

文章编号:1671-8879(2016)01-0092-06

Vague 集的主辅路断面组合方案综合测度模型

涂圣文,过秀成,姚栋强

(东南大学 交通学院,江苏 南京 210096)

摘 要:为量化、综合性地进行主辅路断面组合方案评价及决策,构建了基于 Vague 集的主辅路断面组合方案优劣性能测度模型。从交通功能、自然条件、工程经济 and 环境影响等 4 个方面建立了备选方案的测度指标体系,并分定性型和定量型 2 类指标探讨了评价值转换为 Vague 值的方法;采用加权记分函数的方法,提出了方案性能的综合测度模型以刻画方案满足决策者要求的程度,构造了指标权重求解的线性规划模型;并将提出的综合测度模型应用于南京绕城公路快速化改造主辅路断面方案比选的工程实践。研究结果表明:与传统的模糊评判法相比,该模型不仅能够有效反映各个备选方案的综合优劣性能,方案之间的综合测度值还具有更强的区分度,而且计算过程简便,便于实际应用。

关键词:交通工程;测度模型;Vague 集;主辅路;加权记分函数

中图分类号:U491.12

文献标志码:A

Comprehensive evaluation model for cross-section alternatives of main-auxiliary road base on Vague set

TU Sheng-wen, GUO Xiu-cheng, YAO Dong-qiang

(School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: For evaluating and decision-making on alternatives of the cross-section for main-auxiliary road quantitatively and comprehensively, an evaluation model was established to test the performance of alternatives based on Vague set. Firstly, an evaluation index system was built from four aspects such as traffic function, natural condition, engineering economy and environmental impact, and the methods to convert measurement value of qualitative and quantitative index to Vague value were presented respectively. Then, the weighted score function was adopted to establish the comprehensive evaluation model to measure the performance of each alternative to satisfy the requirements of decision makers. Meanwhile, the linear programming model to obtain index weight was also put forward. Finally, the suggested model was applied to engineering practice of decision-making on the cross-section alternatives for reconstructing of the Ring Road in Nanjing. The results show that compared with the traditional fuzzy evaluation method, the proposed model can not only reflect the comprehensive quality of each alternative performance effectively and comprehensive evaluation values among alternatives, but also have

收稿日期:2015-08-15

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(07R17);长沙理工大学道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金项目(kfj100309)

作者简介:涂圣文(1975-),男,湖北仙桃人,工学博士研究生,E-mail:79418129@qq.com。

clear distinction. Furthermore, the calculation process of the model is simple and convenient for practical application. 3 tabs, 2 figs, 21 refs.

Key words: traffic engineering; evaluation model; Vague set; main-auxiliary road; weighted score function

0 引言

随着中国城市化和机动化的快速发展,越来越多的过境公路、城市快速路、主干道都采用主辅路的断面形式,以适应新时期道路功能和交通量的变化要求。如何根据道路的功能及沿线的实际条件,选择合适的主辅路断面组合形式,成为项目决策人员需要重点考虑的问题之一。近年来,不少规划设计人员在项目实践的基础上,初步探讨了主、辅路断面组合的常见方式及其适用性,如黄少红结合株洲市快速环道规划设计实践,提出了快速路与辅道组合的并列式、分离式及大面积绿地分隔式等 3 种方式,并分析了各种方式的优缺点^[1];王晓华等提出应根据快速路在路网中的位置、区域发展状况及现状地形等综合条件,因地制宜地选择不同主辅路设置方式,并结合天津市快速路建设实践,探讨了主辅路平行设置方式、分离设置方式、分行设置方式及辅路单侧设置方式的适用条件^[2];唐德文通过对辅路设置目的及承担任务的分析对辅路进行了分类,并对各类辅路进行了交通功能分析,同时提出了辅路设计的概略方法^[3]。已有文献均着眼于从定性角度分析不同断面组合形式的经验性适用条件,而普遍缺乏从量化的角度,提出考虑影响主、辅路断面组合形式各种因素的综合测度模型,为主辅路断面方案决策提供更加客观的依据。为此,本文在建立主辅路断面组合方案测度指标体系的基础上,提出基于 Vague 集的综合测度模型,为分析主辅路备选方案的优劣性能提供一种量化的、综合性的方法。

