



地震控制策略

郑文衡, 梁枢平, 王 乘

(华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 提出了控制地震概念和用时间反转方法实现非均匀地壳中波的聚焦,从而实现动力触发地震的思路。采用了有限元动力学仿真技术,研究了在波的遍历模型、线性不均匀的介质、以至非线性介质中的时间反转,探讨了在潜在震源区域人工聚能的可能性。结果表明这种聚能是可行的,在考虑介质非线性的条件下,波能量至少可以近似地聚焦。

关键词: 控制地震; 触发; 时间反转; 动态有限元; 聚焦

中图分类号 P315.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-0844(2004)01-0082-07

0 引言

地震发生在地壳深处,震源不可直接接触。为了通过控制地震达到减轻地震灾害的目的,将一列人工产生的波聚焦到潜在的震源点是人工触发地震的可能有效方法。由马提斯·芬克^[4]在超声波研究中发展起来的时间反转方法,能使在非均匀地壳中人工激发的地震波聚焦。他通过物理实验得出一些时间反转过程的规律,研究了波在一个具有遍历特性系统中的行为。遍历系统的含义是向任意方向发出的一列波最终要通过系统中全部的点。他的实验表明时间反转效应可以通过一点来实现,而不需要一个阵列上的许多点。也就是说,时间反转现象具有全息特性,一个点接收的波包含了全域的信息。但他的实验条件不适合研究象地壳中的地震波那样较长的波列以及较大的系统。为了得到地壳的时间反转动力学响应,本文运用了非线性动态有限元方法(ND-FEM)来研究地壳在变化载荷下的时间反转行为。

1 非线性动态有限元原理

2.1 一般模型

考虑拉格朗日坐标系中的多介质系统,在时间 $t=0$,以及 $t=t_n$,设 m 代表不同的介质, V 是介质总体积, S_{in} 是内部冲击表面, S_x 是位移边界条件,而 S_l 是力边界条件,根据虚功原理,控制方程是

$$\sum_{m=1}^M \int_{V_m} [\sigma_{ij} \delta x_{i,j} + (\rho_i \ddot{x}_i - F_i) \delta x_i] dV - \int_{S_{T_m}} T_i \delta x_i dS = 0 \quad (1)$$

这里 σ_{ij} 是应力; V_m 是第 m 种介质总体积; S_{T_m} 是第 m 种介质边界总面积; dV 是体积微分元; dS 是微面积元; ρ_i 对应于第 i 种介质密度; $x_i (i=1,2,3)$ 定义了位置坐标; $\ddot{x}_i$ 是加速度; $\delta x_i, \delta x_{i,j}$ 分别是虚位移及其导数的增量; F_i 与 T_i 分别为体积力与面力载荷。

将多介质系统的总体积离散为 n 个单元,单元内任意一点随时间 t 变化的位置坐标 $x_i (i=1,2,3)$ 可用形函数 N_j (本文采用8节点块单元; $j=1,2,\dots,8$)与节点位置 x_i^j 插值表示为

$$x_i = \sum_{j=1}^8 N_j(\xi, \eta, \zeta) x_i^j(t) \quad (2)$$

式中 ξ, η, ζ 是单元的局部坐标,块单元形函数 N_j 被定义为

$$N_j(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi \xi_j) (1 + \eta \eta_j) (1 + \zeta \zeta_j) \tag{3}$$

其中 ξ_j, η_j, ζ_j 是单元局部坐标系下节点位置,取值为 $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$ 。因此离散后的虚功原理可以用矩阵的形式表示为

$$\sum_{mn} \left[\int_{V_{mn}} (\rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} \mathbf{a} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} - \rho \mathbf{N}^T \mathbf{F}) dV - \int_{S_{T_{mn}}} \mathbf{N}^T \mathbf{T} dS \right] = 0 \tag{4}$$

