

文章编号:1674-599X(2022)03-0113-08

精准管控下的城市交通拥堵状态研判与建模

张可可¹,韩春阳²,周京¹,许鹏鹏³

(1.湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南 长沙 410200;2.清华大学 自动化系,北京 100084;
3.香港大学 土木工程系,香港 999077)

摘要:针对治理城市交通拥堵难题,本研究提出了一种趋势预测、状态评价及精细判定的综合评判方法。该方法以交通流量、平均速度和时间延误为判别因素,建立了基于模糊C-均值聚类算法的动态交通状态评价标准;基于支持向量机构建交通态势预测模型,利用聚类模型进行状态评价,判定需要采取交通管制的路段;采用数据包络法,确定各路段所需要采取措施的优先级。本研究以长沙市部分路段为实例,验证了该方法的合理性和有效性,为城市交通精细化管控提供了技术参考和决策支持。

关键词:交通管理;拥堵评价;数据驱动;机器学习

中图分类号:U491.2 **文献标志码:**A

Towards smart management and control: a novel approach to identify traffic congestion states in urban areas

ZHANG Keke¹, HAN Chunyang², ZHOU Jing¹, XU Pengpeng³

(1.Hunan Provincial Communications Planning & Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;
2.Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3.Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: To solve the problems caused by traffic congestions in urban areas, this study proposed a comprehensive method to evaluate and predict traffic states. Based on three discriminating factors of traffic flow, average speed and travel time delay, a dynamic traffic state discrimination model using the fuzzy C-means clustering algorithm was established first to determine the states of all samples. Then, the traffic situation prediction model is constructed based on the support vector machine model, and the clustering model is used to evaluate the traffic states and determine the road segment that needs to be traffic controlled. Finally, the data envelopment method was developed to identify the priority of each road section for more precise traffic control. Based on the empirical data collected in Changsha, China, this method was validated, the research results could provide substantial supports for decision makers to take proactive measures to release traffic congestions in urban areas.

Key words: traffic management; traffic congestion identification; data driven approach; machine learning

交通拥堵程度是衡量城市道路交通运行状况的指示器,直接影响居民的出行质量和城市发展^[1]。目前,各城市已采取多项措施治理交通拥堵。但由于交通系统的复杂性,采取有效的措施并非易事。面对交通状态的不确定性和动态性,

建立实时、科学的预测—判定—管控体系显得尤为重要。

交通运行状态研究主要分为评价指标选取、评价方法构建、状态预测判别以及管理手段4个方面。指标研究多侧重于交通特征指标的选取与组合^[2-3],

收稿日期:2021-07-06

作者简介:张可可(1990—),女,湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师。

研究各指标之间的相关性。评价方法主要侧重于方法的优化及拥堵传播机理的讨论^[4-7],旨在通过改进预测方法和参数,提高预测的精度。管理手段主要从交通规划、智能技术设备等方面^[8],通过合理规划路网密度和道路功能,布置道路横断面,引入智能交通系统等手段,缓解交通拥堵。

目前,对道路交通的判定—预测—管控全过程的研究较少。因此,本研究选择流量、平均速度和延误时间作为交通运行状态指标,建立评价体系,制定各道路等级评价标准;再建立交通状态发展趋势的预测模型,判定需要采取交通管控的路段;最后,建立精准判定模型,确定每个路段所需采取措施的优先级。

1 模型构建

1.1 构建思路

先选取评价指标,再以历史指标数据为基础,建立基于模糊C均值算法(fuzzy C-means algorithm, 简称为FCM算法)的交通状态评价标准模型,制定城市交通运行状态的评价标准。然后,运用基于支持向量机(support vector machine, 简称为SVM)的交通状态趋势预测模型对路段状态进行预测,确定需要管控的路段。最后,运用基于数据包络分析方法(data envelopment analysis, 简称为DEA)的交通措施优先级判定模型确定管控道路的优先级。具体流程如图1所示。

1.2 评价指标选取

根据相关研究^[2-3,9]及《城市交通运行状况评价规范》(GB/T 33171—2016),选取了流量、平均速度和延误时间作为状态判别的参数。其中,流量 q 指的是路段某车道截面在单位时间内通过的实际车辆数,该参数反映路段的载荷状态;路段平均速度 v

