

文章编号:1005-0523(2017)03-0088-07

基于D-S证据理论的灾后公路交通生命线 多源信息融合技术

李贤钰¹, 郭忠印¹, 王璐², 苏东兰³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 云南省交通科学研究所, 云南 昆明 650216; 3. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 灾后公路交通生命线的灾情信息获取具有来源广、信息格式不一、灾情时空信息变化剧烈等特点。为了提高多源异构信息的处理精度, 提出基于信息源可靠度D-S证据理论建立的信息融合模型。通过对采集得到的不同公路交通生命线状态信息进行特征提取, 得到关于生命线状态的初步决策结果, 按照一定的融合准则以及每个信息源的可靠度进行综合判断, 获得最终的融合结果, 并以算例示范了模型的具体应用。

关键词: D-S证据理论; 多源异构; 信息融合; 信息源可靠度; 公路交通生命线

中图分类号: U491

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.03.014

随着灾后信息采集技术的发展, 卫星遥感、GPS、无线传感器等先进技术已经越来越多的应用到灾害评估和灾后道路信息采集中。但是不同来源的信息数据类型和格式各异, 包括图片、数字信号、视频、文本信息等, 并且灾后未知因素, 对生命线灾后评估影响较大。针对灾后生命线获取信息的多源异构性特点^[1], 采集到的灾害信息需要通过多源信息融合技术诊断来判断交通生命线状态。

常用的多源信息融合技术主要有 Bayes 准则、神经网络、模糊积分、传统 D-S 证据理论等。Bayes 是多传感器信息融合和优化决策的主流技术, 前提是能够获得先验概率^[2]; 神经网络^[3]在数据层的信息融合中在不确定信息推理方面具有明显优势, 但是其学习和成熟需要一定量的样本进行训练。模糊积分^[4]是一种基于对象证据与期望目标之间最大一致性的搜索算法, 但关键数据模糊密度的确定过于依赖专家主观经验, 较难得到最优结论。与其他方法相比, D-S 证据理论^[5]的优势在于它不需要先验概率和大量样本, 但是传统 D-S 证据理论的正确性受信息源间冲突影响较大。

针对现有多源信息融合技术对已知信息的过度依赖性, 进一步的灾后信息融合技术需要能够解决不精确推理过程中不同可靠性数据和信息的形式差异的问题。

1 多源信息融合层次确定

多源信息融合按照不同的处理层次可分为数据级信息融合、特征级信息融合、决策级信息融合, 不同层级所采用的融合算法不一。

数据级融合是最低层次的融合。该层级直接融合未经处理的原始观测数据, 并根据融合结果进行特征识别、决策。保证了数据的完整、准确性, 但数据量大, 处理时间较长, 导致实效性差, 难以达到理想的融合效果, 通常用于图像融合方面。

收稿日期: 2016-09-16

基金项目: 云南省交通运输厅科技计划项目(云交科 2014(A)10, 云交科 2014(A)06)

作者简介: 李贤钰(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向道路安全与环境工程。

特征级融合是中间层次的融合。该层级的融合实现了信息压缩,融合的特征结果给予决策分析坚实的基础,但不可避免损失了一部分信息。

决策级融合是最高层级的融合。该层级的融合实时性好;在一个或几个传感器失效时,仍能做出正确决策,容错性好;同样适用于异构传感器数据融合。其主要方法包括贝叶斯推理、D-S 证据理论、模糊集理论、神经网络等。决策级融合具体过程如图 1 所示,融合过程包括对信息源预处理、特征提取、判断决策、决策融合以及最终决策。

公路交通生命线多源信息融合属于决策级融合^[6],首先对每种信息采集方式进行道路特征提取,得到关于公路交通生命线状态的初步决策结果,然后按照一定的融合准则以及每个信息源的可靠度进行综合判断,获得最终的决策结果。

