

文章编号:1001-7372(2015)12-0120-08

## 基于模糊综合评判的山区危险性急 弯路段辅助决策方法

汪双杰<sup>1</sup>, 张 驰<sup>1,2</sup>, 金 龙<sup>1</sup>, 邵东建<sup>2</sup>, 马向南<sup>2</sup>

(1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了对急弯路段小客车行车危险性进行排序, 辅助决策者找出急需改善的危险路段, 提高道路安全管理水平和资金利用效能, 利用临界附着系数和路面附着系数作为分析指标, 选取 25 组试验路段作为研究对象, 并将路段按危险性大小分为 8 级, 利用数理统计和模糊综合评判理论, 确定单因素评判矩阵和影响因素权重, 进而得到综合评判结果; 结合不同危险等级对应的权重, 得到综合评判系数, 以此对 25 组试验路段危险性进行排序, 并进行了实例验证。研究表明: 行驶速度和圆曲线半径是影响急弯路段小客车行车危险性的最主要因素; 运用模糊综合评价法得到的结果与实际事故数据资料相符。

**关键词:**交通工程; 危险路段排序; 模糊综合评判; 小客车; 平曲线路段

**中图分类号:**U491.2 **文献标志码:**A

## Auxiliary Decision-making Method on Risky Sharp Turn Section in Mountain Area Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Shuang-jie<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>1,2</sup>, JIN Long<sup>1</sup>, SHAO Dong-jian<sup>2</sup>, MA Xiang-nan<sup>2</sup>

(1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Area, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to sort the risk of passenger cars moving on sharp turn sections, assist the decision-makers to find out the risky section which was in urgent need of improvement and improve road safety management level and capital utilization efficiency, the critical adhesion coefficient and road adhesion coefficient as evaluation indices and 25 selected groups of test sections as the research object, they were divided into 8 levels based on risks. With the theories of mathematical statistics and fuzzy comprehensive evaluation, the single factor evaluation matrix and the weight of each effect factor can be determined, and then the comprehensive evaluation result was obtained. Combining the corresponding weights of different risk levels, the comprehensive evaluation coefficient was obtained. Based on the coefficients, 25 groups of test sections were sorted according to the risks, which were verified by examples. The results show that the driving speed and circular curve radius are the leading factors which lead to the risk of

收稿日期: 2015-03-11

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01); 交通运输部应用基础研究计划项目(2014 319 812 170);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(新教师基金)项目(20120205120013);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G2211005)

作者简介: 汪双杰(1962-), 男, 安徽怀宁人, 教授级高级工程师, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: wangshj@ccroad.com.cn。

passenger cars moving on sharp turn sections. The results obtained by fuzzy comprehensive evaluation agree with the actual accident data.

**Key words:** traffic engineering; sorting of dangerous section; fuzzy comprehensive evaluation; passenger car; horizontal curve section

## 0 引言

自 20 世纪 90 年代中期以来,中国公路运输行业迅猛发展,截至 2013 年底,公路通车里程、民用汽车保有量、汽车驾驶人数量分别增长了 4.0 倍、15.8 倍、20.7 倍<sup>[1]</sup>。然而,由于行车速度、道路结构的特殊性等原因,交通事故频繁发生。仅 2011 年,中国道路交通事故伤亡人数接近 30 万人,仅次于印度<sup>[2]</sup>。据中国 2011 年道路交通事故统计数据,超速行驶是该年中国高速公路所有事故类型中造成死亡人数最多的交通违法行为,事故数量占总数的比例达 11.4%,弯道事故数量仅次于超速行驶,占 10.5%<sup>[3]</sup>。可见,随着中国公路运输行业的发展,急需在公路安全管理方面投入大量资金,然而,由于资金的有限性,管理者只能将资金投入急需改善的危险路段,因此,对不同行驶速度下、不同弯道路段小客车行车风险进行分析,对路段的危险性进行识别和排序,辅助决策者找出急需改善的危险路段,对提高安全管理水平和资金利用效能具有重要意义。

急弯路段是事故的多发路段,找寻出这些危险路段,并对其危险性进行分级和排序,是改善危险路段交通安全状况的第一步,也是最关键的一步。目前,对危险路段的识别研究正在逐步展开。Erdogan 等<sup>[4]</sup>收集交通事故数据,运用地理信息系统(GIS)技术,采用核密度分析法和泊松分布法,对危险路段进行识别,并比较了 2 种方法的优劣性;孟祥海等<sup>[5]</sup>利用交通事故数据资料,对山区高速公路进行了研究,结合事故率系数提出了基于几何线形指标的路段交通安全评价方法;Effati 等<sup>[6]</sup>将潜在的危险路段道路参数及事故数据信息导入 GIS,运用点估计法建立模糊隶属函数,并利用模糊推理的方法得出隶属函数的隶属度,进而得到了路段的评判系数,并用此系数去确定不同路段的危险性大小;Agarwal 等<sup>[7]</sup>将潜在的危险路段分为直线段、曲线段和平交段,分别找出了影响其安全的因素,并用层次分析法得出了每个影响因素的权重,从而确定因素的危险系数,最后运用危险系数对危险路段进行了排序。

