

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.01.009

爆破地震波传播过程中的多普勒效应研究^{*}

陈建龙^{①②}

①中铁第一勘察设计院集团有限公司(陕西西安,710043)

②陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院)(陕西西安,710043)

[摘 要] 为研究爆破施工中毫秒延时爆破作用的频谱特性,采用理论推导和数值模拟相结合的方法进行分析与计算。利用模态识别方法对炮孔间隔时间为25 ms的延时爆破振动数据进行频谱特性分析,得到爆源左、右两侧的爆破振动频率分别约为35 Hz和45 Hz的整数倍。进一步分析可得,这是由于爆破地震波在传播过程中发生多普勒效应,导致不同方向上的频率发生偏移,使得爆源两侧的爆破振动频率值存在差异。据此,实际爆破施工中可以利用多普勒效应进行爆破振动频率的调控。

[关键词] 多普勒效应;爆破地震波;频谱分析

[分类号] TD235

Doppler Effect in Propagation of Blasting Seismic Wave

CHEN Jianlong^{①②}

① China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710043)

② Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI) (Shaanxi Xi'an, 710043)

[ABSTRACT] In order to study the spectrum characteristics of millisecond delay blasting in blasting construction, theoretical derivation and numerical simulation were combined to analyze and calculate. Modal identification method was used to analyze the frequency spectrum characteristics of the time-delay blasting vibration data with the time interval of 25 ms and the blasting vibration frequency on the left and right sides of the blasting source is about an integer multiple of 35 Hz and 45 Hz, respectively. Further analysis shows that it is due to Doppler effect of blasting seismic wave in the propagation process, which causes the frequency deviation in different directions, resulting in the difference of blasting vibration frequency values on both sides of the blasting source. Therefore, Doppler effect can be used to control the blasting vibration frequency.

[KEYWORDS] Doppler effect; blasting seismic wave; spectral analysis

引言

爆破施工过程中产生的爆破振动对保留岩体和附近建筑物均有不利的影响;因此,有必要对爆破振动的控制进行相关的研究。而爆破振动主要是由介质中爆破地震波的传播而引起的。

爆源参数和岩体特性对爆破地震波传播均有很大的影响^[1],这就决定了爆破地震波在空间和时间上均具有随机性^[2]。同时,由于爆破振动频谱曲线的范围是连续的,说明其包含的频率也是连续的^[3]。尽管频谱分布连续,但其幅值却差异很大,而幅值大小的差异代表着该频率所携带能量的不

同。因此,爆破振动频率与爆破振动产生的破坏效应应具有密切的联系。基于这种联系,为了进一步控制爆破振动及其产生的破坏效应,有必要针对爆破振动频率进行研究。

爆破地震波是一种复杂的复合机械波。而波在传播过程中存在着多普勒效应。因此,在理论上,爆破地震波在传播过程中同样存在着多普勒效应^[4]。

目前,国内外在地震研究领域对多普勒效应已有相关的研究和应用。李启成等^[5]利用多普勒效应的原理提出了地震作用下断层滑动速度的方法,并以四川汶川地震的余震为例验证了该方法的可行性。刘瑞丰等^[6]以汶川地震198个全球地震站检测的数据为背景,研究得到地震波传播时,由于多普勒

^{*} 收稿日期:2020-03-18
第一作者:陈建龙(1993 -),男,硕士,助理工程师,主要从事地下空间及岩土工程方面的研究。E-mail:chenjianlong@whu.edu.cn

效应导致震源东北向的地震动有所加强,而西南方向有所减弱。许力生等^[7]以青海玉树地震为背景,通过地震波反演得到震源破裂模型,表明破裂过程产生的多普勒效应加重了地震的破坏性。施富强^[8]基于对爆破振动频率的研究,成功实现利用多普勒效应进行频率控制,达到拆除爆破的目的。

