

基于最小二乘集成赋权模型的交叉口交通状态评价

丁祥颖¹, 胡尧^{1,2*}

¹贵州大学数学与统计学院, 贵州 贵阳

²贵州大学公共大数据重点实验室, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月24日; 发布日期: 2023年1月31日

摘要

为提高道路交叉口交通状态综合评价结果的全面性及准确性, 研究出1种兼顾主客观权重优点的集成赋权模型, 该模型基于最小二乘(least squares, LS)思想和矩估计理论建立改进LS集成赋权模型, 更好弥补单一赋权模型的局限性, 最大限度保留单一赋权结果中所反映出的指标重要度信息。在此基础上, 通过组合权重-隶属度矩阵计算得到各路口交通状态综合评价结果。应用以上评价方法对贵阳市4个交叉口进行评价, 结果表明, 所提模型更充分地凸显了指标的重要性; 以国家城市交通运行状况评价规范和现有组合赋权模型的评价结果为基准, 对模型的有效性进行评估, 所提模型评价结果的准确度分别为75.95%和96.61%, 且结果的区分度更大更符合实际交通路况。综上, 所提模型同时具备实用性和有效性, 对交叉口运行状态的评估和预警具有一定的指导意义。

关键词

交通状态, 综合评价, 集成赋权, 最小二乘, 矩估计

Intersections Traffic Status Evaluation Based on Least Squares Method Combined Weighting Model

Xiangying Ding¹, Yao Hu^{1,2*}

¹College of Mathematics and Statistics, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Public Big Data Key Laboratory, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 24th, 2023; published: Jan. 31st, 2023

*通讯作者。

Abstract

In order to improve the comprehensive and accurate results of road intersections traffic status comprehensive evaluation, based on the least squares thought and moment estimation theory, an improved least squares integrated weighting model is established to better compensate for the limitations of a single weighting model and the index importance information reflected in the results of single weighting is retained to the maximum extent. On this basis, comprehensive evaluation results of each intersection status are obtained by calculating the combination weight-membership matrix. The above evaluation method is used to evaluate four intersections in Guiyang, and the empowerment and evaluation results show that the improved model gives full play to the importance of the indicators. The effectiveness of the model is evaluated based on the evaluation results of the national urban traffic operation status evaluation standard and the existing combined weighting models, and the accuracy of the evaluation results based on the proposed model is 75.95% and 96.61%, respectively, and the evaluation results are more discriminative and more in line with the actual traffic conditions. To sum up, the intersections traffic status evaluation method proposed is both practical and effective, and has certain guiding significance for the evaluation and early warning of intersections traffic status.

Keywords

Traffic Status, Comprehensive Evaluation, Combination Weighting, Least Squares, Moment Estimation Theory

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

道路交叉口的交通状态综合评价研究, 不仅有利于交管部门加强道路管理工作及掌握交通具体状况信息和变化规律, 还可以帮助出行者及时了解交通运行信息, 合理安排出行时间和路线。

交通畅通或拥堵状态能通过交通指标来量化, 而这些指标又是基于各种交通参数的。Flyvbjerg 等[1]用总出行延误时间对交通运行系统进行评价。我国公安部公布的《城市交通管理评价指标体系》根据平均行程速度的大小将交通状态划分为 5 个等级[2]。Brown 等[3]通过拥堵指数对不同等级道路及区域的交通拥堵状况进行了比较分析。上述研究仅基于单交通指标评价交通状态, 但现实中交通状态受多种因素的影响, 使用单一指标虽然方便理解及计算, 但往往不能全面地反映道路交通状态, 且对比不同指标下的评价结果通常会存在一定的差异[4] [5] [6]。

随着交通状态问题研究的不断深入, 道路交通状态评价研究经历了从单指标至多指标综合分析的发展历程, 很多学者提出用模糊综合评价法评价交通状态, 将交通状态划分至不同的等级, 取得了符合实际路况的评价结果。如晏雨婵等[7]利用熵权法 - 隶属度的模糊评价方法将交通状态划分为 6 个等级。吴高华等[8]选取交通事故的发生频次、事故严重程度和运营单位对风险设备管控程度等指标, 基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定指标权重后, 构建交通运行状态综合评价模型。陈征等[9]通过无线射频识别交通检测系统和视频监控系统获取车辆行驶时间和速度, 并基于这 2 个指标对交通状态进行模糊判别。以上综合评价方法可以很好地识别道路交通的通行情况, 综合评价结果也比单指标下的评

价结果更加的有效和全面。

关注交通状态多指标综合评价的原理可知, 要想得到可用及准确的评价结果, 指标的权重设立机制极其重要。基于研究人员的主观判断和历史研究经验, Yu 等[10]提出使用 AHP 法和 TOPSIS 法的组合方法对各交通指标权重进行计算。许伦辉等[11]用改进 AHP 法计算交通各指标的权重, 并在计算权重环节作了改进, 用多算法权重结果均值表示权重向量。苏飞[12]和 Shen 等[13]深入挖掘指标携带的数值信息, 分别使用模糊熵 - 熵权法、差异驱动法计算交通指标的权重。总结以上计算权重的方法, 可将其分为两类, 一类为主观赋权法, 另一类为客观赋权法, 二者各有其突出的优缺点, 主观方法很好地运用了研究人员宝贵的历史经验, 却忽略了实际指标值; 客观赋权方法注重指标数据分布情况和数值信息, 但缺乏决策者的主观经验知识[14]。基于以上情况, 集成赋权模型应运而生, 将评价指标的主、客观权重组合, 扬长避短, 使指标的权重分配得到优化。

根据组合方式的不同, 集成赋权模型可分为以下 4 种: 加权平均集成赋权[15]、乘法归一化集成赋权[15]、客观修正主观集成赋权[16]、目标规划集成赋权[17]。加权平均模型原理简单, 但得到的集成赋权结果的有效性及其可靠性依赖于更多的赋权方法数目; 乘法归一化模型在集成过程中可能会使指标权重倍增, 导致权重向量的合理性和可解释性降低; 客观修正主观模型, 在不同环节上分别对主观经验和客观数据信息进行了合理利用, 组合权重的解释性强; 目标规划模型以求解模型最优解的形式计算组合权重, 理论可靠, 计算方法简便, 是计算主客观集成权重的有效方法。