这里 $\mathbf{N}$ 为单元形函数 N_i 的集合矩阵, $\mathbf{a}$ 为节点加速度矢量,与加速度 $\ddot{x}_i$ 的关系式为

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{N} \mathbf{a} \tag{5}$$

$\mathbf{B}$ 是应变协调矩阵,定义为

$$\mathbf{B} = \mathbf{D}^T \mathbf{N} \tag{6}$$

$\mathbf{D}$ 为与单元类型有关的算子矩阵, $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{T}$ 是给定的单元体积力与面力载荷矢量, $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力矢量。

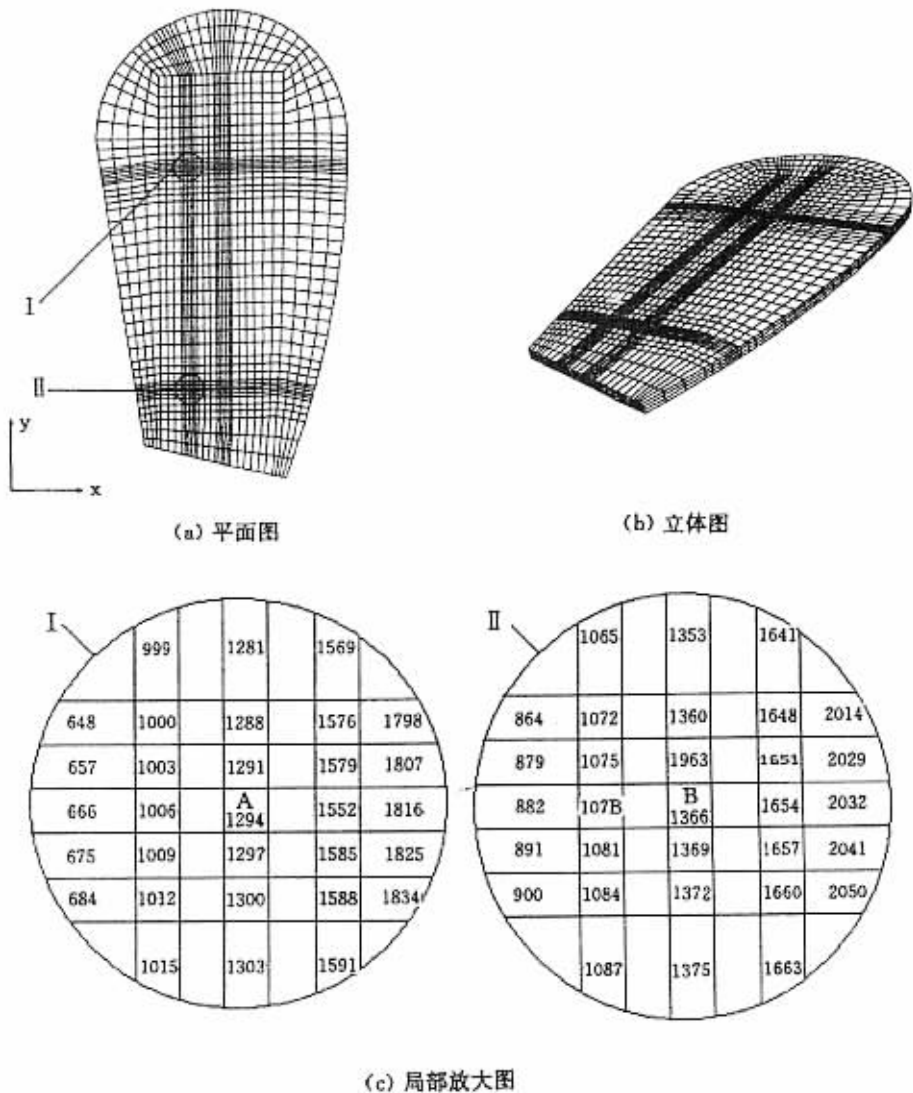


图 1 三维有限元模型

Fig. 1 3-D dynamic FEM model.

