

文章编号: 1001-1455(2009)05-0486-06

地下化学爆炸地运动信号关联探索*

唐玉志^{1,2}, 马远良¹, 蔡宗义², 吴祖堂², 王占江²

(1. 西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 分析了弹性区域中应力传播的波动方程, 说明该应力传播过程可以使用线性系统模型进行描述。根据系统辨识领域的脉冲响应方法, 建立了应力测点的脉冲序列与源函数和响应序列之间的关系。在此基础上, 建立了各测点间应力序列之间的关联响应模型, 给出了采用神经网络的自适应优化方法求解关联参数的方法, 并采用某次黄土介质中化学爆炸的实验数据进行了验证。将该模型用于测点数据的预测, 预测值和实测值之间的误差很小。这表明, 各测点间存在与测量数据无关的客观联系, 仅由实验中爆炸源、测点位置和地介质力学参数分布等所决定。

关键词: 爆炸力学; 关联响应模型; 脉冲响应; 化学爆炸; 应力波

中图分类号: O382

国标学科代码: 130 · 3520

文献标志码: A

1 引言

地下化学爆炸和地下核爆炸产生的应力波的传播过程, 是一个复杂的力学过程, 涉及到爆炸源的方式、结构、材料、爆炸产物和爆心周围介质的物理学性质, 应力波传播过程中涉及的传播介质的力学性质、介质的不均匀分布等。在地下爆炸的近场力学效应研究中, 对爆炸产生的应力波进行传播分析的常规方法是从爆炸源产生的高温高压爆生气体出发, 按照应力波在介质中传播的规律, 采用数值方法(有限元、有限差分、边界元等)逐步推算, 得到某位置的应力序列。该方法计算量大, 要求掌握波场所涉及材料的动态本构关系, 因此实际效果并不总是令人满意。对于范围大、地质和地形条件复杂的情况, 常因计算量大而难以实现, 或者网格过度简化而导致计算精度降低。在地下爆炸的远场力学效应研究领域, 如地震学、地质勘探等, 因经过扩散和长距离传输, 应力幅度已经低于传播介质的弹性限, 因此, 可以按照弹性力学的方法进行处理。通常是将爆炸源等效为一个源函数, 将传输过程中的扩散、反射、折射等因素等效为一个格林函数^[1]。在以往的这些研究模型中, 关注的是单个测点在特定爆炸源作用下的应力响应过程。而在特定的实验条件下, 各个测点间的响应序列之间的联系在地下爆炸的力学效应、应用等研究过程中也具有很重要的意义。常规的数值计算、源函数和格林函数的研究方法中, 未见有进行测点间数据联系等研究的报道。在文献[2-7]中, 从模拟实验和应力信号处理的角度, 对此进行了研究, 并给出部分拟合曲线, 但仍然难以给出可以推广的、定量的规律。

本文中从弹性介质中应力波传播的波动方程出发, 按线性系统理论建立应力波在介质中的传播模型; 根据线性系统辨识中的脉冲响应求解方法, 给出测点数据与爆炸源函数和脉冲响应间的关系, 建立不同测点之间的关联关系; 使用神经网络自适应优化技术, 给出求解测点之间的关联滤波器的方法; 利用某次黄土中爆炸实验的数据对该模型进行验证。建立的模型不依赖于传播过程中的细节, 反映了在固定的实验配置情况下, 测点间存在的客观联系。这一规律可以在激励源不同的多次实验情况下, 根据任意一个测点的实测数据, 预测其他测点的数据。该方法可用于进行地下爆炸实验和爆破工程等的设计、测点数据预估、对实测数据的检验、工程监测等领域。

* 收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-11-26

作者简介: 唐玉志(1973—), 男, 硕士研究生, 副研究员。

2 地下化学爆炸应力波传播的线性系统模型

2.1 应力传播的波动方程组

地下化学爆炸引起介质中应力的扰动并向外传播。从爆心起算,由内向外,可以存在空腔、塑性区、弹性区等多个区域,如图 1 所示。

在塑性区和弹性区,介质中应力波的传播都可以用一个三维的控制方程组来表述。但在塑性区,介质本构关系复杂,并可能与所经历的应力历史有关。在弹性区,介质的本构关系可用 Hooke 定律

