

高速公路路侧容错环境的 RST-GCE 法评价

陈沅江, 陈熠

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 通过分析高速公路路侧环境的实际情况, 考虑防止车辆驶出路外、避免侧翻或碰撞事故、降低事故严重性等因素, 建立了路侧容错环境评价指标体系。运用灰色聚类评价法与粗集理论(RST-GCE)建立了高速公路路侧容错环境的综合评价模型。同时, 应用所建立的评价模型评价某运营高速公路路侧容错环境, 评价结果与实际情况相符。研究表明, 所建立的高速公路路侧容错环境评价指标体系和模型合理, 可为高等级公路路侧安全评价提供参考。

关键词 高速公路; 路侧安全; 容错环境; 安全评价

中图分类号 X951

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.009

The Assessment of Fault-tolerant Environment for Expressway Roadside Based on RST-GCE

CHEN Yuanjiang, CHEN Yi

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Through an analysis on the expressway roadside environment from the real situation, a evaluation index system for roadside fault-tolerant environment was established to take following three aspects into consideration, that is, preventing vehicles from rushing out the laneway, avoiding the side tumbling or crash, and reducing accident severity. The Rough Set Theory and Gray Clustering Evaluation (RST-GCE) are used to establish an evaluation model for the roadside fault-tolerant environment. And then, the evaluation model is applied to evaluate an operational expressway and the result is consistent with the reality. It shows that the established evaluation index system and the model are rational and feasible. This model could provide some guidelines for the safety evaluation of high grade highway in China.

Keywords expressway; roadside safety; fault-tolerant environment; safety evaluation

0 引言

随着经济的发展, 中国高速公路路侧安全问题越来越明显。据统计, 中国在 1 次死亡 3 人以上的特大交通事故中, 由于车辆冲出路外坠落陡崖或高桥的路侧事故约占 1/2, 由路侧安全问题引发的交通事故越来越严重^[1]。而中国在路侧安全设计理念和实践方面还处于起步阶段, 尤其是路侧安全评价以及路侧安全防护方法等亟待研究。

路侧容错环境就是对道路路侧环境进行宽容设计, 为意外驶出路外的车辆提供 1 个平缓无障碍、可及时纠正失误的路侧区域, 以消除路侧事故或降低其严重程度。路侧容错环境的评价是对路侧设施以及物元状态进行危险等级评价, 以鉴别其路侧环境元素的容错能力。尽管路侧事故是由若干因

素导致的, 但其严重性却取决于路侧环境。因此, 本文通过路侧交通事故致因分析, 构建路侧容错环境评价的指标体系, 建立了相应的 RST-GCE 法评价模型, 并用实例验证了评价模型的实用可靠性。本文主要对路侧容错环境的安全等级进行评价, 路侧容错环境的安全等级越高容错能力越强。

1 路侧容错环境评价指标体系及等级评价

1.1 路侧事故原因分析

交通环境是由人—车—环境组成的 1 个动态环境系统。导致路侧事故的原因很多, 主要原因是人, 但是环境原因也不容忽视。采用安全系统工程原理, 基于事件树分析路侧事故的主要原因, 如图 1 所示。

收稿日期: 2011-09-05; 修回日期: 2011-12-19

作者简介: 陈沅江, 副教授, 研究方向为道路安全, 电子信箱: yuanjiang_chen@126.com

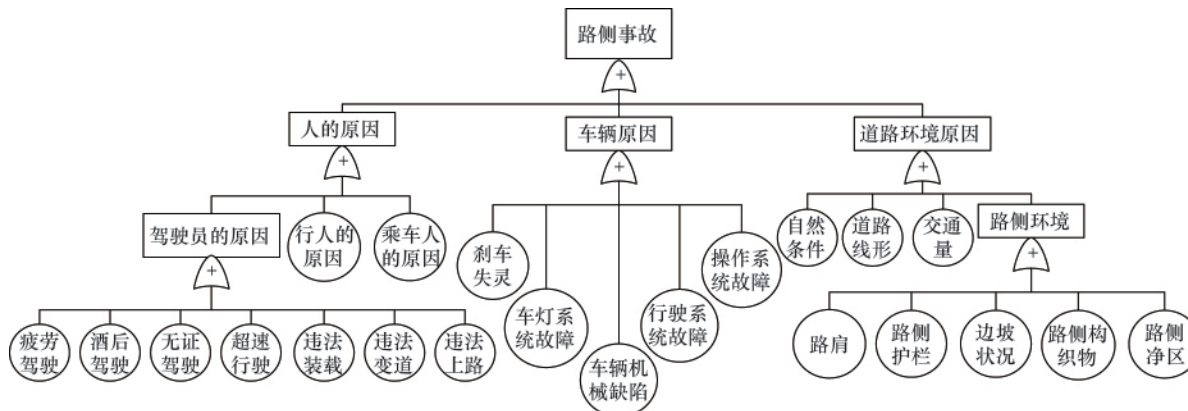


图 1 路侧事故树
Fig. 1 Roadside accident tree

1.2 评价指标体系

路侧容错环境评价的内容包括路肩(路肩震动带)、排水设施(边沟、涵洞等)、边坡、护栏(路侧护栏、中央分隔带护栏、桥梁护栏等)、行道树、各种杆柱(标志杆、电线杆、通信设施杆等)以及解体消能设施等。路侧容错环境评价应遵循目的性、科学性、系统性、可操作性、时效性、政令性、突出性、可

