

基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价研究^{*}卢凯明^{1,2}, 郭斌³, 蔡晓禹^{1,2}, 唐小勇²

(1.山地城市交通系统与安全重庆市重点实验室, 重庆 400074; 2.重庆市城市交通大数据工程技术研究中心, 重庆 401147; 3.重庆市公安局交通巡警总队, 重庆 400055)

摘要: 针对目前信号交叉口运行评价指标估算模型大多需要人工采集、输入多元交通参数, 且假设条件较多的局限, 考虑到现状评价方法不能有效支撑交叉口绿灯时间分配失衡、车道功能划分不当等问题甄别及交叉口信号控制多方案选择与优化, 依据多源轨迹数据特征及交叉口车辆运行特性, 论证了基于大样本车辆轨迹数据批量提取排队车辆交叉口通行时间、初始排队长度的技术可行性, 提出了基于交叉口通行时间、排队长度、二次停车率的信号交叉口运行评价体系。

关键词: 城市交通; 信号交叉口; 多源轨迹数据; 评价指标

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)03-0024-09

信号交叉口是城市道路网络的天然瓶颈。据统计, 正常情况下交叉口信号控制引起的延误占车辆平均总出行时间的 20%~40%。鉴于城市道路车辆出行需求的时空分布不均匀性, 需对交叉口进行连续、准确的跟踪评价, 以合理调配时空资源, 实现由点及面的交通网络均衡。中国现阶段采用交叉口延误指标对其运行进行评价, 方式分为两类: 一是基于数学模型进行计算, 利用国外的服务水平评价标准或国内改进的标准进行评价; 二是借助 VISSIM、Synchro 等交通仿真软件进行评价。两种方式都需同时调查很多交通参数信息, 耗费大量成本。近几年, 随着车联网数据的涌现, 移动轨迹数据体量明显增大, 为研究交叉口评价指标提供了更多样本资源, 为交叉口评价体系重构创造了条件, 也使信号交叉口智慧分析、研判成为了可能。

1 传统信号交叉口运行评价指标

1.1 延误

延误是表征信号交叉口多因素综合影响下运行效率的重要指标之一。从交叉口信号控制角度, 可逐层划分为交叉口延误、进口道延误、相位延误、车道组延误等; 从信号交叉口车辆运行角度, 可分为停车延误、排队延误、引道延误、控制延误等。通常用停车延误或控制延误评价信号交叉口的服务水平。

有关延误指标的计算模型早期研究较多。Webster 等推导并给出了交叉口车流稳态延误模型, 该模型根据车辆到达特性, 分为均匀延误、随机延误, 模型输入参数包括信号周期时长、绿信比、交叉口流量比、交叉口饱和度、车辆到达率, 以此计算交叉口车辆平均延误; Akcelik 等对 Webster 延误模型进行改进, 将交叉口平均滞留车辆数、饱和流率、有效绿灯时间等参数引入随机延误计算模型中。以上模型的基本假设是单位观测时间内车辆平均到达率不变, 在车流量较大时模型计算误差相对较大。为避免 Akcelik 延误模型的缺陷, May、Keller 等提出定数延误模型, 实现不同饱和度情形下交叉口车辆平均延误计算。Whiting 等对以上模型进行融合, 根据饱和度取值不同建立分段过渡函数模型, 重新定义过饱和状态的延误计算方法。HCM2000 延误模型对随机延误模型进行重构, 未考虑交叉口通行能力对随机延误的影响。陈群等为了更精准地估算交叉口延误, 在 Webster 模型的基础上提出相位延误计算模型, 反映同一相位不同进口道交通流延误水平的差异性。这类延误计算模型均需精确输入多种交通参数, 应用中对所有参数进行采集、更新的难度较大, 评价指标估算可实施性差。

随着传统交通检测数据向多源交通大数据环境的变革, 信号交叉口评价更注重对数据的深度挖掘,

^{*} 基金项目: 基于多源大数据的交叉口智能信号控制技术研究(SW-2018-Z015); 国家自然科学基金青年科学基金项目(61703064); 重庆市高校优秀人才支持计划项目; 重庆市技术创新与应用示范专项社会民生类重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0085)

