

# 震害预测仿真系统研究(三) ——仿真优化方法\*

李 杰

(郑州工学院化工部抗震防灾研究室)

**摘 要:** 本文初步建议以系统的震害度为衡量系统震害分布的评价准则,并研究了利用这种评价准则进行仿真预测的理论途径。

**关键词:** 地震、预测、模糊集合

**中国图书分类号:** P315

为了研究历史震害规律及其与地震工程学的现有成果相结合进行震害预测工作的问  
题,目前国内研究工作者提出了各种各样的预测方法,诚如文献[1]所述,这些方法多受  
到模式法经验背景的约束,因而难以反映真实城市系统的现状特征。基于使真实系统与仿  
真系统具有相同的总体震害分布,从而通过仿真系统的震害来预测真实系统的基本思想。  
在文献[2]中,我们进一步研究了如何选取和建立仿真参数集合的问题。这样,我们便解  
决了如何由真实系统建立仿真系统的问题。本文,则解决如何给真实系统及仿真系统建立  
震害分布的评价准则,以及如何利用这种评价准则来实现仿真预测的问题。

## 1 震害度的基本概念

震害度的概念,见于文献[3]。这一概念原为评价模糊烈度而引入<sup>[4,5]</sup>,后来在文献  
[3]中又被引用作为同一类结构在某一烈度下的综合破坏程度的评价。震害度以震害指数  
ind 的模糊集来表示:

$$\tilde{D}(\text{ind}) = \sum_{i=1}^t r_i \cdot A_i(\text{ind}) \quad (1)$$

式中:  $\overset{\Delta}{=}$  表示定义做, ( $\cdot$  表示算术积  $\sum$  表示算术和(典型形式见后)

$\tilde{D}$  为以震害指数为基础变量(ind)的模糊集

$r_i$  为第 i 破坏等级在全部样本中所占比例。

$A_i$  为以震害指数为基础变量,描述破坏等级的模糊集

t 为破坏等级分等个数,一般取五等划分。

$A_i$  的隶属函数的取值,可以在离散点上,即取震害指数论域为  $V = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$\sim$   
 $= \{0, 0.1, 0.2, \dots, 1\}$ , 而对应的模糊子集记为<sup>[6]</sup>:

\* 收稿日期:1990-12-21

$$\left. \begin{aligned}
 A_1 &= \text{完好} = \frac{1}{0} + \frac{0.7}{0.1} + \frac{0.2}{0.2} \\
 &\sim \\
 A_2 &= \text{轻微破坏} = \frac{0.2}{0} + \frac{0.7}{0.1} + \frac{1}{0.2} + \frac{0.7}{0.3} + \frac{0.2}{0.4} \\
 &\sim \\
 A_3 &= \text{中等破坏} = \frac{0.2}{0.2} + \frac{0.7}{0.3} + \frac{1}{0.4} + \frac{0.7}{0.5} + \frac{0.2}{0.6} \\
 &\sim \\
 A_4 &= \text{严重破坏} = \frac{0.2}{0.4} + \frac{0.7}{0.5} + \frac{1}{0.6} + \frac{0.7}{0.7} + \frac{0.2}{0.8} \\
 &\sim \\
 A_5 &= \text{摧毁} = \frac{0.2}{0.6} + \frac{0.7}{0.7} + \frac{1}{0.8} + \frac{1}{0.9} + \frac{1}{1} \\
 &\sim
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

也可以取作连续参数形式, 即取震害指数论域  $V = [0, 1]$ , 而相应的隶属函数取为<sup>[7]</sup>:

$$\left. \begin{aligned}
 u_{A_1}(ind) &= \begin{cases} 1 & 0 \leq ind \leq 0.1 \\ \frac{1}{2}[\sin(5\pi ind) + 1] & 0.1 < ind \leq 0.3 \end{cases} \\
 u_{A_i}(ind) &= \frac{1}{2}[\sin(5\pi ind - i + 1)\pi + 1] \\
 &\quad 0.2(i-1) \leq ind \leq 0.2i \quad (i = 2, 3, 4) \\
 u_{A_5}(ind) &= \begin{cases} \frac{1}{2}[\sin(5\pi ind) + 1] & 0.7 \leq ind \leq 0.9 \\ 1 & 0.9 < ind \leq 1 \end{cases}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

两种取值方式都是人们的客观经验的总结, 而在具体表述上, 又因主观规定性的参与表现出一定的可变动性。

$D$  的具体计算, 当震害等级百分比为具体数值时, 可以取两种计算方式<sup>[5]</sup>, 其一是取有界和形式, 即取  $\sum$  为一系列有界和  $\oplus$ , 两个模糊子集的有界和定义为:

$$u_{A \oplus B}(X) \triangleq \min[1, u_A(X) + u_B(X)] \quad (4)$$

如此, 则:

$$\underline{D} = r_1 \underline{A}_1 \oplus r_2 \underline{A}_2 \oplus \cdots \oplus r_i \underline{A}_i \quad (5)$$