比性、定性与定量相结合的原则。

路侧事故原因的分析结果表明,要体现路侧环境的容错能力,需要考虑 3 个方面:一是防止车辆驶出路外;二是避免侧翻或碰撞事故;三是降低事故严重性。结合当前高速公路路侧环境的实际情况,本文选取 4 项准则、24 个指标构建高速公路路侧容错环境评价指标体系(图 2)。

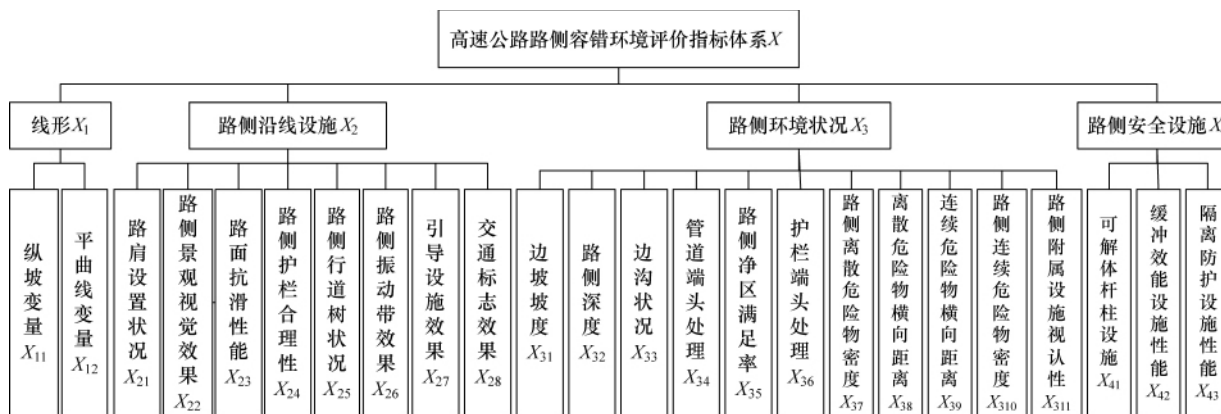


图 2 高速公路路侧容错环境评价指标体系
Fig. 2 Evaluation index system of highway roadside fault-tolerant environment

根据高速公路路侧容错环境的实际情况,通过现场勘查、项目资料、专家评估、测量与计算来量化评价指标,其中通过项目资料量化的指标包括 X_{11} 、 X_{12} 、 X_{21} 、 X_{31} 和 X_{35} ,通过现场勘查的量化指标包括 X_{23} 、 X_{32} 、 X_{33} ,通过测量与计算量化的指标包括 X_{37} 、 X_{38} 、 X_{39} 、 X_{310} ,其余指标通过专家评估量化。表 1 为评价指标量化的计算方法。

1.3 评价等级的划分

为使评价简单、明确及结果具有一致性,需要建立 1 个由高到低的等级标准。将路侧容错环境安全评估等级划分为 4 级:1 级(优)、2 级(良)、3 级(中)、4 级(差),即级别越高路侧安全水平越低。表 2 为路侧安全等级的具体划分依

据^[2]。

2 路侧容错环境的 RST-GCE 评价模型

2.1 GCE 评价模型

设有 n 个聚类对象、 m 个聚类指标、 s 个不同灰类,根据第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个对象关于 $j(j=1,2,\dots,m)$ 指标的观测值 x_{ij} 将第 i 个对象归入第 $k(k=1,2,\dots,s)$ 个灰类,称为灰色聚类(GCE)。根据灰色聚类原理^[3]建立数学模型。

