

# 模糊粗糙集测度的分析分层建模及应急演练控制应用

易涛, 耿志强, 徐圆, 朱群雄<sup>†</sup>

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

**摘要:** 针对应急救援演练控制的复杂性和难以量化问题, 为实现多人参演系统的有效控制, 基于分析分层过程法 (analytic hierarchy process, AHP), 建立一种模糊粗糙集知识测度的综合建模方法. 首先, 分析模糊粗糙集各类知识测度相关概念、相互联系和各自特点, 通过 AHP 方法, 建立模糊规则的分层度量模型并给出了对比矩阵的构造示例, 对模糊规则进行更加精细的度量. 其次, 在分析应急演练知识构成的基础上, 提出预案知识提取和模糊关系粗糙集的构建方法; 设计了演练过程控制流程和基于本文知识综合测度方法形成的核心控制流程; 通过对规则重要性排序, 提高规则判别精度, 提供规则选择的手段和一种规则冲突消解方法. 最终, 通过一个简单案例, 验证了本文所提的研究工作的可行性.

**关键词:** 模糊粗糙集; 分析分层过程法(AHP); 模糊熵; 模糊匹配; 模糊重要度; 应急演练控制

**中图分类号:** TP173      **文献标识码:** A

## Modeling of measures with analytic hierarchy process for fuzzy rough set and its application to emergency drill control

YI Tao, GENG Zhi-qiang, XU Yuan, ZHU Qun-xiong<sup>†</sup>

(College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A comprehensive measure method for knowledge is proposed based on the analytic hierarchy process (AHP) to tackle the complexity and difficulty in realizing the emergency drill control and finally achieving the effective control for the system which many people participate in. Based on the analysis of features and relationship between measures of fuzzy rough sets, the AHP is employed to build the hierarchy model of fuzzy rules; and a comparison matrix is constructed as an example to illustrate the improvement of measure precision of fuzzy rules. After that, the control process is designed, and the core control algorithm is developed based on the comprehensive measures. Relevant control rules are concluded from the values of measures; and the algorithm for choosing rules from the rule base is proposed. Finally, an emergency drill case in virtual reality validates the practicability of the presented research work.

**Key words:** fuzzy rough set; analytic hierarchy process (AHP); fuzzy entropy; fuzzy matching; fuzzy importance; emergency drill control

### 1 引言(Introduction)

石化过程应急演练是为检验应急计划是否有效、应急响应能力和应急人员的协同性而进行的一种模拟应急响应的实践行为. 传统的应急演练大体分为: 讨论型演练和实操型演练, 前者侧重战略和策略, 后者侧重应急响应和战术. 近年来, 计算机仿真模拟辅助应急演练已经成为新型的实操型演练形式<sup>[1]</sup>. 虚拟现实地理信息系统(virtual reality geography information system, VRGIS)是地理信息系统与虚拟现实技术相结合的产物, 是目前地理信息系统和虚拟现实技术研究的热点和前沿方向之一<sup>[2]</sup>. 运用VRGIS和计算机网络技术构建三维虚拟演练环境、多客户端参演的形

式是目前世界上最高端的计算机辅助演练方式. 其特点是用三维方法构建的虚拟演练空间非常接近真实的演练环境、多人多客户端参演保证了人的主观因素的加入、最大限度地接近实战演练且节约大量的人力物力成本. 但无论是计算机辅助VRGIS演练形式还是实战演练, 都需要对演练进行很好的控制, 才能最终达到所想要的效果. 目前, 还较少见到对演练的进程控制方面的研究成果. 其原因在于应急演练是一个非工程系统, 对于演练过程的控制比较复杂且难于量化, 而且参与演练的人员素质参差不齐, 因此很难用某种数学模型进行精确表达<sup>[3]</sup>. 在实际演练过程中, 通过统计和记录, 会产生大量的演练过程知识, 其中一些

是与演练相关,但一些知识则是无效且冗余的<sup>[4]</sup>.为了能够对应急演练进行有效的控制,提高演练的质量和效果,需要通过科学的方法来对演练所产生的实时数据进行归纳、整理、总结;与应急预案的专家知识进行实时比对,量化其中的差异和偏离所在并加以控制;在第1时间内通知相关演练人员以保证整个演练的进程有序而正确.

**1.1 模糊关系粗糙集的各类测度(Measures for fuzzy relations rough set)**

粗糙集(rough set)理论是由波兰科学家Pawlak首先提出的用于处理不确定和不完整知识的数学工具.经过多年发展,已在知识与规则发现、模式识别、故障检测和人工智能等方面取得大量应用.很多学者也同时研究了粗糙集和模糊集之间的关系,扩展了模糊粗糙集理论<sup>[5]</sup>.模糊粗糙集常用的测度方法有距离测度(差值测度)、相似测度、匹配测度等<sup>[6]</sup>.应急演练的实际工作中经常会比较两个知识集,构建模糊二元关系集合,并可通过基于模糊粗糙集构造出多种测度方法对模糊二元关系的各个侧面特性进行量化.运用信息熵等方法结合模糊粗糙集建立各种知识测度方法对应急演练的量化控制规则意义重大.

1) 模糊熵是借用了香农定义的信息熵概念,用以描述一个模糊集的整体模糊度.按照Deluca-Termini信息熵构造,设 $x$ 为模糊集中的元素,集合的模糊熵为<sup>[7]</sup>

$$H(A) = H(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) = -\frac{1}{n} \left[ \sum_{x \in X} \mu_A(x) \log \mu_A(x) + \sum_{x \in X} (1 - \mu_A(x)) \log(1 - \mu_A(x)) \right]. \quad (1)$$

2) 模糊关系集的平均隶属度.

设信息系统 $(U, V, R)$ 的粗糙模糊关系集

$$\mathcal{F}(X, Y) = ((x, y), \mu_{\mathcal{F}}(x, y)), (x, y) \in U \times V,$$

令 $\alpha_{i,j} = (x_i, y_j)$ 为模糊关系隶属度集合,则称 $X$ 对 $Y$ 的平均隶属度定义如下:

$$AVG(X \times Y) = \frac{1}{(i+j)} \sum_{k=1}^{(i+j)} \alpha_{i,j}. \quad (2)$$

3) 基于模糊熵的模糊关系粗糙集匹配度.

