

文章编号: 1001-1455(2010)04-0377-06

# 基于小波包技术的爆破地震效应 计算模型及安全判据研究\*

陈士海<sup>1</sup>, 魏海霞<sup>1, 2</sup>, 张安康<sup>1</sup>, 茅晓辉<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学土木建筑学院, 山东 青岛 266510;

2. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 采用小波包分解和重构的方法, 将复杂的实测爆破地震波速度信号转化为多个简谐波的叠加, 将爆破速度荷载作用下结构的动态响应问题转化为一系列简谐荷载作用下的动态响应问题。通过提出速度因子的新概念并反映在爆破地震效应计算模型中, 考虑了结构动态响应中瞬态响应的影响。同时爆破地震效应计算模型中又融入了归一化的能量比例, 在考虑爆破荷载频率的影响时仅需考虑占有相当能量比例的优势频率的综合作用。然后, 在该计算模型基础上提出了一个新的爆破地震效应安全判据。该判据能反映出爆破激励荷载作用下结构速度响应大小与结构特性、爆破荷载幅值、频率(包括多个优势频率)、持续时间及能量比例等参数的关系。最后结合实际工程案例, 通过使用基于小波包技术的爆破地震效应计算模型与时程分析法, 分别求解出速度响应幅值并将结果进行对比, 验证了所建模型的可行性。

**关键词:** 爆炸力学; 安全判据; 小波包; 地震波; 速度因子

**中图分类号:** O383.2; TU311.3

**国标学科代码:** 130 · 3599

**文献标志码:** A

爆破地震效应安全判据直接关系到爆区周围建筑物及居民的安全问题, 因而一直是爆破工作者关注的焦点。很长时期内一直采用质点振动速度作为建筑物的爆破地震效应安全判据。随着在大量的监测、实验和理论研究工作的进展, 人们逐渐意识到频率是一个不可忽视的重要因素<sup>[1-2]</sup>。因而现行的爆破地震效应安全判据中都考虑了振动速度和频率的综合影响, 但未将爆破振动持续时间和受控建(构)筑物本身的固有特性考虑在内, 因而太过粗糙和笼统, 不可避免地存在一定的缺陷和不足<sup>[3-4]</sup>。制定更加科学合理的爆破地震效应安全判据成为工程爆破领域亟待解决的问题<sup>[5-6]</sup>。

小波包技术在处理爆破地震波这种非平稳信号时具有极强的优越性<sup>[7]</sup>。本文中, 采用小波包分解和重构的方法, 将实测爆破地震波速度信号转化为多个简谐波的叠加, 将爆破速度荷载作用下结构的动态响应问题转化为一系列简谐荷载作用下的响应问题。将考虑瞬态响应的速度因子和归一化处理后的能量比例融入求解爆破地震效应的计算模型中, 并在此基础上提出一个新的考虑诸多影响因素的爆破地震效应安全判据。

## 1 简谐激励荷载作用下多自由度结构体系的动态响应

激励荷载作用下多自由度有阻尼结构体系的运动微分方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为多自由度结构体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\mathbf{I} = (1, 1, \dots, 1)^T$ , 为每一个元素均为 1 的列向量;  $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(t) = (\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dots, \dot{x}_n(t))$ ,  $\ddot{\mathbf{x}}(t) = (\ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \dots, \ddot{x}_n(t))$ , 表示激励荷载引起的建筑物各层质点  $m_i$  的位移、速度、加速度响应, 为  $n$  维向

\* 收稿日期: 2009-05-07; 修回日期: 2009-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778107); 教育部高校博士学科点专项基金项目(20060424002);

山东省泰山学者建设工程专项项目

作者简介: 陈士海(1964—), 男, 教授, 博士生导师。

量;  $\ddot{x}_g(t)$  为激励荷载的加速度。

设激励荷载为简谐速度荷载为

$$\dot{x}_g = v_0 \sin \omega t \quad (2)$$

式中:  $v_0$  和  $\omega$  分别为简谐荷载的幅值和圆频率。

方程(1)的全解分为 2 部分<sup>[8]</sup>: 第 1 部分是齐次方程的通解, 对应的是结构的瞬态响应即有阻尼自由振动响应, 在结构响应的初始阶段可能远远大于稳态响应项, 从而成为结构最大响应的控制量; 第 2 部分是特解, 对应的是结构的稳态响应即直接由外荷载引起的受迫振动响应。

设方程(1)的特解为

$$x_k^p(t) = A_k \cos \omega t + B_k \sin \omega t \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