针对以上分析, 笔者将利用层次分析法、G1 法、熵权法、CRITIC 法和变异系数法分别确定交通状态评价指标的主、客观权重, 并以评价结果离差最小化为目标, 构建基于 LS 的集成赋权模型应用于道路交叉口交通评价指标权重的确定, 弥补单一赋权模型的局限性, 并在集成赋权模型中加入主、客观赋权结果相对重要程度系数, 最大限度保留单一赋权结果中所反映出的指标重要度信息, 进一步提升模型赋权结果的合理性。然后借助组合权重 - 隶属度矩阵算法从车辆平均速度、饱和度、车辆平均延误时间 3 个方面导出更符合实际的交通状态综合评价结果, 进一步为道路交通运输管理的改善提升提供可靠的数据支持。

2. 交通状态评价

2.1. 交叉口综合评价模型

在交叉口交通运行状态研究中, 选用交通单指标对交叉口做出评价十分常见, 但单指标显示的交通信息比较片面, 不能全面反映交叉口整体运行状态, 且在不同指标下对交通状态做出评价可能会得到不同的结果, 因此选取多指标对交叉口的通行状态做出综合评价。考虑到各指标和交通状态之间错综复杂的关联性, 采用综合评价法在各指标和状态等级之间建立起联系, 具体地通过隶属度函数得到各指标和交通状态等级之间的隶属度, 再使用交叉口综合评价模型将各指标的隶属评判结果进行结合, 得到交通状态综合评价结果[18]。综合评价具体步骤如下。

步骤 1: 确定综合评价指标体系。设 m 个评价指标组成的评价指标集为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ 。

步骤 2: 确定评语集。设 p 个评价等级组成的评语集为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_p\}$ 。

步骤 3: 确定评价对象集。设 n 个评价对象组成的评价对象集为 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。

步骤 4: 计算相对隶属度矩阵。分别建立单个评价对象 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})'$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 的相对隶属度矩阵 R_i :

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{im1} & r_{im2} & \cdots & r_{imp} \end{bmatrix}_{m \times p}$$

式中: r_{jk} 为评价元素 x_{ij} 在评语 l_k 上的隶属度, $j=1,2,\dots,m$, $k=1,2,\dots,p$ 。

步骤 5: 确定指标权重。记 m 个评价指标的权重向量为 $W=(w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

步骤 6: 计算评价结果矩阵。首先计算各评价对象综合评价结果向量 B_i , 进而构建评价对象集 X 的评价结果矩阵 $B=(B_1, B_2, \dots, B_n)'$ 。 B_i 计算见式(1)。

$$B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ip}) = WR_i \quad (1)$$

2.2. 交通评价指标体系

在对交通状态进行综合性评估的过程中, 影响评估性能的指标有很多。秉持着最少指标携带最全面、关键信息的原则, 以及考虑到指标数据获取、处理及计算的难易度, 选取车辆平均速度、饱和度、车辆平均延误时间这 3 个指标来对交叉口交通状态进行综合评价。以下介绍各指标的计算方式。

1) 车辆平均速度。车辆平均速度 \bar{v} 是交叉口各进口在某一时间段内, 所有行驶车辆的观测车速的平均值。式(2)中 Q 为观测时间内的车辆总数, veh/5 min; v_q 为第 q 辆车的观测车速, km/h。

$$\bar{v} = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q v_q \quad (2)$$

2) 饱和度。饱和度 s 为交叉口观测时间内到达的车辆数与交叉口通行能力的比值。见式(3), 式中: C 为交叉口的通行能力, veh/5 min。

$$s = \frac{Q}{C} \quad (3)$$

交叉口通行能力是指通过某交叉口的最大交通流量, 此处以交叉口多天所有观测时间段内最大流量的平均值作为通行能力, 计算公式如下:

$$C = \frac{Q_{1,\max} + Q_{2,\max} + \dots + Q_{l,\max}}{l} \quad (4)$$

式中: $Q_{l,\max}$ 为交叉口第 l 天最大车流量, veh/5 min; l 为基础数据的总天数。

3) 车辆平均延误时间。Akcelik 等[19]基于经典的延误模型对过饱和的情形作了研究, 同时还考虑了高峰期的延误问题, 提出了过渡函数延误模型更精准地给出了交叉口平均过饱和和排队长度 N_0 及延误时间 \bar{d} 的函数表达式为

$$N_0 = \begin{cases} \frac{CT}{4} \left((s-1) + \sqrt{(s-1)^2 + \frac{12(s-s_0)}{CT}} \right), & s > s_0 \\ 0, & s \leq s_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{d} = \begin{cases} \frac{T(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda s)} + \frac{sN_0}{Q}, & s < 1 \\ \frac{t_r}{2} + \frac{sN_0}{Q}, & s \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $s_0 = 0.67 + \frac{t_g s}{600}$, 为对应交叉口的饱和流率; t_g 为路口交通信号灯的绿灯时间, s; t_r 为红灯时长, s; λ 为绿信比; T 为信号灯周期时长, s。

2.3. 单指标下交通状态等级

上述 3 个指标可以反映交叉口的交通状态如何, 但是在和交通各状态对应时有模糊性, 因此采用指标区间值来对应交通状态将更符合实际情况[10]。参考《城市交通运行状态评价规范》(GB/T 33171-2016) 将交通状态分为 5 个等级: 畅通、基本畅通、轻度拥堵、中度拥堵、严重拥堵。各单指标对应于不同交通状态的取值范围见表 1 [20] [21]。

Table 1. Traffic status evaluation level criteria under single index

表 1. 单指标下交通状态评价等级标准

交通指标	畅通	基本畅通	轻度拥堵	中度拥堵	严重拥堵
\bar{v} /(km/h)	$[0.7v_f, \bar{v}_{\max}]$	$[0.5v_f, 0.7v_f)$	$[0.4v_f, 0.5v_f)$	$[0.3v_f, 0.4v_f)$	$[\bar{v}_{\min}, 0.3v_f)$
s	$[0, 0.6)$	$[0.6, 0.7)$	$[0.7, 0.8)$	$[0.8, 0.9)$	$[0.9, s_{\max}]$
\bar{d} /s	$[0, 20)$	$[20, 30)$	$[30, 45)$	$[45, 60)$	$[60, \bar{d}_{\max}]$

