

基于熵权云模型的高速公路交通安全风险评估研究^{*}

张琦, 易云帆, 夏鹏

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为评价高速公路交通安全风险, 针对风险评估的模糊性和不确定性, 构建基于熵权云模型的高速公路交通安全风险评估体系。首先在分析各项风险影响因素及其标准的基础上, 建立高速公路安全评价指标体系, 包括道路、气象、交通条件 3 个一级指标和高边坡、桥隧、长大纵坡、出入口、降雨量、能见度、交通量(饱和度)、交通组成(大车比例)8 个二级指标。然后将熵权法和云模型相结合, 利用熵权法修正各评价指标权重, 再利用云模型评价高速公路交通安全风险等级。最后以湖南省某运营高速公路为例开展案例分析, 结果表明该方法能解决模糊评价中隶属度的不确定性问题, 可为制定高速公路交通安全风险管理措施提供一定参考。

关键词: 交通安全; 高速公路; 风险评估; 云模型; 熵权法

中图分类号: U491.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)06-0020-06

高速公路具有车速快、车辆类型复杂、封闭性强等特点, 高速公路上发生的事故大都为特重大或重大人身伤亡和财产损失事故。开展高速公路交通安全风险分析, 辨识风险因素, 评估风险等级, 进而采取相应安全提升措施, 可为高速公路安全运行提供保障。李志华将高速公路风险因素分为主观因素和客观因素, 从道路线形、交通安全设施、路面状况、交通环境和路侧危险物等方面分析了客观因素对高速公路安全的影响; 刘晓从山区天气状况、道路线形、道路安全防护措施、交通安全管理等方面对重庆高速公路交通安全进行了评价; 罗勇等建立递阶层次结构, 综合评估了高速公路隧道运营安全风险; 高建伟探讨了道路条件对行车安全的影响, 并提出了相关设计改善方法; 雷桂荣等探讨了道路线形和交通流指标对高速公路交通安全的影响。

交通安全评价方法主要包括故障树分析法、模糊层次分析法、灰色模糊理论法及神经网络法等, 由于存在一定主观性或需要大量样本进行训练, 评价的实用性和可信性有所降低, 需进行改进。熵权法能客观确定指标权重, 云模型能实现定量与定性概念之间的不确定性转换, 充分考虑其随机性, 可减小主观因素的影响。徐征捷等采用云模型对铁路控制中心限速功能进行了风险评估; 沈进昌等提出了基于云模型的模糊综合评价方法; 杨文东等基于云模

型对边坡进行了风险评估; 刘珊珊基于云模型对高速铁路行车调度系统的不安全事件进行了风险评估; Yang Yafeng 等基于云模型对水资源与能源安全进行了风险评估。本文基于熵权云模型构建高速公路交通安全风险评估指标体系, 对高速公路交通安全风险进行评价。

1 评价指标体系构建

综合考虑影响高速公路交通安全风险的因素, 从道路条件 C_1 、气象条件 C_2 、交通条件 C_3 三方面构建评价指标体系, 评价指标具有独立性、客观性、全面性, 能充分反映高速公路风险状况。

1.1 道路条件指标

对高速公路交通安全风险影响最大的道路条件因素包括高边坡、桥隧、长大纵坡和出入口。

(1) 高边坡 C_{11} 。由于高速公路地形地质条件复杂, 边坡稳定性问题更突出, 容易出现滑坡、落石、崩塌和防护加固工程结构破坏或失效等现象。边坡稳定性越差, 风险越大。综合考虑边坡稳定性及边坡失稳的破坏后果, 对边坡风险值进行量化, 计算公式见式(1)。 R_s 分数越高, 边坡风险性越大。

$$R_s = F \times I_s \times C_s \quad (1)$$

式中: R_s 为边坡安全风险分数; F 为归一化因子; I_s 为滑坡稳定性分数; C_s 为滑坡后果分数。

^{*} 基金项目: 长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(SJ CX202005); 湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2171); 湖南省教育厅重点项目(20A023)