1 主辅路断面组合类型

主辅路断面组合类型归纳起来可以分为主辅路并行式和主辅路分离式 2 类。

(1)主辅路并行式。即主路布置于中间,辅路设置在两侧(车辆单向行驶)或单侧(车辆双向行驶),主辅路的平、纵面指标一致,主路与辅路间通过绿化带(或栏杆)分隔,如图 1 所示。

(2)主辅路分离式。一种灵活的设置方式,即主辅路在平面或纵面上互相独立,主辅路之间的联系通过二者之间的出入口或互通式立交完成。主要实

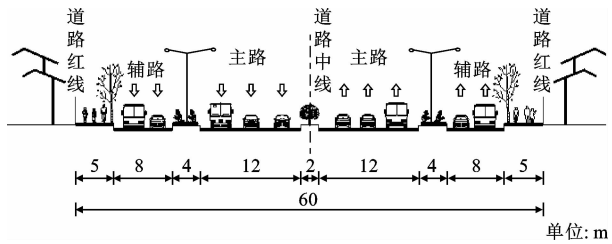


图 1 主辅路并行式

Fig. 1 Parallel mode of main-auxiliary road

现形式又可以细分为以下几种类型:①主路高架式;②主路路堤式;③主路路堑式;④主路隧道式。如下页图 2 所示。

2 主辅路断面组合方案测度指标

影响主辅路断面组合方案的因素主要包括交通功能适应性、自然地理条件协调性、工程经济性和景观环境影响程度 4 个方面。根据这 4 个方面的影响因素,建立主辅路断面组合形式的测度指标体系如表 1 所示。

表 1 主辅路断面组合方案测度指标体系

Tab. 1 Index system for evaluating cross-section alternatives of main-auxiliary road

一级指标层	二级指标层	指标类型	权重
交通功能	主辅路断面总的通行能力 $I_1/(\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$	定量	ω_1
	主辅路之间交通组织的难易性 I_2	定性	ω_2
	道路两侧出入交通组织的难易性 I_3	定性	ω_3
	道路两侧过街交通组织的难易性 I_4	定性	ω_4
沿线条件	与沿线地形地质条件的协调性 I_5	定性	ω_5
	与沿线土地开发状况的协调性 I_6	定性	ω_6
工程经济	工程建设造价 $I_7/(\text{万元} \cdot \text{km}^{-1})$	定量	ω_7
	运营养护费用 $I_8/(\text{万元} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{年})$	定量	ω_8
景观环境	对城市景观的影响程度 I_9	定性	ω_9
	对沿线环境的影响程度 I_{10}	定性	ω_{10}

3 基于 Vague 集的主辅路断面组合方案综合测度模型

主辅路断面组合方案的比选属于多属性决策问题,普遍存在于决策领域并有广泛的实际应用背景,一般采用模糊(Fuzzy)集理论来处理这类问题^[4-10]。传统的模糊集方法反映了指标模糊信息的肯定隶属情况,体现了决策者对模糊概念的肯定与否定两方面信息的判断,却忽略了介于肯定与否定之间的跨

