

考虑方案有效性的应急案例决策方法

郑晶^{1,2}, 王应明¹, 陈圣群²

(1. 福州大学 决策科学研究所, 福州 350116; 2. 福建江夏学院 电子信息科学学院, 福州 350108)

摘要: 针对基于案例推理的应急方案生成问题, 从方案有效性判断和实施效果融合两个角度出发, 提出一种考虑方案有效性的应急案例决策方法. 首先, 依据决策者给出的预估方案生成有效的案例集, 利用检索方法计算有效历史案例与目标案例的相似度; 然后, 根据距离熵方法对多时期的方案实施效果进行融合, 集结相似度和实施效果, 进而得到每个案例的综合评价值, 并根据综合评价值的大小确定最优备选方案; 最后, 通过一个高层建筑火灾算例验证了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 案例推理; 突发事件; 距离熵; 相似度; 方案有效

中图分类号: C931

文献标志码: A

Decision method for emergency case with considering effectiveness of alternative

ZHENG Jing^{1,2}, WANG Ying-ming¹, CHEN Sheng-qun²

(1. Decision Sciences Institute, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. College of Electronics and Information Science, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China. Correspondent: WANG Ying-ming, E-mail: msymwang@hotmail.com)

Abstract: For problem of generating emergency alternative based on case-based reasoning, an emergency case decision method with considering the effectiveness of the alternative is developed from the effective judgment of the alternative and fusion of the implement effect. According to the forecast alternative of the decision maker, the effective case set is generated, and the similarities between the effective historical cases and the target case are calculated. Then, the method of distance entropy is used to fuse the effect of many periods of alternative implementation. Furthermore, the overall evaluation value of each alternative is calculated by integrating the similarities and the effectiveness, and the desirable alternative can be determined according to the obtained overall evaluation value. Finally, a high-rise building fire example is used to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: case-based reasoning; emergency case; distance entropy; similarity; alternative effectiveness

0 引言

近年来, 突发事件的频频发生使应急管理成为关注热点之一. 应急决策作为应急管理中最重要研究内容之一, 是指在不稳定的条件下生成应急方案. 应急决策存在应急预案难以生成及实施效果难以预测的问题, 比如, 在高层建筑火灾救援中, 通常火灾现场情况复杂, 具有不确定性, 极易伴随被困人员伤亡、次生爆炸等危险, 使得快速生成应急方案存在较大困难, 方案的实施效果难以预估. 因此, 如何快速生成有效的应急方案是一个值得关注的研究课题.

目前, 应急决策常用的方法有故障树分析法^[1]、案例推理^[2-3]、前景理论^[4]、决策模型^[5]等. 其中案例推理(CBR)通过搜索相似的历史案例, 利用已有经验解决当前问题^[6], 这与人类的思维方式一致, 而且通过自学能力可以不断改善决策的有效性, 因此受到了很多学者的青睐, 并在很多领域得到了广泛应用, 比如医药^[7]、制造业^[8]、商业^[9]、环境^[10]、故障判断^[11]等. 同时, CBR在应急决策中也受到了广泛的关注, 例如: Liao等^[10]通过利用改进的遗传算法对方案进行调整来生成环境应急预案; Fan等^[12]应用案例推理生成

收稿日期: 2015-09-06; 修回日期: 2015-11-22.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(70925004); 福建省教育厅科技项目(JB14122); 福建江夏学院青年科研人才培养基金项目(JXZ2014009).

作者简介: 郑晶(1980-), 女, 副教授, 博士生, 从事决策理论与方法的研究; 王应明(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策理论与方法、数据包络分析等研究.

工程风险响应策略; 靖可等^[13]通过基于效果域匹配的
案例推理来生成煤矿瓦斯爆炸事故的应急方案; 袁晓
芳等^[14]提出了基于情景检索的案例推理决策方法对
重大煤矿瓦斯爆炸事故做出响应; 郑晶等^[15]针对多时
期应急方案生成过程中决策者心理行为的问题, 提出
了基于前景理论和决策者偏好的应急案例决策方法;
随后文献^[16]提出了一种基于证据推理的考虑总体
优势度的应急案例决策方法。

需要指出的是, 在上述基于案例推理的应急决策
研究中存在一个缺陷: 案例相似度高低与方案的有效
性不成正比^[17], 比如, 历史案例 A 与目标案例的相似
度比 B 略高, 但不意味着历史案例 A 的方案就一定比
 B 的更适用于当前的突发事件, 因为 A 中可能存在某
个属性的相似度较低, 这将造成该案例与目标案例的
相似性相差甚远. 同时, 应急决策中非常关注时间因
素. 实施某个应急方案后, 决策者不仅仅只关注方案
最终带来的效果, 还关注整个过程的效果, 那么实施
效果评估应该针对整个过程. 基于此, 本文在利用案
例推理搜索最相似历史案例时融入决策者的主观判
断来过滤无效的历史案例, 并通过距离熵方法对方案
的多时期实施效果进行融合, 可以有效解决应急方案
生成和实施效果评估的问题。

