

# 沥青路面未确知测度结构优选模型

俞竞伟, 黄晓明, 廖公云

(东南大学 交通学院, 南京 210096)

**摘要:**高速公路投资额巨大,需要科学的路面结构选择方法。针对高速公路沥青路面结构方案评价过程中存在着许多不确定的知识和信息,应用未确知测度数学方法建立了高速公路沥青路面结构优选评价模型,该方法对评价空间实现了有序分割,通过建立多指标综合测度评价矩阵对不同方案进行识别排序。应用该模型对 3 种典型路面结构进行了综合评价。结果表明,采用该方法得到的评价结果能够较为客观地反映沥青路面结构的综合性能。

**关键词:**未确知测度;沥青路面;结构类型;置信度

**中图分类号:**U416.02 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)04-0058-04

## Optimal Selecting Model of Uncertainty Measurement for Asphalt Pavement Structure

YU Jing-wei, HUANG Xiao-ming, LIAO Gong-yun

(Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, P. R. China)

**Abstract:** Scientific method was necessary for road decision-maker to select high cost-effect ratio pavement structure scheme. According to the fact that many uncertain knowledge and information existed in the process of evaluating the expressway asphalt pavement structure schemes, an evaluation model of pavement structure schemes based on uncertainty measurement was put forward; This method implemented ordered division of assessment space, and could recognize and rank different schemes by comprehensive measurement matrix of multiple indexes. three typical design programs of expressway asphalt pavement structure were evaluated by that model. It is shown that the assessment can objectively reflect the comprehensive performance of asphalt pavement structure, which provides a new method and way for evaluation of pavement structure schemes.

**Key words:** uncertainty measurement; asphalt pavements; structure scheme; believing degree.

随着经济的飞速发展,高速公路在现代社会生活中的作用越来越大。建立一种合理的、行之有效的道路结构评价方法,优选技术可行、合理、经济的道路结构方案,使道路能够有效地发挥作用,促进经济发展具有十分重要的现实意义。20 世纪 60 年代以来,随着人们对路面性能认识的提高,对方案的社会效益和环境保护等方面的逐步重视,国内外道路

研究者先后提出了层次分析法<sup>[1]</sup>和模糊综合评判方法(可统称为专家决策方法)<sup>[2-3]</sup>等比较典型的道路选型评价方法,其充分发挥了专家在路面方案选型方面的作用,取得了一定的效果,但这些选型方法对专家的主观依赖性太大,对道路性能受客观因素影响状况反映不够,因而迫切需要一种既能发挥专家决策方法的优点,又能充分考虑道路性能实际状况,使评判过程更加科学化的选型方法。

收稿日期:2010-01-06

基金项目:国家 863 计划资助项目(2006AA11Z110);西部交通建设科技项目(20063100004)

作者简介:俞竞伟(1976-),男,博士生,主要从事道路工程研究,(E-mail)fishq123@163.com。

黄晓明(联系人),男,博士,教授,博士生导师,(E-mail)huangxm@seu.edu.cn。

该文从道路结构使用性能的的相关影响因素出发,运用未确知测度方法<sup>[4-5]</sup>,建立基于未确知测度模型<sup>[6]</sup>对路面结构进行综合评价,该模型在未确知测度空间的基础上,充分利用各影响因素的客观数据,根据评价空间的有序性,建立识别准则,并进行优劣排序,综合考虑了各影响因素的性质及重要程度对路面结构的影响,为路面结构评价提供了一种新的方法。

## 1 未确知测度模型

### 1.1 空间的确定

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  是路面结构方案的  $n$  个待评价的样本,由这些样本组成的集合  $X$  称作对象的样本空间,记为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, x_i \in X$ ; 对每个方案有  $m$  个评价指标,构成指标空间  $Y$ ,记为  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}, y_m \in Y$ ; 方案  $x_i$  的第  $j$  个指标  $y_j$  的测量值为  $x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ , 对每个测量值有  $p$  个评价等级  $z_1, z_2, \dots, z_p$ , 则称  $U$  为评价空间,表示为  $U = \{z_1, z_2, \dots, z_p\}, z_p \in U$ 。