指的是通过某路段所有车辆的速率平均值,该参数反映车辆的通行效率;延误时间 d 指的是某路段实际行程时间与自由流对应下的行程时间之差,该参数反映行车受外部干扰的程度。

1.3 基于FCM算法的交通状态评价标准模型

1.3.1 模型构建

设有 n 个路段,历史交通数据样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,每个样本 x_i 包含3个属性 $x = (q, v, d)$,将 X 划分为 C 个交通运行状态($2 \leq C \leq n$), C 个聚类中心为矩阵 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_c\}$, U 为隶属度矩阵, $U = [u_{ij}]_{n \times m}$, u_{ij} 表示第 j 个样本属于第 i 类的隶属度。

具体模型为^[10]:

$$\min \{J_m(U, A)\} = \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^n u_{ij}^m D_{ij}^2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} u_{ij} \in [0, 1], \sum_{i=1}^C u_{ij} = 1, \\ 0 \leq \sum_{j=1}^n u_{ij} \leq n \\ m \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $D_{ij} = \|x_j - a_i\|$ 为样本点 x_j 到聚类中心 a_i 之间的欧式距离, $m \geq 1$ 为模糊加权参数。

1.3.2 算法改进

影响FCM算法聚类效果的关键参数包括:模糊指数 m 、聚类数目 C 、聚类中心的初始值 $x_0 = (q_0, v_0, d_0)$ 和聚类中心。因此,做出如下改进:

1) 优化模糊指数 m 的选择。

原FCM算法中 m 主要依据经验进行取值。宫改云等人^[11]认为 m 的取值范围在1.0~2.5。

2) 改进聚类数目 C 和聚类中心初始值的确定方法。

本研究采用减法聚类的方法,该方法回避了传统FCM算法无法消除离散程度大的点,需要预先设

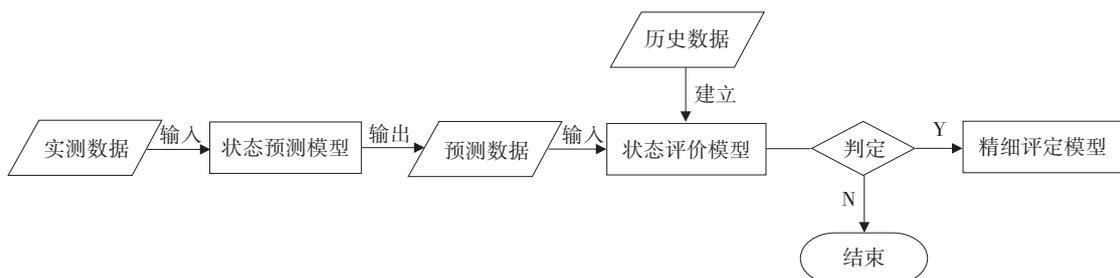


图1 多阶段路段状态精细化评价流程

Fig.1 Flowchart of the proposed multi-stage traffic-state evaluation approach

定分类数目,对于聚类中心初始值没有统一标准的缺陷。

选择路段历史数据样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的密集样本点作为初始聚类中心,计算样本点 x_i 的测度值 P_i, P_i 为 x_i 到其他任一样本点的距离函数,选择对应 P_i 值最高的点 x_i ; 作为第一个初始聚类中点 x_1^* ,再计算下一个聚类中心,直到 $P_k^* < \varepsilon_1 P_1^*$ 为止, ε_1 一般在 $[0, 1]$ 内取值,计算出初始聚类中心、聚类数目 C 。

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (2)$$

其中, $\alpha = \frac{4}{r_\alpha^{2/(m-1)}}$, r_α 表示邻域半径, $r_\alpha =$

$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \|x_i - x_k\|^2}$, 引入平均模糊熵^[12], 判别算法在不同取值下的聚类效果。模糊熵 $H(U, c)$ 越小, 划分效果越好。

$$H_m(U, c) = -\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ij} \ln(u_{ij}) \quad (3)$$

