

基于三角形隶属度函数控制的高速公路汽车安全运行模糊综合评价*

张永勤¹ 孙国君¹ 张维军¹ 潘宗友¹ 周文海² 杜超飞³

(1. 兰州石化职业技术学院, 兰州 730060; 2. 兰州理工大学石油化工学院, 兰州 730050; 3. 中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

【引用】张永勤,孙国君,张维军,等. 基于三角形隶属度函数控制的高速公路汽车安全运行模糊综合评价[J].汽车文摘,2019(9):51-56.

【Citation】Zhang Y., Sun G., Zhang W., et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Safe Operation of Automobile on The Expressway Based on The Triangle Membership Function Method [J]. Automotive Digest (Chinese), 2019 (9):51-56.

【摘要】为客观掌握高速公路汽车运行安全状态,实现安全运行的动态评价和管理,选用道路交通密度、车辆的制动管道压力、电气系统故障率、转向系统故障率4个评价指标建立评价因素集,并应用模糊数学和AHP(Analytic Hierarchy Process)理论对评价对象进行量化评价。整个过程选用三角形函数控制单因素的隶属度取值,同时采用主因素决定型 $M(\wedge, \vee)$ 中的Dombi算子对模糊运算进行定义。基于连霍高速(G30)兰州至西安段某节假日50辆行驶小轿车运行状况安全评价实例证明,该方法能将安全运行状态特征信息和评价指标进行有效地关联,准确地对现实运行状况的安全性进行评价。

关键词 汽车安全运行 三角形隶属度函数 模糊综合评价 三角模算子 模糊运算符

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Safe Operation of Automobile on Expressway Based on The Triangle Membership Function Method

Zhang Yongqin¹, Sun Guojun¹, Zhang Weijun¹, Pan Zongyou¹, Zhou Wenhai², Du Chaoferi³

(1. Lanzhou Petrochemical Polytechnic, Lanzhou 730050; 2. School of Petrochemical Technology, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

【Abstract】To objectively grasp the safety state of automobile operation on expressway and realize the dynamic evaluation and management of safe operation, four evaluation indicators are selected to establish the evaluation factor set, including road traffic density, brake pipe pressure, electrical system failure rate and steering system failure rate. Fuzzy mathematics and AHP (Analytic Hierarchy Process) theory are applied to quantify the evaluation objects. In the whole process, triangle function is used to control the membership value of single factor, Meanwhile the Dombi operator which is the main factor decision type($M(\wedge, \vee)$) is used to define the fuzzy operator. Based on the example of safety evaluation of 50 cars running in Lanzhou-Xi'an section of Lianhuo expressway (G30), it is proved that this method can effectively correlate the characteristic information of safe operation state with the evaluation index, and accurately evaluate the safety of the actual operation condition.

Key words: Safe operation of automobile, Triangle membership function, Fuzzy comprehensive evaluation, Triangular norm, Fuzzy operator

1 引言

随着我国现代化进程的加快和汽车工业的飞速

发展,交通事故已成为威胁中国人生命安全主要隐患之一,特别是高速公路交通事故更为之甚。据不完全统计,每年我国交通事故高达60余万例,造成人员死

*基金项目:甘肃省自然科学基金(B061709)。

亡数约 10 万人左右,直接经济损失超过 30 亿元^[1-2]。李一兵等人^[3]搜集了 21 世纪以来中、美和欧洲的交通事故数据,通过对数据特征分析,提出了针对汽车各类特征事故的应对措施和发展趋势。Kordani 等人^[4]借助 CarSim 和 TruckSim 软件研究不同圆曲线半径、设计速度和纵坡坡度对小客车和单体货车的横向稳定性的影响,Wang 等人^[5]通过开展模拟驾驶试验,构建了不同平纵组合的线形参数下侧向加速度的回归预测模型。Furtado 等人^[6-7]采用了 VDM-road 软件,确定了在不同平纵线形组合设计中的圆曲线的最小半径。杜燕^[8]通过将无线传感器装配于行驶车辆的车胎、座椅、液压监测系统等,远程搜集汽车实时信息,达到对汽车安全运行的远程控制和监测目的。本文采用模糊数学原理,选取车辆行驶过程中的道路交通密度、车辆的制动管道压力、电气系统故障率、转向系统故障率四个因素为评价集,对车辆安全行驶状态进行模糊综合评价,整个过程选用三角形隶属度函数对单因素隶属度取值进行控制。最后将本文构建的评价系统应用于某一高速公路现场实例,以期对类似该现场汽车安全运行状况起到现实指导意义。

