

# 双车道公路路侧环境客观安全性评估模型

方 勇<sup>1</sup>, 郭忠印<sup>1</sup>, 李志勇<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 湖南省交通科学研究院, 湖南 长沙 410015)

**摘要:** 为了客观评价路侧安全性, 从车辆驶入路侧可能性与路侧本体特征安全性两个层次建立路侧环境客观安全性评估模型. 将影响路侧安全性的各种路侧本体客观特征指标进行层次划分, 在国内外研究成果和一定的调查数据统计分析基础上, 确定了各指标安全性等级界定标准, 并利用模糊评判方法计算路侧客观特征危险指数. 考虑影响车辆侵入路侧的交通组成、线形、路基宽度与路面状况 4 个客观指标, 利用贝叶斯网络方法计算车辆侵入路侧概率. 以路侧客观特征危险指数作为 X 轴, 车辆侵入路侧概率作为 Y 轴构成的平面区域基础上, 利用模型综合评价指标作为定量指标进行安全等级划分. 研究成果可为路侧安全改进工程方案提供决策依据.

**关键词:** 双车道公路; 路侧环境; 模糊评判; 贝叶斯网络(BN); 客观安全性

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

## Assessment Model of Roadside Environment Objective Safety on Two-lane Highway

FANG Yong<sup>1</sup>, GUO Zhongyin<sup>1</sup>, LI Zhiyong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Hunan Communications Research Institute, Changsha 410015, China)

**Abstract:** For an objective evaluation of roadside safety, assessment model of roadside environment objective safety was established based on the probability of run-into-roadside and the roadside objective characteristics. First, the indicators of the various objective characteristics that affect roadside safety were hierarchically divided, and each indicator safety level were determined on the basis of domestic and overseas research results and certain statistics data. The risk index of the roadside objective characteristics was calculated by fuzzy judgment. Then, the probability of run-into-roadside which considers objective indicators about traffic composition, highway alignment, subgrade width and pavement condition

was calculated by Bayesian Networks. Finally, based on planar region which was composed by the risk index as X-axis and the enforcement probability as Y-axis, roadside objective safety level was divided by comprehensive evaluation indicator. The results can provide decision for roadside safety improvement program.

**Key words:** two-lane highway; roadside environment; fuzzy judgment; Bayesian Networks(BN); objective safety

路侧交通事故在公路交通事故中约占 30%, 在死亡 3 人以上的重特大恶性交通事故中, 由于车辆冲出路外、高架桥梁及高墩桥梁或坠落陡崖而发生的路侧交通事故约占一半的比例<sup>[1]</sup>. 目前路侧安全研究在我国越来越受到重视, 对路侧危险程度做出合理的分级是指导路侧安全问题改善、提高路侧安全的重要前提. 在路侧危险等级划分方法中, 主要为定性方法研究, 比较有代表性的是 Zegeer 等根据路侧净区宽度、边坡坡率、路侧表面粗糙度、护栏设置方式、路侧危险物刚度等路侧特征, 将路侧危险程度分为 7 级, 级别越高表示路侧越危险<sup>[2]</sup>; 高海龙等在借鉴国外路侧安全等级分级的基础上, 提出了路侧危险程度 4 级划分方法<sup>[3]</sup>. 这两种方法, 都属于定性表述, 但影响路侧危险程度的指标众多, 面对复杂的路侧环境时应用定性分级方法难以判断路侧危险程度. 在利用数学方法定量研究方面, 郑恒等利用贝叶斯网络<sup>[1]</sup>、李长城等利用灰色聚类方法<sup>[4]</sup>等方法建立了路侧安全评估模型, 但由于部分指标间存在相关性, 且原因指标和结果指标都在一个评价体系中, 势必影响评价结论的可靠性.

