

高速公路交通安全与道路线形和 主要交通流特性的关系*

雷桂荣¹, 刘峰², 谢华昌², 金霞¹, 朱顺应¹

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 广东云梧高速公路有限公司, 广东 云浮 527300)

摘要: 为寻求高速公路交通事故发生规律, 构建道路空间线形 7 个综合特征指标及饱和度和大货车率 2 个交通流指标, 采用主基底分析法, 取方差阈值 $l=0.3$, 筛选出相互正交的 6 个主要指标, 以 90% 累计原始净信息量探索影响高速公路事故多发段和较安全路段形成的规律; 利用双聚类分析法对主要指标和事故率分别聚类, 并以广云(广州—云浮)、云梧(云浮—梧州)、云罗(云浮—罗定)高速公路为例进行分析。结果表明, 事故多发段规律为集合{势能相对变化指标, 平纵组合协调性指标, 视觉连续性指标, 饱和度, 势能均衡指标} = $(-16.319, 1.318) \cap (0.241, 0.583) \cap [(2.466, 3.6) \cup (6.863, 7.423)] \cap [(0.270, 0.3) \cup (0.670, 0.820)] \cap [(2.372, 3.447) \cup (18.919, 41.686)]$, 较安全路段规律为集合{势能相对变化指标, 大货车率} = $(3.564, 21.225) \cap [(0.015, 0.017) \cup (0.174, 0.204)]$ 。

关键词: 交通安全; 高速公路; 道路线形; 交通流特性

中图分类号: U491.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0041-06

根据赵学刚的研究成果, 由不良线形直接或间接导致的道路交通事故达 70%。Long K. J. 等利用贝叶斯网络的后验概率得出的引发事故原因中, 道路线形不尽合理是一个重要因素; Dadashova B. 等采用随机森林算法研究得出多个道路线形设计标准对交通事故严重性具有重大影响; 郭应时等对山区高速公路事故率与角度变化率进行回归分析, 拟合出事故率与角度变化率之间的曲线关系; 竺灵杰等以心率增长率为评价指标, 通过多元回归分析, 提出了不同海拔区间行车安全所需的最小平曲线半径参考值; 孟祥海等依据平纵几何线形对路段单元进行划分, 基于粗糙集理论中可辨识矩阵的约简算法确定对事故发生有突出影响的几何线形指标变量; 李大等建立连续下坡路段线形评价参数与亿车公里事故率之间的关系模型, 确定了线形质量评价参数的行车安全区间。上述研究得出不合理道路线形条件是交通事故的重要致因之一及事故率与平纵线形单个指标之间的关系。但影响高速公路安全的线形指标并不是单一的, 道路线形设计是一个非线性、非凸优化问题, 道路线形本质上是一条空间曲线, 由平纵线形组合而成。因此, 研究空间线形综合特征才能从本质上揭示交通事故的发生机理。

道路行车安全受交通流的影响也较大。Shi A. 等提取事故前后的交通流数据, 利用时间序列法分析了交通流的演变规律; 张铁军等针对山区双车道公路, 研究货车比例对安全的影响, 发现货车比例与各类型交通事故尤其是追尾事故、碰撞事故成正影响关系; 侯树展等将交通事故发生时段的交通流主要指标与事故信息进行数据匹配, 分析流量、速度、大车比例等交通流指标与不同等级事故数的分布规律, 发现在某些流量、速度或大车比例较大的区段, 交通事故数及严重程度处于较高水平; 郝亮等通过研究速度离散对行车安全的影响, 发现并非交通流速度越大越不安全, 而是与车辆需求安全距离的差越大越不安全。以上研究分析了事故前后的交通流特征, 但未考虑车与路的共同影响。

现有研究考虑了事故多发路段的事故数(事故率)与道路线形或交通流的单一关系, 少数虽研究了事故率与单个线形指标间的关系, 但没有对比分析较安全路段的空间线形综合特征和交通流特征。该文提取道路空间线形综合指标, 考虑饱和度 V/C 和大货车率 ω 2 个交通流特征指标, 分别以交通事故结果和因素为驱动, 分析事故多发段的主要致因, 探究较安全路段的贡献因素。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(71771183)

