学 术 论 文

基于 Vague 集的系统安全综合评价

刘爱华[1]，施式亮[1]，吴　超[2]
（1. 湖南科技大学能源与安全工程学院，湖南湘潭　411201；
2. 中南大学能源与安全工程学院，长沙　410083）

［摘要］　系统安全中存在含糊性和不可分辨性，Fuzzy 综合评价只能从正面解决含糊性问题，而 Vague 集具有对不确定数据更强、更灵活的直觉表达能力，由此提出把 Vague 集运用到综合评价当中，并使用改进层次分析法确定各评价指标的权重，建立了基于 Vague 集的系统安全综合评价模型。通过对陕西某高层建筑火灾危险评价实例证明，该模型能使系统安全评价结果更准确、合理。

［关键词］　系统安全；Vague 集；综合评价；权重
［中图分类号］ X913　　［文献标识码］ A　　［文章编号］ 1009－1742（2007）03－0058－04

1　引言

系统安全是相对的，具有亦此亦彼的过渡性质，它是一个模糊概念，适合采用模糊数学方法进行评价[1]。Fuzzy 综合评判是目前应用最为广泛的模糊评价方法，但在系统安全评估中存在含糊性和不可分辨性，Fuzzy 综合评价只提供了一个从正面解决含糊性问题的方法，它忽略了侧面影响的作用。Gau 和 Buehrer[2] 提出的 Vague 集是 Fuzzy 集的一种推广形式。目前 Vague 集已成功地运用于模糊控制、决策分析及专家系统等领域，并取得了较传统模糊集理论更好的效果[3,4]。尽管 Bustine 和 Burillo[5] 指出 Vague 集等同于 Atanassov 提出的直觉模糊集，但两者的含义是不同的，元素在 Vague 集中的隶属度由支持与反对两方面的隶属度的下界所界定，定义本身呈动态趋势，所以 Vague 集表达不确定数据的能力较直觉，较模糊集更强、更灵活。考虑到 Vague 集的这些优势，根据 Fuzzy 综合评判模型，建立基于 Vague 集的综合评判模型。

2　评价指标权重的确定

评价指标体系是进行系统安全评价的基础。在评价指标体系中，科学、合理地确定属性权重，关系到决策结果的可靠性和正确性。在当前权重确定方法中，层次分析法（AHP）是用得较多的一种，能把复杂系统的决策问题进行层次化分解，通过判断矩阵的建立、排序计算和一致性检验得到的最后结果具有说服力[6,7]。但是这种方法对专家评分的要求较高，同时收敛较缓慢，迭代次数较多，计算量大，且易产生循环。然而，通过引入诱导矩阵而建立的一种改进层次分析法能很好地解决这些问题，简单有效，符合实际[8]。

2.1　基于诱导矩阵的改进层次分析法原理

定义矩阵 $\boldsymbol{C}=(c_{ij})_{n\times n}$ 为判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的诱导矩阵，其中 $c_{ij}=b_{ij}/w_i$，$i,j\in\Omega$

$$b_{ij}=a_{ij}\Big/\sum_{i=1}^{n}a_{ij},\ i,j\in\Omega \tag{1}$$

w_i 为指标 i 相对于上一个准则层的相对权重向量。

［收稿日期］　2005－10－00；修回日期　2006－01－19
［基金项目］　国家自然科学基金资助项目（50274060）
［作者简介］　刘爱华（1976－），女，湖南衡阳县人，硕士，湖南科技大学讲师，主要从事故预防和控制理论、安全评价等方面的研究工作。

判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为完全一致性矩阵的充要条件是矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中元素全部为 1，即

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

若 $\boldsymbol{C}$ 中存在某个元素 $c_{ij}\neq 1$，则说明判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是不完全一致性矩阵，且 c_{ij} 偏离 1 越大，说明 a_{ij} 对 $\boldsymbol{A}$ 的不一致性的影响越大。当 $c_{ij}>1$ 时，a_{ij} 偏大，应适当减小，当 $c_{ij}<1$ 时，a_{ij} 偏小，应适当增大。由于专家的判断一般不会出现很大的失误，因此对影响判断矩阵一致性的元素可进行适当微调，通过某些元素（或其分母）增加 1 或减小 1 的方法使判断矩阵逐步达到满意的一致性。

2.2　判断矩阵的一致性调整步骤

改进判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的一致性方法如下：

Step 1　计算 $\boldsymbol{A}$ 各归一化向量 β_j，$j\in\Omega$ 及“和积法”求得排序向量 $\boldsymbol{W}$；

