

# 地震孕育、发生、发展动态过程模拟系统<sup>\*</sup>

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

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

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

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

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；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。

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

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.

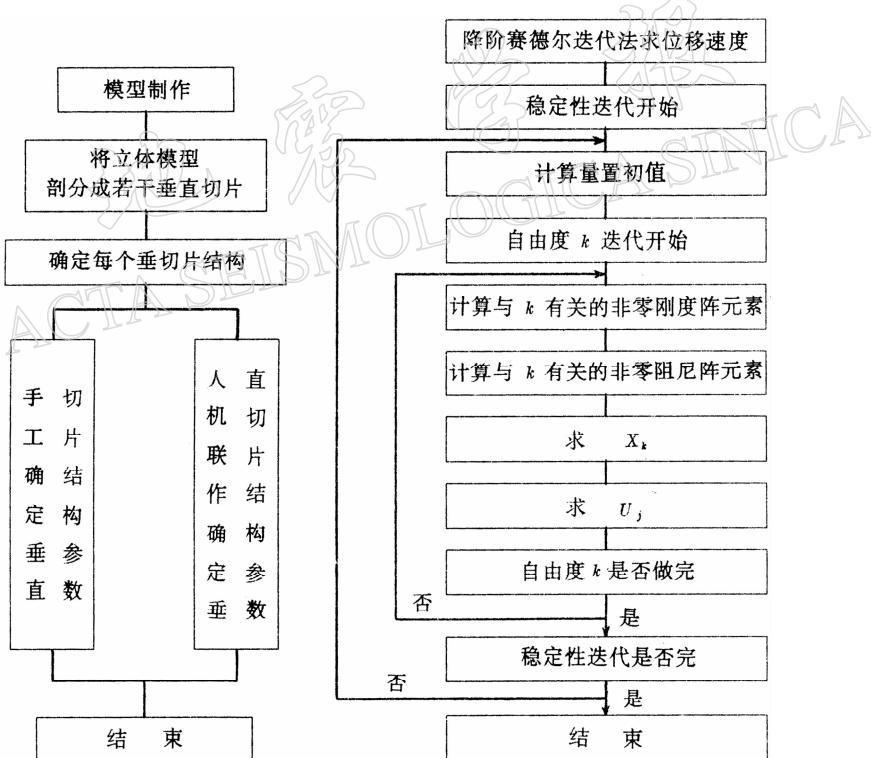


图 1 构筑模型和迭代运算程序框图

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  $\mathbf{U}_k$  的分布  $\mathbf{U}$ . 在程序中加入一个阀门值  $U_T$ . 当  $\max U_k \geq U_T$  时, 认为有可能要发生地震, 让程序搜索节点力  $\mathbf{XXX}$ . 对于  $\mathbf{U}_k$ ,  $\mathbf{XXX}_k$  同时大的区域被推断为是地震的区域;  $\mathbf{U}_k$  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  $\mathbf{U}_k$  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  $\mathbf{F}$  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

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{12} = F_{12}(L, A) - F_{12}(0, A) - F_{12}(L, 0) + F_{12}(0, 0) \\ F_{12}(x'_1, x'_3) = -\frac{Gb_1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{1-\nu} \left[ \frac{(x_1 - x'_1)x_2^2(x'_3 - x_3)}{r^2 R} \left( \frac{1}{R^2} + \frac{1}{r^2} \right) - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{(x_1 - x'_1)(x'_3 - x_3)}{r^2 R} \right] - \frac{(x'_1 - x_1)(x_3 - x'_3)}{q^2 R} \right\} \\ r^2 = R^2 - (x'_3 - x_3)^2 \quad q^2 = R^2 - (x'_1 - x_1)^2 \quad R = (X_i X_i)^{1/2} \quad X_i = x_i - x'_i \end{array} \right. \quad (5)$$

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)算出断层面内的应力降后, 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  $\mathbf{K}$  和集成阻尼阵  $\mathbf{K}'$  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

