

文章编号:1000-582X(2011)02-142-07

隧道健康动态评价模型与应用

李 明^{1,2}, 陈洪凯²

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘 要:在隧道健康安全评价的指标体系及其等级标准的基础上,通过规范化处理样本资料库中的元素,消除了指标类型和量纲的影响后,提出用集对分析方法构造可变模糊集的相对差异度函数,合理的确定了各层相关隧道健康评价指标处于级别标准区间的相对隶属函数,采用乘积标度法确定相关指标权重后,得出了隧道健康模糊综合评价动态模型。确定健康级别指标特征值后,结合实例计算证明了文中所提方法的科学性与合理性,有利于推动可变模糊集理论在土木工程领域的进一步发展。

关键词:隧道健康;动态评价;隶属函数;可变模糊集;模糊综合评价

中图分类号:U45

文献标志码:A

Study on dynamic assessment model and its application to tunnel health

LI Ming^{1, 2}, CHEN Hong-kai²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, P. R. China;
2. Institute of Geotechnical Engineer, Chongqing Jiao-tong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: This paper uses normalized elements in the sample database to avoid the influence of index type and dimension. Basing on the index system and grade standard of tunnel health safety assessment, it puts forward the relative difference function of variable fuzzy set by the method of set pair analysis and confirming reasonable the relative membership function of the related health indexes in every level and its level standard interval, and develops the assessment model of tunnel health after confirming the relative indexes right by multiplication scale method. Once confirming the eigenvalue of health levels, some samples are given to verify the scientificity and rationality of the method in, the results show that the calculation process is visual, simple, strong currency, result is reasonable and precision is high. The model can be used for various system assessment problems and it's propitious to promote the more use of variable fuzzy sets in the field of civil engineering.

Key words: tunnel health; dynamic assessment; membership function; variable fuzzy sets; fuzzy comprehensive evaluation

隧道健康,就是指隧道建筑物在受到自然的(如地震、强风、洪水、地下水压力与侵蚀等)、人为的破坏之后,或经过长期使用之后,通过测定其关键性的指标,检查是否受到损伤并判别隧道的安全状况。在允许的条件下,结合损伤识别技术,确定损伤的部

位,评估损伤的程度,预测剩余的有效寿命,其主要任务就是判断结构的损伤程度。

隧道健康状态是一个多层次、多项目的复杂递归分析问题,是一个外延不太明确而内涵很丰富的概念,状态的好坏是模糊的。隧道健康状态涉及的

收稿日期:2010-11-20

基金项目:重庆市建设科研资助项目(200857);重庆交通大学青年基金资助项目(XN(2009)01)

作者简介:李明(1978-),男,博士研究生,主要从事公路隧道与岩土工程研究,(Email)lijianming7805@126.com。

因素也比较复杂,这些因素自身表现为随机性,与健康状态的关系又表现为模糊性。一方面,有些因素不能用精确的数量来描述,只能是模糊概念;另一方面,各种因素的变化与健康状态之间不存在一一对应的函数关系,不可能建立精确的数学模型求解。因此,采用模糊数学的方法对隧道状态进行综合评估比管理部门常采用的人工经验的定性方法更为科学。

另外,在一定时空条件组合下的模糊概念常常具有相对性和动态可变性,使用精确的数学模型往往造成判断上的不准确和失误,不利于工程的可持续性发展。

因此,文中从经典模糊集合论出发,尝试建立隧道健康可变综合诊断方法并加以应用。

1 可变模糊综合评价模型的思想

自 1965 年美国加州大学伯克利分校电气工程的 L. A. Zadeh 教授^[1]首次提出表达事物模糊性的重要概念以来,模糊理论成了一个热门的课题。从工程技术到社会人文科学都可以发现模糊理论研究的踪迹与成果,在隧道工程的营运安全管理、病害评价等领域亦取得了一定的成果^[2-10]。