2 高速公路汽车安全运行的模糊综合评价

2.1 模糊综合评价方法数学模型的搭建^[9]

(1) 依据目标层特征,确定影响评价目标层的因素集 U 。另将影响评价对象的因素记作 U_i ,则数集 U 可表达为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 。

(2) 针对目标层可能出现的评价状况,确立评语集 F 。将每一因素对应 n 种评价结果记作 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。

(3) 评价矩阵的构建。逐一对影响目标层的因素集 U 进行评价,取得单一因素对评价结果的隶属度,最终确定评价矩阵。记 U_i 对 $f_i (j = 1, 2, \dots, n)$ 的隶属度为 r_{ij} ,则 U_i 的单因素评价集为 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。若有 m 个评价因素,可构建的评价矩阵为:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(4) 模糊综合评判结果。模糊综合评判集记作 D ,将因素集 U 的权重向量 W 与评价矩阵 R 通过模糊运算符“ \sqcup ”进行运算,得到评价集 $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ 最终评价结果依据最大隶属度原则,取评价集中 d_1, d_2, \dots, d_n 中的最大值对应的评语。模糊综合评判结

果模型可表达为:

$$D = W \cdot R = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$= [d_1, d_2, \dots, d_n]$
 式中,“ \cdot ”表示模糊运算符。运算符定义不同,对应于不同的模糊综合评价模型。最常用的评价模型包括两种。主因素决定型:模型为 $M(\wedge, \vee)$, 相应的 $d_j = V_{i=1}^m (\omega_i \wedge r_{ij})$; 加权平均型:模型为 $M(\cdot, \vee)$, 相应的 $d_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^m \omega_i r_{ij} \right\}$ 。

通常取 Zadeh 算子的主因素决定型定义模糊集合,而运算是通过隶属函数逐点取大、取小、取余来实现的,因此在具体处理过程中时常由于错失的信息太多而导致运算结果与问题的本质相背离。而有些三角模算子能较好地反映“逻辑与”及“逻辑或”的性质,并且不但可以凸显主要信息的影响地位,还能够兼顾非主要信息对评价结果的影响。常用的三角模算子有 Drastic 算子、Lukasiewicz 算子、Einstein 算子、Hamacher 算子、Dubois-Prade 算子、Yager 算子、Dombi 算子等^[10-11]。故本文采用主因素决定型 $M(\wedge, \vee)$ 中的 Dombi 算子对模糊运算进行定义,其“逻辑与(\wedge)”及“逻辑或(\vee)”的具体表达形式为:

$$T_{dop}(\omega_i, r_{ij}) = \begin{cases} 0, \omega_i = 0 \text{ or } r_{ij} = 0 \\ 1 / \left\{ 1 + \left[\left(\frac{1}{\omega_i} - 1 \right)^\xi + \left(\frac{1}{r_{ij}} - 1 \right)^\xi \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}^{\frac{1}{\xi}} \end{cases} \quad \text{其它} \quad (3)$$

$$S_{dov}(\omega_i, r_{ij}) = \begin{cases} 0, \omega_i = r_{ij} = 0 \\ 1, r_{ij} = 0 \text{ or } \omega_i = 0 \\ 1 + \left\{ 1 / \left[\left(\frac{1}{\omega_i} - 1 \right)^{-\xi} + \left(\frac{1}{r_{ij}} - 1 \right)^{-\xi} \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\}^{\frac{1}{\xi}} \end{cases} \quad \text{其它} \quad (4)$$

