

引用格式:田静静,贺玉龙,曲桂娟,等.基于模糊集-证据理论-层次分析法的车辆运行风险评估[J].科学技术与工程,2019,19(32):357-363  
Tian Jingjing, He Yulong, Qu Guixian, et al. Vehicle operation risk assessment based on fuzzy set evidence theory-analytic hieracchy process [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (32) : 357-363

# 基于模糊集-证据理论-层次分析法的 车辆运行风险评估

田静静 贺玉龙\* 曲桂娟 周娟

(北京工业大学城市交通学院,北京市交通工程重点实验室,北京 100124)

**摘要** 为研究车辆运行风险等级,通过模糊集理论和 Dempster-Shafer 证据理论(D-S 证据理论),研究不同因素在不同风险等级的概率隶属值。运用层次分析法计算不同因素对车辆运行风险系统的权重值,通过加权计算车辆运行综合因素发生不同等级风险的概率和综合风险值。通过对湖南省高速公路某一路段作为实例分析。研究表明:某路段整体车辆运行风险是中等风险。因此,模糊集-证据理论-层次分析法的方法对车辆运行风险评估是行之有效的。

**关键词** 车辆运行风险评估 模糊集 D-S 证据理论 层次分析法 风险等级

**中图法分类号** U491.54; **文献标志码** A

车辆运行系统是一个动态开放的系统,包括驾驶员、车辆、道路线形以及环境条件等因素。由于多因素相互耦合、相互作用,道路交通系统抗干扰能力弱,正是系统的这种错综复杂特性的存在,使得系统的4个组成要素之间的相互关系容易失调,将会引起交通拥堵、交通阻塞、交通事故甚至交通事故等。目前交通事故数量仍然触目惊心,因此,对车辆运行风险的因素进行分析研究,从技术层面上进行车辆运行风险预测,通过信息手段传递于驾驶员以改变驾驶操作,对减少交通事故的发生和降低事故严重程度具有重要的意义。

近年来,中国国内车辆运行风险评估研究使用的方法很多。风险评估有定性方法,也有定量分析方法,定性方法主要有危险指数法、事件树分析方法、故障树分析方法等,定量方法主要有层次分析法<sup>[1]</sup>、模糊综合评价法<sup>[2]</sup>、灰色系统预测方法<sup>[3]</sup>、BP 神经网络算法<sup>[4]</sup>、行车风险场的概念<sup>[5]</sup>等。

2012年Shen等<sup>[6]</sup>建立了道路安全模型(DEA-RS)对27个欧盟国家的道路安全状况进行分析。2012年,Oh等<sup>[7]</sup>提供了一种方法评估风险高速公路路段相结合的设计速度,观察速度的变化,介绍了可靠性指数模型。同年,Taimur等<sup>[8]</sup>采用分散模型研究发现:道路路表情况、气温、冰雹强度、风速以及能

见度等因素对冬季的道路交通安全有重要影响。Ahmed等<sup>[9]</sup>在2013年通过宏观仿真高速公路网的流量模型对风险进行估计和量化,建立实时碰撞风险模型。2014年Emmanuelle等<sup>[10]</sup>基于30个欧洲国家的道路交通事故年死亡人数的研究建立了潜在的风险和趋势模型。何寿奎<sup>[11]</sup>利用D-S 证据融合算法合理地确定出城市层次各地区的交通安全风险评估等级。黄艳国等<sup>[12]</sup>运用模糊C均值聚类算法,通过先验数据与后验概率的初始聚类中心的优化,进行城市道路交通状态识别。现有的研究多是在城市层面的宏观风险评估,并且研究的因素多是单因素,未考虑车辆运行风险评估是路网层面多因素、多方面的系统评估。

现基于模糊集理论把风险等级分为五个等级,并利用隶属度函数实现不同因素在不同风险等级的概率隶属值,利用 Dempster-Shafer 证据理论(D-S 证据理论)证据融合算法,把不同专家的评估值融合一起,提高专家意见融合的效率和精度。运用层次分析法(analytic hieracchy process, AHP)计算不同因素对车辆运行风险的权重值,计算车辆运行发生不同等级风险的概率,利用加权法实现车辆运行系统风险值的计算,实现路网层面车辆运行风险评估研究。