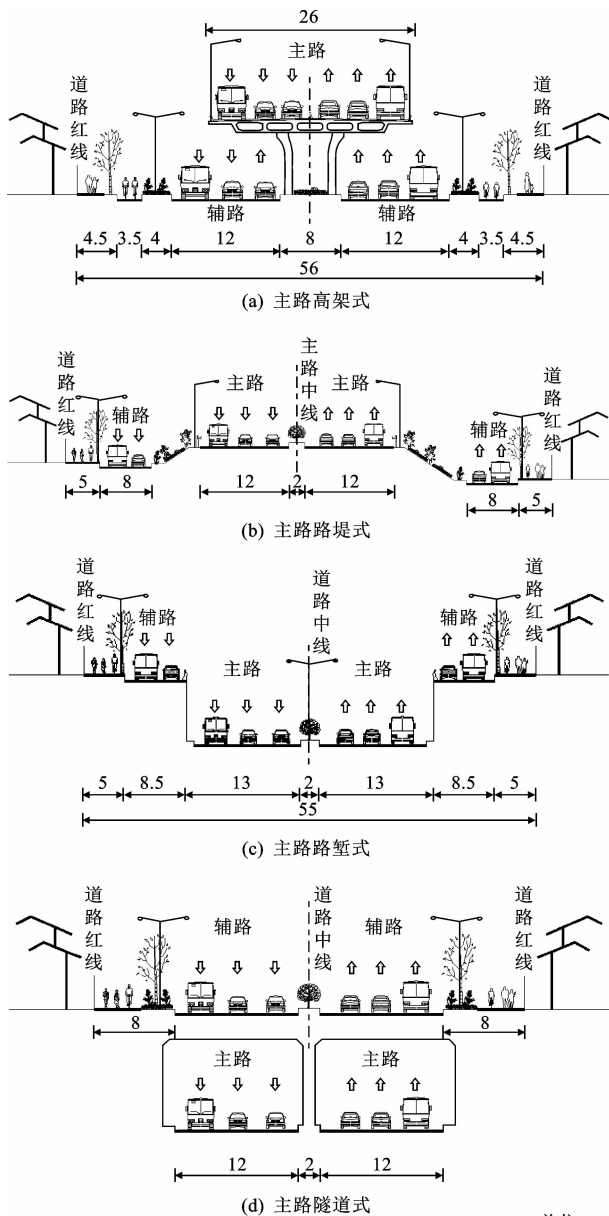


图 2 主辅路分离式

Fig. 2 Disconnect mode of main-auxiliary road

踏信息的体现^[11]。Gau 等提出了 Vague 集概念,通过引入真、假隶属度和踌躇度概念,详细描述决策者对备选方案认识的肯定程度、否定程度和踌躇程度,从而能更好地反映决策者对事物的把握程度和认识水平^[12]。后来在 Chen 等学者的进一步研究下,产生了基于 Vague 集的多属性决策方法,并在工程领域得到了一定的应用^[13-19]。本文采用 Vague 集的相关研究成果,探讨将测度指标转换为 Vague 集的方法,建立基于加权记分函数的备选方案优劣性能综合测度模型,为主辅路断面组合方案比选问题提供一种综合评价、量化决策的方法。

3.1 Vague 集的基本概念

设 U 是一个论域, $x \in U$ 为论域 U 中任何一个元素。 U 上的一个实数值 Vague 集 A 是由真隶属函数 t_A 和假隶属函数 f_A 所描述

$$t_A: U \rightarrow [0, 1], f_A: U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

$t_A(x)$ 是从支持 $x \in A$ 的证据所导出的 $x \in A$ 的肯定隶属度的下界,称之为 Vague 集 A 的真隶属函数; $f_A(x)$ 是从反对 $x \in A$ 的证据所导出的 $x \in A$ 的否定隶属度的下界,称之为 Vague 集 A 的假隶属函数,且 $t_A(x) + f_A(x) \leq 1$; 另外,称 $\pi_A(x) = 1 - t_A(x) - f_A(x)$ 为 x 关于 A 的未知度或踌躇度, $\pi_A(x)$ 的值越大,说明 x 相对于 A 的未知信息越多,显然 $0 \leq \pi_A(x) \leq 1$ 。

根据以上定义,则 x 关于 A 的隶属度可由 $[0, 1]$ 上的子区间 $[t_A(x), 1 - f_A(x)]$ 表示,或者称 $[t_A(x), 1 - f_A(x)]$ 是 x 在 Vague 集 A 中的 Vague 值。由此可见, Vague 集通过隶属度函数表示对一个对象的支持度、反对度和踌躇度,从 3 个方面描述研究对象,充分表述对事物不确定性的描述能力。

