

基于置信规则库的应急方案生成方法

张恺

(福建船政交通职业学院 信息工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 针对突发事件中数据存在不确定性, 应急方案生成困难的问题, 提出一种基于置信规则库方案生成的新方法。将历史案例的数据转换成置信度分布形式, 通过优化模型对历史数据进行学习得到问题与方案之间的置信规则库, 再应用基于证据推理的置信规则库推理方法获得当前突发事件的应急方案; 并以一个重大交通事故说明该方法的可行性与有效性。

关键词: 突发事件; 应急方案; 置信规则库; 重大交通事故

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)06-0584-06

Belief rule-based emergency alternative generating method

Zhang Kai

(Information Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China)

Abstract: To solve the problem of data uncertainty in emergency and the difficulty in generating emergency alternatives, a new method of generating emergency alternatives based on belief rule base was developed. The data of historical cases were transformed into a belief degree distribution form. Then, an optimization model was employed to gain the belief rule base via the relation between the problem and the solution. Furthermore, the rule-base inference methodology using the evidential reasoning was adopted to obtain the emergency alternative. Finally, a numerical example of a fatal traffic accident was used to illustrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: emergency event; emergency alternative; belief rule base; fatal traffic accident

近年来,突发事件频频发生,如:天津塘沽大爆炸、“苏迪罗”台风、四川雅安7.0级地震、北京特大暴雨等,给我国带来了严重的人员伤亡和经济损失,并给生态环境造成了一定程度的影响与破坏。因此,在突发事件刚刚发生的时候,如何快速地采用有效的应急方案进行响应,以此来最大程度地降低突发事件造成的损失,这是一个具有现实意义的研究课题。目前,关于应急决策研究常用的方法有前景理论^[1]、案例推理^[2]、博弈论^[3]等。突发事件具有不确定性、突发性、发展演变复杂等特点,往往导致有些预案失效,因此,基于案例推理的应急决策方法能快速辅助决策者

生成应急方案。需要指出的是,案例推理存在应急方案调整困难的问题,而且突发事件的信息具有不确定性和缺失性。

针对具有不确定数据信息的因果决策问题,基于证据推理的置信规则库推理方法(rule-base inference methodology using the evidential reasoning, RIMER)是一个有效的方法。RIMER是Yang等^[4]于2006年在证据推理、决策理论、模糊理论和传统IF-THEN规则库的基础上提出的,用来对模糊不确定、概率不确定性及非线性特征的数据进行建模。由于RIMER具有处理各种不确定数据的能力,因此受到了广泛的关注,比如,李

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 福建省交通运输厅科技发展项目(201319)

作者简介: 张恺(1979-),男,福建福州人,讲师,硕士,研究方向:信息管理与数据挖掘。

彬等^[5]针对库存存在非平稳需求及区间预测需求的问题,提出了基于置信规则推理的库存控制方法。Xu等^[6]针对管道泄漏检测的问题,提出了基于置信规则库的检测方法。Zhou等^[7]提出了基于隐马尔可夫模型和规则库的方法对故障进行诊断。Zhou等^[8]运用双层置信规则库方法对淋巴结点转移问题进行分类。由此可见,基于置信规则库的决策方法对于不确定性的因果关系间的决策具有一定的有效性和实用性。为此,本文提出了一种基于置信规则库的应急方案生成方法。

1 RIMER方法

RIMER方法包括两个部分,通过确定属性权重、规则权重及结论置信度的模型来构建置信规则库;应用证据推理来融合被当前前提激活的规则,以此得到当前的结论。

1.1 置信规则库的表示

RIMER方法通过置信规则库(belief rule base, BRB)系统对知识进行表达。置信规则库由一系列带有置信度的IF-THEN规则构成,能够准确地表达专家的决策行为。其中第 k 条规则 R_k 描述为:

$$R_k: \text{if } A_1^k \wedge A_2^k \wedge \cdots \wedge A_M^k, \text{ then } \{ (D_1, \beta_{1,k}), (D_2, \beta_{2,k}), \cdots, (D_N, \beta_{N,k}) \} \quad (1)$$

