

# 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析

李夕兵<sup>1</sup>, 凌同华<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 长沙理工大学 公路工程学院, 湖南 长沙 410076)

**摘要:** 利用地震工程中广泛应用的反应谱理论对爆破地震效应进行研究。根据单自由度体系反应谱理论, 采用计算量少、精确度高的三角插值解析公式法取代常用的分段线性插值法进行反应谱数值计算。结合大量工程爆破地震监测资料, 对单段与多段微差爆破振动信号进行反应谱分析。分析结果表明, 在单段与多段微差爆破中, 不同结构体对爆破震动的响应显著不同; 多段微差爆破在起到干扰降震的同时, 使结构体对其震动响应出现选择放大的几率增加, 不同结构体对爆破地震波的选择放大作用也不同。该方法对综合研究爆破机理和爆破地震波, 特别是为将来构建爆破振动速度-频率相关安全准则提供了一种实用的分析技术。

**关键词:** 爆炸力学; 爆破地震效应; 反应谱; 三角插值; 单自由度体系; 爆炸参量

**中图分类号:** TD 235.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)14-2409-05

## RESPONSE SPECTRUM ANALYSIS OF GROUND VIBRATION INDUCED BY SINGLE DECK AND MULTI-DECK BLASTING

LI Xi-bing<sup>1</sup>, LING Tong-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** The response spectrum that is largely applied in earthquake engineering is employed to study the blast seismic effect. Based on the response spectrum theory of system with single degree of freedom, the response spectrum is calculated by using analytical expression of trigonometric interpolation with great efficiency and high precision instead of piecewise linear interpolation. Response spectrum analysis of blast vibration signals in single and multi-deck blasting is performed with a vast amount of monitoring data from engineering blast. The results show that response characteristics of vibration induced by single deck and multi-deck blasting have marked differences. Multi-deck blasting not only has the good effects of reducing vibration by wave interference, but also increases the probability of selective magnification in the structural response on blasting-induced vibration. The effect of selective magnification varies with the types of structure. It is shown that the method provides an effective tool for studying blast seismic effect, especially constituting velocity-frequency safety criteria.

**Key words:** explosion mechanics; blast seismic effect; response spectrum; trigonometric interpolation; system with single degree of freedom; explosion parameter

## 1 引言

爆破振动破坏效应实质上是一个动态破坏问

题, 因此估计结构体在爆破振动作用下的反应, 较为理想的方法是将实际地面运动输入结构体并作为动力分析<sup>[1]</sup>。事实上, 从动力学方法入手分析结构体对振动的动力响应过程, 已成为各国学者研究振动

**收稿日期:** 2004-02-12; **修回日期:** 2004-05-08

**基金项目:** 国家重点基础研究规划(973)项目(2002CB412703); 国家自然科学基金资助项目(50490274)

**作者简介:** 李夕兵(1962-), 男, 1983年毕业于中南大学矿山系采矿工程专业, 现为博士生导师、“教育部长江学者奖励计划”特聘教授, 主要从事采矿与岩石力学方面的教学与研究工作。Email: xbli@mail.csu.edu.cn.

对结构体的破坏的一种主要方法。目前在地震工程中应用比较成熟的反应谱理论，成为分析结构体在不同动力条件下的爆破振动响应的一种重要手段<sup>[2-8]</sup>。在我国爆破工程界，以往的研究主要是关于爆炸参量(爆破总药量、最大段药量、微差延期时间、场地条件等)对爆破振动信号强度的影响，而开展结构体对爆破振动响应分析，研究爆炸参量对爆破振动响应的影响尚不多见。本文结合陕西太白金矿的爆破振动实测资料，对单段与多段微差爆破振动信号进行了反应谱分析，总结了结构体的爆破振动响应的一些特点和规律，对综合研究爆破机理和爆破地震效应具有一定的指导意义。