将式(2)~(3)代入式(1), 展开并整理成  $n$  个方程。由于时间的任意性, 则每个方程左式  $\cos \omega t$  的系数等于右式  $\cos \omega t$  的系数, 而每个方程左式  $\sin \omega t$  的系数均为 0。这样可得  $2n$  个关于  $A_1, B_1, A_2, B_2, \dots, A_n, B_n$  的方程组, 便可解出这  $2n$  个待定系数。

简谐速度荷载作用下  $k$  层质点  $m_k$  的稳态速度响应幅值为

$$v_k^p = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \omega = \beta_k v_0 \quad (4)$$

式中:  $\beta_k$  是与  $v_0$  无关的稳态反应放大系数,  $\beta_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \omega / v_0$ 。

因为多自由度体系的瞬态响应解的求解比较复杂, 为简化运算同时考虑瞬态响应的作用, 引入速度因子  $\eta_k$ , 定义  $\eta_k$  是质点  $m_k$  的总体速度响应(稳态响应与瞬态响应之和)幅值与稳态速度响应幅值之比, 与结构的质量、刚度和阻尼比等特性参数及激励荷载频率有关, 可以通过数值分析法在给定结构和给定激励荷载参数的情况下求得。

质点  $m_k$  的总体速度响应幅值为

$$v_k^w = \eta_k v_k^p = \eta_k \beta_k v_0 \quad (5)$$

由于结构阻尼的存在, 结构的瞬态响应项将会迅速衰减, 最后只剩下由外荷载直接引起的稳态响应项。简谐速度荷载  $\dot{x}_g = v_0 \sin \omega t$  作用下, 单自由度结构中质点  $m_k$  的总体动态速度响应  $v_k^s$  可以近似为

$$v_k^s = \eta_k \beta_k v_0 \sin(\omega t - \phi') \quad (6)$$

式中:  $\phi'$  为结构响应的相位角。

## 2 基于小波包技术的爆破速度荷载作用下多自由度结构体系的动态响应

实测的爆破速度荷载信号由不同频率、不同幅值的波动在一个有限时间范围内的随机组合而成, 包含了很多频率成分的复杂振动信号。由振动理论可知, 复杂的振动信号是由不同振幅和不同频率的简谐波叠加而成。所以实测爆破速度信号可以用一系列简谐荷载的和来代替, 转化可通过小波包分解和重构实现, 具体过程如下。

设  $X_{ij}$  为原始速度信号  $V$  经过小波包分解后第  $i$  层的第  $j$  个节点的小波包分解系数, 对每个小波包分解系数单支重构, 可提取各频带范围的时域信号。以  $V_{ij}$  表示  $X_{ij}$  的单支重构信号, 则总信号

$$V = \sum_{j=0}^{2^i-1} V_{ij} \quad (7)$$

式中:  $i$  是小波包分解的层数(取正整数)。

设单支重构信号  $V_{ij}$  所在频段的幅值为  $V_{ij}^*$ , 经过傅立叶变换后求得的该频段的主频为  $f_{ij}^*$  (圆频率  $\omega_{ij}^* = 2\pi f_{ij}^*$ ), 可以将该支信号表示为简谐正弦波形式:  $V_{ij} = V_{ij}^* \sin(\omega_{ij}^* t)$ 。则总信号  $V$  可表示为

$$V = \sum_{j=0}^{2^i-1} V_{ij}^* \sin(\omega_{ij}^* t) \quad (8)$$

这样, 爆破速度荷载作用下结构的动力响应问题可以转化为一系列简谐荷载作用下的响应问题。参照式(6), 实测爆破荷载速度信号  $V$  作用下多自由度结构的总体动态响应计算模型可近似为

$$V_k^* = \sum_{j=0}^{2^i-1} \eta_{ij} \beta_{ij} V_{ij}^* \sin(\omega_{ij}^* - \phi'_{ij}) \quad (9)$$

式中:  $\eta_{ij}$ 、 $\beta_{ij}$  和  $\phi'_{ij}$  分别为质点  $m_i$  对应重构信号激励下的速度因子、稳态反应放大系数和相位角, 随建筑物各层结构特性参数变化而变化。

设  $V_{ij}$  对应的能量为  $E_{ij}$ , 则有<sup>[9]</sup>

$$E_{ij} = \int |V_{ij}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |v_{jk}|^2 \quad (10)$$