1 研究方案

1.1 研究数据

广云(广州—云浮)、云梧(云浮—梧州)、云罗(云浮—罗定)高速公路总里程近 200 km,其中广云和云梧高速公路为双向四车道(设计车速为 100 km/h),云罗高速公路部分路段为双向四车道(设计车速 100 km/h)、部分路段为双向六车道(设计车速 120 km/h)。因 2014 年前未采取新的交通工程措施,利用 2014 年的道路线形、构造物、交通流和交通事故资料作为研究数据。

1.2 研究单元

研究单元起点为事故集中发生段/无事故发生段或很少事故发生段上游所在的平面线形的直缓点或直圆点,终点为下游平面线形的缓直点或圆直点。

1.3 构建道路空间线形综合特征指标

道路线形是复杂的空间曲线,简化考虑平纵组合,从线形连续性、物理特性和视觉连续性及行车舒适性角度建立平面线形均衡指标、纵断面线形指标、视觉连续性指标和平纵组合协调性指标,综合考虑交通流的饱和度和大货车率。

1.3.1 平面线形均衡指标

平面线形均衡指标 α 又称平面线形偏转指标,表征路线的弯曲程度(路线弯曲影响行车舒适性),按下式计算:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{L} \quad (1)$$

式中: S_i 为线形曲率曲线与里程轴围成的面积之和(rad),如图 1 所示,对于基本型曲线,缓和曲线 $S_i = L_i/(2R_i)$,直线 $S_i = 0$,圆曲线 $S_i = L_i/R_i$; n 为研究单元的长度(km)。

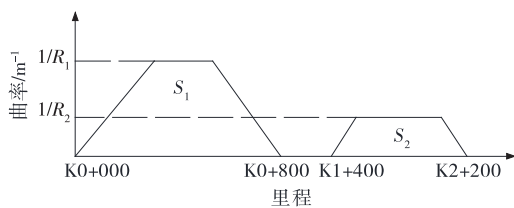


图 1 平面曲线曲率随里程的变化

对于非对称基本型平曲线(见图 2), $\varphi_1 = L_{s1}/(2R)$, $\varphi_2 = L_y/R$, $\varphi_3 = L_{s2}/(2R)$, $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$, $L = L_{s1} + L_y + L_{s2}$ (L_s 、 L_y 分别为缓和曲线和圆曲线长度),根据式(1),单位长度上线形的偏转角

$$\alpha_1 = [L_{s1}/(2R) + L_y/R + L_{s2}/(2R)]/(L_{s1} + L_y + L_{s2})。$$

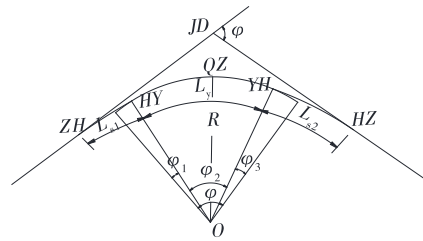


图 2 非对称基本型曲线示意图

1.3.2 纵断面线形指标

纵断面线形指标由势能绝对变化指标 E_p 、势能相对变化指标 \bar{E}_p 、下坡段长度相对指标 η 和势能均衡指标 β 组成,其中 E_p 、 \bar{E}_p 表征高差变化大小和幅度, η 表征下坡段相对长度, β 表征纵断面起伏状况。4 个指标影响车辆的制动,影响行车舒适性。如图 3 所示,其表达式如下:

$$E_p = mg \sum_{j=1}^n h_j, \quad \bar{E}_p = mg \frac{\sum_{j=1}^n h_j}{L}$$

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^m L_k}{L}, \quad \beta = D(h_1, h_2, \dots, h_n)$$