(2) 桥隧 C_{12} 。桥隧是高速公路的特殊构造物,具有封闭性等特征,对高速公路交通安全风险有一定影响。桥隧比例越大,高速公路交通安全风险越大。桥隧评价各等级风险值见表 1、表 2,按照该标准进行分值确定,分值越高,风险越高,分数以累加形式计算。

表 1 桥梁评价各等级风险值

评价标准	风险值
不存在大桥或特大桥梁路段	[0,1)
包含大桥(桥梁长度 L 为 100~1 000 m)的路段	[2,3)
包含特大桥(桥梁长度 $L>1 000$ m)的路段	[3,5)

(3) 长大纵坡 C_{13} 。在长大纵坡上行驶时,不易

表 3 纵坡评价等级划分

坡度/%	不同坡长(m)时风险等级					
	<250	[250,400)	[400,600)	[600,800)	[800,1 000)	$\geq 1 000$
[0,1)	高	低	极低	极低	低	高
[1,2)	高	低	极低	极低	低	高
[2,3)	高	中	低	低	中	高
[3,4)	极高	高	中	中	高	极高
[4,5)	极高	极高	极高	极高	极高	极高

表 4 纵坡评价各等级风险值

风险等级	风险值	风险等级	风险值
极低风险	[0,2)	高风险	[6,8)
低风险	[2,4)	极高风险	[8,10)
中风险	[4,6)		

(4) 出入口 C_{14} 。出入口路段交通交织,车流复杂,存在频繁减速或加速的现象,提高了交通事故危险性和交通安全风险。出入口数量越多,高速公路交通安全风险越大。出入口评价各等级风险值见表 5,按照该标准进行分值确定,分值越高,风险越高。

表 5 出入口评价各等级风险值

评价标准	风险值
不存在出入口路段	[0,1)
包含部分出入口的路段	[2,3)
包含出入口的路段	[3,5)

1.2 气象条件指标

降雨量和能见度是对高速公路交通安全风险影响最大的气象条件因素。

(1) 降雨量 C_{21} 。降雨会使路面摩擦系数下降,导致车辆行驶稳定性降低、制动距离增加。降雨后

控制车速,极其考验驾驶人的反应及操作速度,遇到紧急情况时频繁踩刹车易造成刹车失灵,引起车辆失控。综合考虑坡度与坡长,以设计速度 100 km/h 的高速公路为例,按表 3、表 4 所示标准确定风险等级。

表 2 隧道评价各等级风险值

评价标准	风险值
不存在隧道路段	0
包含或邻近隧道洞口	3
短隧道($L\leq 500$ m)	1
包含隧道 中隧道($500\text{ m}<L\leq 1\,000$ m)	2
中间段 长隧道($1\,000\text{ m}<L\leq 3\,000$ m)	3
特长隧道($L>3\,000$ m)	4
隧道群(相邻隧道间距<250 m)	2

高速公路路面因积水出现水膜,显著降低路面与车轮间的附着系数,导致车辆容易打滑,增大安全风险。风险随着降雨量的增大而增大,达到一定程度时风险降低,这是由于采取了相关管控措施或驾驶人提高了警惕性等。降雨量以降雨强度来表征,定义为一定时段内降落到地面的雨水深度(mm/h)。

(2) 能见度 C_{22} 。能见度为路段的能见距离(m),主要反映雾对高速公路交通安全的影响。能见度降低会使驾驶人分辨不清周围或前方的状况,同时导致驾驶人心理紧张,增加行车风险。

