

基于相对差异函数的隧道群交通安全评价

国威¹, 潘晓东¹, 蒋曙豪²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 浙江沪杭甬高速公路股份有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 引入可变模糊理论中的相对差异函数, 建立高速公路隧道群交通安全评价模型。根据相关研究成果, 选取影响高速公路隧道群交通安全的主要因素构建安全评价指标体系。综合层次分析法(AHP)和信息熵法确定评价指标的权重, 建立相对差异函数安全评价模型。利用相对差异函数评价模型对隧道群交通安全等级进行判别, 得出评价结果。将该方法应用于浙江省某高速公路隧道群交通安全评价, 针对评价结果提出隧道群安全改善对策, 并将该方法与其他交通安全评价方法计算结果进行对比, 结果表明该模型在高速公路隧道群交通安全评价应用中有较好的实用性。

关键词: 交通工程; 隧道群; 安全评价; 相对差异函数

中图分类号: U412.34

文献标志码: A

Relative Difference Function-based Traffic Safety Assessment of Tunnel Groups

GUO Wei¹, PAN Xiaodong¹, JIANG Shuhao²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhejiang Expressway Co. Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: A relative different function of the variable fuzzy theory was introduced to the building of a safety assessment model for tunnel groups. Based on the previous researches, the main factors influencing the tunnel group traffic safety were chosen to construct an evaluation index system, and then, the weights of the evaluation indexes were obtained on the basis of the results by analytic hierarchy process (AHP) method and the entropy of information. Subsequently, a relative different function assessment model was adopted to evaluate the tunnel group traffic safety level. Finally, the safety level of a mountainous freeway tunnel group in Zhejiang Province was evaluated with the proposed model, and some safety improvement measures were proposed accordingly. A comparative study of the analytical results show this model is effective in traffic safety assessment for tunnel groups on freeways.

Key words: tunnel group; traffic engineering; safety assessment; relative different function

车辆在隧道群路段行驶过程中, 在相对较短的时间内经历了一个从明环境到暗环境, 再从暗环境到明环境的过程, 视觉环境的频繁改变给驾驶员的心理及生理造成很大影响。另外, 隧道群通常为山区公路的组成部分, 具有较差的自然环境, 如隧道内外风速差异较大、冬季路面结冰等造成隧道内外环境差异更加悬殊, 增加隧道交通安全隐患。隧道群路段一旦发生交通事故, 应急救援往往难以有效施展, 极易造成巨大的财产损失和不良的社会影响。

国内隧道群交通安全方面研究主要集中在驾驶员心理生理、运行车速及事故预警等方面。赵炜华等^[1]研究了高速公路隧道群出入口段驾驶人视觉信息认知过程和变化。杜志刚等^[2]建立了驾驶员瞳孔面积与隧道进出口照度的幂函数关系, 解决隧道群路段出入口照明过渡问题。张生瑞等^[3]通过采集车辆速度, 建立了车辆运行速度与采集点位置的函数关系, 分析了隧道群路段不同位置运行速度的变化规律。易富君等^[4]利用人工免疫系统原理构建了智能化公路隧道群追尾交通事故预警模型。这些研究多集中于单一特征影响因素, 而从宏观角度阐述隧道群交通安全的文献则相对缺乏。根据风险轨迹交叉理论^[5], 风险事故是许多相互联系的事件顺序发展的结果, 因此从宏观角度研究隧道群交通安全状况更符合客观实际。

本文借鉴可变模糊理论中的相对差异函数构建评价模型^[6], 对浙江省某隧道群实际交通状况进行安全性评价, 针对评价结果提出隧道群安全改善对策, 同时将建立的模型与其他交通安全评价模型计算结果进行对比。结果表明, 该模型可应用于高速公

收稿日期: 2011-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(50878157); 浙江省交通厅科技项目(2009H10)

第一作者: 国威(1983—), 博士生, 主要研究方向为道路交通安全。E-mail: guowei940@163.com

通讯作者: 潘晓东(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通安全与环境工程。E-mail: panxd3@163.com

