

文章编号: 1004-4574(2008) 02- 0048- 05

层次分析法在城市防震减灾能力评估中的应用

刘 莉¹, 谢礼立^{1, 2}

(1 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:城市防震减灾工作关系到经济建设和社会发展, 科学合理地对城市承受地震灾害的能力进行评估并有针对性地加强其薄弱环节, 是减轻城市地震灾害的有效方法之一。根据影响城市防震减灾能力的主要因素, 在设定多层次指标体系基础上, 将层次分析法(AHP)用于城市防震减灾能力的评价体系中, 其中考虑了信息不全的AHP和不确定的AHP, 该方法将复杂的问题分解成若干层次, 在比原问题简单得多的层次上逐步分析, 从而达到解决问题的目的。

关键词:城市; 防震减灾; 层次分析法; 判断矩阵

中图分类号: O223 X43 **文献标识码:** A

Application of analytical hierarchy process in evaluation of cities' ability for earthquake disaster prevention and reduction

LU Li¹, XE Lili^{1, 2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Cities' ability reducing earthquake disasters is a complex system involving numerous factors, moreover the research on evaluating cities' ability reducing earthquake disasters relates to multi subject such as earthquake science, social science, economical science and so on. In this paper, the fragmentary AHP (analytical hierarchy process), and the indeterminate AHP was used to assess the cities' ability reducing earthquake disasters. The AHP easily solves the problem by reducing the complex object to several parts. It can evaluate cities' ability reducing earthquake disasters absolutely and quantitatively and consequently instruct the decision-making on reducing cities' earthquake disasters loss.

Key words city; earthquake disaster prevention and reduction; analytical hierarchy process; judgment matrix

20世纪末时, 联合国国际减灾十年委员会曾呼吁要对现有大中城市的防震减灾能力进行评估, 但由于没有合适有效的方法而使呼吁成为泡影。1994年我国政府提出要使我国大中城市、人口密集和经济发达的沿海地区具有抗御六级左右地震的能力, 这又对全社会提出了如何评估城市防震减灾能力的要求。地震工程是从事工程抗震防灾的科学, 它的根本目的也是为了减轻地震灾害。因此, 城市防震减灾能力评估是当今社会对地震工程提出的一个需要迫切解决的极具挑战性的课题。它不仅可以使城市灾害损失定量化评价成为可能, 而且将为评价城市防震减灾能力提供客观的度量标准, 从而指导城市进行防震减灾决策。

本文在张风华博士^[2]原有研究成果的基础上, 采用改进后的层次分析法, 完善并优化了城市防震减灾能力评估体系。系统采用的评价模式是: 首先建立与城市防震减灾能力相关的评价体系, 通过向有关专家发

放调查问卷的形式确定评价体系中各个指标所占的权重,进而通过灰色关联度计算得到城市的防震减灾能力。在此过程中,最为核心的部分就是利用层次分析法对调查结果进行统计分析以确定体系中各项指标所占的权重。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是 Saaty^[1-4]等人在 20 世纪 70 年代初提出的一种多准则决策方法。它是将半定性、半定量的决策问题转化为定量问题的有效途径。即按决策过程将各个因素进行分解,形成层次化的分析模型,通过两两因素的相对比较,经一致性判断,确定各决策问题的重要性权重或相对优劣的排序值,从而为分析和预测事物的发展提供可比较的定量依据,具有实用性、系统性、简洁性等优点。因此, AHP 已经在经济、社会、管理等各个领域得到了广泛的应用。

1 层次分析法的基本原理

运用 AHP 解决问题,大体可以分为 5 个步骤^[5-6]:

(1) 明确问题,建立一个多层次的递阶结构

根据评价对象的情况,确定评价指标。因评价因素很多,可将各评价因素分类组合形成一种层次结构。

(2) 构造两两比较判断矩阵

建立判断矩阵,并据此计算各元素的优先级权重。用上一层次中的每一元素作为下一层元素的判断准则,分别对下一层的元素进行两两比较,比较其对于准则的重要程度,并按事前规定的标度定量化,建立判断矩阵。

(3) 计算单一准则下元素的相对权重

这一步要解决在准则 B_k 下 n 个元素 C_1, C_2, \dots, C_n 排序权重的计算问题,并进行一致性检验。对于 C_1, C_2, \dots, C_n , 通过两两比较得到判断矩阵 C , 通过解特征根问题 $C\omega = \lambda_{\max}\omega$ 得到 λ_{\max} 和 ω 值。