1 距离熵的权重计算方法

信息熵最早由香农^[18]提出, 用来描述信息源的
不确定性. 目前, 熵常被用来确定属性权重, 其特点
是: 熵值越大, 表明该属性取值范围越大, 其信息量越
大, 在决策中所起的作用也越大, 那么赋予较高的权
重; 反之, 赋予较低的权重. 在应急决策中, 决策者所
获取的信息具有不可靠性或完整性, 然而却需要利用
这些信息做出较高客观性的决策. 熵权的应用可以
降低决策者的主观性. 管清云等^[19]针对应急决策中
对信息客观性、科学性的要求, 提出了距离熵的概念,
即通过利用系统中个体之间的欧氏距离比表示个体
出现的概率来得到熵. 下面针对 x 个方案, 每个方案
有 y 个属性的决策矩阵给出距离熵的计算步骤。

首先, 选取第 j ($j = 1, 2, \dots, y$) 个属性中的最优
值 r_j^* 作为基准信息, 表示为

$$r_j^* = \max_{1 \leq u \leq x} \{r_{uj}\}, \quad (1)$$

其中 r_{uj} 为第 u 个方案关于属性 j 的评价。

然后, 计算 r_{uj} 与 r_j^* 的欧氏距离

$$Ed_{uj} = \sqrt{(r_{uj} - r_j^*)^2}, \quad u = 1, 2, \dots, x. \quad (2)$$

最后, 将式(2)与该序列的所有距离和 $\sum_{u=1}^x Ed_{uj}$
的比作为信息单元概率, 进而得到距离熵

$$E_j = - \sum_{u=1}^x \frac{Ed_{uj}}{\sum_{u=1}^x Ed_{uj}} \cdot \ln \frac{Ed_{uj}}{\sum_{u=1}^x Ed_{uj}}. \quad (3)$$

显然, 信息单元的概率越接近, 距离熵 E_j 的值越
大, 这意味着各信息单元与最优值的差异越小, 越接
近最佳单元。

在距离熵的基础上, 利用熵权法确定属性权重.
熵权法是根据各属性的信息量大小来确定权重的方
法^[20]. 熵值越小, 意味着属性的变异度越大, 即所包
含的信息量越大, 那么在决策中所起的作用也越大, 因
此其权重就越大. 下面给出熵权^[21]的计算方法。

对式(3)进行归一化处理, 得到决策重要性的熵
值如下:

$$e_j = \frac{1}{\ln x} E_j. \quad (4)$$

进一步地, 对 $1 - e_j$ 进行归一化得到属性 j 的客
观权重

$$w_j = \frac{1 - e_j}{x - \sum_{j=1}^y e_j}. \quad (5)$$

其中: $0 \leq w_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^y w_j = 1$.

基于距离熵的权重的确定能够有效体现信息的
偏好和质量, 为信息融合权重的确定提供了客观性和
科学性保障。

2 问题描述

在考虑基于案例推理的突发事件应急决策问题
中, 为了叙述方便, 记 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为案例库
中的 n 个历史案例. 其中: C_i 为第 i 个历史案例, $i \in$
 $\{1, 2, \dots, n\}$, C_0 为目标案例. 通常, 一个案例包括问
题、方案和实施效果, 其信息通过多个属性来描述. 下
面给出问题、方案和实施效果的属性(值)及其权重的
符号表示, 可参考表 1。

$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_h\}$ 为 h 个问题属性, Q_l 为第
 l 个问题属性, $l \in \{1, 2, \dots, h\}$; $w^p = (w_1^p, w_2^p, \dots,$
 $w_h^p)$ 为问题属性的权重向量, w_l^p 为属性 Q_l 的权重, 满
足 $0 \leq w_l^p \leq 1$, 且 $\sum_{l=1}^h w_l^p = 1$; $q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ih})$
为历史案例 C_i 的问题属性向量, q_{il} 为历史案例 C_i
关于问题属性 Q_l 的属性值, $q_0 = (q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0h})$ 为
目标案例 C_0 的问题属性向量; $S = \{S_1, S_2, \dots, S_g\}$
为 g 个方案属性, S_k 为第 k 个方案属性, $k \in \{1, 2,$
 $\dots, g\}$; $b_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ig})$ 为历史案例 C_i 的方
案属性值向量, b_{ik} 为历史案例 C_i 关于方案属性 S_k 的属
性值, $b_0 = (b_{01}, b_{02}, \dots, b_{0g})$ 为历史案例 C_0 的方
案属性值向量; $R = \{R_1, R_2, \dots, R_f\}$ 为 f 个方案实施效
果的属性集, R_e 为方案实施效果的第 e 个属性, $e \in \{1, 2,$