路侧环境包括路侧自身环境与所在路段环境, 其客观安全性只针对静态运行环境进行研究, 相应的评价指标体系应根据路侧事故形成的原因机理进

收稿日期: 2012-06-17

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2009318785009); 山西省科技厅科技项目(2010-07)

第一作者: 方 勇(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路安全与环境工程. E-mail: fangyong87@hotmail.com

通讯作者: 郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路安全与环境工程、路面结构与材料.

E-mail: zhongyin@tongji.edu.cn

行分析<sup>[5]</sup>. 笔者提出的路侧环境客观安全性评估模型引入了车辆侵入路侧概率与路侧客观特征危险指数两个风险指标, 构建了路侧客观安全性综合评估指标, 利用其作为定量指标对路侧环境客观安全性进行等级划分, 可为路侧安全改进工程的开展提供决策依据.

## 1 路侧客观安全性评估模型建立

从导致路侧不安全的原因来分析, 影响路侧安全性的客观指标有两个方面: ①路侧自身客观特征指标影响路侧事故的严重程度不同; ②道路线形指标与交通量大小使得车辆侵入路侧的可能性不同. 这构成了不同严重程度路侧事故的形成必要条件. 这两个方面指标从不同层次决定了路侧客观安全性, 因此本文综合考虑上述两个指标, 建立路侧安全概率评估模型, 公式如下:  $R_s = f(F, P)$ . 式中:  $F$  为路侧客观特征危险指数;  $P$  为车辆侵入路侧概率;  $R_s$  为路侧客观安全性综合评价指标.

## 2 路侧客观特征危险指数确定

路侧客观特征危险指数  $F$  主要根据对安全影响的路侧本体特征指标进行层次划分, 在规范和一定的数据统计基础上, 建立路侧客观特征安全性模糊判断矩阵, 通过层次分析法(AHP)和专家打分法, 确定各路侧客观特征指标的权重, 采用梯形隶属函数,

对路侧客观特征安全等级进行模糊综合评判.

### 2.1 确定影响路侧客观特征安全的指标集

指标集的选取需遵循以下原则: ①尽可能简洁、全面, 能反映路侧自身安全的属性; ②各指标相对易测性较高, 指标之间应相互独立.

按照上述原则, 本文研究路侧客观安全的指标集结构: 边坡  $U_1$  (边坡坡长  $U_{11}$ 、边坡坡率  $U_{12}$ ), 危险物  $U_2$  (离散危险物密度  $U_{21}$ 、离散危险物平均横向距离  $U_{22}$ 、连续危险物密度  $U_{23}$ 、连续危险物平均横向距离  $U_{24}$ ), 路侧深度  $U_3$  (坡底深度  $U_{31}$ ). 每一个指标  $U_i$  又包含若干子指标, 即  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ , 其中  $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots\}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ . 根据前人研究成果<sup>[3,6-7]</sup>以及对4条双车道公路调查数据数理统计分析, 建立影响路侧客观特征安全性的单指标等级划分结构如表1所示. 表中, 危险物密度是指路侧平均每公里路段内的危险物数量; 连续危险物是指位于路侧净区内纵向长度大于3 m或两相邻路侧离散危险物纵向间距小于5 m时的危险物; 坡底深度是指边坡底部至路侧悬崖、河流、沟壑或路肩挡墙底部的高度.

### 2.2 建立评语集

通过对单指标的模糊判断, 得到模糊综合评判的路侧本体特征安全等级, 确定其模糊评语集, 并给各安全等级赋予一定的数值, 以便进行路侧本体特征安全性评判, 即模糊评语集  $T$  由很安全、较安全、一般、较危险、很危险5个等级构成, 可用公式表示为  $T = \{100, 80, 60, 40, 20\}$ .

