

# 基于未确知测度理论的高等级公路交通安全评价

朱兴琳<sup>1,2</sup>, 方守恩<sup>1</sup>, 王俊骅<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 新疆农业大学 机械交通学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 基于未确知测度理论, 建立高等级公路安全性等级评价和排序模型. 首先, 以影响高等级公路安全性的主要因素来确立评价指标体系和评价标准; 然后, 根据实测数据建立各影响因素的未确知测度函数, 并利用信息熵理论计算各影响因素的指标权重, 依照置信度识别准则判定等级; 最后, 得出高等级公路安全性评价结果. 评价方法能解决高等级公路安全性评价中诸多因素不确定性问题, 还可以按安全程度排序. 将该方法应用于新疆 4 条高等级公路的安全性评价并与传统的模糊综合评价法比较, 结果表明, 该方法科学合理, 意义明确, 可以在实际工程中推广应用.

**关键词:** 未确知测度; 高等级公路; 交通工程; 安全性评价; 置信度识别准则; 信息熵

中图分类号: U 492.8

文献标识码: A

results of safety evaluation for high-grade highway were obtained. The evaluation method can not only solve many uncertainty problems affected by various factors in highway safe aspect, but also can rank the order of safe degree. This method was adopted to evaluate safety level of four high-grade highways in Xinjiang Uygur Autonomous Region of China. Compared with the results of fuzzy synthetic evaluation method, the study results show that uncertainty measurement method is reasonable and can be applied to the actual engineering.

**Key words:** uncertainty measurement; high-grade highway; traffic engineering; safety evaluation; credible degree recognition criterion; entropy

## Traffic Safety Assessment of High-grade Highway Based on Uncertainty Measurement Theory

ZHU Xinglin<sup>1,2</sup>, FANG Shouen<sup>1</sup>, WANG Junhua<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Machinery and Traffic, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Based on the uncertainty measurement theory, a safe grade-assessment and order-arrangement model of high-grade highway was established. First, the main factors influencing the safety of high-grade highway were taken into account to construct evaluation index system and appraisal criterion, and then uncertainty measurement functions for the main indexes were achieved according to the field data. Information Entropy theory was adopted to calculate the weight coefficients of these influencing factors, and then safe assessment grade was determined by credible degree recognition criteria. Finally, the

近年来, 随着我国国民经济的快速发展, 带动了我国高速公路里程及汽车保有量的不断增长. 高速公路运输在带来高效、快捷、方便的同时, 不可避免地带来了交通拥挤、环境污染、事故损害等诸多问题, 尤其是我国高速公路交通事故率居高不下, 高速公路交通事故 10 万 m(百公里) 发生率约为普通公路的 4 倍, 经济损失不断加大, 已成为影响我国道路交通可持续、高速发展的重大问题. 由于高速公路在我国起步较晚, 尚缺乏规律性认识, 因而深入分析当前我国高速公路安全中存在的各种问题, 探讨其内在的规律性, 对有效预防交通事故的发生, 提高高速公路行车安全, 具有现实意义. 由于影响高速公路交通安全的因素极其复杂多样, 既有内部因素(如道路线形、车辆性能等), 又有外部因素(如管理水平、气候因素等), 所以, 如何建立合理的评价指标体系, 并对其进行有效的安全评价, 至今还没有一个公认的行之有效的方法.

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAK35B03)

作者简介: 朱兴琳(1971—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: zxl\_417@yahoo.com.cn

方守恩(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路规划与设计、道路交通安全.

E-mail: fangsek@tongji.edu.cn

国内在道路安全评价方面常用的交通安全评价方法主要有事故率法、事故强度法、层次分析法、灰色评价法、交通冲突法、模糊评价法、BP神经网络法等<sup>[1-5]</sup>.虽然目前发展出很多方法,然而,安全性评价的难点在于许多因素的不确定性和隐蔽性.如何将这些不确定的信息考虑在内并进行分析,是值得研究的一个重要问题.在这方面,未确知数学理论提供了一个比较好的途径.