表 1 案例推理应急决策问题的决策矩阵

案例	问题属性				方案属性				实施效果						
	Q_1	Q_2	\dots	Q_h	S_1	S_2	\dots	S_g	R_1			\dots	R_f		
									R_{11}	R_{12}	R_{13}		R_{f1}	R_{f2}	R_{f3}
C_1	q_{11}	q_{12}	\dots	q_{1h}	b_{11}	b_{12}	\dots	b_{1g}	r_{111}	r_{122}	r_{133}	\dots	r_{1f1}	r_{1f2}	r_{1f3}
C_2	q_{21}	q_{22}	\dots	q_{2h}	b_{21}	b_{22}	\dots	b_{2g}	r_{211}	r_{222}	r_{233}	\dots	r_{2f1}	r_{2f2}	r_{2f3}
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots	\vdots
C_n	q_{n1}	q_{n2}	\dots	q_{nh}	b_{n1}	b_{n2}	\dots	b_{ng}	r_{n11}	r_{n22}	r_{n33}	\dots	r_{nf1}	r_{nf2}	r_{nf3}
C_0	q_{01}	q_{02}	\dots	q_{0h}											

$\dots, f\}$, $R_e = (R_{e1}, R_{e2}, R_{e3})$ 为方案实施效果的第 e 个属性在各个时期的属性集, R_{et} 为方案实施效果 R_e 在第 t 时期的属性值, $t \in \{1, 2, 3\}$. 由于实施应急方案后效果的体现是一个过程, 本文将方案效果的评估分为前期、中期和后期 3 个阶段. 设 $r_{ie} = (r_{ie1}, r_{ie2}, r_{ie3})$ 为历史案例 C_i 关于方案实施效果 R_e 在各个时期的属性值向量, r_{iet} 为历史案例 C_i 关于方案实施效果 R_e 在 t 时刻的属性值, 满足 $0 \leq r_{iet} \leq 1$, 且有 $\sum_{t=1}^3 r_{iet} = 1$.

依据实际情况, 考虑表 1 中的问题属性值 (即 q_{il} 和 q_{0l}) 为数值型和语言型, 例如, 高层火灾中的“伤亡人数”、“燃烧面积”、“着火高度”等属性的值一般是数值型, “固定消防能力”的属性值一般是语言型, 采用“好”、“一般”和“很好”等语言短语来表示; 考虑表 1 中的方案属性值 b_{ik} 为数值型, 例如, 为了扑灭火灾需要派出的“消防人员”、“水罐炮车辆”等属性值一般是数值型.

本文要解决的问题是: 针对当前突发事件 C_0 的问题属性向量 q_0 , 依据表 1 所示的历史案例的问题 Q 、方案 S 、实施效果 R 和问题属性权重 w^p 及决策者的主观判断, 如何运用一个可行的决策分析方法生成最优的参考方案.

3 提出的应急案例决策方法

为了获得有效的应急方案, 下面阐述本文提出的考虑方案有效性的应急决策方法. 首先, 该方法根据决策者对当前突发事件的预估方案来构建有效的历史案例集; 然后, 通过计算历史案例与目标案例的问题相似度得到有效的相似应急案例集; 进一步地, 通过距离熵对多时期应急方案实施效果进行融合; 最后, 依据案例相似度和方案实施效果生成当前突发事件的有效方案.

3.1 构建有效的历史案例集

案例推理存在一个缺陷: 即使相似度最高, 也不意味着该案例所对应的方案是最有效的^[17], 例如, 目标案例的属性集为 (5, 8), 案例库中两个历史案例分别为 (1, 8) 和 (4, 6), 设属性权重分别为 (0.2, 0.8), 则由文献 [5] 的相似度计算方法得到的案例相似度分别为 0.8 和 0.15, 但是历史案例 1 的属性 1 与目标案例距离

过大, 这将导致其方案不一定适用于目标案例. 为了提高生成方案的有效性, 决策者对当前突发事件给出一个预估方案, 借此过滤掉无效的案例, 得到一个有效的历史案例集. 若历史案例的方案在决策者预估范围外, 则认为无效的; 反之, 认为是有效的. 设决策者根据当前的案例情况对方案做出一个评估 $b_0 = (b_{01}, b_{02}, \dots, b_{0g})$, 其中 b_{0k} 为区间数 $[b_{0k}^-, b_{0k}^+]$. 设 η_{ik} 为历史案例的方案属性是否有效的指示器, 其计算公式如下:

$$\eta_{ik} = \begin{cases} 0, & b_{ik} \in b_{0k}; \\ 1, & b_{ik} \notin b_{0k}. \end{cases} \quad (6)$$

进一步, 计算历史方案是否在决策者评估方案范围内, 其计算公式如下:

$$\delta_{0i} = \sum_{k=1}^g \eta_{ik}. \quad (7)$$

若 $\delta_{0i} = 0$, 则表示历史案例的方案在决策者预估方案内, 是有效的; 若 $\delta_{0i} \neq 0$, 则表示历史案例的方案与目标案例相差甚远, 为无效案例.