表1 影响路侧客观特征安全性的单指标结构

Tab.1 Structure of single indicator of roadside safety

安全性等级	影响指标						
	$U_{11}/m$	$U_{12}$	$U_{21}/(\text{个} \cdot \text{km}^{-1})$	$U_{22}/m$	$U_{23}$	$U_{24}/m$	$U_{31}/m$
很安全	>9	1:6或更缓	<1	>0.9	<0.01	>0.9	<1
较安全	9~6	1:6~1:4	1~10	0.9~0.7	0.01~0.05	0.9~0.7	1~2
一般	6~3	1:4~1:3	10~30	0.7~0.5	0.05~0.20	0.7~0.5	2~5
较危险	3~1	1:3~1:1	30~40	0.5~0.3	0.2~0.4	0.5~0.3	5~10
很危险	<1	1:1或更陡	>40	<0.3	>0.4	<0.3	>10

### 2.3 权重集的确定

AHP是确定多个权向量的较为有效的方法. 本文利用该方法确定权重集. 路侧本体特征安全性的指标体系分为两层, 在专家咨询的基础上, 构造了判断矩阵并进行了权重计算, 其结果为:  $U = \{U_1, U_2, U_3\}$  结构指标权重为  $w = (0.637\ 0, 0.258\ 3, 0.104\ 7)^T$ ;  $U_1 = \{U_{11}, U_{12}\}$  结构指标权重为  $w_1 = (0.800\ 0, 0.200\ 0)$ ;  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}$  结构指标权重为  $w_2 = (0.128\ 5,$

$0.059\ 5, 0.537\ 9, 0.274\ 1)$ ;  $U_3 = \{U_{31}\}$  结构指标权重为  $w_3 = 1.000\ 0$ . 经检验一致性比率均小于0.1, 符合要求.

### 2.4 评价指标与路侧客观安全性的模糊信息关系

由于影响路侧本体特征安全性的指标非常复杂, 确切划分界限会隐藏其他规律. 模糊集合论采用隶属函数可以解决此矛盾. 对路侧本体特征安全性指标进一步分析, 可以认为各单指标在对应评语集上的评价等级概率(隶属函数)呈线性分布, 选用半

梯形与梯形隶属函数可以较客观地反映实际情况。

各安全评价等级与指标隶属函数可表示为

$$\begin{aligned}
 r_{i1}(x) &= \begin{cases} 1, & a_{i1} \leq x < a_{i2} \\ (a_{i3} - x)/(a_{i3} - a_{i2}), & a_{i2} \leq x \leq a_{i3} \\ 0, & x > a_{i3} \end{cases} \\
 r_{i2}(x) &= \begin{cases} (x - a_{i1})/(a_{i2} - a_{i1}), & a_{i1} \leq x < a_{i2} \\ 1, & a_{i2} \leq x < a_{i3} \\ (a_{i4} - x)/(a_{i4} - a_{i3}), & a_{i3} \leq x < a_{i4} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
 r_{i3}(x) &= \begin{cases} (x - a_{i2})/(a_{i3} - a_{i2}), & a_{i2} \leq x < a_{i3} \\ 1, & a_{i3} \leq x < a_{i4} \\ (a_{i5} - x)/(a_{i5} - a_{i4}), & a_{i4} \leq x < a_{i5} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
 r_{i4}(x) &= \begin{cases} (x - a_{i3})/(a_{i4} - a_{i3}), & a_{i3} \leq x < a_{i4} \\ 1, & a_{i4} \leq x < a_{i5} \\ (a_{i6} - x)/(a_{i6} - a_{i5}), & a_{i5} \leq x < a_{i6} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\
 r_{i5}(x) &= \begin{cases} (x - a_{i4})/(a_{i5} - a_{i4}), & a_{i4} \leq x < a_{i5} \\ 1, & a_{i5} \leq x \\ 0, & \text{其他} \end{cases}
 \end{aligned}$$

式中： $r_{i1}(x), \dots, r_{i5}(x)$ 分别为路侧本体客观特征指标最安全等级 FS-I、较安全等级 FS-II、一般等级 FS-III、较危险等级 FS-IV、最危险等级 FS-V 的隶属函数； $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i6}$ 分别为相应安全性等级对应的指标界限值； $x$ 为被评价对象的指标值。