3.2 主辅路断面组合方案综合测度模型

设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ 为一组候选方案, I 为方案评价指标集, $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, 则候选方案 A_i 满足评价指标集 I 的程度可以用 Vague 集表示为

$$A_i = \{I_i, [t_{ij}, (1 - f_{ij})]\} \quad (2)$$

其中, $t_{ij} + f_{ij} \leq 1$, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$ 。

基于 Vague 集的多属性决策问题,就是如何从 Vague 集表示的候选方案中选出满足决策者要求的最佳方案。其需要解决 2 方面的问题:隶属度函数的构造、综合测度模型的构造。

(1) Vague 值转换

对于定性指标,可采用 5 个等级描述其隶属度:很好、较好、一般、较差、很差。用 Vague 集表示集合 V 为: $V = \{[0.85, 1.00], [0.70, 0.85], [0.55, 0.70], [0.35, 0.55], [0.00, 0.35]\}$ ^[20]。

对于定量型指标,可分为效益型指标和成本型指标^[13]。对于效益型指标,隶属度函数由下式确定

$$t = \left(\frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \left(\frac{|2s - s_{\max} - s_{\min}|}{s_{\max} - s_{\min}} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$f = \left(\frac{s_{\max} - s}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \left(\frac{|2s - s_{\max} - s_{\min}|}{s_{\max} - s_{\min}} \right)^{1/3} \quad (4)$$

对于成本型指标,隶属度函数由下式确定

$$t = \left(\frac{s_{\max} - s}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \left(\frac{|2s - s_{\max} - s_{\min}|}{s_{\max} - s_{\min}} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$$f = \left(\frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \left(\frac{|2s - s_{\max} - s_{\min}|}{s_{\max} - s_{\min}} \right)^{1/3} \quad (6)$$

式中: s 为备选方案对于某指标的量化值; s_{\max} 、 s_{\min} 分

别为该指标的理论最大值和最小值,可根据经验或规范确定。

(2)综合测度模型

综合测度模型用来表示备选方案满足决策者要求的程度,一般采用记分函数的形式来表达^[11,17-21]。许昌林等提出了一种加权记分函数来评价方案的优劣,该方法不仅考虑因素全面,而且大大简化了计算过程,是一种方便有效的记分函数^[21]。本文采用该加权记分函数的思想来构造主辅路断面组合方案综合测度模型。

假设对于评价指标 I_1, I_2, \dots, I_n , 按其重要性各

$$XH[t_{ij}, 1 - f_{ij}] = \begin{cases} 2t_{ij} & t_{ij} > f_{ij}, t_{ij} + f_{ij} = 1 \\ t_{ij} + f_{ij} + (t_{ij} - f_{ij})\pi_{ij} & t_{ij} > f_{ij}, t_{ij} + f_{ij} < 1 \\ -(t_{ij} + f_{ij})\pi_{ij} & t_{ij} = f_{ij} \\ t_{ij} - 2f_{ij} - (t_{ij} + f_{ij})\pi_{ij} & t_{ij} < f_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

指标的权重系数 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 由以下线性规划问题求得

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \{XH[t_{ij}, 1 - f_{ij}]\omega_j\} \\ \text{s. t.} \quad & \omega_1^l \leq \omega_1 \leq \omega_1^r \\ & \omega_2^l \leq \omega_2 \leq \omega_2^r \\ & \vdots \\ & \omega_n^l \leq \omega_n \leq \omega_n^r \\ & \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: ω_j^l, ω_j^r 分别为指标 I_j 的重要程度的真隶属度值和假隶属度值, $j=1, 2, \dots, n$ 。

4 实例分析

(1)备选方案概况及评价指标的建立

南京绕城公路(柳塘至刘村段)城市化改造工程中,共提出了 3 个主辅路断面组合方案:①方案 A, 主辅路并行式;②方案 B, 主辅路分离式(主路高架式);③方案 C, 主辅路分离式(主路路堤式)。其相应技术经济指标数值与定性评价见表 2。