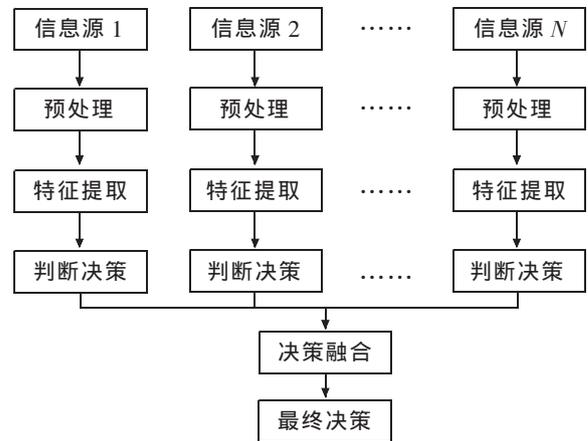


图 1 决策级融合过程

Fig.1 Decision-level fusion process

2 公路交通生命线灾情信息融合模型的构建

多源信息融合的核心思想^[7]是利用多信息源间协调互补的特点,克服单源灾情信息的不确定性及局限性。互补信息源通常包括多源异构信息,从而实现交通生命线灾情信息的不断更新和完善。公路交通生命线多源信息融合属于决策级融合,依据图 1 决策级融合过程,考虑灾后不同应急救援阶段的信息需求,以及各信息源的特性,提出多源公路交通生命线灾情信息融合模型,如图 2 所示。

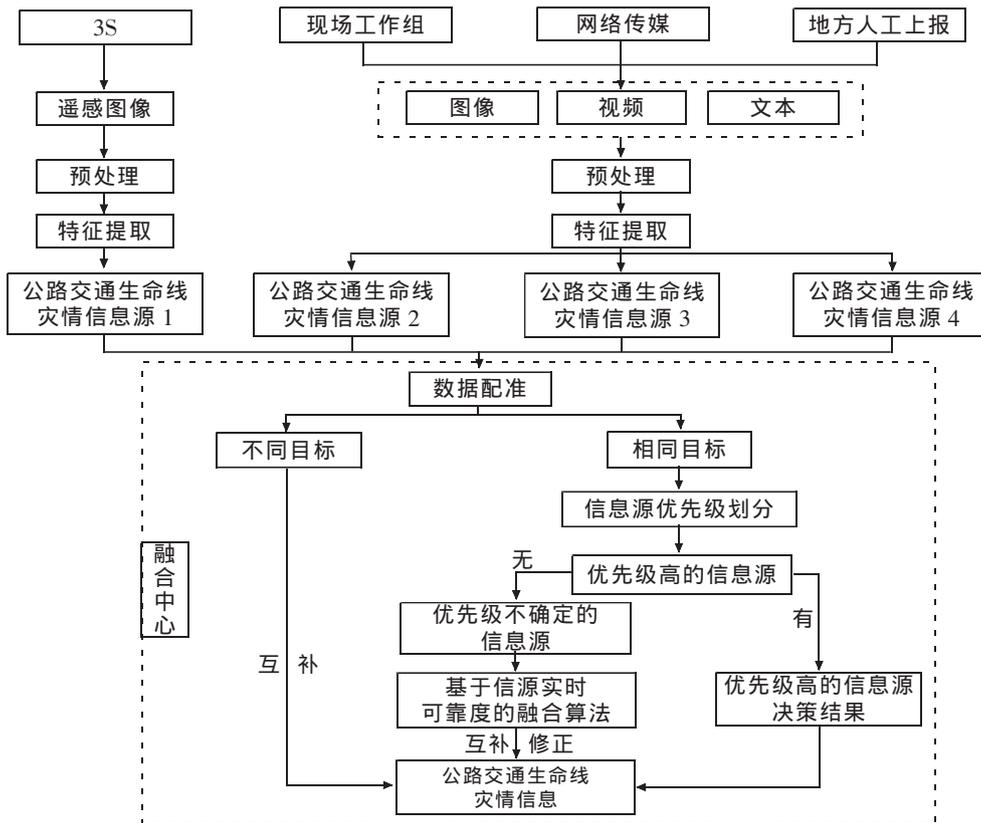


图 2 多源公路交通生命线信息融合模型

Fig.2 Information fusion model of multi-source highway traffic lifeline

2.1 信息源获取

模型中的信息源包括遥感、现场工作组、网络传媒和地方上报 4 种信息获取方式,先对获取信息相继进行预处理、特征处理,将处理后的多源生命线灾情信息输入融合中心进行配准、结合,不同路段之间信息相互补充,扩大信息覆盖区域。

