

基于事故树的高速公路交通安全评价研究

邓卓

(广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 高速公路是全球交通事故的重灾区。基于事故树分析法构建高速公路四类典型路段(直线、弯坡、隧道、桥梁)的事故树模型,将不同因素对高速公路交通安全影响的严重程度进行量化,根据实际事故的发生概率修正结构重要度,提出道路事故安全指数 ARSI。该指标的权重接近实际交通情况,可提高评价结果的客观性和准确性,以实现高速公路路段的微观评价,并提出针对性建议,为改善高速公路交通安全问题提供有效方向。

关键词: 高速公路; 安全评价; 事故树; 结构重要度

中图分类号: U492.8

文献标识码: A

Traffic Safety Evaluation Method for Freeway Section Based on Fault Tree

DENG Zhuo

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510010, Guangdong, China)

Abstract: Expressway is the world's worst traffic accident area. Based on the accident tree analysis method, this paper builds an accident tree model of four typical sections of expressway (straight line, curved slope, tunnel and bridge), quantifies the severity of the impact of different factors on expressway traffic safety, revises the structural importance according to the actual accident probability, and proposes the road accident safety index ARSI. The weight of the index is close to the actual traffic situation, so the the objectivity and accuracy of the evaluation results are improved, so as to realize the micro-evaluation of highway sections. Some targeted suggestions are put forward to provide effective directions for improving highway traffic safety.

Key words: freeway; safety evaluation; fault tree; structural importance

随着高速公路建设的发展,交通安全事故数量也大幅增长,提升高速公路运营的安全性成为国内外需共同面对的重大交通安全问题。目前关于高速公路安全评价的方法较多,但评价指标通常较为宽泛,评价结果难以接近实际^[1]。我国常用的高速公路评价方法主要为统计数据评价法或指标评价法^[2-3],前者仅能作出整体评价,无法分析主要危险源;后者通常主观地选取某路段进行安全评价,再按照专家评价法或线形指标等进行权重赋值,导致路段进行量化时会有局限性,结果有较大的误差。高速公路较多

的伤亡事故可能由某些关键交通因素引起,可寻找关键因素并对其进行改善,达到安全评价的真正目的^[4]。

本文采用事故树分析法总结高速公路不同路段的事故特点,针对性地选择引起路段事故的不同基本事件,对影响各类路段交通安全的基本事件进行分级处理,对各风险源进行比较和量化处理。将事故树的修正结构重要度进行量化,判断不同影响因素对高速公路交通安全的严重程度,并建立评价指标权重体系,提出道路事故安全指数来判断高速公路的安全等级。

收稿日期: 2024-04-18

作者简介: 邓卓,工程师,硕士,研究方向为道路路线设计和安全评价

1 事故树模型构建与定性分析

1.1 路段分类及影响因素

参照《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015) 将高速公路的直线路段、弯坡路段、桥梁路段和隧道路段作为顶上事件, 事故发生类型分为单车、多车两大类。本文从人、车、路和环境等方面分析事故的风险源。高速公路作为特殊的驾驶环境, 出现酒驾、行人干扰等情况较少, 但驾驶员的经验和习惯对交通危险事故的处理起关键作用; 高速公路的运行速度较快, 长时间处于高负荷状态, 对车辆的动力性能、负载情况和制动能力都有较高的要求; 道路条件直接造成交通事故的概率较低, 但设计指标、使用状态、车道设置和交通设施等均易造成驾驶员操作不当, 从而引发交通事故; 驾驶过程中的光线环境、车流状态、临时交通组织和天气状况等客观因素也直接增加行车风险。从“人-车-路-环境”进行分析, 各方面因素多达 54 项^[5], 事故树建立时应考虑主诱因和可度量的原则, 选取设计指标、行驶环境、运行状态等主要因素, 舍弃如失火、偶发性暴雨等次要因素。如无法度量则转换为其他可度量的指标。表 1 为本文中事故树建立所采用的中间事件和基本事件。

表 1 中间事件和基本事件

中间事件		基本事件	
M1	单车事故	X1	经验不足
M2	多车事故	X2	夜间行车
M21	碰撞事故	X3	超速行驶
M22	车辆追尾	X4	交通过大
M22	车辆追尾	X5	车辆超载
M24	侧翻事故	X6	相邻路段运行速度差
M25	坠车	X7	设计与运行速度差大
M31	躲避障碍物	X8	大小车速度差大
M32	路线方向错误	X9	天气不良
M33	前车减速	X10	交通工程设施不完备
M34	后车超速	X11	制动不足
M35	车速过快	X12	护栏质量不足
M36	视线不良	X13	路面行驶障碍
		X14	路面摩擦系数小
		X15	超高不满足
		X16	视距不足
		X17	隧道出入口亮度不足
		X18	隧道行驶时间不良

