

文章编号: 1001-1455(2012)01-0084-07

爆破振动波叠加数值预测方法*

杨年华¹, 张 乐²

(1. 中国铁道科学研究院, 北京 100081;

2. 西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 根据场地地震波的传播叠加原理, 以实测单炮孔爆破振动波形为基础, 考虑预测点位置与各炮孔的相对位置关系, 并按照实际起爆网路设计的各炮孔起爆时差和实测的地震波传播速度等参数, 计算获得预测点的爆破振动波形。不仅可以预测爆破振动速度峰值, 而且可以预测完整的振动波形, 并可获知爆破振动持续时间及主振频率分布范围。根据现场应用数码电子雷管的深孔爆破实验, 该方法计算的预测波形与实测波形相当吻合, 计算结果可靠性较好, 可以在实际工程中推广使用。

关键词: 爆炸力学; 质点峰值振动速度; 振动叠加; 爆破振动; 起爆时差

中图分类号: O389

国标学科代码: 1303599

文献标志码: A

毫秒微差爆破在矿山或石方开挖工程中已经得到广泛的应用。随着爆破施工范围的不断扩大, 爆破振动影响造成的扰民和民扰事件呈上升趋势, 严重制约工程的顺利进展, 有的还影响到社会稳定。为了控制爆破振动, 保护国家和人民的财产利益, 爆破设计时需要目标处可能产生的振动进行预报。然而, 爆破振动效应十分复杂, 影响的因素很多, 到目前为止, 在振动预测上尚无完善的理论。

目前主要采用萨道夫斯基公式^[1]和经验系数方法, 如

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 为介质质点振动速度的峰值, 单位为 cm/s ; R 为爆心距离, 单位为 m ; Q 为炸药量, 即同时段爆破的总药量, 延时爆破为单段最大药量, 单位为 kg ; K 、 α 为与爆破条件、场地地质条件等有关的系数, 由经验和回归分析确定。

实际上, 此公式是根据硃室大爆破的经验和统计提出的。若想得到比较可信的 K 和 α 的值, 需要利用该爆破现场的多次爆破振动测试数据, 采用回归分析法才能得到相应分析结果。但是通常受多种因素影响回归分析的相关系数较低, 近距离的爆破振动峰值计算误差可达 $200\% \sim 300\%$, 远距离的计算误差也有 50% 以上。而且当深孔爆破采用高精度导爆管毫秒雷管及孔内、孔外毫秒延时接力网路时, 需要逐孔起爆, 孔间延时间隔小于 10 ms , 炮孔连续不断地引爆。如仍采用此计算公式预报爆破振动强度, 无法核算单响药量 Q , 此经验公式已不适用小间隔毫秒延时的爆破振动峰值估算。近年来, 也有采用人工神经网络方法预测爆破振动强度^[2-5]的, 它具有很强的非线性动态处理能力, 振动峰值预测效果好于萨道夫斯基经验公式, 但这种方法在本质上仍然基于同类工程的大样本统计规律预测, 只是统计分析方法有较大改进。这些探索一定程度上推动了爆破振动预测技术的发展, 加深了对爆破振动规律的认识。但仍然停留在经验系数方法上, 只能预测爆破振动峰值, 却没法预估爆破振动的持续时间及其振动频率的分布范围。爆破振动评价需要了解全振动过程, 而不仅仅是一个指标。目前爆破振动评价体系也存在这样的问题。

数码电子雷管的投入使用, 可以实现对爆破延时的精确控制, 保证设计延期与实际起爆时间相一致, 这就为更准确预报爆破振动提供了基础条件。本文中, 提出一种与传统统计预测方法完全不同的振

* 收稿日期: 2010-10-01; 修回日期: 2011-03-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA06Z131)

作者简介: 杨年华(1964—), 男, 博士, 研究员。

动叠加预测模型。该方法不需要长期大量的振动检测样本,主要通过预先单孔爆破实验采集多点振动信号作基础,利用开发的软件对信号解析和叠加计算,实现不同位置的爆破振动波形预测。

