

基于 EWM-FCE 模型的高速公路行车风险分析

郭懿天¹, 张萌萌^{1*}, 潘景宜²

1. 山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357;

2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)经济与管理学部, 山东 济南 250353

摘要:为准确评估高速公路行车风险,综合考虑微观驾驶行为和宏观交通环境,选取速度离散度、加速度变化率、碰撞时间占比、空间占有率及中大型车占比为行车风险的评价指标,提出基于熵权法(entropy weighting method, EWM)与模糊综合评价(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)的 EWM-FCE 高速公路行车风险评价模型。通过问卷调查数据标定 EWM-FCE 模型的组合隶属度函数,以山东省某高速公路路段为例,评价此路段的行车风险,并将其评价结果与传统三角形隶属度函数及梯形隶属度函数进行对比,验证 EWM-FCE 模型的准确性。结果表明:该高速公路路段的行车风险等级为超低风险;采用组合隶属度函数的 EWM-FCE 模型相较于采用三角形隶属度函数及梯形隶属度函数时,评价结果准确率分别提高 7.5% 和 7.6%。

关键词:行车风险分析; FCE; 评价指标体系; 组合隶属度函数; 熵权法

中图分类号: U492.8⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)02-0026-08

引用格式: 郭懿天, 张萌萌, 潘景宜. 基于 EWM-FCE 模型的高速公路行车风险分析[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(2): 26-33.

GUO Yitian, ZHANG Mengmeng, PAN Jingyi. Highway traffic risk analysis based on EWM-FCE model [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(2): 26-33.

0 引言

《2023 年交通运输行业发展统计公报》显示,截至 2023 年底,我国高速公路里程达 18.36 万 km。截至 2024 年 6 月底,全国机动车保有量达 4.4 亿辆^[1]。高速公路上行车速度快,通行流量大,交通事故频发,严重影响通行效率和人民生命财产安全^[2]。作为区域交通网络的主动脉,准确评价高速公路的行车风险等级,对合理制定交通管理措施、减少潜在风险、提高运输安全至关重要。

在风险致因分析高速公路行车风险方面,Chen 等^[3]通过分析高速公路行车风险致因与交通事故的关系,发现车流量和道路因素是导致行车风险高的主要原因;胡立伟等^[4]采集车辆速度数据,分析车速变化规律与行车风险间的关系,发现行车风险与车辆加速度变化量相关;许甜等^[5]通过在高速公路上进行实车试验综合评价高速公路行车风险,结果表明车流速度离散度与行车风险相关;张诗雯等^[6]采用统计分析模型分析中大型车辆占比对行车风险的影响,发现随中大型车辆占比的增大,行车风险线性增大。

高速公路行车风险评价方法主要有最优权综合评价法、模拟风险评价法、模糊综合评价(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)法等^[7]。最优权综合评价法^[8]通过观测指标比较行车风险,并假想理想专

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52102412); 山东省自然科学基金项目(ZR2021MF019, ZR2021QF110); 山东省工业和信息化厅项目(202250101842); “新高校 20 条”自主培养创新团队项目(202333040)

第一作者简介: 郭懿天(1998—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为交通运输规划与管理、交通安全、智能交通等, E-mail: 974509691@qq.com。

* 通信作者简介: 张萌萌(1981—), 女, 山东泰安人, 教授, 硕士研究生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通规划、智能交通及大数据挖掘与分析等, E-mail: zhangmengmeng@sdjtu.edu.cn。

家对指标赋值;模拟风险评价法^[9]借助数据库技术与人工智能技术,综合各种方法评价行车风险。FCE 法基于模糊关系,采用多个指标综合评价行车风险等级隶属状况,保留单指标的评价信息,并全面考虑各指标对行车风险的影响,评价结果以向量的形式展现,提供的评价信息比其他方法更丰富。FCE 法的隶属度函数对评价结果影响较大^[10],高朝晖等^[11]根据高速公路服务水平分级表确定各指标的隶属度函数;朱博雅等^[12]、梁心雨等^[13]分别采用梯形和三角形隶属度函数,综合评价高速公路行车风险。高速公路的行车风险受多种因素共同影响,通过 FCE 法评价行车风险时,采用的隶属度函数较主观且单一,影响评价结果的准确性。

