

文章编号: 0451-0712(2018)04-0159-09

中图分类号: U491.223;X913.4

文献标识码: A

# 复杂长大陡坡路段避险车道安全评价模型

张 驰<sup>1</sup>, 张 宏<sup>1</sup>, 闫晓敏<sup>1</sup>, 张 敏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064; 2. 长安大学 公路学院交通工程研究所 西安市 710064)

**摘 要:** 为评价避险车道的安全性,根据避险车道的设置参数,选取引道长度、流出角、视距条件、制动床长度、坡度、集料类型、集料深度等 11 个指标,基于集值统计法思想确定了各评价指标的标度分级与权重,提出了避险车道安全评价模型,并给出了避险车道整体安全性的 5 个等级与相应的安全控制措施。依托西南山区某高速公路的 4 个避险车道设计,对模型进行了应用说明,结果表明:4 个避险车道的识别视距、引道长度差值、流出角三方面存在较大的安全隐患,整体安全值分别为 1.415、1.722、0.607、1.231,安全等级均为Ⅳ级,轻度不安全。该模型与实际相符,模型评价全面详细,应用方便,科学合理。

**关键词:** 道路工程; 长大下坡; 避险车道; 安全评价; 集值统计

国内外改善连续长大下坡路段交通安全形势的实践经验已经证明,避险车道是最为有效的工程措施。而避险车道设置的合理性与安全性是改善长大下坡路段的关键。最早进行避险车道建设的是美国加利福尼亚州,美国联邦公路局(FHWA)开发的坡道严重度分级系统(Grade Severity Rating System, GSRS)是目前连续长大下坡路段是否需要设置避险车道运用最广泛的分析工具<sup>[1]</sup>。美国土木工程师协会(ACSE)<sup>[2,3]</sup>介绍了是否需要设置避险车道的确定方法。亚利桑那州<sup>[4]</sup>指出事故数、制动器温度等影响避险车道设置因素。提出解决货车失控问题的渐进方法<sup>[5]</sup>。Susan T. Chrysler 等基于驾驶员行驶特性对避险车道交通控制设施的行车线路的管理进行了研究<sup>[6]</sup>。Claus Bahlmann 等针对避险车道研究了基于不同标志颜色、形状、可变信息下的交通追踪与识别系统<sup>[7]</sup>;Eck. R. W 在“货车避险设施的使用与设置位置的实践与经验”的报告中总结了避险车道设置的影响因素<sup>[8]</sup>。Ballard A J 对火车避险车道技术现状进行了分析<sup>[9]</sup>。Jin-Mei W U 提出了山区避险车道的设计方法<sup>[10]</sup>。Niu J F 对避险车道的流出角进行了研究<sup>[11]</sup>。Liu S 从驾驶员心生理研究了避险车道长度等参数设置<sup>[12]</sup>。与国外

相比,国内在避险车道设置和研究方面起步较晚,1998年北京八达岭高速公路才设置了国内第一条避险车道。陈渤通过分析载重货车在长大下坡路段制动系统失效原因,得出载重货车在长大下坡路段制动失效与坡度坡长关系以及制动失效后速度与坡长坡度的计算公式<sup>[13]</sup>。张建军建立了重型车辆下坡速度与距坡顶距离的关系模型,并提出了避险车道的设置原则<sup>[14]</sup>。梁营力通过分析得出长大下坡路段事故多发于外地驾驶人驾驶的大货车,且事故从下坡 3 km 附近开始频繁出现,刹车失灵主要发生在 7 km 以后<sup>[15]</sup>。肖宁评价了多种减速设施的减速效果和减速路段的行车安全性,对比了各种交通安全设施的综合效益<sup>[16]</sup>。马壮林研究高速公路连续下坡路段交通事故时空分布特征,验证了避险车道的有效性<sup>[17]</sup>。许洪国等应用模糊统计对山区公路安全评价研究<sup>[18,19]</sup>。

目前国内外研究均验证了避险车道对提高行车安全性的重要性,但研究普遍从引起车辆失控的原因与设置位置的角度进行研究。其次,复杂长大陡坡路段避险车道设置困难,因设置位置不合理存在较大的安全隐患,而国内外研究很少从安全性的角度对避险车道设置的合理性进行评价。此外,国内

基金项目:交通运输部应用基础研究项目,项目编号 2014319812170;中国博士后科学基金,项目编号 2016M590915;“十二五”国家科技支撑计划项目,项目编号 2014BAG05B01;中央高校基本科研业务费专项资金项目,项目编号 310821172201&310821172002;陕西省自然科学基金基础研究计划,项目编号 S2017-ZRJJ-MS-0603

收稿日期:2017-08-02

在避险车道设置原则上较模糊、主观性强,存在长度不够、设置不合理、端头防护不合理等诸多问题,且安全评价方面没有一个统一的标准。因此本文提出一种安全评价模型对避险车道设置的合理性与安全性进行评价,并依托西南山区某高速公路的避险车道设计,有利于避险车道的合理设置,提高避险车道安全性。