其中, $A_i^k (i = 1, 2, \cdots, M; k = 1, 2, \cdots, L)$ 表示第 k 条规则中第 i 个前提属性的候选值, M 表示第 k 条规则的前提属性个数, L 表示置信规则库中规则的数目; $\beta_{j,k}$ 表示第 k 条规则中相对于评价等级 D_j 的置信度。如果 $\sum_{j=1}^N \beta_{j,k} = 1$, 则称第 k 条规则是完备的, 否则称为不完备。

此外,第 k 条规则还具有属性权重 $\delta_{i,k}$,规则权重 θ_k ,基于置信结构的规则库如表1所示。

表1 基于置信结构的规则库

Tab.1 Belief structure-based rule base

规则	前置属性(权重)					结论		
	权重	$A_1(\delta_{1,k})$	$A_2(\delta_{2,k})$	\cdots	$A_M(\delta_{M,k})$	D_1	D_2	$\cdots D_N$
1	θ_1	$A_1^1(\delta_{1,1})$	$A_2^1(\delta_{2,1})$	\cdots	$A_M^1(\delta_{M,1})$	$\beta_{1,1}$	$\beta_{2,1}$	$\cdots \beta_{N,1}$
1	θ_2	$A_1^2(\delta_{1,2})$	$A_2^2(\delta_{2,2})$	\cdots	$A_M^1(\delta_{M,2})$	$\beta_{1,2}$	$\beta_{2,2}$	$\cdots \beta_{N,2}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
1	θ_L	$A_1^L(\delta_{1,L})$	$A_2^L(\delta_{2,L})$	\cdots	$A_M^L(\delta_{M,L})$	$\beta_{1,L}$	$\beta_{2,L}$	$\cdots \beta_{N,L}$

1.2 基于证据推理的规则合成

RIMER方法中推理的步骤是通过证据推理(evidential reasoning, ER)算法实现的。基于证据推理的规则合成主要分为两个部分:计算激活权重;基于证据推理的合成。

1.2.1 激活权重的计算

激活权重的计算公式如下:

$$w_k = \frac{\theta_k \prod_{i=1}^M (\alpha_i^k)^{\bar{\delta}_i}}{\sum_{l=1}^L \theta_l \prod_{i=1}^M (\alpha_i^l)^{\bar{\delta}_i}} \quad (2)$$

其中, $\bar{\delta}_i = \frac{\delta_i}{\max_{i=1,2,\cdots,M} \{\delta_i\}}$, α_i^k 为第 k 条规则中输入值的匹配度。当 $w_k = 0$ 时,表示第 k 条规则未被激活,反之,该条规则被激活。

1.2.2 基于证据推理的合成

对于激活的规则,利用证据推理进行合成,得到结果 $\{ (D_1, \beta_1), (D_2, \beta_2), \cdots, (D_N, \beta_N) \}$ 。

$$\beta_j = \frac{d \left[\prod_{k=1}^L (w_k \beta_{j,k} + 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k}) \right] - \prod_{k=1}^L 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k}}{1 - d \left[\prod_{k=1}^L (1 - w_k) \right]} \quad (3)$$

$$d^{-1} = \sum_{j=1}^N \prod_{k=1}^L (w_k \beta_{j,k} + 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k}) - (N-1) \prod_{k=1}^L 1 - w_k \sum_{j=1}^N \beta_{j,k} \quad (4)$$

由于置信度的形式很难进行比较,通过效用将其转换为精确值。设每个评价等级上的效用分别为 $\mu(D_1), \mu(D_2), \cdots, \mu(D_N)$, 则其输出的置信度可以转换为:

$$f(x) = \sum_{j=1}^N \mu(D_j) \beta_j + \frac{\mu(D_1) + \mu(D_N)}{2} \left(1 - \sum_{j=1}^N \beta_j \right) \quad (5)$$

2 问题描述

一个案例的表示通常分为两个部分:一是对突发事件应急问题的描述;二是针对突发事件问题所采用方案的描述。通常,问题与方案的描述都是采用多个特征属性进行刻画。设 $C = \{C_1, C_2, \cdots, C_n\}$ 表示案例库中有 n 个同类型的历史案例,其中 C_i 表示第 i 个历史案例, C_0 为当前突发事

