

# 山区高速公路平行式避险车道安全性评价研究

刘维维<sup>1</sup>, 万航<sup>1\*</sup>, 赵一飞<sup>2</sup>, 赵艳<sup>2</sup>, 祁晨旭<sup>1</sup>

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**基于 AHP-TOPSIS 方法建立山区高速公路平行式避险车道安全性评价模型。运用 AHP 法对影响平行式避险车道安全性的相关因素进行分类聚合, 建立目标层—准则层—指标层的平行式避险车道安全性评价指标体系; 运用“1~9 标度法”并结合专家意见, 确定单层指标权重、综合权重及综合权重排序; 结合 TOPSIS 法计算评价方案与正理想解的贴近度, 给出贴近度与平行式避险车道安全性等级划分为 5 级的对应关系; 依托 3 条平行式避险车道的设计成果, 对评价模型进行实例应用, 评定其安全性等级的同时提出改善措施建议。

**关键词:**AHP-TOPSIS; 山区高速公路; 平行式避险车道; 安全性评价; 措施建议

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

国内外实践证明: 避险车道是长大下坡路段减轻大货车制动失灵事故严重程度最为主要的工程技术措施之一<sup>[1]</sup>。该文的研究对象——平行式避险车道(图 1), 是指在高速公路连续长大下坡路段紧邻主线硬路肩外侧设置、平纵线形与主线保持一致、供速度失控车辆尽快驶离主线进行减速并展开自救的专用车道。平行式避险车道的组成一般包括渐变段、引道、制动车道、返回车道、附属设施(包括交通标志标线、防撞设施、视线诱导设施、排水设施、照明设施、监控设施等)。它的纵坡与主线保持一致, 承继了下坡制动坡床型避险车道能较好地适应地形条件、填方工程量较小、选址相对容易等优点, 并在制动车道后增设返回车道, 弥补下坡制动坡床型避险车道救援清障困难的缺点, 提高了避险车道的救援效率。该类型避险车道在中国国内实践应用相对较少, 尚未形成完善的安全性评价体系

和评价方法(甘肃省正在试用)。为充分保障平行式避险车道设计方案的安全性和有效性, 有必要从设置条件和结构组成出发系统建立安全性评价模型, 从而为平行式避险车道的设计、改造和后期运营安全管理工作提供参考性依据。

## 1 平行式避险车道安全性评价指标体系

### 1.1 安全性评价指标体系建立

高速公路平行式避险车道是一个具有多维度、多层次的复杂系统。该文从平行式避险车道的设置条件和结构组成出发, 根据影响平行式避险车道各因素间的相互关联及隶属关系, 将平行式避险车道安全评价指标体系分为目标层、准则层和指标层, 如图 2 所示。

#### (1) 设置位置 $C_1$

平行式避险车道设置范围内主线平面线形应为直线或大半径平曲线, 其中, 渐变段、引道和返回车道可设置为主线为直线段或大半径平曲线路段, 制动车道必须设置在直线段。设置在直线段, 可减小驾驶员的操作难度, 也有利于车辆避险过程中前轮同时进入强制减速区域, 防止受力不均而引发倾斜或侧翻的恶性交通事故。出于尽可能减小避险车道总长和提高避险车道的减速效果, 制动车道宜设置为主线缓坡段, 并选择单一纵坡段, 在不得已选择变坡路段时, 应选择先缓

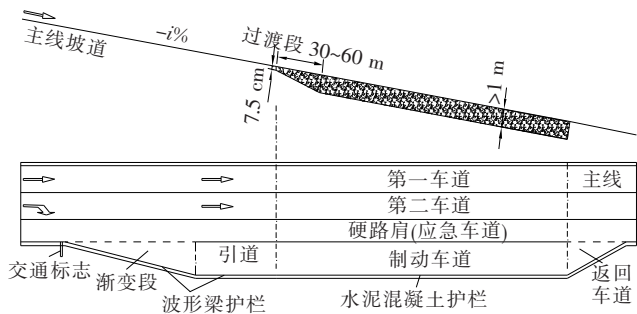


图 1 平行式避险车道平面及纵断面示意图

收稿日期: 2022-11-02(修改稿)

基金项目: 中交一公院科技创新项目(编号: KCJJ2018-05)

