

# 高速公路交通安全风险评价与敏感性分析

吴 焱<sup>1</sup>, 钱振邦<sup>2</sup>, 王建军<sup>2</sup>, 邓亚娟<sup>2</sup>, 卢 杨<sup>2</sup>

(1. 长安大学 建筑学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为预防并减少交通事故发生,将“事后惩治”转变为“事前预防”,构建了包括转向性能、交通条件等 16 个影响因素的高速公路交通安全风险评价指标体系,提出了 AHP-TOPSIS-RSR 法的高速公路交通安全风险评价方法,该方法基于系统分析及嫁接的思想,利用 AHP 法建立评价矩阵,通过引入熵权的 TOPSIS 法计算出交通安全风险综合评价指标值与理想值相对接近度值,结合 RSR 法,根据风险等级的分档标准,对相对接近度值进行分档。基于正交试验法提出高速公路交通安全敏感性分析模型,并计算各因素敏感度值,根据其排序确定主要敏感风险指标,并以福建永武(永安—武平)高速公路为例对该方法进行验证。研究结果表明:永武高速公路交通安全风险等级为 I 级-巨警,风险等级高;疲劳/无证驾驶、车辆超速、线形条件、交通条件、不良天气、救援机制的风险指标敏感度分别达到:0.472 1、0.508 8、0.759 8、0.814 2、0.529 6、0.468 5,属于安全敏感风险指标,基本反映了永武高速公路的交通安全实际状况。

**关键词:**交通工程;交通安全;ATR 法;正交试验法;风险评价;敏感性分析;高速公路

**中图分类号:**U411

**文献标志码:**A

## Traffic safety risk assessment and sensitivity analysis on expressway

WU Yan<sup>1</sup>, QIAN Zhen-bang<sup>2</sup>, WANG Jian-jun<sup>2</sup>, DENG Ya-juan<sup>2</sup>, LU Yang<sup>2</sup>

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to prevent and reduce traffic accidents, “afterwards punishment” should be transformed into “beforehand preventing”. This paper constructed expressway traffic safety risk evaluation index system including 16 influence factors such as steering performance, traffic conditioned etc. Based on the thoughts of system analysis and grafting, the model of expressway traffic safety risk assessment based on the method of AHP-TOPSIS-RSR was put forward and AHP method was used to establish evaluation matrix. TOPSIS method with entropy was introduced to calculate the relative approach degree values between traffic safety risk comprehensive evaluation index values and the ideal values, and combined with RSR method, the relative approach degree values were classified according to the highway traffic safety risk grade of hierarchy standard. Based on the method of orthogonal test, the model of safety sensitivity analysis was put forward. The sensitivity value of each factor was calculated and the main sensitive factors were determined by their order. The paper verified the proposed method on Yongwu Expressway. The results show that the security risk on Yongwu Expressway is level I, namely huge warning, which is high. The risk sensitivity value of the indicator of fatigue/driving without a license, vehicle speed, condition of road alignment, traffic conditions,

adverse weather, rescue mechanism is 0.472 1, 0.508 8, 0.759 8, 0.814 2, 0.529 6, 0.468 5 respectively. They are the safety sensitive indicators. Risk assessment results can reflect the traffic safety situation of Yongwu Expressway. 7 tabs, 1 fig, 21 refs.

**Key words:** traffic engineering; traffic safety; ATR method; orthogonal test; risk assessment; sensitivity analysis; expressway

## 0 引言

中国严峻的高速公路交通安全形势,迫切要求对交通事故进行预防管理,将“事后惩治”转变为“事前预防”,变“突发性管理”为“常态性管理”。对路段进行风险评价及敏感性分析排序,为提出具体、有针对性的交通安全风险管理策略及安全保障措施提供科学依据。