## 1 车辆运行风险指标体系的建立

车辆运行本身就是一个涉及多方面的复杂系统,各个因素相互影响、相互作用,从安全角度出发,考虑驾驶员生理心理特征、交通流量、道路线形、天

2019年10月29日收到 国家重点研发计划(2017YFC0803903)资助  
第一作者简介:田静静,女,汉族,硕士研究生。E-mail: tianjingjing9503@126.com。

\*通信作者简介:贺玉龙,女,汉族,副教授。E-mail: ylhe@bjut.edu.cn。

气状态、异常事件等因素,研究复杂交通流及道路路网环境下车辆运行风险评估方法。分析各影响因素,从众多的因素中提炼出典型的影响因素,以此为评价车辆运行风险评估指标,构建车辆运行安全的风险综合评价体系。从影响车辆运行安全的因素入手,分析人-车-路-环境关键影响因素。

### 1.1 驾驶员因素

主要是指影响驾驶员的驾驶行为的安全因素,如驾驶员超速行驶、疲劳驾驶、酒后驾驶和为了效益超载超限等。

### 1.2 车辆性能

车辆运行的安全与车辆自身性能紧密相关,车辆的制动性影响车辆的刹车距离,操纵性能影响驾驶的平稳性,转向性能对车辆在弯道行驶至关重要。

### 1.3 道路状况

主要包括道路线形、路面状况以及安全性能。不良道路线形包括急弯陡坡、超高等因素,路况考虑道路的完好率和平整性,安全性能考虑道路的路侧设施设置的完善性。

### 1.4 环境条件

主要包括天气条件和交通流特征。对行车安全影响最大的环境因素主要是雨雪雾天气,交通流特征从包括交通流、交通组成以及车队的运行状态。

车辆运行风险归属于一种综合风险,多因素、多层次信息变化的动态性,决定了车辆运行过程中风险的复杂性、多重性。根据道路交通事故统计年报事故原因统计,基于因子分析主要从人、车、路和环境四个方面提出车辆运行的主要风险因素。共从4个方面提出14个风险指标,具体如图1所示。

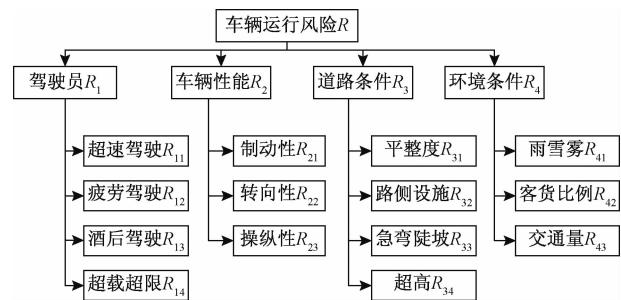


图1 车辆运行风险评估指标体系

Fig. 1 Vehicle operation risk assessment index system

## 2 车辆运行风险评估方法

### 2.1 模糊集与隶属函数

模糊集理论是美国学者扎德于1965年创立的,主要用来描述模糊现象。这种方法把待考察的对象及反映它的模糊概念作为一定的模糊集合,建立特定的隶属函数,通过模糊集合的有关运算和变换,对

模糊对象进行分析。主要利用模糊集理论的核心即隶属度函数,其特点是评价结果不是绝对肯定或否定,而是以一个模糊集合来表示。文中将采取高斯隶属度函数来反映正态分布的特性,高斯公式函数如式(1)所示:

$$y = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

利用模糊集方法把车辆运行风险分为5个等级,按照严重等级程度分别为I级(严重)、II级(较严重)、III级(中等)、IV级(一般)、V级风险(轻微),量化值定义在区间[0,1],对应不同等级的量化值分别为0.9、0.7、0.5、0.3、0.1。