1.3 交通条件指标

对高速公路交通安全风险影响最大的交通条件因素包括交通量和交通组成。

(1) 交通量 C_{31} (饱和度)。安全风险随着交通量的增大而增大。饱和度 W 能间接反映交通量,按式(2)计算。饱和度过低时,行车自由度较高,驾驶人由于放松警惕,车速往往很高,单车安全风险增大;饱和度过高时,引起交通堵塞,驾驶人高度警惕,安全风险反而降低。

$$W = V/C \tag{2}$$

式中: C 为最大通行能力; V 为最大交通量。

(2) 交通组成 C_{32} (大车比例)。大型客货车(除小型轿车外的所有车辆)比例 X 是影响行车安全的因素之一,按式(3)计算。大车混入后诱使小车产生一系列加、减速行为,影响车流运行稳定性。

$$X = U/M \times 100 \quad (3)$$

式中: U 为大型客货车数量; M 为所有车辆数量。

2 熵权云模型相关理论

2.1 云模型

(1) 云的定义。设 U 是以精准值表示的定量论域, C 是 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,每个 x 为概念 C 的一次具体实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是具有稳定趋势的随机数 $\mu:U \rightarrow [0,1]$, $\forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$,那么 x 在 U 上的分布称为云,每个 x 称作一个云滴。

(2) 云的数字特征。云的数字特征能反映概念的整体性和定性知识的定量特征,对定性概念的理解具有重要意义。云一般以云期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3个数字特征来整体表征一个概念。期望 E_x 表示云滴在论域空间分布的中心值,是概念在论域空间的期望,是定性概念最具代表性的典型样本。熵 E_n 度量定性概念的不确定性,由概念的随机性和模糊性来决定。熵不仅能反映云滴的平均离散程度,是对定性概念随机性的度量,还能表达可被定性概念接受的云滴的取值范围,是对模糊性的度量。超熵 H_e 为熵的熵,度量熵值的不确定性,由熵的随机性和模糊性来决定,反映代表该值全部点的不确定度的集中程度,也间接表达云滴的厚度。

(3) 云发生器。云发生器主要分为正向云发生器与逆向云发生器。正向云发生器通过云的数字特征 (E_x, E_n, H_e) 生成云滴,完成定性到定量的映射,它是最基础的云计算,是能将定性信息转换到定量的范围及分布规律的算法,是表达定性信息最常用且最重要的工具,是前向的过程,在表达定性信息的基本语言值时尤为有用。逆向云发生器是实现从定量范围转换到定性概念的算法,能把一系列精确数据转换为以数字特征 (E_x, E_n, H_e) 表示的定性概念。逆向云发生器以统计学为基础原理,有使用确定度信息和不使用确定度信息两种基本算法。

2.2 熵权法

基于熵权理论对各影响因子的权重进行修正。

(1) 设对 a 个评价因子进行评价,每个评价因子有 b 个指标,构建标准化矩阵如下:

$$R = (r_{ij})_{a \times b} \quad (4)$$

(2) 定义各指标熵为:

$$H_j = -\frac{1}{\ln b} \sum_{i=1}^b f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

$$V_{ij} = 1 + \frac{1}{\ln b} \sum_{i=1}^b f_{ij} \ln f_{ij} \quad (6)$$

式中: b 为评价等级数量; f_{ij} 为隶属度, $0 \leq f_{ij} \leq 1$ 。

(3) 用向量 $w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ia})^T$ 作为各指标的权重向量,经熵权修正后权重为:

$$w_{ij} = V_{ij} / \sum_{j=1}^a v_{ij} \quad (7)$$

式中: $0 \leq w_{ij} \leq 1$ 。

3 基于熵权云模型的高速公路交通安全风险评估

3.1 评价假设

评价中,用一个云滴映射一次评价。按照高速公路交通安全风险评估指标体系,风险共分为5个等级,依次为极低风险(I级)、低风险(II级)、中等风险(III级)、高风险(IV级)、极高风险(V级),每个风险评价指标隶属于某一等级的确定度都能用一个综合云表示。

应用云模型进行高速公路交通安全风险评价时,作以下假设:1) 将每一定量的评价等级都视为一个自然语言的概念,对应映射为一朵云;2) 观测数据隶属于5个等级中某一等级的确定度符合正态分布。