本文从宏观交通环境和微观驾驶行为分析高速公路行车风险的影响因素,建立行车风险评价指标体系,基于熵权法(entropy weighting method, EWM)计算评价指标的权重,设计调查问卷,以每份问卷的结果作为 1 次隶属占比试验,标定隶属度函数,构建 EWM-FCE 模型综合评价高速公路行车风险,以期提高行车风险评价的准确性,为高速公路主动安全预警提供科学依据和有力支撑。

1 高速公路行车风险评价指标

从高速公路交通流特性、交通事故形态和风险致因等角度出发,综合考虑并分析高速公路行车风险的主要影响因素,以微观驾驶行为下的速度离散度、急动度、碰撞时间占比,及宏观交通环境下的空间占有率、中大型车占比为指标构建高速公路行车风险评价指标体系。

1.1 速度离散度

车辆速度离散度用于描述道路上车辆速度分布的离散程度,反映车辆速度的差异性,与交通事故率呈正比^[14]。速度变异系数是速度标准差与平均速度之比,能反映速度离散度的绝对值。采用速度变异系数表征速度离散度 U_1 ,公式^[15]为:

$$U_1 = s_d / \bar{v},$$

式中: $\bar{v}$ 为车辆平均速度; s_d 为车辆速度标准差, $s_d = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_s} (v_i - \bar{v})^2 / (n_s - 1)}$, 其中, v_i 为第 i 组车辆速度, n_s 为车辆速度数据的数量。

1.2 急动度

急动度即加速度变化率,加速度变化率越大,危险性越高,发生交通事故的概率越大^[16]。车辆在高速公路上行驶时,短时间内的急加速、急减速行为均会增大行车风险^[17]。急动度

$$U_2 = a_{\max} + |a_{\min}|,$$

式中: $a_{\max}$ 为车辆最大加速度, $a_{\min}$ 为车辆最小加速度。

1.3 碰撞时间占比

高速公路最主要的交通事故形态是追尾碰撞,碰撞时间是评价碰撞风险的常用指标之一^[18-20]。从某时刻开始,前、后两车不采取任何措施至发生追尾碰撞的时间

$$t_{TTC} = v_{n-1} (t_n - t_{n-1}) / v_n,$$

式中: v_n 为后车 n 的速度, v_{n-1} 为前车 $n-1$ 的速度, t_n 为后车 n 的时间戳, t_{n-1} 为前车 $n-1$ 的时间戳。

当 $t_{TTC} < 4$ s 时,对高速公路行车安全产生潜在风险^[21]。以 30 s 为统计周期,以统计周期内跟驰车组碰撞时间小于 4 s 的个数与跟驰车组所有碰撞时间个数之比 U_3 作为行车风险评价指标。

1.4 空间占有率

空间占有率为观测路段上的车辆总长度与该路段长度之比,与车流量正相关,车流量越大,车辆间的安全距离越小,发生交通事故的概率越大^[22],空间占有率

$$U_4 = (l_d N_d + l_z N_z + l_x N_x) / (Rl),$$

式中: l_d 、 l_z 、 l_x 分别为大、中、小型车辆的长度, N_d 、 N_z 、 N_x 分别为大、中、小型车辆数, R 为车道数, l 为车道的长度。

1.5 中大型车占比

中大型车占比为观测路段上的中大型车数与车辆总数 N 之比。与小型车相比,中大型车的尺寸、动力性能、视距高度与小型车有较大差异,行驶速度小,在行驶中易给小型车驾驶员强烈压迫感,干扰小型车行驶,增大行车风险^[18,23]。中大型车占比 $U_5 = (N_d + N_z)/N \times 100\%$ 。

2 高速公路行车风险评价模型

构建 EWM-FCE 高速公路行车风险评价模型时,隶属度函数是影响模型准确性的重要因素之一,一般采用三角形隶属度函数和梯形隶属度函数,本文通过问卷调查数据标定隶属度函数,提高 EWM-FCE 模型评价的准确性。

