

# 地震孕育、发生、发展动态过程模拟系统\*

王妙月 张美根 底青云 陈 静 朱 玲

(中国北京 100101 中国科学院地球物理研究所)

**摘要** 给出了模拟地震孕育、发生、发展动态过程的微机处理系统. 系统可在 486 以上微机上运行; 程序在运行中可自动处理地震发生发展瞬间的时间不连续过程. 该系统同时具有实时监控功能, 可随时暂停模拟进程, 用图形功能显示当前和历史上有关系的计算结果. 退出图形功能后, 可在原来计算结果的基础上继续运行.

**关键词** 地震动态过程 微机 模拟系统

## 引言

从物理预报的目标看, 板内地震预报的实现有两个不同的重要途径: 一个是通过板内近因的具体研究来实现物理预报; 另一个是通过板内地震远因、近因及临震原因的整体研究来实现物理预报.

应用 3D 有限元方法对板内地震孕育、发生、发展的整体过程进行动态数值模拟, 模拟中将地震孕育、发生、发展的远因、近因结合在一起是很有意义的. 王妙月等(1999)已对整体动态数值模拟的理论思路进行了讨论.

本文就如何在微机上解决时、空、强 5 维大模型数值模拟方法的具体难点进行阐述. 在高档微机上形成板内地震带孕育、发生、发展动态过程的模拟和实时监视处理系统.

## 1 时、空、强 5 维过程模拟在微机上的实现

地震的时、空、强 5 维方程是

$$\mathbf{K}\mathbf{U} + \mathbf{K}'\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\text{SUB}(\mathbf{U}) \geq \mathbf{U}_T \quad (2)$$

$$f(\mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

式(1)是地震孕育过程满足的方程, 式(2)是地震发生时满足的方程, 式(3)则是地震发生后位移场调整所满足的方程. 式中,  $\mathbf{K}$  为刚度阵;  $\mathbf{K}'$  为阻尼阵;  $\mathbf{F}$  为边界上的构造外力;  $\mathbf{U}$  为节点位移矢量;  $\dot{\mathbf{U}}$  为节点位移速度矢量;  $\text{SUB}$  表示局部,  $\mathbf{U}_T$  表示强度矢量;  $f(\mathbf{U})$  是关于  $\mathbf{U}$  分量的一个方程式.

采用降阶的赛德尔迭代法求解方程(1).

\* 国家自然科学基金和地震科学联合基金资助项目.  
1998-04-01 收到初稿, 1998-12-02 收到修改稿并决定采用.

$$\begin{cases} X_k^{\text{new}} = \frac{F_k - \sum_{j=1}^{M_p} K'_{kj} \dot{U}_j^{\text{new}} + X_k^{\text{old}} \sum_{j=1}^{M_p} K'^2_{kj}}{Q + \sum_{j=1}^{M_p} K'^2_{kj}} \\ \dot{U}_j^{\text{new}} = \dot{U}_j^{\text{old}} + K'_{kj} (X_k^{\text{new}} - X_k^{\text{old}}) \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\mathbf{X}$  是一个中间矢量， $X_k$  是其元素； $K'_{kj}$  是  $\mathbf{K}'$  的  $k$  行  $j$  列元素； $M_p$  是  $\dot{\mathbf{U}}$  的自由度总数；new 表示迭代中的新值，old 表示老值； $Q$  是一个使解稳定的小量； $\dot{U}_j$  是  $\dot{\mathbf{U}}$  的第  $j$  个分量； $F_k$  是  $\mathbf{F}$  的第  $k$  个分量。

刚度阵  $\mathbf{K}$ 、阻尼阵  $\mathbf{K}'$  的形成以及边界节点力  $\mathbf{F}$  分布的确定与地震带的几何结构及物性结构有关。按照具体地震带这方面的知识，可以构筑具体的模型，从而也就确定了  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{K}'$  和  $\mathbf{F}$ 。构筑模型和式(4)迭代的程序框图如图 1 所示。