注: 表中 v_f 为道路交叉口自由流速度, 为低流量下车辆的平均车速, km/h; \bar{v}_{\max} , \bar{v}_{\min} 分别为 \bar{v} 的最大值和最小值, km/h; s_{\max} 为饱和度的最大值; \bar{d}_{\max} 为车辆平均延误的最大值, s。

2.4. 隶属函数

基于 3 个指标各等级标准取值范围, 建立单指标隶属函数, 采用指派的方法确定函数类型[22], 选取常用的梯形隶属函数计算各指标的隶属度, 将某等级下的区间值映射为 1, 相邻区间指标值隶属度线性递减至 0。以饱和度为例进行分析, 对应交通状态各等级的隶属函数见式(7)~(8), 绘制对应隶属度函数图像如图 1。

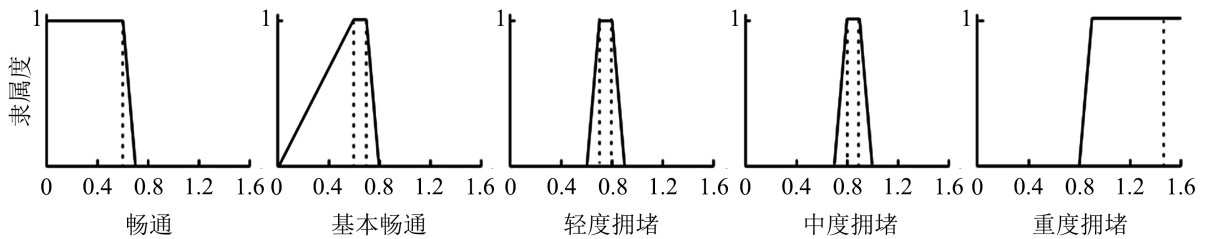


Figure 1. Membership function images at each level of saturation

图 1. 饱和度各等级下隶属度函数图像

饱和度对应交通状态畅通、基本畅通等级的隶属函数分别如 S_1 和 S_2 所示:

$$S_1 = \begin{cases} 1, & s \in [0, 0.6) \\ \frac{0.7-s}{0.1}, & s \in [0.6, 0.7) \\ 0, & s \in [0.7, 1.6) \end{cases}, S_2 = \begin{cases} \frac{s}{0.6}, & s \in [0, 0.6) \\ 1, & s \in [0.6, 0.7) \\ \frac{0.7-s}{0.1}, & s \in [0.7, 0.8) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

饱和度对应交通状态轻度拥堵、中度拥堵和重度拥堵等级的隶属函数分别如 S_3 、 S_4 和 S_5 所示:

$$S_3 = \begin{cases} \frac{s-0.6}{0.1}, & s \in [0.6, 0.7) \\ 1, & s \in [0.7, 0.8) \\ \frac{0.9-s}{0.1}, & s \in [0.8, 0.9) \\ 0, & \text{other} \end{cases}, S_4 = \begin{cases} \frac{s-0.7}{0.1}, & s \in [0.7, 0.8) \\ 1, & s \in [0.8, 0.9) \\ \frac{1.6-s}{0.7}, & s \in [0.9, 1.6) \\ 0, & \text{other} \end{cases}, S_5 = \begin{cases} 0, & s \in [0, 0.9) \\ \frac{s-0.8}{0.1}, & s \in [0.8, 0.9) \\ 1, & s \in [0.9, 1.6) \end{cases} \quad (8)$$

3. 基于集成赋权模型的城市道路交叉口交通状态评价

3.1. 主客观权重计算

1) 基于 AHP 法的主观权重计算。先对需要分析的要素层次化、步骤化, 建立起多层次分析评价模型, 再评判各层级指标的相对重要性标度, 并对赋权结果进行一致性检验, 确保其科学性[23]。其计算步骤如下:

步骤 1: 明确影响因素, 建立层次模型。将问题分解成目标层、指标层和方案层。

步骤 2: 构造判断矩阵。利用 1~9 标度法[24], 确定指标间的相对重要性标度, 如表 2, 再构造判断矩阵 U 。这里确定了指标 d_i 对指标 d_j 和指标 d_j 对指标 d_k 的相对重要性标度 $I:J$ 和 $J:K$ 之后, 再由传递性确定指标 d_i 对指标 d_k 的相对重要性标度为 $I:K = (I:J)/(J:K)$ 。

Table 2. Index scales and meanings of AHP method

表 2. AHP 法的指标标度及含义

相对重要性标度	标度含义
$\lambda^1 = 1$	同等重要
$\lambda^3 = 1.649$	稍微重要
$\lambda^5 = 2.718$	重要
$\lambda^7 = 4.482$	明显重要
$\lambda^9 = 7.390$	强烈重要
$\lambda^2 = 1.284, \lambda^4 = 2.117, \lambda^6 = 3.490, \lambda^8 = 5.755$	介于上述相邻判断的中间值

步骤 3: 计算指标权重向量。通过对判断矩阵 U 做归一化处理, 再将归一化后判断矩阵的每一行元素求和值进行归一化处理, 得到权重向量。

步骤 4: 检验判断矩阵 U 的一致性。计算 U 的最大特征值 λ_{\max} , 由此得到一致性指标 $CI = (\lambda_{\max} - m)/(m - 1)$, 最后求得随机一致性比率 $CR = CI/RI$ (RI 为随机一致性指标)。当 $CR < 0.1$ 时, U 满足一致性, 步骤 3 求得的权向量可作为评价指标的权向量; 否则, 重新修正判断矩阵, 直至其满足一致性为止。

2) 基于 G1 法的主观权重计算。G1 法是基于 AHP 法的改进方法, 无需进行一致性检验, 基于指标重要性排序信息计算指标权重[25]。计算步骤如下:

步骤 1: 确定序关系。按照专家经验或某评价准则将指标按相对重要性从大到小的顺序排序, 得到 $d_1^* > d_2^* > \dots > d_m^*$ 的序关系。

步骤 2: 确定序关系邻近的指标重要性程度之比。即 d_{j-1}^* 权重 w_{j-1} 相对于 d_j^* 权重 w_j 的比值, 记为 $r_j = w_{j-1}/w_j$ 。根据表 3 所示各标度含义与标度的对应关系来确定。