1.2 直线路段事故树分析

在直线路段上的单车事故以碰撞事故为主, 可能由躲避道路障碍物、制动失常和路线方向错误等因素引发; 多车事故分为车辆追尾和侧面刮擦, 由相邻路段运行速度差过大、交通量较大和躲避障碍物等因素引发。根据实际事故的可能性构建直线段事故树模型, 如图 1 所示。

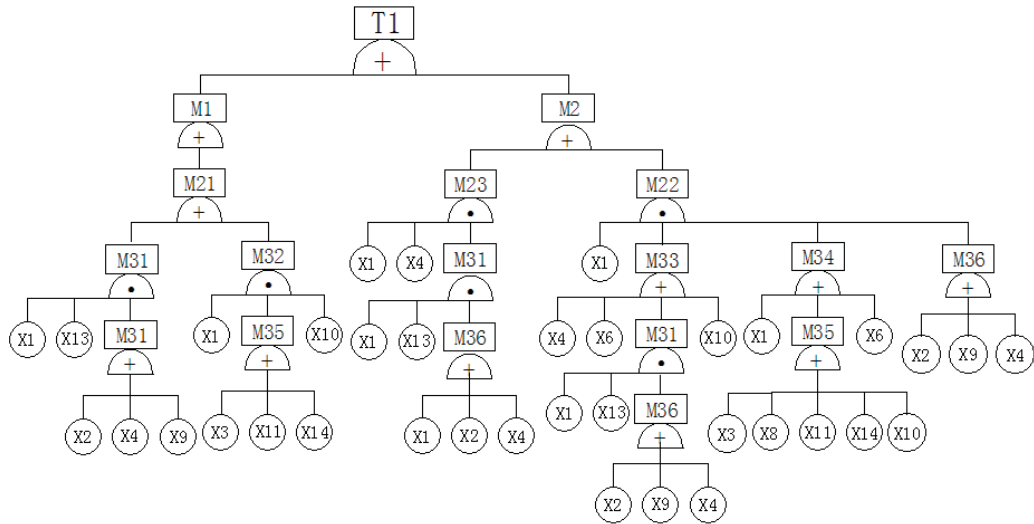


图 1 高速公路直线路段事故树

表 2 直线路段事故树的基本事件结构重要度

基本事件	X1	X2	X3	X4	X6	X9	X10	X11	X13	X14
重要度	0.98	0.77	0.26	0.50	0.43	0.77	0.77	0.57	0.43	0.26

采用相对简单、精确度较高的布尔代数法对直线段事故树进行最小割集求解^[6], 最小割集数

目越多, 引起高速公路直线路段发生事故的可能因素较多。然后采用精确度较高的近似分析模型(式 1) 计算基本事件的结构重要度。由表 2 知经验不足的司机、视线不良等影响驾驶员本身控制的 因素为最重要的危险源, 其次是道路条件、车辆超速、汽车的制动情况以及路面摩擦系数等事件,

会影响驾驶员的操作能力和机动车的制动性能。

$$I_{\varphi(i)} = 1 - \prod_{x_i \in k_j} \left(1 - \frac{1}{2^{n_j-1}}\right) \quad (1)$$

1.3 弯坡路段事故树分析

高速公路弯坡路段由于路线设计中存在转弯半径不足和平纵组合不良等问题,常发生侧翻、碰撞、追尾和侧面刮擦等事故。由于超高设置不合理、车速过快、驾驶员经验不足和转弯半径太小等原因,车辆易在平曲线转弯时侧翻。车辆上

下坡时因前后车辆的速度差较大和视线不足等,易引发追尾事故。弯坡线路安全隐患较多,事故树模型构建更为复杂(见图2),弯坡路段各基本事件结构重要度见表3,其在道路设计上要求较高,应保证高速公路路段之间的协调性、均衡性和连续性,减少路段之间的运行速度差,同时保证转弯处的超高和视距指标达到规范要求。驾驶员减少超车行为、确保机动车的制动性能,在通过高速公路的弯坡路段时更加安全。