3.2 案例相似度计算

不同的属性数据类型, 其属性相似度 $\text{Sim}(q_{il}, q_{0l})$ 的计算公式不同. 针对上述某些属性相似度较低但案例相似度较高的情况, 通过属性相似度阈值区分属性相似度. 当属性相似度低于阈值时, 认为其相似性较弱, 取其属性相似度值为 0. 当问题属性为数值型时, $\text{Sim}(q_{il}, q_{0l})$ 的计算公式为

$$\text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) = \begin{cases} 1 - \frac{|q_{il} - q_{0l}|}{q_l^{\max} - q_l^{\min}}, & \text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) \geq \alpha_l; \\ 0, & \text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) < \alpha_l. \end{cases} \quad (8)$$

其中: α_l 为属性 l 的属性相似度阈值, 通常 α_l 的取值由决策者依据经验或历史数据来确定; 且有

$$q_l^{\max} = \max\{q_{0l}, \max\{q_{il}\}\}; \\ q_l^{\min} = \min\{q_{0l}, \min\{q_{il}\}\}.$$

设语言变量集 $U = \{u_p | p = 0, 1, \dots, T\}$, 则其语言变量 u_p 可以用三角模糊数表示为 $\tilde{q}_p = (q_p^a, q_p^b, q_p^c)$, 即

$$\tilde{q}_p = \left(\max\left(\frac{p-1}{T}, 0\right), \frac{p}{T}, \min\left(\frac{p+1}{T}, 1\right) \right). \quad (9)$$

其中: q_p^a 、 q_p^b 和 q_p^c 为实数, 且有 $0 \leq q_p^a \leq q_p^b \leq q_p^c$

≤ 1.

当问题属性为语言变量时, 根据式 (9) 将语言变量 q_{il} 和 q_{0l} 表示为模糊三角数 $\tilde{q}_{il} = (q_{il}^a, q_{il}^b, q_{il}^c)$ 和 $\tilde{q}_{0l} = (q_{0l}^a, q_{0l}^b, q_{0l}^c)$, 则 $\text{Sim}(q_{il}, q_{0l})$ 的计算式为

$$\text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) = \begin{cases} 1 - \frac{|(q_{il}^a - q_{0l}^a)|}{q_{il}^{\prime\prime\max} - q_{il}^{\prime\prime\min}}, & \text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) \geq \alpha_l; \\ 0, & \text{Sim}(q_{il}, q_{0l}) < \alpha_l. \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} q_{il}^a &= q_{il}^a + q_{il}^b + q_{il}^c, & q_{0l}^a &= q_{0l}^a + q_{0l}^b + q_{0l}^c, \\ q_{il}^{\prime\prime\max} &= \max\{(q_{il}^a + q_{il}^b + q_{il}^c), \\ &\quad \max\{q_{il}^a + q_{il}^b + q_{il}^c\}\}, \\ q_{il}^{\prime\prime\min} &= \min\{(q_{il}^a + q_{il}^b + q_{il}^c), \\ &\quad \min\{q_{il}^a + q_{il}^b + q_{il}^c\}\}. \end{aligned}$$

进一步地, 根据属性相似度 $\text{Sim}(q_{il}, q_{0l})$ 计算案例相似度 $\text{Sim}(q_i, q_0)$, 其计算公式为

$$\text{Sim}(q_i, q_0) = \sum_{l=1}^h w_l^P \cdot \text{Sim}(q_{il}, q_{0l}). \quad (11)$$

其中: $\text{Sim}(q_i, q_0) \in [0, 1]$, $\text{Sim}(q_i, q_0)$ 越大, 表明历史案例 C_i 与目标案例 C_0 的相似度越大.

由文献 [22-23] 可知, 只有案例相似度较高的历史案例才能被提取为相似案例集. 因此, 为了提取合适的历史案例, 可以预先设置案例相似度的阈值 $\xi \in [\min\{\text{Sim}(q_i, q_0)\}, \max\{\text{Sim}(q_i, q_0)\}]$. 通常, ξ 的取值由决策者依据经验或历史数据来确定, ξ 越大, 表明决策者对于案例相似度的要求越高. 当满足 $\text{Sim}(q_i, q_0) \geq \xi$ 时, 历史案例 C_i 将被提取构成有效的相似案例集 $C^{\text{valid}} = \{C_i | i \in M\}$. 其中: $M = \{i | \text{Sim}(q_i, q_0) \geq \xi, i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示所有有效的相似案例的下标集合.