路隧道群交通安全评价。

1 评价模型的建立

1.1 评价指标权重的确定

目前,评价指标的权重多采用层次分析法(AHP),该方法可充分反映专家对某项评价内容的偏好,但在某种程度上过分依赖专家的主观判断。信息熵法可以挖掘数据本身蕴涵的信息,结果相对客观,但却不能反映专家的知识经验和决策者的意见,有时得到的权重可能与实际重要程度不相符,甚至相悖^[7]。综合考虑,本文采用AHP与信息熵综合权重确定方法。

(1) 根据熵的定义,设有 m 个评价指标 n 个评价对象

$$Q = (q_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

对评价矩阵进行归一化处理

$$p_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum_{i=1}^m q_{ij}}$$

(2) 评价指标信息熵的计算

$$H_i = -t \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad t = \frac{1}{\ln n} \quad (2)$$

(3) 计算第 i 个评价指标的熵权

$$e_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (3)$$

(4) 利用AHP法确定评价指标的权重 u_i 。AHP法应用较多,本文不再赘述。

(5) 确定评价指标综合权重

$$\delta_i = \alpha u_i + (1 - \alpha) e_i \quad (4)$$

式中: α 为可变系数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

综合权重随 α 不同取值而改变,当 α 取 1 和 0 时,分别对应 AHP 法和信息熵法。对于 α 如何取值已有很多研究成果^[7-8]。结合以往相关研究成果并咨询有关专家,结合本文评价指标体系的实际情况,取 $\alpha = 0.5$ 。

1.2 相对差异函数确定安全评价隶属度评价模型

1.2.1 相对差异函数

设论域 U 上的一个模糊概念 A , 对 U 中的任意元素 $u (u \in U)$, 在相对隶属度函数连续数轴的任一点上对 u 表示吸引性质 A 的相对隶属度为 $\mu_A(u)$,

对 u 表示排斥性质 A^c 的相对隶属度为 $\mu_{A^c}(u)$, 设 $D(u) = \mu_A(u) - \mu_{A^c}(u)$, $D(u)$ 为 u 对 A 的相对差异度。映射 $D: U \rightarrow [-1, 1], u \mapsto D(u) \in [-1, 1]$, 见图 1, 称为 u 对 A 的相对差异函数^[6]。

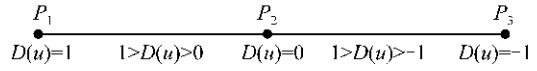


图1 相对差异函数

Fig. 1 Relative difference function

1.2.2 安全评价隶属度函数

评价指标体系中子系统包含 m 个子因素, 每个子因素的论域可以划分为 k 个评价等级。设 $[a, b]_{ij}$ 为标准区间矩阵, $[c, d]_{ij}$ 为变动区间矩阵, M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D(u) = 1$ 的点值。各区间的取值根据具体评价情况确定。

设样本按 m 个指标特征值进行评价, 则 n 个评价样本组成的待评价样本特征矩阵

$$X = (x_{ij}) = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

式中: x_{ij} 为样本 j 指标 i 的特征值, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

将评价因素 j 指标 i 的特征值 x_{ij} 与评价等级 k 指标 i 的 M_{ik} 值进行比较, 若 x_{ij} 落在 M_{ik} 左侧, 隶属度函数

$$\mu_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 + \frac{x_{ij} - a_{ik}}{M_{ik} - a_{ik}} \right), \quad x_{ij} \in [a_{ik}, M_{ik}] \quad (5)$$

$$\mu_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 - \frac{x_{ij} - a_{ik}}{c_{ik} - a_{ik}} \right), \quad x_{ij} \in [c_{ik}, a_{ik}] \quad (6)$$

若 x_{ij} 落在右侧, 隶属度函数

$$\mu_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 + \frac{x_{ij} - b_{ik}}{M_{ik} - b_{ik}} \right), \quad x_{ij} \in [M_{ik}, b_{ik}] \quad (7)$$

$$\mu_A(x_{ij})_n = 0.5 \left(1 - \frac{x_{ij} - b_{ik}}{d_{ik} - b_{ik}} \right), \quad x_{ij} \in [b_{ik}, d_{ik}] \quad (8)$$