直观上, 这实质上是对以  $r_i$  修正后的诸模糊子集进行取和运算, 并限定了取和后的隶属函数不超过单位值 1。

第二种计算  $D$  的方法是取  $\alpha$  截集和区间数进行计算, 设  $A_1, A_2, \dots, A_i$  为论域  $X$  中的模糊子集, 即  $A_i \in F(X), i = 1, 2, \dots, i, F(X)$  是  $X$  中一切模糊子集的集合, 有映射

$$f: \underbrace{X \times X \times \cdots \times X}_t \rightarrow V \quad (6)$$

则取  $\underline{D} \in F(V)$ , 并按扩展原理有:

$$\underline{D} = f(\underline{A}_1, \dots, \underline{A}_i)$$

$$= \int_{x_1 \times x_2 \times \dots \times x_t} U_D(x_1, x_2, \dots, x_t) / f(x_1, x_2, \dots, x_t) \quad (7)$$

上式的另一种表达式为<sup>[5]</sup>:

$$\underline{D} = \int_0^1 \alpha f[(A_1)_\alpha, (A_2)_\alpha, \dots, (A_t)_\alpha] \quad (8)$$

式中 $\int$ 为关于模糊集合的一种求和表示方法,而不是普通意义上的积分。

定义区间数 $\delta$ 为各等级震害指数范围,即 $\delta_i \triangleq (\alpha_i, b_i) = 1, 2, \dots, t$ ,且定义关于区间数的运算:

$$f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_t) \triangleq \{d = f(s_1, s_2, \dots, s_t) | s_i \in (a_i, b_i) \quad i = 1, 2, \dots, t\} \quad (9)$$

则可以应用(8)式计算 $\underline{D}$ 。

一般说来,方式一适合于应用于隶属函数在离散点取值的情况,方式二适合于应用于隶属函数定义在连续区间上的情况。按方式一计算出的 $\underline{D}$ 的隶属函数曲线,不一定满足凸集函数的要求,往往需要进行平滑或插值处理,按方式二计算出的 $\underline{D}$ 则不存在这一问题。

## 2 仿真优化方法

对于真实系统与仿真系统中的各子系统,可以用震害度作为震害关于震害指数分布的评价准则,在此基础上,我们试图建立一种方法,通过它,实现仿真预测的目的。

如下讨论,以子系统为例进行讨论,对所有子系统应用下述方法,我们便可以完成整个系统中的仿真预测。

设某一子系统,对于真实系统中,其关于结构仿真参数的频数分布为 $P(x)$ ,以 $P(x)$ 为约束条件,并结合 $\lambda_1, \lambda_2$ 值,(定义见文[2]),可以由震害资料建立起一个拟仿真子系统 $PSJ$ ,此系统内震害分布以各震害等级百分比 $r_i$ 表示,利用式(1)可以计算其震害度,记为 $\underline{D}'$ ,相应隶属函数曲线记为 $f'(x)$ ,对此震害度,考虑真实系统的设防与加固因素加以修正,给出仿真子系统 $SSJ$ 的震害度为 $\underline{D}$ ,相应的隶属函数为 $f(x)$ 。

从另一方面,选用成熟的模式法,计算真实子系统 $SJ$ 的震害指数分布,并按约定震害等级划分(表1)计算各震害等级百分比 $m_i$ ,然后按式(1)计算其震害度 $C$ (以 $m_i$ 代 $r_i$ ,以 $C$ 代 $D$ ),相应的隶属函数为 $g(x)$ 。

表 1

破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒毁
ind 区间	0~0.1	0.1~0.3	0.3~0.55	0.55~0.8	0.8~1

根据文献[1]的思想,真实系统按模式法计算所得的震害度应以仿真系统的震害度为目标进行修正,这种修正体现为震害指数集合的修正。设按模式法计算所得震害指数集合为:

$$IX' = \{x_i | x_i \in [0, 1], \quad (i = 1, 2, \dots, n)\} \quad (11)$$

经修正后的震害指数集合为

$$IX = \{\beta x_i | x_i \in [0, 1], \quad (i = 1, 2, \dots, n)\} \quad (12)$$

设取目标函数为

$$\begin{aligned}\Delta F &= \int_b^1 [f(x) - g(x)] dx \\ &\approx \sum_{j=1}^n [f(x_j) - g(x_j)] \Delta x_j\end{aligned}\quad (13)$$