找寻出危险路段的最终目的是给决策者提供辅

助,相关学者在此领域也做了大量研究。Mar 等<sup>[8]</sup>建立了车辆跟随变换车道的安全距离模型,通过扩频雷达获取车辆之间的距离和相对速度,根据车辆特性和车辆所处的情况输出加速度,利用模糊判断系统为驾驶人提供可靠的决策信息;谷岩等<sup>[9]</sup>采用基于数据仓库的决策支持系统的体系结构,综合运用数据仓库、联机分析处理、数据挖掘、信息智能等信息处理技术,通过对大量的相关信息进行提取、清理、转换,形成能辅助决策者进行应急处理决策的支持系统;李竺皓<sup>[10]</sup>开发设计了基于 GIS 的交通诱导辅助决策系统,系统以可变信息交通标志(VMS)及相关资料为背景,结合道路交通状况,利用 GIS 的可视化和空间信息处理技术,综合计算机软件技术和交通工程学理论,有效集成在北京市的交通网络化智能诱导控制系统中,最终实现诱导策略生成和辅助决策的功能。

中国学者在危险路段识别及辅助决策方面也进行了大量研究,但其运用的方法基本是对实际的事故数据进行分析,进而得出结论;然而,中国事故数据库尚未完善,公安部门对事故信息也并未完全公开,加上各级地方由于某些原因对实际事故情况上报不充分,导致研究所采用的事故数据不准确。此外,由于安全管理资金有限,只能将资金投入急需改善的危险路段。因此,在不依赖于事故统计资料的情况下,对危险路段危险性进行排序,可以避免交通事故数据不准确的干扰,而得到的排序结果可以为决策者提供借鉴,便于其判断出最需改善的危险路段,使得安全管理水平和资金利用效能得到提升。本文以此为出发点,考虑到风险和交通事故的发生均具有不确定性,运用模糊综合评判的数学方法分析危险路段及其危险性,将危险路段按危险性进行排序,辅助决策者有选择性地改善相应的危险路段。本文首先对模糊综合评判法原理进行介绍,之后确定影响路段危险性的因素及其权重,接着运用模糊综合评判法得到路段危险性分级依据并将其用于辅助决策,最后再进行实例验证。

## 1 模糊综合评判法

模糊综合评判的实质是将研究对象按照一定的

划分依据,按优劣情况进行排序。

已知有限集合  $L$  为

$$L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\} \quad (1)$$

式中:  $l_i$  表示研究对象,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

有限集合  $V$  为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \quad (2)$$

式中:  $v_j$  表示评判集,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

假设有另一有限集合  $U$

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_p\} \quad (3)$$

式中:  $u_k$  表示每个研究对象不同的影响因素,  $k = 1, 2, \dots, p$ 。

假设模糊向量  $A$  为

$$A = (A_1, A_2, \dots, A_p)^T \quad (4)$$

式中:  $a_k$  分别对应不同影响因素  $u_k$  的权重, 且  $a_1 + a_2 + \dots + a_p = 1$ 。

考虑不同影响因素在评判集中的数值, 得到第  $i$  个单因素评判矩阵  $R_i$

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pm} \end{bmatrix}_{p \times m} \quad (5)$$

式中: 任意值  $r_{kj}$  表示第  $k$  个影响因素在评判集中第  $j$  项所占的比例。得到其他研究对象 ( $i = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ ) 的单因素评判矩阵的方法与  $R_i$  类似。

综上, 第  $i$  个研究对象的综合评判结果  $J_i$  为

$$J_i = A \circ R_i = (c_{1j})_{1 \times m} = \left[ \bigvee_{k=1}^m (a_{1k} \wedge r_{kj}) \right]_{1 \times m} \quad (6)$$

式中:  $c_{1j}$  为  $J_i$  在第  $j$  列的取值;  $a_{1k}$  为向量  $A$  在第  $k$  列的取值;  $\vee$  和  $\wedge$  为扎德算子, 且对  $\forall a, b \in [0, 1]$ , 有  $a \vee b \stackrel{\text{def}}{=} \max\{a, b\}$ ,  $a \wedge b \stackrel{\text{def}}{=} \min\{a, b\}$ 。

其他研究对象 ( $i = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ ) 的综合评判方法与  $J_i$  类似。

