

地震危险性分析中的参数敏感性研究^{*}

王 健 高孟潭

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要 强调地震危险性分析是包含多参数的复杂系统, 其参数的敏感性应作为一个整体来研究。考察了参数连续变化对结果的影响以及超越概率和潜在震源区震级上限对参数敏感性的影响, 得到了一些有益的认识。全面计算了包括地震空间分布函数在内的参数之间的交互作用, 提出了相对交互作用的概念。得出在 50 年超越概率 10% 时相对交互作用不超过 10%; 在年超越概率 10^{-4} 时, 高震级潜在震源区的震级上限与年平均发生率、空间分布函数的相对交互作用分别可达到 17% 和 22%, 为实际应用时判断是否要考虑参数的交互作用提供了方便。指出了求解结果的概率分布的重要性和必要性, 分析了各参数取不同水平的权重对结果分布的影响, 揭示多参数敏感性的全貌, 为进行合理的不确定性校正作了必要的准备。

主题词 地震危险性 地震区划 参数敏感性 不确定性校正

引言

研究参数的敏感性在地震危险性分析和区划中是非常重要的部分, 是不确定性校正的基础。地震危险性分析是一个包含多个参数的复杂系统, 其敏感性分析应作为整体来考虑。除了要研究单个参数的敏感性外, 还必须弄清参数间的交互作用以及多个参数同时变化时结果的范围及其分布。敏感性分析依附于地震危险性分析方法, 该方法自引入我国以后, 有了较大改进, 如增加了地震空间分布函数等。本文就是基于改进后的地震危险性分析方法, 对包括地震空间分布函数的参数全面、系统地进行敏感性分析。

就目前的认识水平, 参数的不确定存在一定范围, 敏感性分析应考察在不确定范围内参数联系变化对结果的影响。Rabinowitz 等(1991)曾应用因子设计法研究了参数间的交互作用, 得出震级上限与衰减关系的交互作用较大。我们认为这是由于其应用衰减关系的形式不同所致。该研究的另一结论认为取面源和线源模型与年平均发生率的交互作用较大, 这与我国的具体情况不尽相同。交互作用的大小与参数的变化量是相关的, 为了考察交互作用相对于因子单独影响的大小, 笔者提出了相对交互作用的概念, 并对参数之间的交互作用全面地进行了计算分析。

同时考虑多个参数的不确定性时结果的变化范围往往很大。McGuire^① 应用逻辑树的方

* 地震科学联合基金资助课题。国家地震局地球物理研究所论著 95A0093。

1995-03-14 收到初稿, 1995-08-07 收到修改稿, 1995-11-12 决定采用。

① McGuire R K, 1987. Seismic hazard uncertainty and its effects on design earthquake ground motions. *Proceedings of International Seminar on Seismic Zonation*, 351~359.

法进行过这方面的研究。该方法没有考虑参数取选择值非等权的情况，所给结果的状态是有限的。同时考虑多参数不确定性，其实质就要对多参数、多水平的所有组合进行地震危险性计算，因而给出结果的分布可展示参数敏感性的全貌。本文通过实例研究多参数同时变化状态下，结果的分布以及各参数取不同值的权重对结果分布的影响，为合理的不确定性校正作了准备性工作。

1 计算和分析

1.1 单参数的敏感性分析

单参数的敏感性分析是基础性的工作，以往仅将参数上调或下调一值计算其对结果的影响，缺乏趋势性的分析以及考虑其它因素的影响。本文将能够连续变化的参数，如地震年平均发生率(文中以 A 表示)、 b 值(B)、地震带震级上限(C)、潜在震源区震级上限(D)、地震空间分布函数(F)，在一定范围内等间隔变动计算其对结果的影响。参数的敏感性除与参数的变化量直接相关外，还应与超越概率值相关。随着一些特殊建筑的增多以及其重要性(如核电厂的极限安全地震动就是在年超越概率为 10^{-4} 时计算得到的)，非常有必要在不同超越概率情况下研究参数的敏感性。

本文选取郯庐地震带南段为实验区，地震带和潜在震源区的划分采用了《中国地震烈度区划图》(1990)的方案，衰减关系式采用中国东部衰减公式

$$\begin{aligned} \text{长轴} \quad I &= 6.046 + 1.480M - 2.081 \ln(R+25) & S = 0.49 \\ \text{短轴} \quad I &= 2.617 + 1.435M - 1.441 \ln(R+7) & S = 0.49 \end{aligned} \quad (1)$$

在不同震级上限的潜在震源区内外选取场点，分别在 50 年超越概率 10%，即年超越概率 2×10^{-3} (P_1) 和年超越概率 10^{-4} (P_2) 时，考察各参数的敏感性。经对大量场点计算结果的分析总结，得出以下认识：① 参数的敏感性呈单向变化趋势，即参数增大，结果也趋于增大；反之亦然(b 值的情形则相反)；② 年平均发生率和 b 值在低超越概率时敏感性变小，而震级上限在低超越概率时敏感性有增大的趋势；③ 影响场点的主要潜在震源区震级上限越高，参数的敏感性越大。④ 地震空间分布函数的敏感性受其它因素影响的规律性不强，因此，一般情况下应对其取值给予足够的重视。