表 2 主辅路断面组合方案指标评价值及 Vague 值

指标	指标原始数值			Vague 值		
	方案 A	方案 B	方案 C	方案 A	方案 B	方案 C
I_1	18 538	21 698	21 066	[0.155, 0.292]	[0.659, 0.825]	[0.464, 0.769]
I_2	很好	较差	较好	[0.85, 1.00]	[0.35, 0.55]	[0.70, 0.85]
I_3	一般	较好	较差	[0.55, 0.70]	[0.70, 0.85]	[0.35, 0.55]
I_4	一般	较好	较差	[0.55, 0.70]	[0.70, 0.85]	[0.35, 0.55]
I_5	很差	较差	很好	[0.00, 0.35]	[0.35, 0.55]	[0.85, 1.00]
I_6	一般	很差	较好	[0.55, 0.70]	[0.00, 0.35]	[0.70, 0.85]
I_7	18 307	23 939	14 082	[0.316, 0.772]	[0.094, 0.167]	[0.901, 0.943]
I_8	54	68	52	[0.660, 0.825]	[0.137, 0.253]	[0.806, 0.892]
I_9	一般	很差	较好	[0.55, 0.70]	[0.00, 0.35]	[0.70, 0.85]
I_{10}	一般	较差	较好	[0.55, 0.70]	[0.35, 0.55]	[0.70, 0.85]

自赋予一定的权重值,记为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 其中 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n \in [0, 1]$, 且 $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$ 。则方案 A_i 关于指标集 I 的综合测度模型可表示为

$$W_I(A_i) = \sum_{j=1}^n \{XH[t_{ij}, 1 - f_{ij}]\omega_j\} \quad (7)$$

式中: $W_I(A_i) (i=1, 2, \dots, m)$ 为方案 A_i 满足决策者要求的程度, $W_I(A_i)$ 值最大对应的方案 A_i 为最优方案。

$XH[t_{ij}, 1 - f_{ij}]$ 为方案 A_i 关于指标 I_j 的综合测度值, 可根据 t_{ij} 和 f_{ij} 的相对大小关系, 由下式确定^[17]

(2)Vague 值转换

对于定性型指标,根据其评价等级直接采用前文所述的方法转换为对应的 Vague 值。

定量型指标根据式(3)~式(6),计算各方案关于评价指标的 Vague 值。本文中假设 s_{\max} 等于各备选方案中该指标的最大值乘以系数 1.05, s_{\min} 等于各备选方案中该指标的最小值乘以系数 0.95。以方案 A 通行能力指标 I_1 的 Vague 值计算为例, $s_{\max} = 22\ 783, s_{\min} = 17\ 611, s = 18\ 538$, 则

$$\begin{aligned} t &= \frac{18\ 538 - 17\ 611}{22\ 783 - 17\ 611} \times \\ &\quad \left(\frac{2 \times 18\ 538 - 22\ 783 - 17\ 311}{22\ 783 - 17\ 611} \right)^{1/3} = 0.155 \\ f &= \frac{22\ 783 - 18\ 538}{22\ 783 - 17\ 611} \times \\ &\quad \left(\frac{2 \times 18\ 538 - 22\ 783 - 17\ 611}{22\ 783 - 17\ 611} \right)^{1/3} = 0.708 \end{aligned}$$

同理可计算出其他各方案定量型指标的 Vague 值。转换后各方案诸指标完整的 Vague 值见表 2。

(3)备选方案综合测度值计算

根据专家咨询意见,得到各指标 $I_j(j=1,2,\cdots,10)$ 重要性的真隶属度值 t_j 和假隶属度值 f_j ,如表 3 所示。

表 3 指标重要度的隶属度值

Tab. 3 Subordinate degree value of indexes importance

指标	t_j	$1-f_j$	指标	t_j	$1-f_j$
I_1	0.15	0.80	I_6	0.10	0.70
I_2	0.05	0.90	I_7	0.20	0.70
I_3	0.05	0.90	I_8	0.10	0.75
I_4	0.05	0.90	I_9	0.10	0.70
I_5	0.15	0.75	I_{10}	0.05	0.80

