

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.003

智能网联汽车开放测试道路交通安全评价研究^{*}

蔡云^{1,2}, 吴澳琪^{1,2}, 滕金润^{1,2}, 张又水^{1,2}, 陈森^{1,2}

(1.西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2.汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘要: 随着智慧城市建设的推进,道路交通向智能化、网联化转型,对开放测试道路的交通安全评价体系的研究变得愈发紧迫。文中针对智能网联汽车开放测试道路安全具有随机性、复杂性、模糊性等特点,通过德尔菲法确定人、车辆、道路、环境、云端五大因素和 19 个下属二级指标,构建智能网联汽车开放测试道路安全评价体系,使用层次熵权-可拓模型进行组合评价,建立智能网联汽车开放测试道路评价模型,并将该模型应用于成都市大运直联通道。结果表明,大运直联通道交通安全风险等级为 II 级,最大关联度为 0.010 1,整体呈低风险态势,与实际情况较为相符。该评价模型具有一定的应用价值,可对智能网联汽车开放测试道路安全评价起到指导作用。

关键词: 交通安全;智能网联汽车;道路安全评价;层次熵权法;物元可拓模型

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)01-0017-08

随着智能网联汽车技术的不断发展和普及,其在道路上的应用越来越广泛。在智能网联汽车开发和应用过程中,须进行多方面的测试以确保其安全性和可靠性^[1]。智能网联汽车开放测试是指在现实道路环境下对智能网联汽车进行测试评价,旨在验证其安全性、可靠性、适应性等性能,其中道路安全评价特别重要。

常用的道路安全评价方法有灰色关联法^[2]、层次分析法^[3]、主成分分析法^[4]、模糊综合评价法^[5]、云模型法^[6]、物元分析法^[7]、神经网络法^[8]等。Vorko-Jović A.等研究了道路、环境、信号灯、管理等因素对道路交通安全的影响程度^[9]。Pei Y. L.等对熵权系数法进行改进,采用模糊综合评价法建立了城市冰雪道路交通安全综合评价模型^[10]。Xia J. F.等分析人、车、路、环境、规章制度对交通安全的影响,构建了交通事故因果评价指标体系^[11]。

目前对智能网联汽车测试道路的研究集中在封闭测试场软硬件方面。Chen Y.等开发了一个集车辆动力学模型、传感器模型、通信模型、控制算法、虚拟仿真器为一体并可以模拟各种复杂驾驶场景和情况的智能网联汽车封闭测试场平台^[12]。Reitz B. C.等测试了多种驾驶场景和情况,包括直线驾驶、转弯、加速和减速等,同时考虑了其他车辆和行人的存在,分析了封闭测试道路对于自动驾驶汽车测试的

重要性和价值^[13]。宗晨宏等基于 PreScan 仿真软件、SketchUp 三维绘图软件及 MATLAB/Simulink 建模软件,建立封闭式智能网联环境下 4 种典型测试场景的 18 种测试工况,研究了封闭式智能网联汽车测试场对智能网联汽车自动驾驶性能测试的可靠性^[14]。

智能网联汽车开放测试道路交通事故的发生是由多种相互关联的风险源耦合所致,单一的因素不具备表征其整体交通安全的条件,且智能网联汽车开放测试道路安全评价是多要素、多层次的,是具有复杂随机性、定量与定性结合的综合评价问题。为此,本文引入可以综合考虑各指标之间关系的层次分析法,同时考虑到层次分析法的主观色彩较强,对于客观数据的处理较弱^[15],而熵权法能更客观地评价各指标对决策的影响程度^[16],使用层次熵权组合模型优化权重分配。鉴于物元可拓模型能够充分考虑决策问题中的不确定性、模糊性和复杂性等因素,且能将定性的非数值问题转化为可以计算的形式,实现定性、定量的转换^[17],将层次熵权和物元可拓模型应用于复杂成因下的智能网联汽车开放测试道路安全评价,解决主、客观权重不均的问题,并体现一定的模糊和随机性,为智能网联汽车开放测试道路安全评价提供新的方法。

^{*} 基金项目: 四川省科技计划项目(2022YFG0095); 龙泉驿社规划项目(2023ZD-02); 教育部产学研合作协同育人项目(220600805242815)