式中: E_p 为势能绝对变化指标,即坡度曲线与里程轴围成的面积之和,为车辆在研究单元上的绝对势能变化量(J); \bar{E}_p 为势能相对变化指标,即车辆在单位长度上的平均势能变化量($J \cdot km^{-1}$); mg 为车辆重量,对于单个车辆,其大小对不同研究单元 E_p 、 \bar{E}_p 的相对大小无影响,故其取值为 1; h_j 为纵坡的高差(m),上坡为正,下坡为负; η 为下坡段长度相对指标,为线形单元下坡路段长度占总坡长的比例(%); L_k 为下坡段长度(km); β 为势能均衡指标,为各纵坡段高差的方差(m^2)。

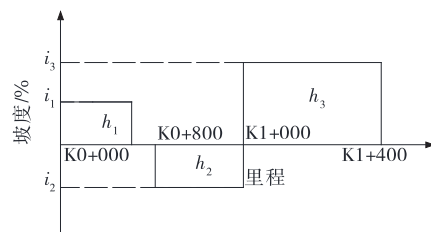


图 3 纵坡坡度随里程的变化

1.3.3 视觉连续性指标

公路线形平面转向、纵面起伏、亮度变化等影响

线形的视觉连续性。视觉间断主要分布在线形拐点(平面线形的直缓点、缓圆点、曲中点、圆缓点、缓直点,纵面线形的变坡点)、亮度变化点(隧道进出口明暗适应)和山体走向与道路走向不一致处。基于此,构建视觉连续性指标 δ ,其表达式如下:

$$\delta = \frac{n}{L}$$

式中: n 为研究单元上视觉变化点数量(个)。

如图4所示,研究单元 K263+814.092—K265+822 的拐点总数为13个,包括平面拐点10个、纵断面拐点3个。

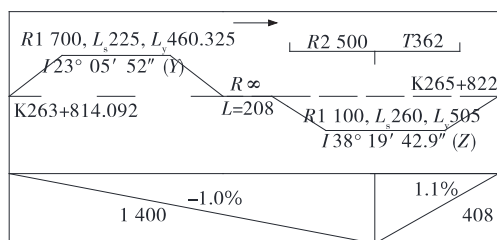


图4 拐点数量统计示意图(单位:m)

1.3.4 平纵组合协调性指标

理想的平纵组合是平纵顶点重合,且平包竖。若平纵组合不良,会形成视觉上不连续的立体线形,危及行车安全。因此,构建平纵组合协调性指标 ξ 。组合协调性用错位距离表示,错位距离由平竖顶点错位距离和平曲线、竖曲线起终点错位距离组成,即在曲线前的直线上竖曲线起点与平曲线直缓点的距离、在曲线后直线上的竖曲线终点与平曲线缓直点的距离(见图5)。

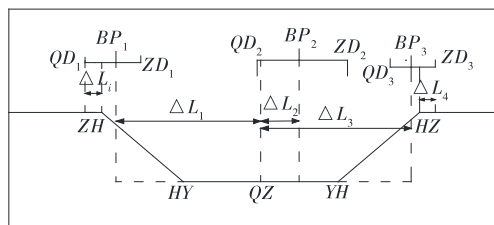


图5 平纵拐点错位示意图

由于不同平纵组合段内平曲线半径大小可能不同,在错位距离相同的情况下,研究单元长度和平曲

线半径大小不同,其对线形协调性的影响也不同。 ξ 的表达式如下:

$$\xi = \frac{1}{L} \times \sum_{i=1}^n \frac{\Delta L_i}{R_i}$$

式中: ΔL_i 为平纵拐点错位距离(m); R_i 为平纵组合段内平曲线半径(m)。

1.4 分析方法

(1) 主基底分析法。与高速公路交通安全密切相关的指标包括较易量化的7个道路空间线形综合指标及饱和度和大货车率2个交通流指标,各指标可能包含多重相关性和冗余信息。主成分分析法、因子分析法等提取原始变量信息通过线性组合形成新变量实现降维,形成的抽象新组合变量难以解释,而主基底分析法对原始变量进行主次筛选,得到的主要原始变量形成主基底变量,不需重新解释。因此,主要因素指标筛选采用主基底分析法。