Table 3. Index scales and meanings of G1 method
表 3. G1 法的定量评价标度及含义

标度	标度含义
1.0	d_{j-1}^* 比 d_j^* 同样重要
1.2	d_{j-1}^* 比 d_j^* 稍微重要
1.4	d_{j-1}^* 比 d_j^* 明显重要
1.6	d_{j-1}^* 比 d_j^* 强烈重要
1.8	d_{j-1}^* 比 d_j^* 极端重要
1.1, 1.3, 1.5, 1.7	上述相邻判断的中间值

步骤 3: 确定评价指标的相对权重向量。通过式(9)计算得到 d_m^* 的权重, 再根据式(10)推出其他指标的权重。

$$w_m = \left(1 + \sum_{k=2}^m \prod_{j=k}^m r_j \right)^{-1} \quad (9)$$

$$w_{j-1} = r_j w_j, j = m, m-1, \dots, 2 \quad (10)$$

3) 基于熵权法的客观权重计算。熵权法依据各个指标数据值的离散度, 利用指标信息熵计算权重, 然后借助熵权对权重向量进行修正, 得到更准确的权重结果[26]。计算步骤如下:

步骤 1: 归一化原始数据。为消除各指标不同量纲对计算结果的影响, 对原始评价对象集 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ 做无量纲化处理, 具体地, 正评价指标值正向标准化 $y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$, 逆评价指标值逆向标准化 $y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})}$ 。其中, $\max_j(x_{ij})$ 为指标 d_j 下评价对象的最大值, $\min_j(x_{ij})$ 为指标 d_j 下评价对象的最小值。由此得到归一化后矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤 2: 计算指标 d_j 的信息熵 h_j 。

$$h_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (11)$$

式中: $f_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^n y_{ij}$, 为第 j 个指标下第 i 个评价对象的特征比重; 特别地, 当 $f_{ij} = 0$ 时, 式中 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

步骤 3: 计算指标 d_j 的变异程度系数 b_j , 也叫做信息冗余度。

$$b_j = 1 - h_j \quad (12)$$

步骤 4: 计算第 j 个指标的熵权 w_j 。

$$w_j = b_j / \sum_{j=1}^m b_j \quad (13)$$

4) 基于 CRITIC 法的客观权重计算。CRITIC 法考虑了指标内部数据变异性的同时兼顾指标间的相关性, 是完全根据数据本身客观属性做出科学评价的方法[27]。计算步骤如下:

步骤 1: 归一化原始数据。得到归一化后的矩阵 $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤 2: 以标准差的形式来表现指标的差异性。如式(14)。

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (14)$$

式中: $\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}$, 为第 j 个指标值归一化后的平均值。

步骤 3: 以相关系数的形式量化指标之间的冲突性。指标 d_j 与其他指标的冲突性可通过下式计算得到:

$$Z_j = \sum_{i=1}^m (1 - z_{ij}) \quad (15)$$

式中: z_{ij} 为指标 d_i 和 d_j 之间的相关系数。

步骤 4: 计算指标信息量。指标信息量越大, 在整个评价指标体系中作用越大, 应分配到更大的权重。计算方法如式(16)。

$$C_j = S_j Z_j \quad (16)$$

步骤 5: 根据式(17)计算客观权重。

$$w_j = C_j / \sum_{j=1}^m C_j \quad (17)$$

5) 基于变异系数法的客观权重计算。变异系数法的基本思想是基于指标变化差异大小程度进行赋权, 给具有更大变异系数的指标赋予更大的权重, 变异系数小的指标被赋予的权重更小[28]。其计算步骤如下:

步骤 1: 计算指标 d_j 的均值和标准差。计算方法同式(14)。

步骤 2: 计算指标 d_j 的变异系数 V_j 。

$$V_j = s_j / \bar{y}_j \quad (18)$$

步骤 3: 对变异系数做归一化处理, 进而得到各指标的权重。见式(19)。

$$w_j = V_j / \sum_{j=1}^m V_j \quad (19)$$

3.2. 基于 LS 的集成赋权模型

为了既照顾到专家学者的主观决策, 又保留指标数据的客观真实性, 使指标的赋权达到主观与客观的统一、价值量与信息量的相合, 尝试对上述主客观方法下各指标的赋权结果进行集成[29]。本文的集成赋权基本思路为: 基于 LS 构建集成赋权的评价结果与主、客观赋权下的评价结果的离差函数, 建立以离差函数达到最小为目标函数, 以各指标权重控制在合理阈值范围为约束条件的优化模型, 求解各指标的最优集成权重。

记有 v 种主观权重计算方法对评价指标进行赋权, 则可得到各指标主观权重集合

$W_A = \{w_{aj} \mid 1 \leq a \leq v, 1 \leq j \leq m\}$, 且对 $\forall a$, $\sum_{j=1}^m w_{aj} = 1$, $w_{aj} \geq 0$ 。基于归一化后的指标数据集 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$,

采用 $u - v$ 种客观权重计算方法对评价指标进行赋权, 得到客观权重集合 $W_B = \{w_{bj} \mid 1 \leq b \leq u - v, 1 \leq j \leq m\}$,

且对 $\forall b$, $\sum_{j=1}^m w_{bj} = 1$, $w_{bj} \geq 0$ 。记各指标的集成权重为 $W_Z = (w_{z1}, w_{z2}, \dots, w_{zm})$ 。由此, 建立的基于 LS 的集成赋权模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ \sum_{a=1}^v [(w_{aj} - w_{zj})y_{ij}]^2 + \sum_{b=1}^{u-v} [(w_{bj} - w_{zj})y_{ij}]^2 \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^m w_{zj} = 1, w_{zj} \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

3.3. 改进的 LS 集成赋权模型

基于 LS 的集成赋权模型在兼顾了主观和客观权重计算方法优点的同时,也尽可能地使评价结果的总离差最小。但是考虑到权重大小也反映了指标自身重要性,且同一指标在主、客观下的相对重要程度也存在差异,因而增设主、客观权重的相对重要程度系数,分别与目标函数中的主观评价离差项和客观评价离差项相乘,以充分地发挥权重占比大小代表的重要程度高低这一功能,最大限度保留单一赋权向量所反映出的指标重要度信息。基于模型(20)得到改进的 LS 集成赋权模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ \alpha \sum_{a=1}^v [(w_{aj} - w_{zj})y_{ij}]^2 + \beta \sum_{b=1}^{u-v} [(w_{bj} - w_{zj})y_{ij}]^2 \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^m w_{zj} = 1, w_{zj} \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式中: α 和 β 分别为主、客观权重的相对重要程度系数,具体计算步骤如下:

步骤 1: 计算指标 d_j 主、客观权重分量期望值。可以把 u 个来自主、客观权重计算结果看做来自 2 个总体,根据矩估计理论可以计算每个指标 d_j 主观权重分量 w_{aj} 和客观权重分量 w_{bj} 的期望值[15]为

$$E(w_{aj}) = \frac{\sum_{a=1}^v w_{aj}}{v}, E(w_{bj}) = \frac{\sum_{b=1}^{u-v} w_{bj}}{u-v} \quad (22)$$

步骤 2: 计算指标 d_j 的主、客观权重的重要系数 α_j 和 β_j , 如式(23)

$$\alpha_j = \frac{E(w_{aj})}{E(w_{aj}) + E(w_{bj})}, \beta_j = \frac{E(w_{bj})}{E(w_{aj}) + E(w_{bj})} \quad (23)$$

步骤 3: 计算主、客观权重相对重要程度系数 α 和 β 。 m 个指标的主观重要系数和及客观重要系数的相对大小可以用于表示主、客观权重的相对重要程度,基于此分别设立主、客观权重相对重要程度系数 α 和 β , 计算方法如式(24)

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^m \alpha_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_j + \sum_{j=1}^m \beta_j}, \beta = \frac{\sum_{j=1}^m \beta_j}{\sum_{j=1}^m \alpha_j + \sum_{j=1}^m \beta_j} \quad (24)$$

α 和 β 的和为 1。在模型(24)中,当 $0.5 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 0.5$ 时,集成赋权结果会更接近于主观结果。当 $0 < \alpha < 0.5$, $0.5 < \beta < 1$ 时,赋权结果会更接近于客观结果。当 $\alpha = \beta = 0.5$ 时,说明该指标在主客观赋权方法下重要程度相同,组合赋权无需偏向哪一方。

4. 实例分析

4.1. 研究区域交通状态概况

选取贵阳市长岭南(北)路 4 个交叉口进行实例分析,分别为长岭南路与阳关大道交叉口、长岭南(北)路与观山东(西)路交叉口、长岭北路与金珠东路交叉口和长岭北路与东林寺路交叉口,为方便后续描述,

分别将以上 4 个交叉口简称为交叉口①、交叉口②、交叉口③和交叉口④。以 4 个交叉口 2021 年 3 月 1 日至 30 日过车数据为基础, 将上述方法和理论应用到该道路不同交叉口的交通状态评估中, 2021 年 3 月 31 日的过车数据用于结果对比分析。

长岭南(北)路位于贵阳市观山湖区, 是区内交通性主干道, 周围有国际会议中心、金融城、城市公园等交通吸引点, 车流量较多, 各交叉口地理位置见图 2。



Figure 2. Spatial distribution of intersections
图 2. 交叉口空间分布图

分别绘制各交叉口 31 d 的日均车速变化图、日均延误时间变化图、日均饱和度变化图, 见图 3~5。从图中可以发现, 在交叉口①处, 车辆行驶的平均速度是偏高的, 但饱和度偏低, 说明相较于其他路口此交叉口发生拥堵的频率较低; 交叉口②特点是具有较高的饱和度的同时, 仍能呈现较高的车速水平, 但是车辆延误时间也明显偏高, 这是因为交叉口②是观山湖区两条主干道相交形成平面交叉路口, 道路交通流量非常大, 且路口截面较宽, 车辆通行时间长; 交叉口③的日平均车速、饱和度、延误时间呈现出不规律的波动形式, 各交通指标的数值没有像其他路口一样呈现出一定的规律性, 是因为该交叉口临近会展中心和金融城, 且会展活动的举办会导致人、车流量的增大, 让该交叉口的拥堵畅通情况呈现不规则波动变化; 交叉口④的平均饱和度相较于其他路口偏高, 延误时间长, 平均车速偏低, 是因为该路口是贵阳市白云区 and 观山湖区北片区往返二环方向的重要节点之一, 交通压力大, 通行状况相较于其他路口表现较差。