2.1.1 建立评价矩阵

令聚类评价道路的段数为 j ,聚类评价路段为 i ,其中 $i=1,2,\dots,n;j=1,2,\dots,m$ 。被评估道路的样本矩阵记作

表 1 评价指标量化的计算方法

Table 1 Calculation method of evaluation index quantification

评价指标	计算公式	备注
X_{11}	$X_{11} = \frac{\sum_i (G_i + l_i)}{L}$	X_{11} 为评价路段加权平均纵坡值; G_i 为评价路段中第 i 个坡段纵坡值; l_i 为第 i 个坡段长度; L 为评价路段长度, 且 $\sum l_i = L$
X_{12}	$X_{12} = \sum_i (WH_i + DEG_i)$	WH_i 为第 i 个圆曲线位于评价路段内的比重; DEG_i 为圆曲线 i 每百米长度的曲线偏角, $DEG_i = 18000/\pi \cdot R_i$, R_i 为第 i 个圆曲线半径
X_{32}	—	对设置了防撞护栏的地段或挖方路段, X_{32} 值取 0; 对设置了不具备防撞能力如示警桩、挡墙、挡块、防护墩的路段, X_{32} 取值按路面至路侧悬崖、沟壑、边坡或路肩挡墙底部的高度计算, 常用目测法获得粗略的数据即可; 对未设置防撞护栏且临近路侧下方有湖泊、河流、水库等较大水体或铁路线的路段, X_{32} 值取 15
X_{35}	$X_{35} = \frac{CZ}{W} \times 100\%$	CZ 为评价路段实际路侧净区宽度; $W = \alpha W_\alpha$, 其中 W 为路侧净区安全宽度下限值, α 为折减系数, 取值为 0.6—0.8, W_α 为建议净区宽度下限值, 依据评价路段边坡比率、交通量和设计速度得到
X_{37}	$X_{37} = \frac{n}{L} \times 1000$	n 为评价路段内的离散危险物数量; L 为评价路段长度, m
X_{38}	$X_{38} = \frac{\sum_i x_i}{n}$	x_i 为路侧离散危险物 i 的横向距离, 即外侧车道边缘线至危险物的径向距离; n 为评价路段内的离散危险物数量
X_{39}	$X_{39} = \frac{\sum_i (x_i \cdot l'_i)}{\sum_i l'_i}$	x_i 为路侧连续危险物 i 的横向距离; l'_i 为评价路段内的连续危险物 i 的长度, m
X_{310}	$X_{310} = \frac{\sum_i l''_i}{L} \times 1000$	l''_i 为评价路段内的连续危险物 i 的长度, m ; L 为评价路段长度, m

表 2 高速公路路侧安全容错环境的安全等级

Table 2 Safety hierarchies for highway roadside safety fault-tolerant environment

路侧安全等级	路侧环境条件
1 级	路侧有较充足的净区宽度, 净区宽度在 4m 以上, 净区内基本无危险物; 边坡坡度缓于 1:3; 驶出路面的车辆可驶回道路; 发生碰撞和翻车事故可能性很小
2 级	净区宽度较小且通常不超过 3m; 路侧存在少量零散障碍物; 距车道边缘较近范围内可能有连续危险物; 边坡坡度陡于 1:3; 驶出路面的车辆不能返回, 但一般能得到有效控制; 与障碍物碰撞的可能性很小, 翻车的概率也不大
3 级	净区宽度较小, 通常最大不超过 1.5m; 路侧深度达 3m 以上, 或距行车道边缘很近范围内存在宽大边沟、房屋、坚硬岩壁等; 车辆驶出路外能导致伤亡事故
4 级	净区宽度通常小于 1m; 路侧地形多为陡崖、深沟、高度大于 4m 的填方边坡或路肩挡墙; 距行车道边缘很近范围内有河流、湖泊、铁路线; 车辆驶出路外后易发生重大、特大事故

$$A = (X_{ij}) = \begin{bmatrix} X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n} \\ X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n} \\ \vdots \\ X_{m1}, X_{m2}, \dots, X_{mn} \end{bmatrix}$$

2.1.2 确定灰类及评价指标的各灰色级别取值

评价指标的各灰色级别取值可通过相关规范标准或专家意见得出, 本文的各级灰类(1—4 级)白化值 $x_j(1)$ 、 $x_j(2)$ 、 $x_j(3)$ 、 $x_j(4)$ 通过参考相关的文献及标准确定。表 3 为评价指标的各灰类白化值。

2.1.3 灰类白化权函数

将 n 个对象关于指标 j 的取值相应地分为 s 个灰类, 称为 j 指标子类。 j 指标 k 子类的白化权函数记为 $f_j^k(x)$ 。设 $f_j^1(x)$ 、 $f_j^2(x)$ 、 $f_j^3(x)$ 、 $f_j^4(x)$ 分别对应各个灰类的 1 级(优)、2 级(良)、3 级(中)、4 级(差)的白化权函数, 其具体形式如下。

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 1 & x < x_j(1) \\ \frac{x_j(2) - x}{x_j(2) - x_j(1)} & x_j(1) \leq x \leq x_j(2) \\ 0 & x > x_j(2) \end{cases} \quad (1)$$

表 3 评价指标的各灰类白化值
Table 3 Values of different grey white functions for evaluation index

评价指标	$x_j(1)$	$x_j(2)$	$x_j(3)$	$x_j(4)$
纵坡变量 $X_{11}^{[2]}$ /%	1	3	5	7
平曲线变量 $X_{12}^{[1]}$	15	30	50	100
路肩设置状况(JTG_B01—2003) X_{21} /m	1.5	2.5	3.0	3.5
路侧景观视觉效果 X_{22}	1/8	1/6	1/4	1/2
路面抗滑性能 $X_{23}^{[4]}$	0.15	0.3	0.45	0.55
路侧护栏合理性(JTG D81— 2006) X_{24}	2	4	6	8
路侧行道树状况 X_{25}	1/8	1/6	1/4	1/2
路侧振动带效果 X_{26}	1/8	1/6	1/4	1/2
引导设施效果 X_{27}	1/8	1/6	1/4	1/2
交通标志效果 X_{28}	1/8	1/6	1/4	1/2
边坡坡度 X_{31}	1:5	1:4	1:3	1:2
路侧深度 X_{32} /m	1	2	5	10
边沟状况 X_{33}	1	3	5	7
管道端头处理 X_{34}	1/8	1/6	1/4	1/2
路侧净区满足率 X_{35}	0.1	0.3	0.5	0.8
护栏端头处理 X_{36}	1/8	1/6	1/4	1/2
路侧离散危险物密度 X_{37}	1	10	20	50
离散危险物横向距离 X_{38} /m	0.1	0.3	0.5	0.7
连续危险物横向距离 X_{39} /m	0.1	0.3	0.5	0.7
路侧连续危险物密度 X_{310}	10	50	200	400
路侧附属设施视认性 X_{311}	1/8	1/6	1/4	1/2
可解体杆柱设施 X_{41}	1/8	1/6	1/4	1/2
缓冲效能设施性能 X_{42}	1/8	1/6	1/4	1/2
隔离防护设施性能 X_{43}	1/8	1/6	1/4	1/2