将综合评判值  $J_i$  归一化, 得到第  $i$  个研究对象的归一化的综合评判结果  $G_i$ , 即令

$$g_{1j} = \frac{c_{1j}}{c_{11} + c_{12} + \dots + c_{1m}} \quad (7)$$

使得

$$G_i = (g_{1j})_{1 \times m} \quad (8)$$

式中:  $g_{1j}$  为向量  $G_i$  在第  $j$  列的取值。

得到其他研究对象 ( $i = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ ) 的归一化的综合评判结果的方法与  $G_i$  类似。

令归一化的综合评判结果的系数矩阵  $Y$  为

$$Y = (y_{d1})_{m \times 1} \quad (9)$$

式中:  $y_{d1}$  为向量  $Y$  在第  $m$  行的取值,  $d = 1, 2, \dots, m$ 。

最终, 得到第  $i$  个研究对象的综合评判系数  $H_i$  为

$$H_i = G_i Y \quad (10)$$

得到其他研究对象 ( $i = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$ ) 的综合评判系数的方法与  $H_i$  类似, 且  $H_1 + H_2 + \dots + H_n = 1$ 。

可以看出, 上述计算方法最终结果是一个综合评判系数的集合。按照该系数的大小, 可以对研究对象的危险性进行排序。

## 2 影响因素及其权重的确定

考虑不同行驶速度下的急弯路段是潜在危险路段的原因在于: 小客车在弯道路段行驶时, 由于离心力的作用, 车轮上有侧向力作用, 此时, 地面对轮胎着力点有侧向反力, 由于车轮具有弹性, 在侧向反力未超过路面与轮胎的附着极限时, 轮胎在着力点附近发生侧向弯曲, 导致车辆行驶方向发生偏移<sup>[11]</sup>, 而当车速较高时, 若该偏移超过  $5^\circ$ , 一般驾驶人就不易保持驾驶方向的稳定<sup>[12]</sup>; 当小客车由直线路段驶入弯道路段时, 驾驶人通过转动方向盘, 使前轴上的内外轮按一定的关系转过相应的角度, 使得内外前轮的垂线与后轴垂线交在一点, 小客车将绕该点作圆周运动<sup>[11]</sup>, 显然, 驾驶人转动方向盘的幅度与圆曲线半径的大小有关; 弯道路段超高的设置是为了抵消或减小离心力的作用, 由于道路上行驶车辆的速度差异明显, 因此抵消或减小离心力所需的超高值不同, 而超高值又与合成坡度相关; 降雨导致道路表面覆盖一层水膜, 小客车在道路上行驶时, 由于水膜的润滑作用, 会造成附着系数显著降低, 从而导致路段所能提供的附着力下降<sup>[13]</sup>。因此, 导致路段危险性增加的因素主要有行驶速度、圆曲线半径、合成坡度、降雨等。

### 2.1 影响因素的确定

张弛等<sup>[14]</sup>考虑行驶速度和道路因素, 以临界附着系数  $\mu$  (小客车每个车轮所受的侧向力与垂直力的比值取绝对值后的最大值) 作为评价指标, 利用小客车动力学仿真软件 (CARSIM) 构建驾驶人模型、车辆模型和道路模型。其中, 驾驶人模型包括速度控制 (匀速行驶, 车速固定) 和方向控制 (沿道路中线); 车辆模型包括车体参数 (车辆尺寸、质量等) 和系统参数 (引擎、制动系、转向系、悬架、轮胎); 道路模型包括平面线形、纵断面线形和横断面线形。之后, 将数据输出结果运用正交试验法进行分析, 得到

离差及方差分析结果。图 1 为部分数据输出结果( $e$  为超高),表 1 为离差及方差分析的部分结果。最后,运用 MATLAB 回归分析得到临界附着系数与行驶速度、道路参数的回归方程[式(11)]。