3.3 多时期应急方案实施效果的融合

应急方案实施后的效果不是立竿见影的, 应该是一个过程, 而且在应急决策中, 时间是考虑的关键因素之一, 决策者对实施效果的关注不应该只有最终结果, 应该是整个过程. 本文将方案实施效果过程分为前期、中期和后期 3 个阶段. 方案的评估属性主要包括安全性、成本、事故损失^[19]. 对于实施效果的融合, 文献 [19] 提出的距离熵融合方法不仅满足应急决策信息不完备或不可靠、决策的客观性高等特点, 而且能很好地表征信息的质量, 因此, 本文采用距离熵方法进行多时期实施效果融合, 具体计算过程如下:

首先, 将案例 $C_i (C_i \in C^{\text{valid}})$ 的第 t 个时期的评估属性 r_{iet} 归一化为 r'_{iet} , 其归一化公式为

$$r'_{iet} = \frac{r_{iet}}{\sum_{i \in M} r_{iet}}, \quad (12)$$

显然 $r'_{iet} \in [0, 1]$.

由于属性分为成本型 L^C 和效益型 L^B , 每个评估属性在每个时期的最优值确定方法为

$$r_{ie}^* = \begin{cases} \max\{r'_{iet}\}, & r'_{iet} \in L^C; \\ \min\{r'_{iet}\}, & r'_{iet} \in L^B. \end{cases} \quad (13)$$

然后, 根据式 (2) 计算 r'_{iet} 与 r_{ie}^* 之间的欧氏距离 Ed_{iet} , 并根据式 (3) 计算各时期距离熵

$$E_{ie} = \begin{cases} - \sum_{i \in M} \frac{\text{Ed}_{iet}}{\sum_{i \in M} \text{Ed}_{iet}} \cdot \ln \frac{\text{Ed}_{iet}}{\sum_{i \in M} \text{Ed}_{iet}}, \\ \text{Ed}_{iet} \neq 0; \\ 0, & \text{Ed}_{iet} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

进而根据式 (4) 对熵值进行归一化, 并根据式 (5) 计算每个评估属性在每个时期的权重 w_{et} .

最后, 通过线性加权法融合每个时期的评估属性, 其计算公式如下:

$$z_{ie} = \sum_{t=1}^3 w_{et} \cdot r'_{iet}. \quad (15)$$

重复上述步骤, 对评估属性 z_{ie} 进行融合, 得到最终的实施效果 z_i .

3.4 备选方案的综合评价价值及方案优选

获取案例相似度和实施效果后, 根据文献 [24-25] 的基于案例的决策理论, 计算案例的综合评价价值, 其计算公式为

$$V_i = \sqrt{\text{Sim}(q_0, q_i) \cdot z_i}, \quad i \in M. \quad (16)$$

显然, V_i 越大, 历史案例 C_i 与目标案例 C_0 的相似性越大, 方案实施效果越好. 依据综合评价价值 V_i 的大小得到所有有效的案例集关于相似度和实施效果的综合评价排序结果, 进而将实施效果最有效的相似历史案例的应急方案作为当前突发事件的应急预案, 或者根据实际情况对该方案进行适当的调整和修正, 从而生成更合适的应急方案.

综上所述, 考虑方案有效性的应急案例决策方法的计算步骤归纳如下.

Step 1: 决策者依据自身的知识和经验给出当前突发事件的预估应急方案, 依据式 (6) 和 (7) 构建有效的历史案例集.

Step 2: 运用预先设置的属性相似度阈值 α_l , 依据式 (8)~(10) 计算案例属性相似度 $\text{Sim}(q_{il}, q_{0l})$; 依据式 (11) 计算历史案例与目标案例的相似度 $\text{Sim}(q_i, q_0)$, 结合预先设置的案例相似度阈值 ξ 构建有效的相似案例集 C^{valid} .

Step 3: 获取针对各有效历史案例的多时期应急方案实施效果的评价信息 r_{iet} .

Step 4: 依据式 (12)~(15) 对实施效果的多时期评价属性进行融合, 得到评价属性在多时期的局部融

合结果 z_{ie} .

Step 5: 依据式 (12)~(15) 对实施效果的评价属性进行融合, 得到各案例实施效果的评价信息 z_i .

Step 6: 基于案例相似度和案例实施效果评价信息 z_i , 依据式 (16) 获取案例的综合评价值 V_i .

4 算例分析

为了验证本文所提方法的有效性和可行性, 下面以某市的高层建筑火灾事故应急方案生成问题为例进行说明. 设某市发生了一起高层建筑火灾, 情况紧急, 需要立即采取有效的应急措施. 消防部门收集到相关的 15 个案例作为历史案例 (C_1, C_2, \dots, C_{15}). 案例所涉及的问题属性包括: 伤亡人数 (Q_1 /人)、燃烧面积 (Q_2 /m²)、着火高度 (Q_3 /m)、固定消防能力水平 (Q_4) 和建筑高度 (Q_5 /m). 其中: 固定消防能力水平的语言评价为极差 (VW)、差 (W)、一般 (G)、强 (S) 和非常强 (VS). 考虑的方案属性包括: 消防人员 (S_1 /人)、水罐炮车 (S_2 /辆)、中高压泵消防车 (S_3 /辆)、高喷车 (S_4 /辆) 和抢险救援车 (S_5 /辆); 方案实施效果考虑的属性包括: 成本 (R_1)、伤亡人数降低率 (R_2) 和财产损失降低率 (R_3). 表 2 给出了问题和方案的属性值.