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

来较好地表示,其中 λ, μ 为 Lamé 系数。

在弹性区域,控制方程组可以归并为下面 2 个波动方程的组合^[8-10]

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \varphi = 0 \quad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \mu \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \Psi = 0 \quad (2)$$

式中: φ 是一个标量函数,被称为位移的标量势; Ψ 是一个矢量,被称为位移的矢量势。

$$\mathbf{u}_p = \text{grad } \varphi, \quad \mathbf{u}_s = \text{rot } \Psi, \quad \mathbf{u} = \mathbf{u}_p + \mathbf{u}_s \quad (3)$$

式中: \mathbf{u}_p 和 \mathbf{u}_s 分别对应无旋波(P波)和等容波(S波)的位移矢量, \mathbf{u} 是总的位移。

根据线性系统的定义^[11-12],可以把应力波在介质中传播的过程视为一个线性系统对一个入射(源)应力脉冲的响应,从而建立系统的响应模型。在这个模型中,不均匀介质中应力波的曲线传播、反射、折射等现象,均可以归结为系统响应中适当的系数。实验中的不同测点,是对该系统的不同空间响应节点的采样。

2.2 线性系统模型

假设在应力波的弹性区,选择一个封闭的球面 S_0 ,半径为 R_0 。应力在 r, θ 和 φ 方向的分量,分别表示为 $\sigma_k(t) |_{S_0}, k=r, \theta, \varphi$, 则

$$\boldsymbol{\sigma}(t) |_{S_0} = \sigma_r(t) |_{S_0} \mathbf{r} + \sigma_\theta(t) |_{S_0} \boldsymbol{\theta} + \sigma_\varphi(t) |_{S_0} \boldsymbol{\varphi} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}$ 分别表示球坐标系中 3 个坐标方向的单位矢量。

假设在爆心处有脉冲信号 $\delta(t)$,它按照线弹性材料的本构模型在控制方程组(1)、(2)的作用下向外辐射应力波,并在球面 S_0 上产生应力矢量 $\boldsymbol{\sigma}(t) |_{S_0}$ 。它的各个分量可以建立以下的响应模型

$$\sigma_k(t) |_{S_0} = \delta(t) \otimes h_{0,k}(0, 0, 0, r_0, \theta_0, \varphi_0) = h_{0,k}(0, 0, 0, r_0, \theta_0, \varphi_0) \quad (5)$$

式中: $k=r, \theta, \varphi, \otimes$ 表示卷积。 $h_{m,k}(r_1, \theta_1, \varphi_1, r_2, \theta_2, \varphi_2)$ 是球坐标中源点 $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$ 上的 m 向应力矢量和目标点 $(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ 上的 k 向应力矢量间的脉冲响应。当源点位于爆炸源时,目标点的脉冲序列由源点产生,二者间由应力传播路径相联系。

需要指出,从爆心到球面 S_0 上的应力波脉冲响应,是根据线弹性材料的控制方程组,假设爆心存在脉冲信号 $\delta(t)$ 而得到的。它符合线性系统的传播规律,但在塑性区,不是实际的物理过程的描述。引入它,使得整个传播过程可以使用线性系统的模型,简化以下的推理过程。

根据文献[11-12]中进行系统辨识的脉冲响应方法,假设在爆心处有源信号 $x(t)$,它按照线弹性材料的模型向外辐射应力波,并在球面 S_0 上 $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ 处产生应力矢量 $\boldsymbol{\sigma}(t) |_{S_0}$ 。它的各个分量可以建立以下的响应模型

$$\boldsymbol{\sigma}_k(t) |_{S_0} = x(t) \otimes h_{0,k}(0, 0, 0, r_0, \theta_0, \varphi_0) \quad (6)$$

对于经由球面 S_0 继续向外传播的应力信号,根据惠更斯原理,可以把球面 S_0 上各点的应力波作为

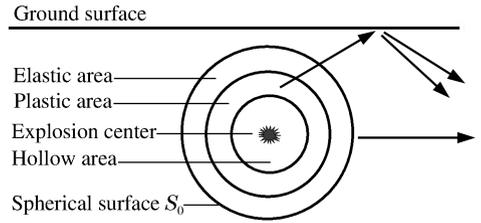


图 1 地下化学爆炸产生的应力状态的分布区域和应力波传播示意图

Fig. 1 Illumination of distribution and transmission of underground chemical explosion-induced stress