式中:  $v_{jk}$  为重构信号  $V_{ij}$  离散点的幅值。

当能量较大时,  $E_{ij}$  通常是一个较大的数值, 在分析时会带来一些不便。进行归一化处理, 令

$$E = \left( \sum_{j=0}^{2^i-1} |E_{ij}| 2 \right)^{1/2} \quad (11)$$

归一化后的能量比例可以表示为

$$n_{ij} = \frac{E_{ij}}{E} = \frac{E_{ij}}{\left( \sum_{j=0}^{2^i-1} |E_{ij}| 2 \right)^{1/2}} \quad (12)$$

在研究爆破荷载作用下结构的动态响应时发现: 结构的动态响应幅值不仅与各爆破速度重构信号的幅值和频率有关, 与重构信号所占能量比例也有很大的相关度。采用系数修正法, 将归一化的能量比例  $n_{ij}$  融入求解式(9)的幅值即实测爆破速度信号  $V$  作用下多自由度结构的速度响应幅值  $V_{ks}^*$  中, 经过反复数学实验后,  $V_{ks}^*$  可用如下表达式代替

$$V_{ks}^* = 1.3 \sum_{j=0}^{2^i-1} n_{ij} \eta_{ij} \beta_{ij} V_{ij}^* \quad (13)$$

若  $V_g$  为结构体系所在处的爆破地面振动速度幅值, 则式(13)进而简化为

$$V_{ks}^* = 1.3 \sum_{j=0}^{2^i-1} D_{ij} V_g \quad (14)$$

式中:  $D_{ij} = n_{ij} \eta_{ij} \beta_{ij} V_{ij}^* / V_g$ , 为量纲一系数。

式(14)即为本文提出的基于小波包技术上的爆破地震效应计算模型。监测作用在多自由度结构体系的爆破速度信号, 将信号经过适当尺度的小波包分解并重构后, 通过式(14)可以方便地求出结构各层质点的速度响应幅值。当小波包分解层数比较多即重构信号较多时, 可选择能量比例较大的若干个重构信号(5~10个)进行叠加即可, 占有能量比例非常小的信号可以忽略, 这样相当于考虑了占有相当能量比例的优势频率的综合作用。

此方法能反映爆破激励荷载作用下结构速度响应大小与结构特性、爆破荷载频率、幅值及能量比例参数的关系, 因为能量是基于持续时间上累计的能量, 同时又隐含考虑了爆破震动持续时间的作用。该方法合理地考虑了诸多影响因素的综合作用, 有较强的普适性。

### 3 基于上述计算模型的爆破地震效应安全判据

若  $[V_{ks}^*]$  表示多自由度结构体系中质点速度响应的容许幅值,  $[V_g]$  表示爆破地面振动速度的容许幅值, 根据式(14), 有

$$[V_{ks}^*] = 1.3 \sum_{j=0}^{2^i-1} D_{ij} [V_g] \quad (15)$$

则

$$[V_g] = \frac{[V_{ks}^*]}{1.3 \sum_{j=0}^{2^i-1} D_{ij}} \quad (16)$$

式中: $[V_{ks}^*]$  可通过 $[V_{ks}^*]=[\sigma]/(\rho c_p)$ 求得, $[\sigma]$ 为建筑物结构介质的容许应力, $\rho$ 为介质密度, $c_p$ 为纵波波速。

这个基于上述爆破地震效应计算模型上的安全判据考虑了结构特性参数、爆破地震波荷载 3 要素(幅值、频率和持续时间)及震动信号能量比例等诸多参数的共同作用。比现行的只考虑爆破震动速度幅值与震动频率的爆破地震效应安全判据(如 GB 6722-2003《爆破安全规程》)更全面、合理和科学。

#### 4 爆破地震效应计算模型的实际案例

有一个 3 层钢筋混凝土框架建筑物结构,层高为 3.6 m,总高 10.8 m,采用柱下独立基础,基础为 1.2 m×1.2 m×0.8 m,梁截面为 0.2 m×0.2 m,柱截面为 0.4 m×0.4 m,柱网为 4.5 m×4.5 m。楼板厚 0.1 m,混凝土采用 C20,钢筋为 Q235。施加的水平方向的爆破速度荷载时程曲线见图 1。

利用基于简谐波的数值分析法,计算了该三自由度结构体系在各激励频率下的各层质点的速度因子 $\eta_{ij}$ ,见图 2。忽略非常弱的信号(能量比例非常小),取能量比例比较大的 6 个重构信号进行叠加。第 1、2、3 层质点的速度响应幅值 $V_{1s}^*$ 、 $V_{2s}^*$ 和 $V_{3s}^*$ 的求解过程见表 1,在此复杂的运算均通过 Matlab 编程来实现。第 1、2、3 层质点的速度响应幅值分别为 9.32、9.04 和 9.43 mm/s。