件,其解决方案未知。 $C^P = \{C_1^P, C_2^P, \dots, C_m^P\}$ 表示突发事件问题的特征属性集,其中 C_j^P 表示第 j 个问题特征属性。 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ 表示关于案例 C_i 的问题属性向量,其中 x_{ij} 表示案例 C_i 的第 j 个问题属性; $x_0 = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}\}$ 表示当前突发事件的问题属性向量。 $C^s = \{C_1^s, C_2^s, \dots, C_h^s\}$ 表示突发事件方案的特征属性集,其中 C_i^s 表示第 1 个方案特征属性。 $y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ih}\}$ 表示关于案例 C_i 的方案属性向量,其中 y_{il} 表示案例 C_i 的第 1 个问题属性; $y_0 = \{y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0h}\}$ 为当前突发事件要生成的应急方案。

所要解决的问题是:依据历史案例 C_i 的问题和方案及当前突发事件 C_0 的问题,为当前突发事件生成一个有效的应急方案。

3 基于置信规则库的应急方案生成方法

为了解决上述提及的应急方案生成问题,这里提出一种基于置信规则库的应急决策方法。

首先,确定每个属性的评价等级,并把问题属性转换为置信度分布形式 $S(x_{ij}) = \{(H_{j,e}, \alpha_{j,e})\}$ 。为了计算方便,设置每个问题属性的评价等级均为 $H_j = \{H_{j1}, H_{j2}, H_{j3}\} = \{\text{Low}, \text{Medium}, \text{High}\}$,那么相应的评价等级上的评价值为 $H_{j1} = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$, $H_{j2} = (H_{j1} + H_{j3})/2$, $H_{j3} = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}$ 。确定完属性的评价等级和等级评价值后,根据文献[4]提出的信息转换方法将历史案例的问题属性 x_{ij} 转换为等级评价形式 $S(x_{ij}) = \{(H_{j,e}, \alpha_{j,e})\} (e, 1, 2, 3)$,其转换公式如下:

$$\alpha_{j,e} = \frac{H_{j,e+1} - x_{ij}}{H_{j,e+1} - H_{j,e}} \text{ 和 } \alpha_{j,e+1} = \frac{x_{ij} - H_{j,e+1}}{H_{j,e+1} - H_{j,e}} \quad (6)$$

其次,初始化置信规则库。根据属性的评价等级及其属性的个数确定置信规则库的规则数,比如评价等级为 3 个等级,那么规则数为 m^3 。由于置信规则库的结论只能表示一个方案属性的置信度,针对突发事件的方案具有 h 个属性的问题,采用 h 个置信规则库的方式进行解决,其结构如图 1 所示。设方案属性的评价等级设置为 $D_1 = \{D_{11}, D_{12}, D_{13}\} = \{\text{Low}, \text{Medium}, \text{High}\}$,其评价等级上的效用为 $\mu(D_{11}) = \min_{1 \leq i \leq m} \{y_{i1}\}$, $\mu(D_{13}) = \max_{1 \leq i \leq m} \{y_{i1}\}$, $\mu(D_{12}) = \mu(D_{11} + \mu(D_{13}))/2$ 。

然后,通过历史案例的数据来学习确定第 1

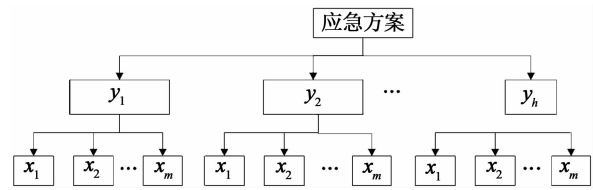


图 1 多属性应急方案生成结构图

Fig. 1 The model of generating multiple attributes emergency alternatives

个置信规则库 BRB_1 中的 3 个参数:属性权重 $\delta_{i,k}^l$ 、规则权重 θ_k^l 及其结论置信度 $\rho_{j,k}^l$,其中 $l = 1, 2, \dots, h$ 。Yang 等^[4]曾在 2007 年提出对 BRB 系统进行参数训练的模型,其主要思想是:通过数据的实际输入输出值来修正规则库中的参数,进而提高 BRB 系统的推理能力。其训练模型如图 2 所示。