国外关于道路交通风险因素分析(事故致因理论)的研究较多,按照安全系统工程的发展历程,大体可以分为单因素(人的差错)致因理论、多因素(道路交通三要素)致因理论和综合因素(系统综合)致因理论。文献[1]在分析危险物品的道路运输、回顾原来的事故统计并参考国家立法的基础上,提出了促进道路风险管理的3个手段<sup>[1]</sup>;Saaty提出了AHP(层次分析法),它将复杂问题分解成若干有序的层次,基于一定客观事实,定量表示每一层的相对重要度,得到能表达每一层全部元素的相对重要性排序的数值,并根据对各层次的分析推导出对整个问题的分析<sup>[2]</sup>;Hwang等根据评价对象与理想化目标的接近程度,对现有的对象进行相对优劣的评价提出了TOPSIS(逼近理想点排序法),是多目标决策中一种常用的行之有效的方法<sup>[3]</sup>;Mckowen根据惩罚函数的概念提出了基于惩罚函数法的敏感度分析法,借助所谓的惩罚函数将约束问题转化为无约束问题<sup>[4]</sup>;Olden等提出了基于随机化检验的敏感性分析方法<sup>[5]</sup>;Borgonovo等在对投资项目风险估计的研究中应用敏感性分析方法对净现值(NPV)、内部收益率(IRR)等多个经济指标进行处理<sup>[6]</sup>。中国对道路交通安全风险的分析,大多基于传统的事故致因理论,仅仅考虑人、车、路、环境中的某1个单因素,并且较为重视人的因素;或者虽然从人-车-路-环境多方面对交通事故的致因进行分析,但未考虑各因素之间的相互影响,割裂了各因素之间的逻辑关系。田凤调提出了RSR(秩和比法),它是一种集古典参数估计与近代非参数统计各自优点于一体的统计分析方法<sup>[7]</sup>;邱清盈等提出了一种不依赖于特定算法,适用于离散、不可微或者隐式优化

问题的敏感度分析方法——基于正交试验的敏感度分析法,并在坦克陆上机动性能评估指标体系的建立、工农业生产等领域被广泛应用<sup>[8-9]</sup>。

基于此,本文针对上述研究现状及不足,提出了基于AHP-TOPSIS-RSR方法对高速公路交通安全风险评价,根据回归分析的结果对路段总体安全进行归档评级,进而分析各风险因素对交通安全风险的影响度,利用正交试验的敏感度分析法对评价指标体系进行敏感性分析,找出对评价结果影响大的指标,给出其敏感指标的排序。

## 1 风险评价指标体系

高速公路交通安全风险评价指标的选择和确立,应当考虑所评价高速公路交通安全系统的特点以及高速公路所在区域的经济、社会、地形条件以及交通安全水平等因素,并结合国内外类似评价指标的应用,经过归纳、分析、对比研究、综合分析和考虑,建立高速公路交通安全风险评价指标体系<sup>[10]</sup>。本文主要以人、车、路、研究、管理5个方面来分析。

(1)交通参与者。在高速公路交通这一具有特定功能的闭环系统中,作为交通参与者的人是影响交通安全最主要的因素,起着主导作用。由于高速公路实行全封闭交通管制,所以交通事故中人的原因主要体现在车内参与者的责任,部分是由于车外交通参与者的违规行为<sup>[11]</sup>。

(2)车辆。车辆是高速公路交通系统的重要组成部分。通过对中国高速公路交通事故的调查,发现引发高速公路交通事故的车辆故障主要有:超载、超速、爆胎、制动不良(失效)、转向失效等。

(3)道路。道路因素在交通事故的发生过程中起着不可忽视的作用,道路几何线形要素的构成是否合理、线形组合是否协调对事故的发生有较大的影响<sup>[12]</sup>。特殊点段的设计、路面的平整度和抗滑性也是影响高速公路安全行驶的原因。

(4)环境。影响交通安全的环境因素大体分为地理环境、交通环境和天气环境。地理环境是指路段的道路地质条件、路侧危险障碍物,地理环境的好坏会对行车安全产生一定的影响。在其他条件相同

时,行车事故的数量取决于交通环境,交通环境包括交通条件和交通安全设施。因为交通条件决定行车速度、交通流的行驶规律以及驾驶人的精神紧张程度。交通安全设施的合理设置与否对事故的发生会产生显著的影响。天气环境因素包括风、雨、雾、冰雪等恶劣气候对行车安全的影响。恶劣气候会影响驾驶人的视线,容易产生错误判断而发生交通事故。在雨天、冰雪天,路面抗滑能力减低,因附着力小,容易使轮胎打滑而发生交通事故。

(5)管理。高速公路安全管理措施是系统运行的保障,管理水平的高低将直接影响事故的发生和发生事故后的损失程度,特别是快速救援体系的完善与否对减少死亡数关系重大。因而,设立了管理体制、管理人员素质和事故救援体系作为管理水平高低的评价。

本文构建的高速公路交通安全风险评价指标体系由 5 个子系统有机构成,从人、车、路、环境、管理这 5 个方面描述高速公路交通运行的安全状态。其中二级指标 10 个,对应子指标 16 个,见表 1。

