

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.09.019

基于模糊综合评价的HOV车道综合效益分析

王瑜¹, 李勇²

(1. 四川交通职业技术学院, 四川 成都 611130;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610036)

摘要:为验证HOV车道的实施效果,从社会经济、交通效率、环境影响、出行满意度4个方面构建了综合效益评价指标体系,并对各项指标进行了定义,运用熵权法确定了指标权重。结合道路交通评价标准,确立了各项评价指标的隶属度,并建立了指标的梯形隶属度函数。运用模糊数学原理,构建了模糊综合评价模型。以成都市为例,对已推行HOV车道的运行现状进行了调研,结合模糊综合评价模型,得到了HOV车道的综合效益评价价值。结果显示:天府大道南段的HOV车道运行效益最优,科华南路的HOV车道运行较为稳定,此两路段的综合运行效益评价结果均为良好,剑南大道HOV车道运行效益较差,综合运行效益评价结果为一般,且3个路段HOV车道的早高峰综合运行效益评价价值优于晚高峰;同时,对比同路段的HOV车道和普通车道,科华南路、剑南大道HOV车道的综合效益优于普通车道,改善效果明显,天府大道南段HOV车道和普通车道的综合效益相差不大,设置必要性不突出。最后,分析了现行HOV车道方案存在的问题与局限,从准入条件、设置HOV车道类型、区间长度、运行监管等方面提出了建议和对策,以进一步提高HOV车道的公众满意度。

关键词:运输经济;综合效益;模糊综合评价;HOV车道;效益指标

中图分类号:U491.2⁺23

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2020)09-0148-11

Analysis on Comprehensive Benefit of HOV Lane Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation

WANG Yu¹, LI Yong²

(1. Sichuan Vocational and Technical College of Communications, Chengdu Sichuan 611130, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: To verify the implementation effect of HOV lanes, a comprehensive benefit evaluation indicator system is constructed from the aspects of social economy, traffic efficiency, environmental influence and travel satisfaction, and each indicator is defined, and each indicator weight is determined by entropy weight method. The membership degree of each evaluation indicator is established in combination with the road traffic evaluation standard, and the trapezoidal membership function of the indicators is established. A fuzzy comprehensive evaluation model is built by the principle of fuzzy mathematics. Taking Chengdu City for example, the operation status of the existing HOV lanes is investigated, and the comprehensive benefit evaluation value of the HOV lane is obtained by combining the fuzzy comprehensive evaluation model. The result shows that (1) The operation efficiency of the HOV lane of south Tianfu Avenue is the best, and the operation efficiency of HOV lane of Kehua South Road is relatively stable. The comprehensive operation benefit evaluation result of these 2 sections are all good. The operation benefit of the HOV lane of Jiannan Avenue is poor, and its comprehensive operation benefit evaluation result is general. The comprehensive

收稿日期: 2019-10-12

基金项目: 四川省教育厅重点课题项目(18ZA0328)

作者简介: 王瑜(1988-),女,四川达州人,硕士研究生。(252786508@qq.com)

operation benefit evaluation values of the HOV lanes of the 3 sections in the morning rush hour are better than those in the evening rush hour. (2) At the same time, comparing HOV lanes and common lanes of the same section, the comprehensive benefits of HOV lanes of Kehua Road and Jiannan Avenue are better than those of common lanes, the improvement effect is obvious. The comprehensive benefits of HOV lanes and common lanes of Tianfu Avenue are not much different, and the necessity of setting HOV lanes is not prominent. Finally, the existing problems and limitations of the current HOV lane scheme are analyzed, and the suggestions and countermeasures are put forward from the aspects of access condition, setting type of HOV lanes, interval length, operation supervision, so as to further improve the public satisfaction of HOV lanes.

Key words: transport economics; comprehensive benefit; fuzzy comprehensive evaluation; high occupancy vehicle (HOV) lane; effect indicator

0 引言

高容量车辆 (High Occupancy Vehicle, HOV) 车道最初在美国兴起, 相继在加拿大、澳大利亚、英国等欧美发达国家广泛采用。通过设置通行规则, 有效提高道路使用效率, 缓解交通拥堵^[1]。2014 年 5 月, HOV 车道正式进入我国, 无锡市首次设置 HOV 车道, 允许 3 人及以上车辆通行。2015 年 7 月, 济南市试点开通 HOV 车道, 允许 2 人及以上乘员车辆、特种车辆在早晚高峰使用。随后, 成都市、大连市等均在具备设置条件的相应路段 (一般为城市主干道或快速路) 开通 HOV 车道, 规定在工作日的早晚高峰使用。

国内外学者对于 HOV 车道的设置可行性、理论模型、设置方案、效益评价等进行了广泛的研究。Huang 等^[2]考虑单独驾车、合乘和地铁出行方式, 改进了既有的交通流均衡模型, 并从经济学角度分析了模型结果。Kwon 等^[3]采用交通量检测器收集数据, 对 HOV 车道运行效果进行了全面分析评价。李春燕等^[4]从宏观和微观层面分析了美国 HOV 车道的设置类型和运行方式, 分析了在我国的适用性和可行性, 并提出实用性建议。户佐安等^[5]通过分析 HOV 车道设置的影响因素, 建立了路段的出行总效用模型, 对比分析了方案实施前后的总效用差值。

目前, 国内外大部分研究成果主要集中于 HOV 车道的可行性分析和理论模型建立, 缺乏对 HOV 车道的实证分析。鉴于此, 从社会经济、交通效率、环境保护、出行满意度 4 个方面建立 HOV 车道的综合效益评价指标体系, 以成都市为例, 对 HOV 车道的综合效益进行评价。

1 HOV 车道评价指标体系的构建

HOV 车道通过提高小汽车载客量, 鼓励合乘出

行, 减少道路车流量, 提高道路资源利用率, 解决交通拥堵和环境污染问题。为综合性评价 HOV 车道的运行效果, 从社会经济、交通效率、环境保护、出行满意度 4 个方面构建评价指标体系, 见图 1。

