

地震危险性分析的经验点椭圆模型

沈建文 华宜平 邱 瑛
(安徽 省 地 震 局)

孔 令 磊
(中国科学技术大学)

摘要

本文系统建立地震危险性分析的经验点椭圆模型。对多数地区,等震线略具狭长的形状,经验点椭圆模型可以减小点源模型和断层破裂模型的系统偏差。本文给出了经验点椭圆模型的具体计算方法和实用计算程序 EPEMSHA (Empirical point-ellipse model for seismic hazard analysis)。在关键性的条件概率 $P(I \geq i | E_{I,m})$ 的计算中,本文将关于面积的积分设法解析,从而提高了计算精度和速度。

关键词 危险性分析;经验点椭圆模型;点源模型;地震区划

一、引言

在“关于地震烈度衰减模型的系统偏差”^[1]一文中,笔者讨论了点源模型^[2]和断层破裂模型^[3]存在的系统偏差问题,指出经验点椭圆模型可以减小偏差,在现阶段较为合理。本文用同心同轴的椭圆系列近似实际等震线,建立烈度地震危险性分析的经验点椭圆模型,并将之推广,用于地震动参数危险性分析。

二、地震危险性分析的经验点椭圆模型

从工程地震目前的工作方法来看,地震危险性分析主要建立在经验的基础上。潜在震源参数的确定离不开历史与现代地震的记录统计,地质类比也主要以经验为基础。此外,衰减规律的建立固然可以从波的扩散和介质对震动的阻尼吸收等因素出发,但由于地震和地壳的复杂性,目前,人们宁可从已有震例的等震线或从强震仪取得的实测资料着手。值得指出的是,从震例所得的“衰减规律”同时包含了震源的特征和介质的衰减性质,很难将两者区分开来。由此看来,若以经验为基础给出潜在震源参数之后,建立理论正演模型,倒不如直接建立经验模型单纯和明确。这里所谓经验模型是指由某区域中的经验

1986年11月10日收到本文初稿,1987年10月28日决定采用。

资料得出规律，推测其未来发生地震并产生影响场(烈度或地震动参数的分布)的方法。

设在我们讨论的区域中，等震线大体近似为同心同轴的椭圆系列。据已有的烈度资料得如下衰减规律

$$I = F_1(M, R_A) \quad (1)$$

$$I = F_2(M, R_B) \quad (2)$$

式中 R_A 和 R_B 分别为椭圆形等震线的半长轴和半短轴， I 为相应的烈度， M 为震级。由于上述经验衰减规律中同时已经包含了研究区域中的震源特征，诸如震源深度、破裂长度等的影响，模型在作预测计算时不应再引进这些参数。至此，我们已可以给出经验点椭圆模型的大体图象。若要研究某一场地的地震危险性，我们应做两方面的工作：一是确定可对该场地产生影响的大范围中的潜在震源，及其特征参数包括年发生率 ν ，起始震级 m_0 ，最大可能震级 m_u ， b 值或 β 值等；二是研究该区域中的衰减关系。若如上文所说，则建立经验公式 (1), (2)。在某些地区，椭圆长轴具若干优势方向，如一个或共轭的两个，则应统计取得该优势方向的概率，或即求出长轴方向的概率分布。在求对某确定烈度 i 的超越概率时，据潜在震源的震级 M 和所考虑的烈度 i ，即可从 (1), (2) 两式中求得一系列成对的长短轴和相应的椭圆，赖以建立危险性分析的计算模型。

按上述模型的衰减特点，即同心椭圆系列，我们称之为“经验点椭圆模型”。这里已不需要破裂长度的概念，取而代之的是一系列随 M 和 i 而改变的椭圆。破裂断层方向也已为椭圆长轴方向取代。

下面我们给出用椭圆模型确定超越概率的具体计算方法。对震级-频度关系的 $b(\beta)$ 值假设和地震事件为均匀泊松过程的假设，本文暂不加改变。为压缩篇幅，我们直接引出，当年超越概率很小时^[3]

$$P(I \geq i)_{\text{年}} \approx \sum_{j=1}^n \nu_j \cdot P(I \geq i | E_j) \quad (3)$$