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0 & x < x_j(1) \text{ 或 } x > x_j(3) \\ \frac{x-x_j(1)}{\lambda_j^2-x_j(1)} & x_j(1) \leq x \leq \lambda_j^2 \\ \frac{x_j(3)-x}{x_j(3)-\lambda_j^2} & \lambda_j^2 < x \leq x_j(3) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda_j^2 = \frac{1}{2} \times (x_j(1) + x_j(3))$ 。

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0 & x < x_j(2) \text{ 或 } x > x_j(4) \\ \frac{x-x_j(2)}{\lambda_j^3-x_j(2)} & x_j(2) \leq x \leq \lambda_j^3 \\ \frac{x_j(4)-x}{x_j(4)-\lambda_j^3} & \lambda_j^3 < x \leq x_j(4) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\lambda_j^3 = \frac{1}{2} \times (x_j(2) + x_j(4))$ 。

$$f_j^4(x) = \begin{cases} 0 & x < x_j(3) \\ \frac{x_j(4)-x}{x_j(4)-x_j(3)} & x_j(3) \leq x \leq x_j(4) \\ 1 & x > x_j(4) \end{cases} \quad (4)$$

2.1.4 权重的确定

本文采用粗集理论确定权重 η_j , 具体算法见 2.2 节。

2.1.5 灰色聚类分析

第 i 个评价路段的灰色聚类系数 σ_i^k 为

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x) \cdot \eta_j \quad (5)$$

得到灰色聚类矩阵

$$(\sigma_i^k) = \begin{bmatrix} \sigma_1^1, \sigma_1^2, \dots, \sigma_1^k \\ \sigma_2^1, \sigma_2^2, \dots, \sigma_2^k \\ \vdots \\ \sigma_n^1, \sigma_n^2, \dots, \sigma_n^k \end{bmatrix}$$

确定第 i 个评价路段单元的路侧容错环境安全等级, 若 $\sigma_i^k = \max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\}$, 则路段 i 的路侧安全等级为 k^* 。本文的 k 取值 为 1—4, 即 $k=1$ 时路侧安全等级为 1 级(优); $k=2$ 时路侧安全等级为 2 级(良); $k=3$ 时路侧安全等级为 3 级(中); $k=4$ 时路侧安全等级为 4 级(差)。

2.2 粗集理论

粗集理论(RST)^[5]是在保持分类能力不变的前提下, 通过知识约简导出问题的决策或分类规则。

(1) 构建信息系统。

设 $S=(U, R, V, F)$ 是 1 个信息系统, 请专家对系统 S 中的各评价指标打分, 得到各指标的属性值。

(2) 简化信息系统。

若有属性值相同的指标, 表示该指标在整个系统中是冗余的, 要进行简化, 即只保留其中 1 个指标即可。

(3) 计算决策属性和所有条件属性集合的等价类。

设 P 和 Q 是信息系统 S 的评价指标 U 中的等价关系, Q 的 P 正域记为 $pos_P(Q)$, 且

$$pos_P(Q) = \bigcup_{x \in U/Q} \underline{P}X \quad (6)$$

式中, $pos_P(Q)$ 表示 U 中所有根据 U/Q 分类的信息可以准确地划分到关系 Q 的等价类中去的对象的集合。

(4) 计算属性重要度。

对信息系统 S 的评价指标 R , 设 $R=C \cup D$, 条件属性 $c_j \in C(j=1, 2, \dots, m)$, 则 c_j 对决策属性的重要度 k_j 为

$$k_j = \gamma_C(D) - \gamma_{C-c_j}(D) = \frac{card(pos_C(D)) - card(pos_{(C-c_j)}(D))}{card(U)} \quad (7)$$

式中, $\gamma_C(D) = \frac{card(pos_C(D))}{card(U)}$ 为 C 与 D 之间的依赖度, 表示根据 C 能被准确分类的对象在整个系统中的比例; $card(pos_C(D))$ 为决策属性的个数; $card(U)$ 为条件属性的个数; $\gamma_{C-c_j}(D) =$

$\frac{card(pos_{(C-c_j)}(D))}{card(U)}$ 为 D 相对于 $\{C-c_j\}$ 的正域, 即 U 中所有根据属性集 $\{C-c_j\}$ 划分后仍可准确划分到 D 的等价类中的对象集合。