记 $\omega_j(j=1,2,\cdots,10)$ 为指标 I_j 的权重,由式 (9)得到线性规划模型

max

$$0.301\omega_1+1.2\omega_2+1.11\omega_3+1.11\omega_4-1.26\omega_5+0.293\omega_6-0.062\omega_7+0.43\omega_8+0.293\omega_9+1.11\omega_{10}$$

s. t.

$$0.15\leq\omega_1\leq0.20,0.05\leq\omega_2\leq0.10,0.05\leq\omega_3\leq0.10,0.05\leq\omega_4\leq0.10,0.15\leq\omega_5\leq0.25,0.10\leq\omega_6\leq0.30,0.20\leq\omega_7\leq0.30,0.10\leq\omega_8\leq0.25,0.10\leq\omega_9\leq0.30,0.05\leq\omega_{10}\leq0.20$$

求解该模型,可得

$$\omega_1=0.15,\omega_2=0.05,\omega_3=0.05,\omega_4=0.05,\omega_5=0.15,\omega_6=0.10,\omega_7=0.20,\omega_8=0.10,\omega_9=0.10,\omega_{10}=0.05$$

则根据式(7),可得方案 A、B、C 的综合测度值分别为

$$W_I(A)=0.132,W_I(B)=-0.726,W_I(C)=0.766$$

由此可知方案 C 为最优方案,该结论与传统模糊评判法得出的结论一致。从各方案的综合测度值还可以看出,由于同时考虑了支持度、反对度和踌躇度 3 个方面的模糊信息,基于 Vague 集的综合测度模型得出的评价价值区分度更明显,便于从复杂多属性的决策问题中选出最优方案。

5 结 语

(1)从交通功能适应性、自然地理条件协调性、工程经济性和景观环境影响程度等 4 个方面,建立了包含 10 个二级指标的主辅路断面组合方案测度指标体系,作为方案优劣评价的依据。

(2)基于考虑了支持度、反对度和踌躇度 3 个方面模糊信息的 Vague 集理论,构建了主辅路断面组

合方案综合测度模型,全面、量化地进行断面组合方案优劣性评价和决策。该模型在南京绕城公路快速化改造断面方案比选中得到了应用,结果表明该模型不仅简便,方案之间的综合测度值还具有较强的区分度,有利于确认最优方案。

(3)主辅路断面组合方案影响因素复杂,本文虽然初步建立了一个指标体系,但大多数指标均还是定性型指标,因此比选结论仍含有一定的主观因素。如何进一步量化主辅路断面组合方案的测度指标,是需要进一步研究的问题。

参考文献:

References:

[1] 黄少红. 浅论城市快速环道中快速路与辅道的关系[J]. 城市道桥与防洪,2003(6):27-29.
HUANG Shao-hong. Brief talk about relation of express road with auxiliary road in urban express ring road[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2003 (6):27-29. (in Chinese)

[2] 王晓华,汪凌志,张 琦. 浅谈天津市快速路主路与辅路的设置方式[J]. 城市道桥与防洪,2008(7):10-12.
WANG Xiao-hua,WANG Ling-zhi,ZHANG Qi. Elementary discussion on arrangement mode of trunk road and auxiliary of expressway in Tianjin[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2008(7):10-12. (in Chinese)

[3] 唐德文. 城市快速路辅路功能定位分析及设计标准[J]. 城市道桥与防洪,2012(7):11-14.
TANG De-wen. Analysis of functional orientation and design standard for auxiliary roads of urban expressway[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control,2012 (7):11-14. (in Chinese)

[4] 张 腾,马荣国. 高铁引线绩效多层次模糊综合评价方法[J]. 交通运输工程学报,2011,11(2):97-101.
ZHANG Teng,MA Rong-guo. Multi-level fuzzy comprehensive evaluation method of lead performance for high-speed railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2011,11(2):97-101. (in Chinese)

[5] 豆 飞,王 莉,秦 勇,等. 铁路旅客乘车方案多因素选择决策[J]. 长安大学学报:自然科学版,2015,35(增):80-85.
DOU Fei,WANG Li,QIN Yong,et al. Multivariate selection decisions for railway passenger traveling schemes[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2015,35(S):80-85. (in Chinese)

