

# 深孔微差爆破震动预报浅析<sup>①</sup>

徐全军<sup>a b</sup> 毛志远<sup>a</sup> 张庆明<sup>b</sup> 丁 敬<sup>b</sup>

(a 南京工程兵工程学院 南京 210007)

(b 北京理工大学 北京 100081)

**摘要** 以深孔爆破的单孔装药爆破震动测试为基础,得到单孔装药爆破的样本函数,并通过系统随机脉冲下的响应分析建立了模拟深孔微差爆破震动波形合成的模型,通过试验和模拟探索用单孔装药爆破的样本函数来预报深孔微差爆破震动波形及峰值的方法。

**关键词** 深孔爆破 脉冲响应函数 爆破震动 模拟

**中图法分类号** TD 236

## 1 引言

大量土石爆破时,常会遇到对保护目标的地面震动速度(加速度)进行预报和控制的问题,大部分爆破工作者是利用萨道夫斯基公式进行预报的,实际上,在对深孔爆破的地面震动预报时,该公式很难反映震动的实际情况。通过对大量的爆破震动实测波形及数据分析后,我们认为,由爆破引起的地面质点震动速度或加速度的幅值是随机的,难以用确定的公式来表示,通过深孔爆破的单孔爆破样本函数法,应用单孔样本函数线性叠加理论对地面爆破震动进行分析的方法较为可行。在某核电站的山体爆破开挖地面震动加速度监测中,我们用该方法来进行爆破震动的预报和控制。

## 2 建立模型

一般来说,深孔爆破总是将某一孔径的深孔在台阶上以一定的空间顺序进行排列,结合孔与孔、排与排之间时间延期使得炸药的能量在时域上逐次释放,从而使爆破的块度、飞石、震动等得到控制和改善。在采石场、矿山、土石方开挖等工地进行爆破时,一般采用多孔、多排延时起爆,由于雷管精度所限,同段位雷管的起爆时间并不相同,但服从正态分布。深孔爆破产生的地面震动对保护目标影响的研究,国外自本世纪60年代就开始重视了,在 Baumgardt 和 Ziegler(1988)及 Smith(1989)<sup>[1]</sup>等人的研究中认为爆破地震波与天然震波的明显区别是前者具有波的调制特性。这样使通过单孔爆破的波形来合成多孔爆破的波形成为可能。为此,在用单孔爆破的波形来合成多孔微差延时起爆波形时,提出如下几点假设<sup>[2]</sup>:(1)每个深孔装药的爆炸都相当于一次脉冲激励,多孔爆炸为一随机脉冲过程;(2)爆破地震波传播的介质为线性系统,波在测点处进行线性叠加;(3)爆破的网孔参数恒定,不考虑地形地质变化的影响;(4)每个孔爆炸后在测点处产生相同的波形。

① 徐全军:男,1967年生,博士研究生,讲师。

1996-12-02收到原稿,1997-08-12收到修改稿。

根据上述假设, 由于近似地将大地看做是一个线性系统, 因此将单个爆炸激励所对应的响应设为  $S(t)$ , 用  $W(t)$  来模拟不同时间爆炸的随机脉冲过程, 则这个系统在随机脉冲作用下的响应表示为  $S(t)$  与  $W(t)$  卷积<sup>[3]</sup>:

$$Y(t) = S(t) * W(t) \tag{1}$$

这里

$$W(t) = \sum_{j=1}^n T_j W(t - t_j) \tag{2}$$

考虑到空间位置的影响

$$t_j = t_j - \frac{(X_j \sin\theta - Y_j \cos\theta)}{v} \tag{3}$$

根据狄拉克函数的定义

$$W(t - t_0) = \begin{cases} \infty & t = t_0 \\ 0 & t \neq t_0 \end{cases}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} W(t - t_0) dt = 1 \tag{4}$$

其中:  $t_j$  为距第一个装药起爆的时间;  $X_j, Y_j$  为第  $j$  个装药的座标 (原点在第一个装药的位置);  $T_j$  为爆炸强度幅值;  $\theta$  为  $y$  轴方向与测点的顺时针夹角;  $v$  表示相速度