2.2 数据配准

在多源特征信息融合之前需要进行数据配准,保证融合的信息是针对同一观测目标的同一位置。数据配准包括时间配准和空间配准。

时间配准即把不同信息采集方式所获得的同一目标的特征信息同步至相同时段。空间配准是将多源特征信息映射到统一的坐标系当中,将具有相同空间位置(同一目标)的特征信息配准,包括道路桩号、坐标等。

2.3 信息源优先级划分

针对同一目标的异质信息进行融合,分析每个信息源优先级排序。文中优先级排序采用顺序尺度的方法,值的大小代表优先级的高低。

若存在优先级别高的信息源,无论与其他证据是否存在冲突,都以优先级高的信息源判断结果作为最终的融合结果;若仅有优先级不确定的信息源,则利用基于信息源实时可靠度的融合方法得到更为精准的交通生命线灾情信息。

2.4 信息融合

根据融合算法确定信息源优先级不确定时的决策信息。在抢修、保通阶段,3S 及现场工作组的时效性较差,可能仅有网络传媒、地方人工上报的信息。考虑以上两种信息采集方式的特点,研究基于信息源可靠度的融合算法。

3 基于信息源可靠度的 D-S 证据理论信息融合

3.1 基于信息源可靠度的 D-S 证据理论的引入

针对传统证据理论正确性受信息源冲突影响的特点,提出改进的基于信息源可靠度的 D-S 证据理论。即将信源可靠度的量化值作为权重,分别对各基本概率分配进行加权平均,然后再使用 D-S 融合规则进行合成。根据以上理论,可将改进的 D-S 证据理论应用于网络传媒、地方人工采集的公路交通生命线多源信息融合过程之中。

3.2 基于信息源可靠度的 D-S 证据理论融合过程

1) 建立识别框架。识别框架就是对于某个对象进行判断的所有可能命题的集合,是一个互斥的非空有限集合,即 $\Theta=\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ 。考虑信息源主体的局限性^[8-9],设定多源公路交通生命线灾情信息融合的识别框架 $\Theta=\{\text{基本完好 } A_1, \text{轻微破坏 } A_2, \text{中等破坏 } A_3, \text{严重破坏 } A_4\}$ 。

2) 确定基本概率分配(BPA)。构建完整的识别框架后,需确立每个独立信息源对生命线不同破坏程度的支持度即基本概率分配(BPA),它能够很好地体现定性信息所描述的内容,需要依据实际情况灵活选择适宜的确定方法,实现定性信息向定量信息的转化。

若有 n 种信息源,则用 $m_j(A_i)$, ($i=1, 2, 3, 4; j=1, 2, \dots, n$)表示 n 个信息源对 4 种破坏程度的基本概率分配,取值范围为 $[0, 1]$,且满足

$$\sum_{i=1}^4 m_j(A_i)=1 \quad (1)$$

3) 信息源可靠度的量化。信息源的可靠度通过采集的信息间相互支持度进行量化,用多源信息间的相似性表示。

① 信息源间的相似程度是由各信息源对不同破坏程度的支持度(基本概率分配)相似性来反映。将第 j 个信息源的基本概率分配看作识别框架 Θ 中的向量 \vec{m}_j , 信息源间的相似程度即为 n 个向量间的相似度, 向量相似度可通过相关系数法求得, 信息源 m_1 及信息源 m_j 间相似度 $\text{sim}(m_1, m_j)$ 可表示为

$$\text{sim}(m_1, m_j) = \left| \frac{\sum_{i=1}^4 [m_1(A_i) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 m_1(A_i)] [m_j(A_i) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 m_j(A_i)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 [m_1(A_i) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 m_1(A_i)]^2 \cdot \sum_{i=1}^4 [m_j(A_i) - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 m_j(A_i)]^2}} \right| \quad (2)$$