作者简介: 刘维维, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 410891706@qq.com

\* 通信作者: 万航, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 1132862644@qq.com

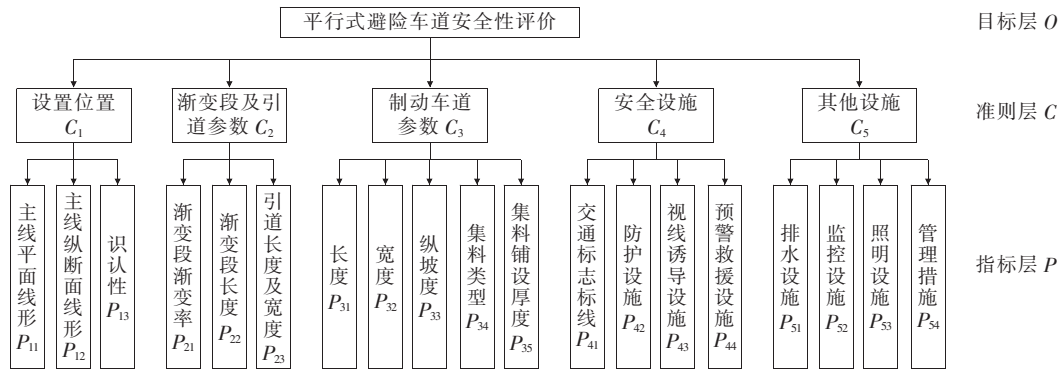


图 2 平行式避险车道安全性评价指标体系图

后陡的组合纵坡段。另外,为使驾驶员能够及早发现避险车道入口并看清避险车道全貌,避险车道全段还应满足驾驶员识别视距的要求<sup>[2]</sup>。

(2) 渐变段及引道参数  $C_2$

为方便制动失效车辆可以较为平稳地进入避险车道,渐变段应具有合适的渐变率和渐变长度。渐变段形式采用平行式,终点宽度与制动车道宽度同宽。该文基于制动失控车辆在平行式避险车道渐变段处的运行轨迹特性,提出平行式避险车道渐变段计算模型示意图如图 3 所示。

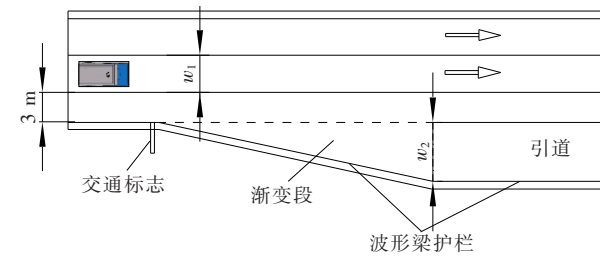


图 3 平行式避险车道渐变段计算模型示意图

计算公式如下:

$$t_1 = \frac{w_1/2+3}{v_0} \tag{1}$$

$$t_2 = \frac{w_1/2+3+w_2/2}{v_0} \tag{2}$$

$$L_1 = Vt_1 \tag{3}$$

$$L_2 = Vt_2 \tag{4}$$

$$L = L_2 - L_1 \tag{5}$$

$$n = \frac{w_2}{L} \tag{6}$$

式中: $w_1$ 、 $w_2$  分别为主线最外侧车道宽度、避险车道渐变段终点车道宽度(m); $V$ 、 $v_0$  分别为避险车道入口设计速度值(km/h)、车辆横移速度值(取 1 m/s); $t_1$ 、 $t_2$  分别为失控车辆从主线最外侧车道分别行驶

至硬路肩和避险车道渐变段终点时所用的时间(s); $L$ 、 $L_1$ 、 $L_2$  分别为平行式避险车道渐变段长度、主线最外侧车道至硬路肩渐变段长度、渐变段总长度(m); $n$  为避险车道渐变段渐变率。