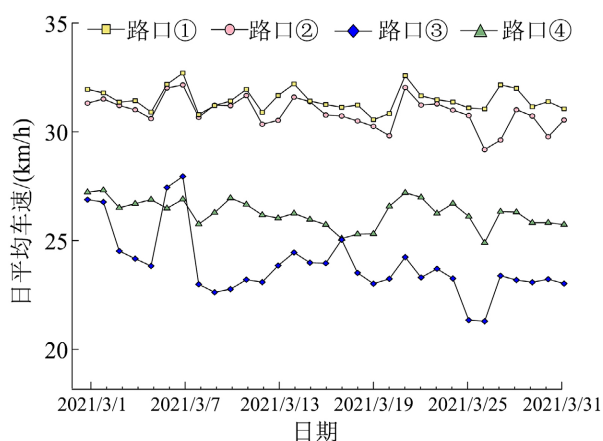


Figure 3. Daily average vehicle speed
图 3. 逐日平均车速

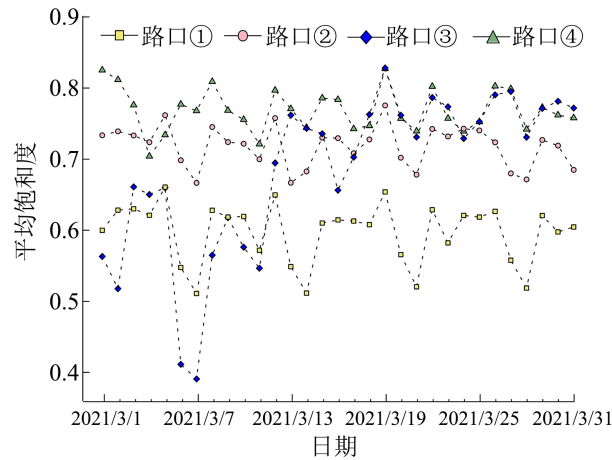


Figure 4. Daily average saturation
图 4. 逐日平均饱和度

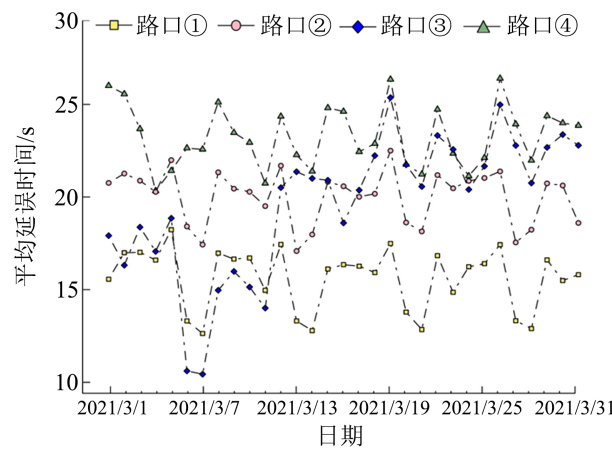


Figure 5. Daily average delay time
图 5. 逐日平均延误时间

4.2. 道路交通状态评价指标的主客观权重

1) 基于 AHP 法的主观权重计算。基于专家主观经验确定的 3 个指标的重要性排序为: $\bar{v} > s > \bar{d}$ [7] [21]。基于表 2 构建交叉口交通状态评价指标的判断矩阵 U , 计算其一致性比例 $CR = 0.0068 < 0.1$, 此时满足一致性要求。求得 U 的最大特征值 $\lambda_{\max} = 3.008$, 及其对应的特征向量, 并对特征向量做归一化处理, 得到 \bar{v} 、 s 和 \bar{d} 3 个指标的主观权重向量 $W_{A1} = (0.516, 0.278, 0.206)$ 。

2) 基于 G1 法的主观权重计算。基于指标序关系及专家针对各指标做出的相对重要程度描述 [7] [21], 得到指标 \bar{v} 相对于 s 的重要性程度之比 $r_2 = 1.2$, s 相对于 \bar{d} 的重要性程度之比 $r_3 = 1.1$ 。继而得到 3 个指标基于 G1 法的主观权重向量 $W_{A2} = (0.386, 0.322, 0.292)$ 。

3) 基于熵权法的客观权重计算。根据交通数据归一化后矩阵计算得到 3 个指标的变异程度系数分别为: $b_1 = 0.0054$, $b_2 = 0.0076$, $b_3 = 0.0023$ 。继而得到 3 个指标基于熵权法客观的权重向量 $W_{B1} = (0.351, 0.497, 0.152)$ 。

4) 基于 CRITIC 法的客观权重计算。根据式(14)~(17)计算得各指标的标准差 S_j 、相关系数 Z_j 系数和信息量 C_j 。继而得到 3 个指标基于 CRITIC 法的客观权重向量 $W_{B2} = (0.350, 0.390, 0.260)$ 。

5) 基于变异系数法的客观权重计算。根据式(18)计算得各指标的变异系数 V_j 。继而得到基于变异系数法的客观权重向量 $W_{B3} = (0.359, 0.418, 0.223)$ 。

4.3. 道路交通状态评价指标最优组合权重

根据式(22)~(24)可计算出基于上述主观权重 W_{A1}, W_{A2} 和客观权重 W_{B1}, W_{B2}, W_{B3} 的相对重要程度系数分别为 $\alpha = 0.503$, $\beta = 496$, 因此赋权结果应偏向主观。在此基础上, 使用 R 软件对模型(21)进行求解, 可得到集成权重向量 $W_z = (0.3929, 0.3803, 0.2268)$ 。与模型(20)求解结果 $W'_z = (0.3926, 0.3807, 0.2267)$ 对比, 权重向量 W_z 与相对重要程度更大的 2 个主观权重向量更为接近。图 6 绘制了各方法计算权重的结果的雷达图, 对比发现, 采用 5 种单一赋权方法得到的权重结果存在一定的差异, 改进的 LS 集成赋权模型得到的赋权结果很好地均衡了各权重向量, 有理由相信集成赋权结果更趋合理。

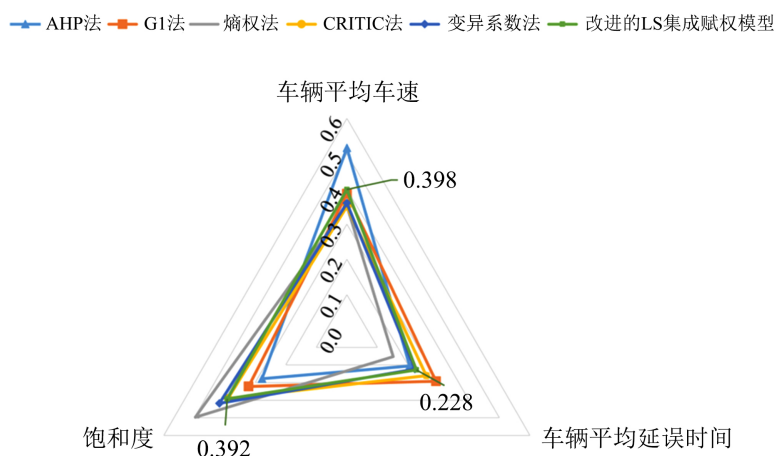


Figure 6. Comparison of weight results
图 6. 权重结果对比

4.4. 评价指标

为验证模型的有效性, 以 GB/T 33171-2016 交通状态划分准则、文献[16]中的客观修正主观组合赋权模型和文献[17]中的基于博弈论的线性集成赋权模型的交通状态评价结果作为基准, 将本文模型的评价结果与以上结果进行对照, 采用准确率(accuracy)、1 次偏差率(single deviation rate, SDR)和高次偏差率(high deviation rate, HDR)将各方法之间的比对结果进行量化, 具体计算方法如下:

$$\text{accuracy} = (\text{评价正确的次数} / \text{评价总次数}) * 100\%$$

$$\text{SDR} = (\text{评价结果与基准相差1个状态等级的次数} / \text{评价总次数}) * 100\%$$

$$\text{HDR} = 1 - \text{准确率} - \text{一次偏差率}$$

4.5. 交叉口交通状态评价结果

采用集成权重 - 隶属度矩阵计算 4 个交叉口在 2021 年 3 月 31 日的评价结果 B_i , 并根据最大隶属度原则得到对应的交通状态等级。表 4 给出了改进 LS 集成赋权模型的有效性验证结果, 和文献[16]的交通状态组合赋权评价模型的结果进行相比, 准确率超过 96%, 说明所提模型与现有研究集成赋权模型的判断基本一致; 与根据自由流速度划分状态的 GB/T 33171-2016 准则评价结果相比, 1 次偏差范围内准确率超过 97%也说明该模型能较好地反应出长岭南(北)路交叉口的真实交通状况。