### 1 评价指标确定

避险车道参数(制动床长度、引道长度等)在设计时具有较大的主观性,导致避险车道在使用中存

在诸多问题。对连续长陡下坡路段,应根据交通量及交通组成、地形条件、服务设施的分布情况等,对避险车道设置位置、数量间距进行评价,并对避险车道的引道、平面线形、纵面线形、横断面宽度、长度和坡度、制动坡床材料、排水、端部处理以及交通安全设施和管理设施等进行评价。本文参考国内外相关规范、研究与国内避险车道主要存在的问题,结合避险车道细节设置(见图1),确定设置合理性、平纵横线形、制动坡床材料、长度、引导长度、端头防护、安全措施等评价内容<sup>[20-21]</sup>。

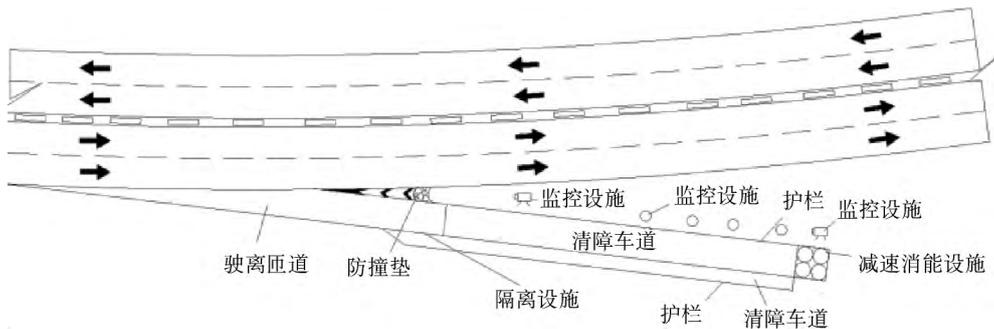


图 1 典型避险车道组成部分示意

#### (1) 设置位置。

避险车道合理设置可以确保失控车辆安全、顺利驶入,提供一种自救方式。若位置不合理不仅起不到避险的作用,或许还会增加车辆其他危险因素,适得其反,还增加财政负担。运营公路避险车道设计应分析连续下坡路段的货车制动失效事故特征,参考制动毂温度和货车运行速度,结合公路线形、路侧地形条件、桥隧结构物位置与视认性要求等选择避险车道的设置位置。本文主要从避险车道设置位置的视认性进行其安全性分析。

#### (2) 平面线形。

车辆失控后,驾驶员心理极度恐慌,因此驶离匝道平面线形应设计成直线,易于驾驶员操控行驶,避免采用需要车辆转向的曲线。当条件受限必须采用曲线时,曲线半径应尽量采用较大值,保持车辆平稳性要求,一般宜大于不设超高的曲线半径值。

#### (3) 纵断面线形。

避险车道的纵断面线形宜为直坡线。制动车道宜采用单向上坡。当需要设置竖曲线时,竖曲线半径应满足视距要求的半径值。避险车道的纵坡坡度应根据避险车道的长度和坡床材料综合确定,保证车辆不发生纵向倾覆和纵向滑动。其值宜控制在

8%~20%。本文主要选用线形与纵坡两方面进行评价。

#### (4) 横断面。

在右侧地形条件允许情况下,避险车道宽一些为宜,一般以满足一辆车使用。因汽车制动失效时驾驶员心理高度紧张,为保安全控制汽车大致驶入制动车道中间部分,一般不会想到靠左侧或靠右侧,有意留出—条车道供其他失控车辆使用。

#### (5) 引道长度。

引道应保证有足够的长度,使驾驶员能够及时发现避险车道,同时保证失控货车在高速下能平顺地驶入避险车道。若引道长度不足,车辆驶入避险车道受力不均,容易发生侧翻事故。本文主要依据与规范值的差值作为评价依据。

#### (6) 流出角。

从避险车道视认性和车辆转向行驶稳定性两方面考虑,避险车道与主线的夹角取值越小越好。若夹角过大,车辆需要偏离主线较大角度、反向转向才能进入驶离匝道和制动床,这会增加驾驶员在方向操纵上的困难,特别是在车辆失控、车速较高、驾驶员心理紧张的情况下,极易导致车辆横向滑移或倾覆。

### (7) 制动床。

制动床材料应是圆形的、尺寸均匀且单一的、干净的、不易被压碎和压实的,这样能使材料的孔隙率最大化,因此提供最佳排水、减小自锁和压实,以利于车轮陷入。

避险车道的长度应根据失控车辆驶出速度、避险车道纵坡及坡床材料综合确定,以保证失控货车在避险车道内以适宜的减速率安全减速停车。若长度不足,车辆到达避险车道端部时仍具有一定速度,有冲出避险车道的危险。为评价方便,本文采用与规范值的差值作为评价内容。

### (8) 端头防护。

制动床末端端头防护应起一定缓冲作用尽量避免直接碰撞端部挡墙或山体,减轻车辆及乘员的伤害程度。端头高度的合理设置可以有效提高避险车道制动坡床安全防护能量的安全余量。