消防决策部门专家根据自身经验给出问题属性的权重向量 $w^p = (0.2, 0.3, 0.15, 0.2, 0.15)$, 给出了当

前突发事件的预估方案范围 ($[100, 180], [20, 35], [10, 20], [10, 20], [5, 15]$), 另外, 设置属性相似度和案例相似度阈值分别为 $\alpha_l (l = 1, 2, 3, 4, 5) = 0.6$ 和 $\xi = 0.75$. 下面简要给出一些计算过程和结果.

首先, 依据式 (6) 和 (7), 结合前文提及的有效案例集的构建方法确定出有效的历史案例集 ($C_1, C_2, C_3, C_4, C_8, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}$).

然后, 依据预先设置的属性相似度阈值, 并结合式 (8)~(11) 对有效历史案例集中的历史案例与目标案例的相似度 $\text{Sim}(q_i, q_0)$ 进行计算, 得到如下结果:

$$\begin{aligned} \text{Sim}(q_1, q_0) &= 0.7591, \text{Sim}(q_2, q_0) = 0.8453, \\ \text{Sim}(q_3, q_0) &= 0.6453, \text{Sim}(q_4, q_0) = 0.6929, \\ \text{Sim}(q_8, q_0) &= 0.7185, \text{Sim}(q_{12}, q_0) = 0.8310, \\ \text{Sim}(q_{13}, q_0) &= 0.8701, \text{Sim}(q_{14}, q_0) = 0.9488, \\ \text{Sim}(q_{15}, q_0) &= 0.9401. \end{aligned}$$

由于消防决策部门专家设置了案例相似度阈值 $\xi = 0.75$, 将有效历史案例 C_3, C_4 和 C_8 剔除, 得到相似历史案例集 ($C_1, C_2, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}$). 此外, 要得到相似案例集的方案的多时期实施效果, 本文主要分为前期 (R_{i1})、中期 (R_{i2}) 和后期 (R_{i3}), 其评价信息如表 3 所示.

表 2 问题和方案的属性值信息

案例	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	S_1	S_2	S_3	S_4
C_1	35	800	48	W	95.8	120	23	10	10
C_2	37	400	100	G	168	150	30	15	20
C_3	38	849	59	G	159	180	35	20	25
C_4	57	400	110	W	187	170	18	16	12
C_5	87	480	12	G	49.9	200	32	17	15
C_6	120	1200	92	W	99.9	230	38	18	27
C_7	80	650	35	VS	73.5	180	40	25	30
C_8	58	650	75	VW	99.8	110	33	19	16
C_9	60	450	104	G	492	135	37	13	8
C_{10}	89	437	28	W	234.35	260	45	16	22
C_{11}	100	1000	130	VW	210	280	60	25	30
C_{12}	43	600	80	S	150	150	30	15	12
C_{13}	47	450	70	S	100	120	25	10	10
C_{14}	65	500	68	G	90	130	25	10	10
C_{15}	68	560	65	G	96	135	26	12	11
C_0	53	520	60	G	105.5	-	-	-	-

表 3 有效相似案例方案的多时期实施效果评价信息

案例	R_1			R_2			R_3		
	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{21}	R_{22}	R_{23}	R_{31}	R_{32}	R_{33}
C_1	0.65	0.3	0.05	0.2	0.4	0.4	0.25	0.3	0.45
C_2	0.5	0.3	0.2	0.1	0.45	0.45	0.3	0.55	0.15
C_{12}	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5	0.2	0.7	0.2	0.1
C_{13}	0.3	0.4	0.3	0.6	0.2	0.2	0.6	0.3	0.1
C_{14}	0.3	0.5	0.2	0.7	0.2	0.1	0.7	0.2	0.1
C_{15}	0.6	0.2	0.2	0.5	0.3	0.2	0.3	0.6	0.1

依据式(12)~(15)对评估属性的每个时期进行融合,得到的融合结果如表4所示.对评估属性进行融合,得到每个案例的实施效果评价信息 z_i ,即

$$z_1 = 0.3460, z_2 = 0.3479, z_{12} = 0.3300,$$

$$z_{13} = 0.3216, z_{14} = 0.3177, z_{15} = 0.3382.$$

最后,依据式(16)对相似案例的相似度和实施效果进行集结,得到方案的综合评估值 $V_1 = 0.5125, V_2 = 0.5423, V_{12} = 0.5237, V_{13} = 0.5290, V_{14} = 0.5491, V_{15} = 0.5660$.进而,依据各综合评估值的大小可以得到相似案例的排序结果 $V_{15} > V_{14} > V_{13} > V_2 > V_{12} > V_1$,因此,选择案例 C_{15} 的方案作为最优

备选方案.