1.2.3 综合相对隶属度矩阵

样本 j 指标 i 对各个级别的相对隶属度矩阵

$$P = \mu_A(x_{ij})_k$$

样本 j 对级别 k 的综合相对隶属度

$${}_j p_k = \left\{ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [\delta_i (1 - \mu_A(x_{ij})_k)]^{\frac{\alpha}{b}}}{\sum_{i=1}^m [\delta_i \mu_A(x_{ij})_k]^{\frac{\alpha}{b}}} \right]^{\frac{b}{\alpha}} \right\}^{-1} \quad (9)$$

式中: δ_i 为指标权重; a 为优化准则参数, b 为距离参数, a, b 称为可变模型参数^[6],可根据评价要求进行调整.根据不同参数的组合,并将式(9)归一化得到

$$U_j = ({}_j p'_k) \quad (10)$$

得出样本 j 的级别特征值 $H_j = [1 \ 2 \ \cdots \ k] \cdot U_j$.

2 高速公路隧道群交通安全评价指标体系的建立

评价指标体系考虑到隧道群路段不仅具有一般隧道路段的交通特点,而且具有行车环境频繁变化、

相邻隧道间相互影响的特点.以交通安全评价、隧道交通环境评价等相关研究成果^[9-11]及相关技术规范^[12]为依据,选取影响隧道群交通安全的主要因素有:交通特性、隧道特性、道路状况、隧道环境、自然环境、交通安全设施.对于表征对象相近的因素,选择其中具有代表性且易得到的指标进行评价.共选取18项因素,构建隧道群交通安全评价指标体系.五个评价等级Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ分别表示安全性很好、较好、一般、较差、很差.具体分级标准及赋值参考相关经验数据,如表1所示.

表1 高速公路隧道群交通安全评价指标体系

Tab.1 Traffic safety evaluation index system of expressway tunnel group

一级指标	二级指标	评价等级				
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
交通特性 ^[9] S_1	S_{11} 车道车辆密度/(pcu·(km·ln) ⁻¹)	18	18~25	25~45	45~60	≥60
	S_{12} 大型车占交通比例/%	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
	S_{13} 设计车速/(km·h ⁻¹)	≤80	80~100	100~110	110~120	≥120
	S_{14} 行车视距/m	≥210	160~210	110~160	75~110	≤75
隧道特性 S_2	S_{21} 隧道进出口线形	很好	较好	一般	较差	很差
	S_{22} 隧道长度 ^[12] /m	250	250~500	500~1 000	1 000~3 000	≥3 000
	S_{23} 隧道之间行驶时间/s	≥30	15~30	10~15	5~10	2~5
	S_{24} 隧道纵坡坡度/% 上坡 下坡	0.3~1.0 -1.0~-0.5	1.0~2.0 -2.0~-1.0	2.0~3.0 -3.0~-2.0	3.0~3.5 -3.5~-3.0	≥3.5 ≤-3.5
道路状况 S_3	S_{31} 路面附着系数	≥0.60	0.40~0.60	0.35~0.40	0.30~0.35	≤0.30
	S_{32} 路面排水系统	很好	较好	一般	较差	很差
隧道环境 S_4	S_{41} 隧道烟雾对下游影响	无影响	稍有影响	影响一般	影响较大	影响很大
	S_{42} 隧道噪声污染指数 ^[10]	0.50~0.60	0.60~0.67	0.67~0.75	0.75~1.00	1.00~1.50
	S_{43} 隧道空气污染指数 ^[10]	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2
	S_{44} 相邻隧道间照明过渡	很好	较好	一般	较差	很差
交通安全设施 ^[11] S_5	S_{51} 安全设施有效性	很好	较好	一般	较差	很差
	S_{52} 交通设施认知性	很好	较好	一般	较差	很差
自然环境 S_6	S_{61} 年不良气候天数 ^[9] /d	0~20	20~30	30~40	40~50	≥50
	S_{62} 隧道外侧风风速/(m·s ⁻¹)	≤4	4~8	8~12	12~16	16~20

注:空气污染指数 $P_a = \sum_{i=1}^n \omega_i P_{ai}$, P_{ai} 为第 i 种污染物的污染指数, ω_i 为第 i 种污染物的权重值, n 为参与评级的因子数;噪声污染指数

$P_N = L_{Aep}/L_b$, L_{Aep} 为环境噪声等级, L_b 为基准噪声等级取75 dB^[10]; S_{21} , S_{44} 利用驾驶员生理指标进行评价,试验与评价方法参照文献[2, 13];各项取值为两隧道以及之间连接段道路评价最小值.