表 1 评价指标体系  
Tab. 1 Evaluation index system

子系统	二级指标	影响因素
人的因素	车内参与者	1. 疲劳/无证驾驶
	车外参与者	2. 养护人员的风险行为
车辆因素	车辆性能	3. 转向性能
		4. 制动性能
	车辆超限	5. 车辆超载
		6. 车辆超速
道路因素	道路线形	7. 线性条件
	路基路面	8. 路基边坡
		9. 路面的平整度及抗滑性
环境因素	交通环境	10. 交通条件
		11. 交通安全设施
	气象环境	12. 不良天气
管理因素	安全管理	13. 交通安全管理制度
		14. 管理人员能力
	救援管理	15. 救援机制
		16. 救援能力

## 2 基于 ATR 法的高速公路交通安全风险评价

### 2.1 ATR 风险评价法(AHP-TOPSIS-RSR)

国内外在道路交通安全风险评价方面常用的方法有事故率法、事故强度法、灰色评价法、模糊综合评价法、层次分析法、BP 神经网络法等,各种方法均

有其优缺点及适用条件,详见文献[13-16]。

本文结合交通安全风险因素的综合性、复杂性、不确定性等特点以及相关评价方法的适用条件,提出了一种全新的交通安全风险综合评价方法:AHP-TOPSIS-RSR,即层次分析法、逼近理想点排序法、秩和比法相结合。

层次分析法(AHP)是 Saaty 提出的一种定性与定量相结合的分析 and 评价方法,它能够反复统一处理决策中的定量与定性问题,直到接近客观要求,在处理复杂系统的评价中有独特的优点。

逼近理想点排序法(TOPSIS)是由 Hwang 和 Yoon 首先提出来的一种逼近理想解的排序方法。其基本的处理思路是:首先建立初始化决策矩阵,而后基于量纲一后的初始矩阵,找出有限方案中的最优方案和最劣方案(也就是正、负理想解),然后分别计算各个评价对象与最优方案和最劣方案的距离,获得各评价方案与最优方案的相对接近程度,最后进行排序,并以此作为评价方案优劣的依据。

秩和比法(RSR)是由中国学者田凤调于 1988 年提出的。基本思想是:首先将各指标编秩获得量纲一统计量 RSR 值,在此基础上运用参数统计分析的概念和方法,确定 RSR 分布,最后对 RSR 分析结果进行科学阐释。

AHP-TOPSIS-RSR 法,首先利用 AHP 法建立评价矩阵并量纲一化,并通过引入熵权的 TOPSIS 法计算出交通安全风险综合评价指标值与理想值相对接近度值  $C_i$ ,再结合 RSR 法,根据高速公路交通安全风险等级的分档标准,对  $C_i$  值进行分档,即可得出评价高速公路交通安全风险等级的隶属档次。AHP-TOPSIS-RSR 相结合,既能克服传统的 TOPSIS 法在确定评价指标的权重因子时一般采用专家评估法或层次分析法造成的主观因素的影响,保留 TOPSIS 法敏感反映各指标之间差异的优点,又能利用 RSR 法来解决 TOPSIS 法不能对评价对象进行合理的优劣分档问题,3 种方法相结合,优势互补<sup>[17]</sup>。

### 2.2 风险评价模型

#### (1)评价矩阵

根据 AHP 评价指标体系(基本指标数  $n$ ),依据风险指标评分表,采用专家打分法,取平均值,建立初始风险评价矩阵。“警限值”的设定是安全风险评价的重要环节,当指标值偏离正常水平超过警限值的大小,就表明出现危险。目前比较成熟的是用系统化方法进行分析,所谓系统化主要是指根据各种合并的客观原则进行研究,主要有多数原则、半数原

则、少数原则、均数原则、众数原则、负数原则和参数原则等,根据每一种原则确定 1 个警限值,之后根据各种原则确定的警限值加以综合平均,最后加以适当调整求得各指标的警限值<sup>[18]</sup>。

表 2 风险指标评分  
Tab. 2 Risk indicators' scores

导致交通事故可能性	几乎不可能	有一定可能	有较大可能	有很大可能	有极大可能
风险分数	0~1.0	2.0~3.0	4.0~6.0	7.0~8.0	9.0~10.0

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix}x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{31} & \cdots & x_{3n}\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: $\mathbf{X}$  为评价矩阵; $x_{ij}$  为风险评价矩阵中第  $j$  个风险指标的第  $i$  个值, $i=1,2,3$ 。1 代表专家打分法最小值、2 代表专家打分法最大值、3 代表专家打分法平均值; $j=1,2,\cdots,n$ 。