(5) 计算属性权重。

根据重要度 k_j 计算出各评价指标的客观权重 α_j , 则

$$\alpha_j = k_j / \sum_{j=1}^n k_j \quad (8)$$

设每个指标的综合权重为 η_i , 令 $\eta_i = p\beta_i + \alpha_i(1-p)$ 。其中, β_i 为主观权重, 是根据各评判专家的专业性和权威性得到的各评判指标权重; p 为经验因子 ($0 < p < 1$), 它反映决策过程中决策者对主观权重和客观权重的偏好程度, 且 p 越大, 表明决策者越重视专家的经验知识, 反之表明决策者更重视客观权重。

3 应用实例

某运营高速公路路段 K0+000—K12+910.378 全长 13.083km, 由潭邵高速公路韶山互通(K0+000)向西北延伸,

在上跨 S208 后, 于保合亭设置单喇叭楠竹山互通与 S208 相接, 跨韶山灌渠, 经井拖山、老塘冲、槐星村、绕银田镇北、过塘湾里至鳌石村, 跨云湖天河, 经铁炉冲沿韶山铁路北行, 在螺大山左行于韶山林场上跨韶山铁路, 沿石忠村乡道终于韶山市洞江口(K12+910.378), 与韶山市规划的天鹅路顺接并与 S208 相交。

根据路段单元的划分原则和公路的实际状况, 将该运营高速公路划分为 17 个路段单元, 各路段单元的纵坡、边坡、线形数据等统计结果见表 4。

表 4 各路段单元的实际路况统计数据

Table 4 Statistical data of each road section under the real situation

路段单元	起止桩号	纵坡坡度/%	纵坡坡长/m	边坡坡度	路肩宽/m	平曲线半径/m	平曲线长度/m
L_1	K0+000—K0+500	0.455	500	1:3	3.0	0	0
	K0+500—K0+860	-0.88	360				
L_2	K0+860—K1+960	0.5	1100	1:4	2.9	2500	1535.593
L_3	K1+960—K2+360	-1.46	400	1:2	2.5	0	0
	K2+360—K2+720	1.31	360				
L_4	K2+720—K3+180	-0.47	460	1:3	2.8	1545.955	1199.511
	K3+180—K3+580	1.08	400				
L_5	K3+580—K4+280	2.08	700	1:2	2.5	4000	497.408
L_6	K4+280—K4+860	0.32	580	1:3	2.8	0	0
L_7	K4+860—K5+720	-2.09	860	1:4	2.8	2113.161	734.034
L_8	K5+720—K6+540	1.59	820	1:3	2.5	2541.765	1382.047
L_9	K6+540—K7+340	-1.78	800	1:5	2.5	2541.765	1382.047
L_{10}	K7+340—K7+860	0.357	520	1:3	2.5	4341.945	1110.021
L_{11}	K7+860—K8+500	-0.3	640	1:4	3.0	4341.945	1110.021
L_{12}	K8+500—K9+140	3.0	640	1:2	2.8	4000	1415.745
L_{13}	K9+140—K10+040	0.57	900	1:3	2.5	4000	1415.745
L_{14}	K10+040—K10+520	1.94	480	1:5	3.0	1400	1161.936
L_{15}	K10+520—K11+560	0.5	1040	1:3	2.8	1400	1161.936
L_{16}	K11+560—K12+000	-2.82	440	1:4	2.8	1386.47	1105.135
L_{17}	K12+000—K12+910.378	-0.3	910.378	1:5	3.0	0	0

3.1 指标变量值及其白化权函数值

对现场勘查或由专家评估的指标, 按照 1.3 节的等级标准打分, 其中 1 级为 8—10 分, 2 级为 6—8 分, 3 级为 4—6 分, 4 级为 4 分以下。根据表 4 的统计数据并结合表 1 的评价指标量化公式, 计算出部分评价指标值, 再由现场勘查和专家评估得出其余评价指标值。具体计算过程省略, 各评价路段的指标值见表 5。

根据表 3 和表 3 及灰类白化权函数, 可计算出各路段单元指标变量的各级灰类白化权函数值。

3.2 各指标权重的确定

3.2.1 构建信息系统

以高速公路 17 个路段单元为评价样本, 记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{17}\}$, 用粗糙集理论确定其评价指标的权重。根据表 5 的数

据, 请专家对公路评价指标体系中各指标进行评分, 评判结果中的 1 级(优)、2 级(良)、3 级(中)、4 级(差)对应属性值 1、2、3、4, 构成的信息系统见表 6。

3.2.2 简化信息系统

从表 6 可看出, 属性 $c_{11}, c_{33}, c_{35}, c_{37}$ 对应评价路段的属性值相同, 即对这 17 个样本, 属性 $c_{11}, c_{33}, c_{35}, c_{37}$ 具有相同的分辨能力, 故只需保留 1 个, 如本文保留 c_{11} 。类似地, 属性 c_{21}, c_{24} , 属性 c_{22}, c_{28}, c_{34} , 属性 c_{23}, c_{27} , 属性 c_{36}, c_{39} , 属性 c_{38}, c_{311}, c_{42} 对应路段的评价属性值也相同, 假设保留属性 $c_{21}, c_{22}, c_{27}, c_{36}, c_{38}$, 得到初步简化后的信息系统(表 7)。