1 爆破振动预测方法

1.1 理论原理

预测指定位置的爆破振动波形最重要的一步是进行单孔爆破实验,单孔爆破的位置应与群组炮孔临近。单孔爆破获得的各测点振动信号中包含了爆破施工区到测点位置间所有复杂地质条件下大地震动的属性。因此,基于实地记录得到的单孔爆破振动波形综合包含了本地区地质条件和爆破条件的信息,群组炮孔爆破其实是由多个单孔爆破在不同时空下组合,因此可以利用实测的单个炮孔爆破振动波形表征群组炮孔的爆破振动特点。

由于单孔爆破和群组爆破地震波传播经历的地质条件完全相同,利用单孔爆破的振动信号推测预报群组爆破振动波形,不仅不需要建立复杂的地质模型,也不需要依靠经验系数的假设修正。理论上,将爆破振动叠加过程假设为一个线性系统是可行的,这样可以用单个炮孔的爆破振动信号,按照线性系统中信号的叠加特性模拟群组药包爆破振动信号(如图 1 所示)

$$F(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t + T_i) \tag{2}$$

式中: T_i 为当前单个炮孔爆炸地震波传播到目标位置相比上一炮孔延迟的时间; $f_i(t)$ 为当前单个炮孔爆炸形成的振动波; $F(t)$ 是预测得到的爆破振动波形。

在缺乏高精度电子雷管的条件下,雷管的延期精度不能满足上述模拟预测的要求,相关研究只能停留在理论推导和假想阶段,工程实验的规模很小,爆破振动强度预测分析误差较大,没有给出在实际工程中应用的具体实施办法,严重地影响了此类研究的全面展开,难以获得可信的结果。而数码电子雷管的出现使这一情况得到了改变。数码电子雷管的延期时间可精确到 1 ms,极大地提高了起爆网路的延时准确性。为爆破技术向数字化、精准化发展提供了基础条件。

1.2 数据获取

在预测爆破振动时,为了精确计算各炮孔的爆破振动波传到目标点的起始时间,需要获得现场地震波传播速度,实际上地震波传播速度也反映了场地地质条件。在单孔爆破振动检测中,安排三台以上测振仪布置在一条测线上(见图 2),采用无线同步触发装置,使各爆破测振仪同时触发记录。读取地震波到达各台测振仪的起始时间,得到当地地震波传播的速度

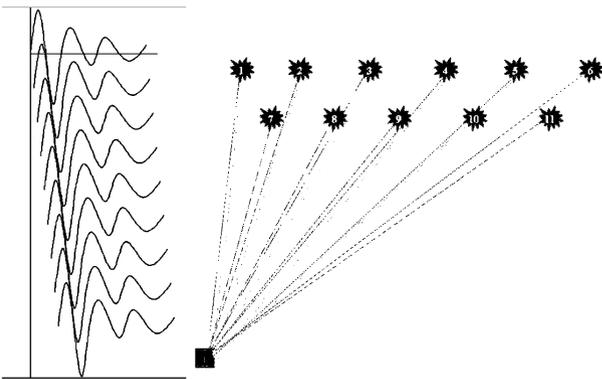


图 1 预测点振动波叠加示意图

Fig. 1 The scheme of wave superposition at a certain location

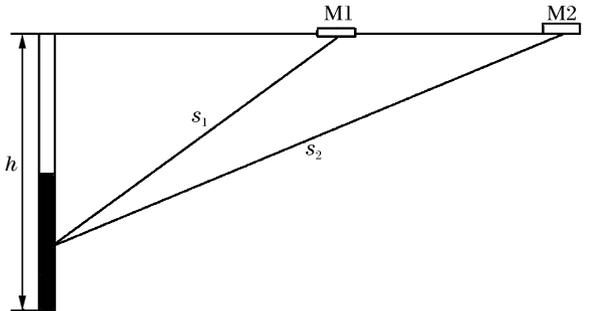


图 2 地震波速度实测示意图

Fig. 2 The measurement of seismic wave velocity

$$c_v = \frac{s}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: s 是任意两台测振仪至炮孔的距离之差; Δt 是地震波到达这两个测振仪的时间差; c_v 是两台测振仪间地震波传播的速度。安排多台仪器测振是为了求得各段地震波速度,提高测量结果的准确性,也是为了获得不同距离范围的单孔爆破基波信号。