利用时程分析法中的集中冲量法<sup>[10]</sup>,在整个离散的爆破振动持续时间域上,采用步步积分法得到三自由度弹性体系在如图 1 所示的水平方向爆破速度荷载作用下结构第 1、2、3 层质点的速度响应幅值分别为 9.4、9.1 和 9.0 mm/s。

用基于小波包技术的爆破地震效应计算模型求得的各层速度响应幅值与用较为成熟的基于结构动力学的时程分析法求得的结果相比,误差分别为 0.8%、0.7%和 4.7%,预测精度较高,因此该方法具有可行性。

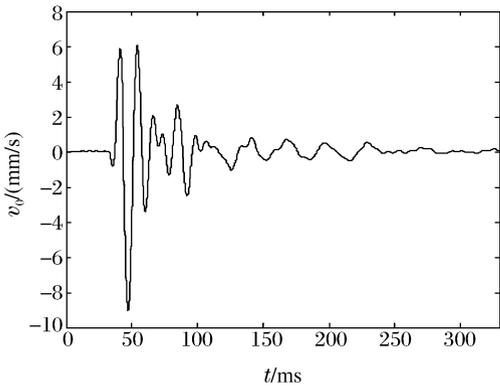


图 1 爆破地震波速度时程曲线  
Fig. 1 Temporal curve of velocity of blasting vibration wave

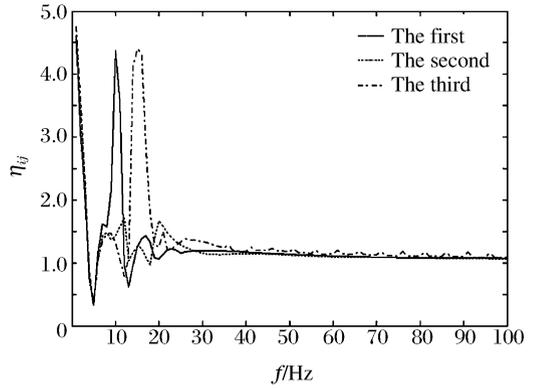


图 2 三自由度结构体系各层质点的速度因子  
Fig. 2 Velocity factors of particles on every floor of the three-freedom structural system

表 1 求解过程

Table 1 Solution course

$\beta_{ij} V_{ij}^* /$ (mm/s)	$\eta_{ij}$	$n_{ij}$	$V_{1s}^* /$ (mm/s)	$\beta_{ij} V_{ij}^* /$ (mm/s)	$\eta_{ij}$	$n_{ij}$	$V_{2s}^* /$ (mm/s)	$\beta_{ij} V_{ij}^* /$ (mm/s)	$\eta_{ij}$	$n_{ij}$	$V_{3s}^* /$ (mm/s)
-----------------------------------	-------------	----------	------------------------	-----------------------------------	-------------	----------	------------------------	-----------------------------------	-------------	----------	------------------------

0.96	1.19	0.087		0.88	1.14	0.087		0.89	1.28	0.087	
5.30	1.10	0.911		5.19	1.09	0.911		5.19	1.14	0.911	
2.39	1.12	0.213		2.32	1.10	0.213		2.32	1.14	0.213	
0.49	1.07	0.010	9.32	0.49	1.06	0.010	9.04	0.49	1.07	0.010	9.43
2.96	1.08	0.326		2.93	1.07	0.326		2.93	1.10	0.326	
1.35	1.08	0.097		1.33	1.07	0.097		1.33	1.09	0.097	

## 5 结 论

(1)采用小波包分解和重构的方法,将复杂的实测爆破地震波速度信号转化为多个简谐波的叠加,将爆破速度荷载作用下结构的动态响应问题转化为一系列简谐荷载作用下的动态响应问题。通过提出速度因子这样一个新概念,考虑了结构动态响应中瞬态响应的影响,并将速度因子项反映在所提出的爆破地震效应计算模型中。用传统方法来求解激励荷载(尤其是简谐激励荷载)作用下的结构动态响应常常仅考虑稳态反应,通过图2可以看出,当激励荷载频率远低于结构(一阶)自振频率时利用传统方法求解出的结果将有相当大的误差。