式中, ξ 为参数,要求 $\xi > 0$, 在本文中取 $\xi = 1$ 。

2.2 隶属度函数的确定

美国 TREAT 学者对汽车安全行驶影响因素研究分析指出,汽车行驶的安全状态主要由驾驶人员、道路情况和汽车自身状况 3 大因素所决定,这 3 大影响因素中最为主要的是人员因素,但是由于驾驶人员的年龄结构、驾龄等级、性别以及疲劳状况和情绪波动等都属于随机事件,并且很难对其进行量化评价,故本文对高速公路汽车安全运行进行评价时只选择涉及车辆自身状况和道路情况有关的因素进行研究分析^[12]。依据 GB 12676—1999《汽车制动系统结构、性

能和试验法》、GB 21670—2008《乘用车制动系统技术要求及试验方法》以及《中华人民共和国道路交通管理条例》^[13-14],本文最终选定交通密度、制动管道压力、电气系统故障率、转向系统故障率4个因素对高速公路汽车安全运行状况进行量化评价分析。

根据本文研究内容以及隶属度函数确定原则,选用三角形隶属度函数确定单因素评价向量中的隶属度取值,评语集取优、良、中、差4个等级^[15-16]。根据所选因素的性质又可将因素集分为越小越优型和越大越优型,其中交通密度、电气系统故障率、转向系统故障率3因素属于越小越优型;制动管道压力属于越小越优型。

(1)交通密度隶属度函数

根据《中华人民共和国道路交通管理条例》,本文采用优、良、中、差4个评价等级,对高速公路交通密度所引起的车辆安全运行状态进行量化评价。当1 km路段车辆数量小于10辆时,车辆行驶的安全性完全属于优;当车辆数量在10~23辆之间,车辆行驶安全性介于优和良的临界状态;当车辆数量在23~33辆之间,车辆行驶安全性介于良和中的临界状态;当车辆数量在33~41辆之间,车辆行驶安全性介于中和差的临界状态;当车辆数量大于41时,车辆行驶的安全性完全属于差^[17]。交通密度的隶属度函数如图1所示,公式如式(5)~(8)所示。

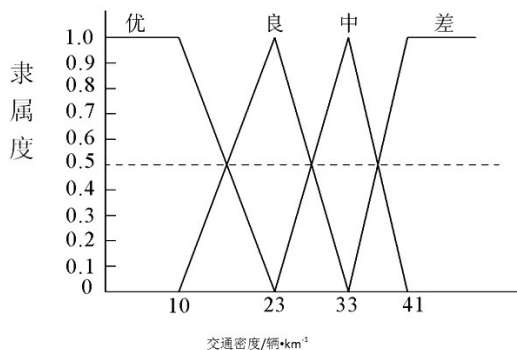


图1 交通密度隶属度函数

Fig. 1 Traffic density membership function

$$R_{11} = \begin{cases} 1 & x \leq 10 \\ -\frac{1}{13}(x-23) & 10 < x \leq 23 \\ 0 & x > 23 \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{12} = \begin{cases} 0 & x \leq 10 \\ \frac{1}{13}(x-10) & 10 < x \leq 23 \\ -\frac{1}{10}(x-33) & 23 < x \leq 33 \\ 0 & x > 33 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{13} = \begin{cases} 0 & x \leq 23 \\ \frac{1}{10}(x-23) & 23 < x \leq 33 \\ -\frac{1}{8}(x-41) & 33 < x \leq 41 \\ 0 & x > 41 \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{14} = \begin{cases} 0 & x \leq 33 \\ \frac{1}{8}(x-33) & 33 < x \leq 41 \\ 1 & x > 41 \end{cases} \quad (8)$$