式中 $P(I \geq i)$ 是场地烈度大于 i 的年超越概率， ν_j 是第 j 潜在震源震级为 $m \geq m_0$ 的地震的年发生率。 $P(I \geq i | E_j)$ 是第 j 震源发生地震产生的条件概率， n 是潜在震源数。重复周期为

$$T = \left[\sum_{j=1}^n \nu_j \cdot P(I \geq i | E_j) \right]^{-1} \quad (4)$$

可见，问题的关键是计算条件概率 $P(I \geq i | E_j)$ 。

本文危险性分析计算的基本思路是，场地上超过烈度 i 的概率 $P(I \geq i)$ 由各潜在震源的概率贡献 $P(I \geq i | E_j)$ 叠加而得。后者又由该震源中各震级 m 的地震的贡献 $P(I \geq i | E_{j,m})$ 叠加而成。

当某潜在震源中的长轴优势取向为 $\theta_k (k = 1, 2, \dots, l)$ 时，应先分别对各 θ_k 方向求出该潜在震源的贡献 $P(I \geq i | E_j | \theta_k)$ ，然后与 θ_k 取向概率相乘迭加得 $P(I \geq i | E_j)$ 。

对本模型来说，潜在震源等震线长轴的优势方向可由研究者预测。通常，等震线长轴方向的分布不难从历史资料统计取得。若长轴无优势方向时，可不分长短轴的差别，按等效圆半径建立衰减，即椭圆模型蜕化为其特例——点源(圆)模型。因而以下我们仅讨论长轴优势方向取定为 θ_k 的情况。根据潜在震源的几何特征，我们分两种类型给出具体算

法：

1. A型 本文的A型源是指一潜在震源为任意凸多边形的区域。形状更为复杂的区域不难截为若干A型源处理。对线形潜在震源，可作为狭长的多边形输入。实际上，本来并不存在真正的线源。抽象出线源只是为简化处理，方便计算。但本文A型源的计算具快速、准确的长处，故没有必要再另建线源模型。

作坐标变换，使x轴方向为 θ_k 方向，场地位于坐标系原点(0,0)。A型源 E_i 此处如四边形 $ABCD$ 所示（见图1）。在等震线长轴取向与x轴相同的条件下，若震级为m的地震要在场地产生指定的烈度i，则易证这些震源的轨迹为以原点为圆心、长轴为x轴的椭圆（如图1所示）。此椭圆的半长轴和半短轴 R_A 和 R_B 可由(1),(2)两式分别解出，即

$$R_A = G_1(m, i) \quad (5)$$

$$R_B = G_2(m, i) \quad (6)$$

由此可知，A型源 $ABCD$ 中位于椭圆以内的部分（斜线区），当震级大于或等于m时，必将在场地引起大于i的烈度，故有

$$P(I \geq i | E_{i,m}) = \begin{cases} 0 & \text{A型源与椭圆不相交} \\ \frac{S_c}{S_i} & \text{A型源与椭圆相交} \\ 1 & \text{A型源被椭圆包含} \end{cases} \quad (7)$$

式中 S_c 是相交区域的面积， S_i 是A型源 E_i $ABCD$ 的总面积。

E_i 中各震级m的贡献的总和为

$$P(I \geq i | E_i) = \int_{m_0}^{m_u} P(I \geq i | E_{i,m}) f_M(m) dm \quad (8)$$

这里， $f_M(m)$ 是震级概率密度函数

$$f_M(m) = \begin{cases} \frac{\beta \cdot \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_u - m_0)]} & m_0 \leq m \leq m_u \\ 0 & \text{其他震级} \end{cases} \quad (9)$$

在实际计算中需考虑以下三个特征震级：第一取 $R_A = 0$ 或 $R_B = 0$ ，从(1)式(或(2)式)可解得能在场地产生烈度i的最低震级

$$M_1 = M_1(0, i) \quad (10)$$

第二是与烈度i对应的椭圆中与A型源 E_i 开始相交的椭圆所对应的特征震级 M_2 ；第三是与烈度i对应的椭圆中开始完全包含 E_i 的椭圆所对应的特征震级 M_3 。考虑 m_0, m_u 及 M_1, M_2, M_3 所有可能的排列方式，即可将(7)与(8)式相结合写成供实际计算的适当形式。