3.2 评价步骤

(1) 明确8个评价指标,将其分为5个级别并分别确定各自合理的分级指标。

(2) 针对某一评价指标 X_i ,根据评判标准,设定各等级分别对应的评价指标范围(a, b),并确定各指标权重。

(3) 确定云模型的(E_x, E_n, H_e),由云发生器形成该评价指标分别隶属于5个评价等级的综合云模型。

(4) 重复步骤2、步骤3,直至每个评价指标都生成其隶属于各自评价等级的云,共 8×5 朵云。

(5) 根据实际数据计算各指标隶属于对应等级的确定度,并乘以相应的指标权重(指标权重由熵权法求出)。

(6) 对每一个确定度矩阵各列值求和,即各评价指标隶属于某评价等级的确定度之和,风险评价

结果即为确定度最大值所属的等级。

3.3 云模型参数选取

根据评价指标及标准,通过如下方法确定云模型的 3 个数字特征:

(1) 对于某变量 V_{Qi} ,如具有上边界 C_{\min} 、下边界 C_{\max} ,则 3 个数字特征按式(8)~(10)计算。

$$E_x = (C_{\min} + C_{\max})/2 \tag{8}$$

$$E_n = (C_{\max} - C_{\min})/6 \tag{9}$$

$$H_e = k \tag{10}$$

式中: C_{\min} 、 C_{\max} 分别表示变量 V_{Qi} 的最小和最大边界值; k 是常数,可通过自身的模糊度大小来确定。

(2) 对于只有单边界的变量,如 $V_{Qi}[C_{\min}, +\infty]$ 或 $V_{Qi}[-\infty, C_{\max}]$,可先依据数据的上下限

确定其缺省边界期望值或参数,然后按式(8)~(10)计算云参数。计算所得云模型参数见表 6。

表 6 云模型参数

风险等级	E_x	E_n	H_e
I 级	$E_{x1}=0$	$E_{n1}=(E_{x2}-E_{x1})/3$	0.01
II 级	$E_{x2}=(a+b)/2$	$E_{n2}=(E_{x2}-E_{x1})/3$	0.01
III 级	$E_{x3}=(b+c)/2$	$E_{n3}=(E_{x3}-E_{x2})/3$	0.01
IV 级	$E_{x4}=(c+d)/2$	$E_{n4}=(E_{x4}-E_{x3})/3$	0.01
V 级	$E_{x5}=c+d$	$E_{n5}=(E_{x5}-E_{x4})/3$	0.01

注: $a\sim d$ 分别代表分级指标的边界值,如某评价因子 X_i 的 5 个评价区间为 I $(0,a]$ 、II $(a,b]$ 、III $(b,c]$ 、IV $(c,d]$ 、V $(d,+\infty)$ 。

3.4 各项指标等级划分

各项指标的分级区间见表 7。

表 7 各项指标等级划分

风险等级	高边坡 C_{11}	桥隧 C_{12}	长大纵坡 C_{13}	出入口 C_{14}	降雨量 C_{21}	能见度 C_{22}	交通量 C_{31}	交通组成 C_{32}
I 级	<45	<1	<2	<1	<0.414	>500	<0.2	<0.15
II 级	$45\sim55$	$1\sim2$	$2\sim4$	$1\sim2$	$0.414\sim1.020$	$200\sim500$	$0.2\sim0.4$	$0.15\sim0.35$
III 级	$55\sim60$	$2\sim3$	$4\sim6$	$2\sim3$	$1.020\sim2.100$	$100\sim200$	$0.4\sim0.6$	$0.35\sim0.55$
IV 级	$60\sim65$	$3\sim4$	$6\sim8$	$3\sim4$	$2.100\sim4.140$	$50\sim100$	$0.6\sim0.8$	$0.55\sim0.85$
V 级	>65	>4	>8	>4	>4.140	<50	>0.8	>0.85