(2)制动管道压力隶属度函数

国内外执行的整车制动标准对踏板力做出明确规定,要求车辆行驶中制动踏板力不应超过700 N^[13-14]。在700 N范围内,制动力越高,地面提供给轮胎的附着力也越高,即踏板压力越大,制动效果越好。当制动管道压力小于100 N时,汽车安全制动效果完全属于差;当制动管道压力在100~300 N之间时,汽车安全制动效果介于差和中的临界状态;当制动管道压力处于300~450 N之间时,汽车安全制动效果介于中和良的临界状态;当制动管道压力在450~550 N之间时,汽车安全制动效果介于良和优的临界状态;当制动管道压力大于550 N时,汽车安全制动效果完全属于优。制动管道压力的隶属度函数如图2所示,公式如式(9)~(12)所示。

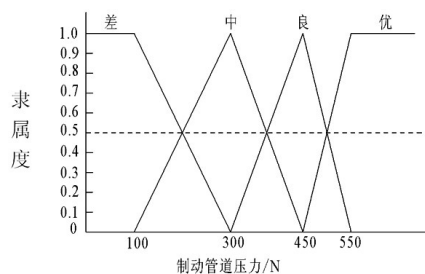


图2 制动管道压力隶属度函数

Fig. 2 Brake pipeline pressure membership function

$$R_{21} = \begin{cases} 1 & x \leq 100 \\ -\frac{1}{200}x + \frac{3}{2} & 100 < x \leq 300 \\ 0 & x > 300 \end{cases} \quad (9)$$

$$R_{22} = \begin{cases} 0 & x \leq 100 \\ \frac{1}{200}x - \frac{1}{2} & 100 < x \leq 300 \\ -\frac{1}{150}x + 3 & 300 < x \leq 450 \\ 0 & x > 450 \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{23} = \begin{cases} 0 & x \leq 300 \\ \frac{1}{150}x - 2 & 300 < x \leq 450 \\ -\frac{1}{100}x + \frac{11}{2} & 450 < x \leq 550 \\ 0 & x > 550 \end{cases} \quad (11)$$

$$R_{24} = \begin{cases} 0 & x \leq 450 \\ \frac{1}{100}x - \frac{9}{2} & 450 < x \leq 550 \\ 1 & x > 550 \end{cases} \quad (12)$$

(3) 电气系统故障率隶属度函数

当电气系统故障率小于0.29%时,汽车安全行驶状态完全属于优;当电气系统故障率处于0.29%~0.58%范围时,汽车安全行驶状态介于优和良之间;当电气系统故障率处于0.58%~1.17%范围时,汽车安全行驶状态介于中和良之间;当电气系统故障率处于1.17%~1.73%范围时,汽车安全行驶状态介于中和差之间;当电气系统故障率大于1.73%时,汽车安全行驶状态完全属于差。电气系统故障率的隶属度函数如图3所示,公式如式(13)~(16)所示。

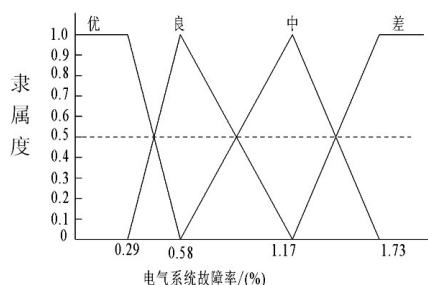


图3 电气故障率隶属度函数

Fig. 3 Electricity fault rate membership function

$$R_{31} = \begin{cases} 1 & x \leq 0.29 \\ -\frac{100}{29}x + 2 & 0.29 < x \leq 0.58 \\ 0 & x > 0.58 \end{cases} \quad (13)$$

$$R_{32} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.29 \\ \frac{100}{29}x - 1 & 0.29 < x \leq 0.58 \\ -\frac{1}{59}x + \frac{117}{59} & 0.58 < x \leq 1.17 \\ 0 & x > 1.17 \end{cases} \quad (14)$$