未确知信息及其数学处理理论最早由王光远于1990年提出<sup>[6]</sup>,前者是一种不同于模糊信息、随机信息和灰色信息的新的不确定性信息.在此基础上,刘开第等建立了未确知数学理论,并将该理论运用到社会科学和自然科学中<sup>[7]</sup>.在未确知数学应用研究中,成果最多的是未确知测度评价模型的应用<sup>[8-9]</sup>.笔者借鉴未确知测度评价模型的理论 and 思想,将未确知数学理论运用到高等级公路安全性评价中,可以解决评价系统中诸多因素不确定性问题,还能对其进行定量分析.针对高等级公路实际的交通安全状况,首先基于未确知测度理论构造了未确知测度模型,计算已建立的各评价指标的未确知测度值,然后利用信息熵理论确定影响高等级公路安全性各因素的权重,最后利用置信度准则对其进行安全判别.利用该模型对新疆4条高等级公路进行安全性评价,并与模糊数学综合评价结果进行对比,研究结果表明,该方法较为理想和实用,为高速公路安全性的评价提供了一种新的安全评价思路.

## 1 未确知测度计算理论

设某评价对象  $R$  有  $n$  个,则评价对象空间  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ . 对于每个评价对象  $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 有  $m$  个单项评价指标空间,即  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , 则  $R_i$  可表示为  $m$  维向量  $R_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$ . 其中,  $x_{ij}$  表示  $R_i$  关于评价指标  $X_j$  的测量值. 对每个子项  $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ , 设有  $p$  个评价等级  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ . 评价空间记为  $U$ ,  $U = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ . 设定第  $k$  级安全等级比第  $k + 1$  级“高”,记为  $C_k > C_{k+1}$ , 若  $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$ , 则称  $\{C_1, C_2, \dots, C_p\}$  是  $U$  的一个有序分割类<sup>[8]</sup>.

### 1.1 单指标未确知测度

若  $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$  表示  $x_{ij}$  属于第  $k$  个评价等

级  $C_k$  的程度,  $\mu$  满足

$$0 \leq \mu(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$\mu(x_{ij} \in U) = 1 \quad (2)$$

$$\mu \left| x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k \mu(x_{ij} \in C_l), \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (3)$$

则称  $\mu$  为未确知测度(uncertainty measurement), 简称测度<sup>[9]</sup>. 式(2)称为  $\mu$  对评价空间  $U$  满足“归一性”, 式(3)称为  $\mu$  对评价空间  $U$  满足“可加性”. 如果  $\mu$  不满足归一性和可加性, 则认为  $\mu$  的值在理论上不可信.

$(\mu_{ijk})_{m \times p}$  称为单指标测度评价矩阵, 且有

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 1.2 指标权重的确定

在此, 需要确定各项指标的权重. 设  $w_j$  表示  $X_j$  相对其他评价指标的重要程度, 即权重, 要求满足  $0 \leq w_j \leq 1$ , 且  $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ , 则称  $w_j$  为  $X_j$  的权重.  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ , 称为指标权重向量. 可利用信息熵确定权重<sup>[10]</sup>, 即

$$v_j = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{i=1}^p \mu_{ji} \lg \mu_{ji} \quad (5)$$

$$w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_i \quad (6)$$

由于单指标测度评价矩阵式(4)是已知的, 所以, 可以通过式(5), (6)求得  $w_j$ .

### 1.3 多指标综合测度评价向量

若  $\mu_{ik} = \mu(R \in C_k)$  评价样本  $R_i$  属于第  $k$  个评价类  $C_k$  等级的程度, 则有

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk}, \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p \quad (7)$$

显然,  $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ ,  $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$ . 所以, 式(7)确定的  $\mu_{ik}$  是未确知测度, 称  $\mu_{ik} = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip})$  为  $R_i$  的多指标综合测度评价向量<sup>[8]</sup>.