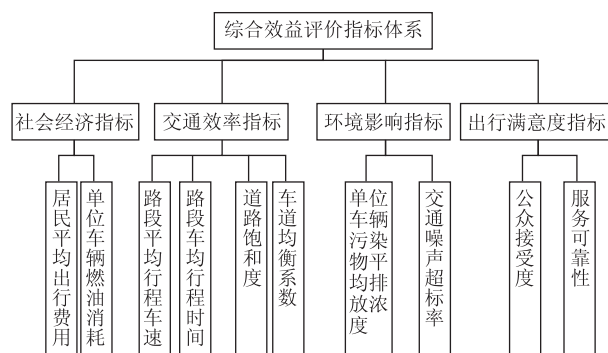


图 1 综合效益评价指标体系

Fig. 1 Comprehensive benefit evaluation indicator system

以下对 HOV 车道的综合效益评价指标体系各项指标进行定义。

1.1 居民平均出行费用

居民平均出行费用以出行时间成本和燃油消耗成本为主, 二者具有不同的当量, 用时间价值和能源价值进行转换, 其计算公式为:

$$U_1 = T \times \varepsilon + \frac{U_2}{n} \times \theta, \quad (1)$$

式中, U_1 为居民平均出行费用; T 为平均出行时间; ε 为时间价值参数, $\varepsilon = 45$ 元/h; U_2 为单位车辆燃油消耗量; n 为乘客数量; θ 为能源价值参数, $\theta = 8$ 元/L。

1.2 单位车辆燃油消耗

单位车辆燃油消耗是居民出行成本的重要构成部分, 与车辆运行速度有关, 其计算公式为:

$$U_2 = T_2 \times FC(V), \quad (2)$$

式中, T_2 为路段的车均行程时间; $FC(V)$ 为车辆每小时油耗模型。

根据相关研究, 高峰时期车辆每小时油耗与车辆行驶速度的回归模型为^[6]:

$$FC(V) = 5.917 - 0.127T_1 + 0.002T_1^2, \quad (3)$$

式中 T_1 为路段平均车速。

1.3 路段平均行程车速

路段平均行程车速是指在一定时间内通过路段观测点的车速平均值, 其计算公式为:

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i, \quad (4)$$

式中, T_1 为平均车速; N 为统计时段里的观测车数; V_i 为第 i 辆车的瞬时车速。

1.4 路段车均行程时间

路段的车均行程时间是指在统计期内通过路段所需时间的平均值, 计算公式为:

$$T_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (5)$$

式中, T_2 为路段的车均行程时间; n 为统计期数; t_i 为统计时段车辆在该路段行程时间。

1.5 道路饱和度

道路饱和度用以衡量道路车流量和通行能力是否均衡, 反映道路拥挤度, 计算公式为^[7]:

$$T_3 = q/C, \quad (6)$$

式中, T_3 为道路饱和度; q 为路段最大车流量; C 为该路段通行能力。

$$C = C_0 \times \gamma, \quad (7)$$

式中, C_0 为道路理论通行能力; γ 为折减系数。

1.6 车道均衡系数

车道均衡系数用来衡量各个车道利用率是否存在不均衡, 计算公式为^[8]:

$$T_4 = \frac{(S-1)q_1}{q_2}, \quad (8)$$

式中, T_4 为车道均衡系数; q_1 为 HOV 车道的车流量; q_2 为普通车道的车流量; S 为车道数。

1.7 单位车辆污染物平均排放浓度

机动车尾气排放污染物平均浓度是重要的环境影响指标之一。通过回归分析得到机动车尾气排放量与速度的计算模型为^[9]:

$$E_1 = -27.156 \times \ln T_1 + 138.941, \quad (9)$$

式中 E_1 为单位车辆污染物排放量。

1.8 车道交通噪声超标率

以 HOV 车道两侧白天平均噪声不大于 70 dB、夜间噪声不大于 55 dB 为标准, 车道交通噪声超标率的计算公式为^[10]:

$$E_2 = \frac{L_0}{L}, \quad (10)$$

式中, E_2 为噪声超标率; L_0 为噪声超标里程; L 为 HOV 车道的设计里程。

1.9 公众接受度

公众接受度作为定性指标, 通过问卷调查的形式, 将定性指标定量化, 得到公众接受度指标值 S_1 。

1.10 服务可靠性

为衡量 HOV 车道的服务可靠性, 引入无量纲路段行程时间变异系数, 反映 HOV 车道运行过程的均衡性、稳定性。当变异系数为 0 时, 数据服从均匀分布, 无波动; 当变异系数越大时, 波动性越大继而稳定性越差。

$$S_2 = \frac{\sigma_T}{\Delta T}, \quad (11)$$

式中, S_2 为道路运行时间变异系数; σ_T 为道路运行时间标准差; ΔT 为道路运行时间平均值。

2 HOV 车道模糊综合评价模型的建立

采用模糊综合评价法对 HOV 车道进行综合效益评价。一是使用熵权法确定指标权重, 熵权法通过数据之间的差异来确定指标的权重, 较为客观地反映某项指标在指标体系中的重要性。二是以模糊数学为基础, 应用模糊合成原理, 综合多个因素对被评价对象进行模糊综合评价^[10]。

2.1 熵权法确定指标权重

2.1.1 设 m 个评价指标对 n 个评估对象进行评估, 构建判断矩阵 P ^[11]

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, p_{ij} 为第 i 个评价指标对第 j 个评估对象的值。

对 p_{ij} 进行标准化处理得到:

$$t_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^m p_{ij}}, \quad (13)$$

式中 t_{ij} 为 p_{ij} 标准化后的指标数据。

2.1.2 定义第 i 项指标的熵值

$$d_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n h_{ij} \ln h_{ij}, \quad (14)$$

$$h_{ij} = \frac{1 + t_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + t_{ij})}, \quad (15)$$

式中, d_i 为第 i 项指标的熵值; h_{ij} 为第 i 个评价指标对第 j 个评估对象的特征比重值, 当 h_{ij} 时, 令 $\ln h_{ij}$ 。