上述研究从理论上指出地震波传播中存在多普勒效应的影响,但在爆破振动方面的应用研究较少,也没有对多普勒效应进行具体的试验研究论证,缺少其与振动频率之间关系的研究。

爆破振动具有随机性和复杂性。因此,直接验证多普勒效应对爆破振动频率的影响较为困难。但是,可以利用毫秒延时起爆条件下爆破振动频谱结构的特殊性来研究。在毫秒延时起爆时,产生的爆破载荷可以等效看做是作用在岩体上的外界强迫激励^[9]。Blair^[10]指出,毫秒延时起爆时,若相邻爆源的起爆时间均相差 t ,则得到的频谱曲线的峰值均出现在 t^{-1} 及其整数倍处。因此,可根据延时爆破情况下起爆间隔时间和产生的振动频率在数值上的这种特殊关联,通过合理设计起爆时间得到预期的爆破振动频率范围。

基于已有的研究,通过对爆破振动频谱的分析与计算,利用模式识别方法进行数据处理,结合数值模拟,研究爆破地震波传播中的多普勒效应及其对爆破振动频谱的影响。

1 毫秒延时起爆条件下的爆破振动频谱结构

1.1 毫秒延时爆破的振动频谱

毫秒延时爆破的振动频谱与间隔起爆时间具有相关性,具体公式推导如下。

单孔起爆的振动频谱由傅里叶变换^[11]求得:

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

式中: f 代表频率; $u_n(t)$ 为各炮孔的振动波形; $\tilde{u}_n(f)$ 为第 n 个孔爆破振动信号的傅里叶变换; t 为时间。

变换式(1)形式得

$$\tilde{u}_n(f) \supset u_n(t). \quad (2)$$

傅里叶变换的基本定理:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \tilde{u}_n(f) \supset \sum_{n=1}^N u_n(t); \\ \tilde{u}_n(f) e^{-i2\pi ft'} \supset u_n(t-t'). \end{cases} \quad (3)$$

则多段爆破总振动的频域表达式为

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

假定多孔起爆时其控制点位于爆破远区,则该点到各炮孔的距离可以看成是相等的($r_n = r$; $h_n = h$),且当各炮孔药量相等时($q_n = q$),其爆破振动所得波形一样,均为 $v(t)$,该波形的傅里叶变换假设为 $\tilde{v}(f)$,则式(4)可以化简为

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

当各相邻炮孔为理想延时(无误差)起爆时,其微差延时间隔可认为是相等的,均为 $\Delta\tau$,即 $\tau_n = (n-1)\Delta\tau$,则式(5)变为

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

设每个炮孔起爆产生的时程曲线 $v(t)$ 的时间是 t_s ,得到单个炮孔的功率谱密度 $p_s(f) = |\tilde{V}(f)|^2 / t_s$,则多段 $V(t)$ 的总时间 $t_v = t_s + (N-1)\Delta\tau$,其总的功率谱密度为

$$p(f) = \frac{|\tilde{V}(f)|^2}{t_v} = p_s(f) \left| \frac{1 - e^{-i2\pi fN\Delta\tau}}{1 - e^{-i2\pi f\Delta\tau}} \right|^2 \cdot \frac{t_s}{t_v}. \quad (7)$$

转换得

$$p(f) = p_s(f) \frac{1 - \cos(2\pi fN\Delta\tau)}{1 - \cos(2\pi f\Delta\tau)} \cdot \frac{t_s}{t_v}. \quad (8)$$

经过简单的三角变换,得

$$p(f) = p_s(f) \frac{\sin^2(\pi fN\Delta\tau)}{\sin^2(\pi f\Delta\tau)} \cdot \frac{t_s}{t_v}. \quad (9)$$

