距离较远时, 能量上升速度缓慢并且分布相对较集中。四号机爆心距比三号机要远, 其低频能量应该要大于

三号机, 但三号机在 $0\sim 46.87$ Hz 频率段的能量平均占比要比四号机提高 24.32 百分点, 在 1972 平台发生高程放大效应。

(2)爆破振动在边坡高程放大效应的影响下, 振动速度、能量逐渐放大, 振动频率逐渐衰减, 当与边坡构筑物固有频率逐渐接近时, 会造成破坏。通过研究爆心距、边坡高程放大效应对振动能量传播分布的影响, 为矿山爆破开挖设计与边坡稳定性监测提供依据, 利于对整个边坡的稳定状态进行评估。同时, 在未来的矿山开采活动中, 需要实施一系列相关措施, 如减

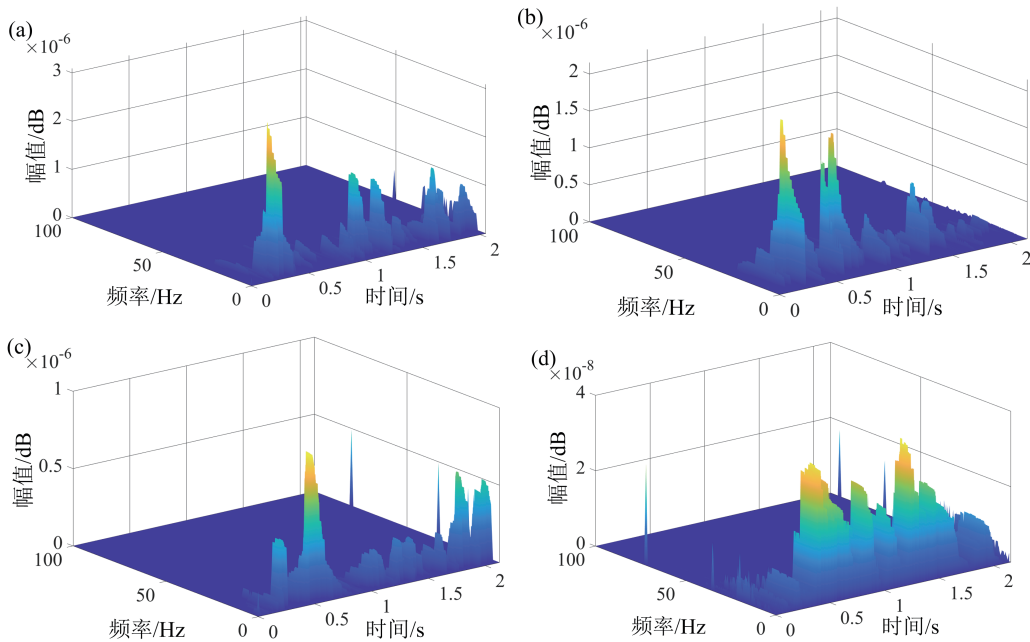


图 12 2023.08.27 振动能量三维图 (a—一号机; b—二号机; c—三号机; d—四号机)
 Fig. 12 2023.08.27 Vibration energy three-dimensional diagram (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3; d—Machine 4)

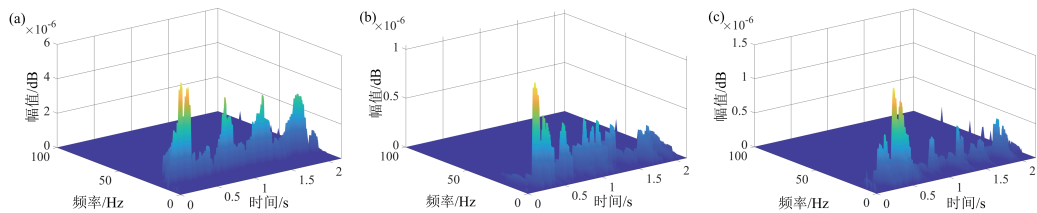


图 13 2023.09.23 振动能量三维图 (a—一号机; b—二号机; c—三号机)
 Fig. 13 2023.09.23 Vibration energy three-dimensional diagram (a—Machine 1; b—Machine 2; c—Machine 3)

少最大单段药量和设置隔离孔,以减轻爆破产生的振动波对附近建筑物的不良影响。

参考文献:

[1] 林海松. 高边坡爆破振动传播规律及其控制技术[J]. 工程爆破, 2020, 26(2): 69-74+86.
 LIN H S. Blasting vibration propagation law of high slope and its control technology[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 69-74+86.