2.1.3 计算熵权

$$W_i = \frac{(1 - d_i)}{\sum_{i=1}^m (1 - d_i)}, \quad (16)$$

式中 W_i 为第 i 项指标的权重。

2.2 构建评价指标的隶属度函数

将 HOV 车道运行效益划分为优秀、良好、一般、较差、差 5 大类,并分别用 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 表示,则得到判断集 $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\}$ 。根据评价路段的道路等级情况,结合《城市道路交通运行评价指标体系》(DB11/T 785—2011)对相关指标的规定,作为判断依据,确立 HOV 车道运行效益评价的隶属度评价价值^[12],如表 1 所示。

表 1 评价指标的隶属度

Tab. 1 Membership degrees of evaluation indicators

评价指标	优秀	良好	一般	较差	差
U_1	≤ 6	(6, 8]	(8, 10]	(10, 12]	> 12
U_2	≤ 0.35	(0.35, 0.5]	(0.5, 0.65]	(0.65, 0.9]	> 0.9
T_1	> 60	(40, 60]	(30, 40]	(20, 30]	≤ 20
T_2	≤ 5	(5, 7.5]	(7.5, 10]	(10, 15]	> 15
T_3	≤ 0.5	(0.5, 0.6]	(0.6, 0.8]	(0.8, 1]	> 1
T_4	(0.8, 1]	(0.6, 0.8]	(0.5, 0.6]	(0.4, 0.5]	≤ 0.4
E_1	≤ 25	(25, 40]	(40, 50]	(50, 60]	> 60
E_2	≤ 5	(5, 20]	(20, 40]	(40, 60]	> 60
S_1	> 90	(70, 90]	(50, 70]	(30, 50]	≤ 30
S_2	≤ 0.2	(0.2, 0.4]	(0.4, 0.6]	(0.6, 0.8]	> 0.8

HOV 车道运行效益水平没有明确的分界线,存在一定的模糊性。因梯形隶属度函数具有平缓稳定的特性,故将其作为隶属度函数,结合表 2 数据,建立以下各隶属度函数^[13-15]。

2.2.1 居民平均出行费用的隶属度函数

居民平均出行费用为定量指标,最优评价结果为最小值,定义为负指标,其隶属度函数为:

$$U_1^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 6 \\ 7 - x & 6 < x \leq 7 \\ 0 & x > 7 \end{cases}, \quad (17)$$

$$U_1^2(x) = \begin{cases} 1 & 6 < x \leq 8 \\ x - 5 & 5 \leq x < 6 \\ 9 - x & 8 < x \leq 9 \\ 0 & x < 5 \text{ 或 } x > 9 \end{cases}, \quad (18)$$

$$U_1^3(x) = \begin{cases} 1 & 8 < x \leq 10 \\ x - 7 & 7 \leq x < 8 \\ 11 - x & 10 < x \leq 11 \\ 0 & x < 7 \text{ 或 } x > 11 \end{cases}, \quad (19)$$

$$U_1^4(x) = \begin{cases} 1 & 10 < x \leq 12 \\ x - 9 & 9 \leq x < 10 \\ 13 - x & 12 < x \leq 13 \\ 0 & x < 9 \text{ 或 } x > 13 \end{cases}, \quad (20)$$

$$U_1^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 12 \\ x - 11 & 11 \leq x < 12 \\ 0 & x < 11 \end{cases}, \quad (21)$$

式中, $U_1^n(x)$ 为居民平均出行费用的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段的居民平均出行费用值。

2.2.2 单位车辆燃油消耗的隶属度函数

居民平均出行费用为定量指标,最优评价结果为最小值,定义为负指标,其隶属度函数为:

$$U_2^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.35 \\ \frac{0.4 - x}{0.05} & 0.35 < x \leq 0.4 \\ 0 & x > 0.4 \end{cases}, \quad (22)$$

$$U_2^2(x) = \begin{cases} 1 & 0.35 < x \leq 0.5 \\ \frac{x - 0.3}{0.05} & 0.3 \leq x < 0.35 \\ \frac{0.55 - x}{0.05} & 0.5 < x \leq 0.55 \\ 0 & x < 0.3 \text{ 或 } x > 0.55 \end{cases}, \quad (23)$$

$$U_2^3(x) = \begin{cases} 1 & 0.5 < x \leq 0.65 \\ \frac{x - 0.45}{0.05} & 0.45 \leq x < 0.5 \\ \frac{0.7 - x}{0.05} & 0.65 < x \leq 0.7 \\ 0 & x < 0.45 \text{ 或 } x > 0.7 \end{cases}, \quad (24)$$

$$U_2^4(x) = \begin{cases} 1 & 0.65 < x \leq 0.9 \\ \frac{x - 0.6}{0.05} & 0.6 \leq x < 0.65 \\ \frac{0.95 - x}{0.05} & 0.9 < x \leq 0.95 \\ 0 & x < 0.6 \text{ 或 } x > 0.95 \end{cases}, \quad (25)$$

$$U_2^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 0.9 \\ \frac{x - 0.95}{0.05} & 0.85 \leq x < 0.9 \\ 0 & x < 0.85 \end{cases}, \quad (26)$$

式中, $U_2^n(x)$ 为单位车辆燃油消耗的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较

差、差 5 种评价结果； x 为评价路段的单位车辆燃油消耗值。

2.2.3 路段平均行程车速的隶属度函数

路段平均行程车速为定量指标，最优评价结果为最大值，定义为正指标，其隶属度函数为：

$$T_1^1(x) = \begin{cases} 1 & x > 60 \\ \frac{x-50}{10} & 50 \leq x < 60, \\ 0 & x < 50 \end{cases} \quad (27)$$

$$T_1^2(x) = \begin{cases} 1 & 40 < x \leq 60 \\ \frac{x-30}{10} & 30 \leq x < 40 \\ \frac{70-x}{10} & 60 < x \leq 70 \\ 0 & x < 30 \text{ 或 } x > 70 \end{cases}, \quad (28)$$

$$T_1^3(x) = \begin{cases} 1 & 30 < x \leq 40 \\ \frac{x-20}{10} & 20 \leq x < 30 \\ \frac{50-x}{10} & 40 < x \leq 50 \\ 0 & x < 20 \text{ 或 } x > 50 \end{cases}, \quad (29)$$

$$T_1^4(x) = \begin{cases} 1 & 20 < x \leq 30 \\ \frac{x-10}{10} & 10 \leq x < 20 \\ \frac{40-x}{10} & 30 < x \leq 40 \\ 0 & x < 15 \text{ 或 } x > 35 \end{cases}, \quad (30)$$

$$T_1^5(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 20 \\ \frac{30-x}{10} & 20 < x < 30, \\ 0 & x > 30 \end{cases} \quad (31)$$