(4) 一致性检验

AHP 要求判断矩阵要有大体的一致性,能够使计算的结果基本上合理。求一致性指标 $I_C = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ (式中 n 为判断矩阵的阶数), $C_R = I_C / I_R$ (I_R 为平均一致性指标), 如果 $C_R < 0.1$, 则一致性检验通过。

(5) 计算各层元素的组合权重

为了得到递阶层次结构中每一层次所有元素对于总目标的相对权重,需要把第三步的计算结果进行适当的组合,并进行总的判断一致性检验。这一步骤是由上而下逐层进行的。最终计算结果为决策方案优先顺序的相对权重和整个递阶层次模型的一致性检验。

以上是用 AHP 解决比较简单的决策问题时所用到的。实际上,对于某个复杂的系统,广集多个决策者(专家)的意见是一种常用的方法。当考虑因素较多时,由于客观事实的复杂性和人的认识的多样性,在群组决策时还需要考虑到一些特殊的情况^[5]。在本文中,作者就以城市防震减灾能力评估系统为例对这样的情况进行了分类处理:

(1) 信息不全下的 AHP

参与系统调查的专家组成员中有的专家对某些因素的评判很内行,而对另一些因素的评判不熟悉,缺乏充分的理由,甚至由于某种原因不便于对某些因素作出评判,给出所谓的残缺判断矩阵,并造成参加两两比较的专家人数不一致,由此残缺判断矩阵导出的方案中相对重要性的排序问题称为不完全判断信息下的排序问题。例如矩阵

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ & 1 & 3 \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

(2) 不确定型 AHP

在对诸因素作两两比较时,专家的意见不一致,只能集中在某一区间内,在某区间也可能是均匀分布,也可能是正态分布,或者有其他类型的分布。在这样决策因素概率分布未知情况下所作的评判,一般需要先对所涉及的随机因素的概率分布加以估计,并根据估计期望的最大值来选择最优方案。例如矩阵

$$\begin{pmatrix} 1 & 2\sim 5 & 3\sim 6 \\ & 1 & 2\sim 3 \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

对这些问题的处理见文献 [7], [8]。

2 城市防震减灾能力评估

2.1 城市防震减灾能力评估体系指标的确定

城市防震减灾能力本身是一个涉及因素众多的复杂体系,对它的评估也是涉及到地震科学、社会科学和经济科学的交叉学科问题。所谓防震减灾能力是指一个城市确保其地震安全的能力。根据地震灾害对一个城市造成破坏和损失的特点,用人员伤亡、经济损失和震后恢复时间三个方面作为衡量城市防震减灾能力的准则,围绕这三个准则,从影响城市防震减灾能力的众多复杂因素中抽取六大因素,并用一些简单、可测量的指标来代表这六大因素,从而建立起城市防震减灾能力评估体系,具体结构如图 1 所示^[3]。