2.1 模糊评价矩阵

建立包含 5 个等级的高速公路行车风险等级集合 $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$, 其中 $h_1 \sim h_5$ 分别为超高风险、高风险、中风险、低风险、超低风险。

构建高速公路行车风险模糊评价矩阵

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix},$$

式中: r_{mn} 为各评价对象对高速公路行车风险评价指标的隶属度, m 为评价对象数, n 为评价指标数。

2.2 EWM-FCE 评价模型

高速公路行车风险综合评价向量

$$B = (b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_m)^T = RW^T = R(w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_j \ \cdots \ w_n)^T,$$

式中: $b_1, b_2, \dots, b_m$ 分别为第 1~ m 个评价对象的综合评价结果; W 为评价指标权重向量; $w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n$ 分别为第 1~ n 个评价指标的权重, 要求满足归一化条件, 即 $\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \in [0, 1]$ 。

为避免主观赋权法影响评价准确性, 采用客观赋权方法 EWM 计算指标权重 w_j 。首先归一化处理评价指标的原始数据 x_{ij} , 正向指标归一化处理后的数据 $X_{ij}^* = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$, 负向指标归一化处理后的数据 $X_{ij}^* = (\max x_{ij} - x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$ 。

计算各评价指标的熵值

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij}^* \ln P_{ij}^*,$$

式中: P_{ij}^* 为指标比重, $P_{ij}^* = X_{ij}^* / \sum_{i=1}^m X_{ij}^*$, 若 $P_{ij}^* = 0$, 则定义 $\lim_{P_{ij}^* \rightarrow 0} P_{ij}^* \ln P_{ij}^* = 0$ 。

风险评价指标权重 $w_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n E_j, j = 1, 2, \dots, n$ 。

根据最大隶属度原则, 取高速公路行车风险评价向量 B 中最大元素对应的风险等级作为高速公路行车风险的评价结果。

2.3 隶属度函数确定

高速公路行车风险评价指标中, 任一自变量 x 对 A 的隶属度为 $A(x), A(x) \in [0, 1]$, A 为各风险等级的模糊集合, 当 x 在取值范围内变动时, $A(x)$ 为 A 的隶属度函数。

当多个不同量纲的评价指标综合评价高速公路行车风险时, 需构建隶属度函数消除各评价指标的量纲效应^[24]。本文向交通领域科研人员发放调查问卷, 要求受访者认真考虑高速公路行车风险评价指标自变量对行车风险影响的程度, 填写自变量 x 最适合评价集 H 中的风险区间。问卷采用随机抽样的方

法,共发放问卷 500 份,剔除无效问卷后得到 368 份有效问卷,问卷调查分布情况如表 1 所示。

表 1 问卷调查分布情况

风险等级	风险区间	百分比/%	累计百分比/%	风险等级	风险区间	百分比/%	累计百分比/%
超低风险	[0,0.1]	58.42	58.42	中风险	[0.2,0.5]	11.14	11.14
	[0,0.2]	41.58	100.00		[0.2,0.6]	9.51	20.65
低风险	[0.1,0.2]	19.84	19.84		[0.3,0.5]	17.39	38.04
	[0.1,0.3]	18.49	38.33		[0.3,0.6]	20.38	58.42
	[0.1,0.4]	20.11	58.44		[0.4,0.5]	17.12	75.54
	[0.2,0.2]	0.54	58.98		[0.4,0.6]	24.46	100.00
	[0.2,0.3]	19.29	78.27	高风险	[0.5,0.7]	16.85	16.85
	[0.2,0.4]	21.47	99.74		[0.5,0.8]	13.32	30.17
	[0.2,0.5]	0.26	100.00		[0.5,0.9]	15.49	45.66
超高风险	[0.7,1.0]	36.96	36.96		[0.6,0.7]	20.10	65.76
	[0.8,1.0]	31.79	68.75		[0.6,0.8]	18.48	84.24
	[0.9,1.0]	31.25	100.00		[0.6,0.9]	15.76	100.00