(2) 评价矩阵量纲一化

为消除量纲,并在数量上统一,对初始风险评价矩阵进行量纲一化处理<sup>[3]</sup>。

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}} \tag{2}$$

式中: $y_{ij}$  为量纲一化决策矩阵中第  $j$  个风险指标的第  $i$  个值; $i=1,2,3$ ;  $j=1,2,\cdots,n$ 。

(3) 熵权法确定指标权重

采用熵的概念来确定评价指标的权重,可以避免主观因素的影响。熵权法是根据各指标的观测值所提供信息量的大小来确定权重的方法。数据分布越分散,其不准确性也越大。当系统可能处于  $m$  种不同状态,第  $j$  个风险指标的熵值  $H_j$  为

$$H_j=\frac{1}{\ln(n)}\sum_{i=1}^m p_{ij}\ln(p_{ij}) \tag{3}$$

$$p_{ij}=\frac{(1+y_{ij})}{\sum_{k=1}^m (1+y_{kj})} \tag{4}$$

式中: $p_{ij}$  为第  $j$  个风险指标的第  $i$  个值对应的影响系统熵值变化的概率; $i=1,2,\cdots,m$ ;  $j=1,2,\cdots,n$ 。

第  $j$  个指标的评价值数据的分散程度  $g_j$  可表示为  $g_j=1-H_j$ 。给定的指标值  $x_{ij}$  的差异越大,相应的  $g_j$  值也表明该指标所包含和传输的信息量越大,重要程度也越高;相反,表明该指标的重要性低;如果各方案的  $x_{ij}$  都相等,则指标评价绝对集中,该指标对综合评价不起任何作用。因此,可以用熵测度来表示的第  $j$  个指标的权重,确定出各指标的权重后,以它们为主对角线上的元素构造主对角矩阵——指标权重矩阵<sup>[19]</sup>。

为了区分各区间界限。给“有极大可能”赋值为 10,“几乎不可能”赋值为 0,中间再分为“有一定可能”、“有较大可能”、“有很大可能”3 个等级,具体赋值如表 2 所示。

$$\mathbf{W}=\begin{bmatrix}w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & w_n\end{bmatrix} \tag{5}$$

$$w_j=\frac{(1-H_j)}{n-\sum_{j=1}^n H_j} \tag{6}$$

式中: $\mathbf{W}$  为指标权重矩阵; $w_j$  为各评价指标的熵权, $j=1,2,\cdots,n$ 。

(4) 构造规范化加权矩阵

根据指标权重矩阵可以得到加权数据矩阵  $\mathbf{Z}$ ,其元素  $z_{ij}$  为

$$z_{ij}=y_{ij}w_j \tag{7}$$

(5) 确定“理想解”与“负理想解”

确定参考样本,参评样本中的最大值构成最优样本,最优样本点(理想解) $z^+$  为

$$z^+=(z_1^+,z_2^+,\cdots,z_n^+) \tag{8}$$

参评样本中的最小值构成最劣样本,最劣样本点(负理想解) $z^-$  为

$$z^-=(z_1^-,z_2^-, \cdots, z_n^-) \tag{9}$$

其中

$$z_j^+=\max_{1\leq i\leq m}\{y_{ij}\}, z_j^-=\min_{1\leq i\leq m}\{y_{ij}\} \tag{10}$$

(6) 计算指标值与“理想解”和“负理想解”的距离  $D_i^+$ 、 $D_i^-$  及与“理想解”的相对接近度  $C_i$ <sup>[20]</sup>

样本点到最优样本点和最劣样本点的距离  $D_i^+$ 、 $D_i^-$  分别为

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij}-z_j^+)^2}, D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij}-z_j^-)^2} \tag{11}$$

相对接近度  $C_i$  为

$$C_i=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-} \tag{12}$$

相对接近度  $C_i$  值越大,越接近理想解,交通安全风险水平越低。

(7) 计算秩合比值  $R_i$ ,确定 RSR 分布

秩和比指的是表中行(或列)秩次的平均值,是一个非参数计量的综合指数,具有 0~1 区间连续变量的特征,是非参数统计与参数统计相互融通的接

口、切入点,有着极强的统计信息功能。利用秩和比法进行统计分析,其基本思想是:在矩阵中通过秩转换,获得量纲一化 $R_i$ 的统计量,以 $R_i$ 值对评价对象的优劣进行排序。

TOPSIS 法用于排序的相对接近程度取值在 0 和 1 之间,分布同秩和比法中的 $R_i$ ,可进一步进行 RSR 法分析。根据 $C_i$ 值处于 0~1 之间的特点,用 $C_i$ 值替代秩和比 $R_i$ ,并以此分档。根据 $R_i$ 值大小进行分组,列出不同组段的频数 $f$ 、累计频数 $f'$ 得到平均秩次 $\bar{R}$ 和 $\bar{R}/n$ 值,再求出对应概率单位值 $y$ 。