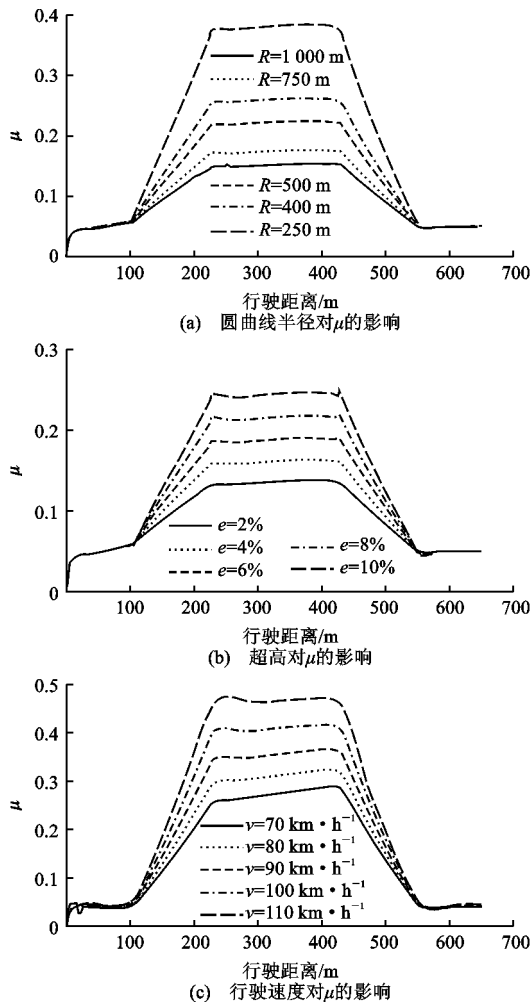


图 1 数据输出结果

Fig. 1 Results of Data Output

表 1 基于临界附着系数  $\mu$  的离差及方差分析结果  
Tab. 1 Deviation and Variance Analysis Results Based on Critical Adhesion Coefficient  $\mu$

因素	离差平方和	自由度	F 值
$R$	0.241 805	2	2 121.11
$v$	0.269 906	2	2 367.60
$\alpha$	0.025 730	4	112.86

$$\mu = \frac{0.014\ 449v^2}{R} - 0.031\ 159\cos(\alpha) + 0.093\ 561, r^2 = 0.96 \quad (11)$$

式中: $v$  为行驶速度; $R$  为圆曲线半径; $\alpha$  为合成坡度; $r^2$  为判定系数。

从表 1 可以看出, $v$  与  $R$  的  $F$  值之比接近于 1, 而  $v$  与  $\alpha$  的  $F$  值之比超过 20, 可见, 与行驶速度  $v$

和圆曲线半径  $R$  相比, 合成坡度  $\alpha$  对临界附着系数  $\mu$  的影响微小。

季天剑<sup>[13]</sup>利用实测数据回归分析得到水膜厚度与降雨强度的关系方程、路面附着系数与水膜厚度的关系方程, 并将 2 个方程合并, 得到降雨强度与路面附着系数的方程, 即

$$\psi = 0.945\ 8 - 0.005\ 7v - 0.000\ 7l^{0.613\ 4} \cdot \alpha^{-0.313\ 3} q^{1.448\ 3}, r^2 = 0.88 \quad (12)$$

式中: $\psi$  为路面附着系数; $l$  为坡面长度; $q$  为降雨强度。

坡面长度示意如图 2 所示。图 2 中, $i'$  为纵坡坡度, $BO, AC$  分别表示半幅路面宽度  $b$ 、坡面长度  $l$ , 且合成坡度可由超高、纵坡算得。坡面长度计算方法如下

$$l = \frac{eb}{\alpha} \sqrt{\alpha^2 + 1} \quad (13)$$

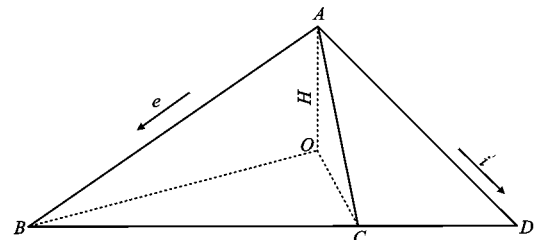


图 2 坡面长度示意

Fig. 2 Schematic of Slope Length

本文研究的急弯路段一般出现在山区, 选取的设计速度为  $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  对应的半幅路面宽度的标准值为  $12.25\text{ m}$ ;  $l$  的取值与  $\alpha$  有关, 故  $l$  和  $\alpha$  实际上仅为 1 个因素。参考张弛等<sup>[14]</sup>处理数据的方法, 运用正交试验法处理数据, 并参考《公路路线设计规范》(JTG D20—2006)<sup>[12]</sup>, 对行驶速度  $v$ 、合成坡度  $\alpha$ 、降雨强度  $q$  各选取 3 组数据, 见表 2, 数据处理最终结果见表 3。

表 2 因素及水平表

Tab. 2 Table of Factors and Levels

因素	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$q/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$\alpha$
水平 1	60	0.05	4.12%(纵坡坡度 1%, 超高 4%)
水平 2	80	0.50	6.71%(纵坡坡度 3%, 超高 6%)
水平 3	100	1.00	9.43%(纵坡坡度 5%, 超高 8%)

从表 3 可以看出,  $v$  与  $q$  和  $v$  与  $\alpha$  的  $F$  值之比分别约为 100 和 171.57, 可见, 与行驶速度  $v$  相比, 降雨强度  $q$  与合成坡度  $\alpha$  对路面附着系数  $\psi$  影响微小。

小客车行驶于急弯路段易发生侧滑事故, 判定

表 3 基于路面附着系数的离差及方差分析结果

Tab. 3 Deviation and Variance Analysis Results Based on Road Adhesion Coefficient