### (9) 安全措施。

避险车道安全措施包括交通安全设施、排水、照明、诱导、监控、救援锚栓等,这些设施能更好地发挥避险车道的避险能力,也便于失控货车的自救。

## 2 基于集值统计法的避险车道安全评价模型

从避险车道设计、安全性评价规范与国内外研究现状角度而言,上述9方面包含11个评价指标,由于性质不同、评价内容不同、量纲不同,不能直接建立函数计算公式进行计算,而需根据综合评价理论中<sup>[22]</sup>不可公度原理(即评判函数属性值的规范化),将上述11个指标首先进行无量纲化标度,然后求11个指标的权重系数,这样就可以建立11个指标的函数计算公式。并进行求解计算,具体计算表达式如下:

$$S = \sum_{i=1}^m \omega_i X_i \quad (1)$$

式中: $S$ 为避险车道安全值; $\omega_i$ 为第*i*个指标的权重; $X_i$ 为第*i*个指标的标度分值。

由上述模型可知,对避险车道进行安全性评价,首先对上述指标进行公度从而求出标度分值,其次确定11个指标的权重系数。

### 2.1 基于集值统计法的评价指标公度

评价指标公度为依据评价指标对避险车道安全等级进行定义与分级。本文主要采用集值统计法,要求专家给出一个大致的描述范围(即相对空间)的子集,再根据数理统计方法进行可靠度的计算,从而

确定指标公度。

#### 2.1.1 基本理论

假设避险车道安全评价指标构成的集合为  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_i, \dots, E_{11}\}$ ,参与确定指标公度的专家有  $n$  个,第  $j$  个专家对于指标  $E_i$  的公度区间为  $[a_{ij}, b_{ij}]$ 。专家给出的公度区间形成一个集值统计序列  $[a_{i1}, b_{i1}], [a_{i2}, b_{i2}], \dots, [a_{ij}, b_{ij}], \dots, [a_{in}, b_{in}]$ 。对这些区间进行可靠度验证时,首先将这些区间叠加在一起,形成覆盖在评价值轴上的一种分布即样本落影函数  $f(E_i)$ <sup>[23-24]</sup>,如下:

$$f(E_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi(a_{ij}, b_{ij}) \quad (2)$$

$$\varphi(a_{ij}, b_{ij}) = \begin{cases} 1, & a_{ij} \leq u_i \leq b_{ij} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其次,计算指标  $E_i$  的估值:

$$\begin{aligned} \bar{E}_i &= \int_{a_{\min}}^{b_{\max}} E_i f(E_i) dE_i / \int_{a_{\min}}^{b_{\max}} f(E_i) dE_i \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (b_{ij}^2 - a_{ij}^2) / \sum_{j=1}^n (b_{ij} - a_{ij}) \end{aligned} \quad (4)$$

基于估值,用区间方差  $V_i$  来计算其可靠度  $R_i$ ,如下:

$$R_i = (b_{\max} - a_{\min}) / (b_{\max} - a_{\min} + V_i) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} V_i &= \sum_{j=1}^n [(b_{ij} - \bar{E}_i)^3 - (a_{ij} - \bar{E}_i)^3] / \\ &\quad [3 \sum_{j=1}^n (b_{ij} - a_{ij})] \end{aligned} \quad (6)$$

$R_i$  值越大,说明专家对指标的公度越一致,即可靠度越高。实际评价中,可以预先指定可靠度值(如0.9),若未达到指定可靠度值,则需要专家修正对某指标的评价,直至达到该值为止。

#### 2.1.2 评价指标公度

本文邀请多年从事路线设计、安全评价、交通安全分析、路面材料等4个方面的5位专家对上述指标的安全等级进行范围定义。这些专家均对避险车道有一定的了解与接触且专攻不同的方向。专家结合实际项目避险车道的设置条件进行各评价指标安全等级的定义,本文可靠度值最小要求为0.9,若可靠度值未达到要求,则需要专家对某指标进行进一步地了解并修正,直到达到该值为止。专家最终指标公度与可靠度见表1~表9。其中差值均为规范值减实际值。制动坡床材料与安全措施等无法量化的指标经5位专家进行讨论定性描述指标公度见表10。

表 1 入口视认性公度与可靠度

评价专家	入口视认视距差值安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家 1	满足规范	(0,10]	(10,20]	(20,40]	(40,60]
专家 2	满足规范	(0,8]	(8,20]	(20,40]	(40,60]
专家 3	满足规范	(0,8]	(8,15]	(15,35]	(35,60]
专家 4	满足规范	(0,10]	(10,20]	(20,40]	(40,60]
专家 5	满足规范	(0,9]	(9,20]	(20,40]	(40,60]
	/	4.544	14.16	29	49.405
$R_i$	/	0.98	0.971	0.904	0.9
最终公度	满足规范	(0,9.2]	(9,19]	(19,39]	(39,60]