在编制实际计算程序时，上述椭圆与多边形相交区域面积 S_c 的计算是一个关键。若用数值方法作近似处理，则不仅速度慢，精度也难于保证。本文的做法是，在若干判断的基础上，将 S_c 表示成三角形与椭圆扇形的代数和。在图1所示的例子中

$$S_c = S_{\Delta OAF} + S_{OFE} - S_{\Delta OAE} \quad (11)$$

式中 S_{OFE} 是椭圆扇形 OFE 的面积， $S_{\Delta OAF}$ 是三角形 OAF 的面积， $S_{\Delta OAE}$ 是三角形

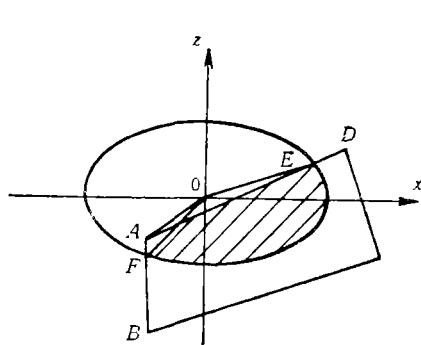


图1 A型源

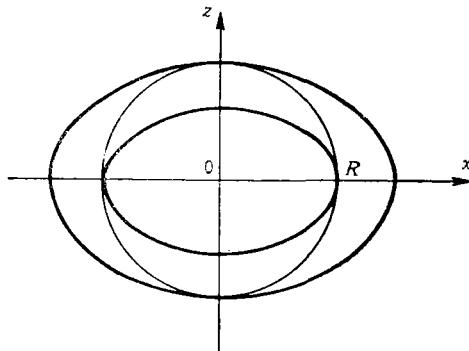


图2 B型源

OAE 的面积。在各点坐标已知的情况下, S_c 相当于可解析表示, 从而提高了计算速度和精度。

2. B型源

本文所谓 B型源, 是指潜在震源为以场地为中心的圆或圆环。

由于圆环不难化为二个圆处理, 故我们只简述圆的计算情况。设 B型源如图 2 中半径为 R 的圆。如前所述, 在等震线椭圆长轴方向与 x 轴相同的情况下, 震级为 m 而能在场地产生烈度 i 的震源, 其轨迹必为以场地为圆心, x 轴为长轴的椭圆。其长短半轴由(5)、(6)式定, 这时我们有

$$P(I \geq i | E_{j,m}) = \begin{cases} \frac{R_A R_B}{R^2} & \text{当 B型源包含椭圆} \\ \frac{\pi R_A R_B + 2R^2 \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{R_B}{R_A} \sqrt{\frac{R_A^2 - R^2}{R^2 - R_B^2}} \right) - 2R_A R_B \sin^{-1} \sqrt{\frac{R_A^2 - R^2}{R^2 - R_B^2}}}{\pi R^2} & \text{当 B型源与椭圆相交} \\ 1 & \text{当椭圆包含 B型源} \end{cases} \quad (12)$$

与 A型源类似, 考虑 B型源 E_j 中各震级 m 贡献的总和同样用(8)式。且此处我们也需与 A型源类似的三个特征震级: 第一个即 M_1 同样由(10)式决定; 第二个特征震级对应于图 2 中的内椭圆, 即取 $R_A = R$, 由(1)式解得对应于烈度 i 的震级

$$M_2 = M_1(R, i) \quad (13)$$

第三个特征震级对应于图 2 中的外椭圆, 即取 $R_B = R$, 由(2)式解得对应 i 烈度 i 的震级

$$M_3 = M_2(R, i) \quad (14)$$

考虑 m_0, m_u 与 M_1, M_2, M_3 所有可能的排列, 将(8)式与(12)式相结合, 不难取得计算 $P(I \geq i | E_j)$ 的表达式。

三、经验点椭圆模型作地震动参数危险性分析

目前所谓椭圆形等震线都是指烈度而言, 故上述经验点椭圆模型是从烈度危险性分析引入的。由于地震动资料数量有限、且较离散, 现还不能断言地震动参数(加速度、速度

等)等值线与等烈度线有大体相似的形态。但粗略地说,人们实际上已经建立并使用了地震动与烈度相互可以换算的假设,许多烈度表都给出了烈度与地震动参数的对应关系。按此种假设,则显然,若某地有椭圆形等烈度线,则必有形态相似、轴向相同的椭圆形地震动等值线。

另一方面,我国现有的强震记录资料还不足以建立实用可信的地震动衰减规律。故我国目前地震动参数危险性分析中,多采用文献[4,5]中介绍的通过本地烈度衰减与烈度和地震动资料均较丰富的异地的烈度资料相比较,然后从该异地的地震动衰减推断本地地震动衰减的“借用法”。在上述借用中,烈度震级法采用的原则是:“假定地区1和地区2对同样震级M的地震,若烈度相等,则地震动参数也相等”^[3]。显然,这里采用的有条件的换算原则比无条件换算的做法严格,即相同的烈度需在相等震级的条件下才对应相同地震动。但无疑,依照这里的原则,只要某地震的等烈度线为椭圆,则其地震动等值线仍为轴向相同、形态相似的椭圆。故我们假定在某些等烈度线大体为椭圆的地区,地震动参数也具相似的形态。采用上述假定,经验点椭圆模型用作地震动参数危险性分析并不增加新的困难。