## 2 反应谱理论及其数值计算

### 2.1 反应谱理论

反应谱理论是以单自由度粘性阻尼体系在实际地震过程中的反应为基础来进行结构反应分析的<sup>[1]</sup>。根据这一理论，应用反应谱曲线可以计算出在一定振动载荷作用下结构体的动力反应，即是说任何一条反应谱曲线都是许许多多具有不同动力特性的单质点结构对一个地震动时程的动力最大反应按时间排列起来的结果<sup>[9]</sup>。实际应用中，常用体系的最大速度反应与体系自振周期的函数关系来表示反应谱曲线，即满足以下运动方程：

$$\ddot{U} + 2\xi\omega\dot{U} + \omega^2U = \ddot{u}_0(t) \quad (1)$$

式中： $\ddot{U}$ ， $\dot{U}$ ， $U$  分别为系统相对于地面的加速度、速度、位移； $\xi$ ， $\omega$  分别为系统的阻尼比和自振圆频率； $\ddot{u}_0(t)$  为地面运动加速度输入，亦即爆破地震波加速度记录。这样，当爆破地震波  $\ddot{u}_0(t)$  作用于某一具有确定自振圆频率的振动体系时，通过求解式(1)可以得到该结构体的最大振动响应速度；同样，若改变自振圆频率  $\omega$ ，即  $\omega$  取一系列值时(此时  $\omega$  不同的取值代表具有不同圆频率的振动体系)，就可以得到一系列最大速度绝对值与对应圆频率的反应谱曲线  $\dot{U}(\omega)$ 。

在实际应用中，常用到“速度放大倍数”的概念。所谓速度放大倍数是指体系最大反应速度与爆破地震波输入体系的最大速度的比值<sup>[1, 10]</sup>，即

$$\beta = \frac{\dot{U}(\omega)}{|\dot{u}_0(t)|_{\max}} \quad (2)$$

式中： $\beta$ ， $\dot{U}(\omega)$ ， $|\dot{u}_0(t)|_{\max}$  分别为速度放大倍数、体系最大反应速度、爆破地震波输入体系的最大速

度。

如用  $\beta$  的值(无量纲)作为纵坐标， $\omega$  的值作为横坐标，所形成的  $\beta(\omega)$  曲线称为标准反应谱。标准反应谱反映了结构体对爆破地震波中某些频率成分的选择放大作用，体现出结构体对爆破震动响应时的动力效应。

### 2.2 反应谱的数值计算

反应谱的数值计算方法有许多，如直接积分法、中点加速度法、褶积算法<sup>[11-13]</sup>。为提高计算精度，各种插值算法不断出现，如文[13]中采用三次样条函数求积法、文[14]中采用抛物线内插反应谱计算方法、文[15]提出三角插值解析公式法以及一直被广泛应用的分段线性插值法等。三角插值解析公式法直接从运动方程(式(1))出发，通过求得右端扰力项  $\ddot{u}_0(t)$  的解析表示，从而实现了输入加速度的连续表示。与其他各种算法比较，该方法具有计算量少、精确度高的特点。本文根据三角插值解析公式法用 MATLAB 语言编制了反应谱数值计算程序。

## 3 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析

### 3.1 爆破振动测试

在陕西太白金矿采场崩矿时，用四川动态测试研究所生产的 EXP2850 爆破振动分析仪(最高采样频率 50 kHz)和 CDJ-1 型速度传感器(可测频率范围为 2~500 Hz)分别对单段与多段微差爆破振动进行过多次测试，从中抽取 3 条单段爆破振动和 3 条多段微差爆破振动信号进行反应谱分析，其爆破条件、测点位置见表 1。

表 1 测试点的爆破条件  
Table 1 Condition of blasting measurement

| 存盘号   | 测点到爆心 | 最大段   | 总药量   | 雷管段号                |
|-------|-------|-------|-------|---------------------|
|       | 距离/m  | 药量/kg | /kg   |                     |
| DDJ-1 | 66.0  | 7     | 7     | 4(单孔)               |
| DDJ-2 | 78.0  | 18    | 18    | 4(双孔)               |
| DDJ-3 | 89.0  | 21    | 21    | 4(三孔)               |
| TB2-1 | 23.6  | 170   | 1 200 | 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |
| TB2-2 | 57.5  | 170   | 1 200 | 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |
| TB2-3 | 79.1  | 170   | 1 200 | 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9 |