由表 1 可知:超低风险和超高风险的各风险区间分布较均匀;高风险等级中,风险区间[0.6,0.7]的百分比最大,为 20.10%;24.46%的受访者认为风险区间[0.4,0.6]适合中风险等级;低风险等级中,[0.1,0.4]、[0.2,0.4]2 个风险区间的百分比均大于 20%。

把 1 份调查问卷结果作为 1 次试验,若 n 次试验中覆盖各风险等级的次数为 m ,则称 m/n 为自变量 x 对各风险等级的隶属度,统计高速公路行车风险等级的隶属度,描绘为隶属度函数曲线如图 1 所示,不同风险等级的隶属度如表 2 所示。

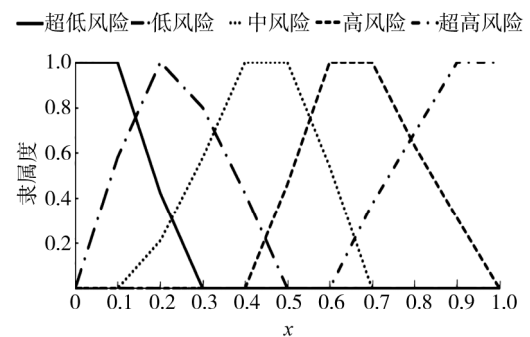


图 1 隶属度函数曲线

表 2 高速公路行车风险等级的隶属度

x	隶属度					x	隶属度				
	超低风险	低风险	中风险	高风险	超高风险		超低风险	低风险	中风险	高风险	超高风险
0	1.00	0	0	0	0	0.6	0	0	0.54	1.00	0
0.1	1.00	0.58	0	0	0	0.7	0	0	0	1.00	0.37
0.2	0.42	1.00	0.21	0	0	0.8	0	0	0	0.63	0.69
0.3	0	0.80	0.58	0	0	0.9	0	0	0	0.31	1.00
0.4	0	0.42	1.00	0	0	1.0	0	0	0	0	1.00
0.5	0	0	1.00	0.46	0						

高速公路行车风险等级超高风险、高风险、中风险、低风险、超低风险的隶属度函数 $h_1(x) \sim h_5(x)$ 分别为:

$$h_1(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 0.6 \\ (10x - 6)/3, & 0.6 \leq x < 0.9 \\ 1, & 0.9 \leq x \leq 1.0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 h_2(x) &= \begin{cases} (10 - 10x)/3, 0.7 \leq x \leq 1.0 \\ 1, 0.6 \leq x < 0.7 \\ (10x - 3)/3, 0.3 \leq x < 0.6 \\ 0, 0 \leq x < 0.3 \end{cases}, \\
 h_3(x) &= \begin{cases} 0, 0 \leq x < 0.2 \\ (10x - 2)/2, 0.2 \leq x < 0.4 \\ (7 - 10x)/3, 0.4 \leq x < 0.7 \\ 0, 0.7 \leq x \leq 1.0 \end{cases}, \\
 h_4(x) &= \begin{cases} 5x, 0 \leq x < 0.2 \\ 1, 0.2 \leq x < 0.3 \\ (5 - 10x)/2, 0.3 \leq x < 0.5 \\ 0, 0.5 \leq x \leq 1.0 \end{cases}, \\
 h_5(x) &= \begin{cases} 1, 0 \leq x < 0.1 \\ (3 - 10x)/2, 0.1 \leq x < 0.3 \\ 0, 0.3 \leq x \leq 1.0 \end{cases}.
 \end{aligned}$$

3 实例分析

以山东省内某高速公路路段为例,结合问卷调查数据与路侧实际数据综合评价此路段行车风险。

3.1 数据来源与计算

通过安装在高速公路路侧的激光雷达收集车辆速度、加速度、类型和轨迹数据,以 30 s 为统计周期计算各评价指标,共获得 123 组指标数据,部分结果如表 3 所示。根据 EWM-FCE 模型中的组合隶属函数,得到该高速公路的行车风险模糊综合评价矩阵,第 1 个周期的结果如表 4 所示。