表 2 横向力系数公度与可靠度

评价专家	横向力系数安全等级				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家 1	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.13]	(0.13,0.20]
专家 2	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.15]	(0.15,0.20]
专家 3	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.12]	(0.12,0.20]
专家 4	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.12]	(0.12,0.20]
专家 5	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.13]	(0.13,0.20]
	/	0.025	0.075	0.117	0.164
$R_i$	/	1	1	1	1
最终公度	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.13]	(0.13,0.20]

表 3 竖曲线半径公度与可靠度

评价专家	竖曲线半径安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家 1	直坡段	(6 000,10 000]	(4 000,6 000]	(2 000,4 000]	(100,2 000]
专家 2	直坡段	(6 000,10 000]	(3 000,6 000]	(1 500,3 000]	(100,1 500]
专家 3	直坡段	(6 000,10 000]	(4 500,6 000]	(2 000,4 500]	(100,2 000]
专家 4	直坡段	(6 000,10 000]	(4 000,6 000]	(1 500,4 000]	(100,1 500]
专家 5	直坡段	(6 000,10 000]	(3 000,6 000]	(1 000,3 000]	(100,1 000]
	/	8 000	4 771.47	2 702.381	896.667
$R_i$	/	0.882	0.942	0.942	0.975
最终公度	直坡段	(6 000,10 000]	(3 700,6 000]	(1 600,3 700]	(100,1 600]

表 4 纵坡公度与可靠度

评价专家	纵坡安全等级/%				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家 1	(18,20]	(15,18]	(11,15]	(8,11]	(0,8]
专家 2	(12,15]	(7,12]	(5,7]	(4,5]	(0,4]
专家 3	(13,15]	(10,13]	(8,10]	(6,8]	(0,6]
专家 4	(15,20]	(13,15]	(10,13]	(8,10]	(0,8]
专家 5	(10,15]	(8,10]	(6,8]	(4,6]	(0,4]
	15.088	11.833	10.038	4.283	4.529
$R_i$	0.923	0.909	0.918	0.955	0.952
最终公度	(13.0,17.0]	(10.5,13.5]	(8.0,10.5]	(6.0,8.0]	(0.6,0]

表5 横断面宽度公度与可靠度

评价专家	横断面宽度安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家1	[9.0,11.0)	[8.5,9.0)	[8.0,8.5)	[5.0,8.0)	[3.5,5.0)
专家2	[9.0,12.0)	[8.0,9.0)	[7.0,8.0)	[5.0,7.0)	[3.5,5.0)
专家3	[9.0,14.5)	[8.5,9.0)	[6.0,8.5)	[5.0,6.0)	[3.5,5.0)
专家4	[9.0,12.0)	[8.5,9.0)	[7.0,8.5)	[5.0,7.0)	[3.5,5.0)
专家5	[9.0,11.0)	[8.0,9.0)	[7.0,8.0)	[5.0,7.0)	[3.5,5.0)
	10.815	8.607	7.519	6.1	4.25
$R_i$	0.918	0.996	0.983	0.975	0.991
最终公度	[9.0,12.0)	[8.3,9.0)	[7.0,8.3)	[5.0,7.0)	[3.5,5.0)

表6 引道长度差值公度与可靠度

评价专家	引道长度差值的安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家1	满足规范	(0,15]	(15,50]	(50,70]	[70,300]
专家2	满足规范	(0,10]	(10,45]	(45,60]	[60,200]
专家3	满足规范	(0,15]	(15,50]	(50,65]	[65,250]
专家4	满足规范	(0,10]	(10,50]	(50,55]	[55,200]
专家5	满足规范	(0,10]	(10,45]	(45,60]	[60,200]
	/	6.25	29.118	54.375	150.685
$R_i$	/	0.999	0.996	0.999	0.902
最终公度	满足规范	(0,12]	(12,46]	(46,62]	[62,230]

表7 流出角公度与可靠度

评价专家	流出角的安全等级/(°)				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家1	[3,5]	(5,8]	(8,12]	(12,15]	(15,20]
专家2	[3,5]	(5,7]	(7,9]	(9,10]	(10,15]
专家3	[3,5]	(5,6]	(6,10]	(10,12]	(12,15]
专家4	[3,5]	(5,6]	(6,9]	(9,11]	(11,15]
专家5	[3,5]	(5,8]	(8,10]	(10,12]	(12,15]
	4	6.2	8.567	11.4	14.147
$R_i$	0.996	0.992	0.98	0.972	0.934
最终公度	[3,5]	(5,7]	(7,10]	(10,12]	(12,16]

表8 制动床长度差值公度与可靠度

评价专家	制动床长度差值的安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家1	满足规范	(0,20]	(20,50]	(50,90]	[90,350]
专家2	满足规范	(0,15]	(15,45]	(45,80]	[80,250]
专家3	满足规范	(0,20]	(20,55]	(55,90]	[90,250]
专家4	满足规范	(0,15]	(15,40]	(40,80]	[80,250]
专家5	满足规范	(0,15]	(15,50]	(50,85]	[85,300]
	/	9.167	33.333	66.419	186.551
$R_i$	/	0.999	0.998	0.997	0.908
最终公度	满足规范	(0,12]	(12,46]	(46,62]	[62,230]