根据以上分析,通过模糊评判得到的分值,结合安全性等级分值标准——FS-I(85~100),FS-II(70~85),FS-III(50~70),FS-IV(30~50)与FS-V(<30),可以判定路侧本体特征处于的安全性等级。

### 3 车辆侵入路侧概率计算方法

国内外对侵入路侧事故研究表明<sup>[1,5-8]</sup>,影响车

$$P(C_{11}) = \begin{cases} \frac{\int_{Q_1}^{Q_2} (-5 \times 10^{-8} Q^2 + 0.0006Q - 0.0244) dQ}{\int_0^{7500} (-5 \times 10^{-8} Q^2 + 0.0006Q - 0.0244) dQ + \int_{7500}^{Q_{\max}} (2 \times 10^{-5} Q + 0.9196) dQ}, & Q < 7500 \\ \frac{\int_{Q_1}^{Q_2} (2 \times 10^{-5} Q + 0.9196) dQ}{\int_0^{7500} (-5 \times 10^{-8} Q^2 + 0.0006Q - 0.0244) dQ + \int_{7500}^{Q_{\max}} (2 \times 10^{-5} Q + 0.9196) dQ}, & Q > 7500 \end{cases}$$

式中： $Q_{\max}$ 表示设计日平均交通量最大值； $(Q_1, Q_2)$ 划分为(0, 2 000), (2 000, 5 000), (5 000, 7 500), (7 500, 10 000), (10 000, 15 000)等5个范围进行相应的边缘概率计算。

辆发生侵入路侧事故的指标较多,有线性指标、交通量、驾驶行为、天气等。本文因为研究路侧环境客观安全性,主要考虑客观环境引起的车辆侵入路侧事故的影响指标,因此,车辆侵入路侧概率应从线性、路基宽度、路面状况、交通构成4个客观指标计算车辆侵入路侧概率 $P$ 。由于车辆侵入路侧的可能性计算属于不确定性推理范畴,因此,可利用贝叶斯网络来耦合车辆侵入路侧概率计算模型。

#### 3.1 构建贝叶斯网络拓扑结构

根据分析,车辆侵入路侧概率指标可以看成是由平曲线曲率、纵坡度、路基宽度、交通量等底层指标推断出来的。对底层的指标需要确定其边缘概率,利用匹兹堡大学决策系统实验室开发的用以构建图形决策理论模型的软件 GeNIe,采用贝叶斯网络中的分叉连接结构,构建了车辆侵入路侧概率计算模型的贝叶斯网络(BN)拓扑结构,如图1所示。

#### 3.2 BN中各节点的条件概率确定方法

##### 3.2.1 基于经验公式的根节点边缘概率

对于车辆侵入路侧概率计算模型中根节点的边缘概率,有判据的情况下,可利用国内外学者较为公认的经验关系<sup>[9-10]</sup>计算边缘概率。根据经验公式计算边缘概率的方法是采用指标范围区间内在总区间内面积域比重大小作为边缘概率,即

$$P(C) = \int_{x_2}^{x_1} f(x) dx / S_c$$

式中： $P(C)$ 表示 $C$ 指标边缘概率； $f(x)$ 表示边缘概率密度函数； $(x_1, x_2)$ 表示根节点指标界定值,是根据双车道公路设计标准参数作为依据划分； $S_c$ 表示 $C$ 指标总区间内面积域值。

BN拓扑结构中交通量 $C_{11}$ 、平曲线弯曲度 $C_{21}$ 与纵坡坡度 $C_{22}$ 指标即可采用该方法计算。

(1) 交通量 $C_{11}$ 可由日平均交通量 $Q$ 进行计算

(2) 对于平曲线弯曲度 $C_{21}$ ,用 $C_r$ 表示,由于当 $-3 \leq C_r < 3$ 时,平曲线弯曲度对车辆侵入路侧事故的事故修正系数为 $1^{[10]}$ ,因此该范围概率计算可忽略 $C_r$ 影响;其他范围概率按下式计算:

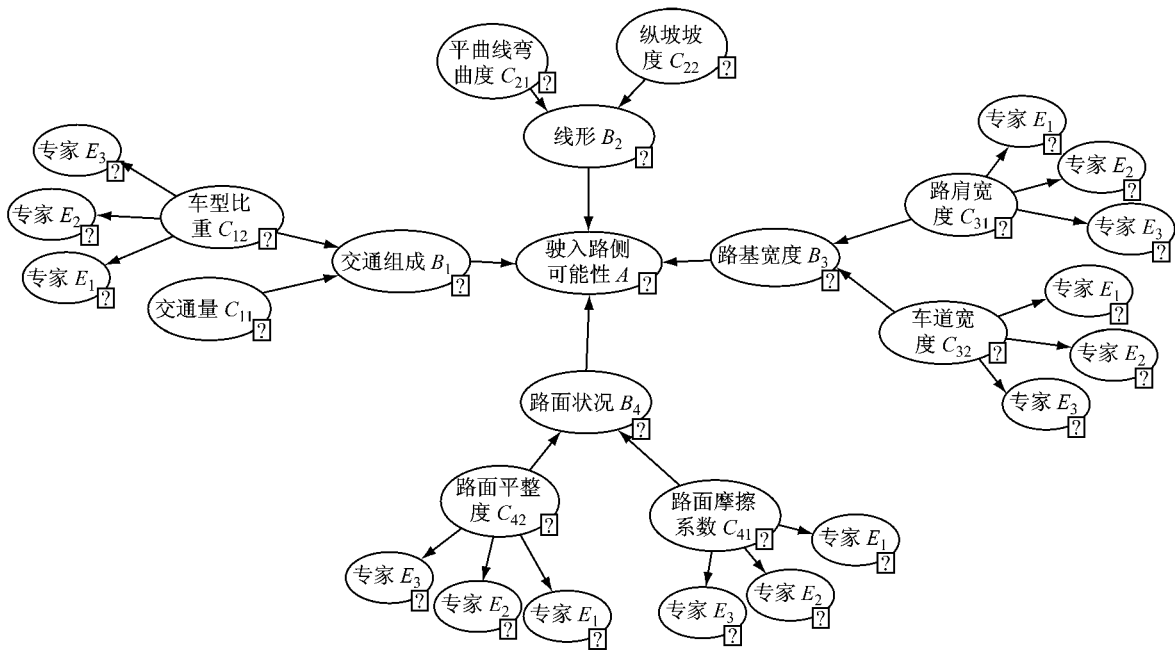


图 1 车辆侵入路侧概率计算模型的贝叶斯网络拓扑结构

Fig.1 Bayesian Network topology of vehicles driving into the roadside

$$P(C_{21}) = \begin{cases} \int_{C_{r1}}^{C_{r2}} 3dx/S, & C_r < -6 \\ \int_{C_{r1}}^{C_{r2}} (-x-3)dx/S, & -6 \leq C_r < -3 \\ \int_{C_{r1}}^{C_{r2}} (\frac{1}{3}x-1)dx/S, & 3 \leq C_r < 6 \\ \int_{C_{r1}}^{C_{r2}} dx/S, & C_r > 6 \end{cases}$$

式中:  $S = \int_3^6 (\frac{1}{3}x-1)dx + \int_6^{C_{rmax}} dx + \int_{-3}^{-6} (-x-3)dx + \int_{-6}^{C_{rmin}} 3dx$ ;  $(C_{r1}, C_{r2})$  划分为  $(-9^\circ, -7^\circ)$ ,  $(-7^\circ, -5^\circ)$ ,  $(-5^\circ, -3^\circ)$ ,  $(3^\circ, 5^\circ)$ ,  $(5^\circ, 7^\circ)$ ,  $(7^\circ, 9^\circ)$  等 6 个范围。