式(4)即为进行动态过程计算的基本公式。对于系统内作用面 S_{in} 上的介质相互作用,式(4)中并未明确定义,只有在计算模型中附加约束条件。在保证几何协调性与动量守恒的基础上,以内能调整保证总能量守恒作为补充条件,建立起界面相互作用处理模型,才能使界面相互作用这个特定的非线性边界条件问题得以完整描述。这里附加约束条件为内界上法向位移和法向应力相等,切向应力等于内摩擦力。

1.2 动态过程计算方法

由于动态系统中一般呈现出较强的非线性(几何、材料和内作用边界的耦合非线性性),要求动态计算中积分的时间增量适当地小,从而能正确清楚地反映动态响应过程。因此本计算中采用了显式积分方法,根据计算稳定性的要求,在计算过程中由计算机程序自动决定适当的时间步长。为讨论简便起见,取以下形式的动力学平衡方程:

$$M\ddot{u} + Ku = F(t, u) \quad (7)$$

式中 M 、 K 、 u 、 F 和 t 分别为质量矩阵、刚度矩阵、位移、载荷和时间。

两阶中心差分的格式为

$$\ddot{u}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = \frac{1}{\Delta t} [u(t + \Delta t) - u(t)] \quad (8)$$

和

$$\ddot{u}(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[\dot{u}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \dot{u}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right) \right] \quad (9)$$

由以上三式,可以得到每一时刻的递推关系:

$$Mu(t + \Delta t) = (\Delta t)^2 F(t) + [2M - (\Delta t)^2 K] u(t) - Mu(t - \Delta t) \quad (10)$$

2 建模及计算结果

2.1 小型线性模型

模型必须在物理上真实,数学上简洁。由于地壳存在不均匀性,存在断层和不同尺度的裂隙,都将导致地壳中波的散射、反射、折射和绕射,因此地壳可以当作一个具有波的遍历特性的系统。我们假设一种由均匀材料构成、无裂隙的模型也具有波的遍历特性,其遍历特性只须由边界条件来保证:不规则的边界,大致的长、宽、高比例不是简单整数;边与边不正交;某些边是曲线形;厚度为常数;边界在板的中面法线方向固定。模型的密度、弹性模量、泊松比、均采用典型的岩石参数(R. Wang, 1980, 1982; S. Wang, 1980)。由于重力每时刻与支座反力处于静力学平衡,为简洁计不计算重力的影响。

图1是所研究的模型,其中两个单元(单元号为1294和1366,记为A和B)分别是随机选出震源点和纪录台站点。

2.2 用小型线性模型进行模拟

在A点施加一个峰值为5帕斯卡、持续时间0.1秒的半周期正弦压力脉冲,通过数值计算得到应力、应变、位移、速度等物理场随时间变化的函数。此处仅提取平均正应力场,即平均压力的

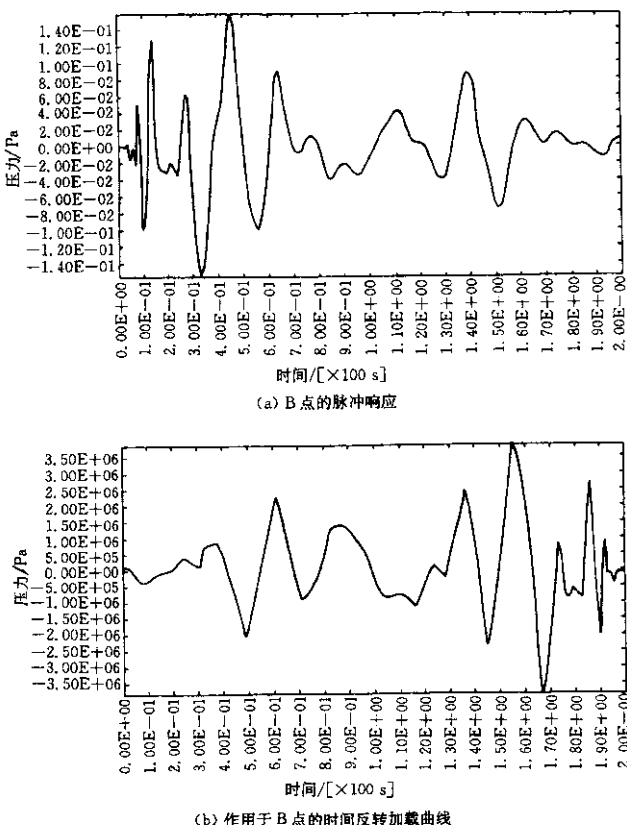


图2 只需一个点的时间反转

Fig.2 Time Reversal by Single Point.