在模糊信息系统 $(U, V, R)$ 中, $R$ 是论域 $X \times Y$ 上的模糊相似关系, $F$ 是一个模糊集,设

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\},$$

$$\underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F}) = \{\mu_{\underline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_1), \mu_{\underline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_2), \dots, \mu_{\underline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_n)\},$$

$$\overline{\text{apr}}_R(\mathcal{F}) = \{\mu_{\overline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_1), \mu_{\overline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_2), \dots, \mu_{\overline{\text{apr}}_R \mathcal{F}}(x_n)\}.$$

A) 基于模糊熵下匹配度:

1) 设 $x_i \in \underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F})$ ,记 $\tau_{x_i}^Y = H(R\{x_i\})/H(Y)$ ,则称 $\tau_{x_i}^Y$ 为 $x_i$ 关于 $Y$ 的 $R$ 模糊熵下匹配度.

2) 设 $X \subseteq \underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F})$ ,记

$$\tau_X^Y = H(\bigcup_{x_i \in X} R\{x_i\})/H(Y), \quad (3)$$

式中 $H(*)$ 表示模糊集合的熵.

B) 基于模糊熵上匹配度:

1) 设 $X = \overline{\text{apr}}_R(\mathcal{F}) - \underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F})$ ,记

$$A = \min[Y, R\{x\}]$$

为模糊集 $Y$ 和 $R\{x\}$ 的交集, $\varphi_x^Y = H(A)/H(Y)$ .若 $\forall x \in X$ ,则称 $\varphi_x^Y$ 为 $x$ 关于 $Y$ 的 $R$ 模糊熵上匹配度.

2) 设 $X' \subseteq X$ ,记

$$A' = \min[Y, \bigcup_{x \in X'} R\{x_i\}] \quad (4)$$

为模糊集 $Y$ 和 $\bigcup_{x \in X'} R\{x_i\}$ 的交集, $\varphi_{X'}^Y = H(A')/H(Y)$ .

C) 模糊粗糙集的上、下匹配度混合熵:

在模糊信息系统 $(U, V, R)$ 中, $R$ 是论域 $X \times Y$ 上的模糊相似关系, $F$ 是一个模糊集,设 $Y = y_1, y_2, \dots, y_k, x_i \in \underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F})$ 的下匹配度为 $\tau_{x_i}^Y, x'_i \in \overline{\text{apr}}_R(\mathcal{F}) - \underline{\text{apr}}_R(\mathcal{F})$ 的上匹配度为 $\varphi_{x'_i}^Y$ ,根据信息熵的通用定义方法,定义模糊粗糙集的混合匹配熵如下:

$$\Gamma(F) = - \sum_{i=1}^{2k} (\tau_{x_i}^Y \times \log \tau_{x_i}^Y + \varphi_{x'_i}^Y \times \log \varphi_{x'_i}^Y). \quad (5)$$

4) 模糊关系集中元素重要度的模糊熵测度.

根据模糊熵的定义,模糊熵具有单调变化的性质,所以构造出的模糊熵函数存在函数上的偏序关系.这样笔者用模糊熵函数 $H(*)$ 来替代 $\Theta(*)$ ,可以用以对元素的重要性进行测度:

$$SGF\_S_{X \times Y - \{\alpha\}}(\alpha) = H(X \times Y - \{\alpha\}) - H(X \times Y). \quad (6)$$

**1.2 各类测度特点及相互关系(Features and relationship of measures)**

模糊熵描述了集合的模糊程度,其优势在于能用一个阈值测量模糊关系的清晰度.模糊关系也是一种模糊集,所以如果把模糊熵的概念推广到模糊关系中,则称为模糊关系熵,反映了关系的区分能力.信息系统 $(U, V, R)$ 的模糊关系熵越接近 $-\log(0.5)$ ,表明信息系统的中的两个集合的关系越模糊,越不容易区分;当模糊关系熵越接近0,表明论域中的两个集合之间的关系越清晰.因此对于一个模糊集而言,其内部关系是否清晰,用模糊熵来描述是很适合的.然而它的缺陷也很明显:当模糊熵最小的时候,虽然可以断定该模糊集趋于清晰,却无法判断两个集合的相关程度,还需要计算相关隶属度才能对模糊关系集进行进一

步的测量.

平均隶属度值能代表集合总体模糊关系的平均值. 通过平均隶属度, 可以大体测量模糊集合之间的总体相关程度, 但对于方差很大的隶属度函数集合的测量则不是很准确. 例如: 假设模糊集合  $X = (0.01, 0.01, 0.01, 0.99)$ , 其平均隶属度为  $((3 \times 0.01) + 0.99)/4 = 0.255$ . 而集合  $Y = (0.255, 0.255, 0.255, 0.255)$ , 其平均隶属度亦然为 0.255. 但是很明显由于  $X$  中大部分元素的隶属度非常低, 只有偶尔的元素隶属度超高.  $X$  的总体模糊关联程度就应该比  $Y$  低. 所以平均隶属度方法相对还是很粗的测度, 还无法真正做到对知识相关性的有效区分. 例如: 假定基于平均隶属度的模糊熵联合测度判别规则如下:

If 模糊熵接近 0, and 平均隶属度接近 1, then 判定模糊关系很清晰, and 两个集合相关性很大.

If 模糊熵接近 0, and 平均隶属度接近 0, then 判定模糊关系很清晰, and 两个集合相关性很小.

If 模糊熵接近 0, and 平均隶属度在  $(0, 0.5)$ , then 判定模糊关系很清晰, and 两个集合相关性较小.

If 模糊熵接近 0, and 平均隶属度在  $(0.5, 1)$ , then 判定模糊关系很清晰, and 两个集合相关性较大.

If 模糊熵接近  $-\log(0.5)$ , then 判定模糊关系很模糊, 两个集合相关性暂时无法判定.