[6] 陆化普,蔚欣欣,胡启洲,等. 基于模糊界定的城市生态交通综合测度模型[J]. 交通运输系统工程与信息,

- 2010,10(3):86-92.
- LU Hua-pu, YU Xin-xin, HU Qi-zhou, et al. Comprehensive evaluation model for urban eco-traffic based on fuzzy define[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(3):86-92. (in Chinese)
- [7] 许金良,周育名,王玉平,等.西北地区公路交通价值评估指标体系[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(2):79-87.
- XU Jin-liang, ZHOU Yu-ming, WANG Yu-ping, et al. Evaluation index system of highway traffic value in northwest China[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(2):79-87. (in Chinese)
- [8] 周志军,张铁柱,牛涌,等.基于区间模糊分析法的边坡治理方案决策[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(1):1-5.
- ZHOU Zhi-jun, ZHANG Tie-zhu, NIU Yong, et al. Study on decision-making for slope treatment scheme based on the method of interval fuzzy analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(1):1-5. (in Chinese)
- [9] 孙全胜,常继峰.公路桥梁承载能力多级模糊综合评定方法[J].交通运输系统工程与信息,2008,8(1):127-132.
- SUN Quan-sheng, CHANG Ji-feng. Comprehensive estimating method of loading capacity of bridges on base of theory of fuzzy evaluating[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(1):127-132. (in Chinese)
- [10] 韩亚楠,周伟.客运枢纽服务质量评价四维度模型[J].长安大学学报:自然科学版,2014,34(3):120-127.
- HAN Ya-nan, ZHOU Wei. Four dimensions model for passenger transport hub operation service quality evaluation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3):120-127. (in Chinese)
- [11] 邱香,陈继光.基于Vague集的水电工程方案模糊综合评价[J].数学的实践与认识,2011,41(4):34-37.
- QIU Xiang, CHEN Ji-guang. Fuzzy comprehensive evaluation of hydropower project plan based on Vague set[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(4):34-37. (in Chinese)
- [12] GAU W L, BUEHRER D J. Vague sets[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1993, 23(2):610-614.
- [13] CHEN S M, TAN J M. Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on Vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 67(2):163-172.
- [14] HONG D H, CHOI C H. Multicriteria fuzzy decision making problems based on Vague set theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(1):103-113.
- [15] YE J. Improved method of multicriteria fuzzy decision-making based on Vague sets[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(2):164-169.
- [16] GENG X L, CHU X N, ZHANG Z F. A new integrated design concept evaluation approach based on Vague sets[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(9):6629-6638.
- [17] 项琴,朱宏伟.基于Vague集的路堑边坡设计方案的优选[J].公路交通科技,2011,28(1):52-55.
- XIANG Qin, ZHU Hong-wei. Optmial option of design plans for cutting slope based on Vague set[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(1):52-55. (in Chinese)
- [18] 陈继光.基于Vague-Fuzzy理论的深基坑支护方案评价应用[J].数学的实践与认识,2011,41(11):46-50.
- CHEN Ji-guang. Based on Vague-Fuzzy theory model for evaluating the retaining plan of deep excavation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(11):46-50. (in Chinese)
- [19] 朱涛,王华,鲁斌.基于Vague集的客运专线列车运行图方案优选方法[J].中国铁道科学,2011,32(4):122-127.
- ZHU Tao, WANG Hua, LU Bin. Method for optimally selecting the train diagram of passenger dedicated line based on Vague sets[J]. China Railway Science, 2011, 32(4):122-127. (in Chinese)
- [20] 王鸿绪. Vague集的综合决策规则在方案优选中的应用[J].计算机工程与应用,2010,46(27):145-147.
- WANG Hong-xu. Synthesis decision rule of Vague sets and its application in scheme optimum seeking[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27):145-147. (in Chinese)
- [21] 许昌林,魏立力.多准则模糊决策的Vague集方法[J].系统工程理论与实践,2010,30(11):2019-2025.
- XU Chang-lin, WEI Li-li. Vague set method of multicriteria fuzzy decision making[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(11):2019-2025. (in Chinese)