在模糊数学的众多分支中,中国学者汪培庄^[11]最早提出了模糊综合评判的方法,借助模糊数学的一些概念和原理,对实际问题提供一些评价方法。但是在进行模糊综合评价时,一般很少考虑评价对象的特征值随时间变化的情况,而是把评价指标作为常量进行评价,或者只根据某时间点的 1 组指标值进行评价,然后把评价结果推及整个时间段。这样的评价方法,对于求解某些问题显然是不适合的,因此有必要提出动态模糊综合评价法来更好地处理类似的问题。针对上述静态模糊评判技术的缺点,国内外众多的专家和学者进行了探索与应用,在部分领域取得了一定的成果^[12-20]。中国学者陈守煜教授根据前人的结果和计算理论的不足,提出了可变模糊集理论^[13-15,20],文献^[19,21-22]亦提出了各自的动态评价模型,主要都是从静态的评价向动态的方向转变或过渡,为构建新的动态评价方法提供了模型依据,扩展了应用领域。但是针对隧道与地下工程的动态模糊评价目前尚处于空白状态,笔者在总结前人^[12,15,18,21]建模经验的基础上,尝试提出隧道与地下工程动态模糊综合评价法。

动态综合评价的基本特征是在指标集、评价对象的基础上增加了时间因素,是具有时间、指标、评

价对象的三维综合评价问题,因而处理难度增加。动态模糊综合评价从数学角度看是要通过构造综合评价函数得到评价对象在整个时间段上的模糊综合评价值。从数学原理看,传统静态模糊综合评价是作了 2 次映射。同样的,模糊动态综合评价也可看作是基于映射的数学模型。在这里,首先假设样本资料库中的元素已作了规范化处理,消除了指标类型和量纲的影响。最终得到的动态综合评价值,构成一维空间(一维直线)。从函数角度看,动态评价是将三维空间中的点映射到一维直线上来。

2 可变模糊综合评价模型的基本理论

2.1 可变模糊集理论

定义 1 设论域 U 上的对立模糊概念(事物、现象),以 \underline{A} 与 \underline{A}^c 表示吸引与排斥性质,对 U 中的任意元素 $u, u \in U$,在参考连续统区间 $[0, 1]$ (对 \underline{A})与 $[0, 1]$ (对 \underline{A}^c)的任一点上,吸引与排斥的隶属度分别为 $\mu_{\underline{A}}(u)$ 、 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$,且 $\mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1$ 。令

$$\underline{A} = \left\{ u, \mu_{\underline{A}}(u), \mu_{\underline{A}^c}(u) \mid u \in U \right\}, \quad (1)$$

$$\text{满足 } \mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1, 0 \leq \mu_{\underline{A}}(u) \leq 1,$$

$$0 \leq \mu_{\underline{A}^c}(u) \leq 1, \quad (2)$$

式中: \underline{A} 称为 U 的对立模糊集,如图 1 所示。 M 为参考连续统区间 $[0, 1]$ (对 $\mu_{\underline{A}}(u)$)与 $[0, 1]$ (对 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$)的中点,即 $\mu_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}^c}(u) = 0.5$ 。

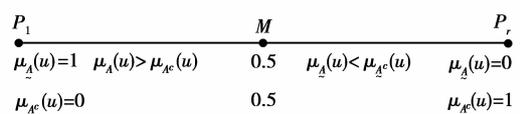


图 1 对立模糊集 \underline{A} 示意图

定义 2 设

$$D_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}}(u) - \mu_{\underline{A}^c}(u), \quad (3)$$

$D_{\underline{A}}(u)$ 称为 u 对 \underline{A} 的相对差异度,如图 2 所示。

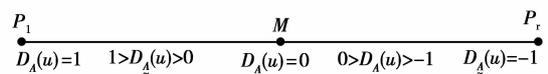


图 2 相对差异函数示意图

定义 3

$$E_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}^c}(u) / \mu_{\underline{A}}(u), \quad (4)$$