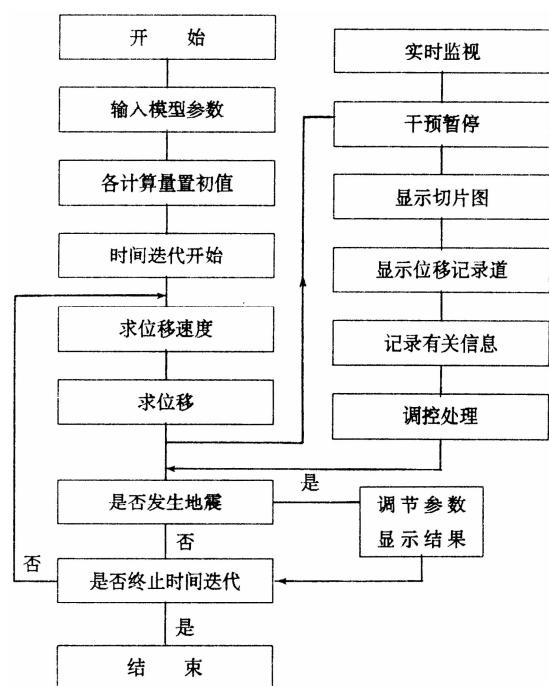


图 2 模拟系统程序框图

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。

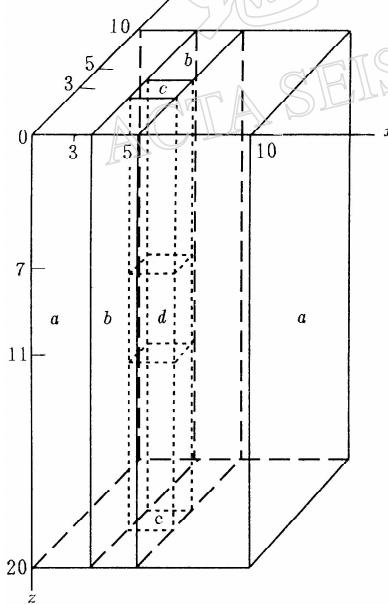


图 3  $10 \times 10 \times 20$  模型的几何结构及参数

图中  $a$ :  $v_p = 3600$ ,  $v_s = 2080$ ,  $\rho = 3.0$ ;  $b$ :  $v_p = 3300$ ,  $v_s = 1905$ ,  $\rho = 2.7$ ;  $c$ :  $v_p = 1600$ ,  $v_s = 930$ ,  $\rho = 2.1$ ;  $d$ :  $v_p = 3000$ ,  $v_s = 1732$ ,  $\rho = 2.6$ .  $v$  的单位是  $m/s$ ,  $\rho$  的单位是  $g/cm^3$ .  $\lambda' = 0.001\lambda$ ,  $\mu' = 0.001\mu$ .

$$\Delta x = 10 \text{ m}, \Delta y = 10 \text{ m}, \Delta z = 10 \text{ m}$$

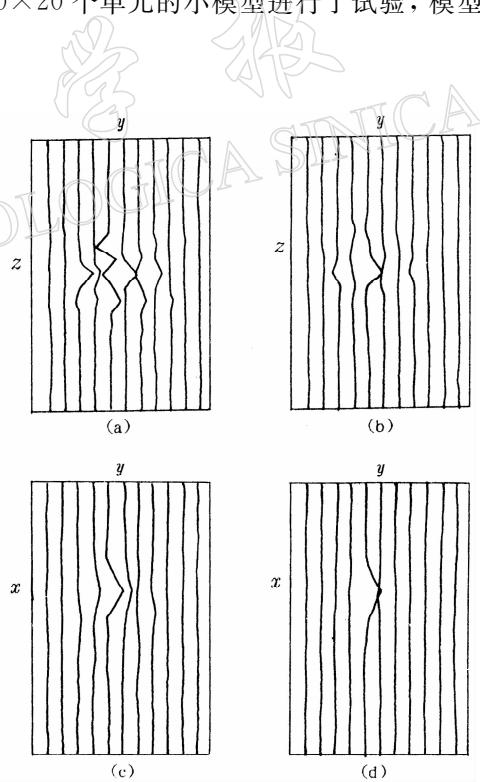


图 4 图 3 模型中心置集中力时的结果

(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。

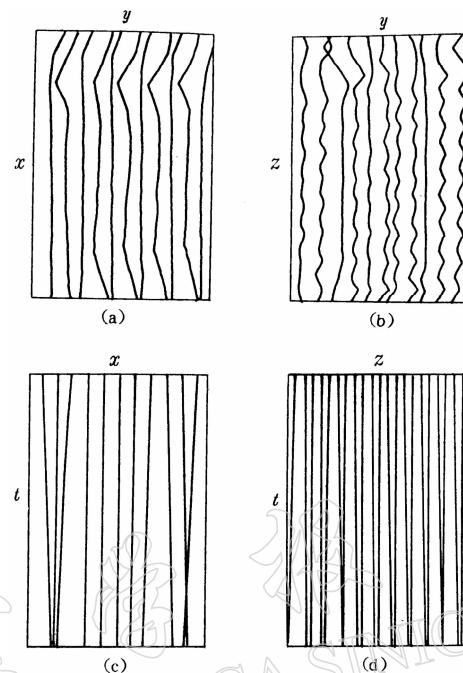


图 5 模型侧面加力(左面加正力, 右面加负力)时的结果

- (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