注：各测点处的矿岩地质条件相对简单，无明显节理、裂隙。

由于反应谱计算中输入体系的原始数据是加速度而不是速度，因此必须将测试到的速度信号转换为加速度信号。EXP2850 爆破振动分析仪自带的数据分析软件可以实现速度与加速度间的相互转换，图 1 所示爆破振动信号即是经转换后得到的。

### 3.2 爆破振动反应谱

对于实际的构(建)筑物，其阻尼比  $\xi$  一般为 0.02 ~ 0.05，而在工程抗震计算中常取结构振动阻尼比  $\xi = 0.05$ <sup>[10]</sup>。根据运动方程(式(1))，采用三角插值解析公式法对表 1 所列信号分别进行反应谱数

值计算，各信号对应的速度反应谱曲线见图 2, 3，对应的标准反应谱曲线示于图 4, 5。

### 3.3 单段与多段微差爆破地震的反应谱特征分析

(1) 从图 2 ~ 5 都可以看出，单段爆破振动信号的反应谱和标准反应谱曲线的形态比多段微差爆破振动信号的反应谱和标准反应谱曲线的形态要简单，后者的“突峰”数量比前者多。表明多段微差爆破产生的振动其频率成分比单段的丰富，多段微差爆破在起到干扰降震的同时，使结构对其振动响应出现选择放大的几率增加。显然这是实施多段微