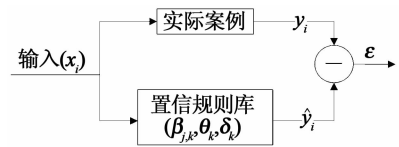


图 2 BRB 训练模型

Fig. 2 BRB training model

针对上述模型,并参考 Wang 等在文献[9]中构建的优化模型,得到优化模型如下:

$$\text{Minimize } J = \sum_{i=1}^n \varepsilon^2 = \sum_{i=1}^n (y_{il} - \bar{y}_{il})^2 \quad (7)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^N \beta_{j,k} = 1, k = 1, \dots, L, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^M \delta_{i,k} = 1, \quad (9)$$

$$0 \leq \beta_{j,k} \leq 1 \quad (10)$$

$$\delta_{i,k} \geq 0, \quad (11)$$

$$0 \leq \theta_k \leq 1, k = 1, 2, \dots, L \quad (12)$$

其中,式(7)为目标函数,表示使得实际方案的属性值与预测值之间的差异越小越好;式(8)和式(11)表示每条规则的结论部分的置信度之和为 1,且每个置信度值非负;式(9)和式(11)表示每条规则的前置属性权重之和为 1,且每个权重非负;式(12)表明置信规则库中的每条规则权重的取值范围。

最后,根据确定的置信规则库,获得当前突发事件的应急方案 $(y_{01}, y_{02}, \dots, y_{0h})$ 。将当前突发事

件的问题属性向量 $\mathbf{x}_0 = (x_{01}, y_{02}, \cdots, y_{0m})$ 根据式 (6) 转换为置信度分布形式。从确定的置信规则库中获取规则权重和属性权重, 根据式 (3) 来计算激活权重, 以此确定当前突发事件激活了置信规则库中的哪些规则。如果 $w_k \neq 0$, 表明该条规则被激活; 否则, 表明未被激活。对于被激活的规则, 其结论部分的置信度通过式 (3) ~ (4) 进行融合, 得到当前突发事件的结论置信度。为了跟实际的方案结果比较, 采用效用对置信度形式进行转换, 根据式 (5) 将融合得到的结论置信度转换为精确值。

综上所述: 基于置信规则库的应急方案生成方法的计算步骤如下:

步骤 1 根据式 (6) 将历史案例的问题属性 x_{ij} 转换为等级评价分布的形式 $S(x_{ij}) = \{(H_{j,e}, \alpha_{j,e})\}$;

步骤 2 利用历史案例的问题与方案的数据, 根据式 (7) ~ (12) 的模型来学习确定置信规则库 BRB_1 中的参数 $(\beta_{j,k}^1, \theta_k^1, \delta_{i,k}^{-1})$;

步骤 3 根据式 (6) 将当前案例的问题 x_{01} 转换成置信度的形式;

步骤 4 计算当前案例激活置信规则库中规则的权重 w_k ;

步骤 5 利用证据推理融合置信规则库中被激活的规则的结论, 并根据式 (5) 将置信度形式的结论转换为精确数 y_{01} 。

步骤 6 重复上述步骤, 获取应急方案的其他属性 $y_{02}, y_{03}, \cdots, y_{0h}$ 。

4 算例分析

以某城市的重大交通事故应急方案生成问题为背景来说明所提出方法的应用性。设某城市收集到的近年来发生的大型车辆重大交通事故有 30 个案例作为历史案例 $\{C_1, C_2, \cdots, C_{30}\}$ 。案例所涉及的突发事件问题特征包括: 伤亡人数 (C_1^P , 单位: 人)、事故车辆数目 (C_2^P , 单位: 辆)、道路拥堵情况 (C_3^P) 和财产损失 (C_4^P , 单位: 万元)。其中, 属性拥堵情况根据拥堵程度分为 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1) 5 个等级, 1 表示最拥堵, 0.2 表示拥堵程度最弱。案例所设计的突发事件应急方案问题特征包括: 出动车辆数目 (C_1^S , 单位: 辆) 和出动力量 (C_2^S , 单位: 人)。表 2 给出了历史案例的问题特征值和方案特征值的信息。为了更具比较性, 采用

历史案例的第 30 个案例作为当前突发事件, 案例 1 ~ 29 作为历史案例。针对当前突发事件的情况, 采用所提出的基于置信规则库的应急方案生成方法进行应急响应。下面给出简要的一些计算过程与结果。