向外辐射的源。假设空间采样点为 $P_1(r_1, \theta_1, \varphi_1)$, 球面 S_0 上球坐标为 $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$ 的微元 ds 在 P_1 处产生的应力响应的 k 向分量为

$$\sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t) = \sum_{m=r, \theta, \varphi} \sigma_m(t) |_{S_0} \otimes h_{m,k}(r_0, \theta_0, \varphi_0, r_1, \theta_1, \varphi_1) \quad (7)$$

式中: $h_{m,k}(r_0, \theta_0, \varphi_0, r_1, \theta_1, \varphi_1)$ 是微元 ds 处应力的 m 向分量和测点 P_1 间的 k 向分量间的脉冲响应函数。测点 P_1 处应力响应 k 向分量总的响应, 为球面 S_0 上所有点源在 P_1 处产生的响应的积分

$$\sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t) = \oint_{S_0} \sum_{m=r, \theta, \varphi} \sigma_m(t) |_{S_0} \otimes h_{m,k}(r_0, \theta_0, \varphi_0, r_1, \theta_1, \varphi_1) ds \quad (8)$$

进一步推算可以得到

$$\sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t) = x(t) \otimes h_{0,P_1,k} \quad (9)$$

$$h_{0,P_1,k} = \oint_{S_0} \sum_{m=r, \theta, \varphi} h_{0,m}(0, 0, 0, r_0, \theta_0, \varphi_0) \otimes h_{m,k}(r_0, \theta_0, \varphi_0, r_1, \theta_1, \varphi_1) ds \quad (10)$$

$x(t)$ 体现了源信号的时域特性, 与传播过程和测点位置无关。 $h_{0,P_1,k}$ 体现了传播路径的因素, 与源信号的特性无关。

与采用震源函数和格林函数的地震传播模型比较, $x(t)$ 相当于震源函数, 但用它描述的人射波形自由度更大。 $h_{0,P_1,k}$ 相当于格林函数, 但本文中, 建立的脉冲响应不仅仅局限于源点和测点, 也包括弹性面上的点和测点、各测点之间等多方面。

3 测点间的数据关联

3.1 测点间数据关联模型

类似的, 对于任意测点 $P_2(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ 的 m 向应力分量, 可以写出

$$\sigma_m(r_2, \theta_2, \varphi_2, t) = x(t) \otimes h_{0,P_2,m} \quad (11)$$

可以设计一个滤波器(脉冲响应) $h_{P_1,P_1,k,m}$, 使得

$$h_{0,P_2,m} = h_{0,P_1,k} \otimes h_{P_1,P_1,k,m} \quad (12)$$

这样, 得到测点 P_1 的 k 向分量和测点 P_2 的 m 向分量关联的方程

$$\sigma_m(r_2, \theta_2, \varphi_2, t) = x(t) \otimes h_{0,P_1,k} \otimes h_{P_1,P_1,k,m} = \sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t) \otimes h_{P_1,P_1,k,m} \quad (13)$$

原则上, 关联滤波器 $h_{P_1,P_1,k,m}$ 可按下式计算^[13]

$$h_{P_1,P_1,k,m} = \text{ift} \left(\frac{\text{ft}(\sigma_m(r_2, \theta_2, \varphi_2, t))}{\text{ft}(\sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t))} \right) \quad (14)$$

式中: ft 表示傅立叶变换, ift 表示逆傅立叶变换。

3.2 关联模型的传递性

设有 3 个测点 $P_1(r_1, \theta_1, \varphi_1)$ 、 $P_2(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ 和 $P_3(r_3, \theta_3, \varphi_3)$, 对其 k, m, n 分量间建立响应关联, 其相互间的关联滤波器分别为 $h_{P_1,P_2,k,m}$ 、 $h_{P_1,P_3,k,n}$ 、 $h_{P_2,P_3,m,n}$, 则有以下关系成立

$$h_{P_1,P_3,k,n} = h_{0,P_1,k}^{-1} \otimes h_{0,P_3,n}^{-1} = h_{0,P_1,k}^{-1} \otimes h_{0,P_2,m} \otimes h_{0,P_2,m}^{-1} \otimes h_{0,P_3,n} = h_{P_1,P_2,k,m} \otimes h_{P_2,P_3,m,n} \quad (15)$$