3.5 分级指标模型

计算各评价指标在不同风险等级下的标准正态

云值,结果见表 8。图 1 为高速公路交通安全风险评估的分级指标模型图。

表 8 各评价指标的标准正态云值

评价指标	各等级的标准正态云数字特征				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
C_{11}	(22.25,7.50,0.01)	(50.00,1.67,0.01)	(57.50,0.83,0.01)	(62.50,0.83,0.01)	(70.00,1.67,0.01)
C_{12}	(0.50,0.17,0.01)	(1.50,0.17,0.01)	(2.50,0.17,0.01)	(3.50,0.17,0.01)	(4.50,0.17,0.01)
C_{13}	(1.00,0.33,0.01)	(3.00,0.33,0.01)	(5.00,0.33,0.01)	(7.00,0.33,0.01)	(9.00,0.33,0.01)
C_{14}	(0.50,0.17,0.01)	(1.50,0.17,0.01)	(2.50,0.17,0.01)	(3.50,0.17,0.01)	(4.50,0.17,0.01)
C_{21}	(0.207,0.069,0.01)	(0.717,0.101,0.01)	(1.560,0.180,0.01)	(3.120,0.340,0.01)	(7.170,1.010,0.01)
C_{22}	(650,50.00,0.01)	(350,50.00,0.01)	(150,16.67,0.01)	(75,8.33,0.01)	(25,8.33,0.01)
C_{31}	(0.1,0.033,0.01)	(0.3,0.033,0.01)	(0.5,0.033,0.01)	(0.7,0.033,0.01)	(0.9,0.033,0.01)
C_{32}	(0.075,0.025,0.01)	(0.250,0.033,0.01)	(0.450,0.033,0.01)	(0.700,0.050,0.01)	(0.925,0.025,0.01)

4 实例分析

以湖南省某运营高速公路为例,运用上述方法评估其交通安全风险。通过实地调查获得指标数据,按特征值计算公式计算各评价指标的云模型特征值(E_x, E_n, H_e),结果见表 9。

计算各评价指标在各风险等级下的隶属度,结

果见表 10。

为反映各指标对高速公路交通安全风险的影响程度,基于熵权法确定权重系数,计算结果见表 11。

从单一的评价指标权重来看,长大纵坡的权重最大,对风险影响最为突出。采用加权平均型模糊合成算子将确定度矩阵与权重系数矩阵相结合,得到综合评判向量,再按最大隶属度原则评价高速公