(1) 式经傅立叶变换, 在频域中, 测点响应的幅值  $Y(k)$  可表示为

$$Y(k) = |S(k)W(k)|, \quad W(k) = \sum_{j=1}^n T_j \exp(ik t_j) \tag{5}$$

根据现场地质勘察报告, 取  $v = 4500\text{m/s}$ ,  $S(k)$  为频域中的单孔脉冲响应函数

### 3 单孔爆破试验

事实上, 爆破地震与天然地震一样是个非常复杂的非平稳随机过程, 其传播过程中的影响因素很多, 除了受岩石的力学性质、节理、地下水位等影响外, 炸药的性能、网孔参数、孔径、临空面的数量对它也有很大的影响。为了得到较好的单孔脉冲响应函数, 我们进行了多次单孔装药的爆破试验。目的是要得到同一爆破工地不同地点爆炸时测点处加速度峰值的离散情况。经十次单孔爆破现场试验, 我们得到测点加速度峰值垂向的统计参数为:  $\bar{X}_z = 0.0057g$ ,  $S = 1.5 \times 10^{-3}g$ , 径向的统计参量为:  $\bar{X}_r = 0.00684g$ ,  $S = 1.8 \times 10^{-3}g$ 。图 1 为本试验的典型垂向单孔爆破加速度记录波形 (图中  $a$  表示加速度,  $g$  为  $10\text{m/s}^2$  以下同)。

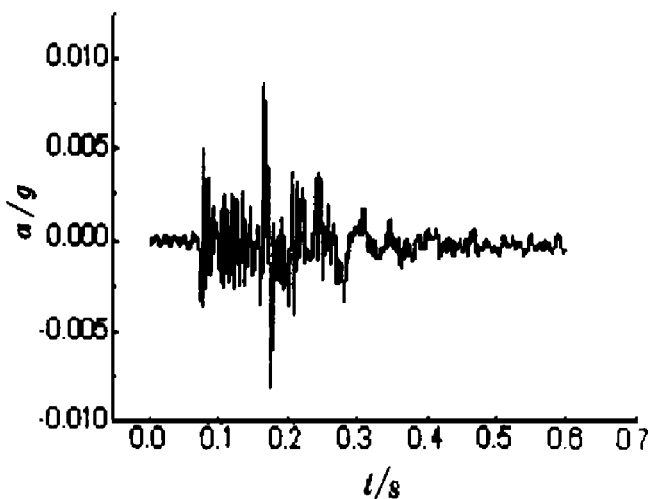


图 1 典型单孔装药爆破垂向加速度波形  
Fig. 1 Typical wave of particle acceleration by single charge blasting

### 4 模型计算与实测波形分析

#### 4.1 模型计算

(1) 考虑一种简单的波形调制, 设单孔响应为狄拉克函数  $S(t) = W(t)$ , 五个孔成直线排列间距  $4\text{m}$  起爆间隔为  $100\text{ms}$ , 岩石的波速为  $4500\text{m/s}$ 。经叠加后的波形如图 2 所示, 纵座标表示相对幅值。

从图上可看到两个现象:一是在恒定的间隔  $10\text{Hz}$  处其相对幅值始终是加强的;二是在整个爆破持续时间倒数的间隔处其叠加的结果相对幅值是减小的。

(2)考虑简化深孔爆破单孔响应函数的模拟,研究由于雷管延期时间离散对波形叠加的影响,令二孔装药同时发火或相差  $10\text{ms}$  得到双孔爆破的波形调制。深孔爆破的单孔装药爆破响应函数非常复杂,其传播中衰减规律未知,下面取简单的  $k^2$  的调制函数形式<sup>[4]</sup>,这里取

$$S(k) = k^2 \left[ 1 + \left( \frac{k}{k_c} \right)^2 \right]^{-1} \quad (6)$$

孔径  $90\text{mm}$ 、孔深  $10\text{m}$  的深孔爆破  $k_c$  为  $50$

由图 3 可以看出:在低频区(小于  $10\text{Hz}$ )合成的波形受延期时间的影响不太大,但在大于  $10\text{Hz}$  以上的频率区由于雷管的发火时间不同波形变化较大。叠加的结果使得某些频率的幅值减小。利用这个特性,在选雷管段别时,可选择与幅频值减小相对应的雷管段别。