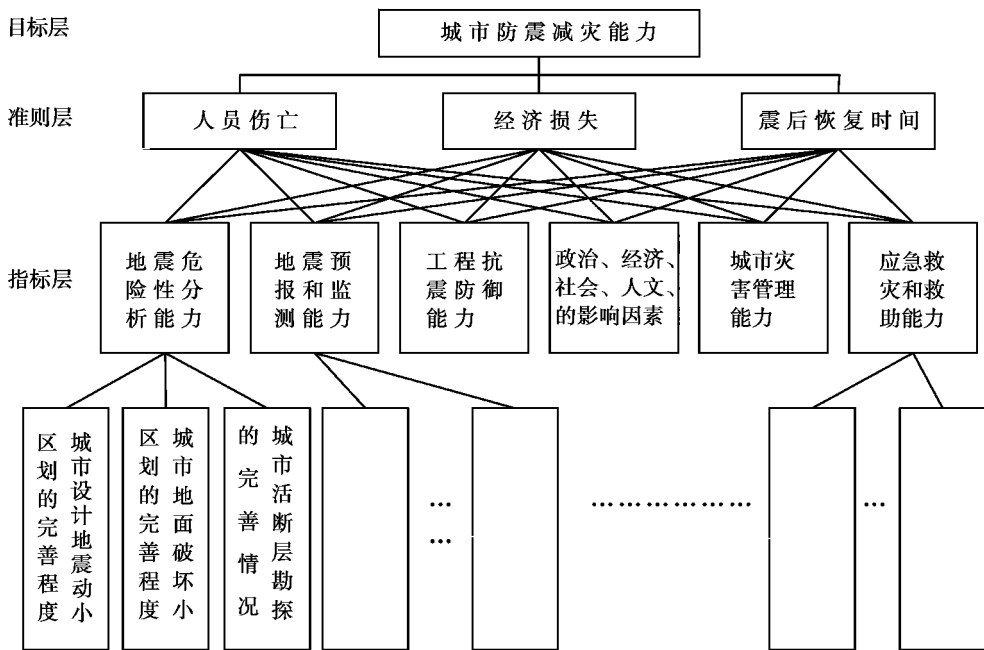


图 1 城市防震减灾能力评估层次体系模型

Fig 1 Hierarchical model for assessment of city's ability in earthquake disaster prevention and reduction

2.2 城市防震减灾能力评估体系指标权重的确定

2.2.1 构造相应元素的判断矩阵

在构造判断矩阵时,由于本系统涉及方面相当复杂,我们首先考虑的是用专家打分法,这种方法是由相关领域的专家通过自己的经验分析得到各评价指标之间的相互关系,然后再根据这些关系相应的给判断矩阵的相关项赋值。由于专家的经验非常丰富,所以这种方法有一定的适用性。但是它的缺点也相当明显:人的主观因素影响太大,不可能对评价指标采用构造出确定的判断矩阵,因此,我们采用了确定性评价和不确定性评价两种模式。

所谓的确定性评价,就是指常规的层次分析法(不包括信息不全的 AHP 和不确定性 AHP),而所谓的不确定性评价,就是改进的层次分析法(包括信息不全的 AHP 和不确定性 AHP)。当某个评价指标的相关资料丰富,专家对其中各项评价指标及其相互关系十分了解时,可以采用常规的 AHP;当某个指标的相关资料匮乏,专家对其中各项评价指标及其相互关系不是完全了解时,可以采用不确定性 AHP 和信息不全 AHP 相互结合使用。

2.2.2 权重向量的计算分析

在权重向量的分析计算过程中,本文采用了文献^[9]的方法,也就是在研究不确定 AHP 给出的区间数判断矩阵权重计算方法的基础上,充分利用判断者的全部判断信息,将区间数判断矩阵进行一致性逼近,应用误差理论,计算区间数判断矩阵的权重。

定理 1 设 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 为一致性数字矩阵, 则 A 的权重向量为 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 其中 $\omega_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$, $j = 1, 2, \dots, n$.

定理 2 设 $A = (A_{ij})_{n \times n}$, $A_{ij} = [a_{ij}, b_{ij}]$, 取 $m_{ij} = \sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n \frac{a_{ik} b_{jk}}{a_{jk} b_{ik}}}$, 则 $M = (m_{ij})_{n \times n}$ 为满足互反性的一致性

数字判断矩阵, 其权重向量为 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 其中, $\omega_j = \frac{\sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n a_{jk} b_{jk}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[2n]{\prod_{k=1}^n a_{ik} b_{ik}}}$, $j = 1, 2, \dots, n$.

定理 3 记 $\Delta M_1 = (m_{ij} - a_{ij})_{n \times n}$, $\Delta M_2 = (b_{ij} - m_{ij})_{n \times n}$, ΔM_1 与 ΔM_2 称为 A 与 M 的极差矩阵. 应用误差传递公式可进行区间数判断矩阵的权重向量分析计算.

$$(\Delta_k \omega_j)^2 = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n m_{ij}\right)^4} \sum_{j=1}^n \Delta_k^2(m_{ij}), k = 1, 2, \Delta_1 m_{ij} = (m_{ij} - a_{ij}), \Delta_2 m_{ij} = (b_{ij} - m_{ij})$$

由此可得权重区间 $(\omega_j - \Delta_1 \omega_j, \omega_j + \Delta_2 \omega_j)$, 为方便排序比较, 本系统取权重为权重区间大小值的平均值.

2.2.3 权重系数的确定

应用以上的改进的层次分析法, 本文在向专家咨询后回收的问卷中, 进行了城市防震减灾能力评估系统中各个指标的权重计算.