根据高斯隶属度函数,求出专家对各个影响因素的评价值隶属于不同风险等级的程度。令5个不同等级对应的隶属函数的中心分别为1、0.75、0.5、0.25、0。则隶属函数分别为

$$y_I(x, \sigma) = e^{-\frac{(x-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$y_{II}(x, \sigma) = e^{-\frac{(x-0.75)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

$$y_{III}(x, \sigma) = e^{-\frac{(x-0.5)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

$$y_{IV}(x, \sigma) = e^{-\frac{(x-0.25)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

$$y_V(x, \sigma) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

进而构造14个不同指标的隶属矩阵为

$$\mathbf{H}_{R_{ij}} = [y_I(a_{ij}, \sigma_{ij}) \ y_{II}(a_{ij}, \sigma_{ij}) \ y_{III}(a_{ij}, \sigma_{ij}) \ y_{IV}(a_{ij}, \sigma_{ij}) \ y_V(a_{ij}, \sigma_{ij})] \quad (7)$$

式(7)中: $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$ 。

### 2.2 D-S 证据融合算法

D-S 证据理论算法是对概率论的扩展,由 Dempster 和 Shafer 提出,它把命题和集合的关系一一对应,把命题的不确定性转化为集合的不确定性,而证据理论处理的正是集合的不确定性,针对的是对于主观不确定性问题。

D-S 证据理论的核心是 Dempster 合成法则<sup>[13]</sup>。基于这一法则,以风险评估指标体系中的某个指标为例,讲述  $n$  个专家就这一个指标分配的风险等级隶属度的融合。对于  $\forall A \subseteq \Theta$ ,其中  $\Theta$  是指车辆运行风险等级即(I级、II级、III级、IV级、V级),多个证据  $m_1, m_2, \dots, m_n$  的融合法则为:

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1)m_2(A_2)\cdots m_n(A_n)}{1 - K}, & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_2)\cdots m_n(A_n)$

代表了多个独立证据  $m_1, m_2, \dots, m_n$  的冲突程度。

利用 Dempster 合成法则直接进行数据融合会

引起焦元爆炸问题,若要融合 $n$ 个专家的评估结果,风险分为5个等级,则公式计算需要的时间为 $O(5^n)$ ,随着专家人数的增加所需的时间会以指数形式增加;当证据之间存在较大的冲突时,即 $K$ 接近于1,直接用证据融合公式计算结果不太理想<sup>[14]</sup>。对DS算法进行改进,提出了基于矩阵分析和权值分配的DS合成算法。其中,基于矩阵分析的算法<sup>[15]</sup>用于减少计算量,基于权值分配的算法<sup>[16]</sup>用于解决证据冲突的问题。

假设有 $n$ 个专家对车辆运行系统进行风险评估,则通过高斯隶属度函数确定的基本概率分配为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{n5} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中:矩阵 $\mathbf{P}$ 中的任意元素 $p_{ij}$ 代表就车辆风险评估的某一元素而言,第 $i$ 位专家为第 $j$ 个等级的基本概率分配。

把不同家的基本概率分配融合,比如把第一位专家与第二位专家融合,用 $\mathbf{P}_1$ 的转置与 $\mathbf{P}_2$ 相乘,得到矩阵 $\mathbf{M}$ 。

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{P}_1^T \mathbf{P}_2 = \begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ \vdots \\ p_{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{21} & p_{22} & \cdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11}p_{21} & \cdots & p_{11}p_{25} \\ p_{12}p_{21} & \cdots & p_{12}p_{25} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{15}p_{21} & \cdots & p_{15}p_{25} \end{bmatrix} \quad (10)$$

矩阵 $\mathbf{M}_1$ 中的主对角线元素之和即为合成法则(8)的分子,非主对角线元素之和即为合成法则中的冲突程度 $K$ ,即完成了专家一和专家二的证据融合。