3.2.3 决策属性和所有条件属性集合的等价类

$UID = \{\{u_1, u_{10}, u_{13}, u_{14}, u_{15}\}, \{u_2, u_5, u_8, u_{16}\}, \{u_3, u_4, u_6, u_7, u_9, u_{11}, u_{12}, u_{17}\}\}$;

表5 高速公路各路段评价指标汇总
Table 5 Summary of each highway section indexes

评价指标		路段单元																
		L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁	L ₁₂	L ₁₃	L ₁₄	L ₁₅	L ₁₆	L ₁₇
X ₁	X ₁₁	0.63	0.5	1.39	0.75	2.08	0.32	2.09	1.59	1.78	0.357	0.3	3.0	0.57	1.94	0.5	2.82	0.3
	X ₁₂	1	4.32	1	5.10	2.14	1	3.57	3.94	3.94	3.45	3.45	3.65	3.65	6.52	6.52	6.65	1
	X ₂₁	3.0	2.9	2.5	2.8	2.5	2.8	2.8	2.5	2.5	2.5	3.0	2.8	2.5	3.0	2.8	2.8	3.0
	X ₂₂	9.2	8.3	7.5	8.8	8.5	7.8	7.6	8.0	8.3	7.3	7.6	8.4	8.1	7.6	8.9	7.9	7.8
	X ₂₃	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.45	0.5	0.45	0.5	0.5	0.5	0.45	0.5	0.5	0.45	0.5	0.5
X ₂	X ₂₄	2	2	2	2	2	4	4	2	4	4	2	2	2	2	2	4	2
	X ₂₅	8.2	7.7	7.8	7.8	8.5	8.8	7.7	7.8	7.9	8.8	8.5	7.9	8.8	7.9	7.9	7.8	7.8
	X ₂₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	X ₂₇	8.8	8.9	9.2	8.5	9.0	8.3	8.7	9.2	8.9	8.0	8.3	7.8	7.9	8.2	8.5	8.8	9.1
	X ₂₈	9.2	8.3	7.5	8.8	8.5	7.8	7.6	8.0	8.3	7.3	7.6	8.4	8.1	7.6	8.9	7.9	7.8
	X ₃₁	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.3	1.4	1.3	1.5	1.3	1.4	1.2	1.3	1.5	1.3	1.4	1.5
	X ₃₂	8	9	8	12	8	6	7	10	16	9	11	10	9	10	11	14	5
	X ₃₃	1	2	2	3	2	3	4	5	3	4	6	7	5	4	4	3	1
	X ₃₄	9.2	8.3	7.5	8.8	8.5	7.8	7.6	8.0	8.3	7.3	7.6	8.4	8.1	7.6	8.9	7.9	7.8
	X ₃₅	0.86	0.84	0.79	0.8	0.79	0.86	0.82	0.8	0.84	0.86	0.87	0.84	0.8	0.82	0.84	0.8	0.79
X ₃	X ₃₆	9	8.8	8	8.5	8.6	7.2	8.7	8.3	8.6	9.2	7.2	7.2	8.2	7.8	8.3	8.5	9
	X ₃₇	10.5	10	10.5	10.5	10	10.3	8.1	6.1	6.3	5.8	6.3	6.3	8.9	8.3	7.7	6.8	8.8
	X ₃₈	1.45	1.18	0.96	1.24	1.56	1.27	0.75	1.36	1.25	1.75	1.54	1.26	1.33	1.45	1.50	1.72	1.46
	X ₃₉	0.25	0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0	0	0.25	0.25	0.25
	X ₃₁₀	189	0	303	249	257	276	281	240	152	338	187	114	0	0	261	209	264
	X ₃₁₁	8.2	5.8	7.2	8.5	8.5	5.8	5.8	7.2	7.2	5.8	5.8	7.2	5.8	8.5	7.2	5.8	5.8
X ₄	X ₄₁	7.2	7.2	8.5	3.8	7.2	5.8	5.8	8.6	8.8	5.8	5.8	7.2	5.8	3.8	7.2	5.8	7.2
	X ₄₂	8.2	5.8	7.2	8.5	8.5	5.8	5.8	7.2	7.2	5.8	5.8	7.2	5.8	8.5	7.2	5.8	5.8
	X ₄₃	8.5	7.8	7.8	7.9	8.5	8.2	8.4	7.8	7.8	8.6	8.6	8.9	8.2	7.9	8.9	8.4	7.8

$U/C=\{\{u_1\},\{u_2\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{12}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{15}\},\{u_{16}\},\{u_{17}\}\};$

$U/C-\{c_{11}\}=\{\{u_1\},\{u_2,u_{17}\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{12}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{15}\},\{u_{16}\}\};$

...

$U/C-\{c_{43}\}=\{\{u_1\},\{u_2\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{12},u_{15}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{16}\},\{u_{17}\}\}。$

各属性的正域为

$pos_c(D)=\{\{u_1\},\{u_2\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{12}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{15}\},\{u_{16}\},\{u_{17}\}\};$

$pos_{c_{11}}(D)=\{\{u_1\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{12}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{15}\},\{u_{16}\}\} \neq pos_c(D);$

...