(2) 双聚类分析法。为鉴别高速公路交通事故多发段和较安全路段,探索各因素对两类路段的影响规律,采用双聚类分析法,即对因素和结果分别聚类,其中因素是筛选出的主要指标,结果是事故率。以结果为驱动,鉴别事故多发段和较安全路段,因素聚类与结果聚类对应,得出各主要指标在两类路段的取值规律。K-均值聚类法是将样品或变量按照其在性质上的亲疏程度进行分类的多元统计分析方法,用于对样品进行快速聚类,其计算量小,适合大样本数据分析。为避免不同聚类方法带来的误差,对因素和结果采用K-均值聚类法进行聚类。结果和因素分别聚类后进行对比分析,以事故多发段规律寻求避免交通事故的方法,即研究事故致因,降低不利结果以保证道路交通安全;以较安全路段规律找出最大贡献因素,即研究车辆安全运行环境,提供良好条件保证道路交通安全。

2 研究结果分析

2.1 指标数据计算

广云、云梧、云罗高速公路各路段道路空间线形综合特征指标、饱和度、大货车率和事故率见表1。

表1 广云、云梧、云罗高速公路各路段的9个指标和事故率 λ

| 路段编号 | $\alpha / (\text{rad} \cdot \text{km}^{-1})$ | E_p / J | $\bar{E}_p / (\text{J} \cdot \text{km}^{-1})$ | $\eta / \%$ | β / m^2 | $\delta / (\text{个} \cdot \text{km}^{-1})$ | ξ / km^{-1} | V/C | $\omega / \%$ | $\lambda / [\text{次} \cdot (\text{百万车} \cdot \text{km})^{-1}]$ |
|----------------|--|------------------|---|-------------|----------------------|--|------------------------|-------|---------------|--|
| A ₁ | 0.514 | -9.378 | -4.500 | 0.738 | 10.692 | 6.061 | 0.019 | 0.420 | 0.099 | 0.333 |
| A ₂ | 0.408 | 33.229 | 11.265 | 0.112 | 18.919 | 4.425 | 0.027 | 0.350 | 0.201 | 0.060 |
| A ₃ | 0.463 | 1.809 | 0.621 | 0.546 | 13.357 | 3.373 | 0.085 | 0.660 | 0.024 | 0.366 |