[2] 张勤彬, 程贵海, 卢欣奇, 等. 考虑岩体损伤的爆破振动速度衰减多元非线性模型[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 95-101.
 ZHANG Q B, CHENG G H, LU X Q, et al. Multivariate nonlinear model of blast vibration velocity attenuation considering rock damage[J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(3): 95-101.

[3] 李洪涛, 杨兴国, 舒大强, 等. 不同爆源形式的爆破地震能量分布特征[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 30-34.
 LI H T, YANG X G, SHU D Q, et al. Study on energy distribution characteristics of seismic waves induced by different forms of blasting resource[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(1): 30-34.

[4] 沙仙武, 陈才贤, 李佳建. 巨龙铜矿地应力对大断面巷道稳定性与岩倾向性数值模拟[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(2): 52-57.
 SHA X W, CHEN C X, LI J J. Numerical simulation of ground stress on stability and rockburst tendency of large section roadway in Julong Copper Mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(2): 52-57.

[5] 陈明, 卢文波, 李鹏, 等. 岩质边坡爆破振动速度的高程放大效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2189-2195.
 CHEN M, LU W B, LI P, et al. Elevation amplification effect of blasting vibration velocity in rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2189-2195.

[6] 王文才, 孟刚, 常建平, 等. 高村露天铁矿爆破振动传播规律研究[J]. 露天采矿技术, 2018, 33(6): 69-72.
 WANG W C, MENG G, CHANG J P, et al. Research on blasting vibration propagation law of Gaocun open-pit iron ore mine[J]. Open Pit Mining Technology, 2018, 33(6): 69-72.

[7] 彭亚雄, 吴立, 苏莹, 等. 考虑高程效应的水下爆破振动衰减拟合模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 173-178.
 PENG Y X, WU L, SU Y, et al. Fitting models of underwater blasting vibration attenuation considering effects of elevation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 173-178.

[8] 韩宜康, 杨长卫, 张建经, 等. 坡面角度对岩质边坡加速度高程放大效应的影响[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 874-880.
 HAN Y K, YANG C W, ZHANG J J, et al. The influence of slope angle on the elevation amplification effect of rock slope acceleration[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 874-880.

[9] 李祥龙, 赵泽虎, 王建国, 等. 基于EMD-HHT和小波理论的地下浅孔爆破振动规律研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 100-108.
 LI X L, ZHAO Z H, WANG J G, et al. Research on vibration law of underground shallow hole blasting based on EMD-HHT and wavelet theory[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(12): 100-108.

[10] 武旭. 台阶地形爆破地震波传播规律研究[D]. 唐山: 华北理工大

- 学, 2015.
- WU X. Research on seismic wave propagation law of terrace terrain blasting[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2015.
- [11] 阳生权, 张家辉, 吕中玉, 等. 较大高程差迎波坡面爆破地震地形效应分析[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 22–28.
- YANG S Q, ZHANG J H, LYU Z Y, et al. Blasting seismic topographic effects of follow-wave slope with higher differential elevation[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 22–28.
- [12] 张耿城, 郭连军, 贾建军, 等. 某露天铁矿爆破振动对边坡的动态响应特征研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(12): 165–169.
- ZHANG G C, GUO L J, JIA J J, et al. Research on dynamic response characteristics of blasting vibration on slope in an open-pit iron ore mine[J]. China Mining Industry, 2020, 29(12): 165–169.
- [13] 程小兵, 何申中, 吴红波, 等. 二氧化碳爆破效果及振动分析[J]. 煤矿爆破, 2023, 41(3): 26–30.
- CHENG X B, HE S Z, WU H B, et al. Effect and vibration analysis of carbon dioxide blasting[J]. Coal Mine Blasting, 2023, 41(3): 26–30.
- [14] 陈吉辉, 仇文革, 赵旭伟, 等. 基于小波包技术地铁隧道分区爆破振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 222–228+255.
- CHEN J H, QIU W G, ZHAO X W, et al. Vibration characteristics analysis of the metro tunnel subarea blasting based on wavelet packet technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 222–228+255.
- [15] 周建敏, 汪旭光, 龚敏, 等. 缓冲孔对爆破振动信号幅频特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 240–244+280.
- ZHOU J M, WANG X G, GONG M, et al. Effects of buffer hole on amplitude–frequency features of blast vibration signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 240–244+280.
- [16] 路亮, 龙源, 谢全民, 等. 提升小波包最优基分解算法在爆破振动信号分析中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2014(5): 165–169+186.
- LU L, LONG Y, XIE Q M, et al. Application of lifting wavelet packet decomposing algorithm based on optimal basis in blasting vibration signal analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014(5): 165–169+186.
- [17] 范伟强, 刘毅. 基于自适应小波变换的煤矿降质图像模糊增强算法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(12): 4248–4260.
- FAN W Q, LIU Y. Fuzzy enhancement algorithm of coal mine degradation image based on adaptive wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(12): 4248–4260.
- [18] 王坤, 李凌均, 郝旺身, 等. 全矢FSWT方法在轴承故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造, 2023(12): 205–208.
- WANG K, LI L J, HAO W S, et al. Application of full vector FSWT method in bearing fault diagnosis[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023(12): 205–208.
- [19] 杨彦鑫, 路华, 林子云, 等. 基于希尔伯特黄变换的场地液化识别方法研究[J]. 灾害学, 2024, 39(3): 36–42.
- YANG Y X, LU H, LIN Z Y, et al. Research on site liquefaction identification method based on Hilbert's yellow transform[J]. Disaster Science, 2024, 39(3): 36–42.