式中， $T_1^n(x)$ 为路段平均行程车速的隶属度函数； n 为 1, 2, 3, 4, 5，分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果； x 为评价路段的平均行程车速值。

2.2.4 路段车均行程时间的隶属度函数

路段车均行程时间为定量指标，最优评价结果为最小值，定义为负指标，其隶属度函数为：

$$T_2^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 5 \\ 6-x & 5 < x \leq 6, \\ 0 & x > 6 \end{cases} \quad (32)$$

$$T_2^2(x) = \begin{cases} 1 & 5 < x \leq 7.5 \\ x-4 & 4 \leq x < 5 \\ \frac{8-x}{0.5} & 7.5 < x \leq 8 \\ 0 & x < 4 \text{ 或 } x > 8 \end{cases}, \quad (33)$$

$$T_2^3(x) = \begin{cases} 1 & 7.5 < x \leq 10 \\ \frac{x-7}{0.5} & 7 \leq x < 7.5 \\ 11-x & 10 < x \leq 11 \\ 0 & x < 7 \text{ 或 } x > 11 \end{cases}, \quad (34)$$

$$T_2^4(x) = \begin{cases} 1 & 10 < x \leq 15 \\ x-9 & 9 \leq x < 10 \\ 16-x & 15 < x \leq 16 \\ 0 & x < 9 \text{ 或 } x > 16 \end{cases}, \quad (35)$$

$$T_2^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 15 \\ x-14 & 14 \leq x < 15, \\ 0 & x < 14 \end{cases} \quad (36)$$

式中， $T_2^n(x)$ 为路段车均行程时间的隶属度函数； n 为 1, 2, 3, 4, 5，分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果； x 为评价路段的车均行程时间值。

2.2.5 道路饱和度的隶属度函数

道路饱和度为定量指标，最优评价结果为最小值，定义为负指标，其隶属度函数为：

$$T_3^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.5 \\ 20(x-0.5) & 0.5 < x \leq 0.55, \\ 0 & x > 0.55 \end{cases} \quad (37)$$

$$T_3^2(x) = \begin{cases} 1 & 0.5 < x \leq 0.6 \\ 20(x-0.45) & 0.45 \leq x < 0.5 \\ 20(0.65-x) & 0.6 < x \leq 0.65 \\ 0 & x < 0.45 \text{ 或 } x > 0.65 \end{cases}, \quad (38)$$

$$T_3^3(x) = \begin{cases} 1 & 0.6 < x \leq 0.8 \\ 20(x-0.55) & 0.55 \leq x < 0.6 \\ 20(0.85-x) & 0.8 < x \leq 0.85 \\ 0 & x < 0.55 \text{ 或 } x > 0.85 \end{cases}, \quad (39)$$

$$T_3^4(x) = \begin{cases} 1 & 0.8 < x \leq 1 \\ 20(x-0.75) & 0.75 \leq x < 0.8 \\ 20(1.05-x) & 1 < x \leq 1.05 \\ 0 & x < 0.75 \text{ 或 } x > 1.05 \end{cases}, \quad (40)$$

$$T_3^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 1 \\ 20(x-0.95) & 0.95 < x \leq 1, \\ 0 & x < 0.95 \end{cases} \quad (41)$$

式中， $T_3^n(x)$ 为道路饱和度的隶属度函数； n 为 1, 2, 3, 4, 5，分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果； x 为评价路段的道路饱和度值。

2.2.6 道路均衡系数的隶属度函数

道路均衡系数为定量指标, 最优评价结果为最大值, 定义为正指标, 其隶属度函数为:

$$T_4^1(x) = \begin{cases} 1 & 0.8 < x \leq 1 \\ \frac{x-0.7}{0.1} & 0.7 \leq x < 0.8 \\ \frac{1.1-x}{0.1} & 1 < x \leq 1.1 \\ 0 & x < 0.7 \text{ 或 } x > 1.1 \end{cases}, \quad (42)$$

$$T_4^2(x) = \begin{cases} 1 & 0.6 < x \leq 0.8 \\ 20(x-0.55) & 0.55 \leq x < 0.6 \\ 20(0.85-x) & 0.8 < x \leq 0.85 \\ 0 & x < 0.55 \text{ 或 } x > 0.85 \end{cases}, \quad (43)$$

$$T_4^3(x) = \begin{cases} 1 & 0.5 < x \leq 0.6 \\ 20(x-0.45) & 0.45 \leq x < 0.5 \\ 20(0.65-x) & 0.6 < x \leq 0.65 \\ 0 & x < 0.45 \text{ 或 } x > 0.65 \end{cases}, \quad (44)$$

$$T_4^4(x) = \begin{cases} 1 & 0.4 < x \leq 0.5 \\ 20(x-0.35) & 0.35 \leq x < 0.4 \\ 20(0.55-x) & 0.5 < x \leq 0.55 \\ 0 & x < 0.35 \text{ 或 } x > 0.55 \end{cases}, \quad (45)$$

$$T_4^5(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.4 \\ 20(0.45-x) & 0.4 < x \leq 0.45, \\ 0 & x > 0.45 \end{cases} \quad (46)$$

式中, $T_4^n(x)$ 为道路均衡系数的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段的道路均衡系数值。