时变场。压力脉冲一波的形式传播,在不规则的边界上反射,各种反射波以一种很复杂的形式互相叠加;以至于最终的结果是一种混沌响应。

因为由 A 点的脉冲激励的任意方向的波最终都要经过 B 点,只需要再 B 点加载一个时间反转的响应纪录,就可以在 A 点重建一个脉冲。考虑到无限长时间的时间反转是不能实现的,模型中在 B 点表面设置了能量耗散机制以便截取有限长的响应时间历程,同时削弱在时间反转加载初始瞬间可能有的冲击作用。稍后的研究表明这种影响很小。在非线性动态有限元中,能量耗散通过设置波吸收边界条件实现,在物理上相当于单元上作用着临界阻尼。同样我们只是从任意点 B 提取 200 s 的响应纪录(图 2(a)),而不一定要在边界上选点,亦不需要整个边界上所有点的阵列。运用时间反转过后的响应记录作为载荷曲线,施加于同一点(图 2(b)),得到一个动力学效应,这个效应可以按照很短的时间步长逐步“定格”,仔细察看。更多的仿真研究表明,反转载荷的振幅乘以一个载荷因子,对时间反转特性影响很小,载荷因子可达到 10^6 。

经过后处理,得到一系列以颜色标度(颜色代表计算结果中物理场的强度,此处是平均压力)的动画画面。研究这些动画画面,我们找到了反转的直达波以及众多的反射波相互干涉的证据,这种干涉在一个很短的时间和空间范围形成一个高压脉冲,其位置在 A 点(图 3),其时刻在反转加载的 200 s(图 4)。图 4 是 A 点在反转过程中的平均压力随时间变化的历程。

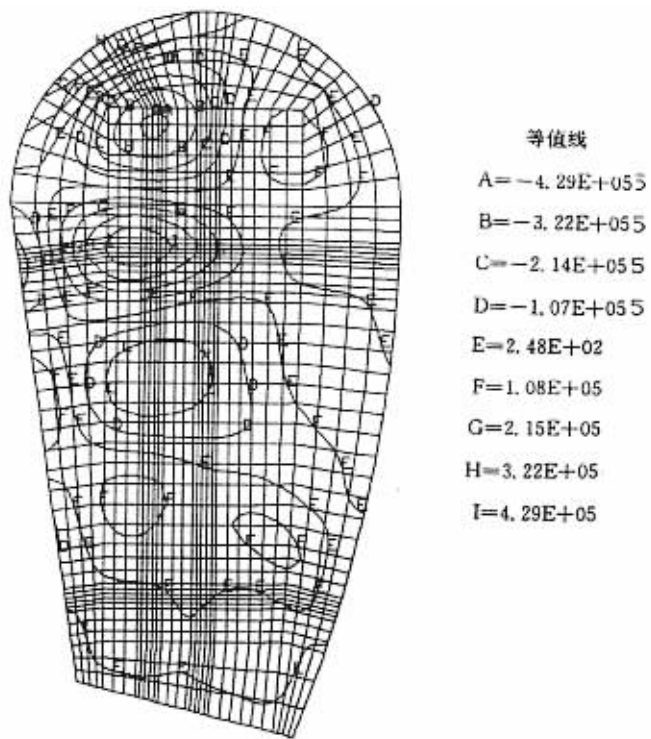


图3 时间反转加载 200 s 后的压应力分布

Fig. 3 The distribution of pressure at 200th second of time reversal loading .