$$R_{33} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.58 \\ \frac{100}{59}x - \frac{58}{59} & 0.58 < x \leq 1.17 \\ -\frac{25}{14}x + \frac{173}{59} & 1.17 < x \leq 1.73 \\ 0 & x > 1.73 \end{cases} \quad (15)$$

$$R_{34} = \begin{cases} 0 & x \leq 1.17 \\ \frac{25}{14}x - \frac{117}{56} & 1.17 < x \leq 1.73 \\ 1 & x > 1.73 \end{cases} \quad (16)$$

(4) 转向系统故障率隶属度函数

当转向系统故障率小于0.36%时,汽车安全行驶状态完全属于优;当转向系统故障率处于0.36%~0.84%范围时,汽车安全行驶状态介于优和良之间;当转向系统故障率处于0.84%~1.32%范围时,汽车安

全行驶状态介于中和良之间;当转向系统故障率处于1.32%~1.81%范围时,汽车安全行驶状态介于中和差的之间;当转向系统故障率大于1.81%时,汽车安全行驶状态完全属于差。转向系统故障率的隶属度函数如图4所示,公式如式(17)~(20)所示。

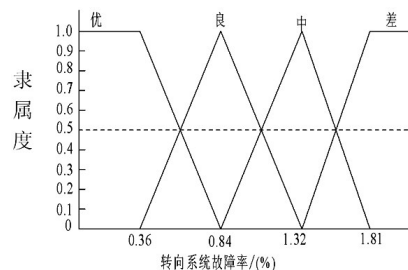


图4 转向系统故障率隶属度函数

Fig. 4 Steering fault rate membership function

$$R_{41} = \begin{cases} 1 & x \leq 0.36 \\ -\frac{25}{12}x + \frac{7}{4} & 0.36 < x \leq 0.84 \\ 0 & x > 0.84 \end{cases} \quad (17)$$

$$R_{42} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.36 \\ \frac{25}{12}x - \frac{3}{4} & 0.36 < x \leq 0.84 \\ -\frac{25}{12}x + \frac{11}{4} & 0.84 < x \leq 1.32 \\ 0 & x > 1.32 \end{cases} \quad (18)$$

$$R_{43} = \begin{cases} 0 & x \leq 0.84 \\ \frac{25}{12}x - \frac{7}{4} & 0.84 < x \leq 1.32 \\ -\frac{100}{49}x + \frac{181}{49} & 1.32 < x \leq 1.81 \\ 0 & x > 1.81 \end{cases} \quad (19)$$

$$R_{44} = \begin{cases} 0 & x \leq 1.32 \\ \frac{100}{49}x - \frac{132}{49} & 1.32 < x \leq 1.81 \\ 1 & x > 1.81 \end{cases} \quad (20)$$

2.3 指标权重的确定

本文采用层次分析法确定权重

(1) 根据通过对影响汽车安全运行状态因素的分析,结合九标度法建立判断矩阵^[18-19]。构造判断矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mm} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中 A_{i1i2} 为评价指标 i_1 相对于 i_2 的重要程度。

(2) 确定各影响因素的权重。第 i 项指标的权重可通过层次分析法得到:

$$\omega_i^1 = \frac{\sqrt[m]{\prod_{i_2=1}^m A_{i_1i_2}}}{\sum_{i_1=1}^m \sqrt[m]{\prod_{i_2=1}^m A_{i_1i_2}}} \quad (22)$$

(3)根据一致性原则对判断矩阵进行检验。具体一致性比率 C_R 的表达式为^[20]:

$$C_R = \frac{C_I}{R_I} = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} / R_I \quad (23)$$

式中: C_I 为一致性指标; R_I 为平均随机一致性指标; λ_{\max} 为因素集构建的判断矩阵对应的最大特征值, $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m \frac{(A\omega_i^1)}{n\omega_i^1}$;当 $C_R < 0.1$ 时判断矩阵通过一致性检验,此时可用最大特征值对应的归一化特征向量作为因素集的权向量,否则对判断矩阵加以调整。

