

DOI: 10.11779/CJGE201902020

# 毫秒延时爆破作用下岩体的受迫振动分析

陈建龙<sup>1, 2</sup>, 卢文波<sup>\*1, 2</sup>, 孙鹏昌<sup>1, 2</sup>, 陈明<sup>1, 2</sup>, 王高辉<sup>1, 2</sup>, 严鹏<sup>1, 2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 爆破振动的频谱特性分析是爆破振动控制的基础。通过白鹤滩水电站坝基爆破开挖实测爆破振动数据, 利用 MATLAB 进行频谱分析。结果表明, 在相同段别雷管的延迟爆破作用下, 利用多参考点复指数法处理爆区两侧的数据, 得到的爆破振动频率为两组谐振频率, 说明岩体的振动为受迫振动。且两组谐振频率的大小不相等, 通过数值计算与分析得到, 这是由于运动爆源在爆破地震波的传播过程中产生多普勒效应, 使谐振频率因震源相对运动而发生偏移。反之, 数据处理结果也同时验证了在考虑多普勒效应的情况下, 利用模态识别方法精确计算爆破振动谐振频率的可行性。据此, 以毫秒延时起爆产生的振动频率作为控制基频, 再利用多普勒效应产生的频率偏移, 实现爆源周围的频率定向调控及爆破振动主动控制。

**关键词:** 频率; 多普勒效应; 爆破振动

中图分类号: TU435; TV523 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)02-0397-08

作者简介: 陈建龙(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事爆破振动控制以及岩石动力学等方面的研究工作。E-mail: chenjianlong@whu.edu.cn。

## Forced vibration analysis of rock mass under millisecond delay blasting

CHEN Jian-long<sup>1,2</sup>, LU Wen-bo<sup>1,2</sup>, SUN Peng-chang<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, WANG Gao-hui<sup>1,2</sup>, YAN Peng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key

Labortory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Eduction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The frequency spectrum analysis of blasting vibration is the basis of blasting vibration control. Based on the blasting vibration data of the dam foundation blasting excavation of Baihetan hydropower station, the frequency spectrum analysis is carried out by means of MATLAB. Under the action of delayed blasting of the same segment, the data at both sides of the detonation zone are processed by the prony-reference complex exponential method. The results show that the vibration frequencies are two sets of resonant frequencies, and the vibration of rock mass is a forced one. The two groups of resonant frequencies are not equal. Through numerical simulation and analysis, it is found that the resonant frequency is shifted due to the Doppler effect which is generated by the relative motion of the seismic source. On the contrary, the data processing results also verify the feasibility of using the modal identification method to accurately calculate the resonance frequency of blasting vibration in the case of Doppler effect. Based on this, the vibration frequency of delayed detonation is used as the fundamental one, and then the frequency shift generated by the Doppler effect is used to achieve the directional frequency alteration and vibration control around explosive sources.

**Key words:** frequency; Doppler effect; blasting vibration

## 0 引言

爆破振动是工程爆破过程中产生的危害之一。由爆破而引起的地面的振动是一个非常复杂的过程, 其振动的振幅以及频率等都是随时间变化的。大量研究表明, 97%以上的建筑物实际损坏都是与爆破振动速度有关, 所以爆破振动产生的破坏与质点峰值振速 PPV 有较大的相关性。因此, 通常将质点峰值振动速度作为爆破振动的安全判据。在对爆破振动不断深入研究的过程中, 研究人员发现爆破振动产生的破坏除

了与 PPV 相关外, 与持续时间和频率等参数也有很大相关性<sup>[1]</sup>。中国在对爆破振动频率作了大量研究的基础上, 综合考虑国内外研究成果以及实践经验, 中国最新的国家标准《爆破安全规程》(GB6722—2014)提出, 对于地面建筑物, 将质点峰值振动速度和主振

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779190)

收稿日期: 2017-12-21

\*通讯作者 (E-mail: wblu@whu.edu.cn)

频率作为爆破振动安全的联合判据<sup>[2]</sup>。

在爆破振动作用下, 振动频率对建(构)筑物的破坏具有很大的影响。若爆破振动主振频率接近建(构)筑物的自振频率, 由于共振作用, 会导致产生更大的振动, 从而引起建(构)筑物的破坏<sup>[3]</sup>。以往爆破振动控制的方法大致有: 采用低威力、低爆速炸药, 采用微差爆破, 采用预裂爆破和开挖减振沟, 限制一次爆破的最大用药量<sup>[4]</sup>等。例如丰满水电站<sup>[5]</sup>新坝坝基在爆破开挖过程中, 为保证老坝体的安全, 在施工中采用了降低单响药量、微差起爆、预裂爆破以及打减震孔等方法, 这些方法一般为被动的控制方法。然而对于该工程中的重点保护对象, 如水电站老厂厂房, 则需要考虑主动控制的方法, 为保证老厂厂房运行安全, 在靠近厂房区域进行爆破作业时, 采用调整起爆延时时间的方法, 以避免爆破振动叠加, 从而达到减小质点振动速度的目的, 但这种主动控制也仅是定性的控制。而实际工程中, 实现爆破振动频率的定量调控对爆破振动主动控制具有重要应用价值。Blair<sup>[6]</sup>指出在忽略雷管延时存在误差的情况下, 如果相邻爆源之间的延迟起爆时间间隔都为  $t$ , 那么由此求得的振动频谱在每间隔  $1/t$  频率时就会有一个明显的峰值, 将延时起爆间隔与振动频谱定量联系起来。Andrews<sup>[7]</sup>和Anderson 等<sup>[8]</sup>的研究均得到: 改变炮孔延时间隔, 爆破振动的频率成分也随之改变。以上研究说明可以通过设计合理的延时起爆时间间隔改变爆破振动频谱, 但上述研究主要是诸多假定条件下的理论, 未考虑炮孔间距以及实际工程误差的影响, 也没有提出一种在考虑上述因素时的精确识别方法。Moore 等<sup>[9]</sup>从爆破谐波的角度并结合理论上的多普勒效应进行了拍振的控制。施富强<sup>[10]</sup>利用多普勒效应产生的振波频移建立了爆破振动动力响应控制的理论和方法, 并成功应用于拆除爆破。以上研究说明爆破地震波在传播过程中存在着多普勒效应的影响。而如何在考虑雷管延时误差以及多普勒效应存在的情况下精确地识别出爆破振动谐振频率, 需要提出一种切实可行的方法。