2.3 具有内边界和多种介质的三维模型

为了研究在不均匀、有断裂的介质中的时间反转效应,建立了一个地壳介质的三维模型^[2]。多重介质分布在 8 个不同的卦限,模拟介质的不均匀性,介质的交界面对波有反射、折射、散射的能力,模拟断层的存在。进行上述同样的研究步骤,得到同样的研究成果。

新的问题也随之不断提出来。比如在地壳中反射不是地震波的主要表现,地壳中波的遍历特性不是反射而是折射导致的,多路经效应也许比遍历特性更强等等。所以我们又建立了一个真实尺度的地壳模型,并进行了仿真研究。

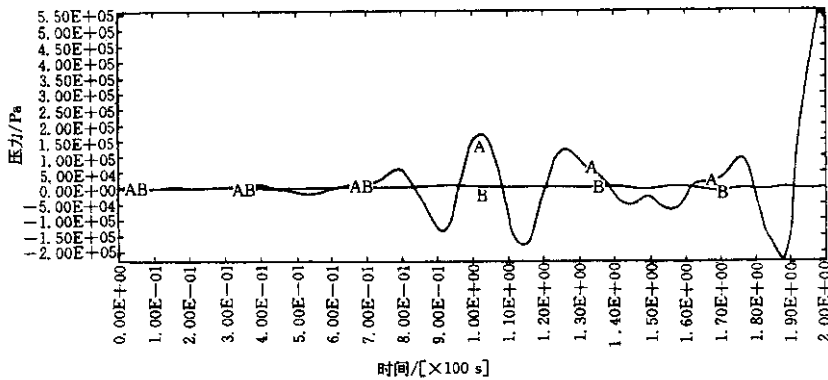


图 4 A 点和单元 1336 (A 点附近任选的点) 上压力的时间历程
Fig. 4 The history of time reversal process on A point and element 1336 .

2.4 真实尺度模型

图 5 和图 6 是真实尺度的地壳模型,它包含了中国的北方部分。众所周知的 1996 唐山 M_s 7.8 地震就发生在研究区内,同时许多地震台站位置也在本区内,例如兰州台、西安台、上海台。四条断层带纵横其中,北有阴山及燕山断裂;东面有郯庐断裂;西有太行山前断裂。唐山地震离燕山断裂较近。

在唐山位置加载一个冲击载荷,应力向外传播,形成地震波,在台站位置,提取响应的时间历程,即仿真的地震图(图 7)。在时间上反转这些地震图,作为载荷曲线,在各个台站位置重新加载,其中一些波循原路返回到震源点,在空间上形成一个聚焦区域,在时间上形成一个冲击,即在时间轴上的反转终点形成一个峰。特别地,单个台站也能实现很好的时间反转聚焦,这可以解释为只要多路径特性而不必严格的遍历特性即可实现单点的时间反转效应。图 6 显示了平均压力(一种等效应力)的分布情况。注意压力等值线在断层上不连续。

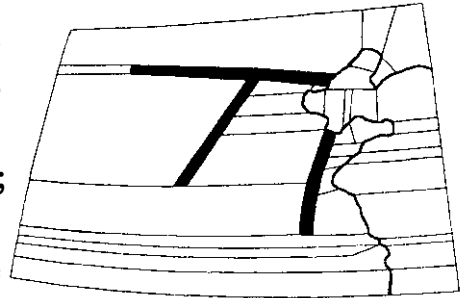


图 5 真实尺度的地球模型(华北)
Fig. 5 Full scale model of crustal (Norther Chian) .