表 9 端头防护高度差值公度与可靠度

评价专家	端头防护高度差值的安全等级/m				
	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
专家 1	满足规范	(0,0.3]	(0.3,0.6]	(0.6,1.5]	[1.5,2.0]
专家 2	满足规范	(0,0.1]	(0.1,0.4]	(0.4,0.8]	[0.8,2.0]
专家 3	满足规范	(0,0.2]	(0.2,0.5]	(0.5,1.0]	[1.0,2.0]
专家 4	满足规范	(0,0.2]	(0.2,0.5]	(0.5,1.2]	[1.2,2.0]
专家 5	满足规范	(0,0.1]	(0.1,0.4]	(0.4,0.8]	[0.8,2.0]
	/	0.106	0.33	0.826	1.493
$R_i$	/	0.998	0.994	0.967	0.951
最终公度	满足规范	(0,0.2]	(0.2,0.5]	(0.5,1.0]	[1.0,2.0]

表 10 集料类型与安全措施公度

评价指标	十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
集料类型	圆形砾石	砂子	松散砾石	松散碎料	其他
交安、排水照明、诱导、监控、救援锚栓等 5 方面安全措施	均设置详细,且满足规范	均设置详细,但存在 3~5 处不满足规范	有 1~2 项未进行设置说明	有 3 项以上未进行设置说明	有 3 项以上未进行设置说明,且多处不符合规范要求

2.1.3 指标的标度分级

标度一般是指用数值 1、3、5、7、9 标度两指标相比较,前者较后者同等重要,稍重要,明显重要,强烈重要和极端重要性。本文采用集值统计法对影响避险车道安全性的指标进行公度,依据上述公度详

情,本文采用文献[25]中的标度分值,作为本参数计算的标度分值,具体数值:无影响为零,轻度影响为 1,中度影响为 3,严重影响为 6,极严重影响为 10,详细分级与标度分值对应情况见表 11。

表 11 评价指标标度分级

评价内容	评价指标	标度分级				
		十分安全	较安全	基本安全	安全性差	事故多发
		0	1	3	6	10
设置位置	识别视距差值/m	满足规范	(0,9.2]	(9,19]	(19,39]	(39,60]
平面线形	横向力系数	直线	(0,0.05]	(0.05,0.10]	(0.10,0.13]	(0.13,0.20]
纵断面线形	曲线半径/m	直坡段	(6 000,10 000]	(3 700,6 000]	(1 600,3 700]	(100,1 600]
	纵坡/%	(13.0,17.0]	(10.5,13.5]	(8.0,10.5]	(6.0,8.0]	(0,6.0]
横断面	宽度/m	[9.0,12.0)	[8.3,9.0)	[7.0,8.3)	[5.0,7.0)	[3.5,5.0)
引道长度	差值/m	满足规范	(0,12]	(12,46]	(46,62]	[62,230]
流出角	/ (°)	[3,5]	(5,7]	(7,10]	(10,12]	(12,16]
制动床长度	差值/m	满足规范	(0,12]	(12,46]	(46,62]	[62,230]
端头防护高度	差值/m	满足规范	(0,0.2]	(0.2,0.5]	(0.5,1.0]	[1.0,2.0]
制动床长度	差值/m	满足规范	(0,0.2]	(0.2,0.5]	(0.5,1.0]	[1.0,2.0]
集料类型		圆形砾石	砂子	松散砾石	松散碎料	其他
交安、排水照明、诱导、监控、救援锚栓等 5 方面安全措施		均设置详细,且满足规范	均设置详细,但存在 3~5 处不满足规范	有 1~2 项未进行设置说明	有 3 项以上未进行设置说明	有 3 项以上未进行设置说明,且多处不符合规范要求

2.2 基于集值统计法权重系数确定

2.2.1 基本理论

本文采用集值统计法的思想确定评价指标权重,通过专家对各个指标权重的模糊范围,即参与确定指标权重的专家有  $n$  个,第  $j$  个专家对于指标  $E_i$  的权重范围为  $[a'_{ij}, b'_{ij}]$ 。所有的权重范围集形成一个集值统计序列。落影函数、估值  $i$  与可靠度  $R'_i$  的计算同上。可靠度,满足要求值时,对各指标的估值进行归一化处理,得到各指标权重  $\omega_i$ ,公式如下:

$$\omega_i = \bar{\omega}_i / \sum_{j=1}^n \bar{\omega}_i \quad (7)$$

2.2.2 权重系数确定

本文同时让上述专家对 11 个评价内容进行权重描述并进行可靠性分析。最终结果见表 12。经计算,避险车道安全性评价指标权重为  $\omega = \{0.151, 0.066, 0.053, 0.074, 0.051, 0.136, 0.125, 0.106, 0.057, 0.078, 0.103\}$