因此, 从判别规则来看, 仅靠模糊熵和平均隶属度, 只能解决有限的部分问题. 有些知识集之间的模糊关联程度依然无法准确判断. 需要引入更多的测度方法并加以结合才能有效.

模糊关系匹配度主要定义模糊粗糙集元素与集合之间以及集合与集合之间的知识匹配度. 若模糊关系  $F$  的模糊熵上匹配度和模糊熵下匹配度均为 1, 则称模糊关系  $F$  与  $R$  是最佳匹配关系. 由于模糊熵描述的是模糊集合内部模糊度的大小, 因此可以认为基于模糊熵的匹配能对模糊粗糙集的模糊关系的模糊度进行有效测度. 匹配度越高, 则表示模糊粗糙集与论域上的模糊关系越接近. 模糊粗糙集的上、下匹配度混合熵(以下简称混合熵)通过对模糊粗糙集的上下逼近中元素的匹配程度的熵计算, 定量描述了粗糙集中知识对于论域中的知识的综合匹配的程度. 信息系统中的各元素对于系统某方面测度所承担的重要性是不同的. 因此在实际工作中, 常需要对模糊关系集合中的某些元素的重要性进行更加精细的测度.

通过以上分析可知, 对于模糊粗糙集的各类测度, 仅从不同的侧面描述了粗糙集的特性: 模糊熵描述了粗糙集本身的模糊程度、隶属度函数描述元素与元素或集合与集合之间的关系紧密度、元素与集合以及集合与集合之间的匹配度描述了模糊粗糙集与标准集合之间不同层面的符合度、元素的重要性测度则刻画

了该元素在集合中的重要性. 这些测度可以被用来对应急演练的知识集进行度量并形成规则, 但是需要寻求一种方法综合这些测度值才能有效地运用于演练进程的控制.

## 2 基于模糊粗糙集测度的演练评价AHP综合模型 (Comprehensive model of AHP for fuzzy rough set measures)

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)方法是一种层次权重决策分析方法. 它利用较少的定量信息使决策思维过程得到量化, 从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策提供简便的决策<sup>[8]</sup>. 国内外已经有研究人员使用AHP分析方法对应急演练进行综合评估<sup>[9]</sup>. 但是, 还较少看到使用该方法对应急演练过程进行控制的研究论文. 为了解决模糊粗糙集各种测度只能解决单一问题的缺陷, 可基于应急预案与演练操作的知识比对, 构造出的综合模糊评测规则, 运用AHP法结合模糊粗糙集测度对构造的模糊规则进行权重分配.

面对纷繁的测度值, 需要首先解决关联规则的综合测度问题. 对基于模糊粗糙集的各类测度的多输入多输出系统(MIMO)模糊推理, 一般的规则描述是<sup>[10]</sup>:

$$R = \{R_{\text{MIMO}}^1, R_{\text{MIMO}}^2, \dots, R_{\text{MIMO}}^n\},$$

其中:  $R_{\text{MIMO}}^j$ : If ( $x$  是  $A_i \dots$ , and  $y$  是  $B_i$ ), then ( $z_1$  是  $C_i \dots$ , and  $z_q$  是  $D_i$ ),  $x$  是  $A_i$  表示  $x$  对于模糊关系集合  $A_i$  的隶属度, 记为  $\mu_{A_i}(x)$ . 通过类似于这样的模糊规则, 只要输入  $\mu_{A_i}(x), \dots, \mu_{B_i}(y)$ , 可以模糊计算推导出  $\mu_{C_i}(z), \dots, \mu_{D_i}(z)$  (方法很多, 不逐一描述). 类似这样的专家规则形成一系列规则库, 以双输入单输出模糊系统来看:

输入:  $x$  是  $A' \dots$ , and  $y$  是  $B'$

$R_1$ : If ( $x$  是  $A_1 \dots$ , and  $y$  是  $B_1$ ), then ( $z$  是  $C_1$ )

also  $R_2$ : If ( $x$  是  $A_2 \dots$ , and  $y$  是  $B_2$ ), then ( $z$  是  $C_2$ )

$\vdots$

also  $R_n$ : If ( $x$  是  $A_n \dots$ , and  $y$  是  $B_n$ ), then ( $z$  是  $C_n$ )

输出:  $z$  是  $C'$

在规则库里规则众多, 且有些规则可能会是通过专家系统自动生成的, 这就导致规则冗余而且规则间的关系往往不甚明晰. 进行模糊推理时, 需要从推理库中选择合适的规则进行匹配, 而规则的选取往往对于推理结果是否正确显得很重要. 为了实现对模糊规则的动态选择, 对规则进行重要性排序是一种有效手段.

从演练的复杂性可知, 要评判演练是否受控, 总体有 4 个层面的规则集合: 演练组织评价规则、演练总体行为评价规则、演练单体(参与者)行为评价规则、演练单体重要性评价规则. 其中前两个标准是对演练总

体的评价, 对于演练控制而言重要度最高; 后两个标准是针对对演练个体的控制, 重要度次之。

AHP方法根据问题的性质和要达到的总目标, 将问题分解为不同的组成因素, 按因素间的相互关联影响以及隶属关系将因素按不同层次聚类组合, 形成一个多层次的分析结构模型, 最终使问题归结为最底层(方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要性权重或优劣次序排定<sup>[11]</sup>。