以交通历史数据为依据,改进的FCM算法可以确定交通运行状态的评价标准,为路段实时状态判定奠定了基础。

1.4 基于支持向量机的交通状态趋势预测模型

1.4.1 模型构建

选用SVM模型,以路段实时状态 $x = (q, v, d)$ 作为输入指标,以数据采集时间 t 为预测间隔,对交通流状态进行预测。在高维特征空间中,构造最优线性函数:

$$f(x) = \omega^T \varphi(x) + b \quad (4)$$

其中, $\omega \in R^n$ 为权值, $b \in R$ 为偏移值, $\varphi(x)$ 是输入数据的映射函数。SVM模型的目的是寻找与实际目标 y_i 偏差不超过 ε 的函数 $f(x)$, 因此,只需使 $\|\omega\|^2$ 最小,即可求得最优解,问题转化为:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 \quad (5)$$

$$\text{s.t. } |f(x_i) - y_i| \leq \varepsilon, i = 1, 2, \dots, l \quad (6)$$

为自动确定 ε , 本研究采用 ν 支持向量机回归 (ν -support vector regression, 简称为 ν -SVR), 同时令核函数 $K(x_i, x) = \exp(-\sigma \|x_i - x\|)$, 其中, σ 是一个控制半径的正数。该函数的有效参数值在 $[0, 1]$ 内, 缩小了参数取值的选择范围, 简化计算过程。

1.4.2 预测周期

预测周期 N 定义为预测间隔 t 与次数 n 的乘积。由《2020年度全国主要城市通勤监测报告》可知, 全国主要城市的单程通勤平均时长约为 36 min, 城市治理的业内共识是须保障平均单程通勤在 45 min 以内^[13]。若行程时间增加超过 10 min, 城市运行效率和居民生活品质会受到显著影响。因此, 若某一路段的中度、严重拥堵状态持续超过 10 min, 则应采取交通管控措施。因此取预测周期间隔 N 为 10 min。

1.5 基于DEA的交通措施优先级判定模型

定义每一个路段预测数据 $x_j = (q_j, v_j, d_j)$ 为一个决策单元 (decision making unit, 简称为 DMU)。假设有 n 个 DMU, 每个 DMU _{j} ($j=1, 2, \dots, n$) 有 m 种类型的输入 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, m$), 得到 s 种输出 y_{rj} ($r=1, 2, \dots, s$), b_r 为第 r 项输出的权重, w_i 为第 i 项输入的权重, 第 k 个 DMU 的相对指数可由式(7)求得:

$$\begin{aligned} \max_{b_r, w_i} & \sum_{r=1}^s b_r y_{rk} \\ \text{s.t.} & \begin{cases} \sum_{i=1}^m w_i x_{ik} = 1 \\ \sum_{r=1}^s b_r y_{rk} - \sum_{i=1}^m w_i x_{ik} \leq 0 \\ b_r, w_i \geq 0, r=1, 2, \dots, s; i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

最优决策单元所在的平面多锥面为 DEA 的相对有效面^[14] (有效生产前沿面), 其综合指数 $\theta = 1$ 。作为一种样本间的相对比较, 最优决策单元是相对有效面对应的 DMU 的偏离程度, 偏离程度越大, 其 θ 越小 ($\theta \in (0, 1]$)。

通过对历史样本数据进行分析, 发现交通运行状态一般在相邻两三个状态之间转变, 极少样本呈跳跃式变化。

根据对交通管理部门和机动车驾驶员的调研, 轻度拥堵为可接受范围的上限。因此每次预测选取轻度拥堵及以下的样本。

本研究通过搭建算法框架, 构建面向交通状态评价、发展趋势预测及拥堵路段精细化判定的一体化交通拥堵防控方法。

算法中, 输入实时样本数据 $x = (q, v, d)$, 输出道路管控措施优先级列表。

具体步骤为:

1) 实时状态评价: 基于改进的 FCM 算法对实时检测数据 $x = (q, v, d)$ 进行状态评价。

2) 交通运行状态指标预测:①将评价为轻度拥堵及该状态以下级别的样本 $x_{i_{tk}} = (q_{i_{tk}}, v_{i_{tk}}, d_{i_{tk}})$ 输入基于SVM的交通运行状态发展趋势的预测模型;②预测 n 次,得到 $\{x_{f_1}, x_{f_2}, \dots, x_{f_n}\}$ 。