将相关参数代入式(1)~(6),得出平行式避险车道不同宽度下渐变段的渐变率和渐变长度的建议值,如表 1 所示。

引道设置长度需满足驾驶员调整舒缓紧张情绪、安全顺利进入制动车道的要求,采用避险车道入口设

表 1 平行式避险车道不同宽度下渐变段的渐变率和渐变长度的建议值

$w_2$ / m	$V$ / (km · h <sup>-1</sup> )	$n$	$L_1$ / m	$L$ / m	$L_2$ / m
4.5	100	1/23.1	94	104	198
	110	1/25.5	103	115	218
	120	1/27.8	113	125	238
	130	1/30.1	122	135	257
	140	1/32.4	131	146	277
5.0	150	1/34.7	141	156	297
	100	1/22.2	94	111	205
	110	1/24.4	103	122	225
	120	1/26.7	113	133	246
	130	1/28.9	122	144	266
5.5	140	1/31.1	131	156	287
	150	1/33.3	141	167	307
	100	1/21.5	94	118	212
	110	1/23.6	103	130	233
	120	1/25.8	113	142	254
6.0	130	1/27.9	122	153	275
	140	1/30.1	131	165	297
	150	1/32.2	141	177	318

续表 1

$w_2/$ m	$V/$ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$n$	$L_1/$ m	$L/$ m	$L_2/$ m
6.0	100	1/20.8	94	125	219
	110	1/22.9	103	138	241
	120	1/25.0	113	150	263
	130	1/27.1	122	163	284
	140	1/29.2	131	175	306
	150	1/31.3	141	188	328

计速度 3 s 行程作为最小长度进行控制<sup>[3]</sup>。引道横断面宽度设计采用引道全长均以制动车道宽度过渡至制动车道入口的形式。引道的最小长度  $L_{\min}$  可根据式(7)计算:

$$L_{\min}=\frac{V}{3.6}\times t=\frac{V}{1.2}$$

(7)

不同入口设计速度  $V$  下,平行式避险车道引道最小设置长度  $L_{\min}$  如表 2 所示。

表 2 平行式避险车道引道最小设置长度建议值

$V/$ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$L_{\min}/$ m	$V/$ ( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$L_{\min}/$ m
150	125	120	100
140	117	110	92
130	108	100	83

表 3 不同材料的滚动阻力系数值

表面材料	$f$	表面材料	$f$	表面材料	$f$
硅酸盐水泥混凝土	0.01	沥青混凝土	0.012	密实的砂砾	0.015
松散的砂质泥土	0.037	松散的碎料	0.05	松散的砂砾、砾石	0.1
砂	0.15	豆砾石	0.25		

表 4 平行式避险车道制动车道长度建议值

制动车道 纵坡/%	坡床材料	$f$	不同入口设计速度(km/h)时制动车道长度/m					
			100	110	120	130	140	150
0	松散砾石	0.10	394	476	567	665	772	886
	砂	0.15	262	318	378	444	514	591
	豆砾石	0.25	157	191	227	266	309	354
-2	松散砾石	0.10	492	595	709	832	965	1 107
	砂	0.15	303	366	436	512	594	681
	豆砾石	0.25	171	207	246	289	336	385
-3	松散砾石	0.10	562	681	810	951	1 102	1 265
	砂	0.15	328	397	472	554	643	738
	豆砾石	0.25	179	217	258	302	351	403

(3) 制动车道参数  $C_3$

制动车道是平行式避险车道强制减速、展开自救的场所,是结构组成中最为重要的部分。制动车道应设置在主线直线段;纵断面线形宜设置在缓坡段,并采用单一纵坡度,在不得已采用变坡设计时,应采用先缓后陡的组合纵坡。同时,从驾驶员生理心理和控制工程造价的角度出发,平行式避险车道制动车道宜按满足一辆车使用设计,宽度为 4.5~6.0 m,并选用合适的集料类型和铺设厚度,该文制动车道面层集料推荐采用豆砾石。

该文在现有规范标准指南的基础上,基于运动学原理对平行式避险车道的制动车道长度展开讨论研究,假设失控车辆在平行式避险车道制动车道上做匀减速直线运动,仅考虑车辆轮胎与制动车床材料间的滚动阻力和车辆自身的重力作用<sup>[4]</sup>,根据能量守恒定律,可得式(8)、(9):

$$\frac{1}{2}mv^2=mgLf+mgLi$$

(8)

$$L=\frac{V^2}{254(f+i)}$$

(9)