逐渐衍生出一些新的思路和方法。陈百旺等将改进 HCM 延误模型估算结果与基于浮动车数据的延误计算结果融合构建延误估算融合模型,并通过仿真验证了其可行性。王进等基于交通波动理论,考虑上游交叉口信号配时、路段长度、下游交叉口车辆到达特性等因素构建下游交叉口“面积法”延误计算模型,但该模型需调查大量数据。Chen P.等基于传统交叉口车辆累计到达一离开曲线提出考虑剩余排队的周期延误计算方法,根据连续信号周期排队长度概率分布特性构建随机过饱和排队一延误概率模型,并利用典型干线 AVI 数据验证了其可行性。但该模型提出了较多假设,如单位时间内(30 min)车辆均匀到达,实际中难以普遍应用。张志松针对浮动车回传时间间隔太大的缺陷,根据车辆在交叉口的减速、停车、加速变化过程建立基于欠采样 GPS 数据的匀加减速模型,实现欠采样情形下车辆控制延误估计,并通过与实测数据对比验证了其可行性。

1.2 排队长度

排队长度能从空间视角反映交叉口的运行水平,是交叉口运行评价常用指标之一,也是交叉口信号方案优化过程的重要约束条件,一直以来都是信号交叉口评价及优化领域的研究热点。

排队估算基础理论可归纳为输入一输出模型(即交叉口车辆到达一离开累计曲线)和交通波理论模型。早期更多的是稳态模型,假设交通需求处于稳定状态,且输入和输出流率保持平衡状态。后期改进方法主要是基于车辆到达一消散曲线估算较小分析时段内的排队长度,最早应用于 Transyt 软件。部分研究利用马尔科夫链理论构建车辆排队模型,其本质是基于历史时段内的交通状态进行排队长度估算。其余方法主要是利用交通拥挤、消散波动理论,能较详细地刻画排队时空演变过程。

传统的排队长度估算方法应用到实际中存在局限。就输入一输出模型而言,其主要难点是无法保证对长队列的准确估算,当排队尾部超出交叉口上游检测器时,车辆到达率无法被精准获取,导致估算结果误差较大,制约了对城市交通拥堵频发的干线路交叉口在过饱和状态下排队长度的估测。尽管利用交通波理论能克服这个问题,但想要探测并推算几种不同类型的波速,依靠现实交通检测数据无法保证其连续性和准确性。

多源数据的广泛应用促进了对排队长度估算手段和方法的改进与创新。Comert G.等根据单个交叉

口排队长度概率分布特性,利用浮动车在排队队列中的位置,假设浮动车的实际占比已知来实时估算排队长度。Cheng Y.等利用样本轨迹数据构建信号交叉口配时参数及周期级信号交叉口排队长度估算方法,其核心是利用样本数据探测车流波动过程的关键点得到最大、最小排队长度计算公式。Zhongyu Wang 等融合交叉口上游固定检测器数据和浮动车数据,提出交通波改进模型,共提出 4 个假设:1) 车辆在周期内的到达率恒定不变;2) 数据回传间隔为 1 s,且研究周期内排队队列里至少有 1 辆车被检测到;3) 各车道组的平均长度为交叉口进口排队长度;4) 所有排队车辆在 2 个周期内通过交叉口。该方法只适合小数据的分析应用,且约束条件过多,不具有普适性。Xianyuan Zhan 等利用干线交叉口车牌识别数据,基于高斯差值拟合法重构多车道当量累计到达一消散曲线,并采用基于车辆跟驰的仿真模型实时估算车道组的排队长度。朱超军等利用高清视频,采用图像自动识别算法提取交叉口排队长度,但在排队超出检测范围时其估算误差较大。

1.3 其他指标

除交叉口延误、排队长度指标外,常被采用的交叉口评价指标还有通行能力、饱和度、平均停车次数、二次停车率等。通行能力由交叉口车道功能划分、信号配时等多种因素决定,属于“交叉口供给”;饱和度由信号周期内到达车辆数与通行能力决定;延误是饱和度、通行能力等多元指标的函数。因此,单纯利用饱和度、通行能力进行交叉口运行水平评价,评价结果有失偏颇。

平均停车次数是干线交叉口信号协调性的重要表征指标,能反映交叉口信号控制方案对交通流的适应性,对相位设计、绿灯时间分配、相位差优化具有重要参考价值。与停车次数相关联的二次停车率也是交叉口运行效率重要评价指标,尤其在交叉口接近饱和及过饱和状态时,能更直接地突显交叉口配时方案的优劣。但实际应用中二次停车率判别及获取难度较大,对其开展的研究也相对甚少。而浮动车、车联网等车辆轨迹数据能连续地还原车辆的运动变化特征,为识别、统计不同分析时段内停车状态创造基础条件。