1.3 实施步骤

实施步骤如下:

(1)在待爆区范围内选择一个合适的炮孔进行单孔爆炸实验,采集单孔爆破振动数据。可以安排群孔爆破的首爆孔作单孔振动的基础信号,但首爆孔与其他炮孔爆破的延时间隔应在 200 ms 以上。

(2)在目标点测线方向安放多台测振仪(不少于 3 台),测点距离从近至远,尽可能涵盖预测点距离范围。

(3)收集现场爆破参数,包括炮孔坐标、孔深、装药量、爆破网路等。

(4)利用本文中软件对采集到的单孔爆破振动数据进行分析,选择合理的单孔爆破振动基础信号。

(5)输入群炮孔爆破参数和对应的设计延期时间,通过软件分析得到地震波的预测结果。

(6)根据预测结果对爆破网路延期方案进行修改,直到符合工程指标后进行爆破。

(7)再次记录现场爆破振动,并与预测结果进行对比,进一步优化计算参数。

进行 2~3 个循环的实测和参数优化后,预测结果的精确性会大有提高。

1.4 数据分析软件

分析软件由地震信号滤波、波速计算和振动预测 3 部分组成(见图 3)。

测振仪在现场爆破振动数据采集过程中,受多种因素影响,会引入高频噪声,降低信噪比。软件设计了滤波处理,若振动有高频噪声可预先滤波,降低噪声对分析结果的影响。

通过判读振波到达各测振点的第 1 个波峰的时间确定 Δt ,由 GPS 测量坐标计算 s ,由公式(3)求出爆破地震波的传播速度 c_v 。

假设各炮孔的爆破振动波形与基础波形相似,只是药量和距离的小范围变化使得振动幅值相应变化,则可以利用单孔实验中得到的基础振动波形推算相应炮孔的爆破振动波形

$$f_i(t) = \sqrt{\frac{Q_i}{Q_0}} f_0(t) \left(\frac{L_0}{L_i}\right)^\alpha \quad (4)$$

式中: $f_0(t)$ 为前期单孔实验得到的基础振动波形; Q_0 为单孔装药量; L_0 为单孔实验点至测振点距离; Q_i 为任意炮孔装药量; L_i 为任意炮孔至测振预测点距离; $f_i(t)$ 为任意炮孔的振动波形; α 为单孔爆破振动峰值衰减指数。

任意炮孔起爆后地震波传播到预测点位置的延迟时间 T_i 包括了雷管延期时间 t_i 和地震波穿越一定距离至预测点位置的迟后时间

$$T_i = t_i + \frac{L_i - L_0}{c_v} \quad (5)$$

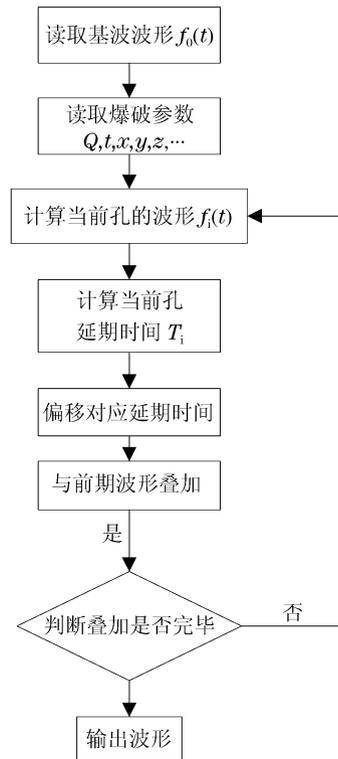


图 3 爆破振动预测程序执行流程图

Fig. 3 The execution of prediction program on blasting vibration

2 应用实例

2.1 实例 1

2009 年 12 月,隆芯 1 号数码电子雷管在德兴铜矿进行了推广试用,并在富家坞采区进行了工程实验。爆破台阶高度 15 m,一次采宽 90 m。炮孔直径 250 mm,孔深 15~17.5 m,孔网参数为 8 m×8 m。单孔装药量 500~700 kg,共 41 孔,爆破总药量 37 t。每孔放置 2 个起爆弹,每个起爆弹装 1 发电子雷管。按照本文中实施步骤,在爆破前进行了单孔爆炸,群组炮孔和测振点位置如图 4 所示。图 5 是 3 个测点的单孔爆破振动记录。实际群组爆破时,3 个测点的位置与前期单孔爆炸测振位置完全相同。在进行群组炮孔爆破前,根据已有的爆破设计参数,利用本文中预测设计软件对振动情况进行了模拟,在爆破后与实际的振动记录进行了比对。测点 1~3 的振动波形如图 6~8 所示。