2.2.7 单位车辆污染物平均排放浓度隶属度函数

单位车辆污染物平均排放浓度为定量指标, 最优评价结果为最小值, 定义为负指标, 其隶属度函数为:

$$E_1^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 25 \\ \frac{30-x}{5} & 25 < x \leq 30, \\ 0 & x > 30 \end{cases}, \quad (47)$$

$$E_1^2(x) = \begin{cases} 1 & 25 < x \leq 40 \\ \frac{x-20}{5} & 20 \leq x < 25 \\ \frac{45-x}{5} & 40 < x \leq 45 \\ 0 & x < 20 \text{ 或 } x > 45 \end{cases}, \quad (48)$$

$$E_1^3(x) = \begin{cases} 1 & 40 < x \leq 50 \\ \frac{x-35}{5} & 35 \leq x < 40 \\ \frac{55-x}{5} & 50 < x \leq 55 \\ 0 & x < 35 \text{ 或 } x > 55 \end{cases}, \quad (49)$$

$$E_1^4(x) = \begin{cases} 1 & 50 < x \leq 60 \\ \frac{x-45}{5} & 45 \leq x < 50 \\ \frac{65-x}{5} & 60 < x \leq 65 \\ 0 & x < 45 \text{ 或 } x > 65 \end{cases}, \quad (50)$$

$$E_1^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 60 \\ \frac{x-55}{5} & 55 \leq x < 60, \\ 0 & x < 55 \end{cases}, \quad (51)$$

式中, $E_1^n(x)$ 为单位车辆污染物平均排放浓度的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段的单位车辆污染物平均排放浓度值。

2.2.8 交通噪声超标率的隶属度函数

交通噪声超标率为定量指标, 最优评价结果为最小值, 定义为负指标, 其隶属度函数为:

$$E_2^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 5 \\ \frac{10-x}{5} & 5 < x \leq 10, \\ 0 & x > 10 \end{cases}, \quad (52)$$

$$E_2^2(x) = \begin{cases} 1 & 5 < x \leq 20 \\ \frac{x-0}{5} & 0 \leq x < 5 \\ \frac{25-x}{5} & 20 < x \leq 25 \\ 0 & x > 25 \end{cases}, \quad (53)$$

$$E_2^3(x) = \begin{cases} 1 & 20 < x \leq 40 \\ \frac{x-15}{5} & 15 \leq x < 20 \\ \frac{45-x}{5} & 40 < x \leq 45 \\ 0 & x < 15 \text{ 或 } x > 45 \end{cases}, \quad (54)$$

$$E_2^4(x) = \begin{cases} 1 & 40 < x \leq 60 \\ \frac{x-35}{5} & 35 \leq x < 40 \\ \frac{65-x}{5} & 60 < x \leq 65 \\ 0 & x < 35 \text{ 或 } x > 65 \end{cases}, \quad (55)$$

$$E_2^5(x) = \begin{cases} 1 & 60 < x \leq 100 \\ \frac{x-55}{5} & 55 \leq x < 60 \\ 0 & x < 55 \end{cases}, \quad (56)$$

式中, $E_2^n(x)$ 为交通噪声超标率的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段的交通噪声超标率值。

2.2.9 公众接受度的隶属度函数

公众接受度为定性指标, 将其定量化, 最优评价结果为最大值, 定义为正指标, 其隶属度函数为:

$$S_1^1(x) = \begin{cases} 1 & x > 90 \\ \frac{x-80}{10} & 80 \leq x < 90 \\ 0 & x < 80 \end{cases}, \quad (57)$$

$$S_1^2(x) = \begin{cases} 1 & 70 < x \leq 90 \\ \frac{x-60}{10} & 60 \leq x < 70 \\ \frac{90-x}{10} & 90 < x \leq 100 \\ 0 & x < 60 \text{ 或 } x > 90 \end{cases}, \quad (58)$$

$$S_1^3(x) = \begin{cases} 1 & 50 < x \leq 70 \\ \frac{x-40}{10} & 40 \leq x < 50 \\ \frac{80-x}{10} & 70 < x \leq 80 \\ 0 & x < 40 \text{ 或 } x > 80 \end{cases}, \quad (59)$$

$$S_1^4(x) = \begin{cases} 1 & 30 < x \leq 50 \\ \frac{x-20}{10} & 20 \leq x < 30 \\ \frac{60-x}{10} & 50 < x \leq 60 \\ 0 & x < 20 \text{ 或 } x > 60 \end{cases}, \quad (60)$$

$$S_1^5(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 30 \\ \frac{40-x}{10} & 30 < x \leq 40 \\ 0 & x > 40 \end{cases}, \quad (61)$$

式中, $S_1^n(x)$ 公众接受度的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段的出行者满意度值。

2.2.10 服务可靠性的隶属度函数

服务可靠性为定量指标, 最优评价结果为最小值, 定义为负指标, 其隶属度函数为:

$$S_2^1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq 0.2 \\ \frac{0.3-x}{0.1} & 0.2 < x \leq 0.3 \\ 0 & x > 0.3 \end{cases}, \quad (62)$$

$$S_2^2(x) = \begin{cases} 1 & 0.2 < x \leq 0.4 \\ \frac{x-0.1}{0.1} & 0.1 \leq x < 0.2 \\ \frac{0.5-x}{0.1} & 0.4 < x \leq 0.5 \\ 0 & x < 0.1 \text{ 或 } x > 0.5 \end{cases}, \quad (63)$$

$$S_2^3(x) = \begin{cases} 1 & 0.4 < x \leq 0.6 \\ \frac{x-0.3}{0.1} & 0.3 \leq x < 0.4 \\ \frac{0.7-x}{0.1} & 0.6 < x \leq 0.7 \\ 0 & x < 0.3 \text{ 或 } x > 0.7 \end{cases}, \quad (64)$$

$$S_2^4(x) = \begin{cases} 1 & 0.6 < x \leq 0.8 \\ \frac{x-0.5}{0.1} & 0.5 \leq x < 0.6 \\ \frac{0.9-x}{0.1} & 0.8 < x \leq 0.9 \\ 0 & x < 0.5 \text{ 或 } x > 0.9 \end{cases}, \quad (65)$$

$$S_2^5(x) = \begin{cases} 1 & x > 0.8 \\ \frac{x-0.7}{0.1} & 0.7 \leq x < 0.8 \\ 0 & x < 0.7 \end{cases}, \quad (66)$$

式中, $S_2^n(x)$ 为服务可靠性的隶属度函数; n 为 1, 2, 3, 4, 5, 分别对应优秀、良好、一般、较差、差 5 种评价结果; x 为评价路段时间变异系数值。