因素	离差平方和	自由度	F 值
$v$	0.078 452	2	30 367.56
$q$	0.000 259	2	302.73
$\alpha$	0.000 005	2	1.77

标准为当临界附着系数  $\mu$  大于路面附着系数  $\psi$  时,发生侧滑。依据对表 2,3 的分析,影响临界附着系数  $\mu$  的主要因素为行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$ ,影响路面附着系数  $\psi$  的主要因素为行驶速度  $v$ ;故选取行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  作为影响因素。

## 2.2 权重的确定

权重是指某一指标在整体评价中的相对重要程度。本文需要研究行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  对行车安全造成的影响及其重要程度,而  $F$  值是用于判断影响因素的显著性的指标,因此,可以运用该值计算出行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  的权重。

表 1 中,行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  的  $F$  值之比(即权重之比)为 1.116 2 : 1,且两者权重之和为 1,因此,得出权重向量  $A=(0.527\ 5, 0.472\ 5)^T$ 。

## 3 评判集的确定

评判集是指评判者对评判对象可能做出的各种总的评判结果所组成的集合。它的作用是将急弯路段小客车行车危险进行分级,并作为之后在进行危险路段危险性排序时的标准。这里需要确定行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  的评判集。对急弯路段小客车行车危险进行分级,分级的依据如下

$$z = \frac{\psi - \mu}{\psi} \quad (14)$$

式中: $z$  为危险等级划分依据。

以 0.2 作为梯度,将危险等级划分为 8 级。危险等级划分为 8 级的原因在于,如果危险等级划分数量太少,那么在确定单因素评判矩阵时,不同因素的差异很小,最终导致不同路段的综合评判系数差异很小,不易判断分析;如果危险等级划分数量过多,则单因素评判矩阵过于繁杂、不便分析。以 0.2 作为梯度的原因在于,它可以将区间  $[-0.8, 0.8]$  等分成 8 份,而之所以选取这个区间,则是由于该区间基本包括了可能发生的所有情况。因此,最终的危险等级划分情况为:1 级,  $z \in (0.6, 0.8]$ ; 2 级,  $z \in (0.4, 0.6]$ ; 3 级,  $z \in (0.2, 0.4]$ ; 4 级,  $z \in (0, 0.2]$ ; 5 级,  $z \in (-0.2, 0]$ ; 6 级,  $z \in (-0.4, -0.2]$ ; 7 级,  $z$

$\in (-0.6, -0.4]$ ; 8 级,  $z \in (-0.8, -0.6]$ 。

显然,1~4 级时,  $z$  大于 0,此时路面附着系数大于临界附着系数,安全;5~8 级时,  $z$  小于 0,此时路面附着系数不大于临界附着系数,危险。此外,随着级数的增加,危险性也在增加。

## 4 评判矩阵的确定及危险路段危险性排序

### 4.1 单因素评判矩阵

单因素评判矩阵是指遵循评判集的分级标准,按照某一种方法,确定单因素造成的影响落在每个分级区域内的概率。概率是随机的,但又有规律可循,需要大量的样本点去分析,根据数理统计知识,当样本点不少于 50 个,可认为是大样本。由于降雨强度和合成坡度影响微小,所以取定值,分别取为  $0.05\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  和  $4.12\%$ ,行驶速度和圆曲线半径取值策略见表 4。

表 4 因素取值策略

Tab. 4 Factor Value Strategy

$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$R/\text{m}$
60	250, 255, ..., 495
70	250, 255, ..., 495
80	250, 255, ..., 495
90	250, 255, ..., 495
100	250, 255, ..., 495
56, 57, ..., 105	250
56, 57, ..., 105	300
56, 57, ..., 105	350
56, 57, ..., 105	400
56, 57, ..., 105	450

表 4 中,行驶速度取为 60, 70, 80, 90, 100  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,涵盖了过弯时相当一部分驾驶人采取的速度情况;在圆曲线半径方面,考虑到山区公路的相关指标均较低,因此,在满足规范情况下,本文选取的指标值均较低,也符合实际。

分别将表 4 每组数据代入式(11)、(12)中,各算出 50 组临界附着系数  $\mu$  值和路面附着系数  $\psi$  值,再按式(14)计算得到每组数据的  $z$  值,统计 50 组数据落在每个分级区间内的次数,计算出相应的概率,最终结果见表 5,6。在表 5,6 中,分别选取 1 组概率数据,即构成 1 个单因素评价矩阵,易知,总共有 25 个。

### 4.2 综合评判及归一化

25 组单因素评判矩阵对应的综合评判通过式(6)算得。由于计算得到的综合评判里的数值之和

表 5 不同行驶速度下每种危险等级发生概率  
Tab. 5 Occurrence Probabilities of Each Risk Level  
at Different Driving Speeds