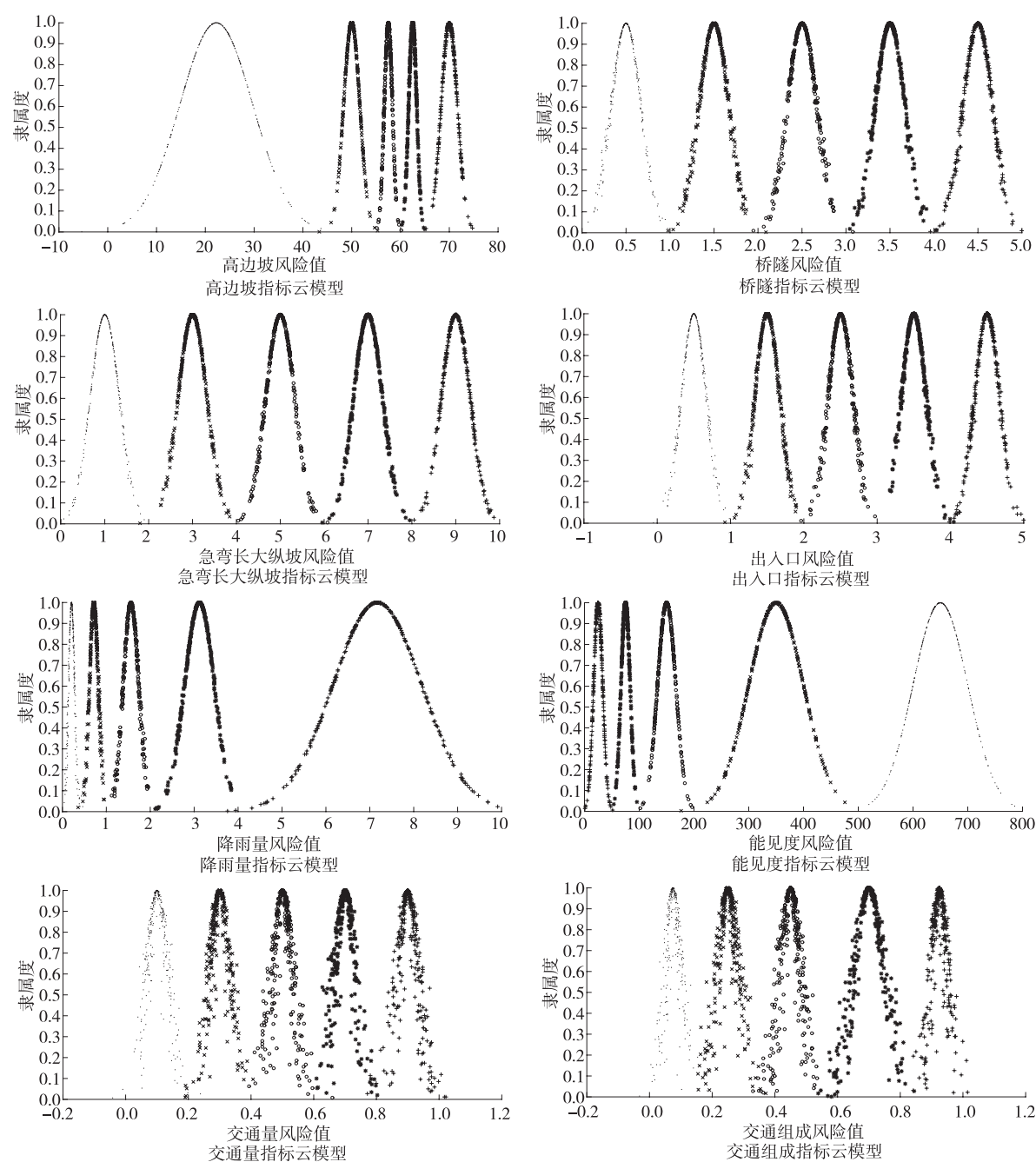


图 1 分级指标模型图

表 9 各评价指标的云模型参数

一级指标	二级指标	云模型参数
C ₁	C ₁₁	(44.200,1.704 5,0.453 1)
	C ₁₂	(1.400,0.601 6,0.248 8)
	C ₁₃	(4.200,0.401 1,0.197 9)
	C ₁₄	(2.400,0.601 6,0.248 8)
C ₂	C ₂₁	(0.806,0.047 1,0.031 0)
	C ₂₂	(226.600,2.406 4,0.700 4)
C ₃	C ₃₁	(0.336,0.036 1,0.008 5)
	C ₃₂	(0.390,0.085 2,0.022 7)

路道路交通安全风险等级,评价结果见表 12。

从表 12 可以看出:该高速公路总体安全风险水平为Ⅱ级(好),其中道路条件风险等级为Ⅲ级(一般),气象条件风险等级为Ⅱ级(好),交通条件风险等级为Ⅱ级(好)。结合权重值可知,对该高速公路交通安全风险影响最大的为道路条件。后续安全改善中可结合表 10 中各指标的隶属度及表 11 中各指标的权重值,采取针对性的防治措施,如设置交通安全设施、改善道路结构物、严格治理超载等,提高其安全水平。

表 10 各指标相对各等级标准指标的隶属度

评价指标	各等级的隶属度				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
C_{11}	0.013 81	0.002 40	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{12}	0.000 00	0.841 13	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{13}	0.000 00	0.001 34	0.052 95	0.000 00	0.000 00
C_{14}	0.000 00	0.000 00	0.841 13	0.000 00	0.000 00
C_{21}	0.000 00	0.678 25	0.000 15	0.000 00	0.000 00
C_{22}	0.000 00	0.047 57	0.000 03	0.000 00	0.000 00
C_{31}	0.000 00	0.551 54	0.000 00	0.000 00	0.000 00
C_{32}	0.000 00	0.000 12	0.191 50	0.000 00	0.000 00