2.3 构建模糊综合评价模型

2.3.1 单因素判断

根据上述构建的评价指标隶属度函数, 结合路段运行数据, 对各指标进行单因素独立影响评判, 得到评判矩阵 $F^{[16-17]}$ 。

$$F = \begin{bmatrix} U_1^1 & U_1^2 & U_1^3 & U_1^4 & U_1^5 \\ U_2^1 & U_2^2 & U_2^3 & U_2^4 & U_2^5 \\ T_1^1 & T_1^2 & T_1^3 & T_1^4 & T_1^5 \\ T_2^1 & T_2^2 & T_2^3 & T_2^4 & T_2^5 \\ T_3^1 & T_3^2 & T_3^3 & T_3^4 & T_3^5 \\ T_4^1 & T_4^2 & T_4^3 & T_4^4 & T_4^5 \\ E_1^1 & E_1^2 & E_1^3 & E_1^4 & E_1^5 \\ E_2^1 & E_2^2 & E_2^3 & E_2^4 & E_2^5 \\ S_1^1 & S_1^2 & S_1^3 & S_1^4 & S_1^5 \\ S_2^1 & S_2^2 & S_2^3 & S_2^4 & S_2^5 \end{bmatrix}. \quad (67)$$

2.3.2 综合评价

将评价指标的权重向量 W 与评判矩阵 F 进行模糊运算, 得到综合评价集 $V^{[18]}$ 。

$$V=W \times F=\left[\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4, \nu_5\right] 。 \quad(68)$$

2.3.3 确定评价结果

将结果量化,采用加权平均法计算最终评价结果^[19]。令判断集 $\left\{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5\right\}=\{1, 2, 3, 4, 5\}$,则:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^5 \nu_i \times P_i}{\sum_{i=1}^5 \nu_i}, \quad(69)$$

式中 R 为最终评价值。

3 成都HOV车道的综合效益评价

从2017年1月起,成都市在3处路段设立HOV车道。一是科华南路由南向北方向(以下简称路段a);二是天府大道南一、二段由南向北方向(以下简称路段b);三是自2018年12月,剑南大道南段(以下简称路段c)。通过现场交通调查,将评价路段早晚高峰交通运行数据统计,见表2、表3。

表2 各路段早高峰交通运行数据

Tab.2 Traffic operation data of each section in morning rush hour

交通运行数据	路段a		路段b		路段c	
	HOV车道	普通车道	HOV车道	普通车道	HOV车道	普通车道
车流量/ (pcu·h ⁻¹)	1 139	3 508	982	3 129	1 325	3 902
平均时速/ (km·h ⁻¹)	65	40	78	67	50	30
运行时间/ min	4.5	8	3.5	4.5	6	10
噪声超标 里程/km	0.6	0.6	0.4	0.4	1.7	1.7
路段运行时间 变异系数	0.12	0.18	0.12	0.14	0.12	0.22

表3 各路段晚高峰交通运行数据

Tab.3 Traffic operation data of each section in evening rush hour

交通运行数据	路段a		路段b		路段c	
	HOV车道	普通车道	HOV车道	普通车道	HOV车道	普通车道
车流量/ (pcu·h ⁻¹)	1 206	3 803	1 041	3 360	1 402	4 431
平均时速/ (km·h ⁻¹)	58	28	75	61	42	25
运行时间/ min	5	11	4	5	7	12
噪声超标 里程/km	0.8	0.8	0.5	0.5	2.1	2.1
路段运行时间 变异系数	0.24	0.32	0.24	0.26	0.24	0.35

同时,通过对周边区域居民出行使用HOV车道的满意度进行问卷调查,获得有效统计结果,见表4。

表4 路段HOV车道的满意度(单位:%)

Tab.4 Satisfaction degree of HOV lane in section (unit:%)

路段	非常满意	满意	一般	很差
a	17	45	18	20
b	33	45	14	8
c	10	32	24	34

结合表2~表4的基础数据,通过前述的指标计算公式,得到3处路段HOV车道的早、晚高峰指标值,如表5~表7所示。

表5 路段a的HOV车道指标值

Tab.5 Indicators of HOV lane in section a

第1级指标	第2级指标	早高峰	晚高峰
社会经济指标	居民平均出行费用	7.1	7.4
	单位车辆燃油消耗	0.47	0.46
交通效率指标	路段平均行程车速	65	58
	路段车均行程时间	4.5	5
	道路饱和度	0.57	0.61
	车道均衡系数	0.65	0.63
环境影响指标	单位车辆污染物平均排放浓度	26	29
	噪声超标率	12	15
出行满意度指标	公众接受度	62	62
	服务可靠性	0.28	0.32

表6 路段b的HOV车道指标值

Tab.6 Indicators of HOV lane in section b

第1级指标	第2级指标	早高峰	晚高峰
社会经济指标	居民平均出行费用	6.8	7.1
	单位车辆燃油消耗	0.52	0.51
交通效率指标	路段平均行程车速	78	75
	路段车均行程时间	3.5	4
	道路饱和度	0.49	0.52
	车道均衡系数	0.94	0.93
环境影响指标	单位车辆污染物平均排放浓度	21	22
	噪声超标率	8	10
出行满意度指标	公众接受度	78	78
	服务可靠性	0.12	0.24

3.1 模糊综合评价

3.1.1 熵权法确定权重

根据前述方法,结合表5~表7路段指标数据,计算评价指标的权重。

表 7 路段 c 的 HOV 车道指标值
Tab. 7 Indicators of HOV lane in section c

第 1 级指标	第 2 级指标	早高峰	晚高峰
社会经济指标	居民平均出行费用	8.1	9.1
	单位车辆燃油消耗	0.45	0.48
交通效率指标	路段平均行程车速	50	42
	路段车均行程时间	6	7
	道路饱和度	0.66	0.7
	车道均衡系数	0.68	0.63
环境影响指标	单位车辆污染物平均排放浓度	33	37
	噪声超标率	34	42
出行满意度指标	公众接受度	42	42
	服务可靠性	0.12	0.24

$$W = [0.29 \quad 0.1 \quad 0.19 \quad 0.13 \quad 0.07 \quad 0.06 \quad 0.07 \\ 0.01 \quad 0.05 \quad 0.03]。$$