式中: A_i 为公路交通生命线第 i 种破坏程度; $m_j(A_i)$ 为信息源 m_j 对第 i 种破坏程度的基本概率分配。

相似度的取值范围为 $[0, 1]$, 取值为 1 时, 表示两个信息源完全相同; 取值为 0 时, 则表示两个信息源完全冲突。

② 计算信息源相互支持度(sup)。支持度是相似度的函数, 一个信息源与其他信息源相似度越高, 则它的支持度也就越高。信息源 m_1 的支持度可表示为

$$\text{sup}(m_1) = \sum_{j=2}^n \text{sim}(m_1, m_j), j=2, 3, \dots, n \quad (3)$$

③ 计算单个信息源的可靠度(D_{crl})。一个信息源的支持度越高, 它的可靠度也就越高, 将信息源的支持度正则化即可获得信息源的可靠度, 可表示为

$$D_{\text{crl}}(m_1) = \frac{\text{sup}(m_1)}{\sum_{j=1}^n \text{sup}(m_j)} \quad (4)$$

4) 基本概率分配的修正。将可靠度 $D_{\text{crl}}(m_j)$ 作为信息源 m_j 的权重, 对基本概率分配进行加权平均。修正后的公路交通生命线不同破坏程度的支持度为 $[m'(A_1), m'(A_2), m'(A_3), m'(A_4)]$ 。

$$m'(A_i) = \sum_{j=1}^n D_{\text{crl}}(m_j) \cdot m_j(A_i) \quad (5)$$

5) D-S 融合规则。融合规则是体现多证据联合作用的一个方法, 其原理是将多个证据的基本概率分配函数进行正交和计算。

假定 m_1, m_2, \dots, m_n 是识别框架 Θ 上的 n 个基本概率分配函数, 则融合规则如式(6)所示

$$\left\{ \begin{array}{l} m(A) = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n(A) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n} \prod_{i=1}^n m_i(A_i)}{1-K} \\ m(\emptyset) = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n(\emptyset) = 0 \\ K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n} \prod_{i=1}^n m_i(A_i), K \neq 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: K 为融合规则的归一化常数, 反映了各个证据之间的冲突程度。

对修正后的基本概率分配按照 Dempster 融合规则(式(6))合成 $n-1$ 次, 得到联合作用后的公路交通生命线破坏程度的基本概率分配值为 $[m(A_1), m(A_2), m(A_3), m(A_4)]$ 。

6) 融合决策。考虑灾后公路交通生命线破坏特点, 选择基于基本概率分配的决策方法, 即选择识别框架中基本概率分配值最大的破坏程度作为最终融合结果。

4 实例分析

本节将通过实例说明公路交通生命线多源信息融合模型的具体应用。2014年5月21日,13时34分56秒,云南省德宏州龙陵县镇安镇发生7.0级地震,震源深度13 km,震中最大烈度为9度,图3是灾区路网拓扑图。

1) 灾后0~10 h(抢修阶段)。该阶段信息需求包括地震属性信息、灾区自然环境及社会环境信息等基础资料。信息需求特点为快速、宏观、准确。

地震属性信息(数字地震台网采集),具体参数如表1所示。

表1 地震属性信息
Tab.1 Seismic attribute information

震时	震中	震级	震源深度	震中烈度
2014年5月21日8时34分56秒	龙陵县镇安镇	7.0级	13 km	最大为9度

2) 灾后10~72 h(抢修阶段)。该阶段信息需求包括气象信息、灾害属性信息、公路交通生命线范围及受灾程度。

信息源 1:(日本)ALOS 光学遥感影像,分辨率为 2.5 m。

信息源 2:(新闻网)S10(节点 7-8)段有一些石头滚落,影响通行。

(微博)某验证用户,S10(节点 7-8)段出现明显裂缝。

(天涯)S10(节点 7-8)完好。

(人民网)G56 正常通行。

(新华网)G320 中断。

信息源 3:(群众上报)S10(节点 7-8)段路不通了。

(群测群防)S230 基本完好。

信息源 4:(现场应急工作组)G320(节点 15-16)被滑坡阻断约 150 m。

2) 特征提取。ALOS 光学遥感影像属于中分辨率,利用 ENVI 软件对遥感图像进行预处理(几何处理、自动配准、数字镶嵌等),获得正射纠正影像,基于面向对象的分类方法,使用软件 ENVI 从遥感图像中提取出公路交通生命线,提取流程如图 4。