表 11 评价指标的权重

一级指标	权重	二级指标	权重	最终权重
C_1	0.62	C_{11}	0.09	0.056
		C_{12}	0.24	0.149
		C_{13}	0.43	0.267
		C_{14}	0.24	0.149
C_2	0.23	C_{21}	0.31	0.071
		C_{22}	0.69	0.158
C_3	0.15	C_{31}	0.58	0.087
		C_{32}	0.42	0.063

表 12 交通安全风险综合评价结果

评价指标	各等级的综合隶属度				
	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
道路条件	0.001 24	0.202 66	0.224 64	0.000 00	0.000 00
气象条件	0.000 00	0.243 08	0.000 07	0.000 00	0.000 00
交通条件	0.000 00	0.319 94	0.080 43	0.000 00	0.000 00
综合评价	0.000 77	0.229 55	0.151 36	0.000 00	0.000 00

5 结论

为辨识高速公路交通安全风险源,建立风险评价指标体系,将高速公路安全影响因素划分为道路条件、气象条件和交通条件3 个一级指标及高边坡、桥隧、长大纵坡、出入口、降雨量、能见度、交通量(饱和度)、交通组成(大车比例)8 个二级指标,把高速公路交通安全状态划分为极低风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险 5 个等级。在此基础上将熵权法和云模型相结合,先利用熵权法修正指标权重,然后应用云模型评价高速公路交通安全风险,得到高速公路交通安全风险等级。采用该方法进行安全风险评价,有助于提高高速公路交通安全改善措施的针对性及改善方案的有效性。但也存在一些不足,如指标选取不够详细;虽然云模型考虑了风险的

不确定性及随机性,尽可能地减小了主观因素带来的影响,但整个风险评价过程中主观因素仍然存在。因此,还有待进行更深入的研究。

参考文献:

[1] 李志华.湖南省高速公路交通安全风险评估与改善对策研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[2] 刘晓.重庆高速公路交通安全评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.

[3] 罗勇,李玉文,袁家伟,等.高速公路隧道运营安全风险评估研究[J].现代隧道技术,2016,53(6):25—30.

[4] 高建伟.道路条件对行车安全的影响分析[J].城市道桥与防洪,2017(10):34—36.

[5] 雷桂荣,刘峰,谢华昌,等.高速公路交通安全与道路线形和主要交通流特性的关系[J].公路与汽运,2018(5):41—46.

[6] 徐征捷,张友鹏,苏宏升.基于云模型的模糊综合评判法在风险评估中的应用[J].安全与环境学报,2014,14(2):69—72.

[7] 沈进昌,杜树新,罗伟,等.基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J].模糊系统与数学,2012,26(6):115—123.

[8] 杨文东,杨栋,谢全敏.基于云模型的边坡风险评估方法及其应用[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(4):30—34.

[9] 刘珊珊.基于云模型的高速铁路行车调度系统不安全事件风险评估研究[D].成都:西南交通大学,2018.

[10] YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHANG Yuanyuan, et al. Risk assessment of water resources and energy security based on the cloud model: A case study of China in 2020 [J]. Water, 2021, 13(13): 1823.

[11] 王艳伟,韩晓庆,熊凯.基于云模型和熵权法的 PPP 项目风险评价研究[J].工程管理学报,2020,34(6):66—70.

(下转第 36 页)