$E_{\underline{A}}(u)$ 称为 u 对 \underline{A} 的相对比例度,如图 3 所示。

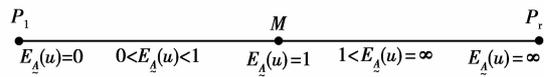


图 3 相对比例函数示意图

定义 4 令

$$\begin{aligned} \tilde{V} &= \{(u, E) \mid u \in U, E_A(u) \\ &= \mu_{\tilde{A}^+}(u)/\mu_{\tilde{A}}(u), E \in [0, \infty]\}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$A_+ = \{u \mid u \in U, 0 < E_A(u) < 1\}, \quad (6)$$

$$A_- = \{u \mid u \in U, 1 < E_A(u) < \infty\}, \quad (7)$$

$$A_0 = \{u \mid u \in U, E_A(u) = 0\}, \quad (8)$$

$$A_* = \{u \mid u \in U, E_A(u) = \infty\}, \quad (9)$$

式中: \tilde{V} 称为模糊可变集合; A_+ 、 A_- 、 A_0 、 A_* 分别称为模糊可变集合 \tilde{V} 的吸引(为主)域、排斥(为主)域、渐变式质变界和突变式质变界。

定义 5 设 C 是模糊可变集合 \tilde{V} 的可变因子集, 有

$$C = \{C_A, C_B, C_C\}, \quad (10)$$

式中: C_A 为模糊可变模型集; C_B 为可变模型参数集; C_C 为除模型及其参数外的其它可变因子集。令

$$\begin{aligned} A^- = C(A_+) &= \{u \mid u \in U, 0 < D_A(u) \leq 1, \\ &-1 < D_A(u) < 0\}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A^+ = C(A_-) &= \{u \mid u \in U, -1 \leq D_A(u) < 0, \\ &0 < D_A(u) \leq 1\}, \end{aligned} \quad (12)$$

统一称为模糊可变集合 \tilde{V} 关于可变因子集 C 的可变域。令

$$\begin{aligned} A^+ = C(A_+) &= \{u \mid u \in U, 0 < D_A(u) < 1, \\ &0 < D_A(C(u)) < 1\}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} A^- = C(A_-) &= \{u \mid u \in U, -1 \leq D_A(u) < 0, \\ &-1 \leq D_A(C(u)) \leq 0\}, \end{aligned} \quad (14)$$

统一称为模糊可变集合 \tilde{V} 关于可变因子集 C 的变量域。

2.2 相对差异函数模型

设 $X_0 = [a, b]$ 为实轴上模糊可变集合 \tilde{V} 的吸引域, 即 $0 < D_A(u) \leq 1$ 区间, $X = [c, d]$ 为包含 X_0 ($X_0 \subset X$) 的某一上、下界范围域区间。如图 4 所示。

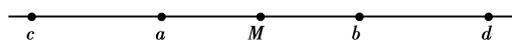


图 4 点 x 与区间 X_0 、 X 的位置关系图

根据模糊可变集合 \tilde{V} 的定义可知 $[c, a]$ 和 $[b, d]$

均为 \tilde{V} 的排斥域, 即 $-1 \leq D_A(u) < 0$ 区间。设 M 为吸引域区间 $[a, b]$ 中 $D_A(u) = 1$ 的点值, 按物理分析确定。 x 为 X 区间内的任意点的量值, 则 x 落入 M 点左侧时, 其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^\beta, & x \in [a, M] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^\beta, & x \in [c, a] \end{cases} \quad (15)$$

x 落入 M 点右侧时, 其相对差异函数模型为

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^\beta, & x \in [M, b] \\ D_A(u) = -\left(\frac{x-b}{d-a}\right)^\beta, & x \in [b, d] \end{cases} \quad (16)$$

式(15)、式(16)中 β 为非负实数, 通常可取 $\beta=1$, 即相对差异函数模型为线性函数。 $D_A(u)$ 确定以后, 根据公式(14)可求相对隶属度 $\mu_A(u)$ 。

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = [1 + D_A(u)]/2, \quad (17)$$

显然, 有

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = 0, x \notin [c, d]. \quad (18)$$

2.3 模糊可变评价模型

在对立模糊集定义概念下模糊可变评价模型为

$$\begin{cases} \mu_{\tilde{A}}(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_g}{d_b}\right)^\alpha} \\ d_g = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (1 - \mu_{\tilde{A}}(u)_i)]^p \right\}^{\frac{1}{p}} \\ d_b = \sum_{i=1}^m [(\omega_i \mu_{\tilde{A}}(u)_i)^p]^{\frac{1}{p}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: α 为模型优化准则参数, p 为距离参数, d_g 、 d_b 分别为参考连续统任一点指标 i 特征值的相对隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(u)_i$ 、 $\mu_{\tilde{A}^+}(u)_i$ 与左、右极点的广义权距离。