即在存在多个测点的情况下, 各关联响应间通过卷积运算具有传递关系。这个关系与测试数据无关。这也说明, 对于多个测点的情况, 任 2 个测点的关联响应与用于求取该响应的中间测点的选择无关。

3.3 关联模型的应用条件

以上的关联模型仅针对应力信号传播模式的单独分量成立, 如 P 波或者 S 波分量。对于各分量混合在一起的, 需人工将他们分离。

3.4 关联响应的时空特性

关联响应建立的是多个测点数据间的联系。当爆炸实验场地固定时, 弹性应力波传播系统为线性时不变系统, 因此, 关联响应也是与时间无关的。关联响应是爆炸源和 2 个测点的坐标的函数, 当爆炸源或任 1 个测点的位置变化时, 关联响应也随之变化, 需要使用测量数据进行更新。

4 关联响应的计算

4.1 关联响应计算方法的选择

由于爆炸产生的信号为瞬态信号,信号是非平稳的,持续时间很短。由于 FFT 算法的分辨率受信号长度限制,基于式(14)进行关联响应的计算,准确度会很低。从式(13)出发,采用时延神经网络方法来进行关联滤波器的计算。

4.2 时延神经网络及计算中使用的参数

从仿生学角度看,神经网络是模拟人的大脑工作的一个网络结构。它接受多个输入,通过多层神经元结构和各层间众多参数的设置,可以模拟几乎任意复杂的连续函数或者离散的决策机制。它提供了完整的调节机制来调整各连接权系数和偏置参数。时延神经网络也称为卷积网络^[14-15]。本文中采用单神经元时延网络结构,将 $\sigma_k(r_1, \theta_1, \varphi_1, t)$ 作为输入, $\sigma_m(r_2, \theta_2, \varphi_2, t)$ 作为输出,关联响应系数 $h_{P_1, P_2, k, m}$ 作为神经元的连接权系数,通过误差反向传播算法(BP 算法)调节权系数,得到关联响应系数。计算中使用的时延神经网络参数分别为:网络层数为 1,神经元数为 1,输入节点数为 210,输出节点数为 1,偏置项为 0,输出函数为线性函数,时延值为 2 ms,训练方法为 BP 算法。得到的响应序列见图 2。

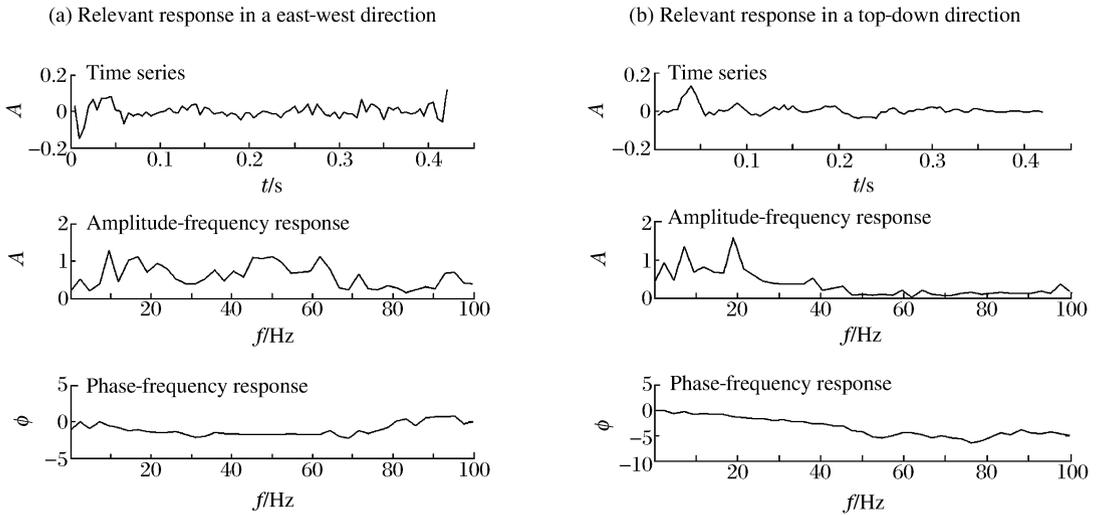


图 2 不同方向上的关联响应的时域序列、幅频和相频响应

Fig. 2 Time series, amplitude-frequency response and phase-frequency response of the relevancy in the different directions