- 社,2006.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计规范:JTG D81—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [3] 北京深华达交通工程检测有限公司.公路护栏安全性能评价标准:JTG B05—01—2013[S].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 周翔海,陈卫霞,邓宝,等.波形梁护栏立柱承载能力研究[J].中外公路,2021,41(2):356—360.
- [5] 黄义飞.桥梁船撞响应及船撞力简化计算方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
- [6] 李江海,石红星.车辆与护栏的碰撞力计算方法[J].道路交通与安全,2014,14(2):49—52.
- [7] 闫书明.有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J].振动与冲击,2011,30(1):152—156.
- [8] 於弈铮,王银辉,罗征.冲击荷载下预制装配式护栏的防撞性能分析[J].公路与汽运,2020(1):40—45.
- [9] 赵庆云,吴军,鹏刘康,等.桥梁砼护栏直立式接高改造设计与碰撞分析[J].公路与汽运,2020(1):46—51.
- [10] 张维刚,胡高贤.土基中波形梁护栏立柱的有限元模型研究[J].公路交通科技,2007,24(7):143—146.
- [11] 高玉恒,陈慧,李志强,等.高速公路波形梁护栏损坏等级划分[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(6):1181—1184.
- [12] 张立状.高速公路中央分隔带组合式护栏的碰撞安全性能研究[D].天津:河北工业大学,2015.
- [13] 闫书明.公路 SB 级三波形梁钢护栏安全应用技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [14] 陈玲.基于车辆碰撞试验的波形梁钢护栏改造方案研究[D].广州:华南理工大学,2007.
- [15] 李明哲.高速公路中央分隔带波形梁护栏改造方案研究[J].交通世界(上旬刊),2022(4):14—16+25.
- [16] 朱志勤,贾宁,王和林.高速公路中央分隔带波形梁护栏改造技术研究[J].特种结构,2016,33(3):80—85.

收稿日期:2022—03—10

(上接第 5 页)

- [5] GHAYEBLOO A, RANDAN A. Superiority of dual-mechanical-port-machine-based structure for series-parallel hybrid electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 589—602.
- [6] PEI H X, HU X S, YANG Y L, et al. Configuration optimization for improving fuel efficiency of power split hybrid powertrains with a single planetary gear[J]. Applied Energy, 2018, 214: 103—116.
- [7] 宫唤春.并联插电式混合动力汽车建模与仿真分析[J].汽车工程师,2021(9):18—21.
- [8] QIN Z B, LUO Y G, ZHUANG W C, et al. Simultaneous optimization of topology, control and size for multi-mode hybrid tracked vehicles[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1627—1641.
- [9] 黄炫方,胡振球,彭再武,等.电动客车能耗仿真建模与分析[J].客车技术与研究,2019,41(5):15—17.
- [10] 王圣海.纯电动城市客车驾驶行为与能耗关系的统计分析[J].客车技术与研究,2020,42(1):60—62.
- [11] 刘建辉.串并联混合动力节能减排性能研究[J].电信快报(网络与通信),2015(9):42—46.
- [12] 余借光.并联式混合动力汽车节能减排性能提升的控制策略研究[D].大连:大连理工大学,2016.

收稿日期:2022—05—05

(上接第 25 页)

- [12] 冯学慧.基于熵权法与正态云模型的大坝安全综合评价[J].水电能源科学,2015,33(11):57—60.
- [13] ZHANG Lei, JING Yachao. Research on comprehensive evaluation of military aircrafts' overhaul performance based on entropy weight and cloud model[C]//E3S Web of Conferences, 5th International Workshop on Advances in Energy Science and Environment Engineering (AESEE 2021), 2021, 02065—02068.
- [14] 张建伟,廖小平,魏土荣.高速公路运营期高边坡安全风险评估体系研究[J].路基工程,2015(6):197—203.
- [15] 杨丰羽,赵艳,张燕飞.高速公路互通式立交路段交通事故特性分析[J].交通科技,2019(2):107—110.
- [16] 孙明玲,赵妮娜,刘莎.高速公路连续长大下坡交通事故与线形特征分析[J].道路交通与安全,2016,16(4):61—64.
- [17] 钟鼎文.高速公路隧道交通事故特征分析研究[J].科技创新与应用,2017(22):183+185.
- [18] ABDEL-ATY M, EKRAM A A, HUANG H L, et al. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke[J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(5):1730—1737.
- [19] 张运福,林毅,李倩,等.气象条件对高速公路交通影响研究进展[J].黑龙江交通科技,2016(5):168—169.

收稿日期:2022—04—11