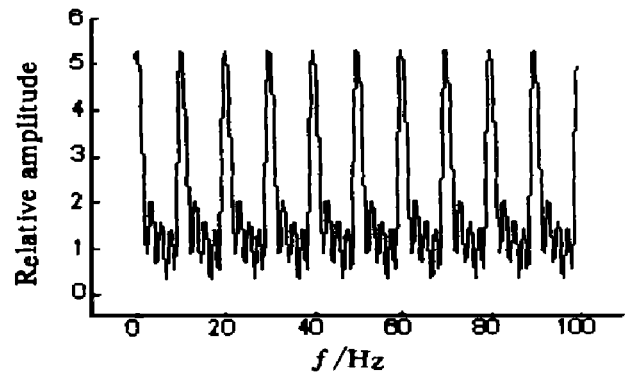


图 2 成直线排列五孔相隔  $100\text{ms}$  起爆的叠加幅频图

Fig. 2 Blast vibration superposition wave of five holes in a line delaying  $100\text{ms}$

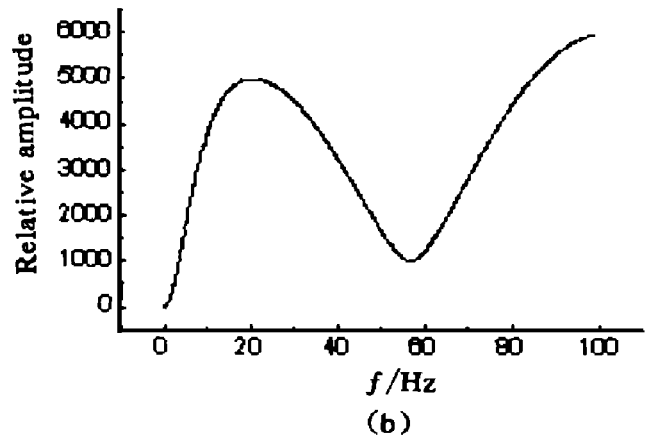
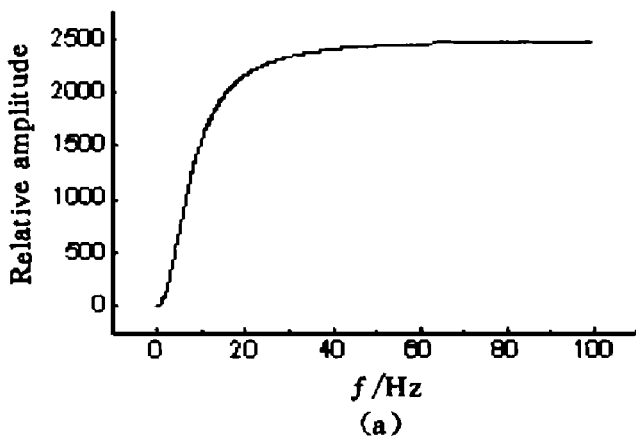


图 3 模拟两装药同时或相隔  $10\text{ms}$  起爆的爆破震动幅频图

Fig. 3 The simulation of blasting amplitude of two charges blasting at the same time or delaying  $10\text{ms}$

## 4.2 模型试验实测波形分析

我们进行了混凝土试块中的模拟深孔爆破震动叠加的模型试验,采用瞬发电雷管和高精度程控起爆器进行起爆,起爆器的延时误差小于  $1\text{ms}$ 。图 4 为单孔爆破的波形,图 5(a)为延期  $15\text{ms}$  的双孔爆破的实测波形,图 5(b)为单孔爆破的相隔  $15\text{ms}$  的叠加波形。

由图 5 可以看出:精确延期下的深孔爆破的波形基本符合线性叠加规律,这里的精确延期是采用高精度程控起爆器和瞬发电雷管来实现的。这种精确延期下的模拟深孔爆破波形叠加的试验结果表明:用单孔样本函数法来得到多孔的叠加波形是可行的,只要延期时间精确,多孔装药的爆破震动波形可通过单孔波形叠加得到。