(8)确定 RSR 回归方程

以 $y$ 作自变量,以 $R_i$ 为因变量估计回归方程

$$\hat{R}=\alpha+\beta y \tag{13}$$

式中: $\hat{R}$ 为秩和比的统计回归值; $y$ 为概率单位; $\alpha$ 、 $\beta$ 为回归方程相关参数。

2.3 风险评价标准

利用 RSR 的合理分档法对风险评价标准进行分档。合理分档法以正态分布为依据,分档根据为标准正态差 $\mu$ ,基于统计量 RSR 进行多指标综合评价并提出合理分档数;标准正态曲线下的累计面积是各个分档的百分位数。本文在此不做过多探讨,详见文献[21]。

按 RSR 的合理分档方法,对评价高速公路交通安全风险水平进行归档,即可得出所评价高速公路交通安全风险等级,根据标准正态差 $\mu$ 分档,档数位为 5。各档对应的百分位数及概率单位见表 3。

表 3 风险预警警度  
Tab. 3 Degree of risk warning alarm

预警等级	描述	百分位数 $p$	概率单位 $y$
I 级	巨警	3.593 以下	3.2 以下
II 级	重警	3.593~27.425	3.2~4.4
III 级	中警	27.425~72.575	4.4~5.6
IV 级	轻警	72.575~96.407	5.6~6.8
V 级	无警	96.407 以上	6.8 以上

3 基于正交试验法的敏感性分析

在确定交通安全风险等级的基础上,分析计算众多不确定的风险因素对交通安全的敏感度,判断其对交通安全风险的影响能力,给出风险因素的主次关系,进而找出对交通安全有重要影响的主要风险因素。

通过敏感性分析,计算各指标对交通安全的影响度即敏感性系数,找出敏感性指标,抓住影响交通安全的主要矛盾,避免出现主观错误判断;通过对敏

感性系数进行排序,将影响交通安全的指标分为敏感风险指标和一般风险指标,给出风险指标的主次关系,为针对敏感风险指标提出具体、有针对性的交通安全改善对策提供依据。

3.1 正交试验法

敏感性分析的方法有基于广义简约梯度法的敏感度分析法、基于罚函数法的敏感度分析法、基于几何规划法的敏感度分析法、不需二阶信息的敏感度分析法等。

以上提及的敏感度分析法往往依赖于寻优算法,不同的寻优算法其分析方法有所不同。此外还要求优化问题连续可导,而对于实际问题,这点往往不能满足。因此,在应用推广上受到了一定的限制。

正交试验法是指用正交表来安排试验方案的一种试验设计方法,是一种不依赖于特定算法,通用于离散、不可微或者隐式的优化问题的灵敏度分析方法,其具有正交性、典型性以及综合可比性等优点。

正交表是根据均衡分布思想,运用组合数学理论构造的一种数学表格。在正交试验设计中,一般利用极差分析法来确定因素的优水平以及对试验指标的主次关系。极差反映了因素对试验指标的影响程度,其蕴含了函数对变量的敏感程度。

3.2 敏感性分析模型

(1)确定目标函数

高速公路交通安全风险效能的数学模型可简单描述为

$$E=f(l_1,l_2,\cdots,l_n) \tag{14}$$

式中: $E$ 为风险效能值,即为风险评价中指标值与“理想解”的相对接近度 $C_i$ 值; $f()$ 为效能函数; $l_1,l_2,\cdots,l_n$ 为风险指标; $n$ 为指标的个数。

(2)选取适合的二水平正交表

对于二水平正交表 $L_a(2^c)$ 构造规律为

$$\begin{cases} a=4t \\ c=a-1 \end{cases} \tag{15}$$

式中: $a$ 为正交表的行数,即实施的试验次数; $c$ 为正交表的列数,一列可以安排 1 个因素, $t\geqslant(n+1)/4$ , $n$ 为指标的个数。

(3)确定变异设计方案

考虑到各因素已量纲一化,量纲一致,取相同的变化量 $h$ ,据此可确定出各因素的水平,见表 4。

表 4 因素水平  
Tab. 4 Levels of factors

水平	$l_1$	$l_2$	$\cdots$	$l_n$
1	$l_1(1-h)$	$l_2(1-h)$	$\cdots$	$l_n(1-h)$
2	$l_1(1+h)$	$l_2(1+h)$	$\cdots$	$l_n(1+h)$