表 3 高速公路行车风险评价指标计算结果

序号	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
1	0.28	0	0	0.04	0.33
2	0.66	0.48	0.50	0.15	0.03
3	0.07	0.33	0.18	0.30	0.37
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
122	0.52	0.31	0	0.10	0.10
123	0.52	0.32	0	0.05	0.09

表 4 第 1 个周期的高速公路行车风险模糊综合评价矩阵

指标	隶属度				
	超高风险	高风险	中风险	低风险	超低风险
U_1	0	0	0.60	0.73	0.10
U_2	0	0	0	0	1.00
U_3	0	0	0	0	1.00
U_4	0	0	0	0.20	1.00
U_5	0	0.10	0	0.85	0

通过 EWM 计算高速公路行车风险评价指标 $U_1 \sim U_5$ 的权重 $w_1 \sim w_5$, 得到指标权重向量 $\mathbf{W} = (0.197\ 1\ 0.197\ 6\ 0.203\ 6\ 0.197\ 6\ 0.204\ 1)$ 。

3.2 高速公路行车风险模糊综合评价

根据 EWM-FCE 模型,高速公路行车风险评价结果如表 5 所示。

由表 5 可知:根据最大隶属度原则,高速公路行车风险等级按频数由大到小排列依次为超低风险、中风险、低风险、高风险、超高风险,该高速公路路段的行车风险等级为超低风险,行车风险极低。

表 5 高速公路行车风险评价结果

序号	隶属度				
	超高风险	高风险	中风险	低风险	超低风险
1	0	0.020 41	0.118 26	0.357 54	0.618 51
2	0.039 42	0.451 40	0.320 06	0.198 58	0.352 30
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
122	0	0.124 84	0.177 39	0.388 57	0.605 30
123	0	0.131 44	0.177 39	0.319 09	0.605 30
频数	0	4	34	11	74

3.3 模型验证

对高速公路行车风险进行模糊综合评价时,隶属度函数对评价结果的准确性影响较大。传统的隶属度函数包括三角形隶属度函数和梯形隶属度函数,三角形隶属度函数计算简便,适用性广,但无平顶区域,无法表示稳定区间;梯形隶属度函数灵活性高,边界过渡圆滑,但无法表示非线性变化的模糊集合^[25]。根据问卷调查数据,结合三角形隶属函数和梯形隶属函数的优点,采用组合隶属度函数对高速公路行车风险进行模糊综合评价,与两种传统隶属度函数对比评价模型的准确性。

3.3.1 传统隶属度函数

分别采用三角形隶属度函数和梯形隶属度函数计算该高速公路路段的行车风险,结果如表 6、7 所示。

表 6 三角形隶属度函数下高速公路行车风险评价结果

序号	隶属度				
	超高风险	高风险	中风险	低风险	超低风险
1	0	0	0.030 62	0.350 88	0.559 28
2	0	0.157 68	0.420 86	0.069 16	0.222 89
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
122	0	0.019 71	0.187 27	0.187 72	0.404 45
123	0	0.019 71	0.197 15	0.177 84	0.464 01
频数	0	16	32	14	61

表 7 梯形隶属度函数下高速公路行车风险评价结果

序号	隶属度				
	超高风险	高风险	中风险	低风险	超低风险
1	0	0	0.061 23	0.339 97	0.598 80
2	0	0.118 26	0.480 04	0.098 80	0.302 90
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
122	0	0	0.216 86	0.177 84	0.605 30
123	0	0	0.236 62	0.158 08	0.605 30
频数	0	34	6	21	62

由表 6、7 可知:根据最大隶属度原则,三角形隶属度函数中高速公路行车风险等级按频数由大到小排列依次为超低风险、中风险、低风险、高风险、超高风险;梯形隶属度函数中,高速公路行车风险等级按频数由大到小排列依次为超低风险、高风险、低风险、中风险、超高风险。两种隶属度函数均表明该高速公路路段的行车风险等级为超低风险。