1.2 交互作用

具有多个参数的复杂系统参数间不可避免地存在着一定的联系。严格地说，参数之间总是存在着或大或小的交互作用，关键是其值的大小。当交互作用较大时，必须考虑其影响，也就意味着一个参数(A)对结果的影响与另一个参数(B)所处的水平有关，也就是说，我们无法脱离其它参数来孤立地评价一个参数的敏感性；当交互作用很小时则可忽略其影响。这也就是计算交互作用的目的和意义所在。

因子设计中的正交设计法有一整套计算交互作用的方法(北京大学数学力学系概率统计组，1976；马希文，1981；中国科学院数学研究所数理统计组，1975)。该方法中，各种参数也称为因子，每一参数的多种选择值叫做参数的水平。参数取高水平用(+)号表示，低水平用(-)号表示。当参数 A 处于高水平时，记为 $A+$ ，相应的结果记为 $Y(A+)$ 。参数 A 在因子 B 处于高水平的影响是

$$A(B+) = Y(A+, B+) - Y(A-, B+) \quad (2)$$

参数 A 在参数 B 处于低水平的影响是

$$A(B-) = Y(A+, B-) - Y(A-, B-) \quad (3)$$

参数 A 与 B 之间的交互作用记为 $A \times B$. 参数间的交互作用可由下列公式计算:

$$A \times B = [A(B+) - A(B-)]/2 \quad (4)$$

在计算参数之间的交互作用时, 对参数不确定性的表达方式是各参数取 3 种可能值. 取《中国地震烈度区划图》(1990)(中国烈度区划图编委会, 1992)的参数为中值, 适当选定各参数处于高水平和低水平的值(表 1). 以此图中国东部的衰减关系作为“中值”, 保持该衰减关系的形式不变, 调整系数分别得到衰减慢和快的关系式, 作为“高值”和“低值”. 由于本文拟给出的实验场点主要受短轴方向的影响, 故只给出短轴方向的衰减关系.

$$\text{短轴} \quad I = 2.941 + 1.363M - 1.494 \ln(R + 7) \quad S = 0.61 \quad (5)$$

$$\text{短轴} \quad I = 3.991 + 1.236M - 1.353 \ln(R + 15) \quad S = 0.61 \quad (6)$$

表 1 参数高、中和低水平值

水平	A	B	CD	E	F
+	2.833	0.73	9.0	公式(6)	0.133 2
中值	1.833	0.68	8.5	公式(1)	0.083 2
-	0.833	0.63	8.0	公式(5)	0.033 2

根据表 1 给出的参数和上述公式, 现对有代表性的两个场点, 即场点 1(郯城 118.33° E, 34.60° N) 和场点 2(连云港 119.17° E, 34.62° N) 在 P_1 和 P_2 两个超越概率时对参数之间的交互作用进行计算. 影响两场点主要潜在震源区的震级上限与地震带震级上限相同, 表 1 中用 CD 表示. 交互作用也与影响场点的潜在震源区震级上限的高低有关, 震级上限越高数值越大, 反之亦然. 经大量计算证明, 交互作用不大. 现将上述两场点的结果列于表 2.

表 2 因子的交互作用

场点	场点 1		场点 2	
	2×10^{-3}	10^{-4}	2×10^{-3}	10^{-4}
$A \times B$	0.1	0.05	0.05	0.0
$A \times CD$	0.05	0.1	0.0	0.15
$A \times E$	0.0	0.05	0.0	0.0
$A \times F$	0.05	0.0	0.1	0.0
$B \times CD$	0.0	-0.1	-0.05	-0.15
$B \times E$	0.0	0.05	0.0	0.0
$B \times F$	0.0	0.0	-0.05	0.05
$CD \times E$	0.0	0.0	0.0	0.05
$CD \times F$	0.05	0.2	0.0	0.2
$F \times E$	0.0	0.0	0.05	0.0

从表 2 中得知, 交互作用一般都不大, 最大值为 0.2.

交互作用的大小与参数的变化量是相关的, 为了考察交互作用相对于因子单独影响的大小, 定义相对交互作用为: 两因子的交互作用除以两因子单独影响之和(如下式)

$$J_{AB} = \frac{A \times B}{(\Delta I_A + \Delta I_B)} \quad (7)$$

根据式(7)、表 2 和表 3 的结果,逐项求相对交互作用。在低超越概率时,对于震级上限很高的潜在震源区,其震级上限与年平均发生率或与空间分布函数的相对交互作用可分别达到 17% 和 22%。其余各项的相对交互作用均小于 10%。

表 3 各因子的单独影响

ΔI	场点 1		场点 2	
	2×10^{-3}	10^{-4}	2×10^{-3}	10^{-4}
A	0.7	0.3	0.6	0.4
B	0.4	0.2	0.3	0.2
CD	0.1	0.8	0.1	0.5
E	0.3	0.3	0.6	0.8
F	0.2	0.2	0.2	0.4