续表 1

| 路段 编号 | $\alpha/(\text{rad} \cdot \text{km}^{-1})$ | E_p/J | $\bar{E}_p/(\text{J} \cdot \text{km}^{-1})$ | $\eta/\%$ | β/m^2 | $\delta/(\text{个} \cdot \text{km}^{-1})$ | ξ/km^{-1} | V/C | $\omega/\%$ | $\lambda/[\text{次} \cdot (\text{百万车} \cdot \text{km})^{-1}]$ |
|-----------------|--|----------------|---|-----------|--------------------|--|----------------------|-------|-------------|--|
| A ₄ | 0.155 | -13.869 | -3.645 | 0.685 | 8.944 | 3.488 | 0.017 | 0.440 | 0.118 | 0.353 |
| A ₅ | 1.361 | -5.251 | -1.248 | 0.413 | 7.513 | 5.005 | 0.583 | 0.320 | 0.073 | 0.368 |
| A ₆ | 0.282 | -13.604 | -4.941 | 0.880 | 4.267 | 5.369 | 0.024 | 0.380 | 0.154 | 0.377 |
| A ₇ | 0.364 | 16.233 | 3.564 | 0.460 | 6.959 | 5.656 | 0.111 | 0.470 | 0.153 | 0.050 |
| A ₈ | 0.590 | -3.282 | -0.786 | 0.368 | 10.302 | 5.374 | 0.032 | 0.470 | 0.153 | 0.358 |
| A ₉ | 0.415 | -28.251 | -5.322 | 0.694 | 14.482 | 5.013 | 0.110 | 0.400 | 0.153 | 0.344 |
| A ₁₀ | 0.865 | 28.845 | 21.225 | 0.000 | 3.447 | 4.954 | 0.058 | 0.440 | 0.015 | 0.000 |
| A ₁₁ | 0.965 | 24.541 | 11.766 | 0.420 | 14.654 | 5.727 | 0.175 | 0.390 | 0.113 | 0.075 |
| A ₁₂ | 0.469 | 31.797 | 12.034 | 0.315 | 13.494 | 4.370 | 0.004 | 0.590 | 0.113 | 0.000 |
| A ₁₃ | 0.480 | 14.264 | 5.291 | 0.277 | 7.156 | 6.863 | 0.093 | 0.300 | 0.204 | 0.067 |
| A ₁₄ | 0.605 | 19.326 | 8.182 | 0.100 | 12.884 | 4.918 | 0.048 | 0.350 | 0.047 | 0.000 |
| A ₁₅ | 0.551 | -11.970 | -5.272 | 0.626 | 8.501 | 5.105 | 0.168 | 0.270 | 0.017 | 0.356 |
| A ₁₆ | 0.341 | 70.975 | 15.981 | 0.000 | 15.871 | 3.600 | 0.000 | 0.670 | 0.017 | 0.076 |
| A ₁₇ | 0.261 | 4.066 | 1.318 | 0.667 | 23.642 | 3.714 | 0.000 | 0.370 | 0.017 | 0.356 |
| A ₁₈ | 0.599 | 30.407 | 9.132 | 0.249 | 11.930 | 6.161 | 0.048 | 0.370 | 0.017 | 0.053 |
| A ₁₉ | 0.648 | -8.418 | -3.713 | 0.423 | 7.505 | 5.761 | 0.141 | 0.310 | 0.130 | 0.388 |
| A ₂₀ | 0.276 | -59.995 | -9.266 | 0.745 | 22.934 | 3.648 | 0.049 | 0.780 | 0.174 | 0.510 |
| A ₂₁ | 0.188 | -37.749 | -15.745 | 0.851 | 11.843 | 5.007 | 0.029 | 0.720 | 0.174 | 0.612 |
| A ₂₂ | 0.236 | -48.925 | -7.285 | 0.616 | 41.686 | 2.466 | 0.014 | 0.750 | 0.047 | 0.381 |
| A ₂₃ | 0.600 | 54.685 | 18.492 | 0.000 | 5.178 | 6.342 | 0.020 | 0.450 | 0.047 | 0.066 |
| A ₂₄ | 0.413 | 33.673 | 7.431 | 0.281 | 8.131 | 3.819 | 0.241 | 0.550 | 0.047 | 0.080 |
| A ₂₅ | 0.265 | 46.179 | 11.690 | 0.339 | 13.379 | 3.858 | 0.010 | 0.310 | 0.042 | 0.095 |
| A ₂₆ | 0.194 | 31.612 | 13.640 | 0.154 | 8.684 | 5.007 | 0.030 | 0.490 | 0.139 | 0.065 |
| A ₂₇ | 0.493 | -11.273 | -5.564 | 0.467 | 10.307 | 7.423 | 0.045 | 0.820 | 0.042 | 0.494 |
| A ₂₈ | 0.571 | -18.491 | -7.632 | 0.878 | 13.301 | 4.792 | 0.042 | 0.660 | 0.042 | 0.669 |
| A ₂₉ | 0.415 | -57.993 | -16.732 | 1.000 | 6.977 | 4.262 | 0.055 | 0.740 | 0.042 | 0.549 |
| A ₃₀ | 0.315 | -6.120 | -1.337 | 0.384 | 4.643 | 4.884 | 0.003 | 0.480 | 0.061 | 0.517 |
| A ₃₁ | 0.188 | -12.766 | -4.319 | 0.682 | 2.372 | 4.335 | 0.118 | 0.330 | 0.042 | 0.416 |