令 $S(f) = \sin^2(\pi fN\Delta\tau) / \sin^2(\pi f\Delta\tau)$,功率谱因子 $S(f)$ 是一个周期为 $(\Delta\tau)^{-1}$ 的周期函数,其自变量为 f ,当 $f = n / \Delta\tau$ ($n \in Z^+$)时,函数 $S(f)$ 最大。因此,若炮孔以时间差 $\Delta\tau$ 依次起爆,由其产生的振动波形经过FFT变换得到的振动频谱的峰值均出现在 $(\Delta\tau)^{-1}$ 及其整数倍处。

1.2 模式识别在爆破振动数据处理中的应用

模式识别方法包括频域法和时域法。频域法需要对数据进行傅里叶变换,从而在频域范围识别参数;而时域法识别时,通常不需要激励载荷数据,只需对结构响应数据进行处理即可得到模式参数,而且对结构的自由响应和强迫振动均可以进行处理。

由于爆破载荷对岩体的作用是一种外界瞬态激励,一般其激励载荷大小很难直接获得,但可以很容易测得其爆破振动的响应数据;因此,可以利用模式识别的时域法来求得系统的模式参数,采用ARMA时序分析法^[12]进行爆破振动数据的处理。基于Matlab程序,对爆破振动数据利用ARMA法进行处理。根据ARMA法数据处理的要求,不仅需要监测计算测点的振动数据,同时还需要监测测点附近某参考点的数据,对测点和参考点的数据进行相关函

数的运算,可以得到该测点的脉冲响应函数。然后,以该响应函数为 ARMA 法的输入数据进行模态参数识别。ARMA 法作为时域法的一种,同样具有时域法不能消除噪声信号干扰的缺点。因此,还需进一步对所得结果剔除噪声信号,提取有效信号。

2 毫秒延时爆破中的多普勒效应

2.1 爆破地震波传播中的多普勒效应

多普勒效应^[13]是当振动波源与测点之间存在相对运动时,测点实际接收到的频率并不等于波源实际频率的现象。

根据多普勒效应的定义,进行毫秒延时爆破作业时,爆源依次起爆,而监测点一般是静止不动的。因此,爆破过程中会有多普勒效应的现象。同样在该过程中,测点是静止的,而爆源是相对测点移动的。具体原理如图 1 所示。

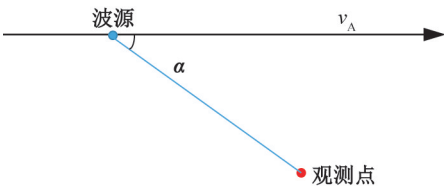


图 1 波源做相对运动
Fig.1 Relative motion of wave sources

如图 1 所示,假设观测点到波源连线和波源运动矢量方向之间的夹角为 α ,该波源自身波速为 v ,波的频率为 f_0 。在波源相对于测点以速度 v_A 运动而测点静止不动时,该测点接受到的频率 f 为:

$$f = \frac{v}{v - v_A \cos \alpha} f_0。$$
 (10)

对式(10)进一步分析,当观测点到波源连线和波源运动矢量方向之间的夹角 $\alpha < 90^\circ$ 时, $\cos \alpha > 0$, 则 $f > f_0$,即测点接收到的频率 f 大于波源的固有频率 f_0 ;当夹角 $\alpha = 90^\circ$ 时, $\cos \alpha = 0$, 则 $f = f_0$,即测点接收到的频率 f 等于波源自身的固有频率 f_0 ;当夹角 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ 时, $\cos \alpha < 0$, 则 $f < f_0$,即测点接收到的频率 f 小于波源自身的固有频率 f_0 。

根据多普勒效应原理,波传播时测点接收的频率会因爆源与测点间的相对运动而产生变化。爆破地震波传播过程中同样会存在由多普勒效应导致的频率偏移。由于爆破地震波包含的成分是非常复杂且丰富的,这种情况下很难明显地发现多普勒效应导致频率偏移的规律。但是,在毫秒差起爆情况下,爆破振动频率表现出一定的规律性,即当炮孔起爆