$pos_{c_{43}}(D)=\{\{u_1\},\{u_2\},\{u_3\},\{u_4\},\{u_5\},\{u_6\},\{u_7\},\{u_8\},\{u_9\},\{u_{10}\},\{u_{11}\},\{u_{13}\},\{u_{14}\},\{u_{16}\},\{u_{17}\}\} \neq pos_c(D)。$

根据粗糙集的属性约简原理, 可得到判断条件属性 c_{22} 、 c_{25} 、 c_{26} 、 c_{36} 、 c_{38} 、 c_{41} 是冗余属性, 直接进行约简, 可得到高速公路路侧安全等级综合评价的属性核 $core(R)=\{c_{11},c_{12},c_{21},c_{27},c_{31},$

$c_{32},c_{310},c_{43}\}。$

3.2.4 属性重要度

根据式(7)可计算出高速公路路侧安全等级综合评价指标的重要度, 计算结果为 $k_{11}=0.1176, k_{12}=0.1176, k_{21}=0.1765, k_{27}=0.1176, k_{31}=0.1176, k_{32}=0.1176, k_{310}=0.1176, k_{43}=0.1176。$ 由于属性 $\{c_{11},c_{33},c_{35},c_{37}\},\{c_{21},c_{24}\}$ 及 $\{c_{23},c_{27}\}$ 对应的路段评价属性值相同, 所以其对应的重要度也相等, 即 $k_{11}=k_{33}=k_{35}=k_{37}=0.1176, k_{21}=k_{24}=0.1765, k_{23}=k_{27}=0.1176。$

3.2.5 属性权重

根据式(8)可计算出各评价指标的客观权重 α_j , 即

$\alpha_j=(\alpha_{11},\alpha_{12},\alpha_{22},\alpha_{23},\alpha_{24},\alpha_{27},\alpha_{31},\alpha_{32},\alpha_{33},\alpha_{35},\alpha_{37},\alpha_{310},\alpha_{43})=(0.0714,0.0714,0.1071,0.0714,0.1071,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714,0.0714)。$

假设由专家调查得到的主观权重 β_j 为

$\beta_j=(\beta_{11},\beta_{12},\beta_{21},\beta_{23},\beta_{24},\beta_{27},\beta_{31},\beta_{32},\beta_{33},\beta_{35},\beta_{37},\beta_{310},\beta_{43})=(0.070,0.065,0.085,0.075,0.060,0.072,0.080,0.088,0.077,0.095,0.073,0.092,0.068)。$

根据专家意见选取经验因子 $p=0.6$, 由 $\eta_j=p\beta_j+\alpha_j(1-p)$ 可

表 6 高速公路路段信息系统
Table 6 Information system for each highway section

条件属性 C	评价样本 U																
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}
c_{11}	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	2	1	2	2	3	2
c_{12}	1	1	2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	3	1
c_{21}	1	2	3	3	1	2	2	2	1	1	1	2	2	3	2	2	2
c_{22}	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2
c_{23}	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	1	3	3	1	2	2
c_{24}	1	1	2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	3	1
c_{25}	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2
c_{26}	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
c_{27}	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	1	3	3	1	2	2
c_{28}	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2
c_{31}	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3
c_{32}	1	2	3	2	1	3	2	3	3	2	2	1	3	2	1	3	2
c_{33}	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	4	1	2	4	3	2
c_{34}	2	2	3	2	2	3	2	3	3	2	2	1	3	2	1	2	2
c_{35}	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	4	1	2	4	3	2
c_{36}	2	2	3	3	2	2	2	3	3	1	1	3	2	3	3	2	2
c_{37}	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	4	1	2	4	3	2
c_{38}	1	3	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	3	3
c_{39}	2	2	3	3	2	2	2	3	3	1	1	3	2	3	3	2	2
c_{310}	2	3	3	2	3	1	2	2	2	1	1	3	1	2	3	2	3
c_{311}	1	3	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	3	3
c_{41}	2	2	1	4	2	3	3	1	1	3	3	2	3	4	2	3	2
c_{42}	1	3	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	3	3
c_{43}	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2
决策属性 D	3	1	2	2	1	2	2	1	2	3	2	2	3	3	1	1	2

表 7 初步简化后的公路信息系统
Table 7 Highway information system after preliminary simplification

条件属性 C	评价样本 U																
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}	u_{17}
c_{11}	1	1	2	2	1	1	3	2	2	1	1	2	1	2	2	3	2
c_{12}	1	1	2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	1	3	1	3	1
c_{21}	1	2	3	3	1	2	2	2	1	1	1	2	2	3	2	2	2
c_{22}	1	1	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	1
c_{25}	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2
c_{26}	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
c_{27}	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	1	3	3	1	2	2
c_{31}	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	3	3	3
c_{32}	1	2	3	2	1	3	2	3	3	2	2	1	3	2	1	3	2
c_{36}	2	2	3	3	2	2	2	3	3	1	1	3	2	3	3	2	2
c_{38}	1	3	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2	3	1	2	3	3
c_{310}	2	3	3	2	3	1	2	2	2	1	1	3	1	2	3	2	3
c_{41}	2	2	1	4	2	3	3	1	1	3	3	2	3	4	2	3	2
c_{43}	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2
决策属性 D	3	1	2	2	1	2	2	1	2	3	2	2	3	3	1	1	2