表 2 关于历史案例的问题与方案特征(值)信息
Tab. 2 Attribute values of problems and alternatives of historical cases

序号	C_1^P	C_2^P	C_3^P	C_4^P	C_1^S	C_2^S
1	35	2	0.6	600	[60, 65]	131
2	50	3	0.4	950	[67, 70]	139
3	55	4	0.4	3 900	[87, 91]	179
4	60	5	0.8	5 300	[93, 100]	190
5	11	1	0.6	657	[43, 48]	90
6	45	2	0.6	1 565	[59, 63]	125
7	27	1	0.4	1 135	[55, 60]	115
8	45	3	0.2	453	[48, 56]	110
9	11	2	1	324	[43, 45]	88
10	16	2	0.8	653	[42, 48]	95
11	40	2	0.8	1 200	[56, 62]	120
12	20	2	0.6	800	[45, 48]	93
13	38	3	0.4	1 500	[60, 63]	123
14	60	4	0.2	1 000	[67, 71]	140
15	15	2	0.6	800	[43, 45]	91
16	18	3	0.4	900	[43, 45]	89
17	25	2	0.6	1 200	[47, 49]	97
18	29	3	0.8	1 500	[51, 56]	107
19	32	5	0.6	900	[63, 68]	130
20	35	3	0.8	700	[58, 62]	125
21	41	5	0.6	800	[53, 60]	115
22	47	3	0.4	1 000	[65, 75]	130
23	50	3	0.8	1 200	[69, 75]	145
24	55	2	0.6	900	[63, 72]	138
25	56	3	0.8	1 300	[67, 75]	143
26	52	2	0.4	800	[67, 72]	138
27	48	4	0.8	1 000	[68, 73]	141
28	36	4	0.8	1 200	[65, 70]	135
29	33	5	1	800	[60, 65]	125
30	37	4	0.8	1 100	[63, 66]	130

首先,依据式(6)将历史案例的问题属性转换为等级评价分布形式;

其次,针对两个方案属性,分别初始化 2 个置信规则库;

然后,根据历史案例的学习结果与其实方案属性值之间的差异来不断调整置信规则库的参数 $(\delta_{i,k}^l, \theta_k^l, \beta_{j,k}^l)$ 。当差异值已经达到阈值后停止调整,得到案例规则库。

在此基础上,依据式(6)将当前突发事件的问题属性转换为置信度分布形式,并应用 RIMER 方法得到方案属性,需要出动的车辆为[63,69]辆,需要出动的人力为 130 人。

为了更好地说明所提出方法的优越性,运用文献[10]提出的案例推理方法对该案例进行求解。计算当前案例与历史案例的属性相似度;再根据置信规则库学习的结果,给出问题属性的权重

为(0.382 0,0.123 6,0.119 5,0.374 9),计算当前案例与历史案例的案例相似度。在此基础上,根据相似度值的大小进行排序,可得到与当前案例最相似的历史案例为: C_{28} 。若采用案例 C_{28} 的方案作为应急方案,那么结果是需要出动的车辆为[65,70]辆,需要出动的力量为 135 人。

由上述可知,由所提出的方法得到 C_{30} 的结果为[63,69]和 130,基于案例推理方法得到的结果为[65,70]和 135,而 C_{30} 的实际结果为[63,66]和 130。显然,所提出的方法得到的方案比基于案例推理方法得到的方案与实际方案更接近,结果更精确。