3 应用实例

浙江省某高速公路隧道群全长约3.7 km,日均断面车流量为20 000辆.隧道群由隧道1号和隧道2号组成.隧道1号左线长度为940 m,纵坡坡度2.66%.隧道2号左线长度2 445 m,纵坡坡度

$$\delta_i = [\delta_1 \ \delta_2 \ \cdots \ \delta_{18}] = [0.058 \ 5 \ 0.058 \ 5 \ 0.095 \ 7 \ 0.106 \ 9 \ 0.083 \ 5 \ 0.055 \ 7 \ 0.084 \ 7 \ 0.053 \ 8 \ 0.067 \ 8 \ 0.067 \ 8 \ 0.063 \ 7 \ 0.033 \ 1 \ 0.043 \ 3 \ 0.038 \ 8 \ 0.022 \ 1 \ 0.022 \ 1 \ 0.041 \ 5 \ 0.041 \ 5]$$

3.2 构造安全评价隶属度矩阵

在现场测量与试验的基础之上,取各指标的安全评价等级论域为 $U = (\text{很好, 较好, 一般, 差, 很$

—2.65%.两隧道设计为单向行驶双洞双车道,双洞轴线间距为35 m,隧道净宽10.16 m,净高6.98 m,内轮廓采用曲墙三心圆拱.隧道内路面结构采用30 cm级配碎石+24 cm水泥砼路面.

3.1 计算评价指标权重

根据式(1)~(4),计算表1中二级评价指标综合权重

差),样本按五个级别指标标准值区间进行综合评价.指标 S_{21} , S_{44} 通过现场试验结果进行评定:很好(90~100),较好(80~90),一般(70~80),差(60~

70),很差(0~60).构造各级别评价指标标准值区间矩阵 $I_{ab} = [[a, b]_{11}, [a, b]_{12}, [a, b]_{13}, [a, b]_{14}, [a, b]_{15}]$ 和变动区间的范围值矩阵 $I_{cd} = [[c, d]_{11}, [c, d]_{12}, [c, d]_{13}, [c, d]_{14}, [c, d]_{15}]$. 确定区间 $[a, b]$ 中相对隶属度 $\mu_A(x_{ij})_k = 1$ 的点,构造矩阵 $M = (M_1, M_2, M_3, M_4, M_5) = (M_k)$. 将评价样本 j 指标 i 的特征值 x_{ij} 与评价级别 k ($k=1, 2, 3, 4, 5$) 指标 i 的 M_k 值进行比较. 该隧道群评价特征向量 $S_{ij} = [24$
45 88 200 73 1 020 30 -2.65 0.3
92 85 0.69 0.48 85 90 82 33 15]

构造矩阵

$$I_{ab} = \begin{bmatrix} [0, 18] & [18, 25] & [25, 45] & [45, 60] & [60, 70] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [0, 4] & [4, 8] & [8, 12] & [12, 16] & [16, 20] \end{bmatrix}$$

$$I_{cd} = \begin{bmatrix} [0, 25] & [0, 45] & [18, 60] & [25, 60] & [45, 70] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [0, 8] & [0, 12] & [4, 16] & [8, 20] & [12, 20] \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 39 & 42.5 & 57.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 10 & 14 & 16 \end{bmatrix}$$

设置可变参数取值,对每个评价指标的特征值利用式(5)~(10)得出每个评价指标安全隶属度向量与级别特征值.现以评价体系中一级指标“隧道环境”下属的四个二级指标($i=1, 2, 3, 4$)为例进行安全级别评价,其对级别 k 的归一化相对隶属度矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.2386 & 0.6590 & 0.1023 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2661 & 0.6451 & 0.0887 & 0 \\ 0.2393 & 0.4239 & 0.3366 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0952 & 0.6666 & 0.2380 & 0 \end{bmatrix}$$

采用前面计算出的“隧道环境”综合权重 $\delta_i = [0.0637 \ 0.0331 \ 0.0433 \ 0.0388]$,利用式(5)~(10)求得 a, b 四种参数组合下样本对级别 k 的相对隶属度与级别特征值 H ,见表2.