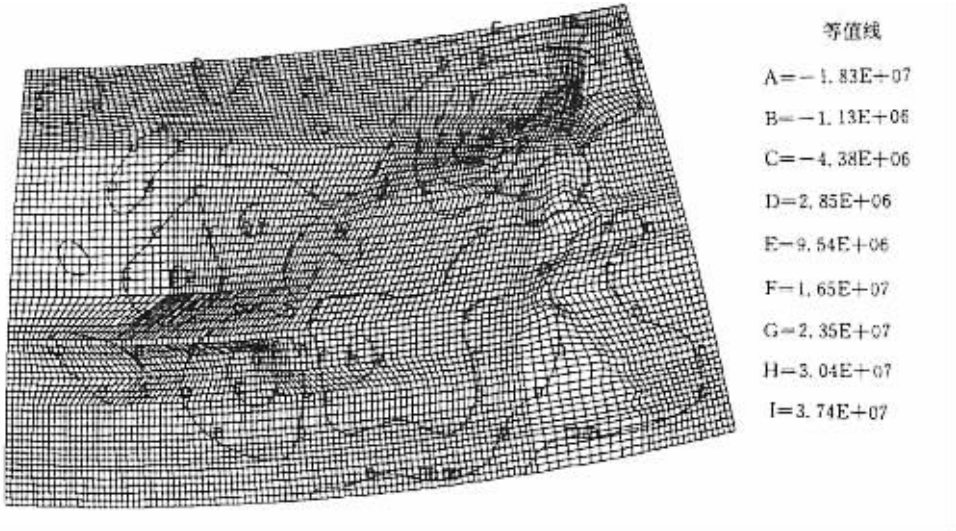


图 6 时间反转法实现的应力(能量)聚焦
Fig. 6 The focus of stress (energy) by time reversal method.

3 多连通域中的时间反转效应

对于非线性介质,通过分析波动微分方程研究了介质响应的时间对称性,这种分析基于如下的数学认识:微分方程与它的解具有相同的对称性。结果表明,能量吸收是时间反转法的不利因素,而波形畸变是可逆因素。随着地震波能量传播到更大的空间中,振幅会自然地衰减,因此大部分地壳处于线性状态,而只有一个很小的非线性部分。如果在线性和非线性部分的交界处附加上一个边界条件限制,人工地震波能量还是可以聚焦到非线性的核(震源)上。我们只需要能量的聚焦,而不是完全地恢复原先的脉冲,这么一来线性区有可能成为一个多连通域。多连通域和单连通域在数学上的性质往往大相径庭。因此运用动态有限元方法仔细研究了多连通域上的时间反转特性,其行为和单连通域一样。事实上,如果考虑地幔,则挖去一个非线性域的体积空间仍是单连通的,在仅考虑地壳时才有可能出现多连通。

4 结果和讨论

仿真研究(和波动微分方程的时间对称性分析)表明:在不均匀的非线性介质中实现波的聚焦理论上具有可行性,至少可以实现近似的聚焦。以上所有的研究都限制在仿真研究的领域,进一步的研究可以将真实地震图作为反转加载的依据作用在模型上,这样做就引入了观测数据。

实践反转是在源点形成一个与原始激励相同的重建脉冲。如果要形成一个相位相反的脉冲,从数学上讲只需要把接收到的波不但在时间上逆转,而且在位相上反相即可。从这个角度出发,还可以设想在源点上形成只相差零点几秒的、相位相同或相反的两个脉冲。诸如此类的问题,在解决了地震动态触发机制的同时(或以后),也许值得进行研究。