首先, 根据以上描述, 构建模糊规则评判的层次模型如图1所示。

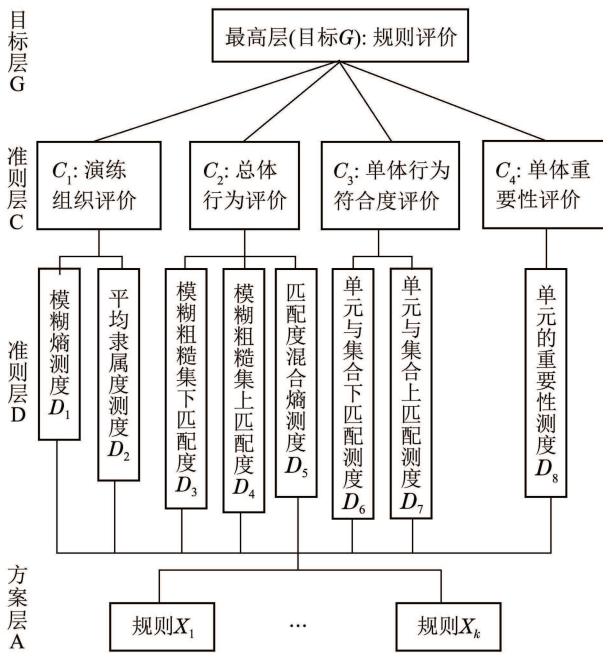


图 1 规则评价层次结构

Fig. 1 Construction of evaluation rules

模糊关系的测度可以总体归纳为集合测度和单元测度. 分别设,  $D_1$ 为模糊熵测度 $H(A)$ ,  $D_2$ 为平均隶属度测度 $AVG(X \times Y)$ ,  $D_3$ 为模糊粗糙集下匹配测度;  $\tau_X^Y$ ,  $D_4$ 为模糊粗糙集上匹配测度;  $\varphi_X^Y$ ,  $D_5$ 为匹配度混合熵测度 $\Gamma(F)$ ,  $D_6$ 为单元与集合之间的下匹配测度;  $\tau_{x_i}^Y$ ,  $D_7$ 为单元与集合之间的上匹配测度;  $\varphi_{x_i}^Y$ ,  $D_8$ 为单元的重要性测度;  $SGF_{S_{X \times Y} - \{\alpha\}}(\alpha)$ . 其中:  $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$ 属于总体评价的测度值,  $D_6, D_7, D_8$ 属于单体评价测度值. 评价的目标是, 通过各类测度对每一个模糊规则设定权重并进行排序。

其次, 构造模糊粗糙集各测度两两比较判别矩阵. 按照1~9比例标度的上述说明, 具体构造准则下的两两比较判断矩阵分别见表1-5(其中 $\omega_i$ 为通过判断矩阵计算出的本层元素对于上层的相对权重)。

再次, 经过计算得出单层测度比较矩阵一致性检验与排序见表6(注:  $C_1, C_3, C_4$ 不用判断)。

最后, 计算规则总排序. 经过计算得到准则层D(模糊粗糙集测度值)中的元素对于目标层G(规则评价)的总排

序权重. 经检验满足总体一致性标准见表7。

表 1 准则层C元素两两比较矩阵及权重

Table 1 Pairwise comparison matrix and weight of level C

G: 规则评价	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$\omega_i$
$C_1$	1	2	5	3	0.4723
$C_2$	1/2	1	4	2	0.2854
$C_3$	1/5	1/4	1	1/3	0.0727
$C_4$	1/3	1/2	3	1	0.1697

表 2 演练组织评价元素两两比较矩阵及权重  
Table 2 Pairwise comparison matrix and weight for drill organization

$C_1$ : 演练组织评价	$D_1$	$D_2$	$\omega_i$
$D_1$	1	1/3	0.25
$D_2$	3	1	0.75

表 3 总体行为评价元素两两比较矩阵及权重  
Table 3 Pairwise comparison matrix and weight for group operation

$C_2$ : 总体行为评价	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$\omega_i$
$D_3$	1	1	3	0.429
$D_4$	1	1	3	0.429
$D_5$	1/3	1/3	1	0.142

表 4 单体行为符合度评价元素两两比较矩阵及权重  
Table 4 Pairwise comparison matrix and weight for single operation

$C_3$ : 单体行为符合度评价	$D_6$	$D_7$	$\omega_i$
$D_6$	1	1/5	0.1667
$D_7$	5	1	0.8333

表 5 单体重要性评价元素两两比较矩阵及权重  
Table 5 Pairwise comparison matrix and weight for importance of person

$C_4$ : 单体重要度评价	$D_8$	$\omega_i$
$D_8$	1	1

表 6 单层比较矩阵一致性判断表  
Table 6 Homogeneity of comparison matrix in single level

判别矩阵	最大特征根 $\lambda_{max}$	一致性指标C.I	一致性比例C.R.
G	4.04747	0.01582	0.0176 < 0.1
$C_2$	5.1983	0.0496	0.04429 < 0.1

表7 D层次总排序( $CR = 0.0000$ )表  
Table 7 Final sequencing in D level ( $CR = 0.0000$ )

$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$D_8$
0.061	0.0324	0.0364	0.0364	0.1091	0.3945	0.0615	0.2727

### 3 综合测度在应急演练控制中的应用(Application of comprehensive measures for knowledge correlation to emergency drills control)

在一般的控制系统中,控制目标、决策和实施大多针对现实的物理系统而言,少有对社会系统的控制方法的研究<sup>[12]</sup>.应急救援系统针对的是灾害,付出的代价是人员和财产的损失,而把人员和灾害串联起来的则是救灾的应急预案.应急演练控制的对象是救援人员的行为:面对不同的灾害环境,能否在适当的时机,有适当的人员,对灾害做适当的处置则是应急过程中的控制关键所在.救灾的应急预案是行业安全专家的救援智慧的知识总结,是应急演练的蓝本.应急预案的知识是分层面、分步骤描述的<sup>[13]</sup>.

#### 3.1 演练过程知识提取方法及模糊关系粗糙集构建(Structure of fuzzy relations rough set for knowledge of emergency drills)

通过对演练知识进行分类,可以从演练的步骤中提取出专家知识.演练过程中出现的知识分为两大类:事件和操作.操作指每一个救灾事件都对一系列的动作(称为“广义的操作”),例如开关阀门操作、使用救灾的工具、对受伤人员的救护等.事件的含义更广,只要发生过的事情都可以成为事件.演练中的知识的之间的关联关系,可以用模糊方法来描述,例如“拿起电话”这个事件,就和“打电话”这个动作产生了较强的模糊关联.再比如“泄漏时间越长、且离泄漏点越近,则人员所受到的伤害度就越大”也描述了事件之间的模糊关系.