1 智能网联汽车开放测试道路交通安全评价指标体系

智能网联汽车开放测试道路配备有高精度地图、无线通信网络及能模拟真实路况环境的基础设施和装备,可以用于测试智能网联汽车的自动驾驶、车联网、安全性能等关键技术及其性能^[18]。智能网联汽车开放测试道路的安全评价因素包括道路基础设施、设计规范^[19]、路况环境^[20]、车辆性能^[21]、安全措施和测试人员素质^[22]等,对这些因素进行评估和安排,可以提高道路的安全性和可靠性,为智能网联汽车的发展提供更好的支持。

1.1 智能网联汽车开放测试道路安全评价初始指标确定

智能网联汽车开放测试道路独有的云端控制系统(以下简称云端)可以实现人-车-路-云系统协同控制,不仅为单车决策提供有效信息,还可扩展到在全路网对所有交通参与者进行控制和引导,提升整体交通效率和安全性。普通道路安全评价主要从人、车辆、道路、环境 4 个方面进行评价,而云端作为智能网联汽车开放测试道路车路协同的主控系统,对道路安全的影响较大,故将该指标纳入一级指标,初步建立表 1 所示智能网联汽车开放测试道路交通安全评价指标体系。

1.2 道路安全指标筛选

为了保证评价模型的普遍有效性,评价指标筛选应遵循目的性、系统性、可行性和适用性原则^[23]。在文献查阅和实地调研的基础上,通过邮件方式对 23 位参与过这类项目的专家学者进行意见征询,采用德尔菲法^[24]分别计算表 1 中指标的均值、标准差和变异系数,结果见图 1。

剔除变异系数大于 0.25 和均值小于 3.5 的指标,确立最终的评价指标体系。将影响智能网联开放测试道路安全的因素分为 5 个维度,分别从人、车辆、道路、环境和云端入手细化为 19 个二级指标,构建图 2 所示智能网联汽车开放测试道路多级评价指标体系。

2 基于层次熵权-物元可拓模型的道路交通安全评价模型

对智能网联汽车开放测试道路安全进行评价,首先构建道路安全指标层次体系,然后将层次分析法与熵权法组合确定各级指标的权重;通过建立物

表 1 智能网联汽车开放测试道路交通安全评价
初选指标体系

目标层	一级指标	二级指标	评价指标编号
智能网联汽车 开放测试道路 交通安全评价	人	驾驶员	1
		行人	2
		交通管理者	3
		乘客	4
		智能网联汽车	5
	车辆	传统机动车	6
		非机动车	7
		道路线形	8
	道路	路基路面	9
		横断面形式	10
		交通标志标线	11
		交叉口	12
	环境	安全设施	13
		气象环境	14
		交通流环境	15
		信号环境	16
		人文环境	17
	云端	交通云控平台	18
		交管平台	19
		地图平台	20
		路侧感知及通信设备	21
		公安平台	22
		出行服务平台	23