### 1.2 单因素未确知测度

设  $x_{ij}$  表示方案  $x_i$  关于  $y_j$  的测量值,当方案  $x_i$  关于指标  $y_j$  的观测值  $x_{ij}$  不同时,则该指标使  $x_i$  处于各评价等级的程度也不同,用  $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in z_k)$  表示  $x_{ij}$  属于第  $k$  个评价等级  $z_k$  的程度。由于  $\mu_{ijk}$  是对程度的一种测量结果,作为一种测度它必须满足:

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

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

$$\mu(x_{ij} \in \bigcup_{k=1}^k z_k) = \sum_{k=1}^k \mu(x_{ij} \in z_k) \quad (3)$$

$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$ 。

其中,式(2)为归一性,式(3)为可加性,满足式(1)~式(3)条件的  $\mu$  为未确知测度,简称测度。其单因素测度评估矩阵如式(4)所示:

$$(\mu_{ijk})_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

该矩阵的第  $j$  个行向量  $(\mu_{ij1}, \mu_{ij2}, \dots, \mu_{ijp})$  为  $x_{ij}$  的单因素测度评估向量<sup>[7]</sup>。

### 1.3 指标权重的确定

在给定指标值  $x_{ij}$  及评价等级后,应当给定各个指标权重。用  $W_j$  表示指标  $y_j$  对于其它指标的相对重要程度,  $W_j$  满足:

$$0 \leq W_j \leq 1, \sum_{j=1}^m W_j = 1 \quad (5)$$

称  $W_j$  为指标  $y_j$  的权重。称  $W = (W_1, W_2, \dots, W_m)$  为指标权重向量。

### 1.4 多因素综合未确知测度

设  $\mu_{ik} = \mu(x_i \in z_k)$  表示  $x_i$  属于第  $k$  个等级的程度,则:

$$\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m W_j \mu_{ijk}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

由于  $0 \leq \mu_{ik} \leq 1$ , 并且  $\sum_{k=1}^p \mu_{ik} = \sum_{k=1}^p \sum_{j=1}^m W_j \mu_{ijk} = \sum_{j=1}^m (\sum_{k=1}^p \mu_{ijk}) W_j = \sum_{j=1}^m W_j = 1$ , 所以式(6)确定的  $\mu_{ik}$  是  $x_i$  的测度,称

$$(\mu_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{np} \end{bmatrix} \quad (7)$$

为多指标综合测度评价矩阵。

根据综合测度评价矩阵,可以识别  $x_i$  属于哪一个评价等级  $z_k$ <sup>[8]</sup>。

### 1.5 识别与排序

若  $z_1 > z_2 > \dots > z_p$ , 称  $z_1, z_2, \dots, z_p$  是评估空间  $U$  上的有序分割类,当划分有序时,可采用置信度识别准则。设置信度  $\lambda > 0.5$  (常取 0.6 或 0.7), 令:

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

则判定待优选方案  $x_i$  属于第  $k_0$  个评估等级  $z_{k_0}$ 。

当  $z_1 > z_2 > \dots > z_p$  时,  $z_k$  的分值大于  $z_{k+1}$  的分值,令  $p+1-k$  表示评价类  $z_k$  的分值。令:

$$q_{x_i} = \sum_{k=1}^p (p+1-k) \mu_{ik}, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

则  $q_{x_i}$  表示  $x_i$  的得分,可按  $q_{x_i}$  的大小对  $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  行优劣排序<sup>[9]</sup>。

## 2 实例分析

### 2.1 沥青路面结构设计方案及影响因素的确定

选取中国道路路面结构方案中具有代表性的 AC、OGFC 和 SMA 3 种典型路面结构形式<sup>[10-11]</sup> 来进行分析。选取道路路面结构类型时主要是考虑路面结构的使用性能<sup>[12]</sup>, 目前路面使用性能主要考虑路面结构的结构性能(包括高温稳定性<sup>[13]</sup>、低温抗裂性<sup>[14]</sup> 和水稳定性<sup>[15]</sup>) 以及路面表面性能(包括平整度、抗滑性能<sup>[16]</sup>、噪声性能<sup>[17]</sup>、防排水性能)。

选择中国从事高速公路管理、设计、施工、养护、监理等工作的专家及相关人士分别进行了沥青路面结构性能和表面性能权重的调查以及 3 种路面结构的各单因素评价的评分调查,调查结果如表 1 所示。