3.3.2 对比分析

采用精准率 P 、趋近率 R 和调和值 F_1 为评价模型准确性的指标,对比 EWM-FCE 模型分别采用组合隶属度函数、三角形隶属度函数和梯形隶属度函数时对高速公路行车风险评价结果的准确性。精准率 P 反映评价结果整体的准确性,趋近率 R 反映评价结果局部的准确性, F_1 为 P 与 R 的调和平均值,综合反映二者的表现, F_1 越大,说明 EWM-FCE 模型的准确性越高。

精准率

$$P = T_p / F_z,$$

式中: T_p 为最大风险等级频数, F_z 为所有风险等级频数之和。

趋近率

$$R = T_p / (T_p + F_N),$$

式中 F_N 为次大风险等级频数。

调和值 $F_1 = 2PR / (P + R)$ 。

分别计算 3 种隶属度函数下 EWM-ECF 模型的准确性指标,结果如表 8 所示。由表 8 可知:组合隶属度函数的 P 、 R 均大于三角形隶属度函数和梯形隶属度函数;组合隶属度函数的 F_1 最大,相较于两种传统隶属度函数,分别增大 7.5% 和 7.6%。表明采用组合隶属度函数的 EWM-ECF 模型准确性高于采用三角形隶属度函数和梯形隶属度函数

表 8 3 种隶属度函数下 EWM-ECF 模型的准确性指标

计算方法	P	R	F_1
三角形隶属度函数	0.496	0.656	0.565
梯形隶属度函数	0.504	0.646	0.566
组合隶属度函数	0.602	0.685	0.641

的 EWM-ECF 模型。

4 结束语

为提高高速公路交通安全,降低行车风险,以宏观交通环境下空间占有率、中大型车占比以及微观驾驶行为下的速度离散度、急动度、碰撞时间占比为指标,构建高速公路行车风险评价指标体系。采用熵权法计算各评价指标权重,建立 EWM-ECF 模型评价高速公路行车风险。通过激光雷达数据与调查问卷数据,构建 EWM-ECF 模型的组合隶属度函数,并与两种传统隶属度函数进行对比分析。结果表明,组合隶属度函数的准确率分别比三角形隶属度函数和梯形隶属度函数的准确率提高 7.5%和 7.6%。EWM-ECF 模型能准确评价高速公路行车风险等级,通过及时发布预警信息,降低潜在行车风险。