应急预案中的知识被归纳并形成论域 $E$ (称为预案论域).其中,每一次演练所涉及到的知识集合称为“预案决策集”设为 $D$ ,且 $D \subseteq E$ .而实际应急演练的过程中,也会产生一系列的知识,同样归纳在 $D$ 中.集合 $D$ 中的元素是影响演练推演的关键事件,设为 $d_i$ ,正是这些关键的事件,推动了演练按照正确的流程进行下去.笔者可以归纳出一系列的事件推演规则,例如,规则3: If “外操1发现火情”, and “外操2关闭进料阀”, then “外操3向班长汇报”.

演练过程中的救援行动分很多种类,包括:跑位、开阀、关阀、救护、打电话、操作消防器材等等.

通过研究应急知识,可以从救援行动中提取其中的演练参与者的各种行为,归纳并形成“演练行为集”设为 $A$ .同样,例如应急预案的知识是:规则3的前件“外操1发现火情”和“外操2关闭进料阀”事件如果得到触发,演练才能正常推进.然而在实际演练过程中,有些行动对演练产生积极效果,但肯定也有一些行为对演练的要求是无效的.因此,需要从“演练行为集”中,分析各种行动可能对“预案决策集” $D$ 中的事件所产生的模糊贡献,设 $\mu_{i,j}$ 为 $a_i \in A$ 与 $d_j \in A$ 的模糊关系隶属度. $\mu_{i,j}$ 越大,表示行为 $i$ 对事件 $j$ 所产生的贡献作用越大.

这样,通过分析应急预案的知识表示和逻辑关系,可以形成表8的应急过程二元模糊贡献标准表.

表8 应急预案二元模糊贡献标准表  
Table 8 Fuzzy contribution of action for drill

行为	事件1( $d_1$ )	事件2( $d_2$ )	...	事件 $j$ ( $d_j$ )
1( $a_1$ )	$\mu_{1,1}$	$\mu_{1,2}$	...	$\mu_{1,j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$i(a_i)$	$\mu_{i,1}$	$\mu_{i,2}$	...	$\mu_{i,j}$

为了能对演练过程中参演人员的行为是否适当进行定量的判别,需要用本文提到的各种测度方法对表8进行综合的计算,为演练的有效控制提供相关数据.在实际演练过程中,演练参与者的行为是动态产生的.随着演练进程,每一个关键步骤都需要构建新的二元模糊关系表,形成新的二元模糊关系集.然后,把每一步骤产生的模糊关系集合按照模糊粗糙集方法,构造出动态二元模糊关系的上下逼近,在演练控制器中对模糊粗糙集进行综合测度计算.

#### 3.2 应急演练的控制模型(Control model for emergency drills)

##### 3.2.1 演练控制流程设计(Design of the process of emergency drills control)

基于应急预案选择的特殊性(即专家知识和救援环境的结合),适合用模糊技术来实现核心的控制算法.实时演练控制的过程是一个闭环:人的操作过程与计算机实时控制进行不断交互.在这一个过程中,控制系统利用三维虚拟环境中真人的替身(称

为Avatar)的行为和应急预案的推演过程进行交互,同时模拟救援的后果(即: 下一步灾害可能发展的方向以及对人员和设备的伤害). 基于应急预案中的相关安全救援知识, 设计并利用演练控制器对演练进行实时的引导和干预; 为救援的参与者提供控制方案, 控制救灾演练的过程. 应急演练的控制流程见图2.

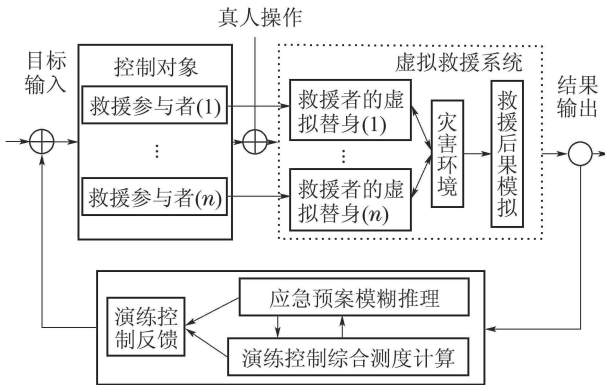


图 2 演练过程控制图

Fig. 2 Control process of emergency drill

在这个过程中, 首先要运用VRGIS技术尽可能地模拟真实的环境. 在虚拟的环境中, 控制系统动态的根据救援人员的行为进行综合测度, 从而寻找对灾害系统有效的救援解决方案和实施步骤, 为下一步真人救援提供决策依据. 当演练控制系统发现新的事件发生的时候, 会通过测度计算, 匹配合适的救援行为规则, 产生新的控制方案的反馈信号. 如此往复, 通过控制策略和行为规范的输出, 就可对整个救援过程进行有效的控制.

### 3.2.2 演练控制核心算法(Key algorithm of emergency drill control)

对演练参与人员行为的综合测度是演练控制算法的核心. 为了能够达到对演练进行实时控制, 则需要构建演练控制器, 并加以实时调用从而保证从演练的开始到结束都按照预想的方向发展. 控制算法的目的是在演练综合测度计算的基础上, 指导演练参与人员正确而及时的采取动作. 控制算法的输入是应急预案的专家知识和实时采集演练参与人员的各种动作, 输出是对演练过程与演练参与人员的提醒和相关建议. 演练控制器设计如下:

1)传统的演练过程中各类测度值的基础上总结出演练控制规则.