表 1 3 种路面结构使用性能指标评价表

路面结构形式	高温稳定性	低温抗裂性	水稳定性	平整度	抗滑性能	噪声性能	防排水性能
AC	良	良	良	优	良	中	良
OGFC	良	中	良	优	优	优	优
SMA	优	优	优	优	优	良	良

2.2 空间的确定

由已知条件知  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ ;  $U = \{z_1, z_2, z_3, z_4\}$ , 其中  $z_1$  为优,  $z_2$  为良,  $z_3$  为中,  $z_4$  为差。评价指标  $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7\} = \{$ 高温稳定性, 低温抗裂性, 水稳定性, 平整度, 抗滑性能, 噪声性能, 防排水性能 $\}$

2.3 确定单指标测度矩阵

按表 1 数据建立指标  $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7\}$  的单指标未确知测度函数如图 1 所示。

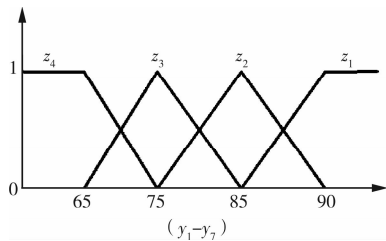


图 1 单指标未确知测度函数

根据表 1 和图 1 得出各路面结构方案的单指标测度评价矩阵。

$$x_1 : (\mu_{1jk})_{7 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0.0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0.0 \\ 0.6 & 0.1 & 0.3 & 0.0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$x_2 : (\mu_{2jk})_{7 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0.0 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$x_3 : (\mu_{3jk})_{7 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.4 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.7 & 0.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.4 确定多指标综合测度评价矩阵

在确定多指标综合测度评价矩阵之前首先要确定权重向量,其确定方法为:由专家对前述使用性能各单项影响因素按很重要、重要、一般、不重要 4 个等级进行打分(对应的分值分别为 7、5、3、1),然后根据统计结果计算各单因素的权重,得到各指标关于  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  的权重向量  $W = (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7) = (0.197 \ 9, 0.162 \ 7, 0.206 \ 6, 0.116 \ 4, 0.122 \ 4, 0.077 \ 6, 0.116 \ 4)$ 。由式(6) - (7)可得多指标综合测度评价矩阵:

$$(\mu_{ik})_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.324 \ 9 & 0.386 \ 7 & 0.268 \ 2 & 0.043 \ 2 \\ 0.464 \ 0 & 0.321 \ 2 & 0.157 \ 2 & 0.057 \ 6 \\ 0.605 \ 3 & 0.287 \ 5 & 0.084 \ 0 & 0.023 \ 3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.5 识别及排序

根据以上综合测度矩阵,由式(8)可以得出各方案的等级累计,见表 2。取置信度  $\lambda = 0.6$ , 根据综合测度矩阵,对评价对象 AC、OGFC 和 SMA 进行识别和排序得  $SMA \in z_1$ ;  $AC \in z_2$ 、 $OGFC \in z_2$ 。

由式(9)可得  $q_{x_i} = (q_{x_1}, q_{x_2}, q_{x_3}) = (3.039 \ 3, 3.191 \ 6, 3.475)$ ,则由此我们可以得到方案的得分顺序: $SMA > OGFC > AC$ 。因此可以得到结论:从综合性能来看,SMA 路面结构得分最高。

应当指出的是,虽然 SMA 综合性能得分最高,但另外 2 种路面结构在单项性能指标方面也有自己的优势,如 AC 平整度指标较优,而 OGFC 在抗滑性能、防排水性能、噪声性能几个指标上较为突出。中国地域广阔,不同地区工程环境差异较大,因此各地可在该模型的基础上结合当地实际情况来进行道路结构方案的选择。

表 2 各方案的等级累计

方案	等级累计			
	$z_4$	$z_3$	$z_2$	$z_1$
AC	1.000	0.979 8	0.711 6	0.324 9
OGFC	1.000	0.942 4	0.785 2	0.464 0
SMA	1.000	0.976 8	0.892 8	0.605 3