在通常情况下, 模型中 α 、 p 可有 4 种组合:

$$\alpha = 1, p = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases}, \alpha = 2, p = \begin{cases} 1 \\ 2 \end{cases}. \quad (20)$$

2.4 模糊可变评价方法的求解步骤

已知待评价样本的 m 个指标特征值向量, 依据 c 个级别的标准值区间矩阵为 I_{ab} , 下面根据提出的可变模型对样本进行评价, 求解步骤如下:

1) 根据已知的 c 个级别的标准区间矩阵 I_{ab} , 构造变动区间的范围值矩阵 I_{cd} 。

2) 依据对指标 i 的物理分析与实际情况, 确定指标 i 级别 h 的 M 矩阵。

3) 确定指标权向量。

4) 根据式(15)~(18), 以及矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 、 M 中的对应数据计算指标 i 级别 h 的相对隶属度矩阵。

5)利用模型公式(19)计算样本对级别 h 的综合相对隶属度向量 $\mu_A(u)$ 。

6)利用级别特征值公式计算样本的级别特征值。

7)根据模糊可变集合关于变换模型,变换模型中参数(主要是指标权向量)有关原理,重复步骤 3)~6),得到样本级别特征值 H 的变动范围,分析样本级别特征值 H 的稳定性,最终确定样本的评定级别,从而可以提高评价结果的可靠性,提高工程质量评价结果的可信度,文中的隧道健康等级划分为健康、亚健康、病害和病危 4 个等级,即 $c=4$,划分的标准区间值如表 1 所示。由以上的分析可知,模糊可变识别模型是一个变化的模型。

表 1 健康等级赋值表

健康等级	健康	亚健康	病害	病危
健康值	4.0~3.5	3.5~2.5	2.5~1.5	1.5~0

3 计算分析

结合文献[23-24]的调查分析资料,并以“八一”隧道 0+130~290 段为例,运用可变模糊综合诊断方法进行该段隧道的健康状态评价,随后对隧道的全段进行评价。

根据现场调查与检测结果,汇总于表 2。结合相关的指标判定标准,汇总于表 3 中。

表 2 “八一”隧道 0+130~290 段指标实测值

裂缝		渗漏水			结构劣化			
长度 /m	宽度 /mm	深度 /m	发展趋势	发展方向	PH 值	冻害	实际强度 /MPa	设计强度 /MPa
13	10.25	0.4	有	多向	5.5	无	15	25
结构劣化				背后空洞		结构变异		
实际厚度/cm	设计厚度/cm	钢筋腐蚀/%	碳化深度	深度 /mm	纵向长度/m	变形量	变形速率	
97	100	10.5	0.4	1 120	3.83	0.5	0.1	
起层、剥落								
掉落直径/mm		掉落深度/mm		可能掉落部位		掉落可能性		
250		350		拱部		有		

表 3 隧道与地下工程健康指标等级评价标准

健康评价指标	健康等级				
	健康	亚健康	病变	病危	
裂 缝	长度/m	0~0.001	0.001~5	5~10	>10
	宽度/mm	0~0.2	0.2~3	3~5	>5
	深度	0~1/3	1/3~1/2	1/2~2/3	2/3~1
	延展性	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
	发展方向	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
渗漏水	渗漏状态	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
	冻害	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
	PH 值	6.1~14	5.1~6.1	4.1~5.1	4.1~0
结 构 劣 化	砼强度	0.90~1	0.75~0.90	0.6~0.75	0.6~0
	支护厚度	0.85~1	0.75~0.85	0.65~0.75	0.65~0
	钢材腐蚀/%	0~5	5~10	10~25	25~100
	碳化深度	0~1/10	1/10~1/2	1/2~2/3	2/3~1