针对演练总流程控制的相关规则提取原则如下:

If 演练模糊关系粗糙集上、下逼近的模糊熵接近0, and 平均隶属度介于[0, 0.5]且小于阈值0.1, 输出“演练参与人员组织清晰, 但总体行为对演练的

贡献小”;

If 演练模糊关系粗糙集上、下逼近的模糊熵接近0, and 平均隶属度介于[0.5, 1]且大于阈值0.9, 输出“演练参与人员组织清晰, 且总体行为对演练的贡献大”;

If 演练模糊关系粗糙集上、下逼近的模糊熵接近 $-\log(0.5)$ , then 输出“演练参与者组织混乱, 总体行为模糊”;

If 演练模糊关系粗糙集基于模糊熵的下匹配测度, (以下简称下匹配测度) $>$ 阈值0.5, then 输出“演练参与者总体按照预案的要求行动”;

If 下匹配测度 $<$ 阈值0.5, and 演练模糊关系粗糙集基于模糊熵的上匹配测度(以下简称上匹配测度) $<$ 阈值0.5, then 输出“演练参与者总体没有按照预案的要求行动”;

If 下匹配测度 $>$ 阈值0.5 and 上匹配测度 $<$ 阈值0.5, then 输出“演练参与者总体按照预案的要求行动, 且无效行为可能较少”;

If 下匹配测度 $<$ 阈值0.5, and 上匹配测度 $>$ 阈值0.5, then 输出“演练参与者总体无效行为可能较多”;

If 演练模糊关系粗糙集的混合匹配熵 $>$ 阈值0.5, then 输出“演练人员的总体行为失控”.

针对演练参与者的相关控制规则提取如下(针对每一个单体进行控制):

If 演练模糊关系粗糙集中的行为元素的下匹配测度, (以下简称行为元素下匹配) $>$ 阈值0.5, then 输出“该参演人员的行为与预案的总体要求相符”;

If 行为元素下匹配 $<$ 阈值0.5, and 行为元素上匹配 $<$ 阈值0.5, then 输出“该参演人员的行为与预案的总体要求不符”, then 输出“该参演人员的行为与预案总体要求相符”;

If 行为元素下匹配 $>$ 阈值0.5, and 行为元素上匹配 $<$ 阈值0.5, 且无效行为可能较少”;

If 行为元素下匹配 $<$ 阈值0.5, and 行为元素上匹配 $>$ 阈值0.5, then 输出“该演练参与者总体无效行为可能较多”;

If 演练模糊关系粗糙集中的行为元素的重要性测度 $>$ 0, 且重要性测度值越大, then 输出“该参演者行为对于演练越重要, 起的作用越大”;

If 演练模糊关系粗糙集中的行为元素的重要性测度 $<$ 0, then 输出“该参演者行为对于演练起反作用”;

If 演练模糊关系粗糙集中的行为元素的重要性测度 $=$ 0, then 输出“该参演者行为对于演练不重

要,基本不起作用”。

## 2) 基于AHP的模糊规则的选择算法。

模糊推理规则的前件和推理结果都是模糊数。在推理过程中,专家库中的模糊规则的挑选十分重要。为了对规则进行权重的排序,可用AHP方法通过对规则前件中的模糊粗糙集测度重要性权重综合计算,进而计算规则的重要性权重。这样,可以解决部分可能出现的规则冲突,提高规则挑选的灵敏度。下面简要介绍规则的置信度计算方法。

演练规则的置信度:

$$\Theta = \frac{1}{(n+1)} \left( \sum_{k=1}^n (\mu_k \times \lambda_k) + \mu_{\text{out}} \times \delta \right), \quad (7)$$

其中:  $\mu_k$  为规则前件中的测度值,  $\lambda_k$  为该测度值对于该规则置信度的权重,  $\mu_{\text{out}}$  表示规则输出事件的隶属度,  $\delta$  表示规则推理后件的属性(见AHP层次结构图中的C层元素)的权重。

假设在规则库中,有1条规则适合某一个推理的前件:(假设“单个参演人员无效行为”事件为M)  $R_1: \text{IF}(0.4/D_6, 0.6/D_7), \text{THEN}(0.6/M)$ 。规则含义:如果元素下匹配值0.4,上匹配值0.6,则单个人员无效行为(属于单体行为符合度测度)值0.6。

该模糊规则的置信度(测度值的权重参考本文D层次总排序表):

$$\Theta = \frac{1}{(n+1)} \left( \sum_{k=1}^n (\mu_k \times \lambda_k) + \mu_{\text{out}} \times \delta \right) = \frac{1}{3} (0.4 \times 0.3945 + 0.6 \times 0.0615 + 0.6 \times 0.0727) = 0.0806. \quad (8)$$

按照此算法,可以对所有的演练规则进行置信度排序,形成的权重值用于演练控制规则的选取和甄别。

演练过程控制规则选取与甄别算法:

**步骤1** 计算初始化准备:通过数据库读入应急预案二元模糊贡献标准表。

**步骤2** 统计当前演练参与人员的行为,并加以归纳保存。

**步骤3** 通过比较特征函数,动态构建演练参与人员实际行为与当前应急事件之间的模糊关系粗糙集的上、下逼近。

**步骤4** 计算模糊关系粗糙集上、下逼近的熵和平均隶属度。

**步骤5** 进行基于模糊熵和平均隶属度的联合测度计算,并保存到“待推理规则前件库”。

**步骤6** 进行模糊关系粗糙集的集合上、下逼近匹配测度计算;进行模糊关系粗糙集中各个行为

元素的上、下逼近测度计算;进行模糊关系粗糙集混合式计算。同时把测度值保存到“待推理规则前件库”。

**步骤7** 计算模糊关系粗糙集中行为重要性测度,并把测度值保存到“待推理规则前件库”。

**步骤8** 找出“待推理前件库”中提取相关的测度值,与规则库中前件是模糊熵,平均隶属度,模糊关系粗糙集的集合上、下逼近匹配测度,模糊关系粗糙集中各个行为元素的上、下逼近测度,模糊关系粗糙集混合式,模糊关系粗糙集中行为重要性测度的规则,进行前件匹配。找到相关的推理规则。