2 结果的分布

同时考虑多参数变动研究敏感性的问题,实质上就要对多参数、多水平的所有组合进行地震危险性计算,计算次数由参数个数和水平数决定, n 个参数、 m 水平的全面计算次数为 m^n 次。可以想见,这些计算值围绕着原结果(不考虑参数的不确定性,所有参数取中值的结果),其分布反映着同时考虑多参数的敏感性结果相对原结果的离散状态。下面就参数取不同水平权重时计算结果的分布,考察水平权重对分布的影响。

2.1 参数水平等权的情形

所谓参数水平等权是指如果参数处于各水平的概率相等,称为该参数是水平等权;反之则称水平不等权。对于各参数取每一水平是等权的情形,参数的每一种组合是等权的。一些组合的结果如果相等,则该组合数除以总的组合数即是该结果的比例。求出所有结果的比例,即得结果的分布。

对场点 1 在年超越概率 2×10^{-3} 时的结果分布进行了计算,各参数 3 水平的取值如表

1.5 参数 3 水平的组合共有 243 个,原结果是 7.9 度,结果分布绘于图 1(实线所示)。从图中可以看到,同时考虑多参数的不确定性,结果最大为 8.5 度,最小为 7 度,结果为 7.9 的概率仅为 10.7%,有 33.30% 的结果大于原结果。

2.2 参数水平非等权的情形

设定参数 A 处于 i 水平的权重为 W_{ai} ,参数 B 处于 j 水平的权重为 W_{bj} ,其余各参数类似。组合方式 $A_i B_j \cdots N_m$ 的出现概率为 $W_{ai} \cdot W_{bj} \cdots W_{mn}$ 。多个组合的结果相等,则该结果的比例即是这些组合出现概率之和。

同样对场点 1 在年超越概率 2×10^{-3} 时的结果分布进行了计算。对于水平非等权的情况,设定各参数处于 2 水平的权重为 60%,1,3 水平的权重分

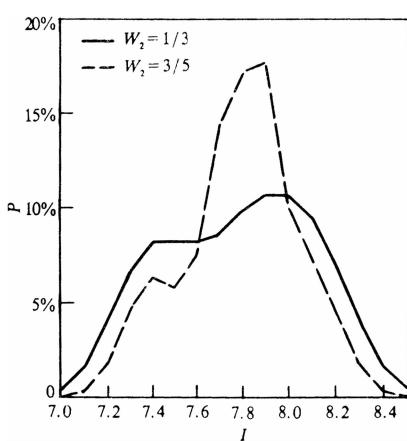


图 1 两种权重下烈度的概率分布

别为 20%. 结果的概率分布绘于图 1(以虚线表示). 从图 1 可以看到, 对于等权和非等权两种情况, 结果的范围, 即最大值和最小值没有变化, 但分布出现了变化. 非等权时结果朝着权重大的原结果集中, 原结果的概率为 17.68, 大于 7.9 度的概率减小到 24.54%. 参数处于各水平的权重, 不改变结果的范围, 但影响结果分布的形状.

3 讨论

地震危险性分析的实质是地震的中长期预测. 就目前的认识水平, 参数不可避免地存在不确定性, 但这种不确定性是有范围, 有层次的, 如某一潜在震源区震级上限较高, 为 8, 其不确定性范围可以从 7.5 到 8.5, 但不应包括 6. 如果震级上限从 6 到 8.5 都有可能, 则可能说明对该区域的地震构造背景和地震活动特征缺乏认识. 从这个意义上讲参数的不确定性依附于定性的判定. 类似的问题还有潜在震源区的不同划分方案应是判定的不同, 用参数的不确定性很难包容, 具体潜在震源区边界的一些变动应属不确定性范畴. 对类似问题应加以区分.

衰减关系是非常重要而复杂的问题, 衰减关系形式的不同(与震级和震中距的函数关系式)、系数的差异、方差的大小都对计算结果有很大影响. 本文没有考虑衰减关系形式和方差的影响.

由经纬度坐标换为直角坐标计算对结果的影响以及等震线长轴走向变化对结果的影响, 参见时振梁等(1991)文献. 有关潜在震源区边界变动的影响参见 Bender(1986).

同时考虑参数的不确定性, 必然有部分结果高于原计算值, 如何在不确定性校正中加以考虑, 有待进一步工作

参 考 文 献

- 北京大学数学力学系概率统计组, 1976. 正交设计法. 北京: 石油化学工业出版社. 1~65
马希文, 1981. 正交设计的数学理论. 北京: 人民教育出版社. 1~35
时振梁, 鄢家全, 高孟潭, 1991. 地震区划原则和方法的研究: 以华北地区为例. 地震学报, **13**(2): 179~189
中国地震烈度区划图编委会, 1992. 中国地震烈度区划图(1990)及其说明. 中国地震, **8**(1): 1~10
中国科学院数学研究所数理统计组, 1975. 正交设计法. 北京: 人民教育出版社. 4~79
Bender B, 1986. Modeling source zone boundary uncertainty in seismic hazard analysis. *Bull Seism Soc Amer*, **76**: 329~341
Rabinowitz N, Steinberg D M, 1991. Seismic hazard sensitivity analysis; a multi-parameter approach. *Bull Seism Soc Amer*, **81**: 796~817