### 1.4 置信度识别准则

若  $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$ , 则称  $\{C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p\}$  是  $U$  的一个有序分割类. 可引入“置信度”评价准则如下:

设  $\lambda$  为置信度 ( $\lambda > 0.5$ )<sup>[8]</sup>, 通常取  $\lambda = 0.6$  或

0.7,且令

$$k_0 = \min \left| k: \sum_{l=1}^k \mu_{il} \geq \lambda, \quad k = 1, 2, \dots, p \right| \quad (8)$$

则认为评价样本  $R_i$  属于第  $k_0$  个评价等级  $C_{k_0}$

### 1.5 排序

除了要判别属于哪个评价等级外,有时要求对  $R_i$  的安全性重要程度排序<sup>[7]</sup>.若  $C_1 > C_2 > C_3 > \dots > C_p$ ,令  $C_l$  的分值为  $I_l$ ,则  $I_l > I_{l+1}$ ,且

$$q_{R_i} = \sum_{l=1}^p I_l \mu_{il} \quad (9)$$

式中:  $q_{R_i}$  为评价因素  $R_i$  的未确知重要度,  $q_{R_i} = \{q_{R_1}, q_{R_2}, \dots, q_{R_n}\}$ ,称为未确知重要度向量.按  $q_{R_i}$  的大小,可对  $R_i$  的安全度排序.

## 2 高速公路交通安全评价指标体系的建立

根据相关研究成果<sup>[11-15]</sup>,选取影响高等级公路交通安全的主要因素:驾驶员特性、道路主体工程、交通工程及沿线设施、交通特性、气象因素、交通管理设施.结合评价指标体系建立的原则——系统性、可比性、可操作性,选取18项因素,构建高等级公路综合评价指标体系,以历史经验数据为依据,划分4个安全性评价等级,即I,II,III,IV,分别表示安全性极高、安全性较高、安全性一般和安全性较低.具体分级标准及赋值情况如表1所示.

表1 高等级公路交通安全评价指标分级标准

Tab.1 Classification criterion of indexes of high-grade highway

评价体系	评价指标	编号	单位	评价等级			
				I ( $C_1$ )	II ( $C_2$ )	III ( $C_3$ )	IV ( $C_4$ )
驾驶员特性	三年以下驾龄比例 <sup>[5]</sup>	$x_1$	%	<10	10~20	20~30	$\geq 30$
	违章率 <sup>[11]</sup>	$x_2$	%	<10	10~20	20~30	$\geq 30$
道路主体工程	线形:相邻路段车速差值 <sup>[12]</sup>	$x_3$	km·h <sup>-1</sup>	<10	10~15	15~20	$\geq 20$
	路面:状况指数 <sup>[13]</sup>	$x_4$		$\geq 70$	70~50	50~30	<30
	视距 <sup>[14]</sup>	$x_5$	m	$\geq 160$	160~110	110~75	<75
交通工程及沿线设施	交通防护和隔离	$x_6$		优	良	一般	差
	防眩设施	$x_7$		优	良	一般	差
	视线诱导设施	$x_8$		优	良	一般	差
	标志、标线及信息板	$x_9$		优	良	一般	差
交通环境特性	每车道车辆密度 <sup>[14]</sup>	$x_{10}$	pcu·km <sup>-1</sup> ·ln <sup>-1</sup>	<18	18~25	25~45	$\geq 45$
	大中型车占交通量比例	$x_{11}$	%	<25	25~50	50~75	$\geq 75$
	设计速度	$x_{12}$	km·h <sup>-1</sup>	<80	80~100	100~120	$\geq 120$
气候因素	年不良气候天数	$x_{13}$	d	<20	20~30	30~40	$\geq 40$
	能见度 <sup>[15]</sup>	$x_{14}$	m	$\geq 500$	500~200	200~100	<100
	风力等级	$x_{15}$	级	<4	4~5	5~8	$\geq 8$
交通管理设施	监控设施	$x_{16}$		优	良	一般	差
	信息设施	$x_{17}$		优	良	一般	差
	报警设施	$x_{18}$		优	良	一般	差

注:在  $x_{10}$  的单位中,“pcu”表示标准车辆,“ln”表示车道.