间隔时间为 $\Delta \tau$ 时,其爆破振动频谱曲线的峰值均大约相隔 $(\Delta \tau)^{-1}$ 。因此,可利用该规律进行多普勒效应导致爆破振动频率偏移的验证和分析。下面利用数值模拟进行验证。

2.2 多普勒效应的数值模拟验证

为验证毫秒延时爆破过程中存在着多普勒效应,并分析其对爆破振动频率的影响,建立 ANSYS 模型,如图 2 所示。利用其动力有限元分析模块 LS-DYNA 进行计算处理。图 2 模型尺寸为 $50\text{ m} \times 15\text{ m} \times 5\text{ m}$,炮孔直径取 0.6 m ,各炮孔间距 10 m 。爆破载荷用理想的三角形载荷模型来代替,3 个炮孔以 25 ms 的间隔时间从左往右依次起爆。为了使爆破地震波传播时不出现波的反射和折射现象,在模型周围设置无反射边界。

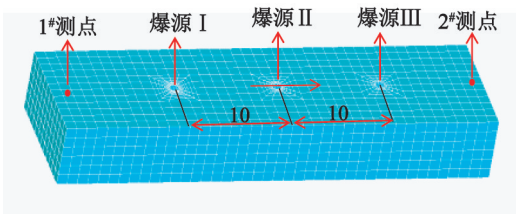


图 2 ANSYS 模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of ANSYS model

岩体采用弹塑性模型材料,在 ANSYS 中通过设置关键词 Mat_Plastic_Kinematic 来实现,相关材料参数如表 1 所示。在爆源轴线两侧布置 2 个监测点,记录其振动数据。

表 1 模型材料参数
Tab.1 Model material parameters

弹性模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	屈服应力/ MPa	切变模量/ GPa
45.0	2 700	0.25	75.0	13.0

上述模型计算完成后,输出所布置测点处的振动数据,结果如图 3 所示。

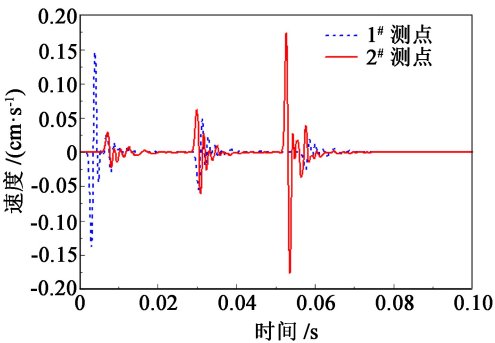


图 3 ANSYS 模型各测点的爆速曲线
Fig.3 Detonation velocity curves of each measuring point in ANSYS model

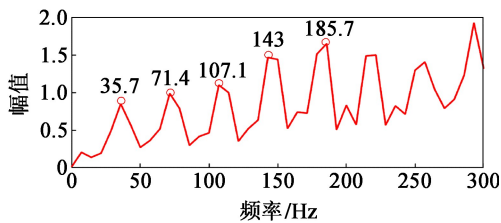
从图 3 可以看出,两测点波形均有 3 个明显峰值;并且,随爆源 I 向爆源 III 方向依次起爆。由于炮孔逐渐靠近 2#测点而逐渐远离 1#测点,因此,靠近爆源 I 的左侧 1#测点的各峰值依次减小,而靠近爆源 III 的右侧 2#测点的各峰值依次增大。输出图 3 曲线的振动数据,并用 ARMA 法进行处理,识别得到爆破振动频率结果,如表 2 所示。

表 2 各测点的振动频率

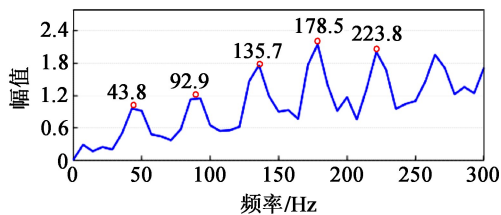
Tab. 2 Vibration frequency at each measuring point