本文在已有研究的基础上, 利用模态识别中的多参考点复指数法, 结合白鹤滩水电站坝基爆破开挖实测爆破振动数据的处理与分析, 提出精确的爆破振动

谐振频率识别方法, 并据此进行爆破振动的主动控制。

## 1 坝基开挖爆破振动实测资料

白鹤滩水电站是金沙江下游干流河段梯级开发的第二个梯级电站, 地处四川省宁南县和云南省巧家县境内, 具有发电、防洪、拦沙、改善下游航运条件和发展库区通航等综合效益<sup>[11]</sup>。左岸坝基高程约600~570 m, 右岸坝基高程约585~541 m范围主要为柱状节理玄武岩。河床坝基采用完整性较好的角砾熔岩层作为基岩, 其中角砾熔岩层厚度为6.0~11.0 m, 地质分布如图1所示。

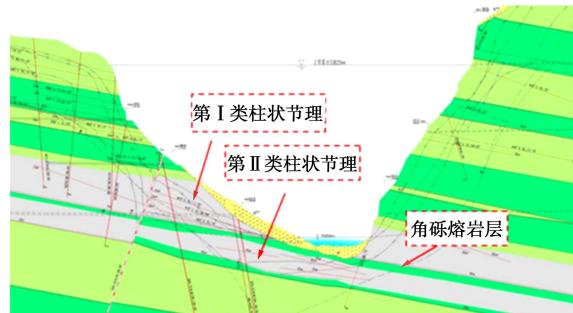


图1 白鹤滩水电站地质分布图

Fig. 1 Geological distribution of Baihetan hydropower station

2016年9月, 在白鹤滩水电站坝基保护层顶面梯段爆破开挖过程中, 完成了水平光面爆破试验, 试验共分为8段完成, 段间采用MS5接力, 所有雷管均采用双发起爆, 保证传爆可靠性。水平光爆试验的分区选址及现场布置情况如图2所示。



图2 光爆试验现场布置

Fig. 2 Site layout of smooth blasting tests

光爆试验测点布置及起爆网路简化示意图如图3所示。图中左侧为测点, 右侧为试验爆破区。试验时,

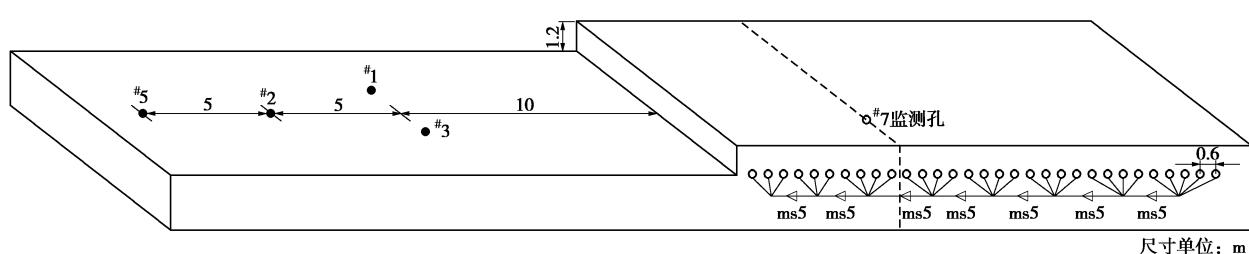


图3 光爆试验测点布置及起爆网路

Fig. 3 Layout of monitoring points and detonating network of smooth blasting test

各段从左向右依次起爆, 各段有三孔、四孔或五孔为一响, 试验采用的爆破参数如表1所示。

表1 光爆试验爆破参数

Table 1 Blasting parameters of smooth blasting tests

孔径 /mm	孔深 /m	药卷直径 /mm	孔距 /m	单孔药 量/kg	堵塞长 度/m
76	10	Φ32/70	0.6	2.2	1

如图3所示, 在光爆孔爆破时, 爆区侧向布置4个地表测点(<sup>#1</sup>, <sup>#2</sup>, <sup>#3</sup>, <sup>#5</sup>), 地表测点的传感器为三向传感器, 每个测点可测试水平切向, 水平径向和竖直向三个方向的质点振动速度。在爆区第三段至第四段之间布置<sup>#7</sup>监测点, <sup>#7</sup>监测点为孔内测点, 分别在光爆面以下1.0, 1.5, 2.0 m处布置孔内单向传感器, 均监测<sup>#7</sup>测点z方向的振动。

试验中测得的典型实测振动波形如图4所示。其中, 从<sup>#1</sup>测点、<sup>#2</sup>测点和<sup>#5</sup>测点的波形可以看出, 实测波形有很明显的8个峰值, 但<sup>#7</sup>测点却只有3个峰值, 这是由于<sup>#7</sup>测点布置在第三段炮孔和第四段炮孔之间, 在爆破过程中导致数据线被炸断, 所以只测到前三段爆破振动的数据。