2.2 主基底分析法因素筛选

对表 1 中的 9 个因素进行主基底分析。令 $X_1 = \alpha$ 、 $X_2 = E_p$ 、 $X_3 = \bar{E}_p$ 、 $X_4 = \eta$ 、 $X_5 = \beta$ 、 $X_6 = \delta$ 、 $X_7 = \xi$ 、 $X_8 = \omega$ 、 $X_9 = V/C$ ，得：

$$\sum_{j=1}^9 r^2(X_3, X_j) = \max \sum_{i,j=1}^9 r^2(X_i, X_j) = 2.901$$

因此，取第一个主基底因素为 $Z_1 = X_3$ 。以 X_3 为起始因素构造主基底，计算每个主基底的方差即净信息含量，得到净信息含量的相对大小为 $\bar{E}_p > \xi > \delta > \omega > V/C > \beta > \alpha > \eta > E_p$ 。选取 $\text{Var}(Z_k) > 0.3$ 的主基底为主要因素，得到势能相对变化指标 \bar{E}_p 、平纵组合协调性指标 ξ 、视觉连续性指标 δ 、大货车率 ω 、饱和度 V/C 、势能均衡指标 β 6 个主基底为主要因素。各因素的净信息含量 R_{NI} 和累计净信

息含量见表 2。

表 2 各因素的 R_{NI} 值和累计 R_{NI} 值 %

| 因素 | R_{NI} | 累计 R_{NI} | 因素 | R_{NI} | 累计 R_{NI} |
|------------|-----------------|--------------------|------------|-----------------|--------------------|
| $Z_1(X_3)$ | 17.1 | 17.1 | $Z_6(X_5)$ | 11.0 | 90.0 |
| $Z_2(X_7)$ | 17.0 | 34.1 | $Z_7(X_1)$ | 5.0 | 95.0 |
| $Z_3(X_6)$ | 16.8 | 50.9 | $Z_8(X_4)$ | 3.0 | 98.0 |
| $Z_4(X_8)$ | 15.6 | 66.5 | $Z_9(X_2)$ | 2.0 | 100.0 |
| $Z_5(X_9)$ | 12.5 | 79.0 | | | |

由表 2，经 Gram-Schmidt 正交变换，得 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 的累计净信息含量达 90%，即 \bar{E}_p 、 ξ 、 δ 、 ω 、 V/C 和 β 6 个因素可以 90% 的高精度代表所有原因因素集合中的净信息含量。

2.3 因素和事故率双聚类分析

利用 IBMSPSS 19.0 软件，采用 K-均值聚类

法,对 \bar{E}_p 、 ξ 、 δ 、 ω 、 V/C 和 β 6 个主要因素及事故率分别进行聚类。以事故率大小为鉴别标准,将 31 条路段分为两类:一类为较安全路段,其事故率 $\lambda \leq$

0.095;二类为事故多发路段,其事故率 $\lambda \geq 0.333$ 。各主要因素在两类路段的取值集合关系及两类路段的规律集合见表 3。

表 3 主要因素在两类路段的集合关系及规律

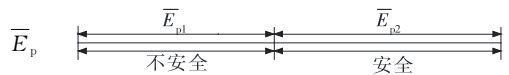

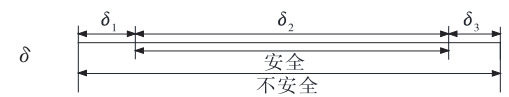
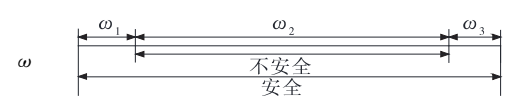
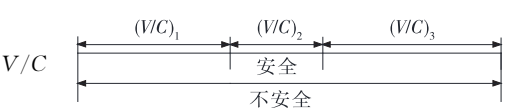
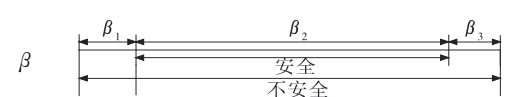
| 主要因素 | 集合关系 | 较安全路段规律集合 | 事故多发段规律集合 |
|-------------|---|---|--|
| \bar{E}_p |  | $\bar{E}_p = (3.564, 21.225)$ | $\bar{E}_p = (-16.319, 1.318)$ |
| ξ |  | — | $\xi = (0.241, 0.583)$ |
| δ |  | — | $\delta = (2.466, 3.6) \cup (6.863, 7.423)$ |
| ω |  | $\omega = (0.015, 0.017) \cup (0.174, 0.204)$ | — |
| V/C |  | — | $V/C = (0.270, 0.3) \cup (0.670, 0.820)$ |
| β |  | — | $\beta = (2.372, 3.447) \cup (18.919, 41.686)$ |