表 12 指标权重公度与可靠度

评价专家	评价指标										
	识别视距差值	横向力系数	竖曲线半径	纵断面坡坡	横断面宽度	引道长度差值	流出角	制动床长度差	端头防护高度差	集料类型	安全措施
专家 1	[0.6, 0.8]	[0.3, 0.4]	[0.2, 0.3]	[0.3, 0.4]	[0.1, 0.2]	[0.6, 0.8]	[0.6, 0.7]	[0.5, 0.6]	[0.3, 0.4]	[0.2, 0.4]	[0.5, 0.6]
专家 2	[0.8, 0.9]	[0.4, 0.5]	[0.2, 0.4]	[0.3, 0.5]	[0.2, 0.3]	[0.7, 0.9]	[0.6, 0.7]	[0.4, 0.6]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.4, 0.6]
专家 3	[0.7, 0.9]	[0.3, 0.5]	[0.2, 0.3]	[0.3, 0.4]	[0.1, 0.3]	[0.6, 0.7]	[0.6, 0.7]	[0.5, 0.7]	[0.1, 0.3]	[0.3, 0.4]	[0.3, 0.5]
专家 4	[0.7, 0.8]	[0.2, 0.4]	[0.1, 0.2]	[0.4, 0.5]	[0.3, 0.4]	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]	[0.5, 0.7]	[0.2, 0.4]	[0.2, 0.4]	[0.5, 0.6]
专家 5	[0.6, 0.8]	[0.1, 0.3]	[0.2, 0.4]	[0.2, 0.4]	[0.1, 0.4]	[0.5, 0.6]	[0.5, 0.7]	[0.3, 0.5]	[0.2, 0.4]	[0.5, 0.6]	[0.5, 0.7]
$i$	0.75	0.325	0.264	0.364	0.25	0.675	0.621	0.528	0.283	0.388	0.513
$R'_i$	0.994	0.99	0.995	0.996	0.993	0.99	0.997	0.991	0.995	0.986	0.991
$\omega_i$	0.151	0.066	0.053	0.074	0.051	0.136	0.125	0.106	0.057	0.078	0.103

2.3 避险车道安全等级划分与控制措施

本文将构建的避险车道安全评价模型,应用于多个实际项目的避险车道安全性评价中,对避险车道安全性进行计算,依据计算结果的最大值与最小值,将避险车道安全性分为 5 种等级,对应 5 种安全状态,并结合实际安全评价项目的经验提出相应的安全控制对策。详情见表 13。

表 13 避险车道安全分级与控制措施

安全等级	安全状态	安全值范围	控制对策
I	极度不安全	[6.0, 10.0]	对避险车道重新进行位置论证与相关参数设置
II	不安全	[4.0, 6.0]	同时对避险车道结构防护能力或使用性能加强改造
III	中等	[2.0, 4.0]	从避险车道结构防护能力或使用性能加强改造
IV	轻度不安全	[0.5, 2.0]	对问题部分进行优化
V	安全	[0, 0.5]	设计安全

3 实际项目应用

3.1 项目概况

根据本文建立的避险车道安全评价模型,对山区某高速公路的长大纵坡段 K18+420~K106+640 施工图设计阶段左线避险车道进行安全性评

价。项目 K 线左线 ZK43+420~ZK18+420 范围,连续长大下坡坡长 38.435 km,平均纵坡 -2.48%。本路段自 ZK24+900 之后,制动器温升超过制动临界温度,并且开始丧失制动能力。本项目评价路段内施工图设计 K 线左线共设置了 4 处避险车道,具体位置见图 2,设置情况见表 14。



图 2 K 线左线 ZK43+420~ZK18+420 平面布置

表 14 K 线左线避险车道详细信息

序号	主线偏出桩号	偏出点主线平面线形	偏出角度/(°)	避险车道平面线形	避险车道纵坡/%	制动坡床长度/m	避险车道位置间距/km
1	ZK34+700	直线	6	圆曲线(R=2500)+直线	8	172	3.3
2	ZK31+400	圆曲线外侧	4	直线	20	125	1.2
3	ZK30+200	圆曲线外侧	6	直线	12	155	11.6
4	ZK18+600	缓和曲线	8	直线	12	153	

该项目避险车道共 4 条,均处于长下坡的后半段,且最后一处位于坡底,避险车道间距适中,整体设置合理,现采用本文避险车道安全评价模型对上述 4 个避险车道的安全性进行评价,并依据安全等级提出相应的安全改善方案。

### 3.2 评价指标确定

基于项目的线形与避险车道数据,结合项目运行速度与《公路避险车道设计细则》,依据本文模型对上述避险车道的评价指标进行计算与统计,详情见表 15。

表 15 K 线左线避险车道的评价指标

评价专家	评价指标										
	识别视距差值	横向力系数	竖曲线半径/m	纵断面坡坡/%	横断面宽度/m	引道长度差值/m	流出角(°)	制动床长度差/m	端头防护高度差	集料类型	安全措施
ZK34+700	满足规范	0.01	直坡段	8	9	50.43	6	满足规范	满足规范	圆形砾石	设置详细且满足规范
ZK31+400	31.34	直线	直坡段	20	9	49.21	4	满足规范	满足规范	圆形砾石	
ZK30+200	满足规范	直线	直坡段	12	9	31.07	6	满足规范	满足规范	圆形砾石	
ZK18+600	满足规范	直线	直坡段	12	9	53.17	8	满足规范	满足规范	圆形砾石	