$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	1~8 级危险发生概率
60	0.82,0.18,0.0,0.0,0.0,0
70	0.18,0.74,0.08,0.0,0.0,0
80	0.0,0.40,0.46,0.14,0.0,0
90	0.0,0.34,0.38,0.24,0.04,0
100	0.0,0.0,0.14,0.36,0.24,0.18,0.08

表 6 不同圆曲线半径下每种危险等级发生概率  
Tab. 6 Occurrence Probabilities of Each Risk Level Under  
Different Radiuses of Circular Curves

$R/\text{m}$	1~8 级危险发生概率
250	0.02,0.24,0.18,0.12,0.10,0.08,0.14
300	0.10,0.24,0.18,0.14,0.12,0.08,0.10,0.04
350	0.18,0.24,0.18,0.14,0.12,0.10,0.04,0
400	0.24,0.26,0.18,0.14,0.10,0.08,0,0
450	0.28,0.26,0.20,0.14,0.12,0,0,0

不为 1,因此,运用式(7)进行归一化,最终结果如表 7 所示。

4.3 危险路段危险性排序

从表 7 可以看出,在行驶速度  $v$  和圆曲线半径  $R$  取不同值时,不同的危险分级区间发生的概率不同,借此可以分析路段危险状况,但单用归一化的综合评判较难分析,为此,应将评判集数量化,即确定归一化的综合评判的系数矩阵,再将评判结果加权平均。由于确定系数矩阵的目的是对危险路段进行排序,因此系数矩阵的取值可以不同,只需保证不同危险分级之差与其对应的数值之差相等即可。选取系数矩阵  $Y=(0.03,0.06,0.08,0.11,0.14,0.17,0.19,0.22)^T$ 。最终,将 25 组综合评判与系数矩阵  $Y$  代入式(10),得到 25 个综合评判系数,按照数值大小,对其进行排序,具体见表 8。

从表 8 可以看出:1~5,6~10,11~15,16~20,21~25 这 5 组数据,每组的综合评判系数呈下降趋势,这是因为每组均保持行驶速度不变,而圆曲线半径逐渐增大的缘故;组间综合评判系数呈上升趋势,这是由组间的行驶速度不断增大决定的;最危险路段和最安全路段编号分别为 21,5,对应的影响因素值分别为  $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  行驶速度和 250 m 圆曲线半径、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  行驶速度和 450 m 圆曲线半径,这是由于速度越高、圆曲线半径越小,越危险。可见,表 8 所列数值和其趋势合理,与实际相符。

表 7 归一化的综合评判结果(试验路段)  
Tab. 7 Normalized Comprehensive Evaluation  
Results (Test Sections)

试验路段	$v/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$R/\text{m}$	综合评判结果
1	60	250	0.35,0.16,0.12,0.08,0.08,0.07,0.05,0.09
2	60	300	0.36,0.17,0.13,0.10,0.08,0.06,0.07,0.03
3	60	350	0.39,0.18,0.13,0.10,0.09,0.07,0.03,0
4	60	400	0.41,0.20,0.14,0.11,0.08,0.06,0,0
5	60	450	0.42,0.21,0.16,0.11,0.10,0,0,0
6	70	250	0.12,0.36,0.12,0.08,0.08,0.07,0.06,0.10
7	70	300	0.13,0.39,0.13,0.10,0.09,0.06,0.07,0.03
8	70	350	0.14,0.41,0.14,0.11,0.09,0.08,0.03,0
9	70	400	0.19,0.42,0.14,0.11,0.08,0.06,0,0
10	70	450	0.22,0.42,0.16,0.11,0.09,0,0,0
11	80	250	0.01,0.27,0.32,0.10,0.08,0.07,0.05,0.10
12	80	300	0.06,0.28,0.32,0.10,0.08,0.06,0.07,0.03
13	80	350	0.13,0.28,0.32,0.10,0.08,0.07,0.03,0
14	80	400	0.17,0.28,0.32,0.10,0.07,0.06,0,0
15	80	450	0.20,0.28,0.33,0.10,0.09,0,0,0
16	90	250	0.01,0.16,0.22,0.25,0.16,0.06,0.05,0.09
17	90	300	0.06,0.16,0.22,0.25,0.16,0.05,0.07,0.03
18	90	350	0.12,0.15,0.22,0.25,0.16,0.07,0.03,0
19	90	400	0.16,0.16,0.22,0.25,0.16,0.05,0,0
20	90	450	0.18,0.17,0.22,0.24,0.16,0.03,0,0
21	100	250	0.01,0.17,0.12,0.09,0.24,0.16,0.12,0.09
22	100	300	0.07,0.16,0.12,0.09,0.24,0.15,0.12,0.05
23	100	350	0.11,0.15,0.11,0.09,0.23,0.15,0.11,0.05
24	100	400	0.14,0.15,0.11,0.08,0.21,0.15,0.11,0.05
25	100	450	0.16,0.15,0.11,0.08,0.21,0.14,0.10,0.05