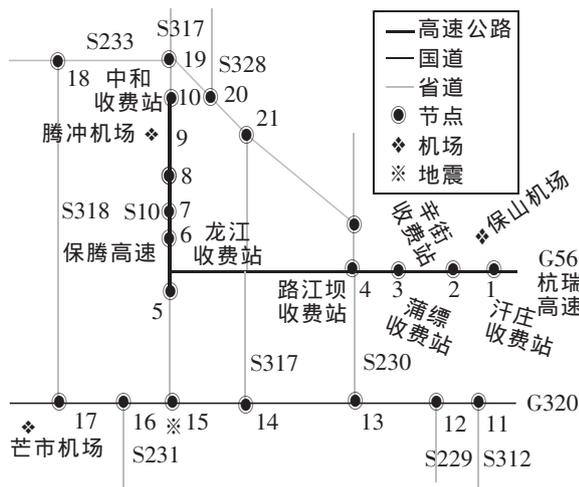


图3 龙陵县地震影响区域路网拓扑图

Fig.2 Topographic map of regional road network affected by earthquake in Longling County

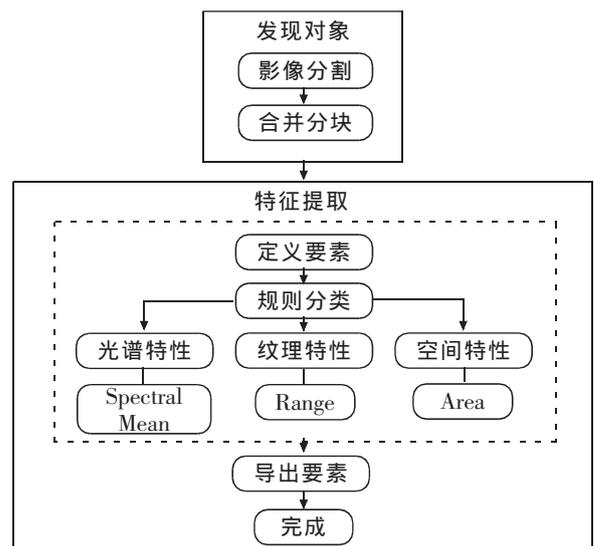


图4 基于 ENVI 的遥感图像道路信息提取流程图

Fig.4 Traffic information extraction of remote sensing image based on ENVI

根据提取结果,判断出公路交通生命线受灾范围为保腾高速(S10)、保龙高速(G56)、G320、S317、S231、S318、S230、XM44。

3) 融合过程。① 数据时空配准。将抢修阶段 10~72 h 多源信息进行时空配准,结果如表 2 所示。

表 2 配准结果
Tab.2 Registration results

信息源	S10(7-8)	G56	S230	G320(15-16)
新闻网	有一些石头滚落,影响通行	—	—	中断
微博	出现明显裂缝	—	—	—
天涯	完好	—	—	—
群众上报	路不通	—	—	—
人民网	—	正常通行	—	—
群测群防队伍	—	—	基本完好	—
现场应急工作组	—	—	—	被滑坡阻断约 150 m

② 信息源优先级。前面通过分析各信息源的时效性、几何测度、覆盖范围特点,评定在该阶段的信息源优先级如表 3 所示。

③ 融合结果。以 S10 为例进行信息融合,由于抢险阶段 3S 技术及现场工作组的时效性较差,仅有网络传媒、地方人工上报的信息。针对 S10(7-8 段)4 个信息来源均为网络传媒和地方人工上报,信息源间优先级不确定,采用基于信息源可靠度的 D-S 证据理论算法解析图 2 模型。

针对 S10(7-8 段)4 个信息来源(新闻网、微博、天涯、群众上报),记为 $m_j(j=1,2,3,4)$,建立识别框架为 $\Theta=\{\text{基本完好 } A_1, \text{中等破坏 } A_2, \text{严重破坏 } A_3, \text{毁坏 } A_4\}$,根据现有灾情信息结合专家知识,确定 4 个信息源的基本概率分配,如表 4 所示。