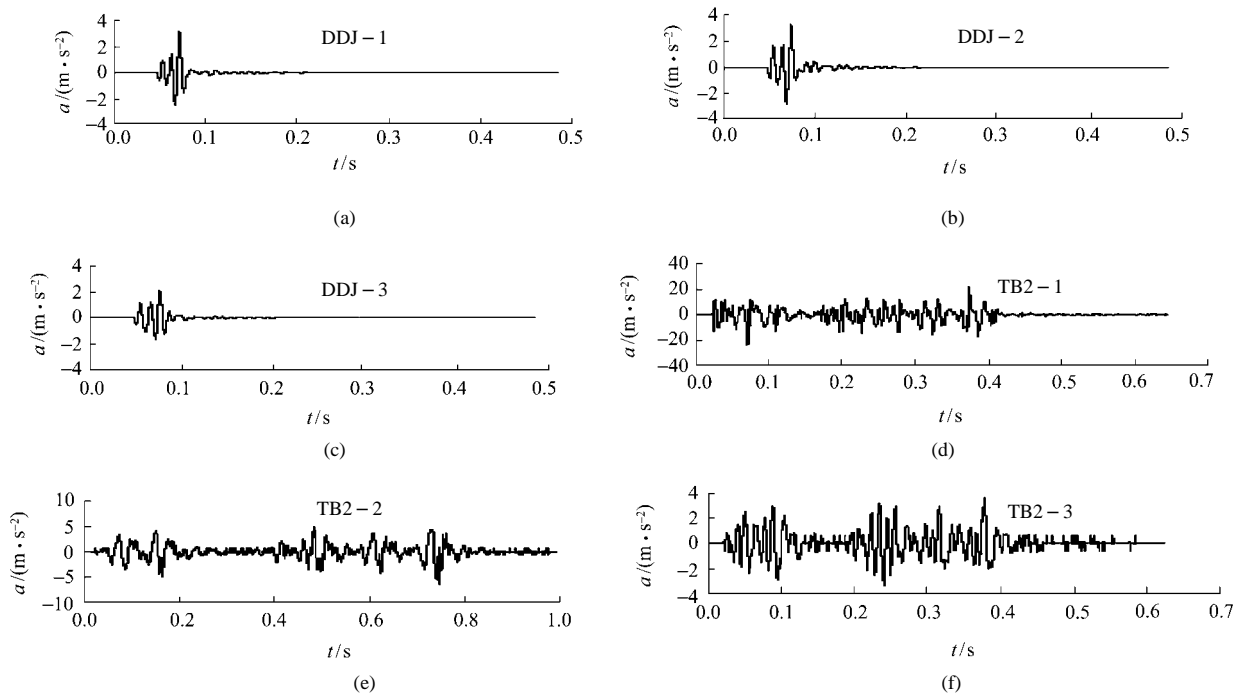


图 1 爆破振动加速度时程曲线

Fig.1 The acceleration vs. time curves of blasting-induced vibration signals

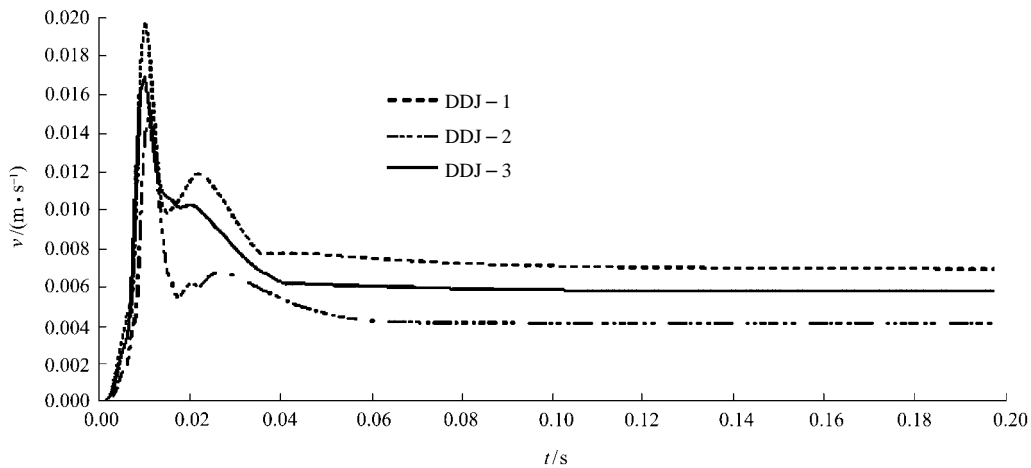


图 2 单段爆破速度反应谱曲线

Fig.2 The velocity response spectrum curves of vibration signals induced by single deck blasting

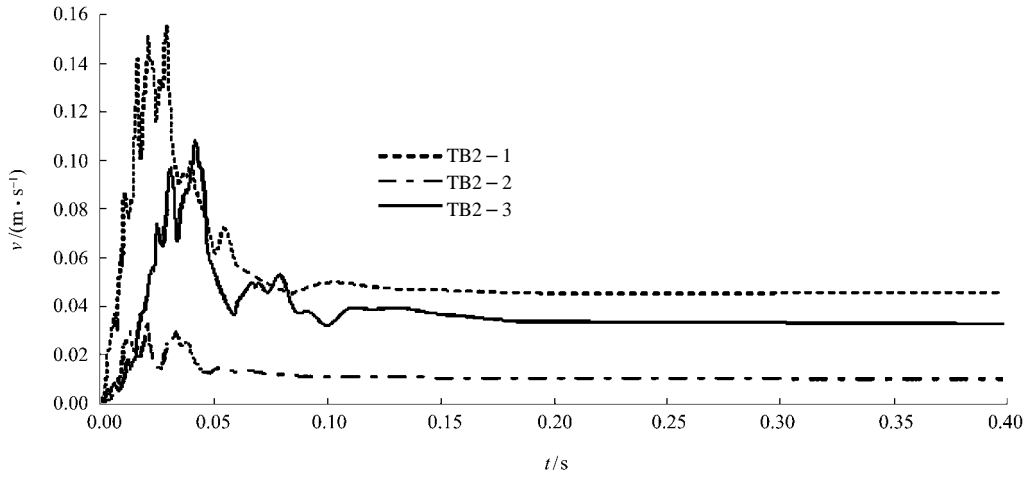


图 3 多段微差爆破振动速度反应谱图

Fig.3 The velocity response spectrum curves of vibration signals induced by multi-deck blasting