由正交表  $L_a(2^c)$  的前  $n$  列变异设计方案。

(4)调用风险效能模型,分别计算目标函数值

风险效能模型调用风险评价中的 TOPSIS 模型来实现风险指标与风险效能值之间的映射,风险效能值即为风险评价中的风险综合值与“理想解”的相对接近度  $C$  值。

$$E(s)=C(l_1,l_2,\cdots,l_n),s=1,2,\cdots,a\tag{16}$$

(5)计算目标函数及约束函数的平均值

各因素各水平对应的风险效能值的平均值反映了风险等级在该因素该水平下的程度状态。

$$\overline{m}_{jk}=\frac{\sum E(l=l_{jk})}{\text{count}(l=l_{jk})}\tag{17}$$

式中; $\overline{m}_{jk}$ 为第  $j$  个风险指标  $k$  水平对应的风险效能值的平均值; $l_{jk}$ 为第  $j$  个风险指标  $k$  水平指标值, $j=1,2,\cdots,n;k=1,2$ ;count 函数用以计算列表中符合条件选项的个数。

(6)计算目标函数值的极差

由于所有变量已经量纲一化,所以可以直接采用各变量所对应的目标函数的极差即可,否则为消除量纲的影响,需要采用各变量所对应的目标函数的相对极差。

第  $j$  个风险指标风险效能的平均值的极差  $R_j$  计算式为

$$R_j=\max[\overline{m}_{j1},\overline{m}_{j2}]-\min[\overline{m}_{j1},\overline{m}_{j2}]\tag{18}$$

$R_j$  越大,说明第  $j$  个风险指标对交通安全的影响越大,根据极差  $R_j$  的大小,即可判断因素的主次关系。

(7)计算各设计变量的敏感度

风险指标的水平差反映了各因素在不同水平下的差异程度。风险指标的敏感度  $S_j$  为

$$S_j=|R_j/(l_{j1}-l_{j2})|\tag{19}$$

(8)敏感风险因素预警

通过对敏感度值进行排序为

$$S_k=\max_{1\leq j\leq n}\{S_j\}\tag{20}$$

确定出敏感度值高的风险因素即为敏感风险因素。

4 算例验证

4.1 概况

本文选取福建省永武(永安—武平)高速公路 A4、A5 合同段进行实例分析。A4 合同段位于龙岩市连城县境内,路段所经区域处于玳瑁山脉北段,大多为丘陵、低山地貌,局部为中低山地貌,间夹高差不等的山间盆地和河谷较大盆地为姑田盆地,地形

起伏较大,相对高差 80~560 m。

A5 合同段位于龙岩市连城县境内,沿线穿越的地貌单元较为复杂,主要为低山-丘陵地貌,间夹高差及范围不等的山间盆地及狭长河谷,地形起伏较大,沿线山体较陡峻,斜坡坡度一般  $23^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,局部可达到  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。

4.2 结果分析

4.2.1 评价实现

(1)风险评价

根据 ATR 风险评价模型的建立方法,以永武高速公路 A4、A5 合同段为例,建立其风险评价模型。根据风险评价模型计算步骤(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6)可知,风险综合评价值与“理想解”的相对接近度  $C_2$  为 0.374 8。由计算步骤(7)确定 RSR 分布,根据  $R_i$  值大小进行分组,列出不同组段的频数  $f$ 、累计频数  $f'$  得出平均秩次  $\bar{R}$  及  $\bar{R}/n$  值,再求出所对应的概率单位值  $y$ ,具体数值见表 5。

表 5 RSR 分布及对应的概率单位值

Tab.5 RSR probability distribution and corresponding unit value

$R_i$	$f$	$f'$	$\frac{\bar{R}}{n}\times 100\%$	概率单位 $y$
1	1	1	33	6.8 以上
0.374 8	1	2	66	2.498 8
0	1	3	92	3.2 以下

根据计算步骤(7)、(8),以  $y$  作自变量,以  $R_i$  为因变量可得回归方程

$$\hat{R}=-0.187\ 5+0.168\ 8\times 2.498\ 8=0.234\ 3\tag{21}$$

按 RSR 的合理分档方法,对评价路段高速公路交通安全风险水平进行预警,即可得出所评价路段高速公路交通安全风险等级为:Ⅰ级-巨警,风险等级高。

(2)风险敏感性分析

基于正交试验法的敏感性分析方法,以永武高速 A4、A5 合同段为例,建立其风险评价模型,构建二水平正交表  $L_{20}(2^{19})$ 。根据敏感性分析模型计算步骤(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6),变化量  $h$  取 30% 可得目标函数值的极差,见下页表 6(表中指标的编号为表 1 中对应的影响因素)。