5 实例验证

以西汉高速(设计速度为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )的 10 个急弯路段为例,运用模糊综合评判法,对其危险性进行排序,并与实际的事故损失大小作对比。虽然出于人本理念,事故损失大小并非评价事故严重程度的最佳评价指标,但是,正如引言中提到,中国事故数据是难以获得的,尤其是人员伤亡情况,因此,选用经济损失作为评价标准,有着一定的合理性。这 10 个急弯路段具体情况见表 9。

按照本文第 4.1 节所述方法,计算出圆曲线半径为 260,290 m 和行驶速度为 62,75,93  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  下的单因素评判矩阵(其他数值下的单因素评判矩阵参考表 5,6),再按照 4.2 节所述方法,得出综合评判矩阵,见表 10。

按照本文第 4.3 节所述方法,系数矩阵不变,算

表 8 危险路段排序(试验路段)

Tab. 8 Sorting of Dangerous Sections (Test Sections)

试验路段 编号	综合评判系数	试验路段 编号	综合评判系数	试验路段 编号	综合评判系数	试验路段 编号	综合评判系数	试验路段 编号	综合评判系数
21	0.134 0	25	0.114 0	12	0.095 4	13	0.085 4	3	0.075 3
22	0.125 1	11	0.107 3	7	0.091 4	8	0.084 1	15	0.072 4
23	0.120 4	17	0.106 2	1	0.091 3	2	0.082 8	10	0.069 6
16	0.117 3	6	0.099 8	19	0.090 3	14	0.078 2	4	0.069 0
24	0.116 4	18	0.096 7	20	0.086 6	9	0.075 9	5	0.063 8

表 9 急弯路段状况及事故损失情况

Tab. 9 Sharp Turn Section Conditions and Situations of Accident Loss

实际路段编号	$v/(km \cdot h^{-1})$	$R/m$	事故损失/元
1	80	260	33 090
2	75	260	26 714
3	90	290	41 580
4	75	290	21 240
5	60	350	1 600
6	100	350	53 695
7	60	400	900
8	62	400	1 300
9	90	450	2 000
10	93	450	18 050

表 10 归一化的综合评判结果

Tab. 10 Normalized Comprehensive Evaluation Results

实际 路段 编号	$v/(km \cdot h^{-1})$	$R/m$	综合评判结果
1	80	260	0.03,0.27,0.32,0.10,0.08,0.07,0.05,0.08
2	75	260	0.03,0.35,0.26,0.08,0.08,0.07,0.05,0.08
3	90	290	0.05,0.17,0.22,0.25,0.16,0.06,0.05,0.04
4	75	290	0.05,0.35,0.26,0.09,0.08,0.07,0.05,0.05
5	60	350	0.39,0.19,0.13,0.10,0.09,0.07,0.03,0.00
6	100	350	0.11,0.15,0.11,0.09,0.23,0.15,0.11,0.05
7	60	400	0.41,0.20,0.14,0.11,0.08,0.06,0.00,0.00
8	62	400	0.40,0.21,0.14,0.11,0.08,0.06,0.00,0.00
9	90	450	0.17,0.17,0.22,0.25,0.16,0.03,0.00,0.00
10	93	450	0.17,0.16,0.13,0.28,0.16,0.10,0.00,0.00

得综合评判系数,并按照数值大小进行排序,具体见表 11。从表 11 可以看出:

(1) 从数据大小分析,依照模糊综合评判结果对危险路段危险性进行排序,路段编号为(危险性由大到小):6,3,1,2,4,10,9,5,8,7。根据表 9 的实际事故损失进行排序,路段编号为(损失由大到小):6,3,1,2,4,10,9,5,8,7。可见,运用 2 种方法得到的结果是相同的。

表 11 危险路段排序

Tab. 11 Sorting of Dangerous Sections

实际路段编号	综合评判系数	实际路段编号	综合评判系数
6	0.120 4	10	0.095 0
3	0.107 8	9	0.086 6
1	0.104 7	5	0.075 3
2	0.102 1	8	0.069 0
4	0.095 5	7	0.068 9

(2)对于路段 5,6,7:路段 5,6 的圆曲线半径相同,行驶速度不同,且速度较大者路段危险性更高,此外,二者的综合评判系数增加率与行驶速度增加率之比为 0.898;路段 5,7 的行驶速度相同,圆曲线半径不同,且圆曲线半径小者路段危险性更高,此外,二者的综合评判系数增加率与圆曲线半径减小率之比为 0.728。因此,路段危险性的总趋势是行驶速度越快、圆曲线半径越小,越危险;当行驶速度增加率与圆曲线半径减小率相同时,因行驶速度增加率造成的综合评判系数增加率更大,即较圆曲线半径而言,行驶速度对路段危险性的影响更大。