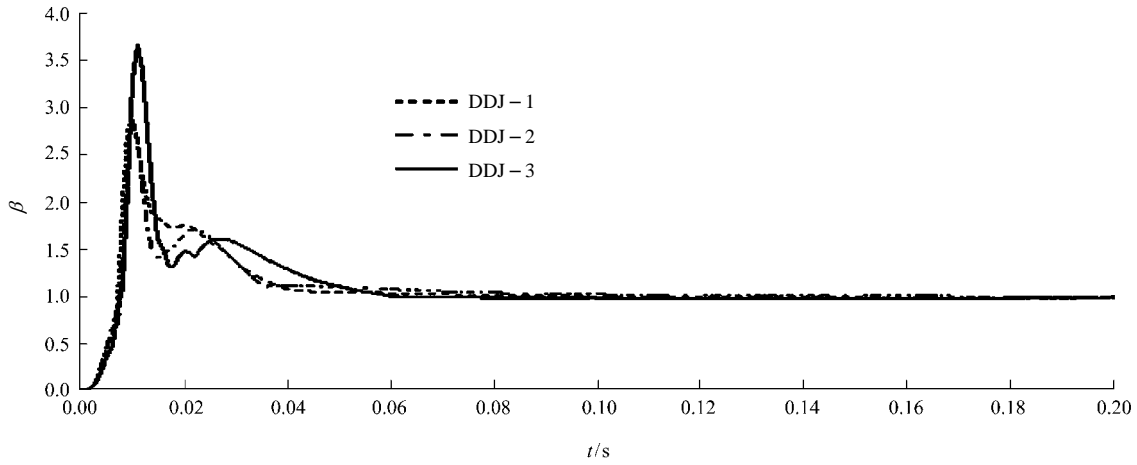


图 4 单段爆破速度标准反应谱曲线

Fig.4 The standard response spectrum curves of vibration signals induced by single deck blasting

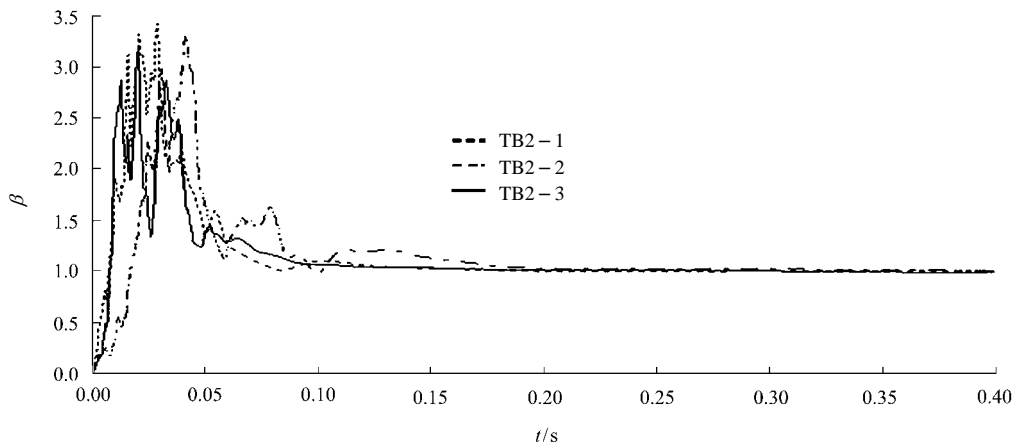


图 5 多段微差爆破振动标准反应谱图

Fig.5 The standard response spectrum curves of vibration signals induced by multi-deck blasting

差爆破时不利的一面。

(2) 爆破地震波在由近及远的传播过程中,随着传播距离的增加,其强度不断减小(图 1),对应的速度反应谱峰值亦相应减小(图 2, 3)。但在图 4,

5 中可以看出, 爆破地震波在由近及远的传播过程中, 其标准反应谱峰值却没有减小的趋势。这一现象表明爆破地震波在传播过程中, 速度放大倍数主要取决于结构体本身, 不同的结构体(具有不同的自振频率)对地震波的选择放大作用不同。

(3) 从图 2, 3 可以看出, 随着到爆源距离的增加, 速度反应谱峰值所对应的周期有增加的趋势(频率降低), 表明爆破地震波在传播过程中, 虽然其振动强度不断衰减, 但结构体对其响应的振动主频有往低频发展的趋势。这一点可以解释工程爆破中离爆源近的构(建)筑物没有遭到破坏, 而离爆源远的构(建)筑物反而遭到破坏的现象(一般构筑物的自振频率较低)。