将 $\mathbf{M}_1$ 中的主对角线元素构成的列矩阵 $\mathbf{B}_1$ 与矩阵 $\mathbf{P}_3$ 相乘,即得到新的矩阵 $\mathbf{M}_2$ ,完成与第三位专家的证据融合,依次类推,求得 $n$ 位专家融合的矩阵 $\mathbf{M}_{(n-1)}$ 。则矩阵 $\mathbf{M}_{(n-1)}$ 的主对角线元素之和即为合成法则中的分子, $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_{(n-1)}$ 矩阵中所有非主对角线元素之和即为 $n$ 位专家证据融合的冲突程度 $K$ 。权值分配改进后的公式为

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \phi \\ \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1)m_2(A_2)\cdots m_n(A_n) + f(A), & A \neq \phi \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $f(A) = Kq(A)$ 是证据冲突的概率分配

函数,令 $q(A) = \frac{\sum_{i=1}^n m_i(A)}{n}$ ,代表所有证据对 $A$ 的

平均支持程度。

构造 $n$ 个专家概率分配的和矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \dots + \mathbf{P}_n$ 则五个风险等级的隶属度DS证据融合计算值为

$$m_j = M_{(n-1)j} + K \frac{H_{1j}}{n} \quad (12)$$

## 2.3 层次分析法

层次分析法(AHP)是美国运筹学家Saaty教授提出的,它是通过把定向指标量化的思想计算出层次单排序和总排序。AHP的思想是把一个复杂的目标决策问题作为一个整体,将目标层分解成多个准则层,每个准则层又分解成多个因素层。计算因素层对准则层、准则层对目标层的权重。解决多层次、多因素的决策问题。权重主要通过求解矩阵的特征向量求得,本文用层次分析法计算不同车辆风险因素对风险总目标的权重,计算步骤如下。

### 2.3.1 建立车辆运行风险层次指标

根据车辆运行风险因素的分析,目标层为车辆运行风险( $R$ ),准则层四个( $R_i, i = 1, 2, 3, 4$ ),因素层14个( $R_{ij}, i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$ )。

### 2.3.2 构建各层次的判断矩阵

针对车辆运行风险递阶层次风险模型中的指标的比较判断,根据专家打分法,分别构准则层-目标层 $R_i - R$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ )、因素层-准则层 $R_{ij} - R_i$ ;( $i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4$ )的判断矩阵。

### 2.3.3 通过特征向量计算权重

计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 所对应的特征向量 $\omega, \omega$ 经过归一化即可得出准则层-目标层、因素层-指标层的权重。

### 2.3.4 一致性检验

为了判断归一化处理后的权重是否合理,需要先判断矩阵的一致性。因此AHP中判断矩阵一致性具有一个度,一致性指标(CI)越小,那么判断矩阵的非一致性就小,权重的可靠性高。具体计算如下。

$$\text{一致性指标 } CI \text{ 计算: } CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (13)$$

$$\text{一致性比例 } CR \text{ 计算: } CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (14)$$

如果 $CR < 0.1$ ,则认为判断矩阵通过一次性检验,否则不满足要求。

### 2.3.5 处理

利用YA-AHP软件对专家的问询表数据进行处理分析,赋予相同的权重,对所有的层次单排序的指标权重进行加权算数平均得到不同因素对评估目标即车辆运行风险的权重。

### 3 实例分析

为分析所提风险评估方法的合理性和有效性,以湖南省 G4 京港澳高速公路某一路段(上行方向 K1720-K1729)为实例进行分析。该路段服务交通流量较大,小客车限速 120 km/h,货车限速 100 km/h,客货车比例较大,为双向四车道高速公路。该路段最大纵坡为 4.04%,最小纵坡为 -0.4%,最小平曲线半径为 800 m,最大为 1 000 m。部分路侧没有护栏防护措施,路堑挡墙路段无护栏防护。2014~2015 年累计发生交通事故 45 起,造成 5 人受伤,财产损失 25.28 万元。其中,阴雨天气条件下发生交通事故 37 起;驾驶人的主要过错行为是跟车距离太近,其次是能见度低的条件下驾驶不规范。事故形态主要表现为碰撞运动车辆和固定物、静止车辆,造