得到各评价指标的权重 η_j , 即

$$\eta_j = (\eta_{11}, \eta_{12}, \eta_{21}, \eta_{23}, \eta_{24}, \eta_{27}, \eta_{31}, \eta_{32}, \eta_{33}, \eta_{35}, \eta_{37}, \eta_{310}, \eta_{43}) = (0.0716, 0.0676, 0.0939, 0.0736, 0.0789, 0.0658, 0.0765, 0.0825, 0.0757, 0.0855, 0.0743, 0.0847, 0.0694)。$$

3.3 灰色聚类分析

根据 3.1 节的各路段白化权函数值和 3.2 节的指标权重, 按照式(5)可计算出各路段单元的灰色聚类系数 σ_i^k , 则所评价高速公路各路段单元的灰色聚类系数矩阵为

$$(\sigma_i^k) = \begin{bmatrix} \sigma_1^1, \sigma_1^2, \dots, \sigma_1^k \\ \sigma_2^1, \sigma_2^2, \dots, \sigma_2^k \\ \vdots \\ \sigma_n^1, \sigma_n^2, \dots, \sigma_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5505, 0.0841, 0.2298, 0.2492 \\ 0.4759, 0.1975, 0.1251, 0.1388 \\ 0.3772, 0.2655, 0.1229, 0.1137 \\ 0.3533, 0.1754, 0.2372, 0.2609 \\ 0.3525, 0.2101, 0.1433, 0.1550 \\ 0.2744, 0.2526, 0.3533, 0.2302 \\ 0.2510, 0.2577, 0.2431, 0.2186 \\ 0.4065, 0.0840, 0.2881, 0.3880 \\ 0.3535, 0.2886, 0.0785, 0.2048 \\ 0.3264, 0.1797, 0.1940, 0.1651 \\ 0.3838, 0.0884, 0.2273, 0.3366 \\ 0.3560, 0.1741, 0.1465, 0.3938 \\ 0.4469, 0.0629, 0.2022, 0.2145 \\ 0.4184, 0.0716, 0.1612, 0.3752 \\ 0.3726, 0.0633, 0.2200, 0.3770 \\ 0.2835, 0.2452, 0.1628, 0.2801 \\ 0.4387, 0, 0.8118, 0.3501 \end{bmatrix}$$

由 $\sigma_i^{k^*} = \max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\}$ 可以判断出韶山高速公路各路段的路侧容错环境的安全等级, 见表 8。

表 8 各路段的安全评价等级
Table 8 Safety assessment grades of each road section

路段	安全评价等级	路段	安全评价等级
L_1	1	L_{10}	1
L_2	1	L_{11}	1
L_3	1	L_{12}	4
L_4	1	L_{13}	1
L_5	1	L_{14}	1
L_6	3	L_{15}	4
L_7	2	L_{16}	1
L_8	1	L_{17}	1
L_9	1		

可见, 该高速公路的路侧容错环境总体上是优, 这与实际情况相符合, 但路段 L_{12} (K8+500—K9+140) 和路段 L_{15} (K10+520—K11+560) 的路侧安全等级差, 这可能主要是由于其路侧护栏端头未进行处理及路侧边坡为大于 4m 的填方边坡造成的。因此, 需要对未处理的护栏端头采取必要的安全措

施, 加强有关高填方边坡的防护或提醒, 以避免偶然驶出路外的车辆发生伤亡事故。

4 结论

(1) 通过分析高速公路路侧环境, 了解导致路侧事故发生的主要原因; 从路侧容错设计的理念出发, 建立了路侧容错环境评价指标体系, 为高速公路路侧安全评价提供了依据。

(2) 将灰色聚类变权法和粗集理论结合起来, 建立了数学评价模型, 为路侧安全评价提供更新、更恰当的数学评价方法。

(3) 将所建评价指标体系和数学评价模型应用到某运营高速公路的评价中, 找出了与实际情况相符的路侧安全等级差的路段, 表明所建评价指标体系正确合理, 所使用的数学评价方法恰当, 对构造中国路侧安全保障技术体系、标准与技术看方案提供了参考。

参考文献 (References)

[1] 阚伟生, 李长城, 汤筠筠. 公路路侧安全问题对策研究 [J]. 公路, 2007 (3): 97-101.
Kan Weisheng, Li Changcheng, Tang Junjun. Highway, 2007(3): 97-101.

[2] 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: 39-40.
Gao Hailong, Li Changcheng. Roadside design [M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 39-40.

[3] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 77-80.
Liu Sifeng, Xie Naiming. Theory and application of grey system [M]. Beijing: Science Press, 2008: 77-80.

[4] 张永清, 贾双盈. 高等级公路沥青路面性能评价方法 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(2): 11-15.
Zhang Yongqing, Jia Shuangying. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(2): 11-15.

[5] 张文修, 吴伟志. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Zhang Wenxiu, Wu Weizhi. Rough set theory and method [M]. Beijing: Science Press, 2001.

(责任编辑 孙秀云, 代丽)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文, 要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性, 同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰, 并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。