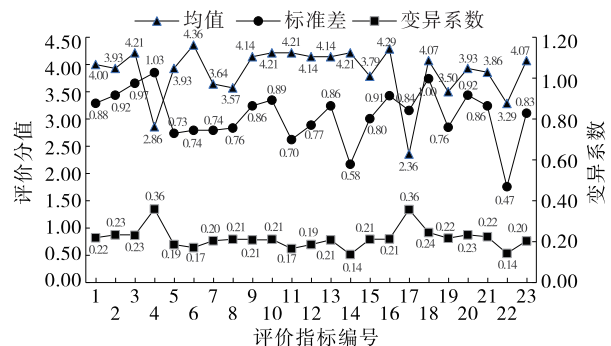


图 1 评价指标的均值、标准差和变异系数

元矩阵、道路安全评价等级标准和经典域、节域,计算一级指标和二级指标的关联度,得出智能网联汽车开放测试道路安全评价结果(见图 3)。

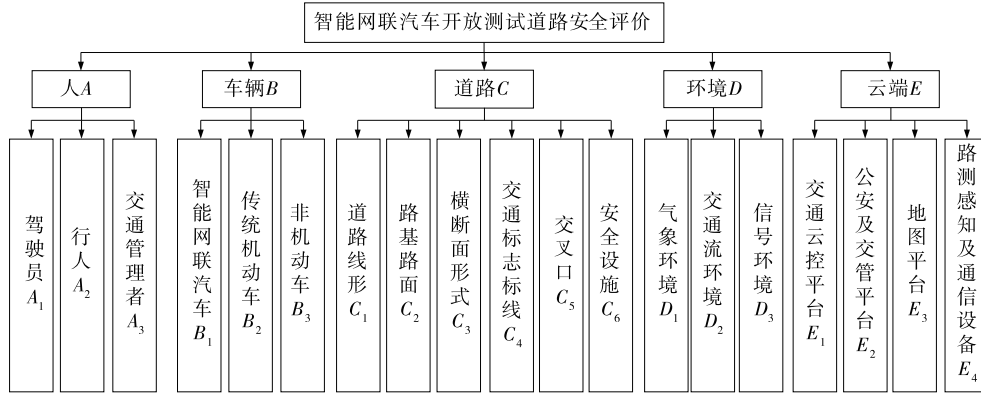


图2 智能网联开放测试道路安全评价指标体系

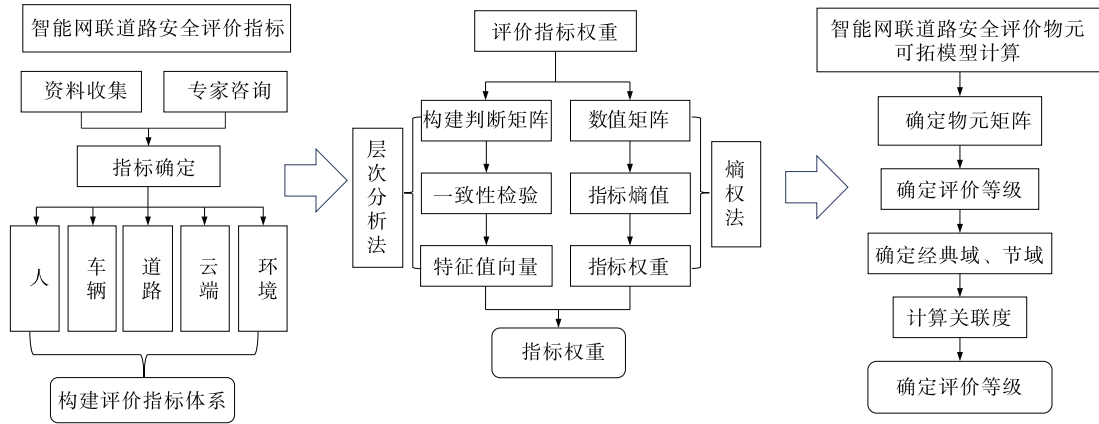


图3 智能网联汽车开放测试道路安全评价流程

2.1 层次熵权组合权重

2.1.1 层次法权重计算

(1) 构建判断矩阵 A 。从一级指标层开始,对于从属于上一层每个同一层要素指标,采用成对比较法和1~9标度法构建对比矩阵,直到二级指标层。

(2) 计算权重系数。对判断矩阵 A 每行元素连乘并开 n 次方得到 ω_j ,再求权重 ω_j° ,公式如下:

$$\omega_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (1)$$

$$\omega_j^\circ = \frac{\omega_j^*}{\sum_{j=1}^n \omega_j^*} \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (2)$$

(3) 一致性检验。按式(3)计算一致性指标 I_{CI} 。为衡量 I_{CI} 的大小,引入随机一致性指标 I_{RI} , I_{RI} 按式(4)计算。按式(5)计算检验系数 R_{CR} ,如果 $R_{CR} < 0.1$,则认为该判断矩阵通过一致性检验。

$$I_{CI} = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: λ 为最大特征值; n 为矩阵的阶数。

$$I_{RI} = \frac{I_{CI1} + I_{CI2} + \dots + I_{CI_n}}{n} \quad (4)$$

式中: I_{CI1} 、 I_{CI2} 、 \dots 、 I_{CI_n} 分别表示随机生成的 n 个比较矩阵的 I_{CI} 值; n 表示比较矩阵的数量。

$$R_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} \quad (5)$$

2.1.2 熵权法权重计算

在考虑多个指标的情况下,熵值越大的指标所包含的信息量越少,对决策结果影响越小;熵值越小的指标所包含的信息量越多,对决策结果影响越大^[25]。熵值计算步骤:

(1) 确定评价对象,建立评价指标体系,构造水平矩阵 R' 。设模型有 n 个二级评价指标,有 m 个一级评价指标, X_{ij} ($i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n$) 为第 i 个一级评价指标下第 j 个评价指标的值,形成 $m \times n$ 阶评价指标数值矩阵 X_{ij} 。

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) 标准化。为避免指标量纲不同,对正向指标通过式(7)进行标准化,负向指标通过式(8)进行标准化。

$$L_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

$$L_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中: L_{ij} 为标准化后的 X_{ij} ; X_{\min} 、 X_{\max} 分别为同准则同要素指标值的最小值、最大值。