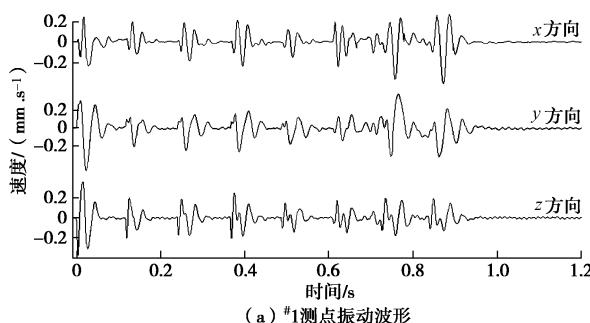
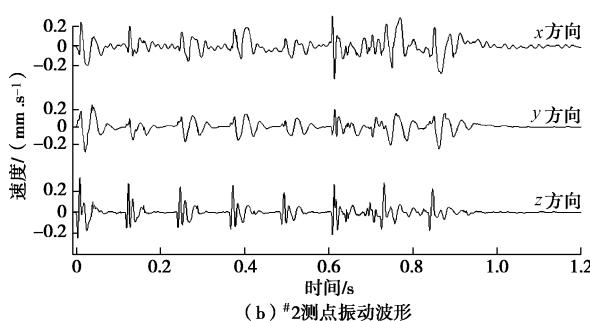
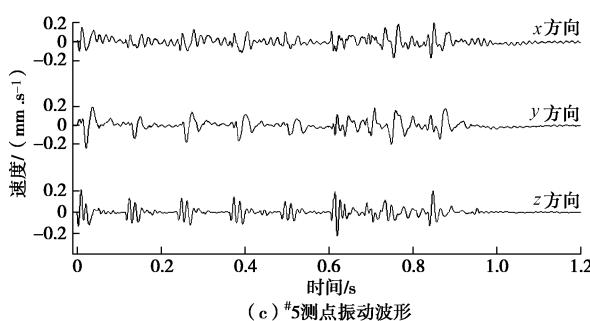
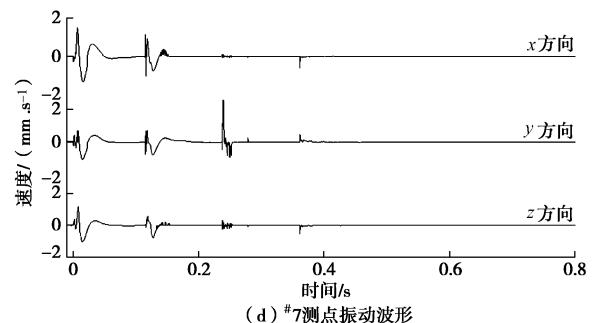
(a) <sup>#1</sup>测点振动波形(b) <sup>#2</sup>测点振动波形(c) <sup>#5</sup>测点振动波形(d) <sup>#7</sup>测点振动波形

图4 光爆试验实测波形

Fig. 4 Measured waveforms of smooth blasting tests

## 2 毫秒延时爆破振动的谐波频率

### 2.1 受迫振动的谐波响应

线性系统在简谐激励作用下的受迫振动, 是频率等于激励频率的简谐振动。但对于非线性系统, 线性系统中的叠加原理并不适用, 因为在非线性系统中各激励力之间存在着相互影响。对于在简谐激励作用下的非线性系统, 其受迫振动却不一定简谐振动。这是因为非线性系统的响应不仅包含频率与激励频率相等的谐波共振响应, 还包含有次谐波共振响应和超谐波共振响应, 其中当频率等于固有频率整数倍时为次谐波共振响应, 当频率等于固有频率分数倍时为超谐波共振响应<sup>[12]</sup>。

存在谐波响应时, 在模态参数的识别过程中, 会使谐波响应与结构的模态发生耦合, 导致识别的频率并不是系统的固有频率<sup>[13]</sup>。如果在周期激励中存在某些过大的谐波成分, 则在相应的频率处产生的响应也较大, 用这些响应数据进行模态参数识别得到的模态, 称为谐波模态<sup>[14]</sup>。本次白鹤滩水电站坝基光面爆破试验的激励是延时雷管为MS5时间间隔的周期激励, 所以用多参考点复指数法(PRCE)<sup>[15]</sup>法识别的结果应为谐波模态频率。

### 2.2 爆区侧向<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>和<sup>#5</sup>测点的数据处理结果及分析

对白鹤滩坝基光爆试验中<sup>#1</sup>测点、<sup>#2</sup>测点和<sup>#5</sup>测点x, y, z三个方向的实测数据进行处理, 实测数据先进行预处理<sup>[16]</sup>, 然后分别取3个测点的x方向、y方向以及z方向依次进行识别, 取每个方向响应较小的测点作为参考点, 利用自然激励技术(NExT)分别计算其他测点与该测点的互相关函数<sup>[17]</sup>, 作为识别输入数据。然后在MATLAB中用复指数法进行处理<sup>[18]</sup>, 得到结果后, 进行真实频率和虚假频率的辨别, 通常认为那些同时出现次数最多、稳定的结果可认为是真实的频率, 据此绘制相应的稳态图, 从中提取真实频率, 剔除虚假频率<sup>[15]</sup>。其中, 识别所得z方向典型稳态图如图5所示。

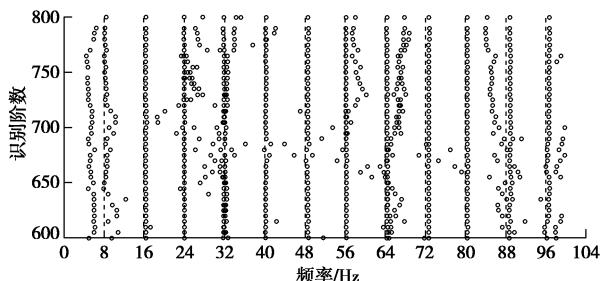


图5 模态识别稳态图

Fig. 5 Stabilization of modal identification

用同样方法计算出其他方向的频率,所得结果如表2所示。

表2 光爆试验数据处理结果

Table 2 Data processing results of smooth blasting tests (Hz)