## 4 结 论

(1) 用三角插值解析公式法取代常用的分段线性插值法并用 MATLAB 语言自编程序对爆破震动信号进行反应谱计算。该方法不仅提高了反应谱计算精度, 而且程序直观易懂, 各个层次的研究人员均可运用该程序进行反应谱计算, 具有很强的实用性。

(2) 多段微差爆破产生的振动其频率成分比单段的丰富, 多段微差爆破在起到干扰降震的同时, 使结构对其振动响应出现选择放大的几率增加。

(3) 爆破地震波在传播过程中, 速度放大倍数主要取决于结构体本身, 不同的结构体对地震波的选择放大作用不同。

(4) 爆破地震波在传播过程中, 虽然其振动强度不断衰减, 但结构体对其响应的振动主频有往低频发展的趋势。

### 参考文献(References) :

[1] 张雪亮, 黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京: 地震出版社, 1981.(Zhang Xueliang, Huang Shutang. Effect of Blasting Ground Vibration[M]. Beijing: Earthquake Press, 1981.(in Chinese))

[2] 丁刚德, 王伟策, 陈小波. 微差爆破的爆破地震反应谱分析[J]. 爆破, 1997, 14(3): 24-29.(Ding Gangde, Wang Weice, Chen Xiaobo. Analysis of blasting vibration response of short delay blasting[J]. Blasting, 1997, 14(3): 24-29.(in Chinese))

[3] Gazetas T. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art[J]. International Journal of Soil Dyn. Earthq. Eng., 1983, 2(1): 2-42.

[4] Kaul M K. Stochastic characterization of earthquake through their

response spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, (6): 497-509.

[5] 刘 军, 吴从师. 用传递函数预测建筑结构的爆破震动效应[J]. 矿冶工程, 1998, 18(4): 1-4.(Liu Jun, Wu Congshi. Predicting blasting vibration effect of building using transfer function[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1998, 18(4): 1-4.(in Chinese))

[6] 李玉民, 倪芝芳. 地下工程开挖爆破的地面振动特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 274-278.(Li Yumin, Ni Zhifang. The characteristics on surface vibration of blasting in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 274-278.(in Chinese))

[7] 李方泽, 刘馥清, 王 正. 工程振动测试与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.(Li Fangze, Liu Fuqing, Wang Zheng. Testing and Analyzing of Engineering Vibration[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.(in Chinese))

[8] John C M St, Zahrah T F. Seismic design of underground structure[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1987, 2(2): 165-197.

[9] 李 杰. 几类反应谱的概念差异及其意义[J]. 世界地震工程, 1993, 9(4): 9-14.(Li Jie. Several response spectrums' conception difference and their significance[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1993, 9(4): 9-14.(in Chinese))

[10] 吕西林, 周德源, 李思明, 等. 建筑结构抗震设计理论与实例[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.(Lu Xilin, Zhou Deyuan, Li Siming, et al. Theory and Example of Antivibration for Building Structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.(in Chinese))

[11] Bismarck-Nasr M N, de Oliveira M. On enhancement of accuracy in direct integration dynamic response problems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991, 20(7): 699-715.

[12] 王前信, 王孝信. 工程结构地震力理论[M]. 北京: 地震出版社, 1979.(Wang Qianxin, Wang Xiaoxin. Seismic Force Theory of Engineering Structure[M]. Beijing: Earthquake Press, 1979.(in Chinese))

[13] 姜建武, 龙 源, 方 向, 等. 基于反应谱值分析的爆破震动破坏评估研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 41-46.(Lou Jianwu, Long Yuan, Fang Xiang, et al. Study on blasting vibration damage based on response spectrum[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 41-46.(in Chinese))

[14] 蔡长青, 沈建文. 抛物线内插反应谱计算方法[J]. 世界地震工程, 2001, 17(1): 87-92.(Cai Changqing, Shen Jianwen. Calculation of response spectrum by parabolic interpolation[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(1): 87-92.(in Chinese))

[15] 朱 敏, 朱镜清. 反应谱计算的三角插值解析公式法[J]. 世界地震工程, 2001, 17(3): 62-64.(Zhu Min, Zhu Jingqing. Calculation of response spectrum based on trigonometric interpolation[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(3): 62-64.(in Chinese))