Table 4. Validation of traffic status evaluation at intersections

表 4. 交叉口交通状态评价有效性验证

基准	<i>accuracy</i>	<i>SDR</i>	<i>HDR</i>
GB/T 33171-2016	75.95%	21.61%	2.43%
客观修正主观组合赋权	96.27%	2.95%	0.78%

表 5 分别给出了在 GB/T 33171-2016 和改进 LS 集成赋权模型 2021 年 3 月 31 号 4 个时间段的具体指标值及评价结果, 对比发现, 两组评价结果非常近似且符合真实路况, 但在 31 日 12:00~12:05 时段长岭北路与金朱东路交叉口的交通状况评价结果不一致, 结合指标值, 可以看出在该时段车辆行驶缓慢, 且交叉口饱和度大于 1, 饱和水平处于偏高状态, 车辆平均延误时间在 30 s 以上, 有理由认定此时交通状态更接近于轻度拥堵等级, 而不是基本畅通的状态。长岭北路与东林寺路交叉口在 18:00~18:05 时段的情况也类似, 此 5 min 内的饱和度为 1.5, 且平均延误时间接近 1 min, 有理由认定此时交通状态更接近于严重拥堵等级, 而不是基本畅通的状态。

Table 5. Evaluation of traffic status at each intersection

表 5. 各交叉口交通通行状态评价

路口	时段	\bar{v} /(km/h)	<i>s</i>	\bar{d} /s	B_i	交通状态 (GB/T 33171-2016)	交通状态 (本文模型)
路口①	00:00~00:05	35.84	0.25	8.86	(1, 0.40, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	06:00~06:05	39.00	0.07	7.73	(1, 0.21, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	12:00~12:05	26.15	0.78	15.36	(0.61, 0.58, 0.39, 0.32, 0)	畅通	畅通
	18:00~18:05	23.51	1.03	26.78	(0.39, 0.61, 0.22, 0.26, 0.39)	基本畅通	基本畅通
路口②	00:00~00:05	29.50	0.32	9.40	(1, 0.56, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	06:00~06:05	36.28	0.11	7.96	(1, 0.29, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	12:00~12:05	27.60	0.86	17.81	(0.62, 0.53, 0.13, 0.38, 0.25)	畅通	畅通
	18:00~18:05	23.09	1.02	26.11	(0.39, 0.62, 0.23, 0.27, 0.38)	基本畅通	基本畅通
路口③	00:00~00:05	27.71	0.33	9.42	(1, 0.59, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	06:00~06:05	33.64	0.11	7.99	(1, 0.33, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	12:00~12:05	18.67	1.16	33.97	(0.06, 0.55, 0.56, 0.20, 0.38)	基本畅通	轻度拥堵
	18:00~18:05	16.01	1.19	35.73	(0, 0.35, 0.62, 0.38, 0.38)	轻度拥堵	轻度拥堵
路口④	00:00~00:05	25.96	0.24	8.76	(1, 0.55, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	06:00~06:05	28.77	0.14	8.14	(1, 0.43, 0, 0, 0)	畅通	畅通
	12:00~12:05	23.43	1.14	32.67	(0.32, 0.58, 0.30, 0.20, 0.38)	基本畅通	基本畅通
	18:00~18:05	19.06	1.50	56.02	(0.08, 0.39, 0.37, 0.23, 0.55)	基本畅通	严重拥堵

针对上述不同赋权方法得到的评价结果做可区分性分析。通过评价结果状态等级数的方差来代表区分度, 方差计算结果如表 6 所示, 其中改进 LS 集成赋权模型的方差最大, 表明通过该模型求解的组合权重评价结果在区分度上有更优表现, 各交通状态间的界限更加明显, 交通状态判别效果更好。

Table 6. Comparison of discrimination of evaluation results of each weighting method
表 6. 各赋权方法评价结果区分度比较

赋权方法	方差
客观修正主观组合赋权	0.78
GB/T 33171-2016	0.57
基于 LS 的集成赋权	0.83
改进 LS 集成赋权	0.84

借助 3 个交通指标 30 d 内的平均值代入所提的评价模型来计算交叉口的总体交通状况, 得到长岭南(北)路 4 个交叉口的交通总体状态评价结果如表 7, 表明长岭南(北)路在此路段上总体处于基本畅通状态, 其中交叉口①的交通通行状况最畅通, 其余 3 个路口的畅通度稍次之, 与前文 4.1 节的各路口交通状况概述的结论相符合, 因此在此路段上交管部门可以分配比路口①更多的注意力在路口②③④上, 以及可以制定更加针对性的交通监管、治理策略。

Table 7. Overall traffic status evaluation of each intersection
表 7. 各交叉口交通总体状态评价

路口	B_i	交通状况
路口①	(1, 0.83, 0, 0, 0)	畅通
路口②	(0.62, 0.85, 0.38, 0.07, 0)	基本畅通
路口③	(0.59, 0.99, 0.41, 0, 0)	基本畅通
路口④	(0.55, 0.73, 0.45, 0.26, 0)	基本畅通

综上, 以上分析证明了所提交叉口交通状态评价模型的实用性和准确性。交通监管部门可依此模型预判交叉口拥堵水平, 及时管控疏导交叉口拥堵, 提升通行效率。

5. 结束语

1) 在交通状态综合评价研究的基础上, 针对单指标评价方法的局限性, 建立了改进的 LS 集成赋权模型。该方法以集成赋权评价结果与主、客观赋权结果离差最小化为目标, 使赋权结果不仅能反映专家的主观经验, 还充分利用指标值的内在客观数据信息。并且此模型通过增设主、客观权重相对重要程度系数, 更有效地调节了模型中主观权重离差和客观权重离差的比例, 使得模型的评价结果更加可靠。