(3) 计算指标熵值。按式(9)计算评价单元下第 j 个二级评价指标占第 i 个一级评价指标的比重值 T_{ij} , 按式(10)计算第 j 个评价指标输出的熵 E_j 。

$$T_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sum_{i=1}^m L_{ij}} \quad (9)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m T_{ij} \ln T_{ij} \quad (10)$$

(4) 计算指标权重。 E_j 越大, 其权重越小, 据此得指标 j 的权重 ω_j^* 为:

$$\omega_j^* = \frac{1 - E_j}{\sum_{i=1}^n (1 - E_j)} \quad (11)$$

2.1.3 组合权重计算

层次分析法通过专家打分、指标比较进行赋权, 结合了专家经验, 对智能网联汽车开放测试道路交通安全要素刻画了大致的权重分配, 但其主观色彩较强。熵权法根据各指标实际观测值的分散程度, 利用信息熵计算各指标的熵权, 从而得到较客观的指标权重。将层次法权重与熵权法权重进行组合计算, 将主、客观权重结合, 可弥补智能网联汽车开放测试道路交通安全评价中主、客观权重不均的问题。计算公式如下:

$$\omega_j = \varphi \omega_j^{\circ} + (1 - \varphi) \omega_j^* \quad (12)$$

式中: j 为指标数, $j=1, 2, 3, \dots, n$; φ 为常数系数, 取 0.5; ω_j° 为层次法权重; ω_j^* 为熵权法权重。

2.2 物元可拓评价模型

2.2.1 确定物元矩阵

物元评价模型由可拓理论发展而来, 是一种通过建立多因素质量参数评价模型, 直观、精准地反映事物综合水平的定量评估方法^[26]。物元是事物 N 、事物特征 C 和特征量值 V 组成的三元组, 记作 $\mathbf{R} = (N, C, V)$ 。

2.2.2 确定经典域、节域

设事物共有 m 个待评价指标 c_1, c_2, \dots, c_m , 每个指标分为 n 个等级, 得到综合评价物元模型, 即经典域:

$$\mathbf{R}_j = (N_j, C, V_{jk}) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{jm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & (a_{jm}, b_{jm}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: \mathbf{R}_j 为由 N_j 、 C 、 V_{jk} 组成的物元, 为经典域; N_j 为智能网联开放测试道路安全第 j 个评价等级; C 表示智能网联开放测试道路安全评价指标集; V_{jk} 为评价指标集 C 关于安全等级 N_j 的取值范围; a_{jm} 、 b_{jm} 分别为智能网联开放测试道路评价指标 c_i 在第 j 安全等级的上限值和下限值。

对各指标的允许取值范围进行综合评价, 得到物元模型, 即节域:

$$\mathbf{R}_p = (N_p, C, V_p) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{pk} \end{bmatrix}_{n \times 2} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & c_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & (a_{pk}, b_{pk}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: V_p 为评价指标集 C 关于道路安全评价等级域 N_p 的取值范围; a_{pi} 、 b_{pi} 分别为指标 c_i 在全部道路安全等级的上限值和下限值。

2.2.3 确定关联函数、综合关联度

(1) 建立关联函数。由于各指标的特征不同, 须根据不同指标选择各自对应的关联度计算方法。点 V_K 与 V_{jk} 、 V_{pk} 的关联度分别按式(15)、式(16)计算。当 $V_K \in (a_{jk}, b_{jk})$ 时, 按式(17)计算各指标 c_k 的关联函数; 当 $V_K \notin (a_{jk}, b_{jk})$ 时, 按式(18)计算各指标 c_k 的关联函数。

$$\rho(V_K, V_{jk}) = \left| V_K - \frac{a_{jk} + b_{jk}}{2} \right| - \frac{b_{jk} - a_{jk}}{2} \quad (15)$$

$$\rho(V_K, V_{pk}) = \left| V_K - \frac{a_{pk} + b_{pk}}{2} \right| - \frac{b_{pk} - a_{pk}}{2} \quad (16)$$

式中: $\rho(V_K, V_{jk})$ 为指标 V_K 与经典域 V_{jk} 的距离; a_{jk} 、 b_{jk} 分别为经典域 V_{jk} 的上限值、下限值; $\rho(V_K, V_{pk})$ 为指标 V_K 与节域 V_{pk} 的距离; a_{pk} 、 b_{pk} 分别为节域 V_{pk} 的上限值、下限值。

$$K_j(V_K)=\frac{-\rho(V_K,V_{jk})}{|V_{jk}|}$$

(17)

$$K_j(V_K)=\frac{\rho(V_K,V_{jk})}{\rho(V_K,V_{pk})-\rho(V_K,V_{jk})}$$

(18)