Study on the Propagation Law of Blasting Vibration in an Open-pit Mine Slope Based on FSWT Algorithm

CHEN Hong^{1,2}, JIA Haoqi¹, HUANG Yonghui³, ZHANG Zhiyu^{1,2}

1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department, Kunming 650093, China;

3. Faculty school of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

Abstract: In order to master the propagation law of blasting vibration signals of open-pit mine slope under complex conditions, the blasting vibration data measured by Jianshan phosphate mine slope was taken as the research object. The frequency slice wavelet transform (FSWT) and Hilbert-Huang transform (HHT) algorithms were used to analyze the influence of blasting center distance and slope elevation amplification effect on the energy distribution and propagation law of vibration wave. The results showed that when the propagation distance of blasting vibration wave was close, the energy rose and then decreased with time, and the energy distribution was not dense. When the propagation distance of the vibration wave was far, the energy rose slowly and the distribution was relatively concentrated. The vibration energy at the bottom of the slope was mainly concentrated in the high frequency band of 93.75~125 Hz and contained a large amount of high frequency energy, and the vibration energy at the top was mainly concentrated in the low frequency band of 0~46.87 Hz and contained a large amount of low frequency energy. The energy proportion of No.3 machine in 1972 platform in the frequency range of 0~46.87 Hz was 69.45% on average, while those of No.1 and No.2 machines were 51.37% and 42.55% respectively. The former was 18.08 and 26.9 percentage points higher than the latter two respectively. The explosion center distance of No.4 machine was farther than that of No.3 machine, and its low-frequency energy should be greater than that of No.3 machine. However, the average energy proportion of No.3 machine in the frequency range of 0~46.87 Hz was 24.32 percentage points higher than that of No.4 machine. The elevation effect was more obvious than the influence of explosion center distance. The high-frequency energy at the top relative to the bottom showed an elevation attenuation effect, and the low-frequency energy at the top relative to the bottom showed an elevation amplification effect.

Keywords: open-pit mine slope; blasting; frequency slice wavelet; vibration propagation law; energy of vibration; altitude effect

引用格式:陈泓,贾皓琦,黄永辉,张智宇. 基于FSWT算法的某露天矿山边坡爆破振动传播规律研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 29-40.

CHEN Hong, JIA Haoqi, HUANG Yonghui, ZHANG Zhiyu. Study on the propagation law of blasting vibration in an open-pit mine slope based on fswt algorithm[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 29-40.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn



通信作者简介:

张智宇, 1973年10月生, 教授、博士生导师, 从事工程及特种爆破、岩石爆破破碎等研究。昆明理工大学爆破新技术应用研究所所长, 中国爆破行业协会理事, 中国爆破行业专家库专家。主持科研项目30余项, 其中国家自然科学基金和省应用基础研究基金各1项。发表学术论文30余篇、SCI 6篇、EI 10篇。主编、参编教材4部, 授权专利11项, 国家软著2项。获中国爆破行业协会科技进步一等奖、云南省科技进步二等奖和三等奖各1项。