续表

健康评价指标		健康等级			
		健康	亚健康	病变	病危
背后	空洞深度/mm	0~0.001	0.001~100	100~500	>500
空洞	纵向长度/m	0~0.001	0.001~3	3~5	>5
结构	变形量	0~1/8	1/8~1/4	1/4~3/4	3/4~1
变异	变形速率	0~0.001	0.001~0.01	0.01~0.1	>0.1
起层、 剥落	掉落可能性	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
	掉落部位	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1
	掉落深度/mm	0~6	6~12	12~25	>25
	掉落直径/mm	0~50	50~75	75~150	>150

根据表3中隧道与地下工程健康指标等级评价标准可以构造模糊可变集合评价的各项参数(a 、 b 、 c 、 d 、 M)取值矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 和 M 。 $I_{ab} = ([a, b]_{ih})$, $i=1, 2, \dots, 20$ 为指标数量, $h=1, 2, \dots, 4$ 为质量评价等级数目, 矩阵中 $[a, b]_{ih}$ 由对应的指标和等级定量判定标准范围值构成。 $I_{cd} = ([c, d]_{ih})$, $i=1, 2, \dots, 20$ 为指标数量, $h=1, 2, \dots, 4$ 为质量评价等级数目, 矩阵中 $[c, d]_{ih}$ 由对应的指标和等级定量判定标准范围值的排斥域构成。由表2可以看出来, 有2种不同类型的指标: 1) 指标标准特征值或特征值区间随级

别 h 的增加而减小; 2) 指标标准特征值或特征值区间随级别 h 的增加而减小。

对于具体的检测与调查结果, 部分指标为定性指标, 其评价语气带有一定的模糊性和人为认识方面的差异, 应该加以注意。文献[14-15]给出了重要性语气算子与模糊标度、相对隶属度之间的关系, 结果列于表4, 可以根据具体的结果加以直接选用, 避免了复杂的计算结果, 文中部分定性指标在可变模糊综合诊断方法的取值直接取自表4。

表4 语气算子与模糊标度值、相对隶属度间的关系

语气算子	同样	稍稍	略微	较为	明显	显著	十分	非常	极其	极端	无可比拟
模糊标度值	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
相对隶属度	1	0.818	0.667	0.538	0.429	0.333	0.250	0.176	0.111	0.053	0

对于指标特征值为区间的指标, 可以直接应用前述的方法, 确定这些指标的标准差异函数 $D_{\tilde{A}}(u)_{ih}$ 和相对隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(u)_{ih}$, 而对于指标特征值为非区间值的指标, 其相对隶属度函数无需计算, 直接根据特征值对应级别的相对隶属度为1, 对其余各个级别的相对隶属度为0。

得到矩阵 I_{ab} 、 I_{cd} 和 M 以后, 根据实测与调查结果, 判断诊断指标 x 落入点 M 的左侧还是右侧, 据此适当选用式(22)或式(23), 用以计算诊断指标对等级标准的差异函数 $D_{\tilde{A}}(u)_{ih}$, $i=1, 2, \dots, 20$ 为指标数量, $h=1, 2, 3, 4$ 为质量评价等级数。随后由式(24)或式(25)可以得到指标 $i=1, 2, \dots, 20$ 对级别 $h=1, 2, 3, 4$ 的相对隶属度 $\mu_{\tilde{A}}(u)_{ih}$ 。将所有指标的相对隶属度值构成的数据以 20×4 的矩阵形式表示

出来, 以方便后续步骤的计算。具体的计算过程从略, 计算的结果如表5所示。

由表5可以看出, 在不同的参数组合下, “八一”隧道0+130~290段的健康等级均为病害等级, 结构存在较为严重的破坏, 急需整治, 这与现场实测结果相符。

表5 α 、 p 不同组合状态下评判结果

p	α	
	1	2
1	1.871 9	2.062 2
2	1.628 6	1.654 5

“八一”隧道其它各段的评判结果如表6所示。

从计算的结果可以看出,该隧道共有 378 m 处于亚健康状态,占隧道总长的 65.40%,处于健康状态的地段共有 40 m,占隧道总长的 6.92%,而处于病害状态的地段共计 160 m,占隧道总长的 27.68%,虽然处于亚健康状态的隧道段较长,但是各段的真实状态还是有差异的。+0~+055 和 +385~+578 段处于较为稳定的亚健康状态,健康值从 2.993 2~