表2 相对隶属度计算结果

Tab.2 Relative membership degree calculation results

k	$a=1, b=1$			$a=1, b=2$			$a=2, b=1$			$a=2, b=2$		
	相对隶属度	归一化结果	H	相对隶属度	归一化结果	H	相对隶属度	归一化结果	H	相对隶属度	归一化结果	H
1	0.0897	0.1993		0.2295	0.1857		0.0897	0.1235		0.0815	0.1029	
2	0.3202	0.3401		0.4611	0.3731		0.3202	0.4409		0.4227	0.5338	
3	0.2764	0.3192	2.4027	0.3582	0.2898	2.4061	0.2764	0.3806	2.3663	0.2376	0.3000	2.3236
4	0.0398	0.1414		0.1869	0.1512		0.0398	0.0548		0.0502	0.0633	
5	0	0		0	0		0	0		0	0	

四种参数组合计算出级别特征值 H 的均值为 2.374 6.安全评价结果为Ⅱ级,较好.采用同样的方法可求出另外五个一级指标的评价结果.

3.3 评价结果分析

通过对安全等级一级和二级指标评价,该隧道群交通安全性平均隶属度向量为 $B = \delta_i \cdot R = [0.1056 \ 0.3962 \ 0.4164 \ 0.0818 \ 0]$,级别特征值 $H = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] \cdot B^T = 2.4744$.该隧道群安全评价等级为Ⅱ级(较好),符合该隧道群交通实际情况.

本文将计算结果与其他高速公路安全评价方法^[9,14]计算结果进行对比,结果如表3.通过比较发现:模糊综合评价计算结果差异稍大,而且在相对隶属度函数构建方面较为复杂,基于差异函数可变模糊评价法与可拓物元法在该问题评价上结果则较为接近.

3.4 隧道群安全改善措施

该隧道群整体评价结果安全等级为Ⅱ级,其中相邻隧道间照明过渡、隧道空气污染指数、隧道进出

表3 各种评价方法的评价结果

Tab.3 Results of other measurement evaluation

评价方法	级别特征值	评价等级	评判结果
模糊综合评价法	2.5524	Ⅱ	较好
基于差异函数可变模糊评价法	2.4744	Ⅱ	较好
未知测度评价法	2.3670	Ⅱ	较好
可拓物元评价法	2.4286	Ⅱ	较好

注:模糊综合评价法隶属度函数采用半梯形与梯形分布.

口线形、隧道外侧风风速评价等级分别为Ⅱ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ,针对该隧道群存在问题提出如下改善措施:

(1) 从降低洞外亮度和增加洞内亮度两方面改善洞口的亮度变化率,如设置渐变式出入口、隧道遮光棚、照明智能控制系统等.

(2) 隧道群为长纵坡和较长纵坡隧道,机动车尾气烟雾较长时间滞留在相对封闭的隧道内不能排出,影响了隧道内能见度,极易引发交通追尾事故.建议加强隧道内通风,如使用LED照明,应充分考虑LED光源的烟雾穿透能力.