需要指出的是,对地震动参数,目前还不可能象烈度那样直接建立长短轴的衰减公式。在上面提到的借用方法中,也不能用某地区烈度长短轴的衰减公式,直接通过与异地资料比较得到该区地震动长短轴的衰减公式。因为异地地震动衰减公式中的距离参数不可能为长短轴,而借用法建立在相同距离参数的基础上。本文建议的方法如下:

1. 把椭圆按面积相等的原则换成等效圆得半径R,建立本地烈度随R的相当于震中距的衰减规律

$$I_1 = I_1(M, R) \quad (15)$$

2. 建立本地烈度椭圆半长短轴 R_A 和 R_B 与 R 之比随震级、震中距的变化规律

$$R_A/R = J_A(M, R) \quad (16)$$

$$R_B/R = J_B(M, R) \quad (17)$$

若上述比值与震级、震中距无关,则取 J_A, J_B 为常数(平均值)。

3. 建立异地如美国西部烈度和地震动参数随震级和震中距的衰减规律

$$I_2 = I_2(M, R) \quad (18)$$

$$Y_2 = Y_2(M, R) \quad (19)$$

4. 采用文献[4,5]中介绍的借用法得到本地地震动参数随震级和震中距的衰减规律

$$Y_1 = Y_1(M, R) \quad (20)$$

5. 据(16)、(17)和(20)式建立本地地震动参数随长短轴的衰减公式

$$Y_1 = Y_{1A}(M, R_A) \quad (21)$$

$$Y_1 = Y_{1B}(M, R_B) \quad (22)$$

四、EPEMSHA 程序简介

EPEMSHA 用 FORTRAN-77 编写,除主程序外,主要有两个子程序:TPA 和 TPB,分别用于处理 A 型源和 B 型源,如图 3、图 4 和图 5 所示。主程序中需输入两个数据文