3) 交通运行状态预测级别判定:①利用评价标准对 $\{x_{f_1}, x_{f_2}, \dots, x_{f_n}\}$ 进行级别判定;②若 $\{x_{f_1}, x_{f_2}, \dots, x_{f_n}\}$ 均被判定为中度拥堵及以下级别的样本,则输出样本号 i 及交通流数据 $x_{i_{mm}} = (q_{i_{mm}}, v_{i_{mm}}, d_{i_{mm}})$ 。

4) 交通管控措施优先级确定:①输入样本号 i 及交通流数据 $x_{i_{mm}} = (q_{i_{mm}}, v_{i_{mm}}, d_{i_{mm}})$;②计算不同状态下聚类中心及最畅通极值点对应的综合指数 θ ;③通过计算样本与类别中心点的距离(即 $\|\theta_{DMU} - \theta_x\|$),

判定同一等级的状态差异;④输出管控措施优先级列表。

2 案例分析

2.1 数据来源

本研究数据来自长沙市交通警察支队智能交通管理平台,其中,流量数据采集自卡口系统,区间平均速度和行程时间数据采集自基于GPS的浮动车系统。

数据采集时间为2020年12月9日—12月16日(每天24h),路段选取情况见表1。本研究收集交通流状态样本的时间间隔为2min。

表1 道路属性表

Table 1 The attributes of roads under investigation

道路名称	编号	路段	车道数	道路长度/km	设计车速/(km·h ⁻¹)	道路等级
万家丽路	LDKS12	远大路—人民路	12	1.5	80	快速路
三一大道	LDZG02	芙蓉北路—车站北路	8	1.8	80	主干路
芙蓉路	LDZG09	湘雅路—五一大道	6	2.1	60	主干路
潇湘大道	LDZG11	新民路—牌楼路	8	1.4	60	主干路
五一大道	LDZG37	湘江大道—芙蓉中路	10	1.7	60	主干路
营盘路	LDZG43	湘江中路—芙蓉中路	6	1.7	50	主干路
蔡锷路	LDCG069	城南西路—五一大道	4	1.3	40	次干路
解放路	LDCG018	黄兴中路—芙蓉中路	4	1.1	40	次干路
银双路	LDCG115	金星中路—银盆南路	4	1.9	40	次干路
滨江景观道	LDCG136	潇湘北路—佑母塘路	4	1.6	40	次干路
银盆南路	LDCG143	潇湘大道—岳麓大道	4	1.7	40	次干路

2.2 路段交通拥堵状态评价

按照改进的FCM算法的交通状态判别模型,取 $\varepsilon_2 = 0.0001$,选取不同的 m 和 ε_1 进行计算,聚类结果见表2。

根据划分熵结果,参考《城市交通运行状况评价规范》(GB/T 33171-2016),将路段交通运行状况等级划分为5个等级,结合北京、上海、广州等城市交通实际运行状态,将本研究聚类数取为5。

主干路、次干路、快速路的聚类中心矩阵分别为 A_1, A_2, A_3 , 聚类结果为:

$$A_1 = (q, v, d) = \begin{pmatrix} 11.76 & 40.61 & 3.83 \\ 19.39 & 36.67 & 6.08 \\ 32.17 & 29.78 & 15.10 \\ 42.03 & 20.54 & 25.73 \\ 57.33 & 8.22 & 34.24 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = (q, v, d) = \begin{pmatrix} 6.98 & 29.76 & 5.69 \\ 13.90 & 27.51 & 9.42 \\ 22.19 & 20.15 & 18.86 \\ 35.29 & 12.68 & 27.99 \\ 46.94 & 5.12 & 35.48 \end{pmatrix}$$

$$A_3 = (q, v, d) = \begin{pmatrix} 13.96 & 58.53 & 1.31 \\ 22.14 & 49.90 & 3.00 \\ 35.78 & 40.77 & 9.42 \\ 46.80 & 24.83 & 15.82 \\ 63.30 & 12.70 & 24.62 \end{pmatrix}$$