成路侧事故 24 起,追尾事故 18 起。事故原因主要是其他影响安全行为、违法变更车道、以及操作不当等。

请 4 位专家对风险因素进行打分,用模糊集方法和 DS 证据融合算法计算不同因素的分别对 5 个风险等级的隶属度,层次分析法进行因素层对目标层的权重计算,对车辆运行风险进行综合风险评估。

#### 3.1 模糊集与隶属函数

对车辆运行风险评估的 14 个风险因素,邀请 4 位专家给不同影响因素所处的风险等级以及对此等级赋值的不确定程度。具体赋值如表 1 所示。

根据模糊集隶属函数计算公式[式(2)~式(5)]的计算并进行归一化处理,则得到不同因素对不同风险等级的隶属度如表 2~表 5 所示。

表 1 专家评价赋值

Table 1 Expert evaluation assignment

专家意见	风险因素	$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{14}$	$R_{21}$	$R_{22}$	$R_{23}$	$R_{31}$	$R_{32}$	$R_{33}$	$R_{34}$	$R_{41}$	$R_{42}$	$R_{43}$
	风险等级	IV	III	II	V	III	V	IV	V	III	II	III	II	IV	IV
专家一	量化值	0.3	0.5	0.7	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1	0.5	0.7	0.5	0.7	0.3	0.3
	不确定程度	0.1	0.1	0.15	0.2	0.15	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.2	0.15	0.1	0.1
	风险等级	III	II	III	IV	II	IV	IV	V	IV	I	III	II	V	V
专家二	量化值	0.5	0.7	0.5	0.3	0.7	0.3	0.3	0.1	0.3	0.9	0.5	0.7	0.1	0.1
	不确定程度	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
	风险等级	IV	I	II	IV	II	III	IV	IV	III	III	III	II	III	III
专家三	量化值	0.3	0.9	0.7	0.3	0.7	0.5	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5
	不确定程度	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.2	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	风险等级	III	II	II	IV	III	V	III	IV	II	III	IV	III	IV	IV
专家四	量化值	0.5	0.7	0.7	0.3	0.5	0.1	0.5	0.3	0.7	0.5	0.3	0.5	0.3	0.3
	不确定程度	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

表 2 专家 1 基本概率分配

Table 2 Basic probability allocation of expert 1

因素	I	II	III	IV	V
$R_{11}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{12}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{13}$	0.090 0	0.629 2	0.273 4	0.007 4	0.000 0
$R_{14}$	0.000 0	0.002 9	0.076 1	0.424 6	0.496 4
$R_{21}$	0.002 6	0.165 5	0.663 8	0.165 5	0.002 6
$R_{22}$	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.348 5	0.651 1
$R_{23}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{31}$	0.000 0	0.000 1	0.019 9	0.422 4	0.557 6
$R_{32}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{33}$	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0
$R_{41}$	0.021 9	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9
$R_{42}$	0.090 0	0.629 2	0.273 4	0.007 4	0.000 0
$R_{43}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{44}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8

表 3 专家 2 基本概率分配

Table 3 Basic probability allocation of expert 2

因素	I	II	III	IV	V
$R_{11}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{12}$	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1
$R_{13}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{14}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{21}$	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0
$R_{22}$	0.000 0	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0
$R_{23}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{31}$	0.000 0	0.000 1	0.019 9	0.422 4	0.557 6
$R_{32}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{33}$	0.651 1	0.348 5	0.000 4	0.000 0	0.000 0
$R_{41}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{42}$	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1
$R_{43}$	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.348 5	0.651 1
$R_{44}$	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.348 5	0.651 1

### 3.2 D-S 证据融合

利用 D-S 证据融合算法计算,得到不同因素对不同风险等的隶属度,具体结果如表 6 所示。

表 4 专家 3 基本概率分配

Table 4 Basic probability allocation of expert 3

因素	I	II	III	IV	V
$R_{11}$	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8	0.000 0
$R_{12}$	0.348 5	0.000 4	0.000 0	0.000 0	0.374 1
$R_{13}$	0.629 2	0.273 4	0.007 4	0.000 0	0.418 5
$R_{14}$	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8	0.000 0
$R_{21}$	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0	0.833 5
$R_{22}$	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9	0.114 1
$R_{23}$	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8	0.000 0
$R_{31}$	0.007 4	0.273 4	0.629 2	0.090 0	0.004 9
$R_{32}$	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	0.037 1
$R_{33}$	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	0.037 1
$R_{41}$	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	0.037 1
$R_{42}$	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0	0.833 5
$R_{43}$	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	0.037 1
$R_{44}$	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0	0.037 1