(3) 隧道1号在出入口接线段为小半径曲线,造成驾驶员视距不良,应当在隧道中设置相应的线形

引导图案,提醒驾驶员注意前方线形。

(4) 制定不良天气下安全控制系统可行的标准与方案,通过信息采集系统、行车安全控制系统、信息发布系统等控制设备迅速准确地显示相应的限速及控制信号,及时将信息提供给过往驾驶员。引导驾驶员控制车速,警惕侧风和湿滑对行车影响,从而保障行车安全。

4 结语

基于相对差异函数构建了高速公路隧道群交通安全评价模型,并利用该模型对浙江某高速公路隧道群交通安全性进行了评价与分析,同时将该模型与其他几种评价模型计算结果进行对比。结果表明,该模型不仅能够确定安全评价等级,而且具有安全隶属度向量易调节等优点。该评价方法为隧道群交通安全评价与环境改善提供了参考依据,具有较强的理论和实际意义。

隧道路段交通安全影响因素众多,给评价体系的建立与评价指标的选取增加了难度。但随着我国安全评价技术的不断发展和完善,影响隧道群交通安全评价的指标选取将更加科学合理,从而获得更为精确、客观的评价结果。

参考文献:

- [1] 赵伟华,刘浩学,刘玮. 高速公路隧道群出入口段驾驶人视觉特征[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(3):75.
ZHAO Weihua, LIU Haoxue, LIU Wei. Visual features of driver in exit and entrance of tunnel group [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(3):75.
- [2] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应试验[J]. 哈尔滨工业大学学报:自然科学版, 2007, 39(12):1998.
DU Zhigang, PAN Xiaodong, GUO Xuebin. Experimental studies of visual adaptation during freeway tunnel's entrance and exit [J]. Journal of Harbin Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(12):1998.
- [3] 张生瑞,李耘,赵友功. 山区高速公路隧道群交通安全分析方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6):94.
ZHANG Shengrui, LI Yun, ZHAO Yougong. Analysis method for traffic safety of mountainous freeway tunnel groups [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6):94.
- [4] 易富君,韩直,邓卫. 公路隧道群追尾交通事故预警模型[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(11):1634.
YI Fujun, HAN Zhi, DENG Wei. An early-warning model for rear-end accident occurring in highway tunnel group [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(11):1634.
- [5] 王保国,王新泉,刘淑艳. 安全人机工程学[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
WANG Baoguo, WANG Xinquan, LIU Shuyan. Ergonomics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [6] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
CHEN Shouyu. Theory and model of variable fuzzy sets and its application [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009.
- [7] 李旭宏,李玉民,顾政华. 基于层次分析法和熵权法的区域物流发展竞争态势分析[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2004, 34(3):398.
LI Xuhong, LI Yumin, GU Zhenghua. Competitive situation analysis of regional logistics development based on AHP and entropy weight [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2004, 34(3):398.
- [8] Jian M, Fan Z P, Huang L H. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights [J]. European Journal of Operation Research, 1999, 112(2):397.
- [9] 朱兴琳,方守恩,王俊骅. 基于未确知测度理论的高等级公路交通安全评价[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(7):1012.
ZHU Xinglin, FANG Shouen, WANG Junhua. Traffic safety assessment of high-grade highway based on uncertainty measurement theory [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(7):1012.
- [10] 马士宾,张绍阳,王选仓,等. 道路环境影响综合评价指标权重确定方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007, 27(4):37.
MA Shibin, ZHANG Shaoyang, WANG Xuancang, et al. Determining method of index weight for synthetic evaluating road environment [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2007, 27(4):37.
- [11] 戴忱华,郭忠印,马艳. 高速公路隧道运行环境安全评价指标[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010, 38(8):1171.
DAI Youhua, GUO Zhongyin, MA Yan. Safety evaluation index of driving environment of expressway tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(8):1171.
- [12] 中华人民共和国交通部. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
Ministry of Transport of P R China. JTG D70—200 Code for design of road tunnel [S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [13] 潘晓东,杜志刚,杨轸. 动视点指标与隧道进口平曲线半径[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2008, 36(12):1661.
PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Zhen. Relationship between eye movement index and horizontal alignment at entrance of highway tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12):1661.
- [14] 陈毕伍,石宝林,雷茂锦. 基于物元模型的高速公路交通安全评价体系[J]. 长安大学学报:社会科学版, 2008, 10(4):20.
CHEN Biwu, SHI Baolin, LEI Maojin. Traffic safety assessment for expressway based on matter element model [J]. Journal of Chang'an University: Social Science Edition, 2008, 10(4):20.