3.120 4,而+055~+085、+085~+130 和+290~+345 段的健康值处于 2.529 7~2.965 0 之间,均值接近病害评判上限值 2.5,一旦参数变化,这些地段将会处于病害阶段。处于健康状态的+345~+385 段的健康值为 3.254 1~3.965 3 之间,说明该段部分结构体已经处于亚健康状态,需要及时的维护与保养。

表6 “八一”隧道各段健康状态动态模糊综合评判结果

桩号	$\alpha=1, p=1$	$\alpha=1, p=2$	$\alpha=2, p=1$	$\alpha=2, p=2$	判定结果
+0~+055	3.016 1	3.120 4	3.085 1	3.101 0	亚健康
+055~+085	2.758 5	2.619 7	2.671 7	2.672 2	亚健康
+085~+130	2.721 9	2.890 7	2.776 7	2.656 0	亚健康
+130~+290	1.871 9	2.062 2	1.628 6	1.654 5	病害
+290~+345	2.653 5	2.529 7	2.965 0	2.631 4	亚健康
+345~+385	3.552 6	3.254 1	3.965 3	3.802 3	健康
+385~+578	3.059 3	2.994 0	3.000 1	2.993 2	亚健康

另外需要提及的是,在相关部门的重视与组织下,“八一”隧道与“向阳”隧道一起进行了整治,现在已经排除了安全隐患,保证了行车与行人的安全。

4 结 语

文中提出了一种以模糊集理论为基础的隧道动态评价模型,详细给出了模型的计算理论推导过程和计算步骤,并应用该模型对重庆市“八一”隧道的健康状态进行了综合评价,评价结果与实际结果相符,证明了该模型的科学与合理性。另外,该模型计算过程直观、简便、通用性强,可适用于已知等级评价标准的各种系统综合评价问题。

由于隧道健康评价体系是一个多维因素的综合体,对其健康状态的评价须经过从单因素的小综合到多因素的大综合,这就决定了常规的单因素评价往往顾此失彼,无法得出以单个隧道(或隧道群)为单位的隧道健康的综合评价结果。应用模糊可变集合,能科学、合理地确定与隧道健康状态相关的各个研究对象(或指标)处于级别区间的隶属度,并且运用人们的经验与知识,反复就关于模糊概念及其重要性进行二元比较与量化,合理地确定出各个指标(或研究对象)的权重,从而实现对隧道健康从定性到定量的综合集成评价。

参考文献:

[1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and control,

1965,8(3):338-353.

[2] 顾吟,杨建宏,梁之坚. 城市隧道运行管理模糊综合评价方法[J]. 市政技术,2006,24(5):311-313,316.

GU YIN, YANG JIAN-HONG, LIANG ZHI-JIAN. A fuzzy comprehensive evaluation method of city tunnel operation management [J]. Municipal Engineering Technology, 2006,24(5):311-313,316.

[3] 贺志勇,张娟,王存宝,等. 高速公路隧道安全性的综合评价[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2008,36(2):58-63.

HE ZHI-YONG, ZHANG JUAN, WANG CUN-BAO, et al. Comprehensive evaluation of expressway tunnel safety[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 36(2):58-63.

[4] 罗玉屏,高桂凤,武红丽. 公路隧道交通安全模糊评判体系研究[J]. 石家庄铁道学院学报,2006,19(3):75-79.

LUO YU-PING, GAO GUI-FENG, WU HONG-LI. Study on fuzzy evaluating system of traffic safety in highway tunnel[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute,2006,19(3):75-79.

[5] 杜益文,韩直,杭力,等. 公路隧道安全模糊评价方法[J]. 公路交通技术,2006(4):120-123.

DU YI-WEN, HAN ZHI, HANG LI, et al. Fuzzy evaluation method for road tunnel safety[J]. Technology of Highway and Transport, 2006(4):120-123.