阶数	x 方向			y 方向			z 方向		
	1-2	2-5	1-5	1-2	2-5	1-5	1-2	2-5	1-5
1	8.1	8.0	7.9	8.0	8.2	8.0	8.1	8.0	8.0
2	17.2	—	16.9	17.1	17.4	17.1	16.4	16.2	16.2
3	24.4	24.9	24.5	24.5	24.4	24.5	24.0	23.9	23.9
4	32.0	32.4	32.2	32.2	31.9	32.3	32.0	31.9	31.7
5	40.3	40.3	40.1	40.5	40.5	40.5	40.0	40.1	40.1
6	48.4	48.0	47.8	48.5	48.4	48.6	47.9	48.5	48.1
7	55.9	55.6	56.3	56.1	56.0	56.1	56.6	56.2	56.4
8	63.5	64.8	64.6	64.0	63.5	64.0	64.4	64.3	64.4
9	70.2	71.7	71.1	71.7	73.7	72.5	72.4	72.6	72.7

绘制其中<sup>#1</sup>测点的频谱图,如图6所示。显然从图6可以看出,在8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72 Hz处的频率较为稳定,可以认为是真实的谐振频率;从频谱图中也可以显然看出,幅值谱图在8Hz的整数倍处的有明显的突峰,其结果与用多参考点复指数法所得到的结果一致。

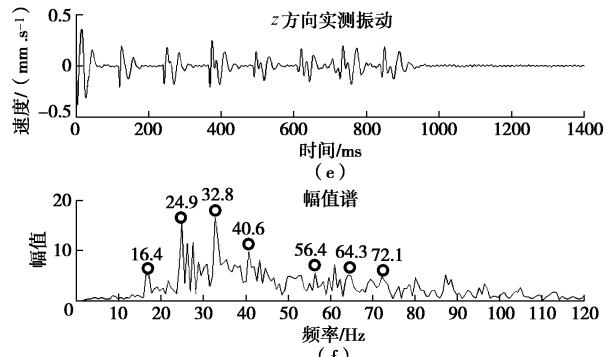
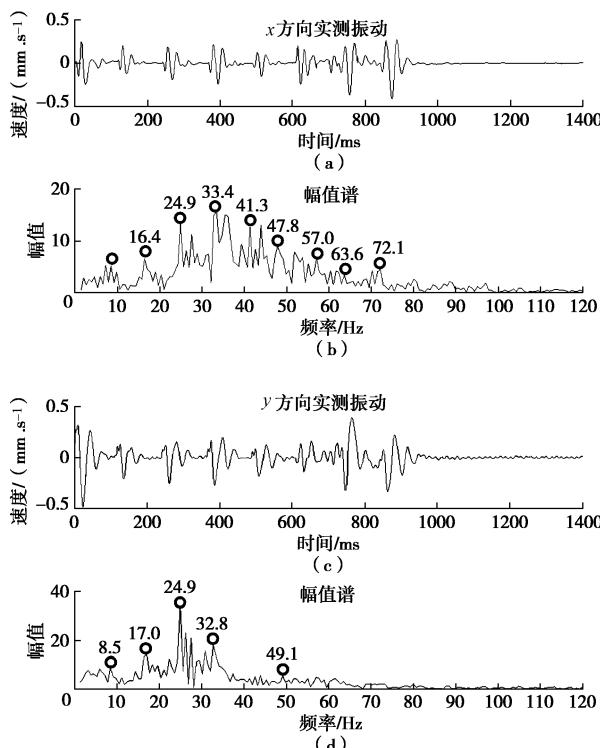
图6<sup>#1</sup>测点幅值谱图

Fig. 6 Amplitude spectra of point No. 1

所以,无论用模态识别的方法还是传统频谱图的方法,其所得到的谐波频率均约为8 Hz的整数倍,即坝基岩体在固定周期性外界激励的作用下发生了受迫振动。同时也说明,用模态识别的方法可以精确识别出毫秒延时爆破作用下岩体受迫振动的谐振频率。

### 2.3 毫秒延时爆破谐振频率的理论分析

对毫秒延时爆破谐振频率的理论分析,就是证明在相邻爆源间的延迟起爆时间间隔都为 $t$ 的情况下,其振动频谱在每间隔 $1/t$ 频率时就会有一个明显的峰值。这是一个求多段爆破总振动的频域解的问题。

对于单段爆破的振动频谱,各炮孔的振动波形的 $u_n(t)$ 的傅里叶变换为<sup>[19]</sup>

$$\tilde{u}_n(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u_n(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad , \quad (1)$$

式中,  $f$ 为频率,  $i$ 为虚数单位。式(1)可以简写为  
 $\tilde{u}_n(f) \supset u_n(t) \quad . \quad (2)$

由于傅里叶变换满足加法定理和位移定理,即<sup>[16]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N \tilde{u}_n(f) &\supset \sum_{n=1}^N u_n(t) , \\ \tilde{u}_n(f) e^{-i2\pi f t'} &\supset u_n(t-t') . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则多段爆破总振动的频域表达式为

$$\tilde{V}(f) = \sum_{n=1}^N p_n \tilde{u}_n(f) e^{-i2\pi f \tau_n} . \quad (4)$$