(3) 对于纵坡坡度  $C_{22}$ , 由于当坡度  $i \geq -2\%$  时, 纵坡坡度对车辆侵入路侧事故的事故修正系数为 1<sup>[10]</sup>, 因此概率计算可忽略纵坡影响; 其他范围概率按下式计算:

$$P(C_{22}) = \begin{cases} \frac{\int_{i_1}^{i_2} dx}{\int_{-2\%}^{-6\%} (-25x-0.5)dx + \int_{-i_{max}}^{-6\%} dx}, & i \leq -6\% \\ \frac{\int_{i_1}^{i_2} (-25x-0.5) dx}{\int_{-2\%}^{-6\%} (-25x-0.5)dx + \int_{-i_{max}}^{-6\%} dx}, & -6\% < i < -2\% \end{cases}$$

式中:  $i_{max}$  表示设计纵坡坡度最大值;  $(i_1, i_2)$  划分为

$(-3\%, -2\%), (-4\%, -3\%), (-5\%, -4\%), (-6\%, -5\%), (-7\%, -6\%), (-8\%, -7\%)$  等 6 个范围。

### 3.2.2 基于集结专家意见方法的根节点边缘概率

在没有任何判断的前提下, 初始假设这些指标使路侧发生事故的概率与不发生事故的概率相等, 可利用 BN 集结专家意见确定更新后概率<sup>[1,11]</sup>. 基于该方法的根节点边缘概率的专家意见见表 2. 表中专家意见的指标界定值是根据双车道公路设计标准参数作为依据划分;  $C_{12}$  指标以小客车比重分析,  $C_{42}$  指标采用国际平整度指数分析. 计算过程利用软件 GeNIe 实现。

### 3.2.3 非根节点的条件概率

对于非根节点的条件概率, 利用联合概率分布, 由于节点间相互独立, 可通过条件独立公式计算<sup>[11]</sup>.

### 3.3 车辆侵入路侧风险级别划分

通过采用专家意见 BN 集结方法、经验公式以及条件独立公式, 选取了 3 条典型双车道公路(公路 A 路侧客观环境最差、公路 C 最好、公路 B 介于两者之间)的 82 个路侧单元(500 m 划分为一个单元)进行试算. 车辆侵入路侧概率值基本范围在 0.1 与 0.6 之间, 该区间(0.1, 0.6)范围值是由于计算各路侧单元车辆侵入路侧概率时采用的专家对某些根节点指标评价意见集成以及经验公式所致.  $P$  值越低, 表示路段客观环境较难导致侵入路侧事故的发生;  $P$  值越高, 表示路段客观环境易使侵入路侧事故发生. 因

表 2 根节点边缘概率的专家意见

Tab.2 Different experts criteria for determining root node marginal probability

评价指标 (根节点)	专家 E <sub>1</sub> 意见		专家 E <sub>2</sub> 意见		专家 E <sub>3</sub> 意见	
	指标值范围	概率	指标值范围	概率	指标值范围	概率
C <sub>12</sub>	<60%	0.50	<60%	0.5	<50%	0.50
	(60%,75%)	0.25	(60%,80%)	0.3	(50%,70%)	0.25
	(75%,90%)	0.20	>80%	0.2	(70%,90%)	0.15
	>90%	0.05			>90%	0.10
C <sub>31</sub> /m	>1.5	0.10	>2.00	0.10	>2.00	0.10
	(1.0,1.5)	0.20	(1.25,2.00)	0.15	(1.25,2.00)	0.15
	(0.5,1.0)	0.30	(0.50,1.25)	0.25	(0.50,1.25)	0.25
	<0.5	0.40	<0.50	0.50	<0.50	0.50
C <sub>32</sub> /m	3.25	0.25	3.25	0.2	3.25	0.15
	3.50	0.35	3.50	0.3	3.50	0.35
	3.75	0.40	3.75	0.5	3.75	0.50
C <sub>41</sub>	<0.2	0.50	<0.2	0.50	<0.2	0.45
	(0.2,0.4)	0.30	(0.2,0.3)	0.30	(0.2,0.4)	0.30
	>0.4	0.20	(0.3,0.5)	0.15	(0.4,0.6)	0.15
			>0.5	0.05	>0.6	0.10
C <sub>42</sub> /(m·km <sup>-1</sup> )	<3.0	0.10	<3.0	0.10	<2.5	0.05
	(3.0,7.5)	0.30	(3.0,5.0)	0.20	(2.5,6.0)	0.25
	>7.5	0.60	(5.0,8.0)	0.25	(6.0,8.0)	0.25
			>8.0	0.45	>8.0	0.45