表 5 专家 4 基本概率分配

Table 5 Basic probability allocation of expert 4

因素	I	II	III	IV	V
$R_{11}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{12}$	0.163 8	0.489 0	0.306 0	0.040 1	0.001 1
$R_{13}$	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0
$R_{14}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{21}$	0.021 9	0.228 5	0.499 1	0.228 5	0.021 9
$R_{22}$	0.000 0	0.000 0	0.000 4	0.348 5	0.651 1
$R_{23}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{31}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{32}$	0.010 8	0.857 6	0.131 5	0.000 0	0.000 0
$R_{33}$	0.002 6	0.165 5	0.663 8	0.165 5	0.002 6
$R_{41}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{42}$	0.000 0	0.040 4	0.919 2	0.040 4	0.000 0
$R_{43}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8
$R_{44}$	0.000 0	0.000 0	0.131 5	0.857 6	0.010 8

表 6 融合后基本概率分配

Table 6 Basic probability allocation after fusion

因素	I	II	III	IV	V
$R_{11}$	0.000 0	0.019 9	0.531 6	0.443 0	0.005 3
$R_{12}$	0.243 8	0.343 9	0.381 5	0.030 1	0.000 6
$R_{13}$	0.046 6	0.540 3	0.399 2	0.013 5	0.000 0
$R_{14}$	0.000 0	0.000 5	0.086 3	0.816 3	0.096 8
$R_{21}$	0.011 1	0.537 5	0.350 3	0.095 2	0.005 9
$R_{22}$	0.005 4	0.057 9	0.189 8	0.399 0	0.347 8
$R_{23}$	0.000 0	0.009 8	0.321 4	0.660 7	0.007 9
$R_{31}$	0.000 0	0.001 7	0.100 5	0.622 8	0.275 0
$R_{32}$	0.002 7	0.231 1	0.532 2	0.231 1	0.002 7
$R_{33}$	0.165 8	0.354 2	0.427 8	0.051 4	0.000 6
$R_{41}$	0.005 2	0.073 0	0.638 6	0.275 9	0.007 7
$R_{42}$	0.064 8	0.504 2	0.409 1	0.021 5	0.000 3
$R_{43}$	0.000 0	0.010 0	0.292 6	0.530 9	0.166 4
$R_{44}$	0.000 0	0.010 0	0.292 6	0.530 9	0.166 4

根据表 6 可以得到不同因素对不同风险等级的隶属度矩阵  $R_{14 \times 5}$ 。

### 3.3 层次分析法确定权重

通过 3.3 节层次分析法的计算过程,计算四位专家对所有的层次单排序的指标权重并进行加权算数平均,具体计算结果如表 7 所示。从表 7 中得到不同因素对评估目标即车辆运行风险的权重  $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{14}] = [0.007 0, 0.019 0, 0.027 6, 0.005 2, 0.204 6, 0.038 5, 0.072 5, 0.012 3, 0.018 5, 0.071 6, 0.041 9, 0.306 6, 0.124 3, 0.050 4]$ 。

表 7 不同因素权重计算

Table 7 Weight calculation results of different factors

目标层	准则层	权重	因素层	权重	总权重
		$(R_i - R)$		$(R_j - R)$	$(R_{ij} - R)$
车辆运行风险	$R_1$	0.058 7	$R_{11}$	0.118 4	0.007 0
			$R_{12}$	0.323 0	0.019 0
			$R_{13}$	0.470 7	0.027 6
			$R_{14}$	0.088 0	0.005 2
	$R_2$	0.315 6	$R_{21}$	0.648 3	0.204 6
			$R_{22}$	0.122 0	0.038 5
			$R_{23}$	0.229 7	0.072 5
			$R_{31}$	0.085 1	0.012 3
	$R_3$	0.144 2	$R_{32}$	0.128 0	0.018 5
			$R_{33}$	0.496 6	0.071 6
			$R_{41}$	0.290 3	0.041 9
			$R_{42}$	0.637 0	0.306 6
	$R_4$	0.481 4	$R_{43}$	0.258 3	0.124 3
			$R_{44}$	0.104 7	0.050 4