从图 6~8 可以看出,在 3 个不同地点的预测波形,与实测波形的波动变化规律基本一致,振动增强和减弱发生的时间也接近。通过本文中方法预测得到的振动波形基本反映了爆破振动在预测点的振动趋势。表 1 给出了 3 个测振点预测振动峰值 v_c 与实测振动峰值 v_e ,误差不超过 10%,可以看出峰值预测的准确性也有相当大的提高。

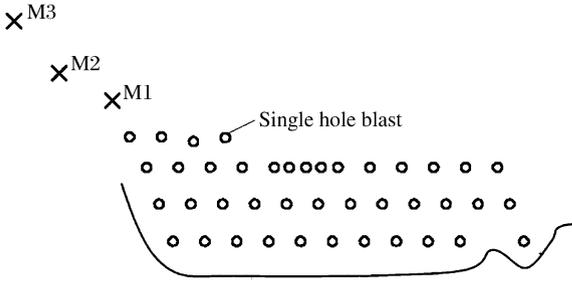


图 4 炮孔和测振点布置

Fig. 4 Measuring point arrangement

表 1 振动速度峰值

Table 1 The comparison of peak particle velocities

测点	l/m	正向			负向		
		v_c / (cm/s)	v_e / (cm/s)	$ \Delta v $ / (cm/s)	v_c / (cm/s)	v_e / (cm/s)	$ \Delta v $ / (cm/s)
M1	98	9.29	9.33	0.04	-8.28	-6.91	1.37
M2	142	1.98	1.80	0.18	-1.67	-1.78	0.11
M3	211	0.93	0.88	0.05	-1.40	-1.25	0.15