## 3 应用实例

### (1) 乌奎高速公路

新疆乌奎高速公路设计使用寿命为20年,设计通行能力为25 000 pcu·d<sup>-1</sup>.路基宽26 m,双向四车道,行车道宽度7.5×2 m,设计速度120 km·h<sup>-1</sup>,停车视距210 m,一般最小平曲线半径1 000 m,全线设置完善的交通标志、标线,设置中央分隔带护栏、路侧护栏及路外隔离栅,沿线设置紧急电话系统,设置有少量的车辆监测器,于2000年11月建

成通车.

### (2) 吐乌大高等级公路

吐乌大高等级公路设计使用寿命为20年,设计通行能力高速公路段为25 000 pcu·d<sup>-1</sup>,二级汽车专用公路为5 000 pcu·d<sup>-1</sup>.高速公路路段技术指标与乌奎高速公路相同.汽车专用二级公路的路基宽度为12 m,行车道宽度为9 m,设计速度为80 km·h<sup>-1</sup>,停车视距为110 m,一般最小平曲线半径40 m,沿线设置完善的交通标志、标线,部分设置路侧护栏.1998年通车.其他高等级公路见表2.

表 2 新疆已建成通车的主要高等级公路  
Tab.2 Main high-grade highways opened to traffic in Xinjiang

序号	公路名称	等级	长度/km	地形	通车年
1	吐乌大	高速	170.6	平微、重丘	1998
		二级汽车专用	113.3	平微	
2	乌奎	高速	283.5	平微	2000
3	奎赛	一级	119.6	平微	2005
		二级汽车专用	55.6		
4	和库	高速	92.4	平微、重丘	2005

表 3 高等级公路安全性评价指标调查统计表

Tab.3 Estimation and measured data of safety evaluation indexes of high-grade highways

样品	评价指标																	
	$x_1/\%$	$x_2/\%$	$x_3/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$x_4$	$x_5/\text{m}$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}/(\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{ln}^{-1})$	$x_{11}/\%$	$x_{12}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$x_{13}/\text{d}$	$x_{14}/\text{m}$	$x_{15}/\text{级}$	$x_{16}$	$x_{17}$	$x_{18}$
$R_1$	12	36	8	75	110	75	65	65	65	13	86	100	40	700	6	80	70	75
$R_2$	13	30	8	80	210	80	68	65	70	15	84	120	15	800	5	75	72	78
$R_3$	14	37	7	80	180	76	70	75	75	14	88	100	21	600	4	75	75	75
$R_4$	13	34	7	82	210	80	80	78	75	13	82	120	11	1 000	4	75	76	80

注:表中数据通过统计原始资料分析获得.

3.1 构造单指标测度函数

根据单指标测度函数的定义和表 1、表 3 中各评价指标的分级标准及具体取值,构建单指标测度函数,以求得各评价指标的测度值.其中,驾驶员特性、

道路主体工程、交通特性及气候因素单指标测度函数分别见图 1a~j,交通工程及沿线设施、交通管理设施等定性单指标根据专家打分获得赋值,然后根据图 1 k 的测度函数取得该指标测度值.