5 基于某地下化学爆炸实验的关联模型验证

在黄土中进行了地下爆炸实验,在地上不同距离处安装了加速度传感器测量地表加速度。使用测到的数据对上述模型进行了检验。

该实验中,使用的是三轴加速度传感器,每一测点得到 3 个方向的波形数据。共在 4 个测点测得数据。各测点离爆心的直线距离分别为 100、300、500、700 m。共进行了 6 次实验。

5.1 计算结果

实验中,第 1 个测点离爆心距离近,其各个分量未分离。从第 2 测点开始,对应于地震学中的 P 波部分,由于波速较快,已经与后面的 S 波等部分分离。随着测点远离爆心,分离的效果也越好。计算只针对这 3 个测点的东西向和垂向数据进行。计算中,部分实验的数据被用来建立关联模型,并用全部实验数据进行验证。图 2 中列出了第 3~4 测点间关联响应的时域序列、幅频响应、相频响应。图 3 中给出了第 4 个测点的测量数据分离的 P 波信号以及根据第 3、第 4 测点实验数据建立的关联模型对第 4 测点数据的预测值。

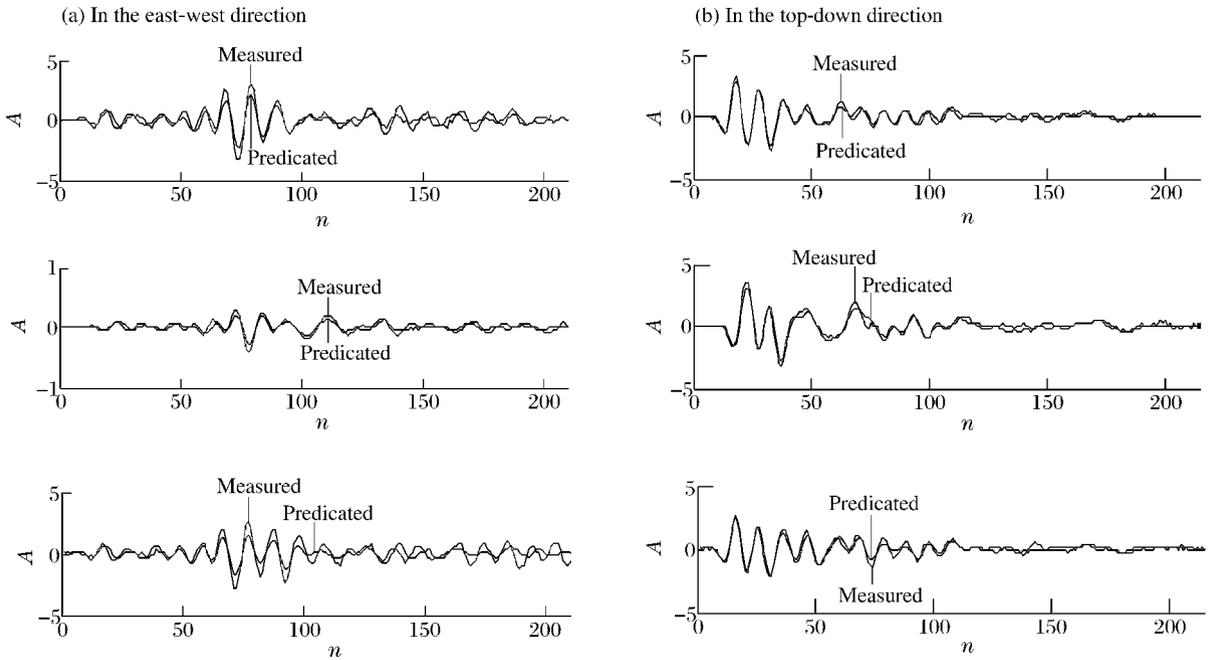


图3 测点4东西向和垂向分量的实测值和预测值

Fig. 3 Measured and predicted data in the east-west and top-down directions for the NO. 4 spot