为了说明所提出方法的精确性,将本文的历史案例作为测试数据,对比根据基于置信规则库的应急方案生成方法得到的方案与实际方案的差异,其结果如图 3、4 所示。

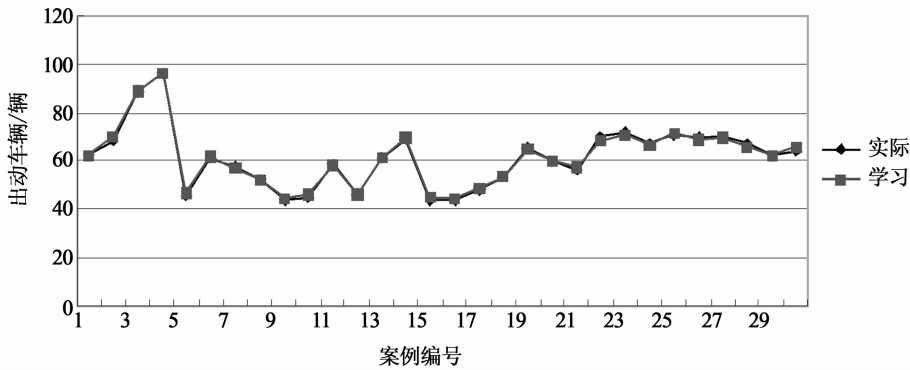


图 3 关于出动车辆数目的实际值与学习值的对比

Fig. 3 Comparison between real values and learning values of dispatched vehicles

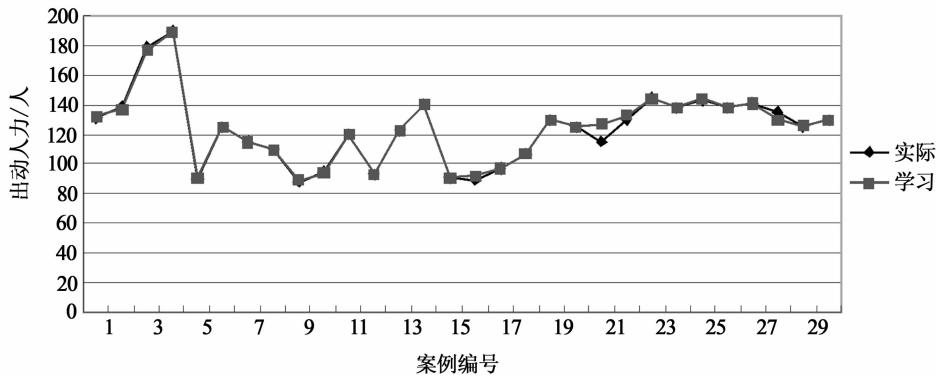


图 4 关于出动力量的实际值与学习值的对比

Fig. 4 Comparison between real values and learning values of dispatched man-power

从图3、4可知,利用所提出的基于置信规则库的方法生成的方案与实际方案之间的差异较小,只有在个别案例上的差异比较大,总体上差异较小。这样的差异对于在突发事件情况下的应急方案生成问题是可行的。

5 结论

所给出的一种基于置信规则库的应急方案生成方法,运用优化模型对历史案例进行学习得到

置信规则库,并通过基于证据推理的置信规则库推理方法计算激活权重和合成激活规则得到当前突发事件的应急方案。该方法不仅可以处理具有不确定数据信息的突发事件,而且生成应急方案的精确度较高。与已有方法相比,所提出的方法的可行性和有效性更高,也更加符合突发事件的情形。在下一步研究中,可针对基于置信规则库的动态应急方案生成问题,开展关于动态突发事件表示及置信规则库学习等方面的研究。

参考文献:

- [1] 樊治平,刘洋,沈荣鉴. 基于前景理论的突发事件应急响应的风险决策方法[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(5): 977-984.
- [2] 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.
- [3] 杨继君,吴启迪,程艳,等. 面向非常规突发事件的应对方案序贯决策[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(4): 619-624.
- [4] Yang J B, Liu J, Xu D L, et al. Optimization models for training belief-rule-based systems[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2007,37(4):569-585.
- [5] 李彬,王红卫,杨剑波,等. 基于置信规则推理的库存控制方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(7): 76-79.
- [6] Xu D L, Liu J, Yang J B, et al. Inference and learning methodology of belief-rule-based expert system for pipeline leak detection[J]. Expert Systems with Applications,2007,32(1):103-113.
- [7] Zhou Z J, Hu C H, Xu D L, et al. A model for real-time failure prognosis based on hidden Markov model and belief rule base[J]. European Journal of Operational Research,2010,207(1):269-283.
- [8] Zhou Z G, Liu F, Jiao L C, et al. A bi-level belief rule based decision support system for diagnosis of lymph node metastasis in gastric cancer[J]. Knowledge-Based Systems,2013,54:128-136.
- [9] Wang Y M, Yang J B, Xu D L, et al. Consumer preference prediction by using a hybrid evidential reasoning and belief rule-based methodology[J]. Expert Systems with Applications,2009,36(4):8421-8430.
- [10] 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.

(责任编辑:肖锡湘)