对多段爆破总振动的频域解作假定:假设控制点位于爆破远区,即可认为所有炮孔到控制点的距离均相等( $r_n=r$ ;  $h_n=h$ ),并假定所有炮孔的药量一致( $q_n=q$ ),则所有炮孔产生的爆破振动时程曲线均一致,为 $v(t)$ ,设其傅里叶变换为 $\tilde{v}(f)$ ,则式(4)可以化简为

$$\tilde{V}(f) = \tilde{v}(f) \sum_{n=1}^N e^{-i2\pi f \tau_n} . \quad (5)$$

假定各炮孔为理想延时(无误差),相邻起爆炮孔的微差时间间隔相同为 $\Delta\tau$ ,即 $\tau_n=(n-1)\Delta\tau$ ,则式(5)变为

$$\tilde{V}(f) = \tilde{v}(f) \sum_{n=1}^N e^{-i2\pi f(n-1)\Delta\tau} = \tilde{v}(f) \frac{1 - e^{-j2\pi f N \Delta\tau}}{1 - e^{-j2\pi f \Delta\tau}}. \quad (6)$$

令各段爆破振动波形  $v(t)$  总时长为  $t_s$ , 其功率谱密度为  $P_s(f) = |V(f)|^2 / t_s$ , 则多段爆破振动  $V(t)$  总时长为  $t_v = t_s + (N-1)\Delta\tau$ , 其功率谱密度为

$$P(f) = |\tilde{V}(f)|^2 / t_v = P_s(f) \left| \frac{1 - e^{-j2\pi f N \Delta\tau}}{1 - e^{-j2\pi f \Delta\tau}} \right|^2 (t_s / t_v), \quad (7)$$

转换得

$$P(f) = P_s(f) \frac{1 - \cos(2\pi f N \Delta\tau)}{1 - \cos(2\pi f \Delta\tau)} (t_s / t_v). \quad (8)$$

经过简单的三角变换, 得

$$P(f) = P_s(f) \frac{\sin^2(\pi f N \Delta\tau)}{\sin^2(\pi f \Delta\tau)} (t_s / t_v). \quad (9)$$

令  $S(f) = \frac{\sin^2(\pi f N \Delta\tau)}{\sin^2(\pi f \Delta\tau)}$ , 称  $S(f)$  为爆破振动功率谱因子, 该函数是关于  $f$  的周期函数, 其周期为  $1/\Delta\tau$ , 当  $f = n/\Delta\tau$  ( $n \in \mathbb{Z}^+$ ) 时, 函数  $S(f)$  取到最大值。因此说明, 若相邻起爆炮孔的微差时间间隔相同为  $\Delta\tau$ , 那么得到的爆破振动频谱每隔  $1/\Delta\tau$  频率均有一个明显的峰值。

### 3 多普勒效应引起的爆破振动谐振频率偏移

#### 3.1 爆区<sup>#7</sup>测点的振动分析

<sup>#7</sup>测点与爆区侧向<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>和<sup>#5</sup>测点的位置不同, 它位于爆破区内第三段至第四段之间的孔底, 前三段起爆时爆源依次靠近<sup>#7</sup>测点。

由于试验中<sup>#7</sup>测点只测到前三段的数据, 所以只取前三段的数据进行处理。首先对3个测点的实测数据进行单点的处理后, 取响应较小的测点作为参考点, 利用NexT法分别计算其他测点与该测点的互相关函数, 然后在MATLAB中用复指数法进行识别。其中以1.5 m处的测点为参考点, 以孔底1 m处的测点为计算点, 绘制的典型稳态图如图7所示。

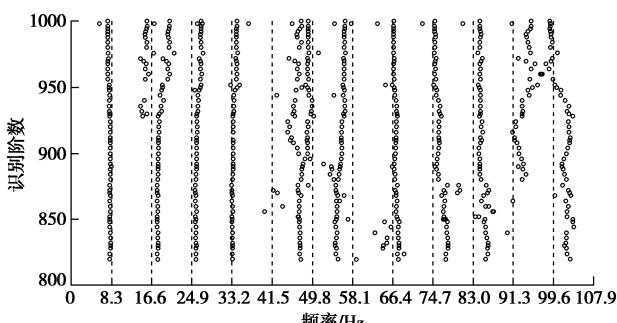


图 7 <sup>#7</sup>测点稳态图

Fig. 7 Stabilization of point No. 7

从图7中可以看出, <sup>#7</sup>孔内测点 $z$ 方向的数据处理的结果约为8.3 Hz的整数倍。

根据2.2节中的计算结果, 位于爆区侧向的<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>和<sup>#5</sup>测点得到的谐振频率为8 Hz的整数倍, 而位于爆区第三段至第四段之间的<sup>#7</sup>孔底测点得到的谐振频率约为8.3 Hz的整数倍, 大于8 Hz的整数倍。这是因为随着炮孔从左向右依次起爆, 爆源逐渐远离位于爆区侧向的<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>和<sup>#5</sup>测点, 而对于<sup>#7</sup>测点, 前三段的爆源则是逐渐靠近的, 因此, 由于爆破过程中爆源与测点的相对运动而发生了多普勒效应, 从而导致了爆源两侧谐振频率的偏移。