**步骤9** 对挑选出来的推理规则进行置信度计算并排序。

**步骤10** 如果规则的置信度小于0.001,则剔除该规则,转步骤9。

**步骤11** 归纳前件测度值相同的规则,形成集合。对集合中的规则按照置信度原则进行排序,形成规则序列( $A_1, A_2, \dots, A_n$ )。

**步骤12** 计算归纳出来的规则集合的平均置信度( $Q = (a_1 + a_2 + \dots + a_n)/n$ )。

**步骤13** 对每一个规则的置信度( $a_i$ )计算与平均置信度的偏离  $E = |Q - a_i|/Q$ 。

**步骤14** 如果  $E > 0.5$ ,则表示该规则与集合总的相关规则偏离较大,建议排除。转步骤12。

**步骤15** 用挑选出的规则进行模糊推理,得出相关结论。

**步骤16** 转步骤2。

## 3.3 案例研究(Case study)

依据模糊粗糙集综合测度方法设计的应急演练控制器,控制了虚拟现实场景中的演练过程,完成了整个装置大预案的正常演练。下面介绍某化工厂聚丙烯装置“烷基铝泄露着火”应急演练过程一个片段。

从应急演练步骤可知,由于火灾是从三乙基铝装置最先触发,因此应急措施首先从该装置入手。该次演练的具体步骤是:1)外操关断三乙基铝的柱塞泵,把三乙基铝装置和聚乙烯反应装置进行隔离。2)切断三乙基铝储罐的出口相关阀门,减少或切断泄漏源的泄漏量。3)用蛭石覆盖着火点,增加消防因子对火焰的影响,最终对火灾进行扑灭。通过这一系列的方法争取在短时间内把火势控制在最小范围内,最终达到扑灭火灾的目的。

为了能够验证演练控制系统的有效性,笔者设置了3组演练人员进行参演。第1组和第2组参演人员中有都有一个“班长”的角色是由对应急预案不

了解的人来扮演的, 而第3组的参演人员全部都由熟悉该应急预案的人来扮演. 第1组演练的时候, 笔者使用了此次研究的控制系统对演练的进程进行控制; 第2组和第3组演练的时候, 启动了演练控制程序, 但屏蔽了控制系统的所有反馈输出, 单凭参演人员自己的应急能力进行演练.

第1组演练过程描述如下: 演练开始后, 推理机启动. 首先第1步启动VR演练场景. 根据演练的第1步要求启动“烷基铝泄露着火”事故, 在三维环境下加以火灾渲染. 接着, 所有参演人员从各种的

客户端加入到演练中来, 并扮演不同角色. 应急流程中的第1步是“内操报警”. 当演练进行到“外一操”巡检步骤时, “外操进行巡检”事件触发. 此时, 由于“班长”不熟悉预案, 没有带上防毒面具, 擅自跑到事故现场. 在对班长行为对演练的有效度进行模糊推理时, 从规则库中找到4条前件可能符合的规则. 其中的测度值分别是单体上匹配、单体下匹配、单体重要度. 规则的输出事件M为“单个参演人员有效行为, 即属于C4评价”事件. 通过规则的选取算法计算, 结果见表9.

表 9 演练控制规则选择案例

Table 9 A case of picking up control rules from emergency drill

规则号	控制规则描述	测度值	规则权重	平均置信度	置信度偏离E
1	If 0.4/D <sub>6</sub> , 0.6/D <sub>7</sub> , 0.1/D <sub>8</sub> then 0.1/M		0.0597		0.0643
2	If 0.2/D <sub>6</sub> , 0.4/D <sub>7</sub> , 0.2/D <sub>8</sub> then 0.2/M	$\tau_{x_5}^Y, \varphi_{x_5}^Y, SGF_{-S_{x_5}}$	0.048	0.0638	0.2476
3	If 0.1/D <sub>6</sub> , 0.8/D <sub>7</sub> , 0.3/D <sub>8</sub> then 0.1/M		0.0469		0.2649
4	If 0.2/D <sub>6</sub> , 0.7/D <sub>7</sub> , 0.6/D <sub>8</sub> then 0.7/M		0.1011		0.5846

从表9可见, 置信度偏离E最小的是规则1, 2, 3, 且远都小于0.5. 所以这3条规则就被用于班长行为的测度. 把当前的3个测度值带入模糊推理运算, 最终推得班长的行为与演练相关的有效度为0.13, 远小于最大值1. 可以断定班长的行为不符合演练的要求. 演练控制系统立即发送“班长行为不符合演练要求”信息给参演者. “班长”的参演者得到相关信息以后, 意识到他的演练行为错误, 回到中控室取防毒面具. 然后, 参演者操作“班长”的Avatar跑至起火现场, 然后执行关闭阀门的操作. 这时, 演练控制系统计算出该操作人员行为重要性和明显提高, 达到0.94. 同时该操作行为对于应急预案知识的匹配度也非常高, 达到了0.9的匹配度. 在整个演练的过程中, 出现过一次参演人员整体匹配熵超过0.5, 演练控制系统立即预警, 并发出“演练人员的总体行为失控”的系统告警. 本次演练使用了本文构造的模糊规则选择算法, 基本没有出现较大偏差的推理结果, 最终演练得以顺利完成. 经过统计, 整个演练过程花费1136 s.

第2组演练过程描述: 演练开始, 由于控制系统只在后台运行并不输出任何控制信息给参演人员, 整个演练过程就等于没有任何控制手段. 在演练过程中, 由于班长不熟悉预案, 其演练的行为基本都不符合要求. 经过计算, 班长总体行为的符合度为0.17. 导致整体参演人员的匹配度被拉低, 只有0.35. 而整体演练的匹配熵比较大, 超过0.7. 这就意味着演练处于失控状态. 这时候, 控制系统内部已经通

过模糊规则推理出了多条“演练人员总体行为失控”的告警信息, 但由于被大家认为屏蔽没有发到相关的演练人员客户端. 经过20分钟以后, 由于灾害长期没有得到有效控制, 经过灾害网络演化动力学模型的计算, 三乙基铝装置火灾附近的聚乙烯装置的火灾危险源被触发, 形成的2次灾害, 演练宣告失败.