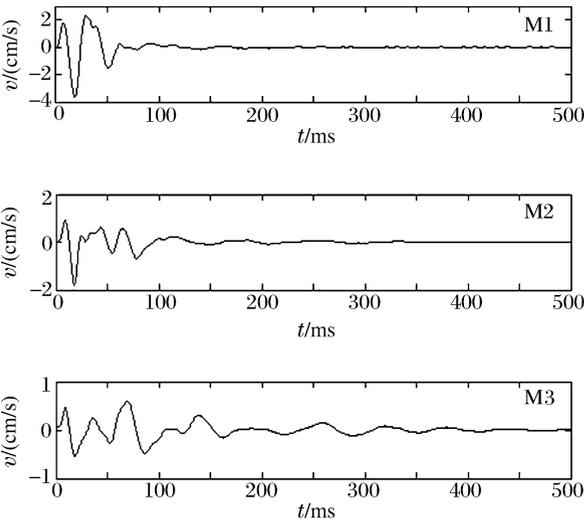


图 5 单孔爆破时 3 个测点的基础振动波形

Fig. 5 Base vibration waveform induced by single blasthole shot

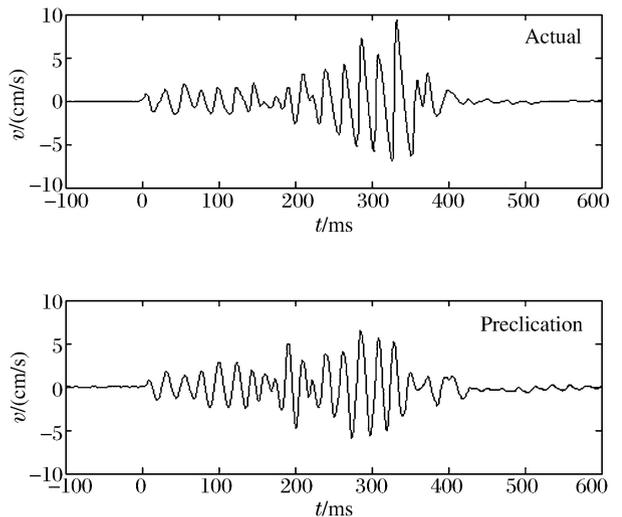


图 6 测点 M1 的振动波形

Fig. 6 The prediction results and actual record at M1

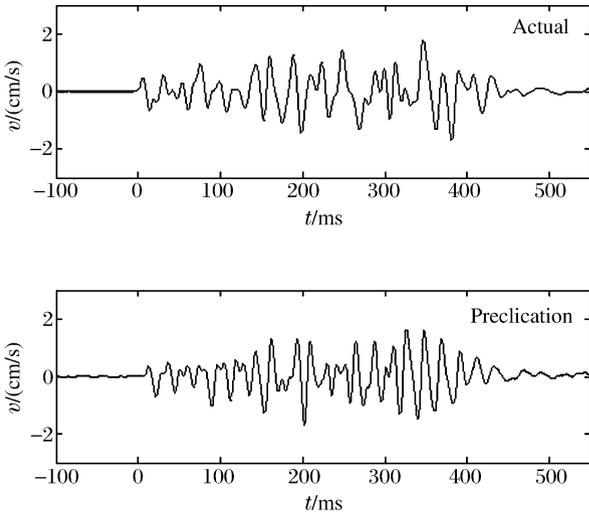


图 7 测点 M2 的振动波形

Fig. 7 The prediction results and actual record at M2

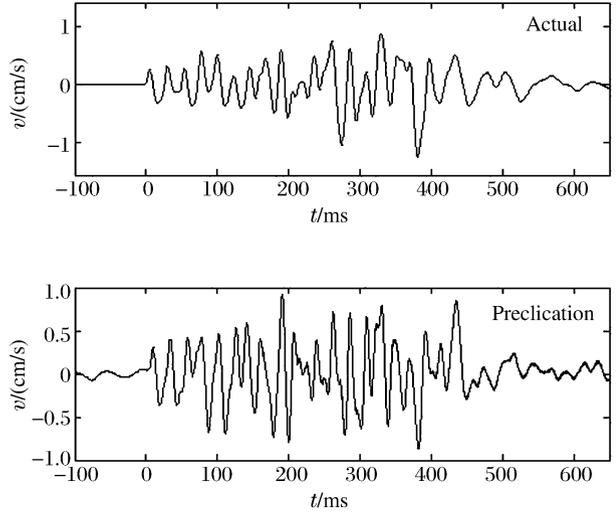


图 8 测点 M3 的振动波形

Fig. 8 The prediction results and actual record at M3

2.2 实例 2

同年,在四川广元大中坝边坡松动爆破中,施工方采用数码电子雷管,并应用本文中方法进行了工程实验。图 9 是单孔爆破实验以及群组炮孔、测点位置示意图,钻孔直径 140 mm,炮孔深度 7~9 m,单孔装药量 40~60 kg,通过电子雷管高精度延时达到逐孔起爆并产生振动干扰叠加,孔间延时差 18 ms。图 10 是单孔爆破振动记录,测点 1~2 至单孔爆破的距离分别为 142.5 和 172.2 m。图 11~12 是群组炮孔爆破时测点 1~2 的实测结果和预测结果。表 2 是测点 1~2 预测振动峰值 v_c 与实测振动峰值 v_s 的数值对比。工程实验证明,由于单孔爆破记录的波形反映了场地的地质条件、实际爆破参数和相应的爆破振动衰减规律,因此应用实测单孔振动波叠加模拟预测的群组炮孔爆破振动波形,结果与实测的爆破振动波形相近,预测误差达到工程容许范围,远小于传统的经验估算误差。大多数钻孔爆破工程中,应用本方法可以对爆破振动的强度、波动历程和主振频率做出有效的判断。同时还发现,应用高精度电子雷管可以实现不同炮孔间振动波波峰与波谷的干扰叠加,使振动强度能达到小于单孔爆破的振动幅值。这样,在爆前利用本文中预测程序对整个方案的延期进行合理调配,寻找最优的振动控制效果,就可以得到最佳的延期设计方案。