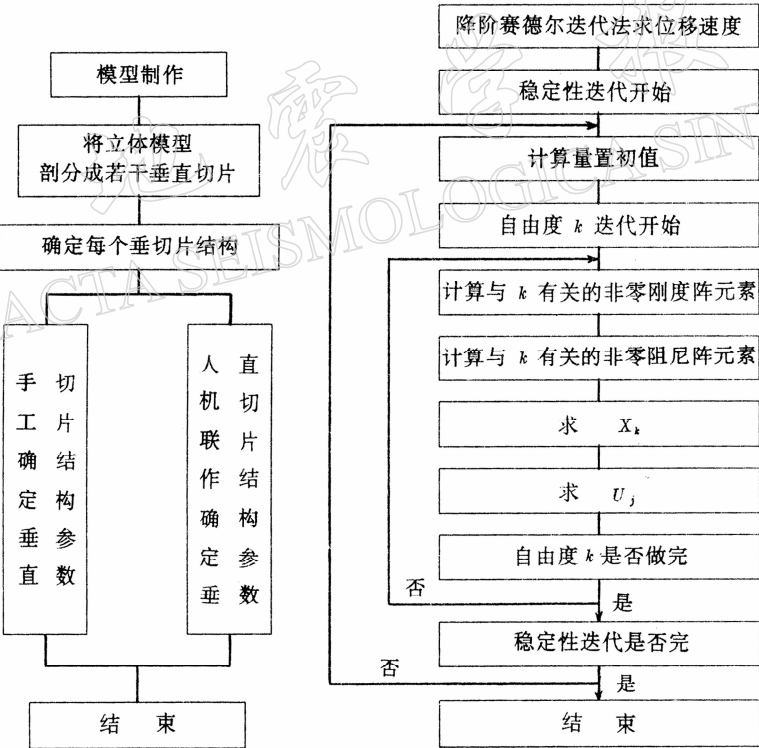


图 1 构筑模型和迭代运算程序框图

按图 1 右侧程序框图反复迭代式(4)，就可以得到相继时间步的位移  $U_k$  的分布  $U$ 。在程序中加入一个阀门值  $U_r$ 。当  $\max U_k \geq U_r$  时，认为有可能要发生地震，让程序搜索节点力  $\mathbf{XXX}$ 。对于  $U_k$ ， $\mathbf{XXX}_k$  同时大的区域被推断为是地震的区域； $U_k$  大而  $\mathbf{XXX}_k$  很小的区域，被推断为是蠕滑区。或者判断  $G = (\mu F_y - F_x) / \mu F_y$  的数值，其中， $\mu$  是断层的摩擦系数， $F_y$  是断层面法向力， $F_x$  是断层面的切向力。 $G \rightarrow 0$  的区域被视为地震危险区， $G \rightarrow 1$  被视为安全区。我们可依据  $G \rightarrow 0$  空间范围的大小，或  $U_k$  接近于阀门值而  $\mathbf{XXX}_k$  较大的空间范围的

大小来确定地震的震级. 这个知识可由震级-地震断层长度的经验公式, 或震级-地震体积的经验公式得到.

地震发展与地震后位移场的调整, 以及继续在  $F$  的作用下应力的传递有关. 王妙月等 (1999) 应用的位移场调整公式过于复杂, 这里给出一个更为简便的方法.

一个矩形位错平面内的切应力分布满足

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{12} &= F_{12}(L, A) - F_{12}(0, A) - F_{12}(L, 0) + F_{12}(0, 0) \\ F_{12}(x'_1, x'_3) &= -\frac{Gb_1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{1-\nu} \left[ \frac{(x_1 - x'_1)x'_2(x'_3 - x_3)}{r^2 R} \left( \frac{1}{R^2} + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{(x_1 - x'_1)(x'_3 - x_3)}{r^2 R} \right] - \frac{(x'_1 - x_1)(x_3 - x'_3)}{q^2 R} \right\} \\ r^2 &= R^2 - (x'_3 - x_3)^2 \quad q^2 = R^2 - (x'_1 - x_1)^2 \quad R = (X_i X_i)^{1/2} \quad X_i = x_i - x'_i \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中,  $b_1$  为位错值, 相当于地震的应力降,  $10^6$  Pa 量级;  $G$  为剪切模量,  $\nu$  为泊松比 (Wang et al., 1976). 由式 (5) 算出断层内的应力降后, 再按静位移几何扩散规律校正其它地方的应力值.

2 微机实时模拟系统

我们在微机上编制了有限元地震孕育、发生、发展动态过程模拟系统的程序. 设计时参考了 Teng(1981) 博士编的三维波动方程有限元程序. 将 Teng 博士的三维波动有限元程序修改成能模拟地震孕育、发生、发展动态过程的程序. 修改中最繁琐的部分是, 对于赛德尔迭代自由度  $k$ , 获取相应于  $k$  的集成刚度阵  $K$  和集成阻尼阵  $K'$  不为零的元素. 通过一年多的努力解决了此问题.

另一个繁琐的部分是对计算结果实现实时监视. 对计算结果的实时监视使我们能动态地监视可能的地震危险区, 实现了计算过程的人工干预调控. 程序框图如图 2 所示.