对上述过程进行进一步定量分析, 根据本次试验中的声波监测结果得爆破地震波的传播波速约为4000 m/s, 相邻两个爆源之间的平均距离为2.4 m, 爆区侧向的<sup>#1</sup>、<sup>#2</sup>和<sup>#5</sup>测点之间的距离为5 m, 如图3所示, 所以得到振动在相邻两爆源之间传播的时间为0.6 ms, 在测点之间的传播时间为1.25 ms, 雷管的延迟时间有误差, 从实测波形图可以得出MS5延时雷管的延迟时间间隔约为123.6 ms (包含了爆心距不同引起的延迟时间0.6 ms), 所以<sup>#1</sup>测点实际接收振动信号的间隔时间为124.8 ms, 所以谐振频率为8 Hz, 同理, 相邻两段光爆孔到孔底3个孔内测点的距离差均约为1.8 m, 如图8所示, 爆区<sup>#7</sup>孔内测点实际接收到的爆破振动信号的间隔时间约为122.5 ms, 所以求得其谐振频率为8.17 Hz。这与MATLAB处理得到的爆区<sup>#7</sup>测点的结果之间存在误差, 这是因为<sup>#7</sup>测点本身位于爆区, 爆破作用对传播介质的破坏作用较大, 影响了爆破地震波的传播, 而实际测得的<sup>#7</sup>测点的振动数据的质量也较差, 而且在实际爆破施工过程中还存在其他各种偶然误差, 使得计算结果与数据处理结果之间存在一定的误差。为了消除这些误差, 下面用数值模拟方法对这一规律进行更为精确的验证。

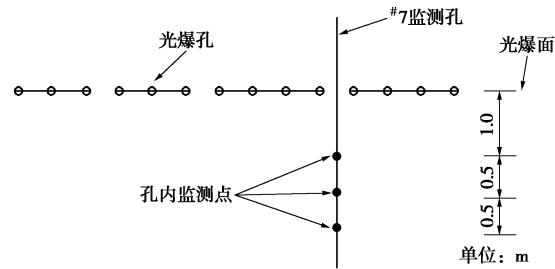


图 8 孔内测点布置图

Fig. 8 Layout of monitoring points in hole

#### 3.2 多普勒效应数值模拟分析

建立ANSYS模型如图9所示, 岩体材料采用弹塑性模型, 用等效爆炸荷载代替炸药, 将爆炸荷载简化为三角形荷载<sup>[20]</sup>, 5个炮孔从左向右依次间隔起爆, 间隔时间为30 ms, 炮孔间距为3.4 m, 总计算时间取

为200 ms。并在爆源周围不同方向处布置8个监测点,作为计算点。

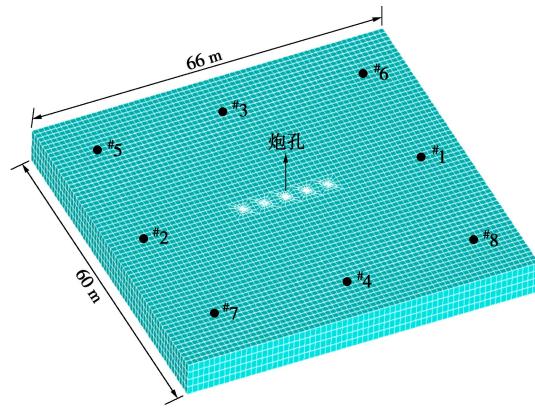
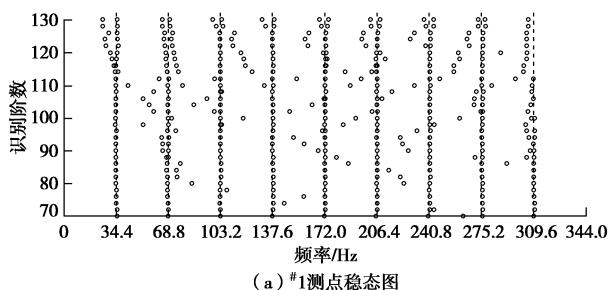


图9 ANSYS 模型及测点布置

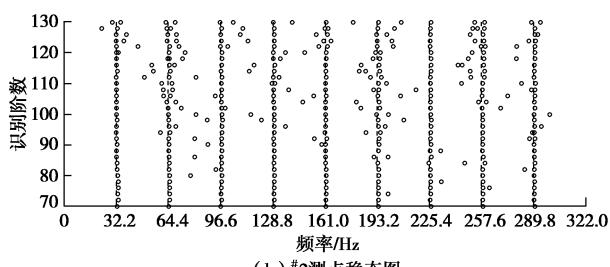
Fig. 9 ANSYS model and layout of monitoring points

用ANSYS/Ls-dyna计算完成后,输出8个计算点及附近参考点的振动数据,用PRCE法分别进行数据处理,其中,所得#1, #2, #3, #5, #6的稳态图如图10所示。

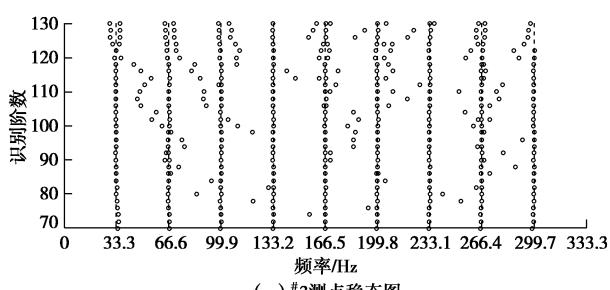
由于计算模型关于炮孔上下对称,所以炮孔下方#4, #7, #8分别与#3, #5, #6的计算结果一致,实际处理结果也证实了这一点。从图10稳态图中可以看出,各测点所得谐振频率都是某一数值的整数倍。