应该注意到,地震波在地面传播过程中不断衰减变化,在不同传播方向波形变化不一致。根据某预测点的振动强度变化选择的延期只能保证在该预测点得到最好的减振效果,在其他位置点上就不一定是最好的,甚至有可能使振动增强。作为露天深孔爆破,延期间隔的选择还应考虑到对爆破块度大小、抛掷率的影响,因此,最终的起爆时差不完全取决于减振效果,确保爆破的综合效益更加重要。

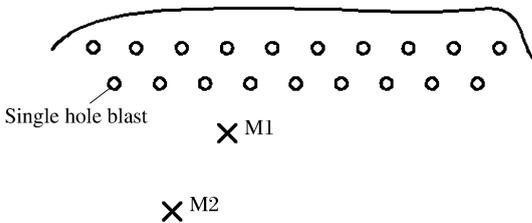


图 9 炮孔和测振点布置

Fig. 9 Measuring point arrangement

表 2 振动速度峰值

Table 2 The comparison of peak particle velocities

测点	l/m	正向			负向		
		v_c / (cm/s)	v_s / (cm/s)	$ \Delta v $ / (cm/s)	v_c / (cm/s)	v_s / (cm/s)	$ \Delta v $ / (cm/s)
M1	142.5	0.87	0.73	0.14	-1.00	-0.64	0.36
M2	176.2	0.33	0.36	0.03	-0.31	-0.42	0.11