式中: $K_j(V_K)$ 表示待评物元的第 k 个评价指标 c_k 关于第 j 级评价等级的关联度。

(2) 计算综合关联度,确定评价等级。对各评价等级,按式(19)计算待评价指标的关联度,若 $K_j = K_j(p) > 0$,则评价对象属于等级 j 。

$$K_j(p)=\sum_{i=1}^m\omega_jk_j(V_i)\quad(j=1,2,\cdots,n)$$

(19)

式中: ω_j 为第 j 个指标的权重。

3 实例分析

3.1 评价对象

大运直联通道以成都大学(大运村)为起点,以东安湖主体育场为终点,全长 11.62 km,是一条西北至东南走向的 Z 字形道路,贯穿龙泉驿区的十陵、西河、中央绿心和东安湖 4 个片区,由白鹤西路、西河大道、新双龙路和体育场西路组成。其位置及范围见图 4。

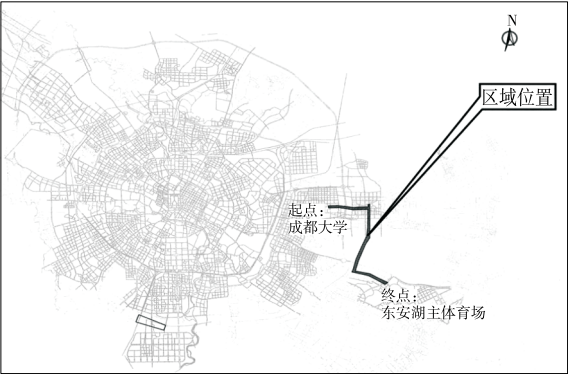


图 4 大运直联通道位置及范围示意图

3.2 评价指标权重确定

分别按式(2)、式(11)计算各评价指标的层次法权重、熵权法权重,按式(12)计算组合权重,结果见表 2、表 3。

表 2 一级指标的权重

指标名称	层次法权重	熵权法权重	组合权重
人	0.346 6	0.135 8	0.241 2
车辆	0.151 0	0.132 0	0.141 5
道路	0.137 8	0.376 2	0.257 0
环境	0.240 2	0.159 5	0.199 9
云端	0.124 4	0.196 5	0.160 5

表 3 二级指标的权重

指标名称	层次法权重	熵权法权重	组合权重
驾驶员	0.190 1	0.041 5	0.115 8
行人	0.073 0	0.050 6	0.061 8
交通管理者	0.083 5	0.043 7	0.063 6
智能网联汽车	0.094 1	0.069 8	0.082 0
传统机动车	0.036 2	0.039 1	0.037 7
非机动车	0.020 7	0.023 1	0.021 9
道路线形	0.015 5	0.040 9	0.028 2
路基路面	0.025 9	0.026 5	0.026 2
横断面形式	0.030 7	0.108 5	0.069 6
交通标志标线	0.007 7	0.055 0	0.031 4
交叉口	0.014 7	0.094 0	0.054 4
安全设施	0.043 3	0.051 3	0.047 3
气象环境	0.120 1	0.059 4	0.089 8
交通流环境	0.060 1	0.046 8	0.053 5
信号环境	0.060 1	0.053 3	0.056 7
交通云控平台	0.058 8	0.054 0	0.056 4
公安及交管平台	0.041 8	0.033 7	0.037 8
地图平台	0.013 4	0.042 7	0.028 1
路侧感知及通信设备	0.010 4	0.066 1	0.038 3

3.3 道路交通安全物元可拓模型评价

3.3.1 评价标准

为准确评判道路安全等级,通过调研分析该道路的实际情况,将智能网联道路安全划分为Ⅰ级(风险低)、Ⅱ级(风险较低)、Ⅲ级(风险中等)、Ⅳ级(风险较高)、Ⅴ级(风险高) 5 个等级,指标等级量化区间分别为[90,100]、[80,90)、[70,80)、[60,70)、[0,60)。

3.3.2 指标评分

邀请 14 名道路交通安全评价项目经理、道路安全检测咨询公司专家、相关领域的大学教授和研究助理,依据实际情况对各评价指标进行打分,总分 100 分(指标赋分越高,指标条件越好),调研值的均值见表 4。