式中: $v$  为车辆驶入避险车道的速度(m/s); $f$  为制动车道集料的滚动阻力系数,按表 3 取值; $i$  为制动车道纵坡度; $g$  为重力加速度,取  $9.8\text{ m/s}^2$ 。

得到平行式避险车道制动车道长度建议值见表 4。

续表 4

制动车道 纵坡/%	坡床材料	$f$	不同入口设计速度(km/h)时制动车道长度/m					
			100	110	120	130	140	150
-4	松散砾石	0.10	656	794	945	1 109	1 286	1 476
	砂	0.15	358	433	515	605	702	805
	豆砾石	0.25	187	227	270	317	367	422
-5	松散砾石	0.10	787	953	1 134	1 331	1 543	1 772
	砂	0.15	394	476	567	665	772	886
	豆砾石	0.25	197	238	283	333	386	443
-6	松散砾石	0.10	984	1 191	1 417	1 663	1 929	2 215
	砂	0.15	437	529	630	739	857	984
	豆砾石	0.25	207	251	298	350	406	466

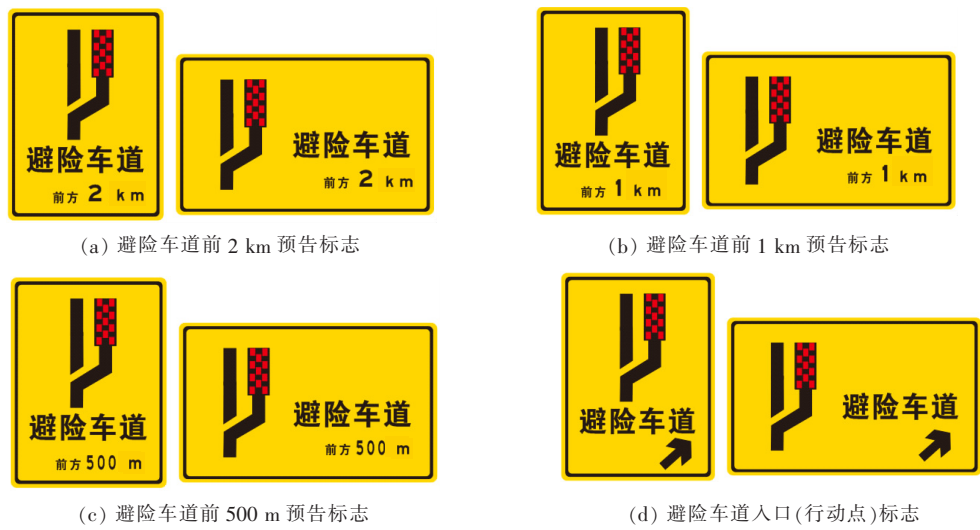


图 4 平行式避险车道预告标志

(4) 安全设施  $C_4$

该文根据平行式避险车道的形式建议采用图 4 避险车道预告标志,并建议加强其他安全设施设计。

(5) 其他设施  $C_5$

为了加强对平行式避险车道的管理和救援体系建设,设置监控照明设施很有必要。同时,应做好排水设施设计,并加强对避险车道的日常养护和沿途载重车的超载治理工作。

1.2 评价指标分级标准确定

基于上文确定的评价指标体系,该文将各评价指标的安全性等级划分为 5 级,分别对应表示安全、较安全、基本安全、安全性差和事故多发,并对应设置 90~100、80~90、70~80、50~70 和 0~50 共 5 个区间分值<sup>[5]</sup>,最后根据专家依照设计资料和现场调研后对各评判指标的综合打分情况,进而表述各指标对平行式避险车道整体安全性的影响。

2 平行式避险车道安全性评价模型

建立基于 AHP-TOPSIS<sup>[6-7]</sup> 的平行式避险车道安全评价模型。若评价方案与正理想解的贴近度越大,表明该方案平行式避险车道设置的安全性越好。

2.1 AHP 法确定评价指标权重

(1) 构造判断矩阵

以所隶属的上层指标为基准,比较同层各元素对上层指标的影响程度,并对其进行重要度赋值,依据结果构造判断矩阵  $A_P$  :

$$A_P = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $a_{ij}$  为元素  $i$  相对于元素  $j$  对上层指标影响的重要程度,其值的大小主要由专家依据表 5 的判断尺度