如上所述, 程序在运行中已经能够自动判断地震是否会发生. 如果有可能发生, 将会给出一个提示, 会确定地震的位置、地震的震级, 并能处理地震后的调整过程, 开始新的孕震过程的模拟. 这些功能也可以通过实时监视系统, 通过人机联作来实现.

模拟中, 可以随时通过实时监控功能暂停系统的计算进程. 这时, 系统将保留计算现场并进入图形方式. 在监控状态下, 通过人机交互的方式, 可以进行如下

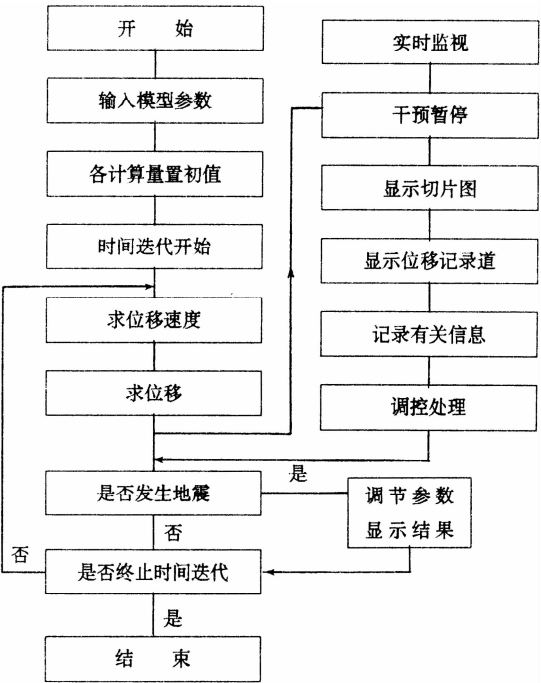


图 2 模拟系统程序框图

操作：① 查看所有感兴趣的当前步切片图. 这些切片包括不同深度的水平切片,  $x$  方向的垂直切片,  $y$  方向的垂直切片. 切片内给出位移、位移速度和力. 每个量都可分  $x, y, z$  3 个分量; ② 查看模拟前设定的感兴趣节点的时间记录. 这些记录同样包括位移、位移速度和力的三分量情况; ③ 研究人员可以凭自己的知识和经验, 根据以上结果资料, 判断地震发生的可能性. 如果没有异常情况, 可退出监控状态, 恢复模拟进程. 如果认为有地震危险, 可圈定危险区范围, 确定地震强度, 并可通过人工干预修改位移和  $\lambda, \mu, \lambda', \mu'$  等参数, 以模拟一次地震的发生.

实时模拟系统使地震孕育、发生、发展过程的模拟更加灵活, 便于研究人员有目的地进行各种干预尝试, 也便于加进新的已知约束条件. 尽管这里给出的实时模拟系统尚是初步的, 但它已为地震孕育、发生、发展过程的整体动态模拟打下了一个基础.

3 结果的可靠性

为了检验程序的可靠性, 我们用有  $10 \times 10 \times 20$  个单元的小模型进行了试验, 模型的几何结构及参数如图 3 所示.

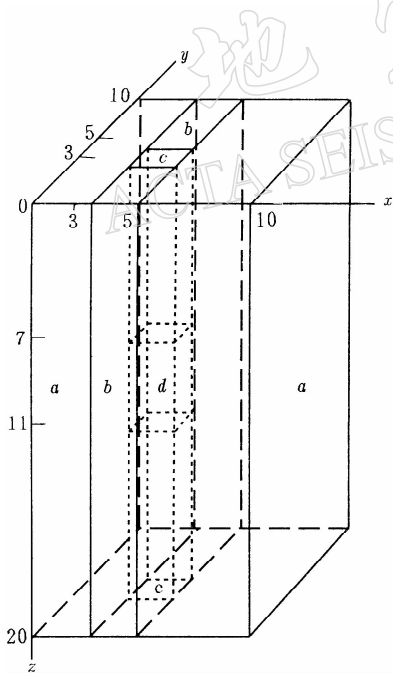


图 3  $10 \times 10 \times 20$  模型的几何结构及参数

图中  $a: v_p=3\ 600, v_s=2\ 080, \rho=3.0$ ;  $b: v_p=3\ 300, v_s=1\ 905, \rho=2.7$ ;  $c: v_p=1\ 600, v_s=930, \rho=2.1$ ;  $d: v_p=3\ 000, v_s=1\ 732, \rho=2.6$ .  $v$  的单位是  $\text{m/s}$ ,  $\rho$  的单位是  $\text{g/cm}^3$ .  $\lambda'=0.001\lambda, \mu'=0.001\mu$ .  
 $\Delta x=10\text{ m}, \Delta y=10\text{ m}, \Delta z=10\text{ m}$