## 4.3 工程爆破峰值预报分析

实际工程中同段雷管发火时间是离散的,由于离散的随机性使得每个装药的起爆时间是

未知的，波形调制难以进行，这就使得爆破震动波形难以准确预报，但爆破震动峰值是可以预报的。本工程中只采用第五段非电毫秒延期雷管，其抽样 20 发的统计参数为  $\bar{x} = 112.6 \text{ ms}$ ,  $s = 7.64 \text{ ms}$  变差系数  $\sigma_x / \bar{x} = 0.066$  我们对用同段雷管的二个装药爆炸在测点处产生的加速度峰值进行了统计，共进行了十四次试验，其垂向统计参数为： $\bar{Y}_1 = 0.00842 \text{ g}$ ,  $S = 2.0 \times 10^{-3} \text{ g}$ ，径向的统计参数为： $\bar{Y}_2 = 0.0112 \text{ g}$ ;  $S = 2.74 \times 10^{-3} \text{ g}$ ，从统计平均值来看， $\bar{Y} \leq 2\bar{X}_1$ ,  $\bar{Y} \leq 2\bar{X}_2$  另外，由于在同样的条件下，用二个第五段非电毫秒延期雷管起爆两个深孔装药所测到

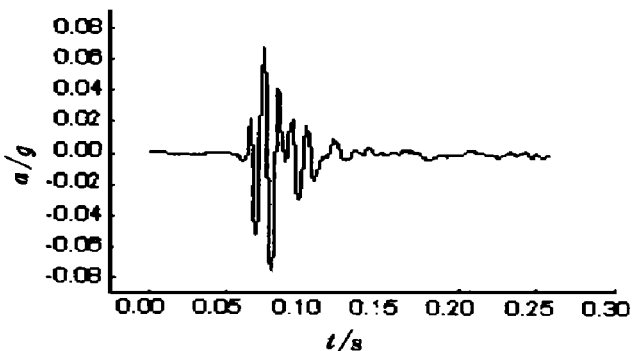


图 4 单孔爆破波形

Fig 4 Single blasting wave

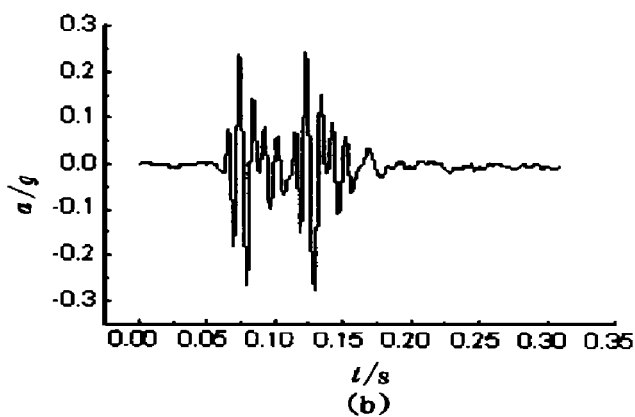


图 5(a) 延期 15m s 的双孔爆破波形

Fig 5(a) Two charges blasting vibration wave delaying 15m s

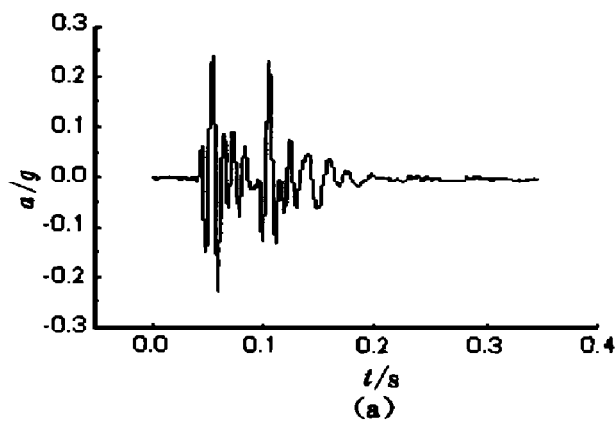


图 5(b) 单孔爆破波形相隔 15m s 的叠加结果

Fig 5(b) The superposition of the single hole wave with time interval 15m s for each charge