(2)将归一化的能量比例融入爆破地震效应计算模型中,这样使得结构响应求解过程中除考虑了结构特性参数、爆破地震波幅值、频率的作用外,还同时考虑了信号能量和爆破振动作用时间的影响。当小波包分解层数较多时,可以忽略能量较弱的信号,仅取能量比例较大的信号进行叠加,对计算结果基本不会产生影响。这同时反映出,在考虑爆破荷载频率的影响时仅需考虑占有相当能量比例的优势频率的综合作用。

(3)结合实际工程案例,通过使用基于小波包技术的爆破地震效应计算模型与时程分析法,分别求解出速度响应幅值并将结果进行对比,验证了所建模型的可行性。

(4)在基于小波包技术的爆破地震效应计算模型基础上提出了一个新的爆破地震效应安全判据。该判据能反映出爆破激励荷载作用下结构速度响应大小与结构特性、爆破荷载幅值、频率(包括多个优势频率)、持续时间及能量比例等参数的关系。

## 参考文献:

- [1] 阳生权,廖先葵,刘宝琛.爆破地震安全判据的缺陷与改进[J].爆炸与冲击,2001,21(3):223-228.  
YANG Sheng-quan, LIAO Xian-kui, LIU Bao-chen. Default of the judging standard of blasting vibration safety[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(3):223-228.
- [2] 焦永斌.爆破地震安全评定标准初探[J].爆破,1995(3):45-47.  
JIAO Yong-bin. Preliminary discuss on judging standard of blasting vibration safety[J]. Blasting, 1995(3):45-47.
- [3] 中国生,徐国元,熊正明.基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J].爆炸与冲击,2006,26(3):222-227.  
ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, XIONG Zheng-ming. Application research of the energy analysis method for blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):222-227.
- [4] 李宏男,王丙乾,林皋.爆破地震效应若干问题的探讨[J].爆炸与冲击,1996,16(1):61-67.  
LI Hong-nan, WANG Bing-qian, LIN Gao. Studies on some problems on explosion earthquake responses[J]. Explosion and Shock Waves, 1996,16(1):61-67.
- [5] 中国生.基于小波变换爆破震动的应用基础研究[D].长沙:中南大学,2006.
- [6] 吴立,陈建平,舒家华.论爆破地震效应[J].爆破器材,1999,28(5):24-27.  
WU Li, CHEN Jian-ping, SHU Jia-hua. Seismic effect by blasting[J]. Explosive Materials, 1999,28(5):24-27.
- [7] 林大超,施惠基,白春华,等.爆破震动时频分布的小波包分析[J].工程爆破,2002,8(2):1-5.  
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. On time-frequency distribution of blasting vibration through wavelet packet transform[J]. Engineering Blasting, 2002,8(2):1-5.

- [8] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:51-57.
- [9] 凌同华,李夕兵,王桂尧,等. 爆心距对爆破振动新号频带能量分布的影响[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(2):53-55.  
LING Tong-hua, LI Xi-bing, WANG Gui-yao, et al. Influence of distance from blasting center on frequency bands energy distribution of blasting vibration signals[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007,29(2):53-55.
- [10] Biggs J M. 结构动力学[M]. 姚玲森,程祥云,译. 北京:人民交通出版社,1982:20-23.

## Computational model and safety criterion of blasting vibration effect based on wavelet packet techniques\*

CHEN Shi-hai<sup>1</sup>, WEI Hai-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG An-kang<sup>1</sup>, MAO Xiao-hui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, China;

2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)

**Abstract:** Complex measured velocity signals of blasting vibration are transformed into the superposition of several simple harmonic waves by the wavelet packet decomposition and reconstruction techniques. In this way, the problem of structural dynamic response under the action of blasting velocity load becomes the problem of that under a series of simple harmonic loads. By introducing a new concept of velocity factor into the computational model of blasting vibration effect, the contribution of structural transient response is considered into structural dynamic response. At the meantime, normalized energy proportion is added to the computational model, and only dominant frequencies of relatively large energy proportions can be included when considering the influence of blasting load frequencies. Then, on the basis of the model above, a new safety criterion of blasting vibration effect is put forward, which can reflect the relation between the structural velocity response magnitude under blasting load stimulation and the following parameters: structural characteristics, amplitude, frequencies including several dominant frequencies, duration and energy proportion of blasting load. In the end, by combining with an actual engineering case, velocity response amplitudes are calculated by the computational model put forward in this paper and the temporal analysis method, respectively. And the computational results show that this computational model is feasible.

**Key words:** mechanics of explosion; safety criterion; wavelet packet; blasting vibration; velocity factor

\* Received 7 May 2009; Revised 25 June 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50778107)

Corresponding author: CHEN Shi-hai, cshblast@163.com