表 4 各评价指标调研值的均值

评价指标	调研值	评价指标	调研值
驾驶员	79	交通管理者	89
行人	82	智能网联汽车	88

续表 4

评价指标	调研值	评价指标	调研值
传统机动车	77	气象环境	83
非机动车	79	交通流环境	88
道路线形	92	信号环境	88
路基路面	93	交通云控平台	93
横断面形式	93	公安及交管平台	89
交通标志标线	87	地图平台	88
交叉口	91	路侧感知及通信设备	89
安全设施	89		

$$R_3(A) = \begin{bmatrix} P & A_1 & [70, 80) \\ & A_2 & [70, 80) \\ & A_3 & [70, 80) \end{bmatrix}$$

$$R_4(A) = \begin{bmatrix} P & A_1 & [60, 70) \\ & A_2 & [60, 70) \\ & A_3 & [60, 70) \end{bmatrix}$$

$$R_5(A) = \begin{bmatrix} P & A_1 & [0, 60) \\ & A_2 & [0, 60) \\ & A_3 & [0, 60) \end{bmatrix}$$

节域如下:

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & A_1 & [0, 100] \\ & A_2 & [0, 100] \\ & A_3 & [0, 100] \end{bmatrix}$$

根据表 4, 得出“人”的评价物元为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} A & A_1 & 79 \\ & A_2 & 82 \\ & A_3 & 89 \end{bmatrix}$$

按式(15)~(18)计算一级指标“人”下各二级指标的关联度。同理, 计算其他二级指标的关联度, 计算结果见表 5。

表 5 二级指标的关联度及评价等级

二级指标	权重	$K_1(c_i)$	$K_2(c_i)$	$K_3(c_i)$	$K_4(c_i)$	$K_5(c_i)$	评价等级
驾驶员	0.115 8	-0.343 8	-0.045 5	0.100 0	-0.300 0	-0.475 0	Ⅲ
行人	0.061 8	-0.343 8	-0.045 5	0.100 0	-0.300 0	-0.475 0	Ⅲ
交通管理者	0.063 6	-0.307 7	0.200 0	-0.100 0	-0.400 0	-0.550 0	Ⅱ
智能网联汽车	0.082 0	-0.083 3	0.100 0	-0.450 0	-0.633 3	-0.725 0	Ⅱ
传统机动车	0.037 7	-0.142 9	0.200 0	-0.400 0	-0.600 0	-0.700 0	Ⅱ
非机动车	0.021 9	-0.361 1	-0.115 4	0.300 0	-0.233 3	-0.425 0	Ⅲ
道路线形	0.028 2	-0.343 8	-0.045 5	0.100 0	-0.300 0	-0.475 0	Ⅲ
路基路面	0.026 2	0.020 0	-0.200 0	-0.600 0	-0.733 3	-0.800 0	Ⅰ
横断面形式	0.069 6	0.030 0	-0.300 0	-0.650 0	-0.766 7	-0.825 0	Ⅰ
交通标志标线	0.031 4	0.030 0	-0.300 0	-0.650 0	-0.766 7	-0.825 0	Ⅰ
交叉口	0.054 4	-0.187 5	0.300 0	-0.350 0	-0.566 7	-0.675 0	Ⅱ
安全设施	0.047 3	0.010 0	-0.100 0	-0.550 0	-0.700 0	-0.775 0	Ⅰ
气象环境	0.089 8	-0.083 3	0.100 0	-0.450 0	-0.633 3	-0.725 0	Ⅱ
交通流环境	0.053 5	-0.291 7	0.300 0	-0.150 0	-0.433 3	-0.575 0	Ⅱ
信号环境	0.056 7	-0.142 9	0.200 0	-0.400 0	-0.600 0	-0.700 0	Ⅱ
交通云控平台	0.056 4	-0.142 9	0.200 0	-0.400 0	-0.600 0	-0.700 0	Ⅱ
公安及交管平台	0.037 8	0.030 0	-0.300 0	-0.650 0	-0.766 7	-0.825 0	Ⅰ
地图平台	0.028 1	-0.083 3	0.100 0	-0.450 0	-0.633 3	-0.725 0	Ⅱ
路侧感知及通信设备	0.038 3	-0.142 9	0.200 0	-0.400 0	-0.600 0	-0.700 0	Ⅱ