表 3 中, \bar{E}_{p1} 为事故多发段的规律集合, \bar{E}_{p2} 为较安全路段的规律集合; ξ_1 为较安全路段的规律集合, $\xi_1 + \xi_2$ 为事故多发段的规律集合, 故 ξ_2 为事故多发段的决定性规律集合, ξ_1 不能决定安全与否; 同理, $\delta_1 + \delta_3$ 为事故多发段的决定性规律集合, δ_2 不能决定安全与否; $\omega_1 + \omega_3$ 为较安全路段的规律集合, ω_2 不能决定安全与否; $(V/C)_1 + (V/C)_3$ 为事故多发段的决定性规律集合, $(V/C)_2$ 不能决定安全与否; $\beta_1 + \beta_3$ 为事故多发段的规律集合, β_2 不能决定安全与否。据此可得到两类路段的规律集合: 1) 较安全路段的规律集合 {势能相对变化指标, 大货车率} = $(3.564, 21.225) \cap [(0.015, 0.017) \cup (0.174, 0.204)]$ 。2) 事故多发段的规律集合 {势能相对变化指标, 平纵组合协调性指标, 视觉连续性指标, 饱和度, 势能均衡指标} = $(-16.319, 1.318) \cap (0.241, 0.583) \cap [(2.466, 3.6) \cup (6.863, 7.423)] \cap [(0.270, 0.3) \cup (0.670, 0.820)] \cap [(2.372, 3.447) \cup (18.919, 41.686)]$ 。

3 结论

该文构建道路空间线形综合指标表征道路线形

的空间复杂性,解释高速公路交通安全特征;通过基底因素筛选出含有较高净信息的影响因素,在安全改善或新建道路施工中可降低成本,提高安全和效率;采用双聚类分析,通过事故率聚类鉴别出较安全路段和事故多发路段,通过因素聚类得出影响较安全路段和事故多发路段形成的规律,结果和因素对应,具有较高的靶向性;聚类结果对比分析,可保证研究的全面性和深度。主要结论如下:

(1) 势能相对变化指标 \bar{E}_p 、平纵组合协调性指标 ξ 、视觉连续性指标 δ 、大货车率 ω 、饱和度 V/C 、势能均衡指标 β 是影响广云、云梧、云罗高速公路交通安全的主要指标,平面线形均衡指标 α 、下坡段长度相对指标 η 和势能绝对变化指标 E_p 不影响这 3 条高速公路的交通安全。

(2) 在平均高差较大、平纵组合较差、拐点密集或很少、纵坡无起伏或起伏大路段应设置必要的警告标志等,提醒驾驶员安全驾驶;对较拥挤路段(饱和度大于 0.67)应及时预警;大小车分车道行驶,必要时采取分流措施,以降低离散程度,保证交通流稳定,提高车辆运行安全;新建道路时,相邻纵坡段高

差的方差宜为 4~18 m²。

参考文献:

- [1] 赵婷,戚春华,朱守林,等.公路线形复杂程度对驾驶员 HRV 的影响研究[J].中国安全科学学报,2016,26(2).
- [2] 赵学刚.道路交通事故多发段(点)定义研究[A].2004 北京国际智能交通论坛[C].2004.
- [3] Long K J, Liu Y. Traffic accident mechanism analysis based on Bayesian network[J]. Journal of Safety & Environment, 2010, 10(1).
- [4] Dadashova B, Ramirez B A, McWilliams J M, et al. The identification of patterns of interurban road accident frequency and severity using road geometry and traffic indicators[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14.
- [5] 郭应时,付锐,袁伟,等.山区公路事故率与平面线形的关系[J].交通运输工程学报,2012,12(1).
- [6] 竺灵杰,柳本民,郭忠印,等.基于心率变化指标的高原公路平曲线试验研究[J].华东交通大学学报,2016,33(6).
- [7] 孟祥海,侯芹忠,史永义,等.IHSDM 高速公路事故预测模型[J].交通运输工程学报,2016,16(1).
- [8] 李大,郑柯,周乾.高速公路连续下坡路段线形质量评价方法研究[J].公路与汽运,2017(3).
- [9] Hirpa D, Hare W, Lucet Y, et al. A bi-objective optimization framework for three-dimensional road alignment design[J]. Transportation Research Part C: Emerging

Technologies, 2016, 65.

- [10] Shi A, Tao Z, Zhang X, et al. Evolution of traffic flow analysis under accidents on highways using temporal data mining[A]. Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications. IEEE Computer Society[C]. 2014.
- [11] 张铁军,唐铮铮,康云霞.山区双车道公路交通组成中货车比例对安全影响研究[A].国际汽车交通安全学术会议[C].2009.
- [12] 侯树展,孙小端,贺玉龙,等.高速公路交通事故严重程度与交通流特征的关系研究[J].中国安全科学学报,2011,21(9).
- [13] 郝亮,李斌,刘文峰,等.基于需求安全距离和交通流理论的速度离散对车辆行驶安全的影响[J].公路交通科技,2013,30(5).
- [14] 王香花,苏彩平.基于创新系统视角的区域自主创新评价[J].统计与决策,2016,18(14).
- [15] Hollnagel E. Is safety a subject for science[J]. Safety Science, 2014, 67.
- [16] 艾明显,郭静,周华.山区高速公路道路线形对交通安全的影响研究[J].公路与汽运,2012(4).
- [17] 吴蓉蓉.基于 TCT 的城市道路交通事故多发点鉴别方法研究[D].南京:东南大学,2006.
- [18] 刘丹丹.基于交通流特性的高速公路交通安全综合评价研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.

收稿日期:2018-03-06

(上接第 40 页)

- 择与救援车辆路径的集成优化研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [5] 张传琪.动态路网下车辆路径问题研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [6] 刘凯,吕晓华,李爱光,等.顾及天气影响的动态路网最优路径研究[J].测绘与空间地理信息,2017,40(3).
- [7] 张程程,康维新.交通动态路网模型与能耗最优路径诱导[J].应用科技,2015,42(4).
- [8] 程思敏.时间限制下动态路网路径规划算法的研究与实现[D].合肥:中国科学技术大学,2015.
- [9] 盖春英. VISSIM 微观仿真系统及在道路交通中的应用[J].公路,2005(8).
- [10] Cherkassky B V, Goldberg A V, Radzik T. Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation[J]. Mathematical Programming, 1996, 73(2).
- [11] Bertsek D P. A simple and fast label correcting algorithm for shortest paths[J]. Networks, 1993, 23.

- [12] Zhan F B, Noon C E. Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks[J]. Transportation Science, 1998, 32(1).
- [13] 严寒冰,刘迎春.基于 GIS 城市道路网最短路径算法探讨[J].计算机学报,2000,23(2).
- [14] 马剑,李文勇,王振.城市交通突发事件的影响范围研究[J].公路与汽运,2012(4).
- [15] 王昱.交通突发事件辅助决策系统的应用研究[D].南京:东南大学,2011.
- [16] 贲莉莉.城市交通事故紧急救援系统研究及辅助决策系统设计[D].南京:河海大学,2007.
- [17] 张铭.城市轨道交通应急决策支持系统设计与实现[A].海峡两岸智慧型运输系统学术研讨会论文集[C].2009.
- [18] 马芳,黄灿彬.城市公共交通应急处置决策支持系统研究[A].公共交通与城市发展研究及实践[C].2006.

收稿日期:2018-04-25