表2 各等级道路下不同 m 和 ε_1 取值得到的结果表

Table 2 The results of m and ε_1 for different functional road types

道路等级	m	ε_1	C	H
主干路	2.0	0.5	3	0.442 2
	1.7	0.5	3	0.281 3
	1.5	0.5	3	0.176 8
	1.3	0.5	3	0.090 6
	1.2	0.5	3	0.057 0
	1.2	0.4	3	0.057 0
	1.2	0.3	3	0.057 0
	1.2	0.2	4	0.066 2
次干路	1.2	0.2	5	0.059 4
	1.2	0.5	3	0.092 4
	1.2	0.3	3	0.085 7
	1.2	0.2	3	0.061 3
	1.2	0.3	4	0.054 6
	1.2	0.2	4	0.055 1
	1.2	0.2	5	0.060 2
	1.2	0.3	3	0.053 7
快速路	1.2	0.2	3	0.061 2
	1.3	0.3	5	0.054 3
	1.3	0.2	5	0.056 8

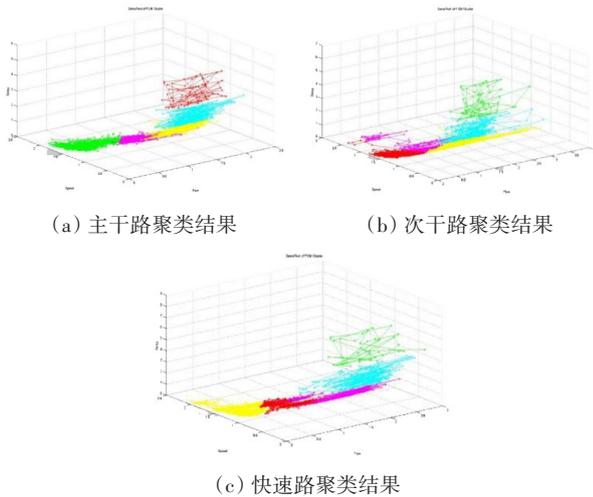


图2 各道路等级聚类图

Fig. 2 Results of the clustering analysis for roads

矩阵按行分别表示道路的畅通、比较畅通、轻度拥堵、中度拥堵和严重拥堵5种状态。采取95%置信度,得到各等级道路的各状态参数区间,分别见表3~5。

表3 主干路结果汇总表

Table 3 Summary of results for arterial roads

等级	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	延误/s
畅通	< 14	> 40	< 5
比较畅通	(12, 27]	(30, 40]	[5, 11]
轻度拥堵	(27, 36]	(22, 30]	(11, 18]
中度拥堵	(36, 47]	[15, 22]	(18, 26]
严重拥堵	> 47	< 15	> 26

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

表4 次干路结果汇总表

Table 4 Summary of results for collector roads

等级	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	延误/s
畅通	< 9	> 30	< 7
比较畅通	[9, 18]	[30, 41]	[7, 12]
轻度拥堵	(18, 29]	(20, 30]	(12, 21]
中度拥堵	(29, 41]	[10, 24]	(21, 29]
严重拥堵	> 41	< 10	> 29

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

表5 快速路结果汇总表

Table 5 Summary of results for expressways

等级	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	延误/s
畅通	< 14	> 55	< 2
比较畅通	[14, 30]	(41, 55]	[2, 5]
轻度拥堵	(30, 40]	(32, 41]	(5, 11]
中度拥堵	(40, 52]	[19, 32]	(11, 19]
严重拥堵	> 52	< 19	> 19

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

本研究采取20个样本于2020年12月22日17:30的实时数据,对其进行状态评价,各样本参数及判定结果见表6。

2.3 路段交通拥堵趋势预测

对判定为轻度及以下拥堵程度级别的1、2、3、6、8、12、15、18、19和20号样本路段进行交通拥堵发展趋势预测。预测周期 N 为10 min (2 min/次,共5次),结果见表7。

2、8、18号样本路段在预测周期内均判定为中度及以上拥堵程度级别,需进行精细判别。

2.4 DEA 求解

2、8、18号样本路段均为主干路,选取FCM模型中主干路聚类中心和数据中最畅通的一个极值,利用DEAP软件对基于DEA的交通状态判别模型进行求解,得到主干路不同状态下的聚类中心及最畅通极值点对应的综合指数 θ ,结果见表8。