3.3.3 关联度计算及评价结果

以一级指标“人”为例, 确定其经典域如下:

$$R_1(A) = \begin{bmatrix} P & A_1 & [90, 100] \\ & A_2 & [90, 100] \\ & A_3 & [90, 100] \end{bmatrix}$$

$$R_2(A) = \begin{bmatrix} P & A_1 & [80, 90) \\ & A_2 & [80, 90) \\ & A_3 & [80, 90) \end{bmatrix}$$

一级指标的综合关联度可通过二级指标的综合关联度和二级指标组合权重利用式(19)计算得到。

各一级指标的综合关联度及评价等级见表 6。

大运直联通道交通安全的综合关联度 $K_j(N)$

表 6 一级指标的关联度及评价等级

一级指标	权重	$K_1(c_i)$	$K_2(c_i)$	$K_3(c_i)$	$K_4(c_i)$	$K_5(c_i)$	评价等级
人	0.241 2	-0.064 1	0.013 5	-0.023 2	-0.099 7	-0.135 1	II
车辆	0.141 5	-0.032 9	0.011 1	-0.019 3	-0.064 6	-0.083 8	II
道路	0.257 0	0.005 8	-0.025 7	-0.141 4	-0.180 0	-0.199 2	I
环境	0.199 9	-0.041 9	0.049 0	-0.057 6	-0.105 0	-0.128 8	II
云端	0.160 5	-0.008 7	0.003 7	-0.082 1	-0.108 3	-0.121 4	II

通过一级指标综合关联度和一级指标组合权重利用式(19)计算得到,结果如下: $K_j(N)=(-0.031\ 7, 0.010\ 1, -0.068\ 0, -0.116\ 9, -0.140\ 2)$,评价等级为 II 级。

大运直联通道的综合评级等级为 II 等级,风险较低,与实际情况较相符。一级指标中道路的评价等级为风险低,道路运行状态较好;人、车辆、环境、云端的风险评价等级均为 II 级,表明整个交通环境中交通参与者的交通意识和交通行为良好且车辆的运行状态良好,外部环境较好,无长时间极端恶劣天气,智能网联云端基础设施建设较完整,风险等级较低;其中环境的关联度最大,为 0.049 0,表明环境与智能网联开放测试道路的关系最紧密。

与传统道路安全评价方法(如层次分析法、模糊综合评价法、熵权法等)相比,基于层次熵权-物元可拓模型的智能网联汽车道路安全评价方法将层次法和熵权法主、客观相结合,解决了评价权重主、客观分配不均的问题;利用物元可拓模型的关联度进行评价,能反映等级隶属程度,体现智能网联汽车开放测试道路安全风险的随机性和模糊性。

4 结语

鉴于智能网联汽车开放测试道路交通安全影响因素的复杂性,本文引入德尔菲法对智能网联汽车开放测试道路交通安全初始评价指标进行筛选,并在普通道路安全评价指标人、车辆、道路、环境四大因素的基础上加入智能网联汽车开放测试道路独有的云端因素,将五大影响因素作为一级评价指标,并细化为 19 个二级指标,使整个安全评价体系更加科学。采用层次分析法与熵权法相结合的方法,得出各评价指标的主、客观综合权重,克服了层次分析法主观色彩过强的缺点,增加了数据信息之间的关联

性。以成都市大运直联通道为例,对智能网联开放测试道路交通安全评价体系及层次熵权-物元可拓模型进行实证分析,结果表明,道路、人和环境三项指标的权重占比最高,评价结果与道路安全现状相符,该道路交通安全评价模型具有一定的科学性及合理性。

参考文献:

- [1] 李国永.智能网联汽车测试评价及问题分析[J].汽车实用技术,2022,47(9):9-13.
- [2] 张晓博,刘朝峰,杜丽衡,等.基于改进灰色关联法的安徽省道路交通安全评价[J].河北工业大学学报,2019,48(3):60-66.
- [3] 林晨,汪洋,王鉉民,等.基于层次分析法的国省干线交通安全综合评价[J].交通工程,2021,21(4):52-57.
- [4] 吴克海,丁光明,雷茂锦.基于主成分法的道路交通事故综合评价方法研究[J].交通标准化,2005,33(11):142-145.
- [5] 郭礼照,杨三强,周良川,等.基于模糊层次分析法的高速公路交通安全综合评价[J].交通科技与经济,2017,19(2):8-12.
- [6] 李雪,赵宁,郑珉.基于云模型的道路交通安全等级评价[J].北京工业大学学报,2015,41(8):1219-1224.
- [7] 王乾,马非,夏杨于雨,等.基于改进的可拓学模型的城市道路隧道交通安全评价[J].隧道建设(中英文),2018,38(增刊 2):169-175.
- [8] 陈君,李聪颖,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.
- [9] VORKO-JOVIĆ A, KERN J, BILOGLAV Z. Risk factors in urban road traffic accidents[J]. Journal of Safety Research, 2006, 37(1): 93-98.
- [10] PEI Y L, FU C Y, QI W W, et al. Model of fuzzy comprehension evaluation of traffic operations safety on