由此看出,居民平均出行费用、行程车速、行程时间、车辆油耗是影响路段运行效益的重要因素。

3.1.2 隶属度函数计算

根据前述的评价指标隶属度函数,结合表 5 路段 a 指标数据,对路段 a 的 HOV 车道各项指标进行单因素判断,分别得到早高峰判断矩阵 F_a^1 、晚高峰判断矩阵 F_a^2 :

$$F_a^1 = \begin{bmatrix} 0.9 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_a^2 = \begin{bmatrix} 0.6 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.8 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

3.1.3 综合评价

结合权重系数 W ,对评价指标进行模糊综合评

价,分别计算早高峰评价集 V_a^1 、晚高峰评价集 V_a^2 。

$$V_a^1 = [0.643 \quad 0.791 \quad 0.078 \quad 0 \quad 0],$$

$$V_a^2 = [0.47 \quad 0.96 \quad 0.174 \quad 0 \quad 0]。$$

3.1.4 确定评价结果

采用加权平均法将结果量化,算出路段 a 早高峰评价值 $R_a^1 = 1.62$,晚高峰评价值 $R_a^2 = 1.82$ 。

运用上述过程,同样计算路段 b、路段 c 的 HOV 车道早高峰综合评价结果,得到:

$$R_b^1 = 1.56, R_b^2 = 1.55, R_c^1 = 2.192, R_c^2 = 2.35。$$

3.2 成都 HOV 车道综合效益评价结果分析

R 作为最终评价值, R 的数值越小,代表综合运行效益越优秀。根据前文计算的 HOV 路段综合评价指数,对评价结果进行分析,见表 8。

表 8 HOV 车道的综合效益评价

Tab. 8 Comprehensive benefit evaluation value of HOV lane

路段	路段 a		路段 b		路段 c	
	早高峰	晚高峰	早高峰	晚高峰	早高峰	晚高峰
综合评价值	1.63	1.81	1.56	1.55	2.19	2.35
评价结果	良好	良好	良好	良好	一般	一般

3.2.1 结果分析

(1) 由表 8 所示,总体上运行情况良好,且早高峰优于晚高峰。成都 HOV 车道从社会经济、交通效率、环境保护、出行满意度 4 个方面总体评价结果为一般及良好,且早高峰运行情况均优于晚高峰。

(2) 路段 b 的 HOV 车道运行效益最优。具体来看,路段 b 道路整体较为通畅,道路饱和度在 50% 左右,交通运行状态良好,车流速度基本能达到 70 km/h 及以上,各项指标均处于较优的状态,出行者满意度较高。

(3) 路段 c 的 HOV 车道运行效益较差。具体来看,路段 c 道路资源有限,交通出行需求较大,道路饱和度较高,且部分路段有施工现场,影响道路交通效率。同时道路监管较难,部分单乘员车辆进入 HOV 车道行驶,影响了综合运行效益。该路段 HOV 车道设置区间较短,难以体现优势。

(4) 路段 a 的 HOV 车道运行效益稳定。路段 a 的 HOV 车道运行情况较为稳定,HOV 车道优势逐渐突出,综合运行效益评价为良好。

3.2.2 对比分析

运用同样的方法,计算 3 个路段普通车道的运行效益,结果见表 9。

表9 路段的运行效益评价

Tab. 9 Evaluation value of operation benefit in road section

时间	路段 a		路段 b		路段 c	
	HOV 车道	普通 车道	HOV 车道	普通 车道	HOV 车道	普通 车道
早高峰	1.63	2.6	1.56	1.57	2.14	3.45
晚高峰	1.81	3.28	1.55	1.66	2.35	3.73

(1) 路段 b 的普通车道运行效益与 HOV 车道相比差别不大, 目前设置必要性不强, 可进一步预测未来交通量分析该路段设置 HOV 车道的可行性。

(2) 路段 c 的 HOV 车道处于运行初期, 普通车道拥挤度加剧。路段 c 的 HOV 车道方案运行时间较短, 普通车道数量减少, HOV 车道优势未突出, 难以改变居民的出行习惯, 反而加剧了普通车道的拥挤度。随着方案推进, HOV 车道优势和特权效益会更突出, 道路运行效益会逐渐产生变化。

(3) 从改善交通效率来看, 路段 a 的 HOV 车道运行效率提高了 60%~80%, 路段 c 的 HOV 车道运行效率提高了 55% 左右, 路段 a 的改善效果相比其他路段更突出。

4 结论

HOV 车道在运行初期运行效率优势不突出, 公众接受度较低, 普通车道数减少反而加剧拥堵; 随着方案的推进, HOV 车道带来的特权效益和运行优势日益突出, 会逐渐改变居民出行习惯。成都市已实施 HOV 车道的运行情况表明, 从社会经济、交通效率、环境影响、出行满意度来综合衡量 HOV 车道运行效益, 路段 a、路段 b 均为良好, 路段 c 为一般。同时, 对比同路段 HOV 车道和普通车道, 路段 a、路段 c 的 HOV 车道综合效益优于普通车道, 改善效果明显; 路段 b 的 HOV 车道和普通车道综合效益区别不大, 设置必要性不强。

部分路段的 HOV 车道改善效果不佳, 存在以下原因: (1) 道路条件不足, 运行环境不好, 出行需求较大, 道路本身处于超饱和运行状态; (2) 部分路段 HOV 车道的设置方案不太合理; (3) HOV 车道方案的运行时间短, 居民对 HOV 车道了解程度不高, 难以改变出行习惯; (4) 监管较难, 部分单乘员车辆违规行驶 HOV 车道, 影响了运行效率。

针对实施过程中存在的问题, 提出以下建议:

(1) 改进既有 HOV 车道运行方案。

路段 b 普通车道和 HOV 车道的运行效益区别不

大, 设置必要性不强, 应满足设置 HOV 车道的基本条件为 2 人以上车辆占比总流量的 30% 以上。该路段目前 HOV 车道设置地点居民出行量较少, 可考虑调整现有 HOV 车道设置的位置。现行方案的设置区间长度为 5 km, 相对较短, 难以体现 HOV 车道的优势, 从而改变居民出行方式, 可考虑增加 HOV 车道的区间长度。