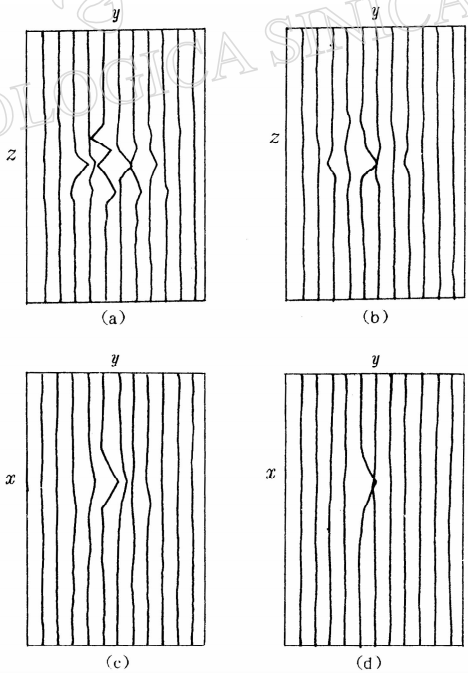


图 4 图 3 模型中心置集中力时的结果

(a) 过力中心  $x=5$  垂直平面内第 3 时间步时垂直节点力分布; (b) 过力中心  $x=5$  垂直平面内第 3 步时垂直节点位移速度分布; (c) 过力中心水平面内第 10 步时垂直节点力分布; (d) 过力中心水平面内第 10 步时垂直节点位移速度分布

### 3.1 集中力置于模型中心时的结果

为了检验结果的可靠性,对于图 3 的模型几何,我们将垂直方向集中力置于模型的中心,图 4 是此情况时的某些结果.

图 4 表明,由于介质的非完全弹性,随着时间的推移,中心点处的力,及由此产生的位移速度逐渐向外推移,这个结果似乎是符合常理的.

### 3.2 作用力置于模型左右侧面时的结果

在图 3 模型的左右侧面加力,左面上的节点  $z$  分量和  $y$  分量加正力,右面上的节点  $z$  分量和  $y$  分量加负力,模拟有一个斜交的构造力作用于左右侧面.图 5 是此种情况的一些结果.

图 5 表明,由于介质的非完全弹性,随着时间的推移,力和位移逐渐向离开边界的地方推移,节点的位移时间记录随着时间的推移逐渐加大,预示着应变能的积累.

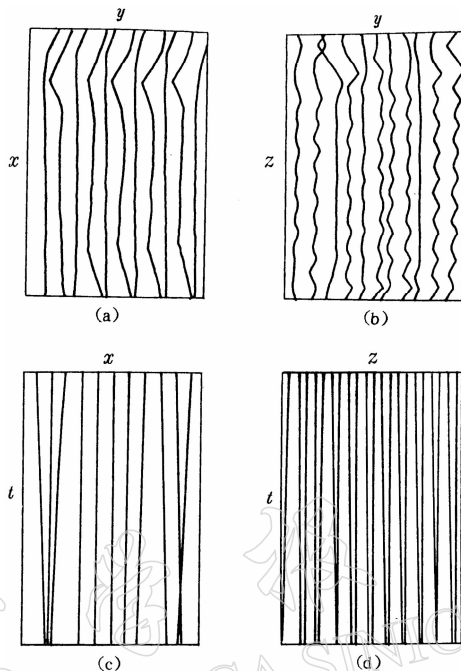


图 5 图 3 模型侧面加力(左面加正力,右面加负力)时的结果  
(a) 与图 4 相当的水平切片内,第 10 步时的节点位移分布,上半部相当于图 3 左面,下半部相当于图 3 右面;  
(b) 与图 4 相当的垂直切片内第 10 步时的节点位移速度分布;(c)  $z=5$  水平面内平行于  $x$  轴的 11 个节点的位移时间记录;(d) 过中心垂向 21 个节点的 VSP 位移时间记录  
(以上结果均为垂直分量)

### 参 考 文 献

- 王妙月,底青云,张美根,等. 1999. 地震孕育、发生、发展动态过程的 3 维有限元数值模拟. 地球物理学报, **42**(2)
- Wang M Y, Yang M Y, Hu Y L. 1976. A preliminary study on the mechanism of the reservoir impounding earthquakes at Xinfengjiang. *Scientia Sinica*, **19**(1), 149~169
- Teng Y C. 1981. *Preliminary Version of the Aldridge Finite Element Algorithm for Three Dimensions*, Midas Report II. New York: Columbia University, 333~386