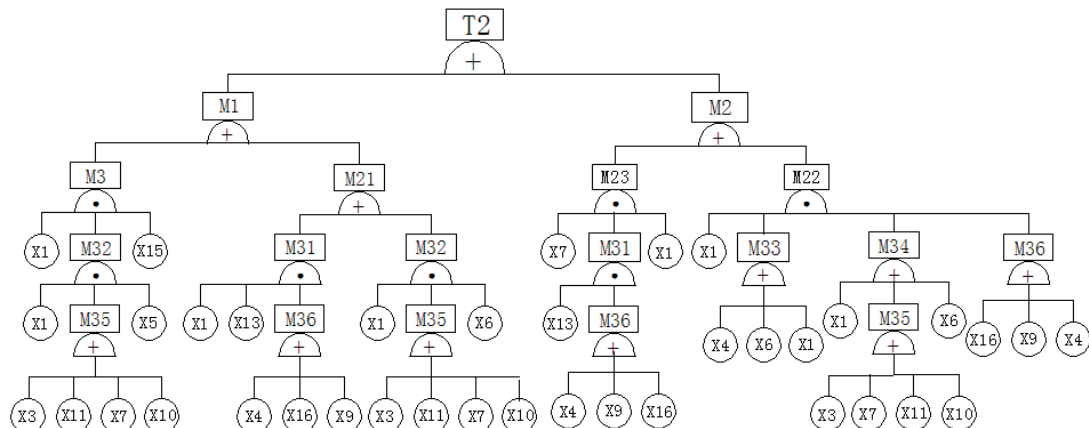


图2 高速公路弯坡路段事故树

表3 弯坡路段事故树各基本事件结构重要度系数

基本事件	X1	X3	X4	X5	X6	X7	X9	X10	X11	X16
重要度	0.97	0.34	0.50	0.41	0.68	0.34	0.50	0.34	0.68	0.50

1.4 隧道路段事故树分析

山区高速公路穿行隧道较多,常发生车辆碰撞或追尾事故,其次因视线不良和照明不足等原因常引起侧面刮擦事故。驾驶员在光线不足的隧

道内超速行驶,若发生突发事件需要紧急避让时易导致交通事故;隧道出入口视线影响也是导致驾驶员产生错误判断的主要原因。根据实际事故的可能性构建隧道路段的事故树模型(见图3),隧道路段各基本事件结构重要度见表4。其发生交通事故的主要原因为驾驶员经验不足、交通量大和出入口亮度不足,其次为线性协调性较差和车辆超速。因此隧道前方应具备完善的交通设施,保证隧道出入口亮度和有效限制行车速度。

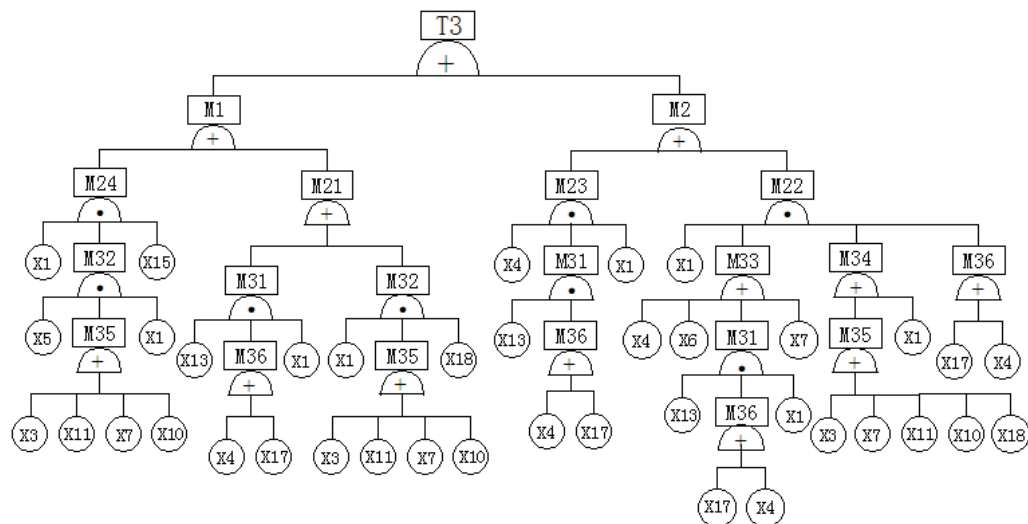


图3 高速公路隧道路段事故树

表4 隧道路段事故树的基本事件结构重要度												
基本事件	X1	X3	X4	X6	X7	X8	X10	X11	X13	X17		
重要度	0.98	0.44	0.82	0.13	0.51	0.34	0.44	0.44	0.44	0.79		