表 4 评估属性在每个时期的融合结果

案例	R_1	R_2	R_3
C_1	0.3574	0.3446	0.3356
C_2	0.3450	0.3530	0.3457
C_{12}	0.3429	0.3371	0.3094
C_{13}	0.3346	0.3109	0.3191
C_{14}	0.3407	0.3028	0.3094
C_{15}	0.3472	0.3196	0.3482

为了更好地验证本文方法的有效性,在没有考虑方案有效性及其属性相似度和案例相似度阈值的情况下,依据式(8)~(11)计算案例的属性相似度和案例相似度,结果如表5所示.

表 5 属性相似度和案例相似度

案例	$Sim(q_{01}, q_{i1})$	$Sim(q_{02}, q_{i2})$	$Sim(q_{03}, q_{i3})$	$Sim(q_{04}, q_{i4})$	$Sim(q_{05}, q_{i5})$	$Sim(q_0, q_i)$
C_1	0.7882	0.6500	0.8983	0.7000	0.9781	0.7741
C_2	0.8118	0.8500	0.6610	1.0000	0.8586	0.8453
C_3	0.8235	0.5888	0.9915	1.0000	0.8790	0.8219
C_4	0.9529	0.8500	0.5763	0.7000	0.8157	0.7944
C_5	0.6000	0.9500	0.5932	1.0000	0.8742	0.8251
C_6	0.2118	0.1500	0.7288	0.7000	0.9873	0.4848
C_7	0.6824	0.8375	0.7881	0.5000	0.9276	0.7451
C_8	0.9412	0.8375	0.8729	0.5000	0.9871	0.8185
C_9	0.9176	0.9125	0.6217	1.0000	0.1258	0.7702
C_{10}	0.5765	0.8963	0.7288	0.7000	0.7086	0.7398
C_{11}	0.4471	0.4000	0.4068	0.5000	0.7636	0.4850
C_{12}	0.8824	0.9000	0.8305	0.7000	0.8993	0.8459
C_{13}	0.9294	0.9125	0.9153	0.7000	0.9876	0.8851
C_{14}	0.8588	0.9750	0.9322	1.0000	0.9649	0.9488
C_{15}	0.8588	0.9500	0.9576	1.0000	0.9785	0.9472

从表5可知:案例 C_3, C_4 和 C_5 的相似度都高于案例 C_1 ,但是所构建的有效案集为 $C^{valid} = \{C_1, C_2, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}\}$.通过表2和专家给出的方案预估范围可知:案例 C_5 和 C_6 不在专家判断范围内.通过表5可知:案例 C_3 在属性燃烧面积(Q_2)上与目标案例的属性相似度为0.5888,低于属性相似度阈值 $\alpha_l = 0.6$,因此,过滤掉案例 C_3, C_4, C_5 后的有效案例集更能体现有效案例集的有效性;案例 C_{14} 的相似度最高,但是就多时期实施效果融合的结果而言,案例 C_{15} 的实施效果高于 C_{14} 的实施效果,因此,选择案例 C_{15} 的应急方案应对当前的突发事件更加有效.

5 结 论

本文首先运用基于决策者判断的检索方法计算目标案例与历史案例的相似度,然后运用距离熵方法集结多时期的方案实施效果,最后获得最优应急备选方案.该方法具有如下特点:1)提高了应急方案的有效性.利用决策者的专业知识过滤掉无效的历史案例,避免了误采用案例相似度高而某属性存在较大差异的历史方案作为备选方案.2)提高了实施效果评估的准确性.利用距离熵方法不仅可以对不确定信息做出更为客观的判断,而且可以融合多时期的方案实施效果,使得效果的评估更精确.3)应用价值高.最优备

选方案选自相似有效案例集,而相似有效案例集不仅保证了历史案例与目标案例的相似度,而且保证了历史案例的方案的有效性,具有较强的现实意义和适用价值.

参考文献(References)

- [1] Liu Y, Fan Z P, Yuan Y, et al. A FTA-based method for risk decision-making in emergency response[J]. Computers & Operations Research, 2014, 42(2): 49-57.
- [2] Fan Z P, Li Y H, Wang X, et al. Hybrid similarity measure for case retrieval in CBR and its application to emergency response towards gas explosion[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(5): 2526-2534.
- [3] 邓守成, 吴青, 石兵, 等. 基于案例推理的水上交通突发事件应急响应资源需求预测[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(3): 79-84.
(Deng S C, Wu Q, Shi B, et al. Prediction of resource for responding waterway transportation emergency based on case-based reasoning[J]. China Safety Science J, 2014, 24(3): 79-84.)
- [4] Liu Y, Fan Z P, Zhang Y. Risk decision analysis in emergency response: A method based on cumulative prospect theory[J]. Computers & Operations Research, 2014, 42(2): 75-82.