测点	峰值 I	峰值 II	峰值 III
1#	35.3	75.2	108.1
2#	45.7	90.9	132.8

同时,利用传统 FFT 变换处理数据,求得 1#测点和 2#测点的频谱曲线,如图 4 所示。



(a) 1#测点



(b) 2#测点

图 4 各测点的频谱曲线

Fig. 4 Spectrum curves at each measuring point

1#测点的谐振频率约为 35 Hz 的整数倍,而 2#测点的谐振频率约为 45 Hz 的整数倍。这证明了当炮孔以 Δt 时间差依次起爆时,由其得到的振动频谱曲线的峰值均出现在某一数值的整数倍处。本次数值模拟采用的相邻爆源间的延迟起爆时间间隔都为 0.025 m,其谐振频率应为 $1/0.025 = 40$ Hz 的整数倍。但计算结果表明,炮孔一侧大于 40 Hz,而另一侧小于 40 Hz。这是由于爆破地震波在传播时存在的多普勒效应引起了两侧爆破谐振频率的偏移。具体分析可知,爆源从左向右依次起爆,逐渐靠近位于爆区右侧的 2#测点,即爆源运动方向与爆源-测点连线方向所成的夹角 $\alpha < 90^\circ$ 时, $\cos \alpha > 0$, 则 $f > f_0$, 即实际传播到测点的频率 f 大于波源自身的频率

f_0 ;反之,爆源逐渐远离 1#测点,则实际传播到测点的频率 f 小于波源自身的频率 f_0 。

2.3 多普勒效应引起的爆破振动频率偏移分析

1#测点和 2#测点位于炮孔起爆方向上。其中,1#测点的谐振频率为 35 Hz 的整数倍,而 2#测点的谐振频率为 45 Hz 的整数倍;前者小于 40 Hz,而后者大于 40 Hz。对结果按照式 (10) 进行计算。其中,1#测点 $\alpha = 180^\circ$,2#测点 $\alpha = 0^\circ$,爆源相对于测点的运动速度 $v_A = 10/0.025 = 400$ m/s,爆源自身的频率 $f_0 = 40$ Hz,假设爆破弹性纵波在介质中的传播速度 $v = 3\,300$ m/s。由此求得 1#测点和 2#测点的频率值与数值计算得到的值几乎完全吻合。如图 5 所示。

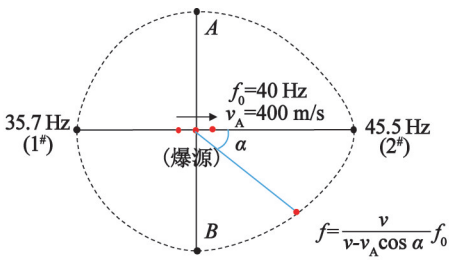


图 5 多普勒效应频移机制

Fig. 5 Frequency shift diagram in Doppler effect

因此,多段延时爆破振动的频谱一方面包括爆源自身延时起爆的频率,另一方面还包括因爆源相对测点运动而产生的频率偏移;毫秒延时起爆情况下爆源周围任意方向处的频率可通过多普勒原理的公式计算得到。特殊地,对于垂直于炮孔轴线(图 5 中 AB 线)的两侧, $\alpha = 90^\circ$, 得到 $f = f_0$, 即该处没有多普勒效应产生的频率偏移。

3 讨论

针对上述计算结果,从时间角度来看,当不考虑炮孔间延迟,即假定炮孔均在空间同一位置处,则其爆破振动频率为 $1/0.025 = 40$ Hz;而实际情况下,各炮孔间存在一定距离,爆破地震波在该段距离传播需要时间,因此,实际到达测点的时间间隔不仅包括炮孔自身 0.025 m 的时间,还包括孔间传播产生的时间,具体为炮孔间距与波速的比,即 $10/3\,300 = 0.003$ s。1#测点实际接收到振动信号的时间间隔为 0.028 m,而 2#测点则为 0.022 s,计算得到其频率与多普勒效应原理的计算结果一致。因此,在不考虑爆源相对运动产生多普勒效应的情况下,各炮孔以 t 时间差依次起爆时,由其得到的振动频谱曲