1.5 桥梁路段事故树分析

车辆在高速公路桥梁路段上发生事故后，易冲出桥梁造成较大人员伤亡的坠车事故。高速公路的匝道转弯半径较小或主桥存在一定的转角时

易引发车辆侧翻事故^[7]。桥梁路段的视野非常开阔，驾驶员容易放松警惕加快速度。桥梁路段的事故树模型构建最为复杂（见图4），桥梁路段事故树各基本事件结构重要度见表5，其出现交通危险的影响因素最多。首先要确保桥梁防护栏质量达到安全标准，采取增加防眩板、防风板等措施，降低不良天气对机动车的影响；其次在桥梁设计时减少平纵曲线，在立交路段延长减速和加速车道，驾驶员在桥梁路段应尽量慢速行驶。

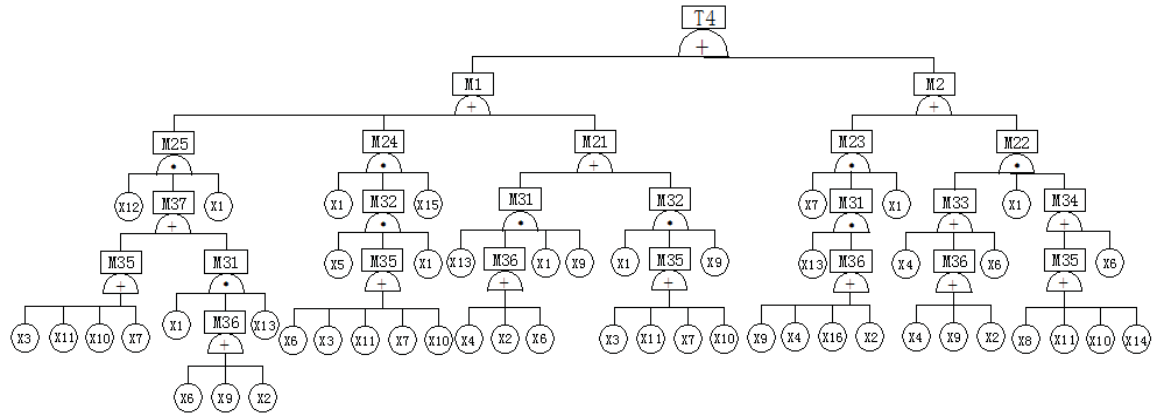


图4 高速公路桥梁路段事故树

表5 桥梁路段事故树的基本事件结构重要度														
基本事件	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X9	X10	X11	X12	X13	X13	X16
重要度	0.98	0.33	0.63	0.23	0.41	0.72	0.51	0.78	0.63	0.57	0.78	0.63	0.41	0.13

2 事故树的修正结构重要度

高速公路交通事故中基本事件的影响程度不仅与事故树模型有关，也与实际事故发生的概率相关联，如桥梁路段的坠车事故由许多因素组成，在事故树中占有较大的比重，但实际上坠车事故比例较低，故应对基本事件的结构重要度进行修正。本文采用已知的事故形态发生概率对基本事件的结构重要度进行修正，并以此作为影响因素的权重对基本事件权重进行归一处理。

2.1 建立修正结构重要度模型

通过事故统计资料中二级事件所占的比例，确定其影响的割集数量，再根据碰撞、侧翻等下层事故的影响概率乘积连接方式计算割集的影响概率^[8]，见式（2）、式（3）：

$$q_i^p = \prod_{j=1}^k \prod_{m=1}^l q_{jm} \tag{2}$$

$$I'_{\varphi(i)} = 1 - \prod_{x_i \in k} (1 - \frac{q_i^p}{2^{n_j-1}}) \tag{3}$$

2.2 路段交通安全评价指标体系

将以上基本事件转换为高速公路路段交通安

全评价的指标，采用五分制量化各指标，所确定的基本事件评价指标的量化方法，如表6所示。各指标权重采用线性方式归一化权重，见式（4）：

$$Q_i = I'_{\varphi(i)} / \sum_{i=1}^n I_{\varphi(i)} \tag{4}$$

式中： Q_i —基本事件*i*的权重；*n*—评价指标总数。

2.3 道路事故安全指数

本文提出“道路事故安全指数 ARSI (accident of road safety index)”，即用线性加权计算道路事故安全指数（式5），其评估值越高，路段越安全，能够展现微观路段的安全状态。

$$ARSI = \sum_{i=1}^n Q_i Z_i \tag{5}$$

ARSI 指标的评判标准建议如下：

- （1）当 ARSI > 4，高速公路较为安全。
- （2）当 3 < ARSI < 4，高速公路安全性一般，可针对指标较低的指标进行适当调整。
- （3）当 ARSI < 3，高速安全性较差，需要进行全面的安全性评价和改善。