Step 2　求出诱导矩阵 $\boldsymbol{C}=(c_{ij})_{n\times n}$；

Step 3　找出 $|c_{ij}-1|$（$\forall\ i,j\in\Omega$）达到最大值的 i，j，记为 k，l；

Step 4　若 $c_{ij}>1$，且 a_{kl} 为整数，令 $a'_{kl}=a_{kl}-1$，否则令 $a_{kl}=1/(1/a_{kl}+1)$；若 $c_{kl}<1$，且 a_{kl} 为整数，令 $a'_{kl}=a_{kl}+1$，否则令

$$a'_{kl}=1/(1/a_{kl}+1) \tag{2}$$

Step 5　令

$$a'_{kl}=1/a'_{kl},\ a'_{kl}=a_{kl},$$
$$i,j\in\Omega\text{ 且 }i,j\neq k,l \tag{3}$$

Step 6　若 $\boldsymbol{A}'=(a'_{ij})$ 具有满意的一致性，则停止，$\boldsymbol{A}'$ 为求得的具有满意一致的判断矩阵，否则，用 $\boldsymbol{A}'$ 代替 $\boldsymbol{A}$ 转 Step 1。

3　基于 Vague 集综合评价模型的建立

3.1　Vague 集[9]

令 U 是一个点的空间，其中的任意一个元素用 u 表示，U 中的一个 Vague 集 A 用一个真隶属函数 t_A 和一个假隶属函数 f_A 表示，$t_A(u)$ 是从支持 u 的证据所导出的 u 的隶属度下界，$f_A(u)$ 则是从反对 u 的证据所导出的 u 的否定隶属度下界，$t_A(u)$ 和 $f_A(u)$ 将区间[0，1] 中的一个实数与 U 中的每一个点联系起来，即 $t_A: U\rightarrow[0,1]$，$f_A: U\rightarrow[0,1]$。

当 U 是连续时，Vague 集 A 可表示为

$$A=\int_U[t_A(u),1-f_A(u)]/u\quad(u\in U) \tag{4}$$

当 U 为离散时，Vague 集 A 可表示为

$$A=\sum_{i=1}^{n}[t_A(u),1-f_A(u)]/u_i\quad(u_i\in U) \tag{5}$$

式中 $t_A(u)+f_A(u)\leqslant 1$。

事实上，$t_A(u)$ 和 $f_A(u)$ 是模糊集论中的隶属函数，而 Vague 集是一种特殊的区间值模糊集[10]。

3.2　基于 Vague 集综合评价模型的建立

3.2.1　评价因素和抉择评语集的确定　设第一层次评价指标分别用 u_1，u_2，…，u_m 表示，构成第一层次评价因素集合为

$$\boldsymbol{U}=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}。$$

设第二层次评价指标分别用 $u_{ij}=(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$ 表示，则将因素集 $\boldsymbol{U}$ 中的每一个因素 u_i 按其属性划分为若干个子因素集

$$\boldsymbol{u}_i=\{u_{i1},u_{i2},\cdots,u_{ij}\cdots,u_{im}\},$$
$$i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n。$$

对于以后各级则逐级划分下去。

设抉择评语集合为

$$V=\{v_1,v_2,\cdots,v_p\}。$$

在系统安全评价中，抉择评语集一般为 $V=$ {安全，比较安全，一般安全，比较危险，危险}。

3.2.2　构造评价矩阵　设评价因素集中 $\boldsymbol{u}_i$ 的因素 $u_{ij}=(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$ 的抉择等级为 $v_k(k=1,2,\cdots,p)$，那么对其构造因素集 U 和评价集 V 之间的关系矩阵为

$$\boldsymbol{R}_i=\begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \cdots & r_{inp} \end{bmatrix} \tag{6}$$

其中 r_{ijk} 表示因素 u_{ij} 关于评价集的评价，

$$r_{ijk}=[t_{Rijk},1-f_{Rijk}]。$$

组织 n 个专家针对某一指标按照评语集给予选择性回答，也允许放弃选择。对各专家的回答进行归一化处理即可得到 t_{Rijk} 和 $1-f_{Rijk}$ 的值。

3.2.3　确定评价因素的权重　在评价因素 $u_{ij}(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$ 中，各因素在总评价中的影响程度各不相同。因此，必须赋予评价因素集中各因素以不同的权值，而权值的大小按前面所讨论的改进层次分析法得出。