- [5] 陈兴, 王勇, 吴凌云, 等. 多阶段多目标多部门应急决策模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(11): 1977-1985. (Chen X, Wang Y, Wu L Y, et al. Emergency decision model with multiple stages, multiple objectives, and multidivisional cooperation[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(11): 1977-1985.)
- [6] 李永海, 樊治平, 袁媛. 考虑应急方案实施效果的突发事件应急方案生成方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(2): 275-280. (Li Y H, Fan Z P, Yuan Y. Method for generating emergency alternative with considering implementation effects of emergency alternatives[J]. Control and Decision, 2014, 29(2): 275-280.)
- [7] Teodorović D, Šelmić M, Mijatović Teodorović L. Combining case-based reasoning with bee colony optimization for dose planning in well differentiated thyroid cancer treatment[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(6): 2147-2155.
- [8] Kuo T C. Combination of case-based reasoning and analytical hierarchy process for providing intelligent decision support for product recycling strategies[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(8): 5558-5563.
- [9] Li H, Sun J. Case-based reasoning ensemble and business application: A computational approach from multiple case representations driven by randomness[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3298-3310.
- [10] Liao Z, Mao X, Hannam P M, et al. Adaptation methodology of CBR for environmental emergency preparedness system based on an improved genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(8): 7029-7040.
- [11] Yan A, Wang W, Zhang C, et al. A fault prediction method that uses improved case-based reasoning to continuously predict the status of a shaft furnace[J]. Information Sciences, 2014, 259(2): 269-281.
- [12] Fan Z P, Li Y H, Zhang Y. Generating project risk response strategies based on CBR: A case study[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 2870-2883.
- [13] 靖可, 赵希男. 基于整体优势度的应急救援案例推理决策[J]. 系统工程, 2008, 26(9): 15-20. (Jing K, Zhao X N. CBR decision for emergency rescue based on integral superiority degree[J]. Systems Engineering, 2008, 26(9): 15-20.)
- [14] 袁晓芳, 李红霞, 田水承. 基于情景分析与 CBR 的非常规突发事件应急决策关键技术研究[D]. 西安: 西安科技大学管理学院, 2011. (Yuan X F, Li H X, Tian S C. Research on key technologies of emergency decision-making for unconventional emergency based on scenario analysis[D]. College of Management, Xi'an University of Science and Technology, 2011.)
- [15] 郑晶, 王应明, 蓝以信. 考虑决策者心理行为的多时期应急决策方法[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(5): 545-555. (Zheng J, Wang Y M, Lan Y X. Decision method of generating multiperiod emergency alternative in consideration of decision maker's preference[J]. J of Systems Science and Mathematical Sciences, 2015, 35(5): 545-555.)
- [16] 郑晶, 王应明, 叶歆. 考虑应急方案总体优势度的决策方法[J]. 控制与决策, 2015, 30(7): 1239-1244. (Zheng J, Wang Y M, Ye X. A decision method for emergency alternative with considering total superiority degree[J]. Control and Decision, 2015, 30(7): 1239-1244.)
- [17] Hong T, Koo C, Kim D, et al. An estimation methodology for the dynamic operational rating of a new residential building using the advanced case-based reasoning and stochastic approaches[J]. Applied Energy, 2015, 150(7): 308-322.
- [18] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. ACM Sigmobility Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [19] 管清云, 陈雪龙, 王延章. 基于距离熵的应急决策层信息融合方法[J]. 系统工程理论实践, 2015, 35(1): 216-227. (Guan Q Y, Chen X L, Wang Y Z. Distance entropy based decision-making information fusion method[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2015, 35(1): 216-227.)
- [20] 李元年. 基于熵理论的指标体系区分度测算与权重设计[D]. 南京: 南京航空航天大学经济与管理学院, 2008. (Li Y N. Research on distinguish degree & weight designing of evaluation system based on entropy theory[D]. Nanjing: College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.)
- [21] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与 TOPSIS 集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 456-458. (Chen L, Wang Y Z. Research on TOPSIS integrated evaluation and decision method based on entropy coefficient[J]. Control and Decision, 2003, 18(4): 456-458.)
- [22] Gilboa I, Schmeidler D. Case-based decision theory[J]. The Quarterly J of Economics, 1995, 110(3): 605-639.
- [23] Gilboa I, Schmeidler D. Act similarity in case-based decision theory[J]. Economic Theory, 1997, 9(1): 47-61.
- [24] 李永海, 樊治平, 李铭洋. 解决广义不确定型决策问题的案例决策方法[J]. 系统工程学报, 2014, 29(1): 22-29. (Li Y H, Fan Z P, Li M Y. Case-based decision analysis method for general uncertain decision making problem[J]. J of Systems Engineering, 2014, 29(1): 22-29.)
- [25] 王清, 赵勇, 饶从军. 基于阈值的案例决策方法及其在创新设计中的应用[J]. 控制与决策, 2010, 25(10): 1562-1566. (Wang Q, Zhao Y, Rao C J. Case-based decision method based on threshold and its application in innovative design[J]. Control and Decision, 2010, 25(10): 1562-1566.)