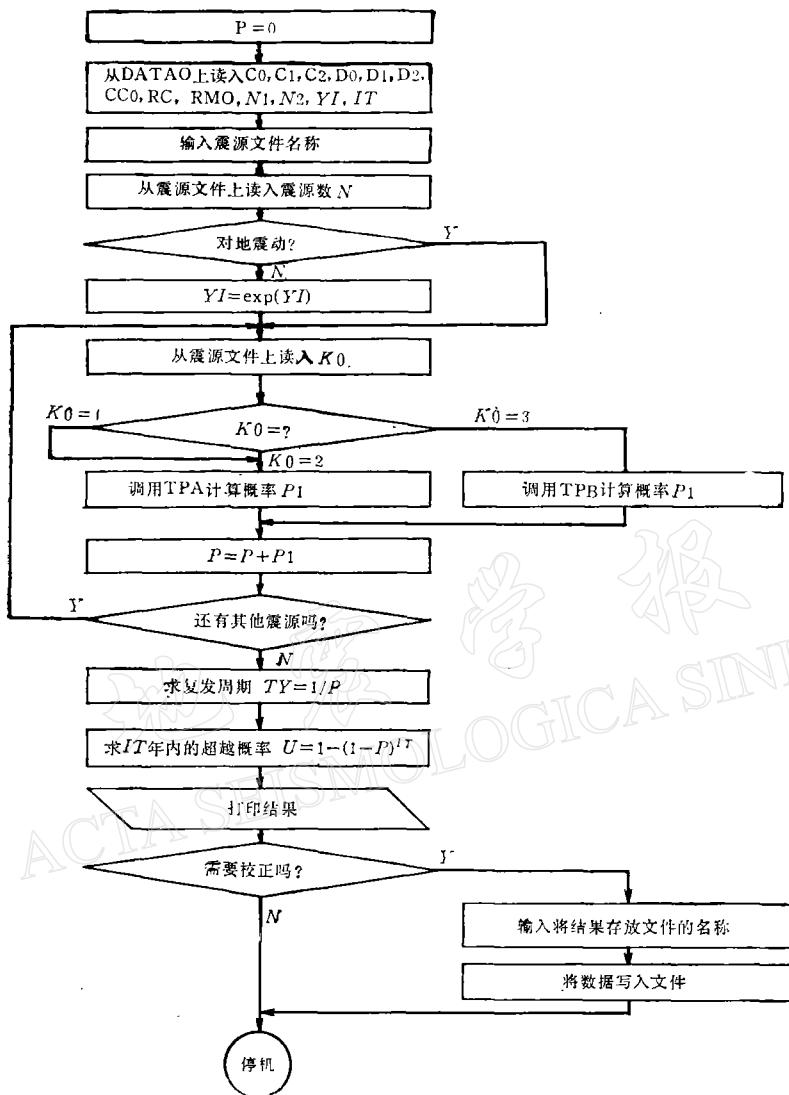


图 3 主程序框图

件：一个装有衰减系数和另一些不随震源变化的参数，取固定的名称 DATA0；另一个文件名由计算者自己确定，为震源参数文件，如发生率 V ，潜在震源的顶点经纬度或半径 R 等，该文件名在程序执行中键入。此外，主程序中除以表格的形式打印最终结果外，还可输出一个数据文件，为以后不确定性校正作准备。

本程序既可作烈度危险性分析，也可作地震动危险性分析。对烈度，衰减公式可用两种形式：其一是分别用长短轴衰减公式，

$$I = C_0 + C_1 \cdot M - C_2 \cdot \ln \sqrt{RA^2 + RC^2} \quad (23)$$

$$I = D_0 + D_1 \cdot M - D_2 \cdot \ln \sqrt{RB^2 + RC^2} \quad (24)$$

式中 I 为烈度， $C_i, D_i (i = 0, 1, 2)$ 为衰减系数， RA 和 RB 分别是等震线椭圆的半长

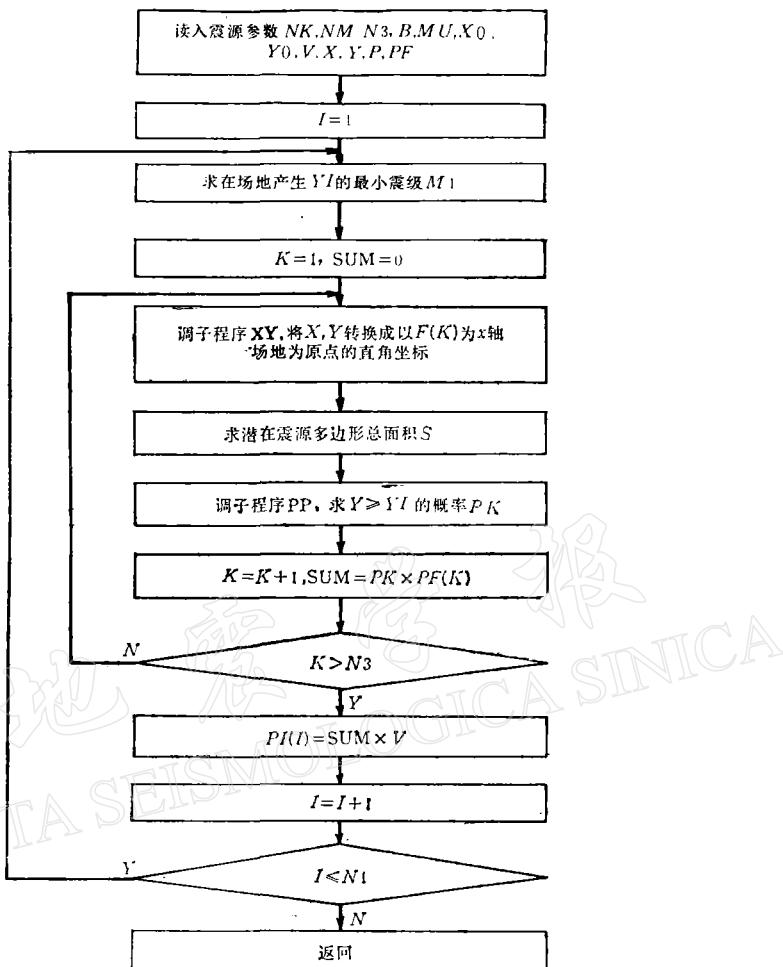


图 4 子程序 TPA 框图

短轴, RC 为震源深度。第二种方式是用震中距衰减公式, 此时输入的 $C_i = D_i$ ($i = 0, 1, 2$), 用常数 $CC0$ 表示长短轴之比的平均值。对地震动参数, 衰减公式的形式与烈度相似, 但 I 改为 $\ln Y$, Y 为地震动, 通常仅用第二种形式。