对各元素进行两两比较获得<sup>[8]</sup>。

表5 AHP常用判断尺度及含义

$a_{ij}$	含义
1	指标 <i>i</i> 与指标 <i>j</i> 同等重要
3	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 稍微重要
5	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 明显重要
7	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 强烈重要
9	指标 <i>i</i> 比指标 <i>j</i> 极度重要
2,4,6,8	重要性程度介于两等级之间
倒数	若因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 重要性判断结果为 $a_{ij}$ , 则 $1/a_{ij}$ 为因素 <i>j</i> 与因素 <i>i</i> 的重要性比值

(2) 单层指标权重计算

根据层次分析法原理对判断矩阵的最大特征根对应的特征向量进行归一化处理后,即可得到所需的各单层指标相对权重值 $w_i$ 。该文选用方根法对各指标权重进行计算,如式(11)所示:

$$w_i = \frac{\overline{w_i}}{\sum_{i=1}^n \overline{w_i}} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}} \quad (11)$$

式中: $\overline{w_i}$ 表示矩阵*A*的第*i*行元素乘积的*n*次方根。

矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 按式(12)计算:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_i}{n w_i} \quad (12)$$

表7 平行式避险车道安全性评价指标综合权重排序

准则层 <i>C</i>	权重	指标层 <i>P</i>	权重	综合权重 $W_{ij}$	排序
设置位置 $C_1$	0.345	主线平面线形 $P_{11}$	0.429	0.148	2
		主线纵断面线形 $P_{12}$	0.143	0.049	8
		识认性 $P_{13}$	0.429	0.148	2
渐变段及引 道参数 $C_2$	0.056	渐变段渐变率 $P_{21}$	0.200	0.011	15
		渐变段长度 $P_{22}$	0.200	0.011	15
		引道长度及宽度 $P_{23}$	0.600	0.034	10
制动车道 参数 $C_3$	0.409	长度 $P_{31}$	0.444	0.182	1
		宽度 $P_{32}$	0.051	0.021	12
		纵坡度 $P_{33}$	0.121	0.049	7
		集料类型 $P_{34}$	0.286	0.117	4
		集料铺设厚度 $P_{35}$	0.098	0.040	9
安全设施 $C_4$	0.151	交通标志、标线 $P_{41}$	0.402	0.061	5
		防护设施 $P_{42}$	0.402	0.061	5
		视线诱导设施 $P_{43}$	0.054	0.008	17
		预警救援设施 $P_{44}$	0.143	0.022	11

(3) 一致性检验

为了保证矩阵*A*求出的权重系数 $\overline{w_i}$ 的合理性,应使得由式(12)得到最大特征值 $\lambda_{\max}$ 通过一致性检验,其一致性标准是 $CR \leq 0.1$ 。*CR*值按式(13)计算:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

式中:*CI*为一致性检验指标, $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ; *RI*为平均随机一致性指标,其具体取值按表6执行<sup>[9]</sup>。

表6 *RI*取值

阶数	<i>RI</i>	阶数	<i>RI</i>
1	0	6	1.26
2	0	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12		

(4) 综合权重计算

基于各指标相对权重,采用递阶加权求和的方法对各层权重进行组合,得到指标层各要素相对于总目标的综合分配权重,并以此综合排序权重计算结果作为最终目标方案决策比较的依据。

根据图2所示安全性评价指标体系,该文邀请高速公路平行式避险车道研究方向的资深专家采用“1~9标度法”对各层次评价指标相对重要性进行赋值,进而计算得到单层指标权重、综合权重(即最底层元素相对于总目标的综合权重)及综合权重排序。处理结果见表7。



续表 7

准则层 C	权重	指标层 P	权重	综合权重 $W_{ij}$	排序
其他设施 $C_5$	0.039	排水设施 $P_{51}$	0.055	0.002	19
		监控设施 $P_{52}$	0.517	0.020	13
		照明设施 $P_{53}$	0.325	0.013	14
		管理措施 $P_{54}$	0.103	0.004	18