利用DEA模型对2、8、18样本路段进行同级别判定,结果见表9。

表6 路段状态样本数据及判定结果表

Table 6 Determinations of real-time states for sampled road sections

序号	样本编号	路段名称	道路等级	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	延误/s	判定结果
1	LDZG0806	黄兴路(中山路—营盘路)	主干路	32	29.0	15.6	轻度拥堵
2	LDZG0916	芙蓉路(城南路—人民中路)	主干路	25	21.0	16.7	轻度拥堵
3	LDZG1004	韶山北路(人民中路—城南东路)	主干路	20	30.0	13.3	轻度拥堵
4	LDZG1109	潇湘北路(银双路—银盆南路)	主干路	15	40.0	7.1	比较畅通
5	LDCG00606	栖凤路(陡岭路—车站北路)	次干路	10	30.2	6.7	比较畅通
6	LDZG4405	车站北路(双拥路—三一大道)	主干路	28	22.0	14.8	轻度拥堵
7	LDZG3915	劳动路(韶山路—芙蓉路)	主干路	18	32.0	11.5	比较畅通
8	LDZG4302	营盘路(芙蓉中路—蔡锷北路)	主干路	35	17.0	22.4	中度拥堵
9	LDCG00529	开元东路(宁华南路—东九路)	次干路	10	40.5	2.4	畅通
10	LDCG00702	晴岚路(紫凤路—黄兴北路)	次干路	8	42.0	3.7	畅通
11	LDCG01507	浏阳河大道(古汉路—晚报大道)	次干路	15	31.0	11.5	比较畅通
12	LDCG01902	城南东路(曙光中路—韶山北路)	次干路	25	26.0	15.4	轻度拥堵
13	LDZG1804	佑母塘路(银杉路—观沙岭路)	主干路	15	40.2	4.9	畅通
14	LDZG1602	星沙大道(滨湖路—特立路)	主干路	25	32.0	9.6	比较畅通
15	LDZG1405	中意路(芙蓉南路—新开铺路)	主干路	35	20.0	23.1	中度拥堵
16	LDZG1308	人民东路(红旗路—望龙路)	主干路	27	33.8	9.9	比较畅通
17	LDZG0103	渔业路(芙蓉北路—车站北路)	主干路	25	31.5	10.1	比较畅通
18	LDZG3704	五一大道(黄兴中路—湘江中路)	主干路	33	25.5	16.8	轻度拥堵
19	LDCG01301	湘雅路(芙蓉中路—湘江中路)	次干路	37	20.5	23.1	中度拥堵
20	LDCG12601	咸嘉湖路(岳华路—金星中路)	次干路	32	30	15.8	轻度拥堵

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

表7 基于支持向量机模型交通状态预测结果表

Table 7 Prediction results for traffic states using support vector machines

序号	2 min		4 min		6 min		8 min		10 min	
	$x = (q, v, d)$	判定结果								
1	(28.15,29.62, 14.80)	轻度拥堵	(35.03,22.72, 21.16)	中度拥堵	(34.00,23.31, 18.97)	中度拥堵	(32.24,25.51, 17.42)	轻度拥堵	(30.41,27.84, 16.63)	轻度拥堵
2	(25.75,21.03, 16.74)	轻度拥堵	(34.21,24.38, 18.52)	中度拥堵	(36.07,21.64, 20.45)	中度拥堵	(35.37,19.21, 15.64)	中度拥堵	(34.20,17.78, 14.59)	中度拥堵
3	(22.51,26.07, 14.52)	轻度拥堵	(26.32,23.97, 16.76)	轻度拥堵	(35,17.45,19.25)	中度拥堵	(31.58,25.12, 16.77)	轻度拥堵	(27.46,27.26, 15.46)	轻度拥堵
6	(30.41,26.79, 16.74)	轻度拥堵	(33.55,24.98, 18.14)	轻度拥堵	(35.27,23.87,23.8)	中度拥堵	(31.61,23.78, 17.02)	轻度拥堵	(29.87,26.14, 15.21)	轻度拥堵
8	(38.45,17.81, 23.16)	中度拥堵	(43,15.27.49, 26.43)	中度拥堵	(45.62,13.54, 28.01)	重度拥堵	(43.62,14.21, 25.01)	中度拥堵	(45.25,14.63, 19.82)	中度拥堵