- urban ice and snow road[M]//LIN S, HUANG X. Advances in Computer Science, Environment, Ecoinformatics, and Education. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 211-215.
- [11] XI J F, ZHAO Z H, LI W, et al. A traffic accident causation analysis method based on AHP-apriori[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 680-687.
- [12] CHEN Y, CHEN S T, ZHANG T, et al. Autonomous vehicle testing and validation platform: integrated simulation system with hardware in the loop[C]//2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). June 26—30, 2018, Changshu, China. IEEE, 2018: 949-956.
- [13] REITZ B C, WILKERSON J L. Test and evaluation of autonomous surface vehicles: a case study[C]//2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). April 20—23, 2020, Portland, OR, USA. IEEE, 2020: 839-850.
- [14] 宗晨宏, 马健霄, 陆涛. 封闭式智能网联汽车测试场可靠性评价方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(4): 105-114.
- [15] 孙剑锋, 马超, 胡金树, 等. 基于灰色关联度与层次分析法耦合的地质灾害易发性评价: 以浙江省云和县崇头镇为例[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 538-551.
- [16] 辛督强. 基于熵权-TOPSIS 的陕西省各市区道路交通安全评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 116-120.
- [17] 祝连波, 王世笛, 林陵娜, 等. 基于博弈论组合赋权-物元可拓模型的地铁车站抗涝韧性评估研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 1-6+42.
- [18] 张卫征. 智能网联汽车开放测试道路建设研究[J]. 电子测试, 2021(23): 137-138.
- [19] 余豪, 周江红. 基于 SEM 的道路交通安全评价研究[J]. 公路与汽运, 2019(5): 35-38+43.
- [20] 刘勇, 杨莉, 彭振仁, 等. 广西道路交通事故 BP 人工神经网络预测模型的建立及效果评价[J]. 广西医学, 2013, 35(3): 257-259.
- [21] LAURESHYN A, SVENSSON Å, HYDÉN C. Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: theoretical framework and first implementation[J]. Accident Analysis & Prevention, 2010, 42(6): 1637-1646.
- [22] YU B, CHEN Y R, WANG R Y, et al. Safety reliability evaluation when vehicles turn right from urban major roads onto minor ones based on driver's visual perception[J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 95: 487-494.
- [23] 曾阳艳, 邓季琳, 张琪慧. 基于熵权 TOPSIS 的区域道路安全评价方法[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(20): 5-8.
- [24] 刘光富, 陈晓莉. 基于德尔菲法与层次分析法的项目风险评估[J]. 项目管理技术, 2008, 6(1): 23-26.
- [25] 李江龙, 樊燕燕, 李子奇. 基于熵权-云模型的城市群综合承灾度评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(7): 48-54.
- [26] 傅宁, 邵月龄. 基于物元可拓模型的机场飞行区安全风险评价及影响程度分析[J/OL]. 安全与环境学报: 1-9 [2023-12-07]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.2085>.

收稿日期: 2023-08-06

关于假冒杂志网站和邮箱的声明

目前互联网上出现以《公路与汽运》杂志名义建立的官方网站和投稿邮箱, 它们盗用“公路与汽运”的名称, 非法向外征稿并收取审稿费、版面费, 严重损害了本刊的权益和声誉。为避免广大作者和读者上当受骗, 本刊郑重声明:

1 本刊的网址为 <http://glyqy.csust.edu.cn>。互联网上以“公路与汽运”名义建立的其他网站都是假冒的, 此类网站上发布的信息及由此造成的一切后果均与本刊无关。

2 本刊唯一的投稿邮箱是 gongluyuqiyun@163.com, 除此之外的任何以本刊名义设立的邮箱都是假冒的。本刊目前没有收取审稿费。

3 本刊强烈谴责这种假冒《公路与汽运》杂志名义、损害本刊和作者、读者权益的违法行为, 并保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明。

《公路与汽运》编辑部