2) 对长岭南(北)路 4 个交叉口的交通状态进行评价, 并与现有评价方法评价结果进行了比较, 验证了该方法的合理性、实用性和可区分性, 研究方法与结论可为其他道路交叉口状态判别提供理论支撑。

3) 通过对 4 个交叉口进行总体状态评价, 确定此路段上总体处于基本畅通状态, 其中长岭南路与阳关大道交叉口的交通状况最畅通, 其余 3 个路口的畅通度稍次之, 交管部门可基于此结论对各路口制定

具有针对性的交通管理策略。

4) 本文的不足之处在于以下 2 个方面: 一是, 在实际的道路上, 影响交通状态的因素有很多, 还有如道路基本设施条件、天气状况等, 但目前由于获取交通数据的渠道有限, 仅选用 3 个交通指标, 因此未来的研究会面向更多影响交通状态的指标; 二是, 本文的研究仅对道路交叉口的交通状态进行了评价, 未来会朝着路段及区域路网的交通状态评价的方向继续研究。

致谢

感谢中国贵州省贵阳市公安交通管理局提供的检测器数据。

基金项目

本项目受国家自然科学基金(12161016, 11661018)、贵州省科技计划项目([2020] 5016)资助。

参考文献

- [1] Flyvbjerg, B., Kahr, K., Petersen, P., *et al.* (1986) Evaluation of Public Transport: Method for Application in Open Planning. *Transportation*, **13**, 23-52. <https://doi.org/10.1007/BF00167736>
- [2] 公安部交通管理局. 城市道路交通管理评价体系[R]. 北京: 公安部交通管理局, 2002.
- [3] Brown, T., Ensor, M., Vallyon, C., *et al.* (2006) Travel Time Performance Programme: A Step toward Congestion Management System. *IPENZ Transportation Conference*, Christchurch, 11 October 2006, 1-12.
- [4] 耿艳芬, 郭华强, 刘轰, 等. 基于时空关联的京杭运河苏北段通行状态研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(5): 859-865.
- [5] Hawas, Y.E. (2007) A Fuzzy-Based System for Incident Detection in Urban Street Networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **15**, 69-95. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.02.001>
- [6] Moran, C.A. and Koutsopoulos, H.N. (2010) Congestion Indicators from the Users' Perspective: Alternative Formulations with Stochastic Reference Level. *Transport Systems & Logistics*, Transport Systems & Logistics Laboratory, Lisbon.
- [7] 晏雨婵, 白璘, 武奇生, 等. 基于多指标模糊综合评价的交通拥堵预测与评估[J]. *计算机应用研究*, 2019, 36(12): 3697-3700+3704.
- [8] 吴高华, 李倩, 史宇峰. 城市轨道交通关键设备识别与运行状态评价[J]. *交通运输研究*, 2019, 5(5): 94-101.
- [9] 陈征, 刘钊, 王静, 等. 基于 RFID 和视频监测的城市交通运行状态模糊判别(英文) [J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(2): 68-75.
- [10] Yu, J.F., Wang, L. and Gong, X.L. (2013) Study on the Status Evaluation of Urban Road Intersections Traffic Congestion Base on AHP-TOPSIS Model. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, **96**, 609-616. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.071>
- [11] 许伦辉, 吴彩芬, 邝先验, 等. 基于层次分析的城市交通状态模糊综合评价方法[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 33(2): 1-8.
- [12] 苏飞. 城市道路路网交通运行状态分析方法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [13] Shen, J., Guo, X.C., Zhang, Y.M., *et al.* (2020) Traffic Status Dynamic Evaluation of an Eight-Lane Highway Based on the Lane Level. *Mathematical Problems in Engineering*, **2020**, Article ID: 1659475. <https://doi.org/10.1155/2020/1659475>
- [14] 王卫东, 杜香刚, 钟晟. 城市轨道交通评价指标权重模糊决策方法[J]. *中国铁道科学*, 2009, 30(1): 118-121.
- [15] 江文奇. 多属性决策的组合赋权优化方法[J]. *运筹与管理*, 2006, 15(6): 40-43.
- [16] 郭佳. 基于交通雷达数据的交通状态判别方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [17] 徐建闽, 韦佳, 首艳芳. 基于博弈论-云模型的城市道路交通运行状态综合评价[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(4): 1-10.
- [18] Zadeh, L.A. (1971) Quantitative Fuzzy Semantics. *Information Sciences*, **3**, 159-176. [https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(71\)80004-X](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(71)80004-X)
- [19] Akcelik, R. and Roupail, N.M. (1994) Overflow of Queues and Delays with Random and Platooned Arrivals at Sig-

- nalized Intersections. *Journal of Advanced Transportation*, **28**, 227-251. <https://doi.org/10.1002/atr.5670280305>
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市交通运行状况评价规范. GB/T 33171-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [21] 聂增国. 城市道路交通状态评价研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [22] 张敬信. 数学建模: 算法与编程实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [23] Saaty, R.W. (1987) The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used. *Mathematical Modelling*, **9**, 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- [24] Dong, Q.X. and Saaty, T.L. (2014) An Analytic Hierarchy Process Model of Group Consensus. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, **23**, 363-375. <https://doi.org/10.1007/s11518-014-5247-8>
- [25] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 67-73.
- [26] Su, F., Dong, H.H., Jia, L.M., *et al.* (2017) On Urban Road Traffic State Evaluation Index System and Method. *Modern Physics Letters B*, **31**, Article ID: 1650428. <https://doi.org/10.1142/S0217984916504285>
- [27] Pan, B.H., Liu, S.R., Xie, Z.J., *et al.* (2021) Evaluating Operational Features of Three Unconventional Intersections under Heavy Traffic Based on CRITIC Method. *Sustainability*, **13**, 4098. <https://doi.org/10.3390/su13084098>
- [28] 王文森. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标[J]. 中国统计, 2007, 55(6): 41-42.
- [29] 冯辉红, 卢祥花. 基于最小二乘云模型的公路服务区项目成功度后评价[J]. 公路, 2022, 67(8): 266-277.