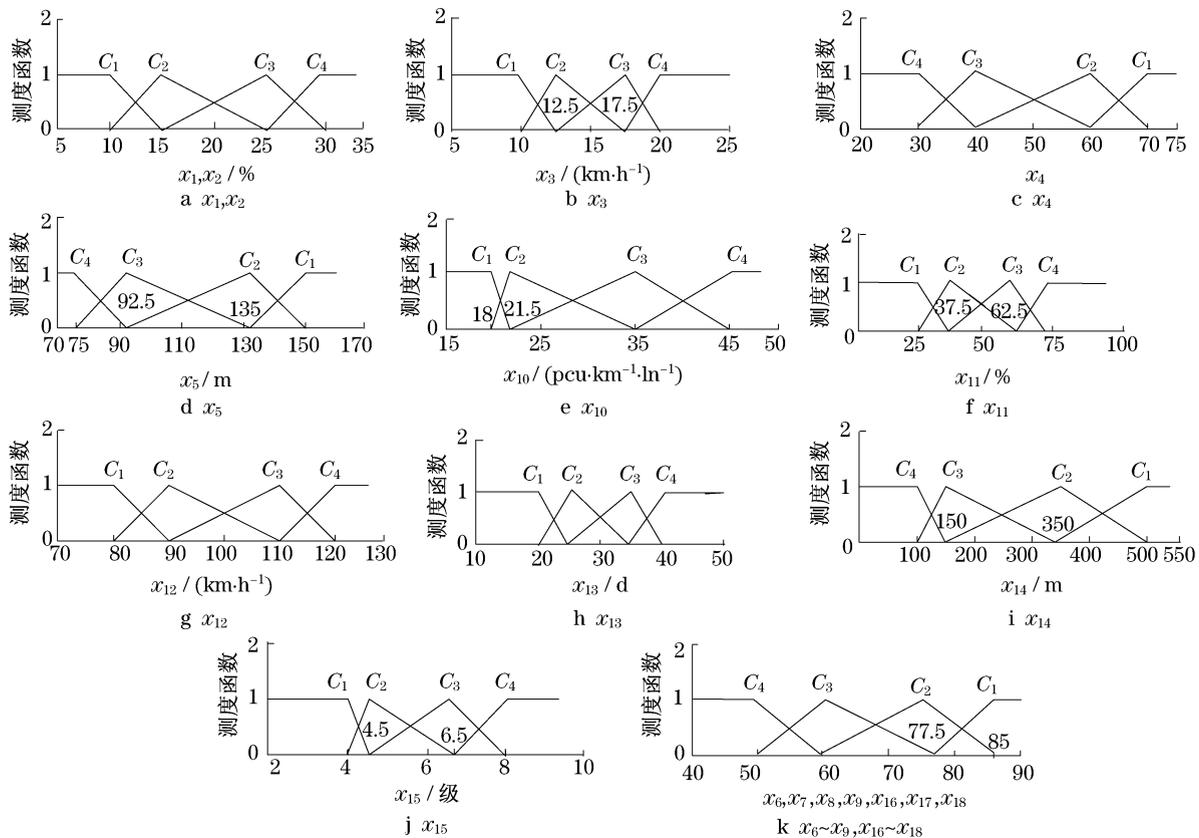


图 1 各单指标测度函数

Fig.1 Uncertainty measurement function of the different single index

由表3中各因素的取值,根据以上单指标测度函数,可以求得4条高等级公路的单指标测度评价矩阵.以 $R_1$ 高等级公路为例,根据表3中18个影响因素的取值,分别代入图1的单指标测度函数.由计算可知, $R_1$ 的单指标评价矩阵为

$$(\mu_{1jk})_{18 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.40 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.41 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0.86 & 0.14 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.71 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.71 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.71 & 0 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 1.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0.57 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0.57 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0.86 & 0.14 & 0 \end{bmatrix}$$

### 3.2 计算多指标测度评价矩阵

用式(1)~(6)确定各评价指标权重, $R_1$ 的评价指标权重为: $\{w_1, w_2, \dots, w_{18}\} = \{0.03799, 0.07383, 0.07383, 0.07383, 0.03775, 0.07383, 0.04197, 0.04197, 0.04197, 0.07383, 0.07383, 0.03692, 0.07383, 0.07383, 0.04388, 0.03746, 0.03746, 0.05199\}$ .根据式(7),求得 $R_1$ 的多指标综合测度评价向量: $\{0.3681, 0.2468, 0.2136, 0.1715\}$ .