此,本文划分车辆侵入路侧风险级别可以通过利用所得到的概率值  $P$  范围区间根据图 2 准则进行划分. 其中计算的车辆侵入路侧概率值及相应的风险级别与实际主观定性评价双车道公路客观环境风险性较为一致.

### 4 综合评价指标描述及其等级划分

路侧客观安全性综合评价指标是综合考虑了影响路侧环境安全性的各单项客观指标,其值描述了路侧环境对应各项客观指标的综合特性. 各单项指标安全等级越高,行车风险越小,则路侧环境客观安全性越好,反之亦然. 各单项客观指标随综合指标  $R_s$  的变化规律如表 3 所示.

表 3 综合指标随单项风险指标的变化规律

Tab.3 Rules of comprehensive index changing with the risk index

路侧环境风险指标	单个指标变化	$R_s$ 表征安全性变化
路侧客观特征危险指数 $F$	上升	上升
侵入路侧评价指标概率 $P$	上升	下降

根据上述分析,建立以路侧客观特征危险指数  $F$  为  $x$  轴,车辆侵入路侧概率  $P$  为  $y$  轴的平面区域,平面区域范围为  $x$  轴(0,100)与  $y$  轴(0.1,0.6)构成的矩形区域. 各路侧单元  $R_s$  值表征为平面矩形区域中某点,根据路侧本体特征安全性等级与车辆侵入路侧风险级别的划分标准,可将矩形区域划分为 5 个区域,各区域代表不同客观安全性等级:最安全等级为 I 级、较安全等级为 II 级、一般等级为 III 级、较

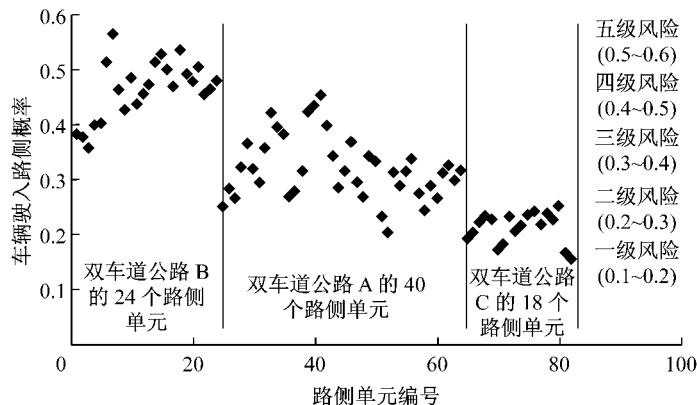


图 2 车辆侵入路侧风险级别划分

Fig.2 Risk levels of vehicles driving into the roadside

危险等级为Ⅳ级、最危险等级为Ⅴ级,见图3。当路侧环境客观安全性处于Ⅳ级与Ⅴ级状态时(组合区域①),应进行安全改进;处于Ⅰ级与Ⅱ级状态时(组合区域②),不需进行安全改进;当处于Ⅲ级时,根据工程资金及改进方案费用效益分析进行安全改进决策。