据层次分析法对风险因素的权重计算,可以看到 G4 京港澳高速公路(上行方向 K1720—K1729)路段雨雪雾天气是车辆运行风险的主要因素,因为雨雪雾天气会引起路面摩擦系数的减小和能见度的降低,对行车速度和车辆制动性有较大的影响。其次的风险因素是车辆的制动性能,因为制动性能的好坏决定了刹车距离,严重者可能引起连环追尾事故。其次,还提出了客货比例的风险要素,客货混合交通引起的速度差对车辆的运行有重要的影响。

### 3.4 风险分析

已知利用模糊集和 DS 证据融合算法计算得到的不同指标对不同风险等的隶属度  $R_{14 \times 5}$ 。车辆运行风险综合指标处于五个风险等的概率是  $N_{1 \times 5} = \mathbf{W}_{1 \times 14} \mathbf{R}_{14 \times 5} = [0.040 4, 0.323 6, 0.369 7, 0.217 5, 0.048 7]$ , 根据隶属度最大原则,该车辆运行系统处于Ⅲ级风险的概率最大。利用加权法求得车辆运行系统的风险值是:  $0.040 4 \times 0.9 + 0.323 6 \times 0.7 + 0.369 7 \times 0.5 + 0.217 5 \times 0.3 + 0.048 7 \times 0.1 = 0.517 8$ , 可见该路段处于中等风险等级,在雨雪雾不利天气条件下需要加强交通管控,提高行车安全,减少交通事件的发生。

## 4 结论

对车辆运行风险指标的提取,模糊集隶属函数和 DS 证据融合算法的运用,层次分析法权重值得计算,以及对 G4 某一路段的分析,得出以下结论。

(1)通过对车辆运行风险的分析,从交通事故原因数据中运用因子分析法提取了 14 个影响车辆运行风险的因素,构建了风险评价指标体系。

(2)通过模糊集分析,把车辆运行风险分为五个评价等级,并给予[0,1]风险等级赋值。

(3)在传统的层析分析法-模糊综合评价法对风险评估的基础上,引入了 DS 证据融合算法,把不同专家意见融合一起,解决了主观性带来的不确定强的冲突问题,DS 证据融合计算过程中引入了矩阵分析和权值分配的 DS 合成算法,减少了计算过程冗长和证据冲突的问题。