3.2.4　基于 Vague 集的综合评判　当确定因素集 $\boldsymbol{u}_i$ 各指标的权重向量集 $\boldsymbol{A}_i$ 和因素 $\boldsymbol{u}_i$ 的总模糊评价矩阵 $\boldsymbol{R}_i$ 后，对各因素集 $\boldsymbol{u}_i=\{u_{i1},u_{i2},\cdots,u_{in}\}$ 的

n 个因素做基于 Vague 集综合评判，其结果为

$$\boldsymbol{B}_i = \boldsymbol{A}_i \circ \boldsymbol{R}_i \tag{7}$$

式中“∘”为 Vague 集运算的符号，$\boldsymbol{A}_i$ 为普通模糊集，其中主要运算有：

1）数乘运算

$$k \cdot \bar{A} = [k \cdot t_A, k \cdot (1 - f_A]k, k \in [0, 1] \tag{8}$$

2）有限和运算

$$\bar{A} \oplus \bar{B} = [t_A \oplus t_B, (1 - f_A) \oplus (1 - f_B)] = [\min\{1, t_A + t_B\}, \min\{1, (1 - f_A) + (1 - f_B)\}] \tag{9}$$

$$b_{ik} = [\min\{1, \sum_{j=1}^{n} a_{ij} t_{R_{ijk}}\}, \min\{1, \sum_{j=1}^{n} a_{ij}(1 - f_{R_{ijk}}\}] \tag{10}$$

$\boldsymbol{B}_i$ 称为抉择评语集 V 上的等级 Vague 集子集，$b_{ik}(k = 1, 2, \cdots, p)$ 为等级 v_k 对综合评判所得等级 Vague 集 $\boldsymbol{B}_i$ 的评价区间值。

设 $\boldsymbol{U} = \{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$ 的因素权重向量集为 $\boldsymbol{A}$，且 $\boldsymbol{A} = \{A_1, A_2, \cdots, A_m\}$，则 U 总的 Vague 集评价矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A} \circ \boldsymbol{B}_i \tag{11}$$

同样，如果因素集 $\boldsymbol{A}$ 的元素非常多时，可对它作多级划分，并进行更高层次的综合评判。

3.2.5 计算最后的评判结果 在分级的评判问题中，设最终得到的评价向量为 $\boldsymbol{B} = (b_1, b_2, \cdots, b_m)$，其中为 $b_i = [t_{B_i}, 1 - f_{B_i}]$ 了对评判结果进行集化，首先给出一种区间数的排序方法，以此可以对多个评价对象做出最后的评判[11]。

设 $\bar{a} = [a^-, a^+]$，$\bar{b} = [b^-, b^+]$，若 $(a^- + a^+)/2 \leqslant (b^- + b^+)/2$，则 $\bar{a} \leqslant \bar{b}$。

按照以上排序方法和最大隶属原则，可以评判出被评对象在评价集 $\boldsymbol{V}$ 中的所属类别。同样可以类似于 Fuzzy 综合评判问题的进行处理，即对 V_i 分别赋值 δ_i，按从高级到低级 δ_i 逐渐减小的规律，得 $\Delta = (\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_m)$，再计算 $\Gamma = \Delta \circ \boldsymbol{B}$，得最终评判指标 Γ，用于判断评价对象的安全等级。

4 应用实例

在对许多建筑火灾事故原因调查的基础上，并参照《高层建筑防火设计规范》，建立了高层建筑火灾危险评价指标体系[12, 13]，应用改进层次分析法，确定了各指标的权重。以西安某高层建筑为具体实例进行评价，高层建筑火灾危险评价指标体系和权重分配如表 1 所示。

表 1 高层建筑火灾危险评价指标及权重分配

Table 1 The index system and weights of high－rise building fire hazard assessment

目标层	准则层/权重	子准则层/权重	评价指标/权重
高层建筑火灾危险状况	建筑防火能力/0.39	总图布置/0.04	防火间距/0.33；周边环境危险性/0.67；
		耐火等级/0.06	建筑结构的耐火等级/0.50；装修材料的耐火等级及发烟性/0.50
		电气防火/0.52	电气设备的防火状况/0.23；变/配电设/0.12；电线/电缆的耐火等级/0.65
		火灾荷载/0.12	火灾荷载密度/0.75；火灾荷载分布/0.25
		防火分区/0.26	水平防火分区/0.17；竖向防火分区/0.83
	灭火能力/0.08	防排烟能力/0.43	防排烟设施的完好程度/0.25；防排烟系统设计的合理性/0.75
		消防队灭火能力/0.43	消防队员的业务水平/0.19；消防设施的先进性/0.07；消防车道/0.37；消防电梯/0.37
		建筑自身灭火设施/0.14	火灾自动报警系统/0.43；自动喷淋系统/0.23；消防栓系统/0.08；
			其他灭火系统/0.04；消防水源/0.23
	安全疏散能力/0.14	疏散通道/0.5	安全疏散线路/0.09；安全疏散距离/0.08；安全出口数量/0.63；安全出口宽度/0.20
		疏散设施/0.5	安全疏散指示标志/0.18；疏散楼梯/0.42；应急照明/0.18；
			火警广播引导系统/0.06；其他疏散设施/0.04；避难层和救生避难设施/0.23
	安全管理能力/0.39	安全制度落实情况/0.67	定期检修情况/0.30；专职值班情况/0.60；防火教育情况/0.10
		管理人员业务水平 0.22	对消防消防设施的熟练程度/0.43；消防知识与技能/0.43；组织能力/0.14
		建筑物内其他人员/0.11	人员密度/0.11；安全意识水平/0.22；防火训练情况/0.67