综合上述分析,可以认为,运用模糊综合评判对危险路段进行排序的方法可靠、有效。

## 6 结 语

(1)以模糊综合评判和数理统计理论为基础,结合 2 个数学模型,分析急弯路段对小客车侧滑可能产生影响的因素,发现仅行驶速度和圆曲线半径会产生显著影响。

(2)针对行驶速度和圆曲线半径,运用比较  $F$  值的方法,得到各自的权重;运用比较临界附着系数和路面附着系数差异程度的方法,将小客车侧滑危险分为 8 个等级。

(3)在行驶速度为 60,70,80,90,100  $km \cdot h^{-1}$ ,圆曲线半径为 250,300,350,400,450 m 时,均随机选取 50 组数据并对数据进行处理,得到相应的单因素评判矩阵,之后,考虑权重,得到综合评判结果,并

最终得到综合评判系数,以此对危险路段危险性进行了排序。

(4)危险路段危险性排序结果可以为决策者确定出急需改善的危险路段,并将资金投入其中,进而提高安全管理水平和资金利用效能。

(5)本文仅在设计速度为  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时对急弯路段危险性进行了研究,未考虑其他设计速度的情况;本文研究的仅是单圆曲线,未考虑实际路段中经常存在的同向曲线、反向曲线、复圆曲线等因素的影响,也未考虑连续下坡的影响;仅研究了小客车侧滑风险,未考虑事故严重程度更高的大货车的行车风险,原因是大货车不仅存在侧滑风险,还存在侧翻风险,较为复杂。在下一阶段研究中,应在本文的基础上,考虑这些情况,以完善得到的结论。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013 [M]. 北京:中国统计出版社,2013.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook of 2013[M]. Beijing:China Statistics Press,2013.
- [2] IRTAD. Road Safety Annual Report 2013[R]. Paris: IRTAD,2013.
- [3] 中华人民共和国公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报 2011[R]. 北京:公安部交通管理局,2011.  
Traffic Management Bureau of the Public Security Ministry of the People's Republic of China. Road Traffic Accident Statistics Report 2011 of the People's Republic of China[R]. Beijing:Traffic Management Bureau of Ministry of Public Security,2011.
- [4] ERDOGAN S, YILMAZ I, BAYBURA T, et al. Geographical Information Systems Aided Traffic Accident Analysis System Case Study: City of Afyonkarahisar [J]. Accident Analysis & Prevention, 2008, 40(1): 174-181.
- [5] 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.
- [6] EFFATI M, RAJABI M A, SAMADZADEGAN F, et al. Developing a Novel Method for Road Hazardous Segment Identification Based on Fuzzy Reasoning and GIS [J]. Journal of Transportation Technologies, 2012, 2(1): 32-40.
- [7] AGARWAL P K, PATIL P K, MEHAR R. A Methodology for Ranking Road Safety Hazardous Locations Using Analytical Hierarchy Process[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013, 104: 1030-1037.
- [8] MAR J, LIN H T. The Car-following and Lane-changing Collision Prevention System Based on the Cascaded Fuzzy Inference System[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 910-924.
- [9] 谷岩,冯华. 智能化城市防灾减灾应急处理支持系统的研究[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(6): 1503-1505, 1513.  
GU Yan, FENG Hua. Research of Intelligent DSS of City Defending and Salvaging for Disaster[J]. Computer Engineering and Design, 2005, 26(6): 1503-1505, 1513.
- [10] 李竺皓. 交通诱导策略自动生成及辅助决策系统研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.  
LI Zhu-hao. Research on Automatic Generation of Guidance Algorithm and Assistant Decision-making System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 牛世峰. 公路弯道路段交通安全特性研究[D]. 长春:吉林大学,2008.  
NIU Shi-feng. Research on Traffic Safety Characteristics of Curved Section of Highway[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [12] JTG D20—2006, 公路路线设计规范[S].  
JTG D20—2006, Design Specification for Highway Alignment[S].
- [13] 季天剑. 降雨对轮胎与路面附着系数的影响[D]. 南京:东南大学,2004.  
JI Tian-jian. The Influence of Rainfall on the Tire and Road Adhesion Coefficient[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [14] 张驰,邵东建,张敏. 基于小客车侧滑微观仿真曲线路段行车风险分析[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(7): 1609-1616, 1627.  
ZHANG Chi, SHAO Dong-jian, ZHANG Min. Risk Analysis of Passenger Car Moving on Curved Sections Based on Sideslip Microscopic Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(7): 1609-1616, 1627.