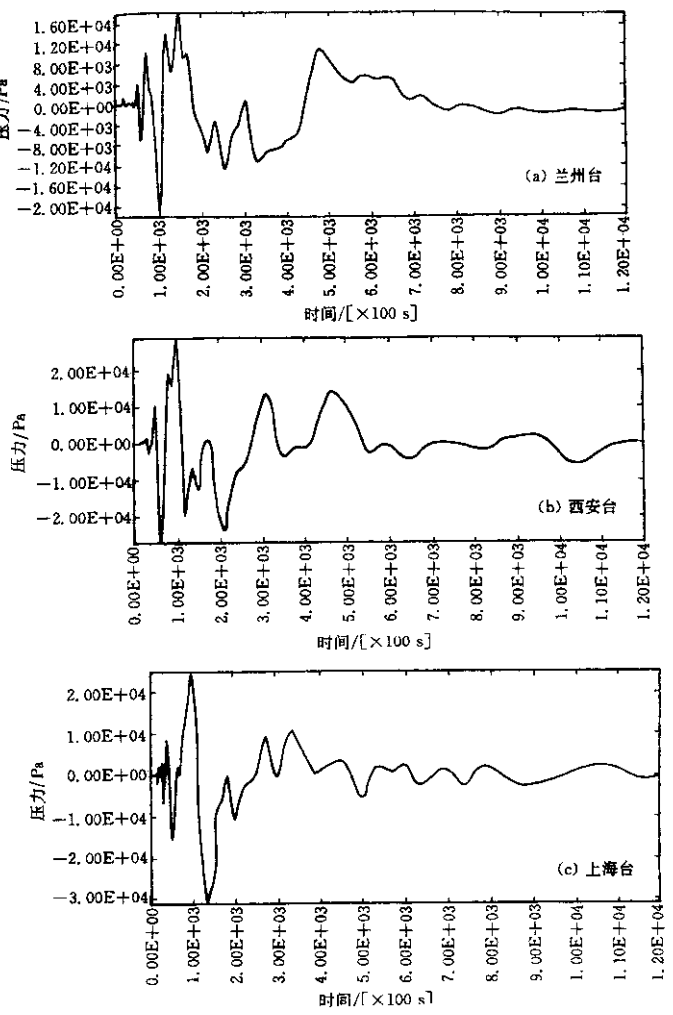


图 7 模拟得出的“地震图”,分别对应于兰州、西安和上海台

Fig. 7 The simulation seismogram from Lanzhou, Xi'an and Shanghai .

[参考文献]

[1] Clouet J F, Fouque J P. A time - reversal method for an acoustical pulse propagating in randomly layered media [J]. Wave Motion, 1997, 25 : 361 - 368 .
[2] 陈湘鹏,王乘,郑文衡. 含内边界非均匀材料三维 FEM 模型的时间逆转仿真研究 [J]. 地壳形变与地震, 2001, 21 (2) : 7 - 16.
[3] Mathias Fink. Time Reversal Vioce Effect [J]. Scientific American, 1999, 281 (5) : 91 - 97.
[4] Fink M. Time - reversed Acoustics [J]. Physics Today, 1997, 50 (3) : 34 - 40.

- [5] Giovanni Gallavotti. Breakdown and regeneration of time reversal symmetry in nonequilibrium statistical mechanics[J]. Physica D, 1998, **112** : 250 – 257.
- [6] 何振,王乘,牛安福,等. 地壳块体应力场动力学演变过程仿真的初步研究[J]. 地壳形变与地震,2000,20(1) : 1 – 7.
- [7] Ing R K, Fink M. Self – focusing and time recompress of Lamb waves using a time reversal mirror[J]. Ultrasonics,1998, 179 – 186.
- [8] 王仁,黄杰藩. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟[J]. 中国科学(B), 1982, (4) : 745 – 753.
- [9] 王仁,何国琦,殷有泉,等. 华北地区地震迁移的数学模拟[J]. 地震学报, 1980, 2(1) : 32 – 42.
- [10] 汪素云,陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J]. 地球物理学报, 1980,23(1) : 35 – 45.
- [11] 尹京苑,等. 地壳应力状态及其在三维有限元模拟计算中的意义[J]. 地震, 1998,7(3) : 226 – 232.

THE SCHEME OF EARTHQUAKE CONTROL

ZHENG Wen-heng, LIANG Shu -ping, WANG Cheng

(School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Sci. & Tech. , Wuhan 430074, China)

Abstract : A new concept of earthquake occurrence control, and a consideration of using the time reversal method to realize the focusing wave energy in earth crust and triggering earthquake dynamically, are proposed. In the method the technology of ND-FEM emulation is adapted to study the time reversal of wave in un-even, and further more non-linear crustal media, verify the feasibility that focus seismic wave energy on to the potential epicentre. The result shows that it is feasible to focus the wave energy through crust, at least an approximate focus through non-linear crustal media.

Key words : Earthquake occurrence control ; Triggering ; Time reversal ; ND-FEM ; Focus