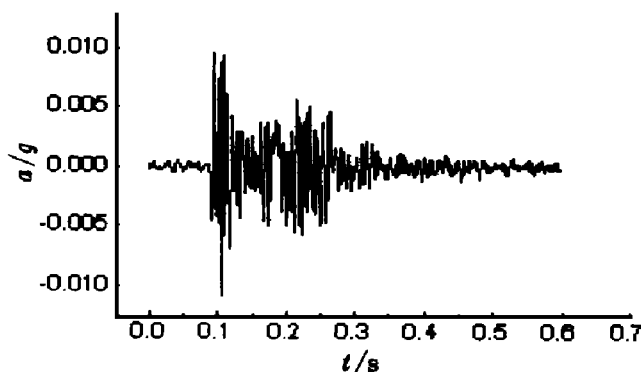
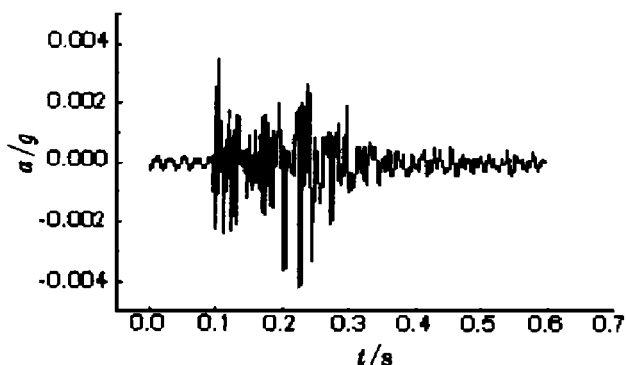


图 6 使用同段雷管发火时间不同的爆破震动波形的比较

Fig 6 The comparison of two charge blasting vibration waves firing at different times

的爆破震动加速度峰值要比用导爆索同时起爆的峰值小，如图 6 所示。因此，单孔样本函数的峰值预报的方法为：首先进行单孔装药爆破的地震波形测试，然后将单孔的峰值与测点处的控制值进行比较，从而得到一次允许起爆的孔数，孔数与单孔峰值的乘积即为多孔峰值，用该方法

估计的爆破震动峰值比实际的稍大。

## 5 结 束 语

在某爆破工程中我们尝试用单孔样本函数法对爆破震动加速度波形进行预报,其结果不能令人满意,但在混凝土试块模型试验中通过精确控制延期起爆时间得到了较好的波形调制,总结上述工作有以下体会:(1)单孔样本函数法的波形预测适用于精确延期起爆的爆破中,对于普通延期雷管可用它来预报震动的最大峰值;(2)保护目标物的震动除了与质点峰值有关外还与震动的主频有关,爆破震动的主频受起爆延期时间的影响很大,单孔样本函数法可用来设计震动的波形使得某些频率成份减少,从而达到控制震动的目的;(3)用单孔样本函数法来预报爆破震动峰值是可行的,但对波形的预报存在许多缺陷,有待进一步完善。

### 参 考 文 献

- 1 Cham p m an M C, Bollinger G A, Sibol M S. Modeling Delay-Fired Explosion Spectra and Source Function Deconvolutions at Regional Distances AD-A 260 232 1992
- 2 Brune J N. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes J Geophys Res 1970 75 4997~ 5009
- 3 Douglas A A, Andrew P R, Stephen R W. A Method for Site-Specific Prediction and Control of Ground Vibration from Blasting. Proceeding of the First Symposium on Explosive and Blasting Research X-22891
- 4 Stump B W, Reamer S, Hinzen K G, et al. Physical Constraints and Seismic Waves from Chemical and Nuclear Explosions Proceedings of 13th Annual PL/DA RPA Seismic Research Symposium. ADA 241325 1991

## THE ANALYSIS OF GROUND VIBRATION PREDICTION OF DELAY-FIRED BENCH BLASTING

Xu Q uan jun<sup>a, b</sup>, M ao Zh iyuan<sup>a</sup>, Zhang Q ing m ing<sup>b</sup>, Ding Jin<sup>b</sup>

(a *Nanjing Engineering Collage, Nanjing, 210007*)

(b *Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081*)

**ABSTRACT** On the basis of monitoring the single charge firing ground vibration of the bench blasting, we get its sample function, then we model the superposition of multiple delay blasting vibration under the analysis of taking the blasting source as series impulses, we find out the way of the linear superposition of the vibration waves and the peak value of the blasting ground vibration.

**KEY WORDS** bench blasting, impulse response function, ground vibration of blasting simulation