### 3 结语

针对路面结构类型方案选择时具有因素多、难量化,评估空间是有序分割类等特点,提出了一个基于未确知测度的沥青路面结构类型方案评价模型,该模型通过属性运算,将复杂的多属性评价问题转化为定量评价,克服了传统模糊评估中模糊集“取大”、“取小”运算损失信息,以及“分级”不清,评价不合理等情况。决策者不仅可以判定不同沥青路面结构所属的等级,也可以得到相应各结构方案的排序,充分利用了评价对象的客观数据和人们的主观认知,达到了主客观的统一。

#### 参考文献:

- [1] 支喜兰,王秉纲. 公路路面结构的经济评价与类型选择[J]. 西安公路学院学报, 1995, 15(1): 21-26.  
ZHI XI-LAN, WANG BING-GANG. Economic evaluation and type selection of highway pavement structures[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1995, 15(1): 21-26.
- [2] 黄卫,刘锋,陈荣生. 高等级公路路面类型选用研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 7-12.  
HUANG WEI, LIU FENG, CHEN RONG-SHENG. Research on selection of pavement structure type of expressway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 7-12.
- [3] 黄卫,刘锋,陈荣生. 模糊数学在高等级公路路面选型中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 1999(11): 71-80.  
HUANG WEI, LIU FENG, CHEN RONG-SHENG. Application of fuzzy mathematics in pavement structure type selection of expressway[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999(11): 71-80.
- [4] 刘开第. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 2-267.
- [5] WAN Y C, BAO X L. The analytic hierarchy process based on the unascertained information[C]//Liu Y M, Chen G Y, Ying M S, et al. Proceedings of International Conference on Fuzzy Information Processing Theories and Applications. Beijing: 2003. 663-668.
- [6] LIU B. Uncertain programming: An unifying optimization theory in various uncertain environments [J]. Applied Mathematics and Computation, 2001, 120(1/2/3): 227-234.
- [7] DARID DEQUECH. Asset choice, liquidity preference and rationality under uncertainty [J]. Journal of Economic Issues, 2000, 34(1): 159-176.
- [8] 曹庆奎,任向阳,刘琛,等. 基于粗集-未确知测度模型的企业技术创新能力评价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006(4): 67-72.  
CAO QING-KUI, REN XIANG-YANG, LIU CHEN, et al. The analysis and study of the ability of technical innovation of enterprises based on rough set and unascertained measure appraisal model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2006(4): 67-72.
- [9] 宫凤强,李夕兵,董陇军,等. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(2): 323-330.  
GONG FENG-QIANG, LI XI-BING, DONG LONG-JUN, et al. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(2): 323-330.
- [10] 沈金安. 沥青及沥青混合料路面性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 78-259.
- [11] 张登良. 沥青路面工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 1-43, 181-338.
- [12] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures [R]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004: 1-167.
- [13] 彭勇,孙立军,石永久,等. 沥青混合料均匀性与材料力学性能关系[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(6): 142-145.  
PENG YONG, SUN LI-JUN, SHI YONG-JIU, et al. Relationship between homogeneity and mechanical properties of asphalt mixture[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(6): 142-145.
- [14] 马新,郭忠印,李志强,等. 动载作用下沥青路面的剪切破坏机理[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 34-39.  
MA XIN, GUO ZHONG-YIN, LI ZHI-QIANG, et al. Shear destruction mechanism of asphalt pavement under moving load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 34-39.
- [15] 袁德明,康蕾,廖克俭,等. 两种道路沥青老化动力学研究的比较[J]. 化学工业与工程, 2008, 25(1): 44-47.  
YUAN DE-MING, KANG LEI, LIAO KE-JIAN, et al. Aging kinetics of two kinds of roading asphalt[J]. Chemical Industry and Engineering, 2008, 25(1): 44-47.
- [16] 曹平,严新平,白秀琴,等. 沥青路面形貌对抗滑性能影响的理论分析[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4): 306-310.  
CAO PING, YAN XIN-PING, BAI XIU-QIN, et al. Theory analyses of effect of topography on skid resistance of asphalt pavements[J]. Tribology, 2009, 29(4): 306-310.
- [17] MURAT E, SUKRIYE L, LYNAMA F. Prediction of road surface friction coefficient using only macro- and microtexture measurements[J]. Journal of transportation engineering, 2005, 131(4): 311-320.

(编辑 胡英奎)