续表7

序号	2 min		4 min		6 min		8 min		10 min	
	$x = (q, v, d)$	判定结果								
12	(27.08,26.94, 18.03)	轻度 拥堵	(29.57,24.83, 19.32)	轻度 拥堵	(34.47,21.45, 23.14)	中度 拥堵	(30.89,24.94, 20.64)	中度 拥堵	(28.97,25.61, 19.77)	轻度 拥堵
15	(38.54,20.63, 22.88)	中度 拥堵	(35.16,23.21, 19.42)	中度 拥堵	(33.21,27.31, 15.47)	轻度 拥堵	(27.35,29.51, 12.44)	轻度 拥堵	(25.20,30.57, 10.33)	比较 畅通
18	(35.98,23.41, 17.52)	轻度 拥堵	(37.25,23.44, 20.85)	中度 拥堵	(40.29,21.74, 23.42)	中度 拥堵	(42.41,20.33, 26.87)	中度 拥堵	(45.67,19.06, 29.26)	中度 拥堵
19	(39.41,22.64, 23.56)	中度 拥堵	(39.07,21.20, 23.94)	中度 拥堵	(38.19,22.61, 20.78)	中度 拥堵	(35.06,24.98, 18.94)	中度 拥堵	(30.77,26.89, 16.45)	轻度 拥堵
20	(33.51,29.87, 16.89)	轻度 拥堵	(33.42,29.53, 16.71)	轻度 拥堵	(34.84,26.77, 17.62)	轻度 拥堵	(33.27,26.85, 18.21)	轻度 拥堵	(34.87,26.33, 18.07)	轻度 拥堵

表8 畅通极值点和各聚类中心的综合指数

Table 8 Results of parameters to determine congestion levels

等级	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	时间延误/s	θ	排名
畅通极值点	11.8	46.3	0.4	1.00	1
畅通中心点	14.5	40.6	3.8	0.25	2
比较畅通中心点	19.4	36.7	6.1	0.15	3
轻度拥堵中心点	32.2	29.8	15.1	0.06	4
中度拥堵中心点	42.0	20.5	25.7	0.03	5
严重拥堵中心点	57.3	8.2	34.2	0.01	6

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

表9 基于DEA模型的交通状态判别结果

Table 9 Results of traffic state determination based on DEA model

样本	流量/pcu	速度/(km·h ⁻¹)	延误/s	θ_i	$\ \theta_i - \theta_1\ $	$\ \theta_i - \theta_2\ $	$\ \theta_i - \theta_3\ $	$\ \theta_i - \theta_4\ $	$\ \theta_i - \theta_5\ $
2	34.20	17.78	14.59	0.031	0.216	0.114	0.025	0.004	0.021
8	45.25	14.63	19.82	0.036	0.211	0.109	0.02	0.009	0.026
18	45.67	19.06	29.26	0.020	0.227	0.125	0.036	0.007	0.010

注:表格内流量数据为每车道每2 min的统计结果。

由表9可知, $\|\theta_2 - \theta_4\| < \|\theta_{18} - \theta_4\| < \|\theta_8 - \theta_4\|$, 这说明观测8号样本路段偏离中度拥堵程度最大; 而 $\|\theta_{18} - \theta_5\| < \|\theta_2 - \theta_5\| < \|\theta_8 - \theta_5\|$, 表明3个观测样本中,18号样本路段拥堵情况最严重,应先对其采取交通管理措施。

3 结论

本研究综合考虑了交通管理的全周期,提出了评价—预测—判定—管控的全过程模型。选取流量、速度和时间延误3个交通参数,制定了交通运行状态综合评价体系。利用基于改进的FCM算法的交通状态判别模型,确定了长沙市交通状态评价标

准,实现了对交通运行状态的实时评价。根据实时状态评价结果选择预测路段,利用SVM模型对交通状态的发展趋势进行预测,判定需要采取管控措施的路段。最后运用DEA模型对同一状态等级下的路段进行精细化评判,明确管控措施的优先级排序,为实施精细化拥堵管控提供依据。本研究提出的模型及算法为交通管理者提供了科学的全过程管理方法,实现了资源的优化配置,提高了决策效率,为城市交通管理体系研究提供了技术支撑。

参考文献(References):