五、结语

- 经验点椭圆模型以一系列长轴具若干优势取向的同心同轴椭圆描述影响场。在等震线较狭长、等震线长轴有若干优势取向的地区具较好的效果, 与实际较接近。在影响场没有方向性差异或等震线椭圆无优势取向的区域, 本模型蜕化为点源(圆)模型。
- 本文介绍的经验点椭圆模型的实用计算模型 EPEMSHA 具有使用方便、速度快、精度高等优点, 潜在震源可为任意多边形。
- 烈度与地震动参数的关系是相当复杂的, 而目前地震动资料又不够丰富。地震动

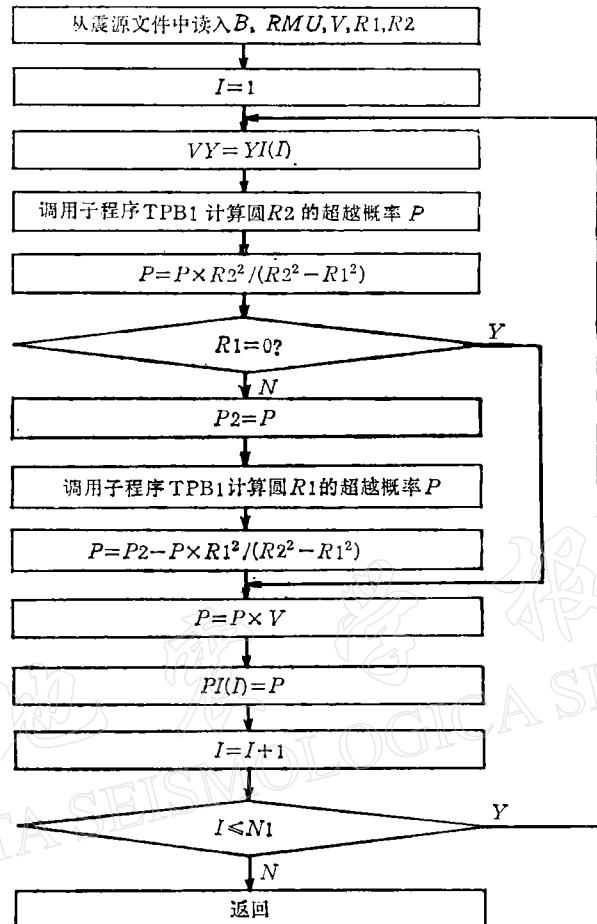


图 5 子程序 TPB 框图

参数的等值线是否也大体具与等烈度线相似的形态尚不敢断言。但若接受目前已在使用的利用本地烈度资料借用异地地震动衰减的烈度震级法的假设，则地震动参数的等值线可假设有与等烈度线大体相似的形态，从而在相应的地区可以使用经验点椭圆模型作地震动参数危险性分析。

作者对廖振鹏老师的鼓励和帮助表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 沈建文、华宜平, 1989. 关于地震裂度衰减模型的系列偏差. 地震学报, **11**, 38—45.
- [2] Cornell C., Allin, 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. seism. soc. Amer.* **58**, 1583—1606.
- [3] Kiureghian A., Der and Ang A. H-S., 1977. A Fault-rupture model for seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Amer.* **67**, 1173—1194.
- [4] 胡聿贤、张敏政, 1984. 缺乏强震观测资料地区地震动参数的估算方. 法地震工程与工程振动, **4**, 1, 1—11.
- [5] 田启文、廖振鹏、孙平善, 1986. 根据烈度资料估算我国地震动参数衰减规律. 地震工程与工程振动, **6**, 1, 21—36.

EMPIRICAL POINT-ELLIPSE MODEL FOR SEISMIC HAZARD ANALYSIS

Shen Jianwen, Hua Yiping and Qiu Ying

(Seismological Bureau of Anhui Province)

Kong Linglei

(China University of Science and Technology)

Abstract

An empirical point-ellipse model for seismic hazard analysis is systematically established in this paper. For most of the regions, isoseismals are of somewhat elongated shape. The empirical point-ellipse model can reduce systematic deviation of point-source and fault-rupture models. Concrete method of computation and the program EPEMSHA (Empirical point-ellipse model for seismic hazard analysis) is given in this paper. In the awkward computation of conditional probability $P(I \geq i | E_{i,m})$ integration over an area is analyzed; as a result, the precision and speed of calculation are increased.