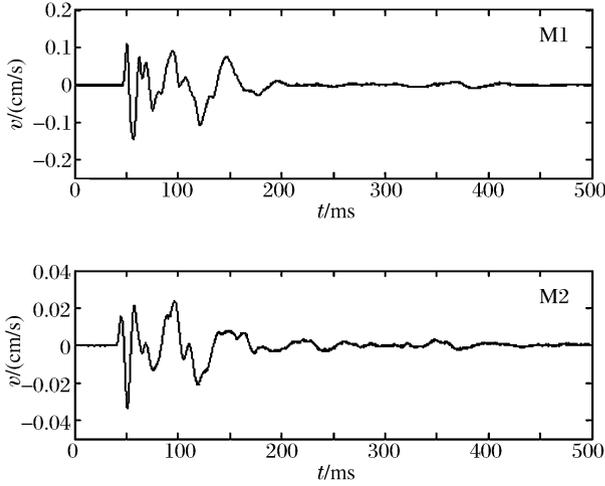


图 10 单孔爆破时 2 个测点的基础振动波形

Fig. 10 Base vibration waveform induced by single blasthole shot

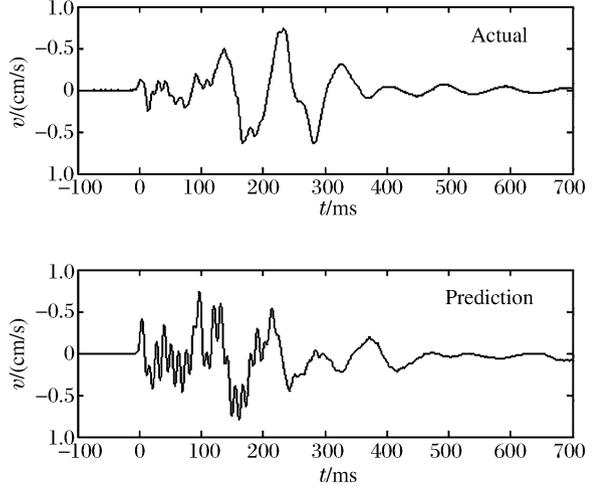


图 11 测点 M1 的振动波形

Fig. 11 The prediction results and actual record at M1

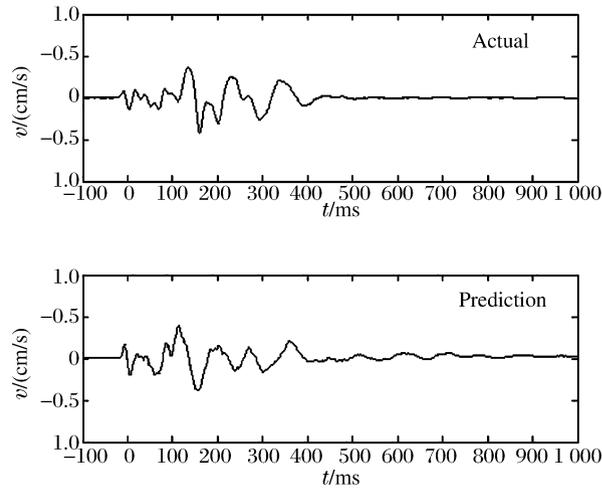


图 12 测点 M2 的振动波形

Fig. 12 The prediction results and actual record at M2

3 总 结

综上所述,基于实际单孔爆破振动波的线性叠加,预测群组爆破时指定点的爆破振动具有更大的理论和实用价值,与传统的统计加经验系数预报方法相比有以下突出优点。

(1)爆破振动参数的预报分析不仅局限于振动峰值速度,而是预测全部地震波的波形,使得振动分析评价中包含了爆破振动的频率和持续时间,预测结果更全面。

(2)本文中方法在工程实际应用中不必选用经验系数,避免了人为因素影响;而且包含了实际地质条件和爆破条件的信息,预测结果更准确。特别适用于高精度延时雷管的炮孔爆破振动预测。

(3)本文中方法工程现场实施过程中需要现场实测振动点数量相比传统预测方式少很多,预测效率和准确度有显著提高,工程可行性更强,便于在实际工程中推广。

本文中仅列出了两次工程实验数据,但在德兴铜矿及其他应用隆芯 1 号电子雷管的爆破工程中也应用了本文中方法,都证明了它的可靠性和准确性。当然,作为一种新的技术,还需要进一步的研究和改善。

参考文献:

[1] 顾毅成,史雅语,金骥良.工程爆破安全[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

[2] 徐全军,张庆明,恽寿榕.爆破地震峰值的神经网络预报模型[J].北京理工大学学报,1998,18(4):473-475.

- XU Quan-jun, ZHANG Qing-ming, YUN Shou-rong. Neural network model for forecasting peak acceleration of blasting vibration[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1998,18(4):473-475.
- [3] 徐全军, 刘强, 聂渝军, 等. 爆破地震峰值预报神经网络研究[J]. 爆炸与冲击, 1999,19(2):134-138.
- XU Quan-jun, LIU Qiang, NIE Yu-jun, et al. Study of neural network prediction on peak particle amplitude of blasting ground vibration[J]. Explosion and Shock Waves, 1999,19(2):134-138.
- [4] 吕淑然. 爆破震动强度预测的神经网络模型研究[J]. 金属矿山, 2009(6):40-42.
- LÜ Shu-ran. Study on the neural network model for forecasting the blasting vibration intensity[J]. Metal Mine, 2009(6):40-42.
- [5] 杨佑发, 崔波. 爆破震动速度峰值的预测[J]. 振动与冲击, 2009,28(10):195-198.
- YANG You-fa, CUI bo. Blasting vibration peak value prediction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(10):195-198.

Blasting vibration waveform prediction method based on superposition principle^{*}

YANG Nian-hua¹, ZHANG Le²

(1. China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science & Technology,
Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the superposition principle of seismic waves, a new blasting vibration waveform prediction model was proposed other than the traditional prediction methods founded on data statistics. According to the measured vibration waveforms from single blast holes, the developed model was used to calculate the blasting vibration waveforms at certain locations. In the calculation, the parameters were considered as follows: the position of the recording site relative to each blast hole, the delay time between the detonation of each two blasthole according to the actual initiation network and the measured propagation velocity of seismic wave. The calculated results show that the developed method can be used to predict the blasting vibration velocity peaks, whole vibration waveform, vibration duration and main frequency distribution. And the calculated waveforms are coincident with the recorded ones in the deep hole blasting tests using electronic detonators. It indicates that the developed prediction method is reliable for engineering application.

Key words: mechanics of explosion; peak particle velocity; vibration superposition; blasting vibration; detonating delay

^{*} Received 1 October 2010; Revised 25 March 2011

Supported by the National High-tech R & D Program (863 Program) (2007AA06Z131)

Corresponding author: YANG Nian-hua, ynianh@sina.com