[1] 黄良会,叶嘉安.保持城市交通畅通香港城市交通管理:香港城市交通管理[M].倪文彦,芮经纬,译.北京:

- 中国建筑工业出版社, 1996. (HUANG Lianghai, YE Jiaan. Keep a city moving: Urban transport management in Hong Kong [M]. Translated by YAO Wenyan, RUI Jingwei. Beijing: China Architecture & Building Press, 1996. (in Chinese))
- [2] 晏雨婵. 城市道路交通拥堵状态预测与评估方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019. (YAN Yuchan. Research on prediction and evaluation method of urban road traffic congestion status [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese))
- [3] 汤旻安, 王攀琦. 兰州市交通拥堵研究 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2019, 49(1): 71-77. (TANG Min'an, WANG Panqi. Research on traffic congestion in Lanzhou City [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(1): 71-77. (in Chinese))
- [4] 赵庆迁, 王亚萍, 雷建明, 等. 基于饱和度的路网交通态势实时辨识 [J]. 交通科学与工程, 2019, 35(4): 104-110. (ZHAO Qingqian, WANG Yaping, LEI Jianming, et al. Real-time identification of the road network traffic state based on saturation [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 104-110. (in Chinese))
- [5] 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. (XU Jianmin, WEI Jia, SHOU Yanfang. Comprehensive evaluation of urban road traffic operation status based on game theory-cloud model [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2020, 38(4): 1-10. (in Chinese))
- [6] 陈美林, 郑治豪, 郭宝, 等. 基于因果关联的交通拥堵传播分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51(12): 3575-3583. (CHEN Meilin, ZHENG Zhihao, GUO Bao, et al. Traffic congestion spreading analysis based on causal nexus [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3575-3583. (in Chinese))
- [7] 卢生巧, 黄中祥. 基于深度学习的短时交通流预测模型 [J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 74-80. (LU Shengqiao, HUANG Zhongxiang. Prediction model of short-term traffic flow based on CNN-GRU deep learning [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 74-80. (in Chinese))
- [8] 陈丽. 重庆主城区交通拥堵综合治理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020. (CHEN Li. Study on comprehensive treatment of traffic congestion in Chongqing urban area [D]. Chongqing: Southwest University, 2020. (in Chinese))
- [9] 蒋欢昕, 王涛, 程一一, 等. 基于多指标融合的单交叉口运行状态实时评价方法 [J]. 交通信息与安全, 2020, 38(4): 84-94, 147. (JIANG Huanxin, WANG Tao, CHENG Yiyi, et al. A real time operational state evaluation method for isolated intersections based on multi-index fusion [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(4): 84-94, 147. (in Chinese))
- [10] CHENG Z Y, WANG W, LU J, et al. Classifying the traffic state of urban expressways: A machine-learning approach [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 137: 411-428.
- [11] 宫改云, 高新波, 伍忠东. FCM 聚类算法中模糊加权指数 m 的优选方法 [J]. 模糊系统与数学, 2005, 19(1): 143-148. (GONG Gaiyun, GAO Xinbo, WU Zhongdong. An optimal choice method of parameter m in FCM clustering algorithm [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2005, 19(1): 143-148. (in Chinese))
- [12] 刘永利, 付丽丽. FCCM 算法中基于划分熵的参数优选方法 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2016, 35(2): 248-253, 273. (LIU Yongli, FU Lili. A method of parameter optimization based on partition entropy in FCCM algorithm [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(2): 248-253, 273. (in Chinese))
- [13] 住建部城市交通基础设施监测与治理实验室, 中国城市规划设计研究院, 百度地图慧眼. 2020 年度全国主要城市通勤监测报告 [R/OL]. (2020-05-20) [2021-07-06]. <https://huiyan.baidu.com/cms/report/2020tongqin/> (Urban Traffic Infrastructure Monitoring And Treatment Laboratory of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development, China Academy of Urban Planning & Design, Baidu Map Huiyan. Commuting monitoring report of major cities in China in 2020. [R/OL]. (2020-05-20) [2021-07-06]. <https://huiyan.baidu.com/cms/report/2020tongqin/> (in Chinese))
- [14] 马占新. 数据包络分析模型与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. (MA Zhanxin. Data envelopment analysis model and method [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容 欧兆虎; 英文编辑: 邢璐)