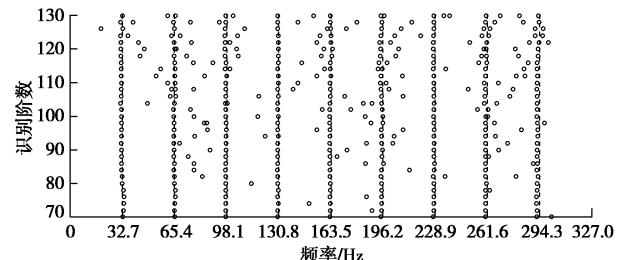
(a) #1测点稳态图



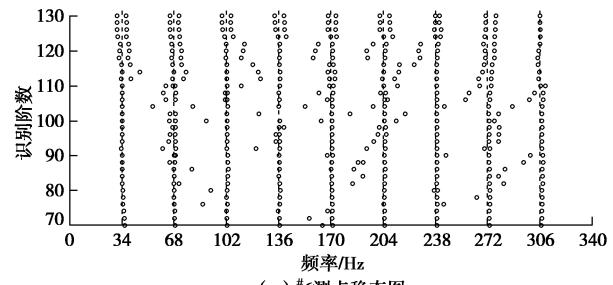
(b) #2测点稳态图



(c) #3测点稳态图



(d) #5测点稳态图



(e) #6测点稳态图

图10 模态识别稳态图

Fig. 10 Stabilization of modal identification

取8个测点计算所得谐振频率的最小值,结果如表3所示。

表3 各测点的谐振频率

Table 3 Resonant frequencies of all points (Hz)

测点	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
频率	34.4	32.2	33.3	33.3	32.7	34.0	32.7	34.0

对于沿炮孔起爆方向上的#1测点和#2测点, #1测点的谐振频率为34.4 Hz的整数倍, 其值大于33.3 Hz, 而#2测点的谐振频率为32.2 Hz的整数倍, 其值小于33.3 Hz, 这是由于在爆破过程中, 除了因存在孔间延时30 ms而产生的33.3 Hz的频率外, 还有因多普勒效应存在而产生的频率偏移。由于爆源依次向远离#2测点的方向起爆, 即测点在运动的振源后面, 其波长变得较长, 所以#2测点处的谐振频率变低; 同样, 由于爆源依次向靠近#1测点的方向起爆, 即测点在运动的振源的前面, 其波长变得较短, 所以#1测点处的谐振频率变高; 对该过程定量分析有, 假设在该介质条件下的P波波速为3300 m/s, 相邻两个爆源之间距离为3.4 m, 所以得到振动在相邻两爆源之间传播的时间为1.0 ms, 所以#1测点实际接收振动信号的间隔时间为29 ms, 所以谐振频率为34.4 Hz, 同理, #2测点实际接收振动信号的间隔时间为31 ms, 所以谐振频率为32.2 Hz, 与PRCE法处理得到的结果吻合;

而对于#3, #4测点, 在距离爆源较远处, 测点相对各炮孔的距离几乎相等, 所以就没有振源相对测点的相对运动, 即爆破地震波传播过程中不发生多普勒效应, 因此其谐振频率只有因孔间延时30 ms而产生的频率, 即33.3 Hz的整数倍。

对于#6和#8测点, 由于在爆源右侧, 所以爆源有

相对靠近测点的趋势, 但该趋势较#1测点小而较#3测点大, 故其值介于33.3~34.4 Hz。同理, #5测点和#7#测点的谐振频率介于32.2~33.3 Hz。

#### 4 爆破振动频率调控

根据3.2节数值模拟结果与分析可得, 爆源周围不同方向处的谐振频率大致服从一个不规则的“椭圆”分布, 由表3数据可绘制其形状如图11所示。

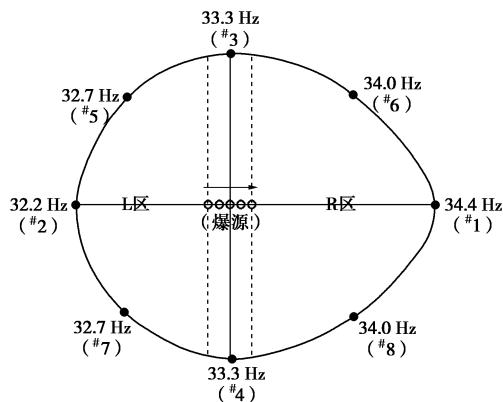


图 11 频率椭圆

Fig. 11 Frequency ellipse

由频率“椭圆”可以清楚看到, 以与炮孔起爆方向垂直的竖线 (#3, #4测点连线) 为分界线, 爆源右侧R区的谐振频率大于33.3 Hz的整数倍, 但小于34.4 Hz的整数倍, 而位于炮孔轴线 (爆源与#1测点连线) 方向上的谐振频率等于最大值34.4 Hz的整数倍; 爆源左侧L区的谐振频率大于32.2 Hz的整数倍, 但小于33.3 Hz的整数倍, 而位于炮孔轴线 (爆源与#2测点连线) 方向上的谐振频率等于最小值32.2 Hz的整数倍; 但需要注意的是, 只有过炮孔轴线起爆方向的谐振频率与计算点到爆源的距离无关, 而对于图11虚线间的区域, 当计算点距离爆源较近时, 由于波程差的正负会发生变化, 使计算存在误差, 所以只有当计算点距离爆源较远时, 其波程差相对炮孔距会很小, 则误差可忽略不计。而其他区域方向处的谐振频率, 由几何知识可知, 其误差也很小, 可忽略不计。

因此, 利用在固定周期荷载激励下产生的谐振频率, 结合运动爆源产生的多普勒效应, 可以得到爆源周围各个方向处的谐振频率, 而利用模态识别方法可有效识别出这个谐振频率。

在实际爆破施工中, 根据爆源附近建筑物的要求或施工要求, 对爆源的爆破推进方向、炮孔距和起爆延迟时间进行调整, 绘制合理的频率“椭圆”, 从而实现对爆源周围的频率的定量调控, 避免出现因与周围建筑物固有频率接近而导致的共振。因此, 针对大规模起爆网路下的爆破振动频率控制, 一方面需要考