根据计算步骤(7)利用极差分析法分析结果,计算出各因素风险指标的敏感度,见下页表 7。

根据计算步骤(8)可得敏感度分布图,如下页图 1 所示,并确定其敏感风险因素。

表 6 目标函数值的极差  
Tab. 6 Extremum of objective function difference

指标	1	2	3	4	5	6	7	8
极差	0.035 7	0.041 1	0.037 2	0.041 1	0.037 2	0.059 6	0.059 6	0.038 3
指标	9	10	11	12	13	14	15	16
极差	0.041 1	0.001 9	0.023 6	0.028 7	0.041 1	0.041 1	0.059 6	0.058 5

表 7 风险指标的敏感度  
Tab. 7 Sensitivities of risk indicators

指标	1	2	3	4	5	6	7	8
敏感度	0.472 1	0.356 8	0.287 4	0.426 9	0.284 9	0.508 8	0.759 8	0.391 6
指标	9	10	11	12	13	14	15	16
敏感度	0.358 6	0.814 2	0.214 3	0.529 6	0.361 5	0.289 3	0.468 5	0.397 4

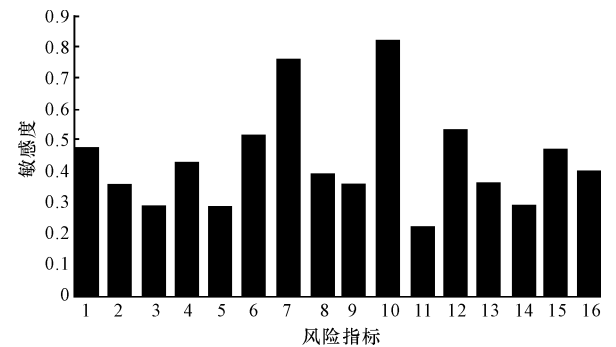


图 1 风险指标敏感度分布

Fig. 1 Sensitivities distribution of risk indicators

4.2.2 结果分析

(1)风险评价结果

通过评价,永武高速公路 A4、A5 合同段的交通安全风险等级为:Ⅰ级-巨警,该风险等级处于不可接受状态,迫切需要采取相关安全保障措施来控制、降低或消除风险。

(2)敏感性分析结果

由图 1 可以看出:1(疲劳/无证驾驶)、6(车辆超速)、7(线形条件)、10(交通条件)、12(不良天气)、15(救援机制)这 6 项风险指标敏感度比较高,分别达到:0.472 1、0.508 8、0.759 8、0.814 2、0.529 6、0.468 5,属于交通安全敏感风险指标。

(3)评价结果分析

风险评价结果与实际情况吻合,较真实地反映了永武高速公路的交通安全状况。风险敏感性分析结果与永武高速公路潜在的风险效应相符,表明分析结果合理、可靠。因此,只要针对敏感风险因素采取相应的安全保障措施即可大幅降低风险程度,从而提高行车安全,取得良好的安全保障效果。

5 结 语

(1)基于系统分析及嫁接的思想,设计了 AHP-

TOPSIS-RSR 法的高速公路交通安全风险评价方法,既能克服 3 种方法各自的缺点,又能保留其优点,丰富了现有风险评价方法体系,同时也拓宽了 AHP、TOPSIS、RSR 方法的应用范围。

(2)将基于正交试验的敏感度分析法引入到高速公路交通安全风险敏感性分析中,运用其对高速公路交通安全风险因素进行了敏感性分析,根据风险指标的主次关系,将风险指标分为敏感风险指标和一般风险指标。由于疲劳/无证驾驶、车辆超速、线形条件、交通条件、不良天气、救援机制这 6 项风险指标敏感度较高,分别达到 0.472 1、0.508 8、0.759 8、0.814 2、0.529 6、0.468 5,因此确立其为交通安全敏感风险指标。

(3)本文主要考虑静态条件下高速公路交通安全风险评价与敏感性分析,考虑到高速公路交通安全风险具有不确定性、多变性,后续将对路网环境下高速公路交通安全风险动态实时预警方面开展进一步研究。

参考文献:

References:

[ 1 ] Engeland A,Skurtveit S,Morland J. Risk of road traffic accidents associated with the prescription of drugs;a registry-based cohort study[J]. Annals of Epidemiology,2007,17(8):597-602.

[ 2 ] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York:Mcgraw-Hill,1980.