表 3 抢修阶段各信息源的优先级别
Tab.3 The priority level of each information source in the repair phase

采集方式	优先级
3S 技术	2
现场工作组	1
网络传媒	不确定
地方人工上报	

表 4 信息源的基本概率分配
Tab.4 Basic probability assignment of information sources

信息源	A_1	A_2	A_3	A_4
1=新闻网	0.1	0.7	0.2	0
2=微博	0.2	0.6	0.2	0
3=天涯	0.9	0.1	0	0
4=群众上报	0	0.7	0.2	0.1

根据式(2)~式(4),计算得到每个信息源的可靠度, $D_{\text{enl}}(m_1)=0.28, D_{\text{enl}}(m_2)=0.26, D_{\text{enl}}(m_3)=0.19, D_{\text{enl}}(m_4)=0.27$ 。

利用信息源可靠度对基本概率分配进行加权平均,得到修正后的概率分配 m 为中等破坏。

其他路线受损状态根据模型可依次得出,最终的融合结果如表 5 所示。融合结果满足该阶段对公路交通生命线的信息需求。

表 5 融合结果
Tab.5 Fusion results

路线编号	S10(7-8)	G56	S230	G320(16-17)
破坏程度	中等破坏	基本完好	基本完好	严重破坏

5 结论

1) 针对现有信息融合技术对已知信息的过度依赖性特点, 提出改进的基于信息源可靠度 D-S 证据理论, 解析公路交通生命线多源信息融合模型, 解决了灾后信息融合不精确推理过程中不同可靠性数据和信息的形式差异问题。

2) 以龙陵县地震为实例验证了模型的应用。将灾后公路交通生命线作为对象进行模型融合, 针对抢险阶段 3S 技术及现场工作组的时效性差的特点, 对网络传媒和地方人工上报等采集信息进行信息融合, 最终得到准确、可靠的生命线状况信息, 为指挥部门决策提供依据。

参考文献

- [1] 张勇, 高克昌. 基于遥感和 GIS 的公路水毁监测和评估技术框架[J]. 交通运输工程学报, 2010(3): 28-34.
- [2] 何友, 王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 293-296.
- [3] 马丽娜. 基于神经网络的建筑环境信息融合方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [4] 米丽萍. 基于模糊积分的多源信息融合及目标融合识别方法[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2015(2): 240-244.
- [5] 孙锐. 基于 D-S 证据理论的信息融合及在可靠性数据处理中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [6] 赵福军. 遥感影像震害信息提取技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [7] 乔彦肖, 赵志忠. 冲洪积扇与泥石流扇的遥感影像特征辨析[J]. 地理学与国土研究, 2001(3): 35-38.
- [8] 全国地震标准化技术委员会. GB/T 18208.3-2011. 地震现场工作第 3 部分: 调查规范[S]. 北京: 地震出版社, 2011.
- [9] 全国地震标准化技术委员会. GB/T 24336-2009. 生命线工程地震破坏等级划分[S]. 北京: 地震出版社, 2009.

Multi-information Fusion Technology of Highway Traffic Lifeline Based on D-S Evidence Theory

Li Xianyu¹, Guo Zhongyin¹, Wang Lu², Su Donglan³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Yunnan Transportation Research Institute, Kunming 650216, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhon University of Science and Technology, Suzhon 215011, China)

Abstract: The information collection for the post-disaster highway traffic lifeline has such characteristics as a wide range of sources, different information formats and dramatic changes. In order to improve the accuracy of multi-source heterogeneous information processing, an information fusion model based on D-S evidence theory of information source reliability was proposed. Through the feature extraction for information of different road traffic lifelines, preliminary decision results were obtained. According to certain fusion criterion and the reliability of each information source, the final fusion result was determined and illustrated with an example to verify the specific application of the model.

Key words: D-S evidence theory; multi-source heterogeneous; information fusion; information source reliability; lifeline of highway traffic

(责任编辑 姜红贵)