[6] 刘彤,谢永利,李宁军. 祈家大山隧道病害治理方案数

- 值模拟研究[J]. 公路, 2005(8):284-287.
- LIU TONG, XIE YONG-LI, LI NING-JUN. Research on numerical simulation of damage treatment scheme of Qijia mountain tunnel [J]. Highway, 2005(8):284-287.
- [7] 许宏科, 王维敏, 王世伟. 高速公路隧道运营管理模糊综合评价[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2005, 37(3):381-385.
- XU HONG-KE, WANG WEI-MIN, WANG SHI-WEI. Fuzzy evaluation on the operation management of highway tunnel[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & technology : Natural Science Edition, 2005, 37(3):381-385.
- [8] 张志霞, 陈永锋, 邵必林. 层次模糊决策模型在公路交通网综合评价中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004, 36(1):75-78.
- ZHANG ZHI-XIA, CHEN YONG-FENG, SHAO BILIN. The use of level fuzzy decision model for the general evaluation of road traffic web [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & technology, 2004, 36(1):75-78.
- [9] 黄波, 吴江敏. 运营隧道状态的综合评价[J]. 世界隧道, 2000, 1(1):58-60.
- HUANG BO, WU JIANG-MIN. The general evaluation of operational tunnels[J]. World Tunnel, 2000, 1(1):58-60.
- [10] 李晓英, 彭立敏, 黄娟. 铁路隧道健康状态模糊评价体系研究[J]. 采矿技术, 2008, 8(5):54-56.
- LI XIAO-YING, PENG LI-MIN, HUANG JUAN. Study of assessment and system for health condition of railway tunnel[J]. Mining Technology, 2008, 8(5):54-56.
- [11] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海:上海科技出版社, 1983.
- [12] 陈宝峰, 王以廉. 动态模糊综合评价法及其应用[J]. 北京农业工程大学学报, 1991, 11(3):22-24.
- CHEN BAO-FENG, WANG YI-LIAN. The dynamic fuzzy synthetically evaluating method and its application [J]. Journl of Beijing Agricultural Engineering University, 1991, 11(3):22-24.
- [13] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型—模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2):308-312.
- CHEN SHOU-YU. Theory and model of engineering variable fuzzy set-mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2):308-312.
- [14] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4):431-435.
- CHEN SHOU-YU, LI MIN. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4):431-435.
- [15] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [16] 彭补拙, 窦贻俭, 张燕. 用动态的观点进行环境综合质量评价[J]. 中国环境科学, 1996, 16(1):16-19.
- PENG BU-ZHUO, DOU YI-JIAN, ZHAN YAN. Attempt to evaluate the environmental comprehensive quality with a dynamic viewpoint[J]. China Environmental Science, 1996, 16(1):16-19.
- [17] 袁大祥, 严四海. 论动态安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(5):38-40.
- YUAN DA-XIANG, YAN SI-HAI. Discussion on dynamic safety evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(5):38-40.
- [18] 孙志翔, 金保升, 周山明, 等. 动态模糊综合评价在烟气脱硫技术优选中的应用[J]. 锅炉技术, 2007, 38(3):72-76.
- SUN ZHI-AO, JIN BAO-SHENG, ZHOU SHAN-MING, et al. Application of dynamic fuzzy comprehensive evaluation in optimization of flue gas desulphurization technique [J]. Boiler Technology, 2007, 38(3):72-76.
- [19] POEHNER M E. Dynamic assessment: a vygotskian approach to understanding and promoting L2 development[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [20] CHEN S, FU G. Combining fuzzy iteration model with dynamic programming to solve multiobjective multistage decision making problems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 152(3):499-512.
- [21] 王璐, 庞皓, 何平. 一种新的动态综合评价模型及应用[J]. 统计与决策, 2006(24):28-30.
- WANG LU, PANG HAO, HE PING. A new dynamic fuzzy comprehensive evaluation model and application [J]. Statistics and Decision, 2006(24):28-30.
- [22] ANEZIRIS O N, PAPAZOGLOU I A. Fast markovian method for dynamic safety analysis of process plants [J]. Journal of Prevention in the Process Industries, 2004, 17(1):1-8.
- [23] 重庆市“八一”隧道试验检验报告[R]. 重庆:重庆公路工程检测中心, 2005.
- [24] 重庆市“向阳”隧道试验检验报告[R]. 重庆:重庆公路工程检测中心, 2005.