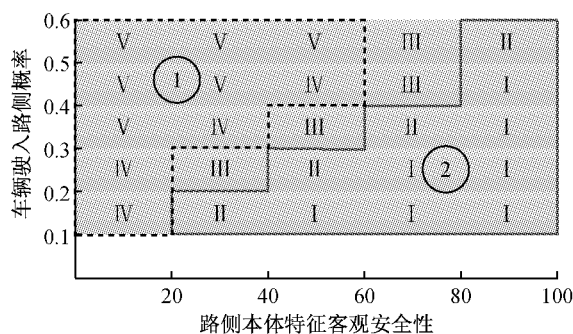


图3 路侧环境客观安全性等级区域划分

Fig.3 Zoning of roadside environment objective safety levels

## 5 结论

(1)影响路侧客观安全性的指标多而复杂,难以建立路侧事故数据与单指标之间可靠的关系模型以说明路侧环境客观安全性。因此考虑路侧事故形成的特点,将影响指标划分为车辆冲入路侧可能性指标与路侧本体特征指标进行研究的思路较为合理。

(2)通过利用模糊评判、贝叶斯网络等数学方法对各评价指标进行综合分析,提出了路侧环境客观风险特征指标、车辆侵入路侧可能性评价指标,并建立相关数学评估模型,为合理解决路侧安全性评估问题提出了有效途径。

(3)根据模型综合指标及其随单项指标的变化规律,将路侧客观安全性分为5个等级,并利用路侧客观特征危险指数与侵入路侧概率为坐标构成的平面区域划分了相应的安全等级区域。研究成果可为路侧环境安全改进工程决策研究提供参考。

(4)由于路侧及其所在路段运行环境的复杂性,对基于综合指标的路侧安全等级划分界限标准以及

路侧环境主观安全性有待进行更深入系统的研究。

## 参考文献:

- [1] 郑恒,李长城,刘煜. 基于贝叶斯网络的路侧安全评价方法[J]. 公路交通科技,2008,25(2):139.  
ZHENG Heng, LI Changcheng, LIU Yu. A roadside safety assessment method based on Bayesian Network[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(2):139.
- [2] Harwood W D, Council M F, Hauer E, et al. Prediction of the expected safety performance of rural two-lane highways[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 2000.
- [3] 高海龙,李长城. 路侧安全设计指南[M]. 北京:人民交通出版社,2008.  
GAO Hailong, LI Changcheng. Roadside safety design guide [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [4] 李长城. 路侧安全灰色聚类评估方法研究[C]// 交通部公路司. 2004 国际公路安全研讨会论文集. 北京:人民交通出版社, 2005:239-247.  
LI Changcheng. Research on evaluation method of roadside safety grey clustering[C]//International Road Safety Seminar 2004. Beijing: China Communications Press, 2005:239-247.
- [5] 郭忠印. 道路安全工程[M]. 北京:人民交通出版社,2012.  
GUO Zhongyin. Road safety engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [6] Transportation Research Board. Roadside safety analysis program (RSAP) engineer's manual[R]. Washington D C: NCHRP Report 492, 2003.
- [7] AASHTO. Roadside design guide [R]. Washington D C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
- [8] 游克思,孙璐,顾文钧. 山区公路路侧安全定量化评价[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(3): 49.  
YOU Kesi, SUN Lu, GU Wenjun. Quantitative assessment of roadside safety on mountain highway [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(3): 49.
- [9] Cooper, P. Analysis of roadside encroachments-single-vehicle run-off-road accident data analysis for five provinces [R]. Vancouver: B C Research, 1980.
- [10] Perchonok K, Ranney T A, Baum A S, et al. Hazardous effects of highway features and roadside objects[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1978.
- [11] 王双成. 贝叶斯网络学习、推理与应用[M]. 上海:立信会计出版社, 2010.  
WANG Shuangcheng. Bayesian Networks learning, reasoning and application[M]. Shanghai: Lixin Accounting Press, 2010.