(4)对湖南某一高速公路路段进行风险评估,通过层次分析法计算出车辆运行风险的主要影响因素分别是:雨雪雾不利天气条件、车辆的制动性能和客货比例的大小。

(5)根据实例进行分析,判断车辆运行风险处于中等等级风险,因此,在不利天气条件下,需要加强事故预防和交通管理,从而保证车辆的运行安全。

## 参 考 文 献

- 1 陈 凤. 阖北高速公路交通安全风险评估[D]. 福州:福建农林大学, 2015  
Chen Feng. Traffic safety risk assessment of Weibei expressway [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015
- 2 耿 丽, 杨延璞, 杜 微. 基于 Fuzzy 理论的油罐车设计评价研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27):6767-6771  
Geng Li, Yang Yanpu, Du Wei. Evaluation study of oil tank vehicle design based on Fuzzy theory [J]. Science and Technology and Engineering, 2011, 11(27):6767-6771
- 3 邱兆文,李玲洁. 基于灰色理论的高速公路工程质量评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(2):262-264  
Qiu Zhaowen, Li Lingjie. Quality evaluation of expressway engineering based on grey theory [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(2): 262-264
- 4 陈 君, 丁光明. 基于 BP 神经网络的高速公路交通安全评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(7):927-931  
Chen Jun, Ding Guangming. Evaluation of highway traffic safety based on BP neural network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2008, 36(7): 927-931
- 5 王建强,吴 剑,李 洋. 基于人-车-路协同的行车风险场概念、原理及建模[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1):105-114  
Wang Jianqiang, Wu Jian, Li Yang. Concept, principle and modeling of traffic risk field based on human-car-road coordination [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 105-114
- 6 Shen Y, Hermans E, Brijs T, et al. Road safety risk evaluation and target setting using data envelopment analysis and its extensions[J]. Accident Analysis and prevention, 2012, 48(3):430-441
- 7 Oh H U, Mun S. Design speed based reliability index model for roadway safety evaluation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2012, 16(5): 845-854
- 8 Taimur U, Fu L. A disaggregate model for quantifying the safety effects of winter road maintenance activities at an operational level [J]. Accident; analysis and prevention, 2012, 48(9): 368-378
- 9 Ahmed M. A data fusion framework for real-time risk assessment on freeways[J]. Transportation Research Part C, 2013, 26 (1): 203-213
- 10 Emmanuelle D, Jacques J F C, Sylvain L, et al. Latent risk and trend models for the evolution of annual fatality numbers in 30 European countries[J]. Accident, Analysis and Prevention, 2014, 71 (1):327-336
- 11 何寿奎. 基于证据融合的城市交通安全风险综合评价[J]. 华东公路, 2007(5):63-66  
He Shoukui. Comprehensive evaluation of urban traffic safety risk based on evidence fusion [J]. East China Highway, 2007 (5): 63-66
- 12 黄艳国,罗云鹏. 基于改进 FCM 均值聚类算法的城市道路状态判别方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(9):335-346  
Huang Yanguo, Luo Yunpeng. Urban road state discrimination method based on improved FCM mean clustering algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(9):335-346
- 13 Sentz, Kari. Combination of evidence in dempster-shafer theory[J]. Contemporary Pacific, 2002, 11(2):416-426
- 14 王 娇,范科峰,莫 玮. 基于模糊集和 DS 证据理论的信息安全风险评估方法[J]. 计算机应用研究, 2017, 34 (11): 3432-3436  
Wang Jiao, Fan Kefeng, Mo Wei. Information security risk assessment method based on fuzzy set and DS evidence theory [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 34(11): 3432-3436
- 15 奚婷婷,熊伟丽,张 林,等. 基于矩阵分析的 DS 合成算法[J]. 计算机工程, 2009, 35 (16):264-266  
Xi Tingting, Xiong Weili, Zhang Lin, et al. DS synthesis algorithm based on matrix analysis [ J ]. Computer Engineering, 2009, 35 (16): 264-266
- 16 奚婷婷. 多传感器数据融合中 DS 证据理论算法的改进与应用 [D]. 无锡:江南大学, 2009  
Xi Tingting. Improvement and application of DS evidence theory algorithm in multi-sensor data fusion [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009

## Vehicle Operation Risk Assessment Based on Fuzzy Set Evidence Theory-Analytic Hierarchy Process

TIAN Jing-jing, HE Yu-long<sup>\*</sup>, QU Gui-xian, ZHOU Juan

(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, College of Metropolitan Transportation, Beijing 100124, China)

**[Abstract]** In order to study the risk level of vehicle operation, the fuzzy set theory and Dempster/Shafer (D-S) evidence theory were used to study on the probability membership values of different factors at different risk levels. The analytic hierarchy process was used to calculate the weight value of different factors to the vehicle operation risk system. Then the probability of different levels of risk and comprehensive risk value arising from the comprehensive factors of vehicle operation were calculated. One typical freeway section in Hunan province was selected. The calculation results showed the vehicle on the study section is in medium-level risk. Therefore, the fuzzy set-DS evidence theory-analytic hierarchy process(AHP) method is effective for vehicle operation risk assessment.

**[Key words]** vehicle operation risk assessment      fuzzy set theory      Dempster/Shafer (D-S) evidence theory analytic hierarchy process(AHP) risk levels