路段 c 的 HOV 车道运行效益不理想, 应对多乘员数量 (现行 2 人及以上适用) 进行调整, 当 HOV 车道平均载客为 1.4 人/veh 以上时, HOV 车道的准入标准应调整为 3 人/veh 及以上的标准, 同时考虑路段 c 道路资源有限等情况, 可考虑不单独设置 HOV 车道、与其他专用道共用等方式。

(2) 加强 HOV 车道的宣传, 让居民了解 HOV 车道的出行优势, 提高公众接受度。

(3) 加强道路监管, 提高违法违规成本, 保障 HOV 车道能够有效实施。

(4) 规范合乘行为、建立信息共享。

制订相应法律法规来规范居民的合乘行为, 保障合乘出行者的合法权益, 营造良好的合乘环境。同时, 构建居民出行需求共享平台, 以有效促进资源的合理分配, 提高居民合乘出行便利性。

参考文献:

References:

- [1] 邓社军, 陈峻, 李春燕, 等. 我国城市快速路基本路段 HOV 车道设置方案研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2013, 11 (2): 11-18, 23.
DENG She-jun, CHEN Jun, LI Chun-yan, et al. Research on the Design Method of HOV Lane Based on the Basic Section of Urban Arterial Road in China [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2013, 11 (2): 11-18, 23.
- [2] HUANG H J, YANG H, Bell M G H. The Models and Economics of Carpools [J]. Annals of Regional Science, 2000, 34 (1): 56-68.
- [3] KWON J, VARAIYA P. Effectiveness of California's High Occupancy Vehicle (HOV) System [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 16 (1): 98-115.
- [4] 李春燕, 陈峻, 邓社军. HOV 车道设置特性及可行性分析 [J]. 城市交通, 2012, 10 (6): 58-65.
LI Chun-yan, CHEN Jun, DENG She-jun. Characteristics and Feasibility Analysis of Setting HOV Lanes [J]. Urban Transport of China, 2012, 10 (6): 58-65.
- [5] 户佐安, 包天雯, 蒲政, 等. 基于出行总效用的 HOV

- 车道设置可行性研究 [J]. 综合运输, 2017, 39 (8): 62-67.
- HU Zuo-an, BAO Tian-wen, PU Zheng, et al. Feasibility Study on HOV Lane Setting Based on Traveling Total Utility [J]. China Transportation Review, 2017, 39 (8): 62-67.
- [6] 隗海林, 王劲松, 王云鹏, 等. 基于城市道路工况的汽车燃油消耗模型 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009, 39 (5): 1146-1148.
- KUI Hai-lin, WANG Jin-song, WANG Yun-peng, et al. Vehicle Fuel Consumption Model Based on Urban Road Operations [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39 (5): 1146-1148.
- [7] 邵春福, 魏丽英, 贾斌. 交通流理论 [M]. 电子工业出版社, 2012.
- SHAO Chun-fu, WEI Li-ying, JIA Bin. Traffic Flow Theory [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [8] 刘昱岗, 徐宜河. 基于模糊综合评价的公交专用道的交通效益评价 [J]. 公路工程, 2015, 40 (4): 193-196.
- LIU Yu-gang, XU Yi-he. Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation of Traffic Benefit of Dedicated Bus Lanes [J]. Highway Engineering, 2015, 40 (4): 193-196.
- [9] 周文竹. 交通模式-道路资源配置-出行效率的平衡与优化 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- ZHOU Wen-zhu. Balance and Optimization of Traffic Mode-road Resource Allocation-travel Efficiency [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [10] 胡永举, 李洋. 关于交通噪声与交通流状态关系的研究 [J]. 公路工程, 2008, 33 (1): 67-69.
- HU Yong-ju, LI Yang. The Study of Relation between Traffic Flow and Traffic Noise [J]. Highway Engineering, 2008, 33 (1): 67-69.
- [11] 贾珊珊. 基于多方法组合的城市交通指数评价研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- JIA Shan-shan. Evaluation of Urban Traffic Index Based on Integrated Methods [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [12] 舒欢, 刘文娜. 基于组合赋权-TOPSIS模型的水利工程建设方案优选决策方法 [J]. 工程管理学报, 2013 (4): 83-86.
- SHU Huan, LIU Wen-na. Hydraulic Engineering Construction Program Optimal Choice Based on Empowerment Combination TOPSIS Model [J]. Journal of Engineering Management, 2013 (4): 83-86.
- [13] 张永安, 马昱. 基于熵权TOPSIS法的区域技术创新政策评价研究 [J]. 科技管理研究, 2017, 33 (1): 238-249.
- ZHANG Yong-an, MA Yu. Research on Regional Technology Innovation Policy Evaluation Based on Entropy TOPSIS Method [J]. Science and Technology Management Research, 2017, 33 (1): 238-249.
- [14] DB 11/T785—2011, 城市道路交通运行评价指标体系 [S].
- DB11/T785—2011, Urban Road Traffic Performance Index [S].
- [15] 龙小强, 谭云龙. 基于模糊综合评价的城市道路交通拥堵评价研究 [J]. 交通标准化, 2011 (11): 114-116.
- LONG Xiao-qiang, TAN Yun-long. Urban Traffic Congestion Evaluation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. Transport Standardization, 2011 (11): 114-116.
- [16] 庄劲松, 曲大义, 曹俊业, 等. 基于模糊综合层次分析法的道路交通运行状态判别 [J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36 (6): 103-110.
- ZHUANG Jin-song, QU Da-yi, CAO Jun-ye, et al. Traffic State Evaluation Based on Fuzzy Comprehensive Analytic Hierarchy Process [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2015, 36 (6): 103-110.
- [17] 田世艳, 刘伟铭. 基于模糊综合评价的路段实时交通状态判别方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (29): 7206-7210.
- TIAN Shi-yan, LIU Wei-ming. Research on the Road Section of the Real-time Traffic Conditions Base on Fuzzy Comprehensive Evaluation [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (29): 7206-7210.
- [18] 杨建超. 模糊综合评价法在快速路方案评价中的应用 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- YANG Jian-chao. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Evaluation of Expressway Schemes [J]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [19] 王秀良. 基于属性数学模型的城市交通系统综合评价方法 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24 (7): 120-126.
- WANG Xiu-liang. Comprehensive Evaluation Method of Urban Traffic System Based on Attribute Mathematical Model [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 24 (7): 120-126.