表 6 评价指标量化表

指标	判断指标	5 分制				
		1	2	3	4	5
X1	驾龄小于 3 年的驾驶员比例/%	>40	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20	0 ~ 10
X2	夜间行车比率/%	>50	50 ~ 40	30 ~ 40	20 ~ 30	<20
X3	车辆超速率	>40	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20	0 ~ 10
X4	服务水平 (v/c)	>0.8	0.8 ~ 0.6	0.4 ~ 0.6	0.4 ~ 0.3	<0.3
X5	超载车辆比/%	>70	70 ~ 50	50 ~ 30	30 ~ 10	<20
X6	相邻路段运行速度差/(km/h)	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
X7	设计与运行速度差/(km/h)	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
X8	大小车速差/(km/h)	>40	30 ~ 40	20 ~ 30	10 ~ 20	<10
X9	年不良天气数/d	>70	50 ~ 70	30 ~ 50	10 ~ 30	<10
X10	交通工程设施完好率/%	<60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	>90
X11	合理制动车辆比例/%	<35	35 ~ 50	50 ~ 65	65 ~ 80	>80
X12	护栏防撞性能	<70	70 ~ 160	160 ~ 280	280 ~ 400	400 ~ 520
X13	路面损坏指数 PCI	<75	75 ~ 110	110 ~ 160	160 ~ 210	>210
X14	路面摩擦系数	<0.41	0.41 ~ 0.50	0.51 ~ 0.55	0.56 ~ 0.64	>0.65
X15	超高满足率/%	<60	60 ~ 70	70 ~ 80	80 ~ 90	>90
X16	视距大小/m	<110	110 ~ 180	180 ~ 210	210 ~ 240	>240
X17	隧道出入口亮度/(cd/m ²)	入口	<40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 90
		出口	<2	2 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 15

3 实例评价

本文选取广东省内梅揭高速某路段进行实例评价,由于该段高速所处山区,设计标准偏低,交通量较大,且多为混合交通量。从 2020 年至 2022 年的交通事故共 987 宗,且呈逐年上升趋势。

3.1 交通特征

本高速公路设计速度为 100 km/h,日交通量为 9 645 pcu/d,方向分布系数为 0.52,服务水平为 0.75;交通量较大,多为混合交通量,货车比例高达 62%,驾驶员为经常往返的经验丰富的老司机;根据该高速的《路面损坏状况指数 PCI 调查报告》显示 PCI≤70 的有 4.24km,占 66.1%。存在交通量大、大型货车较多、路线连续上下坡等安全隐患。

对 K61+200、K70+100、K92+100 等研究路段进行实际速度的测量,弯坡路段的小型车超速率达到 65.1%,隧道内超速率达到 95% 以上,平均运行速度 70 km/h,大小车速度差值 15 ~ 60 km/h。采用 IHSDM 运行速度模型计算全线运行速度,55% 路段的相邻路段的速度差小于 10 km/h,95% 路段的相邻路段的速度差小于 20 km/h,平纵组合设计较为良好,但货车在上坡路段和下坡路段的速度差超过 40km/h。

3.2 直线路段安全性评价

评价高速左线 K60+587 ~ K61+875 路段为 1.2 km 的长直线路段,平均纵坡小于 1.5%。根据当地交警大队的事故资料,此路段共发生事故 8 起,单车事故占 37.5%,多车事故占 62.5%。此路段平均超速率高达 78%,路段超载现象严重,相邻路段平均速度差 7 km/h,设计速度和运行速度差达 11 km/h,大小车速度差在 20 ~ 30 km/h。结合 3.1 中交通特征确定各基本事件量化取值分数(见表 7)。

表 7 直线路段安全评价结果

评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重	评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重
X1	4	0.71	0.15	X9	1	0.27	0.04
X2	1	0.31	0.15	X10	4	0.41	0.11
X3	2	0.36	0.12	X11	3	0.25	0.04
X4	3	0.27	0.11	X13	4	0.57	0.10
X6	4	0.56	0.08	X14	4	0.41	0.09