3 实例分析

本文选取连霍高速(G30)兰州至西安段某节假日50辆行驶小轿车运行状况为评价对象,通过本文构建的评价系统对该50辆调查车辆整体安全运行进行量化评价。通过对道路现场交通密度观察分析和交通管理部门给出的路况数据,估算此次调研期间该路段交通密度约为31辆/km,对调研车辆驾驶员询问统计取平均值得到50辆调研车辆的制动管道压力、电气系统故障率、转向系统故障率分别为390 N、0.42%、0.57%。故,本文对此次调研车辆运行状况建立的评价对象因素集为 $U = \{31.39, 0.042, 0.59\}$ 。

步骤1:确定各指标隶属度

将建立的评价对象因素集 U 带入公式(5)~(20),经计算可得三角形隶属函数确定的评价矩阵为:

$$R_{y(\text{三角形})} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0.55 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0.56 & 0.44 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

将本文所构建的评语集定义为递减型评语集,即,评语集次序为优、良、中、差。故将评价对象 u_1 (交通密度)、 u_3 (电气系统故障率)、 u_4 (转向系统故障率)带入隶属函数计算所得隶属度值直接按照评语次序依次纳入评价矩阵 R_{ij} ;而评价对象 u_2 (制动管道压力)被带入隶属函数计算所得隶属度值首先需倒叙排列,然后依次纳入评价矩阵 R_{ij} 。

步骤2:AHP确定各指标权重

根据式(21),采用专家调查法,构造判断矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 2 & 1/2 \\ 4 & 1 & 5 & 2 \\ 1/2 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 2 & 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

根据公式(22)经计算各指标权重归一化处理后所

得权重向量为:

$$W = [0.1428 \quad 0.5067 \quad 0.0863 \quad 0.2642]$$

经计算 $CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{4.021 - 4}{4 - 1} = 0.007$,
 $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.007}{0.9} = 0.0078$, 根据公式(23)计算得
 $CR = 0.0078 < 0.1$, 判断矩阵具有可接受的一致性,不需从新调整。

步骤3:综合评价

在进行模糊运算过程中如果直接选用主因素决定型即 $M(\wedge, V)$ 时,容易忽略次要信息,只考虑主要影响因素,最终导致评价结果的偏差。故,本文采用主因素决定型 $M(\wedge, V)$ 中的Dombi算子对模糊运算进行定义,将计算所得评价矩阵 R 和归一化处理后所得权重向量 W 带入公式(2)、(3)、(4)计算可得评价结果如表1所示:

表1 模糊综合评价矩阵结果比较
Table 1 Comparison of fuzzy comprehensive evaluations

评价对象	隶属度函数分布	隶属度			
		优	良	中	差
	三角形分布	0.180	0.379	0.287	0

如果将表1中评价结果归一化处理后最终得到的评价结果为:优(0.213)、良(0.448)、中(0.339)、差(0)。根据最大隶属度原则,对本次连霍高速(G30)兰州至西安段某节假日50辆行驶小轿车运行状况评价结果可定义为良,并且依据AHP分析结果可知,影响高速公路汽车安全运行的因素按照重要程度排序依次为制动管道压力因素为0.5067、转向系统故障率因素为0.2642、交通密度因素为0.1428、电气系统故障率因素为0.0863。

4 结论

(1)采用类似表征高速公路汽车安全运行的这种线性关系的因素指标来衡量目标层评价结果时,宜选用三角形函数定义各指标隶属度,其评价结果较为符合实际状况。

(2)在进行模糊集合运算时,模糊运算符尽量避免选用传统的Zadeh算子,可根据需求选用其它类型的三角模算子,部分三角模算子能较好地反映“逻辑与”和“逻辑或”的性质,并且不但可以凸显主要信息的影响地位,还能够兼顾非主要信息对评价结果的影响。