### 3.3 置信度识别

取置信度 $\lambda = 0.6$ ,由式(7)和(8),从小到大,且 $k_0 = 0.1715 + 0.2136 + 0.2468 = 0.6319 > 0.6$ ,即 $R_1$ 的安全度等级为II;从大到小, $k_0 = 0.3681 + 0.2468 = 0.6149 > 0.6$ , $R_1$ 也为II.可见,两次判别的结果一致,可以判定 $R_1$ 的安全性等级为II,即安全性较高.同样,对 $R_2, R_3, R_4$ 评价,评价结果见表4.

### 3.4 安全性重要度排序

由式(9),因 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4$ ,令 $C_1 = 4, C_2 = 3, C_3 = 2, C_4 = 1$ ,计算相对重要度,则有 $q = \{q_{R_1}, q_{R_2}, q_{R_3}, q_{R_4}\} = \{2.6615, 2.9380, 3.1087,$

$3.1032\}$ .

表4 未确知测度模型评价结果

Tab.4 Results of uncertainty measurement evaluation

样本	评价等级				本方法
	$C_1(I)$	$C_2(II)$	$C_3(III)$	$C_4(IV)$	
$R_1$	0.3681	0.2468	0.2136	0.1715	II
$R_2$	0.4501	0.2479	0.0922	0.2096	II
$R_3$	0.4547	0.3369	0.0711	0.1370	II
$R_4$	0.5119	0.2759	0.0155	0.1969	II

对这4条高等级公路的安全性按重要度排序,则安全程度从大到小依次为:奎赛,和库,乌奎,吐乌大.由于同时处理大量路段安全性问题,在时间和人力上等都不现实,现在,根据安全性程度顺序,首先处理安全性程度低的,这样可以提供科学指导,在不影响运营的基础上科学合理地处理.

### 3.5 评价结果分析

比较表4中未确知测度评价结果与表5模糊数学的综合评价结果(计算过程省略),可以看出,其中3条的评价结果完全相同,个别存在不一致.通过分析,认为未确知测度的评价结果更加合理有效.具体体现在:模糊数学评价结果采用的是最大隶属度识别准则.按最大隶属度识别准则, $R_1$ 可判属I级,但这显然不合理(见表5).因为 $R_4$ 属于I级的隶属度0.343和II级的隶属度0.338相差较小.为作比较,把置信度识别准则引入到模糊数学评价方法中,设 $\lambda = 0.6$ ,从大到小和从小到大的评价结果相同,均为II级.这与未确知测度评价结果完全相同.

表5 模糊数学评判结果

Tab.5 Results with the fuzzy synthetic evaluation for high-grade highways

样本	评价等级				判别结果
	$C_1(I)$	$C_2(II)$	$C_3(III)$	$C_4(IV)$	
$R_1$	0.271	0.384	0.223	0.122	II
$R_2$	0.261	0.415	0.262	0.062	II
$R_3$	0.328	0.375	0.263	0.034	II
$R_4$	0.343	0.338	0.202	0.116	I

可以看出,在模糊数学中引入置信度识别准则后的评价结果与未确知测度结果完全吻合.由此可见,未确知测度的评价结果更加科学合理,并且在权重确定时采用信息熵理论,减少了人为因素影响,权重更加客观真实.这是模糊综合评判无法比拟的.

利用模糊综合评判法进行综合评价时,之所以会出现分级不清及不太合理结果,主要原因是复合运算过程中的取大取小运算符只强调极值的作用,而忽视了其他中间值的贡献,从而导致评价结果与

实际不符.

以上仅从宏观的角度针对高等级公路进行了安全度等级的评价,结合道路现场各个具体路段,该方法还能够确定危险源.

## 4 结语

针对道路安全评价中诸多影响因素的不确定性和隐蔽性,本文构建了未确知测度评价模型,并利用该模型对新疆高等级道路安全性进行了评价和分析,同时为验证该模型的有效性,选用了常用的模糊数字评判法与之比较.实际应用结果表明,未确知测度评价模型更加科学合理,不仅能够确定安全等级,还可以按安全度重要程度进行排序,以保证确保安全度低的先治理.本方法为道路安全生产和治理提供了一条新思路,具有重要的理论和现实意义.