第3组演练过程描述如下: 演练开始, 同样控制系统的输出部分被屏蔽. 由于演练人员都是熟悉预案的, 因此演练过程完全按照应急预案的要求进行. 控制系统对每一个参演人员的计算, 发现其行为的符合度都很高, 全部高于0.9, 而且整体参演人员的匹配度也很高. 最终, 演练控制系统内部推理得到“演练参与者总体按照预案的要求行动”的结论. 经过840 s, 整个演练顺利完成.

通过对3组不同情况的演练过程的统计, 我们可以得到看到, 有控制系统的演练过程是基本能够得到成功保障的. 虽然可能由于一些参演人员不熟悉预案导致演练过程中出现了一些波折, 但通过控制系统大多数能被纠正回来. 但和完全熟悉预案的小组对比, 演练的时间会被拉长. 而且经过多次在有控制的情况下演练, 参演人员的行为有效性也会逐渐得以得到提升, 演练时间也逐渐缩短. 这就说明演练控制系统对演练过程的控制是有效和正确的.

#### 4 结论(Conclusion)

本文针对应急演练中知识的实际特点, 在模糊



粗糙集的理论基础上定义并分析了几种知识关联度的测度方法. 其次, 在模糊粗糙集各类测度基础上, 通过AHP方法, 建立模糊规则的分层度量模型并给出了对比矩阵的构造示例, 对模糊规则进行更加精细的度量. 再次, 在分析应急演练知识构成的基础上, 提出预案知识提取和模糊关系粗糙集的构建方法; 设计了演练过程控制流程和基于本文知识综合测度方法形成的核心控制流程, 并从给出模糊控制规则库中规则的选取算法. 通过对规则重要性排序, 提高规则判别精度, 提供规则选择的手段和一种规则冲突消解的方法.

该方法的应用, 解决了应急救援演练中对于演练参与人员行为控制难以量化的问题, 同时也为演练控制系统的核心—控制规则的甄选提供有效的量化途径, 保证了演练的正常而高效的进行. 通过案例比对展示了运用该方法对石化领域内某工厂的应急过程演练的有效控制, 验证了本文所提研究工作的可行性.

#### 参考文献(References):

- [1] 姜传胜, 邓云峰, 贾海江, 等. 突发事件应急演练的理论思辨与实践探索 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 153 – 159.  
(JIANG Chuansheng, DENG Yunfeng, JIA Haijiang, et al. Theoretical thoughts on and practical exploration of emergency exercise [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(6): 153 – 159.)
- [2] 陈戈, 齐永阳, 陈勇, 等. 面向城市仿真的VRGIS平台设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 457 – 460.  
(CHEN Ge, QI Yongyang, GHEN Yong, et al. Design and implementation of urban simulation oriented VRGIS [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(2): 457 – 460.)
- [3] 张辉, 刘奕. 基于“情景应对”的国家应急平台提现基础科学问题与基础平台 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 32(5): 947 – 953.  
(ZHANG Hui, LIU Yi. Key problems on fundamental science and technology integration in ‘scenario-response’ based national emergency response platform system [J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2013, 32(5): 947 – 953.)
- [4] 易涛, 朱群雄, 刘鹏涛. 基于应急演练的化工安全模糊专家系统研究 [J]. 化工学报, 2011, 62(10): 2818 – 2827.  
(YI Tao, ZHU Qunxiong, LIU Pengtao. An emergency drilling-based fuzzy expert system for chemical safety [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(10): 2818 – 2827.)
- [5] ROLLY I, MASAO M. Generalized fuzzy rough sets by conditional probability relations [J]. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, 16(07): 865 – 881.
- [6] 黄正华, 胡宝清. 模糊粗糙集理论研究进展 [J]. 模糊系统与数学, 2005, 19(4): 125 – 134.  
(HUANG Zhengua, HU Baoqing. The studies of fuzzy rough sets theory: A survey [J]. *Fuzzy System and Mathematics*, 2005, 19(4): 125 – 134.)
- [7] 丁世飞, 朱红, 许新征, 等. 基于熵的模糊信息测度研究 [J]. 计算机学报, 2012, 35(4): 796 – 801.  
(DING Shifei, ZHU Hong, XU Xinzhen, et al. Entropy-based fuzzy information measures [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(4): 796 – 801.)
- [8] SATTY T L. *The Analytic Hierarchy Process* [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [9] 承齐, 张礼敬, 邢培育, 等. 基于层次分析法的化工事故应急演练模糊综合评估 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(4): 98 – 102.  
(CHENG Qi, ZHANG Lijing, XING Peiyu, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of chemical emergency drill based on analytic hierarchy process [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 31(4): 98 – 102.)
- [10] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, 20(2): 419 – 435.
- [11] 叶叶成, 柯丽华, 黄德育, 等. 系统综合评价技术及其应用 [M]. 北京: 冶金出版社, 2006: 76 – 94.  
(YE Yicheng, KE Lihua, HUANG Deyu, et al. *System Comprehensive Evaluation Technology and Its Application* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006: 76 – 94.)
- [12] 万百五. 社会控制论及其进展 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 1 – 10.  
(WAN Baiwu. Sociocybernetics and its process: A review [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(1): 1 – 10.)
- [13] 吴宗之, 刘茂. 重大事故应急预案分级、分类体系及其基本内容 [J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 15 – 18.  
(WU Zongzhi, LIU Mao. Gradation and categorization system of emergency plan for major accidents and their main contents [J]. *China Safety Science Journal*, 2003, 13(1): 15 – 18.)

#### 作者简介:

**易涛** (1969–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为灾害仿真与应急演练控制关键技术, E-mail: toweryee@163.com;

**耿志强** (1973–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为计算智能与机器学习、数据挖掘与知识管理、过程建模, E-mail: gengzhiqiang@mail.buct.edu.cn;

**徐圆** (1983–), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为系统工程、人工智能、可拓工程方法, E-mail: xuyuan@mail.buct.edu.cn;

**朱群雄** (1960–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能系统与数据挖掘、可拓工程论与过程工业模拟、虚拟现实与地理信息系统(Web-VRGIS), E-mail: zhuqx@mail.buct.edu.cn.