5.2 结果分析

根据上图和更多的计算结果可以看到,根据测点间实测数据建立的关联响应进行预测,误差很小。这说明,对于第2~4测点的P波成分,建立的数据关联模型是可行的。结果的吻合也说明:该线性系统模型是成立的;P波的主要成分已分离出来;测量数据的一致性较好,包括同一测点各次实验之间和同次实验各测点之间的一致性,都较好。计算值与测量值存在差异的主要原因有:P波数据分离的误差;测量的噪声;关联响应的长度误差;由于测量数据没有时间关联,进行手工对齐带来的误差。

6 结论

建立了固定的源-测点情况下,各测点间测量数据间的数据关联模型,并采用实测实验数据进行了验证。计算结果表明,基于数据关联模型的预测数据和实测数据吻合较好,尤其对于第3和第4测点的数据,吻合非常好。这说明,这个理论模型是成立的。该模型的建立,使得源和各测点位置固定时,各测点间可以建立定量的联系,客观地体现了由实验配置决定的测试数据间的关系,将有助于实验设计、测点数据预估、对实测数据的检验等。也有助于更好地理解复杂介质环境中应力波的传播规律。

参考文献:

- [1] 张海明,陈晓非.地震波研究[J].地震学报,2003,25(5):465-475.
ZHANG Hai-ming, CHEN Xiao-fei. Studies on seismic waves[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(5): 465-475.
- [2] 蔡宗义,吴祖堂,王占江.地运动信号的时频分析[J].解放军理工大学学报,2007,8(5):546-550.
CAI Zong-yi, WU Zu-tang, WANG Zhan-jiang. Time-frequency analysis of ground motion signal[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(5): 546-550.
- [3] 王占江,李孝兰,张若棋.固体介质中球形发散波的实验装置[J].爆炸与冲击,2000,20(2):103-109.
WANG Zhan-jiang, LI Xiao-lan, ZHANG Ruo-qi, et al. An experimental apparatus for spherical wave propagation in solid[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 103-109.
- [4] 王占江,李孝兰,林俊德,等.微量炸药激发的水泥砂浆球运动测量和分析[J].固体力学学报,2002,23(专辑):119-123.
- [5] 王占江,李孝兰,戈琳,等.花岗岩中化爆的自由场应力波传播规律分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(11):

1827-1831.

WANG Zhan-jiang, LI Xiao-lan, GE Lin, et al. Free-field stress wave propagation induced by underground chemical explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1827-1831.

- [6] 王占江,李孝兰,张若棋,等. 用微型炸药球对不同介质中的爆炸力学效应进行模拟试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003,23(增):309-310.
- [7] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1091.
WANG Zhan-jiang. Experimental investigation on tamped and cavity decoupled explosion in rock-soil by mili-explosive charge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(6):1091.
- [8] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [9] Temam R. 连续介质力学中的数学模型[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [10] 姚姚. 地震波场与地震勘探[M]. 北京:地质出版社,2006.
- [11] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [12] 王志贤. 最优状态估计与系统辨识[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
- [13] 陈生潭,郭宝龙. 信号与系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1990.
- [14] Hagan M T, Demuth H B, Beale M H. 神经网络设计[M]. 戴葵,译. 北京:机械工业出版社,2002.
- [15] Duda R O, Hart P E, Stork D G. 模式分类[M]. 李宏东,译. 北京:机械工业出版社,2003

Relevancy between ground-motion signals caused by underground chemical explosion

TANG Yu-zhi^{1,2*}, MA Yuan-liang¹, CAI Zong-yi²,
WU Zu-tang², WANG Zhan-jiang²

(1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: Equations of motion were analyzed for governing underground explosion-induced stress waves spreading in an elastic domain to explain that this stress wave transmission processes could be described by a time-independent linear system model. According to the impulse response methods in the system identification field, the relationships were established to link the impulse series and source functions in the measured points with the response series. Based on the established relationships, a response model was developed to depict the relevancy between the stress series in the measured points. And a method was introduced to calculate the relevant parameters by adopting the adaptive optimization method of neural network and some important parameters were listed. The relevant response model was validated by the experimental data for a certain chemical explosion in soil. The predictions by the relevant response model are in agreement with the measured data and the relevancy between different measured points is determined only by the distributions of the explosion source, measured points and geological parameters.

Key words: mechanics of explosion; relevant response model; impulse response; chemical explosion; stress wave

* Corresponding author; TANG Yu-zhi

E-mail address: yzhtang@163.com