随着我国道路交通安全评价技术的不断发展和完善,影响道路安全性指标取值的精度可以进一步得到提高,从而获得更精确的安全评价结果.

### 参考文献:

- [1] 吴义虎,刘文军,肖旗梅.高速公路交通安全评价的层次分析法[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2006,3(1):7.  
WU Yihu, LIU Wenjun, XIAO Qimei. AHP for evaluating the traffic safety of freeway [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2006, 3(1): 7.
- [2] 胡启洲,张卫华.高速公路交通安全的模糊区间评价[J].中国安全科学学报,2007,17(7):26.  
HU Qizhou, ZHANG Weihua. Fuzzy interval evaluation method for highway traffic safety [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(7): 26.
- [3] 潘艳荣,翟长旭,朱顺应.基于灰色聚类理论和人工神经网络技术的道路交通安全评价[J].重庆交通学院学报,2005,24(1):101.  
PAN Yanrong, ZHAI Changxu, ZHU Shunying. An evaluation of the road traffic safety based on the grey cluster and the neural network [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2005, 24(1): 101.
- [4] 李政.道路安全评价研究[D].西安:长安大学公路学院,2001.  
LI Zheng. Research of road safety evaluation [D]. Xi'an: School of Highway of Chang'an University, 2001.
- [5] 陈君,李聪颖,丁光明.基于BP神经网络的高速公路交通安全评价[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(6):927.  
CHEN Jun, LI Congying, DING Guangming. Traffic safety of freeway based on BP neural network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(6): 927.
- [6] 王光远.论未确知性信息及其数学处理[J].哈尔滨建筑工程学院学报,1990,23(41):52.  
WANG Guangyuan. Uncertainty information and its mathematical treatment [J]. Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute, 1990, 23(3): 52.
- [7] 刘开第,吴和琴,庞彦军,等.不确定性信息数学处理及应用[M].北京:科学出版社,1999.  
LIU Kaidi, WU Heqin, PANG Yanjun, et al. Mathematics treatment and application of uncertainty information [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [8] 刘开第,庞彦军,孙光勇,等.城市环境质量的未确知测度评价[J].系统工程理论与实践,1999,19(12):52.  
LIU Kaidi, PANG Yanjun, SUN Guangyong, et al. The uncertainty measurement evaluation on a city environmental quality [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 1999, 19(12): 52.
- [9] 刘开第,吴和琴,王念鹏,等.未确知数学[M].武汉:华中理工大学出版社,1997.  
LIU Kaidi, WU Heqin, WANG Nianpeng, et al. Uncertainty mathematics [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997.
- [10] 曹庆奎,刘开展,张博文.用熵计算客观型指标权重的方法[J].河北建筑科技学院学报,2000,17(2):40.  
CAO Qingkui, LIU Kaizhan, ZHANG Bowen. Calculation method of objective index weight by entropy [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2000, 17(2): 40.
- [11] 张殿业.道路交通安全管理评价体系[M].北京:人民交通出版社,2005.  
ZHANG Dianye. Evaluation system of road traffic safety management [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [12] 华杰工程咨询有限公司. JTG/T B05—2004—公路项目安全性评价指南[S].北京:人民交通出版社,2004.  
CHELBI Engineering Consultants, Inc. JTG/T B05—2004—High-way safety design and operations guide [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [13] 姚祖康.路面管理系统[M].北京:人民交通出版社,1993.  
YAO Zukang. Pavement management system [M]. Beijing: China Transport Press, 1993.
- [14] 交通部公路司,中国工程建设标准化协会公路工程委员会. JTG B01—2003 公路工程技术规范[S].北京:人民交通出版社,2003.  
Highway Department of the Ministry of Transport of China, Technical Standard of Highway Engineering. JTG B01—2003 Highway technique criterion [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [15] 王晓飞,郭忠印.基于路段二级模糊评判的路网运营安全性研究[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(12):1632.  
WANG Xiaofei, GUO Zhongyin. Research on network safety operation based on two-level fuzzy comprehensive judgment of highway segment [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12): 1632.