(3)连霍高速(G30)兰州至西安段某节假日50辆行驶小轿车运行状况实例分析表明,本文所提评价指

标与方法能够根据车辆自身状况和道路情况,合理选择评价方法确定评价结果,并可依据评价指标计算值对影响因素的重要程度进行排序。

参 考 文 献

- [1] 黄席樾,陈勇,向长城,等.汽车交通事故混沌分析及预测方法[J].控制与决策,2007,22(10):1129-1133.
- [2] 公安部交通管理局.中华人民共和国道路交通事故统计年报(2014年度)[R].无锡:公安部交通管理科学研究所,2015.
- [3] 李一兵,孙岳霆,徐成亮,等.基于交通事故数据的汽车安全技术发展趋势分析[J].汽车安全与节能学报,2016,7(3):241-253.
- [4] KORDANI A A, MOLAN A M. The Effect of Combined Horizontal Curve and Longitudinal Grade on Side Friction Factors[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015,19(1):303-310.
- [5] WANG X S, WANG T, TARKO A, et al. The Influence of Combined Alignments on Lateral Acceleration on Mountainous Freeways: A Driving Simulator Study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015,76:110-117.
- [6] FURTADO G. Vehicle Stability on Combined Horizontal and Vertical Alignments[D]. Ottawa: Carleton University, 2002.
- [7] EASA S M, DABBOUR E. Design Radius Requirements for Simple Horizontal Curves on Three-dimensional Alignments [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, 30 (6) : 10022-1033.
- [8] 杜燕.基于无线传感器的汽车安全控制系统[J].内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2017,46(3):377-380.
- [9] JIN Huilan, Study on Performance Evaluation of Micro-course Teaching Team [J]. Asian Agricultural Research, 2018,10(10):102-104.
- [10] LI Yong-ming, SHI Zhong-ke. Weak uninorm aggregation operators[J]. Information Sciences, 2000, 124(1):317-323.
- [11] Yager R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18 (1):183-190.
- [12] 郭孜政,陈崇双,王欣.基于贝叶斯判别的驾驶行为危险状态辨识[J].西南交通大学学报,2009,44(5):771-775.
- [13] 国家标准化管理委员会.汽车制动系统结构、功能和试验方法:GB 12676—1999 [S].北京:中国标准化出版社,1999.
- [14] 国家标准化管理委员会.乘用车制动系统技术要求及试验方法:GB 21670—2008 [S].北京:中国标准化出版社,2008.
- [15] 张元,李敬.基于三角模糊数的民航企业“管理”安全综合评价模型研究[J].中国安全科学学报,2008,18(9):141-146.
- [16] LI Zhaojun, LI Tinghao, WANG Yujiang, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Running Status of Engine Based on Information Fusion of Vibration and Oil Physicochemical Property [J]. Proceedings of 2018 3rd International Conference on Automation, Mechanical and Electrical Engineering (AMEE 2018): 40-46.
- [17] 高云博,赵云胜,崔巍.高速公路汽车防碰撞模型仿真研究[J].中国安全生产科学技术,2009,5(4):47-50.
- [18] Yin X, Li X, Liu L, et al. A probabilistic robust mixed fuzzy control method for hypersonic vehicles based on reliability theory[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2018, 15(1):1-15.
- [19] Rubai A, Ofoli A R, Burge L, Garuba M. Hardware implementation of an adaptive network-based fuzzy controller for DC-DC converters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005,41 (6):1557-1565.
- [20] 张丽,柏萍,汪忠雨,等.基于层次分析与模糊综合评价的事故应急预案评估[J].中国安全生产科学技术,2015,11(9):126-131.

作者简介:

张永勤:讲师,现就职于兰州石化职业技术学院,主要研究方向为汽车安全性能分析,Tel-18794854051,电子邮箱:18794854051@139.com。