2.2 TOPSIS 法确定评价方案相对贴近度

(1) 构造加权标准化决策矩阵

设参与评价的  $m$  个平行式避险车道  $E_1、E_2、\cdots、E_m$  形成评价方案集  $E$ ,每个方案的判断指标有  $n$  个,构成指标集  $P=(P_1,P_2,\cdots,P_n),b_{ij}$  为平行式避险车道方案  $E_i$  对应指标  $P_j$  的值。由此可建立初始决策矩阵  $B$ :

$$B = \begin{matrix} & P_1 & \cdots & P_n \\ E_1 & [b_{11} & \cdots & b_{1n}] \\ & \vdots & & \vdots \\ E_m & [b_{m1} & \cdots & b_{mn}] \end{matrix} \quad (14)$$

鉴于不同判断指标间,其衡量标准及对应量纲均不同。为消除不同指标量纲不同对平行式避险车道安全性评价带来的影响,对初始决策矩阵  $B$  进行无量纲化处理,得到标准化决策矩阵  $F$ :

$$F = (f_{ij})_{m \times n} = \left( \frac{b_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (b_{ij})^2}} \right)_{m \times n} \quad (15)$$

将层次分析法得到的指标权重  $W$  与无量纲化决策矩阵  $F$  相结合,得到加权标准化决策矩阵  $H$ :

$$H = (h_{ij})_{m \times n} = \begin{matrix} & \omega_1 f_{11} & \cdots & \omega_n f_{1n} \\ & \vdots & & \vdots \\ & \omega_1 f_{m1} & \cdots & \omega_n f_{mn} \end{matrix} \quad (16)$$

(2) 加权标准化决策矩阵正、负理想解及距离计算

根据 TOPSIS 法,加权标准化决策矩阵正理想解  $H_j^+$ 、负理想解  $H_j^-$  求解公式如下:

$$\begin{aligned} H_j^+ &= \begin{cases} \max(h_{ij}), j=1,2,\cdots,n; P_j \text{ 为越大越优型指标} \\ \min(h_{ij}), j=1,2,\cdots,n; P_j \text{ 为越小越优型指标} \end{cases} \\ H_j^- &= \begin{cases} \min(h_{ij}), j=1,2,\cdots,n; P_j \text{ 为越大越优型指标} \\ \max(h_{ij}), j=1,2,\cdots,n; P_j \text{ 为越小越优型指标} \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

评价方案与正、负理想解之间的欧式距离分别为  $D_i^+$  和  $D_i^-$ ,其计算公式为:

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (h_{ij} - H_j^+)^2} \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (h_{ij} - H_j^-)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

(3) 评价方案与正理想解的贴近度  $\eta_i$

$$\eta_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad 0 \leq \eta_i \leq 1 \quad (19)$$

评价方案与正理想解的贴近度  $\eta_i$  越大,表明平行式避险车道的安全性越好。该文参考相关文献[10],将平行式避险车道的安全等级分为 5 级,如表 8 所示。其中,级别越大,表征平行式避险车道的安全性越差。

表 8 平行式避险车道安全等级划分标准

贴近度	安全等级	贴近度	安全等级
$[0,0.3]$	V 级	$(0.7,0.9]$	II 级
$(0.3,0.6]$	IV 级	$(0.9,1]$	I 级
$(0.6,0.7]$	III 级		

注:V 级表示安全性差,IV 级表示基本安全,III 级表示安全,II 级表示安全性好,I 级表示十分安全。

3 工程应用

3.1 实例分析

选取国家高速公路 G30(永山高速公路)绣花庙路段平行式避险车道  $E_1$ (K2083+350~K2083+980)、连霍国道主干线(G045)永昌至山丹段平行式避险车道  $E_2$ (K2621+300~K2621+930)和 G4012 龙丽高速公路拟修建平行式避险车道  $E_3$ (K424+055~K424+710)共 3 条避险车道对该文建立的安全性评价模型进行实例运用。通过查阅设计资料、现场实地调研,结合该文提出的基于 AHP-TOPSIS 方法建立的山区高速公路平行式避险车道安全性评价模型,采用该文确定的安全性评价指标体系对应的指标分级结果与指标权重系数,对上述 3 条平行式避险车道设计方案进行安全性评价,3 处平行式避险车道资料数据概况如表 9 所示,指标分级结果见表 10。