### 3.3 避险车道安全性评价

基于集值统计法的避险车道安全评价模型,利用本文研究确定的评价指标标度分级结果与权重系数,对上述 4 个避险车道进行安全性计算与评价。

依据表 11 评价指标标度分级结果,项目避险车道识别视距、引道长度差值、流出角三方面存在较大的安全隐患。避险车道 ZK31+400 前方经过 3 号大桥,且存在连续 S 性曲线等复杂线性,半径依次为 630 m、450 m、800 m,识别视距严重不良,与规范值相差 31.34 m,安全性差。项目 4 个避险车道引道长度与规范值相差 30~60 m,标度分级取值分别为 6,6,3,6,存在不同程度的安全隐患,安全性差。流出角除避险车道 ZK31+400 外,其他避险车道均存在相对上述两方面较小的安全隐患。依据公式(1)对 ZK34+700、ZK31+400、ZK30+200、ZK18+600 等 4 个避险车道的安全值计算得:1.415、1.722、0.607、1.231。安全等级均为 IV 级,轻度不安全。上述 4 个避险车道整体设置合理,但仍需要针对具体问题进行了优化。针对避险车道的主要问题,本文主要从视距、制动车床和流出角的角度给出建议,其中

制动车床问题较大,建议重点优化。

(1)上述 4 处避险车道引道长度不能满足规范安全要求。建议优化引道长度使驾驶员有充分的时间可以调整车辆行驶方向使其进入制动床,并设置相应的警示标志,使驾驶员能够及时发现避险车道;同时加强线形诱导设施和两侧护栏防撞等级,保证失控货车在高速下能平顺地驶入避险车道,未能停车的重型货车也不至于冲出避险车道引发事故。

(2)建议结合制动毂温度对 ZK31+400 避险车道的位置进行重新论证,选取视距较好的位置,同时制动毂温度允许,可以考虑在 ZK31+400 附近设置停车带。

(3)ZK34+700、ZK30+200、ZK18+600 处的流出角分别为 6°、6°、8°,存在一定危险,建议有条件的情况下优化出口角度在 3°~5°范围内,且在避险车道入口前的长大下坡路段设置轮廓标线或线形诱导标,提高避险车道两侧护栏的等级、高度以及埋深等。

## 4 结语

(1)避险车道参数对于避险车道的安全性有较

大的影响,本文从避险车道参数设置方面具体确定了11个评价指标,作为避险车道安全性评价的基础。

(2)基于集值统计法思想提出了避险车道安全评价模型,结合数理统计方法对多位专家给出的评价指标标度分级、权重的模糊范围进行处理与可靠性分析,确定了不同评价指标的标度分级区间与权重值,从而使评价结果更加接近实际,评价模型应用方便。

(3)本文将构建的避险车道安全评价模型,应用于多个实际项目的避险车道安全性评价中,依据计算安全值的最大值与最小值,将避险车道安全性分为5种等级,并针对不同等级提出了相应的安全控制对策思路。

(4)依托西南山区某高速公路的避险车道设计,对模型实际应用进行介绍。结果表明:该模型综合考虑了避险车道各方面的设置详情,与实际评价结果一致。模型可以准确定位避险车道存在的主要问题,同时就避险车道的整体安全性进行分级。应用方便、科学合理。