高速公路行车风险与人、车、路和环境有关,未来可采集相关行车数据开展综合评价,进一步探究多种因素对行车风险的影响,扩大评价模型的适用范围。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国公安部. 2024 年上半年全国机动车达 4.4 亿辆 驾驶人达 5.32 亿人 新能源汽车保有量达 2472 万辆 [EB/OL]. (2024-07-09) [2024-10-22]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/n9194010/c9648257/content.html>.
- [2] 张洁,张萌萌,李虹燕. 基于二元 Logistic 模型的城市道路交通事故严重程度分析[J]. 交通信息与安全,2022,40(5): 70-79.
- [3] CHEN S K, SAEED T U, ALINIZZI M, et al. Safety sensitivity to roadway characteristics: a comparison across highway classes[J]. Accident Analysis & Prevention, 2019,123:39-50.
- [4] 胡立伟,尹宇,刘泽,等. 基于速度特性的高速公路隧道入口过渡段行车安全性分析[J]. 安全与环境学报, 2021,21(6):2407-2414.
- [5] 许甜,高健强,刘建蓓,等. 车辆碰撞预警系统对行车风险的干预效果[J]. 交通信息与安全,2022,40(1):153-161.
- [6] 张诗雯,彭一川,陆健,等. 自由流条件下高速公路货车比例对交通安全的影响[J]. 武汉理工大学学报,2017,39(12):42-48.
- [7] 吴丽萍. 模糊综合评价方法及其应用研究[D]. 太原:太原理工大学,2006.
- [8] 武保林,谢晓文,王莹. 安全的相对性与企业安全性最优权综合评价模型[J]. 中国安全科学学报,1995(2):14-18.
- [9] 秦雅琴,谢碧珊,杨文臣,等. 山区公路高风险路段安全研究综述[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2020,45(3):118-127.
- [10] 寇敏,张萌萌,赵军学,等. 道路交通安全风险辨识与分析方法综述[J]. 交通信息与安全,2022,40(6):22-32.
- [11] 高朝晖,张晓春,王遥,等. 高速公路路段交通运行状态的模糊综合评价方法[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(2): 339-344.
- [12] 朱博雅,符锌砂,王晓飞. 基于模糊综合评判的高速公路改扩建工程作业区域交通安全评价[J]. 公路,2018,63(2): 249-254.
- [13] 梁心雨,郭彤,孟祥海. 基于三角模糊数权重算法的宏观交通安全评价方法[J]. 交通信息与安全,2017,35(4): 20-28.
- [14] SOLOMON D. Accidents on main rural highways related to speed, drivers, and vehicle[R]. Chicago: Bureau of Public Roads, Department of Commerce,1964.
- [15] 胡功宏,林雨,高建平. 高速公路交通流实时安全性评价[J]. 安全与环境学报,2015,15(1):57-63.
- [16] GARBER N J, NICHOLAS J, GADIRAJU R. Impact of differential speed limits on the speed of traffic and the rate of accidents[J]. Transportation Research Record,1992,1375:44-52.
- [17] 李嘉,龚瑞铭,李洁,等. 基于交通仿真的高速公路桥隧结合段交通安全评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2023,43(4):82-94.
- [18] 温惠英,黄坤火,赵胜. 基于机器学习的高速公路大型货车追尾风险预测[J]. 中国安全科学学报,2023,33(9): 173-180.

- [19] 程国柱,王婉琦,王连震,等. 车辆换道行为风险评价方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(3): 139-150.
- [20] 秦严严,肖腾飞,罗钦中,等. 雾天高速公路车辆跟驰安全分析及控制策略[J/OL]. 吉林大学学报(工学版). (2023-12-01)[2024-06-27]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230634>.
- [21] 潘恒彦,王永岗,李德林,等. 弯坡组合路段追尾事故风险评估与影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(11):36-46.
- [22] 蒋欢昕,王涛,程一一,等. 基于多指标融合的单交叉口运行状态实时评价方法[J]. 交通信息与安全,2020,38(4): 84-94.
- [23] 刘星良,单珏,刘唐志,等. 基于交通流稳定性系数的高速公路交通事故实时风险预测[J]. 交通信息与安全,2022,40(4):71-81.
- [24] 李东,罗登泽,李洪涛,等. 基于模糊综合评价法的堰塞湖开发可行性评价[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(增刊1):147-153.
- [25] 徐斌,周家祥,朱鸣. 道路交通安全的模糊综合评价研究[J]. 科学技术与工程,2009,9(6):1647-1652.

Highway traffic risk analysis based on EWM-FCE model

GUO Yitian¹, ZHANG Mengmeng^{1*}, PAN Jingyi²

1. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Faculty of Economics and Management, Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China

Abstract: In order to accurately evaluate the risk of highway driving, considering micro driving behavior and macro traffic environment, speed dispersion, acceleration change rate, collision time proportion, space occupancy rate, and proportion of medium and large vehicles are selected as evaluation indicators of driving risk. The EWM-FCE model based on entropy weighting method (EWM) and fuzzy comprehensive evaluation (FCE) is proposed. The combined membership function of the model is calibrated through questionnaire survey data, taking a certain highway section in Shandong Province as an example, to evaluate the driving risk of this section, and the evaluation results are compared with the traditional triangular membership function and trapezoidal membership function to verify the accuracy of the EWM-FCE model. The results show that the driving risk level of this highway section is ultra-low risk; the EWM-FCE model using the combined membership function improves the accuracy of the evaluation results by 7.5% and 7.6%, respectively, compared with the triangular and trapezoidal membership functions.

Keywords: driving risk analysis; FCE; evaluation indicator system; combined membership function; EWM

(责任编辑:赵玉真)