[ 3 ] Hwang C L,Yook K. Multiple attribute decision making:methods and applications:a state-of-the-art survey[M]. New York:Springer-Verlag,1981.

[ 4 ] Mckowen J J. Parametric sensitivity analysis of nonlinear programming problems[M]. Amsterdam:North-Holland,1980.

[ 5 ] Olden J D,Jackson D A. Illuminating the“black box”:

- a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154(1/2): 135-150.
- [6] Borgonovo E, Peccati L. Uncertainty and global sensitivity analysis in the evaluation of investment projects[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 104(1): 62-73.
- [7] 田凤调. 秩和比法及其应用[J]. *中国医师杂志*, 2002, 4(2): 115-119.  
TIAN Feng-diao. Rank sum ratio and its application[J]. *Journal of Chinese Physician*, 2002, 4(2): 115-119. (in Chinese)
- [8] 邱清盈, 冯培恩. 基于正交试验的灵敏度分析法[J]. *机械设计*, 1997(5): 4-7.  
QIU Qing-ying, FENG Pei-en. A method of sensitivity analysis based on orthogonal test[J]. *Journal of Machine Design*, 1997(5): 4-7. (in Chinese)
- [9] 李盛阳, 张晓武, 邢立宁. 基于灵敏度分析的动态指标选取方法[J]. *计算机仿真*, 2005, 22(3): 120-123.  
LI Sheng-yang, ZHANG Xiao-wu, XING Li-ning. The method of dynamic selecting measures based on sensitivity analysis[J]. *Computer Simulation*, 2005, 22(3): 120-123. (in Chinese)
- [10] 王海燕. 高速公路交通安全评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
WANG Hai-yan. Study on the highway traffic safety evaluation system[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [11] 王永刚, 王 燕. 人为因素的多维事故原因分析模型[J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(2): 96-100.  
WANG Yong-gang, WANG Yan. Multidimensional analysis model of accident causes resulted from human factors[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(2): 96-100. (in Chinese)
- [12] 孟祥海, 关志强, 郑 来. 基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(2): 103-108.  
MENG Xiang-hai, GUAN Zhi-qiang, ZHENG Lai. Safety evaluation of mountainous expressway based on geometric alignment indexes[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(2): 103-108. (in Chinese)
- [13] 马社强. 区域道路交通安全评价的理论与方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
MA She-qiang. Theory and method on evaluation of regional road traffic safety[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [14] 罗江涛, 刘小明, 任福田. 道路交通安全灰色评价方法研究[J]. *中国公路学报*, 1995, 8(4): 78-83.  
LUO Jiang-tao, LIU Xiao-ning, REN Fu-tian. The gray evaluation of road traffic safety[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1995, 8(4): 78-83. (in Chinese)
- [15] 王 琰, 郭忠印. 基于模糊逻辑理论的道路交通安全评价方法[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(1): 47-51.  
WANG Yan, GUO Zhong-yin. Road safety evaluation based on fuzzy logic[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2008, 36(1): 47-51. (in Chinese)
- [16] Kadali B R, Rathl N, Perumal V. Evaluation of pedestrian mid-block road crossing behaviour using artificial neural network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition*, 2014, 1(2): 111-119.
- [17] 罗丽妮. 加权 TOPSIS 法与 RSR 法相结合在医院综合评价中的应用[J]. *中国医院统计*, 2006, 13(4): 348-351.  
LUO Li-ni. Applications of TOPSIS weighted in association with RSR in hospital synthetical evaluation[J]. *Chinese Journal of Hospital Statistics*, 2006, 13(4): 348-351. (in Chinese)
- [18] 徐秀芹. 高速公路交通事故预警系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
XU Xiu-qin. Study on the forewarning system of freeway traffic accident[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [19] 赵 静, 王 婷, 牛东晓. 用于评价的改进熵权 TOPSIS 法[J]. *华北电力大学学报*, 2004, 31(3): 68-70.  
ZHAO Jing, WANG Ting, NIU Dong-xiao. Improved entropy TOPSIS of knight service evaluation in electric power marketing[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2004, 31(3): 68-70. (in Chinese)
- [20] 李 灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 217-227.  
LI Can, ZHANG Feng-rong, ZHU Tai-feng, et al. Evaluation and correlation analysis of land use performance based on entropy-weight TOPSIS method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 217-227. (in Chinese)
- [21] 田凤调. RSR 法中的分档问题[J]. *中国卫生统计*, 1993, 10(2): 26-28.  
TIAN Feng-diao. Step problem of RSR method[J]. *Journal of China Health Statistics*, 1993, 10(2): 26-28. (in Chinese)