此直线路段道路事故安全指数 ARSI 为 4.18,安全等级较高。通过各指标权重可知,通过改善交通工程设施和完善夜间反光标志等,将提高该路段的行车安全性。

3.3 弯坡路段安全性评价

评价高速右线 K100+687 ~ K98+396 路段有三处平曲线半径不足 900 m,平均纵坡 3.71%,

为连续下坡的弯坡路段。根据当地交警大队的事故资料，此路段共发生事故 75 起，单车事故占 59%，多车事故占 41%，碰撞事故 25%，侧翻事故 75%，追尾事故 79%，刮擦事故为 21%。路段超载现象严重，相邻路段平均速度差 9 km/h，设计速度和运行速度差达 24 km/h，大小车速度差在 40 ~ 60 km/h。结合 3.1 中交通特征确定各基本事件量化取值分数（见表 8）。

表 8 弯坡路段安全评价结果

评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重	评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重
X1	4	0.82	0.16	X9	2	0.44	0.08
X3	1	0.28	0.05	X10	3	0.27	0.05
X4	3	0.48	0.09	X11	4	0.52	0.10
X5	2	0.37	0.07	X15	4	0.37	0.07
X6	4	0.55	0.10	X16	2	0.43	0.08
X7	1	0.26	0.05				

此弯坡路段道路事故安全指数 ARSI 为 2.62，安全等级较低，与实际情况相符。通过各指标权重可知，通过改善服务水平和改善路面条件等，将有效提高该路段的行车安全性。

3.4 隧道路段安全性评价

评价高速的竹子寮—拾荷隧道路段（K87 + 100 ~ K89 + 000）包括竹子寮及拾荷两座隧道，以及隧道之间 250 m 的中间段，竹子寮隧道右线洞口前方 165 m 处为半径 800 m 的平曲线段。根据事故统计结果，本路段单车事故占 60%，多车事故占 40%，碰撞事故 68%，侧翻事故 32%，追尾事故 75%，刮擦事故为 15%。隧道之间距离为 240 m，隧道内超速情况为 95%，相邻路段速度差在 15 ~ 17 km/h，设计速度与运行速度差大于 20 km/h，大小车速度差减小至 10 km/h 内。

表 9 隧道安全评价结果

评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重	评价 指标	量化 分数	重要度	指标 权重
X1	4	0.98	0.16	X8	3	0.34	0.05
X3	1	0.44	0.10	X10	2	0.44	0.07
X4	2	0.82	0.16	X11	3	0.44	0.08
X6	3	0.13	0.05	X13	2	0.44	0.08
X7	1	0.51	0.11	X17	2	0.79	0.14

结合 3.1 中交通特征确定各基本事件量化取值分数（见表 9）。

此路段评价结果道路事故安全指数 ARSI 为 2.29，安全等级较低。通过各指标权重可知，通过改善服务水平、限制车速和提高隧道出入后亮度等，将有效提高隧道的行车安全性。

4 研究结论

（1）本文从交通事故发生原因的角度评价高速公路的安全性，对高速公路上四类典型路段（直线、弯坡、隧道、桥梁）交通事故构建事故树模型，得到交通安全影响因素（基本事件）的结构重要度，针对不同类型路段提出针对性的改善建议，可作为高速公路路段的微观评价指标。

（2）本文提出道路事故安全指数 ARSI，以客观存在的基本事件作为评估指标，排除个人因素影响，将高速公路具体事故概率修正事故树模型的结构重要度模型，使指标的权重接近实际交通情况，提高评价结果的客观性和准确性。

参考文献：

[1] KRISTENSEN K, BONNEVIE C, HARBITZ A. Road Traffic and Avalanches-Methods for Risk Evaluation and Risk Management [J]. Surveys in Geophysics, 2003: 603-616.

[2] 马文敏. 基于动态事故树的高速公路尾随相撞事故成因模型研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 322-326.

[3] 丘安邦. 道路交通安全的影响因素与综合评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2008.

[4] 李薛. 道路交通安全评价方法及其初步应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[5] 马文敏. 基于动态事故树的高速公路尾随相撞事故成因模型研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 322-326.

[6] 王梅. 基于事故树与 Bow-tie 模型的页岩气井控安全风险评估及管控对策[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(03): 34-38.

[7] 王文正, 陈亮, 贺辉宗, 等. LNG 储罐泄漏的三角模糊事故树定量分析研究[J]. 安全、健康和环境, 2021, 21(10): 38-44.

[8] 李政. 道路交通安全评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.