则修正模式预测结果的工作可按下述步骤完成:

① 设定收敛标准 $\varepsilon$ , 计算目标函数值 $\Delta F$ ,

$$\text{若} \quad \Delta F \leq \varepsilon \quad (14)$$

则令  $\beta = 1$

$$Ix = Ix' \quad (15)$$

并转向结束, 否则转向第2步;

② 采用随机步长搜索法修正 $\beta$ 值, 并按(12)计算 $Ix$ , 按式(1)计算 $C$ 及相应 $g(x)$ ;

③ 再次计算目标函数, 并检验收敛准则(14)若满足则取 $Ix$ 为最终结果, 否则转向第二步继续计算。

上述问题求解过程本质上是一个逐步求优的过程, 所以称此方案为仿真优化技术。

根据 $Ix$ , 不难确立各子系统的震害预测矩阵, 进而从样本推断到全体, 即得整个城市系统的震害预测结果。

值得指出: 上述仿真优化过程, 实质上相当于将模式法预测震害度平移以符合仿真系统震害度的过程。这种方案在有些情况可能难以反映震害度曲线的细部结构的符合程度。从物理背景上看, 这一方案是将子系统预测震害指数统一地放大或缩小, 因此, 可能难以全面反映实际存在的种种复杂情形。例如, 一种模式预测方法, 对某些结构可能预测结果偏轻, 而对另一些结构则可能预测结果偏重, 而采用上述方案计算则只能统一地放大或缩小震害指数。

为了解决这一问题, 可以采用多准则仿真优化方法, 所谓多准则优化, 即对同类结构采用两种或两种以上的模式法计算, 没采用第 $j$ 种模式法所得预测结果为

$$Ix'_j = \{x_{ji} | x_{ji} \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, n)\} \quad (16)$$

我们可取经修正后的震害指数集为

$$Ix = \{y_i | y_i \in [0, 1], (i = 1, 2, \dots, n)\} \quad (17)$$

$$\text{其中: } y_i = \alpha \cdot x_{1i} + \beta x_{2i} + \gamma x_{3i} + \dots \quad (18)$$

且满足:

$$\alpha + \beta + \gamma + \dots = 1 \quad (19)$$

则按照类似于上述单准则仿真优化的步骤, 可以确立组合参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 等。只是这里要同时考虑约束条件(19), 因而是一个有约束优化问题。由于 $x_{1i}$ 与 $x_{2i}, x_{3i}$ 等分属不同集合, 采用多准则仿真优化算法, 可以有助于改善仿真预测的细部结果, 并在物理含义上使震害指数有增有减, 因而更趋合理。

显然, 无论是单准则仿真优化还是多准则仿真优化, 我们都提供了一种检验模式法对某一现实系统适用性的一种客观标准。对单准则仿真优化, 如果修正系数 $\beta$ 值与单位值1相距不远, 则说明着模应模式对这一系统的适用性。而对于多准则仿真优化, 诸系数的显著性水平则说明着相应模式对于现实系统的适用性。

### 3 结语

总结文献[1]、[2]和本文的综合研究,我们认为,城市震害预测仿真系统以子系统为结构,以地震工程的理论成果和历史震害资料为基础,通过仿真优化技术的应用,可以达到震害仿真预测的目的。这一系统方法充分注意了城市系统的现状特征,为震害预测工作提供了一个新的综合工具。这一工作的深入进行,不仅有利于增进对震害预测成果的信任度,而且可以对模式法或模糊关系法的适用性程度提供一个客观判据。

### 参 考 文 献

- (1) 李杰.震害预测仿真系统研究(一) 仿真预测的基本思想.郑州工学院学报.第12卷第1期 1991
- (2) 李杰.震害预测仿真系统研究(二) 结构仿真参数研究.郑州工学院学报.第12卷第4期 1991
- (3) 刘锡荟等.震害预测的模糊数学模型.建筑结构学报,1984年1期
- (4) 刘锡荟等.烈度评定与震害预测中的模糊方法.地震工程与工程振动,1982年4期。
- (5) 刘锡荟等.模糊烈度.地震工程与工程振动 1983年3期
- (6) 徐祥文等.结构动力反应与震害关系的模糊识别.地震工程与工程振动,1989年2期
- (7) 陈一平等.若干典型建筑物震害预测的数学方法.中国建筑科学研究院科研报告,1989年

## Research on the Simulation System of Earthquake Disaster prediction (III)——Simulation optimization Method

Li Jie

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** This paper proposed to take earthquake disaster intensity as a principal for assessing system earthquake disaster distribution. A theory method basing on the principal was presented.

**Keywords:** earthquake, prediction, fuzzy set.