在“城市防震减灾能力”单一准则下, 通过不确定 AHP 给定矩阵, 计算得出了人员伤亡、经济损失和震后恢复时间针对这一准则的区间数判断矩阵, 如下式所示.

$$A = \begin{pmatrix} (1, 1) & (1, 34, 2, 92) & (1, 54, 3, 54) \\ (0, 34, 0, 94) & (1, 1) & (0, 74, 1, 68) \\ (0, 37, 0, 66) & (0, 59, 1, 35) & (1, 1) \end{pmatrix}$$

对此区间判断矩阵进行一致性逼近, 可得

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1.94 & 2.19 \\ 0.51 & 1 & 1.08 \\ 0.46 & 0.89 & 1 \end{pmatrix}$$

计算其权重为 $w = (0.51, 0.26, 0.23)$, 与 M 的极差矩阵

$$\Delta M = \begin{pmatrix} 0 & 0.6 & 0.65 \\ 0.17 & 0 & 0.34 \\ 0.09 & 0.3 & 0 \end{pmatrix}, \Delta_2 M = \begin{pmatrix} 0 & 0.98 & 1.35 \\ 0.43 & 0 & 0.6 \\ 0.2 & 0.46 & 0 \end{pmatrix}$$

利用误差传递公式可以求得

$$\Delta_1 \omega = (0.0024, 0.0021, 0.0016), \Delta_2 \omega = (0.0149, 0.0054, 0.0066)$$

所以综合评价的三个指标的权重区间分别为

$$A_1 = [0.5076, 0.5249], A_2 = [0.2579, 0.2654], A_3 = [0.2284, 0.2366]$$

由此可得, 伤亡人数、经济损失和震后恢复时间三大指标在城市防震减灾能力评估体系中的权重分别为 $A = [0.51, 0.26, 0.23]$

在为城市防震减灾能力评估体系的各级指标建立判断矩阵(采用常规 AHP、不确定性 AHP 和信息不全 AHP 相结合的方式)后, 通过计算可得各项评价指标的相对权重. 表 1 为在现有问卷调查基础上第二指标层(即城市防震减灾能力中的六大体系)相对于准则层(即伤亡人数、经济损失和震后恢复时间三大指标)的相对权重成果示意.

2.3 城市防震减灾能力评价体系

通过咨询各个领域的多位专家, 并以现有的回收问卷为依据, 计算得到了城市防震减灾能力评估体系中各个基础指标的权重值, 形成了比较完善的城市防震减灾能力评估体系.

表 1 评估体系中六大因素的权重
Table 1 Weights of six factors in assessment system

指标层	人员伤亡	经济损失	震后恢复时间
地震危险性分析能力	0.13	0.12	0.08
地震监测和预报能力	0.16	0.13	0.07
工程抗震防御能力	0.27	0.31	0.20
政治经济社会人文等因素影响能力	0.09	0.13	0.14
城市灾害管理能力	0.16	0.16	0.20
应急救援和震后恢复能力	0.19	0.15	0.31

3 结论

最终结果表明,应用改进后的层次分析法计算城市防震减灾能力评估体系中的指标权重具有较高的可行性和可信度,但是,由于系统本身的复杂程度和在进行专家咨询过程中遇到的一些问题,此方法还应该进一步完善和改进。

采用层次分析法(AHP)能够合理确定各项指标的相对权重和组合权重。特殊AHP和组合型AHP的分析方法可以使专家根据不同情况(信息不全、人们主观判断的模糊性等)确定指标的权重,扩大了层次分析法的范围。将这些方法用于城市防震减灾能力评估,能够较为全面的考虑影响城市防震减灾能力的因素,反映城市防震减灾能力的综合情况,建立恰当的城市防震减灾能力评估体系,有利于提高城市防震减灾能力工作的定量化、科学化。

参考文献:

- [1] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [2] 张风华. 城市防震减灾能力评估研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2002.
- [3] 张风华. 城市防震减灾能力指标权数确定研究 [J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 23-29.
- [4] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [5] 刘家学. 定量型多指标决策的层次分析法探讨 [J]. 运筹与管理, 1996, 5(3): 10-15.
- [6] 介玉新, 胡韬, 李青云, 李广信. 层次分析法在长江堤防安全评价系统中的应用 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1634-1637.
- [7] 许树柏. 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [8] 胡韬. 长江堤防工程安全分析及安全评价系统的开发 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [9] 许先云, 杨永清. 不确定型 AHP 判断矩阵的一致性逼近与排序方法 [J]. 系统工程理论与实践, 1998 (2): 19-22.