表 9 调查路段平行式避险车道资料数据概况

项目				单位	避险车道 E <sub>1</sub>	避险车道 E <sub>2</sub>	避险车道 E <sub>3</sub>
主线设计速度				km/h	120	120	80
入口设计速度				km/h	150	150	130
主线平面线形					直线段	左转弯曲线段( $R>1\,000\text{ m}$ )	直线段
主线纵断面线形					直坡段	( $-3.85\%/400\text{ m}$ )+( $-2.9\%/140\text{ m}$ )+( $-3.025\%/90\text{ m}$ )	直坡段
渐变段	识认性				满足标准规范要求	满足标准规范要求	满足标准规范要求
	渐变率	采用值			1/33.3	1/40	1/27.5
	长度	采用值	m		200	200	165
引道	长度	采用值	m		—	—	110
		建议值	m		125	125	108
	宽度		m		—	—	6
制动车道	长度	采用值	m		400	400	310
	宽度	采用值	m		6	5	6
	综合坡度		%		-2.30	-3.52	-3.46
	集料类型				豆砾石	豆砾石	豆砾石
	铺设方式及铺设厚度				80 cm 豆砾石+20 cm 钢筋混凝土+20 cm 水泥稳定砂砾+20 cm 压实碎石土	40 cm 豆砾石+20 cm 钢筋混凝土+20 cm 水混稳定砂砾+20 cm 压实碎石土	100 cm 豆砾石+30 cm 水泥稳定碎石基层+15 cm 级配碎石垫层
返回车道	采用值	m			30	30	70
	长度	建议值	m		90	90	70

表 10 平行式避险车道指标分级结果(初始决策矩阵 B)

避险车道	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{21}$	$P_{22}/\text{m}$	$P_{23}/\text{m}$	$P_{31}/\text{m}$	$P_{32}/\text{m}$	$P_{33}/\%$	$P_{34}$
E <sub>1</sub>	100	98	96	1/33.3	200	0	400	6	-2.30	100
E <sub>2</sub>	85	87	92	1/40.0	200	0	400	5	-3.52	100
E <sub>3</sub>	100	95	95	1/27.5	165	110	310	6	-3.46	100
避险车道	$P_{35}/\text{cm}$	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	$P_{51}$	$P_{52}$	$P_{53}$	$P_{54}$	
E <sub>1</sub>	85	88	87	85	78	85	0	88	75	
E <sub>2</sub>	75	85	86	65	75	85	0	80	75	
E <sub>3</sub>	95	96	95	94	95	88	100	95	94	

由表 10 指标分级结果,可得到初始决策矩阵 B,将其进行无量纲化处理得到标准化决策矩阵并与表 7 AHP 法确定的各评价指标的综合权重相结合,可构造加权标准化决策矩阵 H 如表 11 所示。

通过式(17)~(19)分别计算各评价方案与正理想解的相对距离  $D_i^+$ 、与负理想解的相对距离  $D_i^-$  以及与正理想解的贴近度  $\eta_i$ ,得到 3 条平行式避险车道的安全性等级评价结果见表 12。

表 11 加权标准化决策矩阵 H

避险车道	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$
E <sub>1</sub>	0.089 7	0.029 7	0.086 9	0.006 2	0.006 7	0	0.112 9	0.012 8	-0.020 7	0.067 5
E <sub>2</sub>	0.076 2	0.026 3	0.083 3	0.005 2	0.006 7	0	0.112 9	0.010 7	-0.031 7	0.067 5
E <sub>3</sub>	0.089 7	0.028 8	0.086 0	0.007 5	0.005 5	0.034 0	0.087 5	0.012 8	-0.031 1	0.067 5

续表 11

避险车道	$P_{35}$	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$	$P_{44}$	$P_{51}$	$P_{52}$	$P_{53}$	$P_{54}$
$E_1$	0.023 0	0.034 5	0.034 3	0.004 8	0.011 9	0.001 1	0	0.007 5	0.002 1
$E_2$	0.020 3	0.033 3	0.033 9	0.003 7	0.011 5	0.001 1	0	0.006 8	0.002 1
$E_3$	0.025 7	0.037 7	0.037 4	0.005 3	0.014 5	0.001 2	0.020 0	0.008 1	0.002 7