#### 参考文献:

- [1] David K Whiteford. NCHRP Synthesis 178: Truck Escape Ramps[R]. Transportation Research Board, 1992, 5: 2, 17.
- [2] Walid Abdelwahab, John F Morral. Determining Need For And Location of Truck Escape Ramps[J]. Journal of Transportation Engineering, September/October 1997.
- [3] A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (Green Book) [S]. American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), 2001.
- [4] Roadway Design Guidelines[S]. Arizona Department of Transportation, 2004:200—45.
- [5] Truck Escape Ramps[M]. California: Traffic Bulletin No. 24, 1986.
- [6] Susan T Chrysler, Alicia Williams, Steven D. Schrock and Gerald Ullman, Traffic Control Devices for Managed Lanes[J]. Texas Transportation Institute. 2004.
- [7] Claus Bahlmann, Ying Zhu, Visvanathan Ramesh. A System for Traffic Sign Detection, Tracking, and Recognition Using Color, Shape, and Motion Information[J]. Siemens Corporate Research, Inc. 755 College Road East Princeton, NJ 08540, USA.
- [8] Hashim Al—Madani, Abdul—Rahman Al—Janahi Assessment of drivers comprehension of traffic signs based on their traffic, personal and social characteristics[R]. Transportation Research Part F, 2002, (5) : 63—76.
- [9] Ballard A J. Current State of Truck Escape—Ramp Technology [J]. Transportation Research Record, 1983.
- [10] Jin—Mei W U. Layout of Truck Escape Ramp on Mountain Highways[J]. Highway, 2006.
- [11] Niu J F, Wang J H, Dong X Y. Research on the Angle to Truck Escape Ramps of Mountain Roads[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [12] Liu S, Wang J, Niu J. Design for Approach Road of Truck Escape Ramp[C]// International Conference on Transportation Engineering. 2011:2725—2730.
- [13] 杨江锋. 山区高速公路长大下坡路段避险车道设置与安全措施的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [14] 张建军. 连续长大下坡路段避险车道设置原则研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [15] 梁营力. 高速公路长大下坡路段安全设施研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [16] 肖宁. 山区高速公路长大下坡路段交通安全保障设施研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [17] 马壮林, 张宏璐, 谭晓伟. 高速公路连续下坡路段交通事故时空分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(5): 85—91.
- [18] 许洪国, 刘兆惠, 王超, 等. 基于模糊统计的山区公路安全评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(10): 116—119+1.
- [19] 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.
- [20] Yun W, Bin L I, Yanxian Y E. The Application of Truck Escape Ramps on the Long Down—slope Road [J]. Highway Engineering, 2007, 42(1): 159—181.
- [21] Tang Q B, Liu T Z, Zhang H. Research on the Angle to Truck Escape Ramp of Mountainous Expressway[J]. Science Technology & Engineering, 2015.
- [22] 汪双杰, 闫晓敏, 张驰, 等. 多年冻土区公路路线选择分层目标法[J]. 交通运输工程学报, 2016, (4): 1—13.
- [23] 贾明明, 熊锡龙, 黄立文, 等. 基于集值统计—灰色模糊的航道通航环境安全评价[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(1): 41—45.
- [24] 王志亮, 吴兵, 邢书仁. 模糊集值统计法在煤矿安全评价指标权值中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1): 71—73.
- [25] 韩国杰. 甘肃公路自然环境评价指标及分区研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

# 隧道图像型火灾探测系统试验研究

吴梦军<sup>1</sup>, 刘 帅<sup>1</sup>, 孟凡军<sup>2</sup>, 张文庆<sup>3</sup>, 许玉坤<sup>3</sup>, 邓甜甜<sup>3</sup>, 陆 嘉<sup>3</sup>

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 重庆市 400067; 2. 合肥城市轨道交通有限公司 合肥市 230088;

3. 合肥科大立安安全技术股份有限公司 合肥市 230088)

**摘 要:** 结合隧道的狭长空间、通风条件、环境照度等特点验证了一种基于图像处理技术的火灾探测系统的可行性。首先,根据隧道的尺寸对探测器镜头的焦距进行选型试验,试验表明,25 mm 焦距的探测镜头对该隧道具有更好的远距离探测能力;其次,开展了公路隧道实体火灾探测试验,研究了隧道图像型火灾探测系统的探测性能,分析了探测距离、火源大小等因素对报警时间的影响。试验结果表明:该系统可有效排除光源干扰,探测性能不受外界光照的影响;系统能够在 10 s 内有效识别 120 m 范围内火源并实现报警。

**关键词:** 公路隧道; 图像型火灾探测器; 探测距离

公路隧道是公路交通的咽喉要道,它具有空间狭长、环境封闭、通风条件差等特点,一旦发生火灾,火灾扑救难度较大、人员车辆疏散极为困难,且产生的有毒高温烟气严重危害了人们的生

命健康<sup>[1,2]</sup>。火灾的早期探测是预防火灾发生的重要手段,目前应用于公路隧道的探测技术主要有:空气采样探测器、线型感温电缆探测器、分布式光纤探测器、点型火焰探测器、图像型火灾探测

收稿日期:2014-08-22

## Safety Evaluation Model of Truck Escape Ramps in Complicated Long Steep Slope Section

ZHANG Chi<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, YAN Xiao-min<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Traffic Engineering Research Institute, School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to evaluate the safety of the truck escape ramp, 11 indexes such as length, outflow angle, line-of-sight condition, brake bed length, slope, aggregate type and aggregate depth are selected according to the setting parameters of the truck escape ramp. Based on the idea of set-value statistics, the scale and weight of each evaluation index are determined, and the safety evaluation model of the truck escape ramp is put forward. Based on the four truck escape ramp design of a highway in the southwest mountainous area, the five levels of the overall safety of the truck escape ramp and the corresponding safety control measures are given, and the model is applied. The results show that there are higher safety risks in the three aspects of the identification of the horizon, the difference in the length of the approach and the outflow angle of the four truck escape ramp. The overall safety values are respectively 1.415, 1.722, 0.607, and 1.231, the safety level are IV, moderate level insecurity. The model is consistent with the actual situations, which is proved as comprehensive, detailed, convenient, scientific and reasonable.

**Key words:** road engineering; long downhill; escape ramp; safety evaluation; set-value statistics