线的峰值均出现在 t^{-1} 及其整数倍处。而在考虑爆源相对测点运动引起多普勒效应情况下,其振动频谱曲线的峰值均出现在 $(t \pm t_1)^{-1}$ 及其整数倍处。其中, t_1 为孔间传播延时。

4 结 论

通过对爆破振动传播过程中的多普勒效应的分析与研究,主要得到以下几点结论:

- 1) 爆破地震波在传播过程中存在多普勒效应;
- 2) 多段延时爆破振动的频谱一方面包括爆源自身延时起爆的频率,另一方面还包括因爆源相对测点运动引起多普勒效应而产生的频率偏移;
- 3) 在爆源不同方向处,多普勒效应对爆破振动频率的偏移量大小也不同,与起爆方向同向一侧最大,反向一侧最小。

参 考 文 献

- [1] 李顺波,杨军,李长军. 基于精确延时的基坑开挖爆破振动控制研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(6): 9-14.
LI S B, YANG J, LI C J. Control of blasting vibration in foundation pit excavation based on the precise time delay [J]. Explosive Materials, 2015, 44(6): 9-14.
- [2] 冷振东,卢文波,胡浩然,等. 爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1815-1822.
LENG Z D, LU W B, HU H R, et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1815-1822.
- [3] 卢文波,周俊汝,陈明,等. 爆破振动主频衰减公式研究[J]. 工程爆破, 2015, 21(6): 1-6, 24.
LU W B, ZHOU J R, CHEN M, et al. Study on attenuation formula of dominant frequency of blasting vibration [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(6): 1-6, 24.
- [4] 陈建龙,卢文波,孙鹏昌,等. 毫秒延时爆破作用下岩体的受迫振动分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 397-404.
CHEN J L, LU W B, SUN P C, et al. Forced vibration analysis of rock mass under millisecond delay blasting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 397-404.
- [5] 李启成,张晶. 用多普勒效应计算汶川余震断层滑动速度函数[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 505-511.
LI Q C, ZHANG J. The calculation of fault sliding velocity function in Wenchuan aftershock with Doppler effect [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 505-511.
- [6] 刘瑞丰,邹立晔,张立文. 汶川地震的面波震级测定及其多普勒效应[J]. 地震学报, 2018, 40(3): 364-373.
LIU R F, ZOU L Y, ZHANG L W. Determination of the surface-wave magnitude of the Wenchuan earthquake and its seismic Doppler effect [J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(3): 364-373.
- [7] 许力生,邸海滨,冯万鹏,等. 2010 年青海玉树 M_s 7.1 地震近断层地面运动估计[J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1366-1373.
XU L S, DI H B, FENG W P, et al. Estimation of the fault-near ground motion of the 2010 Yushu, Qinghai, M_s 7.1 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(6): 1366-1373.
- [8] 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 F Q. Research and application of blasting vibration frequency control technology [J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 54-59.
- [9] 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 Z Y, YANG N H, LU W B, et al. Progress of blasting vibration control technology in China [J]. Blasting, 2013, 30(2): 25-32.
- [10] BLAIR D P. The measurement, modelling and control of ground vibrations due to blasting[C]//2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Keystone, CO, US, 1987: 88-101.
- [11] BRACEWELL R N. The fourier transform and its applications [M]. 3rd ed. New York, US: McGraw Hill, 2002.
- [12] 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,知识产权出版社, 2006.
- [13] 徐睦然. 多普勒效应的原理及应用[J]. 通讯世界, 2019, 26(2): 313-315.