表 12 平行式避险车道安全等级

避险车道	$D_i^+$	$D_i^-$	贴适度 $\eta_i$	安全等级
$E_1$	0.039 9	0.031 4	0.440 8	Ⅳ级(基本安全)
$E_2$	0.044 3	0.025 5	0.365 7	Ⅳ级(基本安全)
$E_3$	0.027 6	0.042 8	0.607 8	Ⅲ级(安全)

由表 12 可知:3 个被评价项目平行式避险车道的安全性等级排序为  $E_3 > E_1 > E_2$ , 其中  $E_3$  避险车道的安全性等级为Ⅲ级(安全),  $E_1$  和  $E_2$  避险车道的安全性等级为Ⅳ级(基本安全)。

3.2 措施建议

(1) 结合已建成避险车道的使用效果, 论证是否增设引道

$E_1$  和  $E_2$  均已投入运营且均未设置引道, 建议调查以上路段中的避险车辆是否存在制动车道入口附近频繁碰撞水泥混凝土护栏的事故; 若是, 则表明避险车道亟需增设引道, 以提供给驾驶员充足的心理调整和操作时间沿引道对正制动车道驶入。

(2) 返回车道长度优化

平行式避险车道返回车道的作用是便于施救车辆将陷入制动车道的失控车辆拖出, 提高避险车道的救援效率。考虑到施救车辆救援工作结束后返回道路主线的需要,  $E_1$  和  $E_2$  返回车道长度设置为 30 m, 长度略短, 建议适当延长返回车道长度。

(3) 制动车道集料深度优化

$E_1$  和  $E_2$  的面层集料均为豆砾石, 厚度分别为 80 cm 和 40 cm。建议增加制动车道面层集料豆砾石的厚度, 以满足规范要求。

(4) 防护设施优化

$E_1$  和  $E_2$  除制动车道外其余部分均采用 Grb-A-4E 波形梁护栏, 考虑到失控车辆避险过程中运行速度都很高, 建议更换为四(SB)级三波波形梁护栏或“两波+两波”加强型护栏, 间距 2 m, 并按照 JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》的相关要求做好波形梁护栏与水泥混凝土护栏间的衔接过渡。

(5) 增设监控及云预警设备

建议在  $E_1$  和  $E_2$  避险车道路段设置电子监控设

备, 做到避险车道路段全天候 24 h 高清无盲区监控, 同时在避险车道适当位置设置云控预警设备或可变信息情报板, 实时精准发布避险车道的使用情况和事故、拥堵、雨雪天气等预警信息。

4 结 论

(1) 运用 AHP 层析分析法和“1~9 标度法”, 建立了山区高速公路平行式避险车道安全性评价指标体系, 为平行式避险车道的安全性评价指标选取明晰了思路。

(2) 基于 AHP-TOPSIS 方法建立山区高速公路平行式避险车道安全性评价模型, 并给出了贴适度与平行式避险车道安全性等级划分为 5 级的对应关系。

(3) 依托 3 条平行式避险车道具体设计, 对评价模型进行了应用, 给出了各评价方案安全性等级以及改善其安全性的措施建议。

参考文献:

[1] 付小红. 高速公路连续长大下坡避险车道的设置研究与安全性评价[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

[2] 张驰, 张宏, 闫晓敏, 等. 复杂长大陡坡路段避险车道安全评价模型[J]. 公路, 2018, 63(4): 159—168.

[3] 李淑庆. 交通工程导论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[4] 戚亚军. 避险车道几何设计指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.

[5] 郭鑫, 徐阳, 刘明文, 等. 长大下坡路段避险车道安全评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(4): 152—158.

[6] 朱珠, 张琳, 叶晓雯, 等. 基于 TOPSIS 方法的土地利用综合效益评价[J]. 经济地理, 2012, 32(10): 139—144.

[7] 李彦斌, 于心怡, 王致杰. 采用灰色关联度与 TOPSIS 法的光伏发电项目风险评价研究[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1 514—1 519.

[8] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93—100.

[9] 李嵘, 刘志钢, 潘寒川, 等. 基于 AHP-TOPSIS 的城市轨道交通应急演练评估研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(1): 110—115.

[10] 周维东, 汤乾斌, 刘唐志. 山区高速公路紧急避险车道安全性评价研究[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(10): 50—53.