在对该建筑进行调查的基础上，组织相关的安全和建筑方面的专家进行了各指标的问卷调查，得到了相应的评价矩阵，用所建立的评价模型对某大厦进行评价，对安全等级论域 $V = \{$安全，比较安全，一般安全，比较危险，危险$\}$ 分别进行赋值，得到 $\Delta = (90\ 80\ 70\ 60\ 50)$，最终的结果为 $\Gamma = [72.3\ 76.7]$。可确定该大厦的火灾危险等级为Ⅲ级，安全性能一般。这个结果是比较符合客观实际

的，根据调查，该大楼自 1994 年建成使用的 10 年中发生过 13 次火灾事故，幸好建筑物内的灭火系统反应及时，均没有造成大的损失。这说明该系统的管理和防火能力还存在一定问题，有待改进。

5　结论

针对传统 Fuzzy 综合评判模型的缺点，把 Vague 集运用到综合评价当中，建立了基于 Vague 集的综合评价模型。主要结论如下：

1）Vague 集能从含糊性和不可分辨性两个侧面考虑系统安全问题，符合系统安全本身的规律，因而所建立基于 Vague 集的综合评判模型，更符合实际，而且评价结果更加科学、准确。

2）用改进层次分析法确定各评价指标的权重能解决传统层次分析法收敛缓慢、迭代次数较多、计算量大、易产生循环等问题；

3）对某大厦的实例评估表明：该方法可操作性强、效果较好，能在一般的系统评价中推广使用，为日常的安全管理和系统事故控制提供依据。

参考文献

[1]　许开立. 基于模糊熵的安全等级隶属度向量的离散方法 [J]. 中国有色金属学报，2000，(4)：599～603

[2]　Gau W L，Buehrer D J. Vague sets [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern，1993，23(2)：610～614

[3]　李　凡，徐章艳. Vague 集之间的相似度量 [J]. 软件学报，2001，12(6)：922～927

[4]　Li D，Cheng C. New similarity measures of intuitionistic fuzzy sets and application to pattern recognition [J]. Pattern Recognition Letters，2002，23：221～225

[5]　Bustine H，Burillo P. Vague sets are intuitionistic fuzzy sets [J]. Fuzzy Sets and Systems，1996，79：403～405

[6]　黄　海，孙国正，胡文斌. 港口机械结构安全性评价指标体系中权重自学习方法的研究 [J]. 武汉理工大学学报，2005，(2)：30～34

[7]　常志雁，萨殊利，范鹏飞. 层次分析法在 GIS 事故救援系统中的应用 [J]. 武汉理工大学学报，2004，(2)：255～257

[8]　李梅霞. APH 中判断矩阵一致性改进的一种新方法 [J]. 系统工程理论与实践，2000，(2)：121～125

[9]　符海东，卢正鼎. 基于 Vague 集距离的多评价指标模糊决策方法 [J]. 华中科技大学学报（自然科学版），2003，31(8)：77～79

[10]　曾文艺，罗承忠. 区间数的综合决策模型 [J]. 系统工程理论与实践，1997，15(11)：48～50

[11]　张晓平. 基于 Vague 集的模糊综合评判模型 [J]. 山东建筑工程学院学报，2004，19(3)：77～80

[12]　李志宪. 建筑火灾风险评价技术初探 [J]. 中国安全科学学报，2002，(2)：30～34

[13]　韩　新. 建筑火灾危险性评估性能方法基本框架研究 [J]. 自然灾害学报，2001，(2)：50～56

The Synthetic Assessment for Systematic Safety Based on Vague Sets

Liu Aihua[1]，Shi Shiliang[1]，Wuchao[2]

(1. *School of Resource and Safe Engineering*，*Hunan University of Science and Technology*，*Xiangtan*，*Hunan*　411201，*China*；2. *School of Resource and Safe Engineering*，*Central South University*，*Changsha*　410083，*China*)

[**Abstract**]　There are two different sides of ambiguousness and in distinguishability among systematic safety. Fuzzy synthetic assessment can only solve ambiguousness problem from front，but Vague sets have fairly strong and flexible intuition expression ability for handling indefinite data. From this，this paper suggests that Vague sets be used in the synthetic assessment，then determines the weight of each assessment index with improved AHP，and establishes the synthetic assessment model for systematic safety based on Vague sets. Through the assessment for a certain high building fire hazard in Shanxi Province，it proves that this model can make the assessment result of systematic safety more accurate and reasonable.

[**Key words**]　systematic safety；Vague sets；synthetic assessment；the weight