虑毫秒延时爆破振动频率的控制, 另一方面需要考虑多普勒效应引起的频率偏移控制。设计大规模起爆网路时, 采用合理的起爆时差、炮孔间距以及爆破推进方向将爆破振动的频率峰值偏移到安全数值, 避开重点保护对象的自振频率, 达到爆破振动主动控制的目的。

#### 5 结 论

通过对白鹤滩坝基光面爆破试验数据的处理与分析, 结合数值模拟对多普勒效应的计算验证, 主要得出以下3点结论。

(1) 相同段别雷管的延时爆破作用下, 岩体产生受迫振动, 用模态识别的方法对其振动数据进行处理可以得到其谐振频率。

(2) 段间延时爆破过程中, 由于爆源与测点之间存在相对运动, 使爆破地震波在传播过程中发生了多普勒效应, 由于多普勒效应的存在, 使处理得到的谐振频率一侧偏大而另一侧偏小。

(3) 结合模态识别的处理方法和多普勒效应可以绘制出爆源周围的频率“椭圆”, 据此, 可以精确地实现爆源周围的频率定向调控和以频率为依据的爆破振动的主动控制。

本文对于毫秒延时爆破作用下岩体受迫振动的分析过程中, 仅考虑了一组相同段别延时雷管作用下产生的爆破谐波, 多组不同段别延时雷管作用下的爆破谐波的爆破振动频谱控制以及谐振频率与PPV的具体联系尚需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 张志毅, 杨年华, 卢文波, 等. 中国爆破振动控制技术的新进展[J]. 爆破, 2013, 30(2): 25~32. (ZHANG Zhi-yi, YANG Nian-hua, LU Wen-bo, et al. Progress of blasting vibration control technology in China[J]. Blasting, 2013, 30(2): 25~32. (in Chinese))
- [2] GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 2014. (GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. 2014. (in Chinese))
- [3] 汪旭光, 于亚伦. 关于爆破震动安全判据的几个问题[J]. 工程爆破, 2001, 7(2): 88~92. (WANG Xu-guang, YU Ya-lun. On several problems of safety criterion for blasting vibration [J]. Engineering Blasting, 2001, 7(2): 88~92. (in Chinese))
- [4] 冯叔瑜. 城市控制爆破[M]. 2 版. 北京: 中国铁道出版社, 1996. (FENG Shu-yu. City controlled blasting[M]. 2nd ed. Beijing: China Railway Publishing House, 1996. (in Chinese))

- [5] 石岩峰. 丰满水电站新坝坝基爆破控制技术应用研究[J]. 人民长江, 2016, 47(22): 68 - 71. (SHI Yan-feng. Study on application of blasting control techniques in new dam foundation construction of Fengman Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2016, 47(22): 68 - 71. (in Chinese))
- [6] BLAIR D P. The measurement, modelling and control of ground vibrations due to blasting[C]// Second International Symposium Rock Fragmentation by Blasting. Colorado, 1987.
- [7] ANDREWS A B. Design criteria for sequential blasting[C]// Proceeding of the Seventh Conference on Explosives and Blasting Techniques. New York, 1980: 173 - 192.
- [8] ANDERSON D A, WINZER S R, RITTER A P. Blast design for optimizing fragmentation while controlling frequency of ground vibration[C]// Proceedings of the 8th Conference on Explosives and Blasting Technique. New Orleans, 1982.
- [9] MOORE A J, RICHARDS A B, LAING T J. Blasting harmonics and controlling peak particle velocity[C]// 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Sydney, 2015.
- [10] 施富强. 爆破振动频率调控技术研究与应用[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 54 - 59. (SHI Fu-qiang. Research and application of blasting vibration frequency control technology[J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 54 - 59. (in Chinese))
- [11] 付文宣, 贺昌海, 费文才, 等. 白鹤滩水电站导流洞进出口围堰残埂对导流洞泄流能力的影响[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 115 - 118. FU Wen-xuan, HE Chang-hai, FEI Wen-cai, et al. Investigation of influence on discharge of Baihetan diversion tunnel located in its inlet & outlet by residual cofferdam[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(9): 115 - 118. (in Chinese))
- [12] 郭少进. 索-梁结构非线性振动分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. (GUO Shao-jin. Nonlinear oscillations analysis of the cable-stayed beam[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [13] 李怀鹏. 运行模态分析中周期性激励识别方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010. (LI Huai-peng. The investigation of methods of harmonic excitation identification in operational modal analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese))
- [14] BRINCKER R, ANDERSEN P, MØLLER N B. An indicator for separation of structural and harmonic modes in output-only modal testing, #286[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000, 2(1): 45 - 52.
- [15] 章国稳, 马婧华, 陈卓. 基于模态相似指数的 PRCE 虚假模态剔除[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 493 - 498, 592. (ZHANG Guo-wen, MA Jing-hua, CHEN Zhuo. Rejection of spurious modes obtained from PRCE based on modal similarity index[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 493 - 498, 592. (in Chinese))
- [16] 李鹏, 卢文波, 乔新明, 等. 岩石高边坡开挖爆破振动信号处理与振动响应分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 401 - 405. (LI Peng, LU Wen-bo, QIAO Xin-ming, et al. Signal processing and response analysis of blasting vibration induced by high rock slope excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 401 - 405. (in Chinese))
- [17] 续秀忠, 华宏星, 陈兆能. 基于环境激励的模态参数辨识方法综述[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 1 - 5. (XU Xiu-zhong, HUA Hong-xing, CHEN Zhao-neng. Review of modal identification method based on ambient excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(3): 1 - 5. (in Chinese))
- [18] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (WANG Ji, HU Xiao. Applications of MATLAB in vibration signal processing[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2006. (in Chinese))
- [19] BRACEWELL R N. The fourier transform and its applications[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [20] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53(7): 129 - 130. (in Chinese)