2 信号交叉口运行评价方法

2.1 评价标准

美国通行能力手册(HCM2000)采用 15 min 分

析时段内车辆的平均停车延误来衡量信号交叉口的服务水平,把交叉口的服务水平分为 A~F 六级(见表 1)。日本根据交叉口饱和度,将信号交叉口的服务水平划分为 3 个等级。前苏联根据实际行驶速度与自由行驶速度之比即速度系数将信号交叉口的服务水平分为 4 个等级。王伟结合国内城市道路混合交通流特性,对 HCM 中等级划分指标阈值进行了修正(见表 2)。除平均停车延误外,任福田等还提出了交通负荷系数(绿灯利用率)、效率系数(速度比)、交叉口受阻车辆、排队长度等指标,构建了多指标服务水平分级标准(见表 3)。但实际评价中存在两大难点:一是无法同时获取所有指标且多数指标需人工采集;二是在不同交通状态下指标之间存在

一定相关性,合理确定指标权重难度较大。

表 1 HCM2000 中交叉口服务水平划分标准

服务水平	车均停车延误/s	服务水平	车均停车延误/s
A	≤ 5.0	D	25.1~40.0
B	5.1~15.0	E	40.1~60.0
C	15.1~25.0	F	> 60.0

表 2 王伟提出的交叉口服务水平划分标准

服务水平	车均停车延误/s	服务水平	车均停车延误/s
A	≤ 5.0	D	30.1~50.0
B	5.1~15.0	E	50.1~80.0
C	15.1~30.0	F	> 80.0

表 3 任福田等提出的交叉口服务水平分级标准

服务水平	交通负荷系数	效率系数(速度比)	交叉口受阻车辆/%	平均停车延误/s	排队长度/m
一级	< 0.6	> 0.8	< 10	< 30	< 30
二级	0.6~0.7	0.8~0.65	10~15	30~40	30~60
三级	0.7~0.8	0.65~0.5	15~20	40~50	60~80
四级	0.8~0.9	0.5~0.35	20~30	50~60	80~100
五级	> 0.9	< 0.35	> 30	> 60	> 100

综上,中国采用的评价指标及评价标准较老且不尽统一,多数参照国外的指标及分级方法,没有根据国内交叉口交通背景及管控需求,充分结合可利用的数据资源形成合理且实施性强的评价方法。

2.2 综合评价方法

为融合多项指标,实现对交叉口服务水平的综合评价,很多学者将模糊数学、灰色聚类、信息熵理论等数学评价方法引入交叉口综合评价。李嘉等利用灰色聚类法,选取饱和度、停车延误、排队长度、干扰率、人车分离度为评价指标,基于实测数据对单点信号交叉口进行综合评价。Zheng Xiaoyan 等利用信息熵理论,选取平均延误、饱和度、排队长度作为指标对信号交叉口进行评价。马畅等将信息熵与非确定测度理论结合,针对信号协调干线交叉口,以饱和度、平均行程延误、排队长度、停车率、行程车速作为评价指标判别交叉口运行质量。为避免等级划分标准确定及指标权重赋值过程产生评价误差,李小静等综合应用模糊动态聚类与灰色聚类法实现在信息不完备情况下交叉口的模糊评价。

综合评价方法主要有以下特点:1) 数据多数来源于实测小样本数据,在大数据环境下未被验证和

应用;2) 未分析指标的特性及指标间的关联特性;3) 多数参考已有研究中的评价指标隶属函数,未对所有指标给出统一规范,会直接影响最终评价结果。

3 研究热点与面临的挑战

3.1 研究热点

表 4 为部分国内外信号交叉口评价指标研究典型文献。由表 4 可见:近 10 年信号交叉口评价指标主要为延误和排队长度,大多数研究注重对单一指标的研究,模型复杂、可操作性差;数据来源以浮动车 GPS 数据和固定检测器数据为主,少数采用人工观测和仿真数据;研究对象集中于单点信号交叉口,极少部分将指标估算与相邻信号交叉口运行相结合;指标分析时段以周期级较多;指标估算或预测主要采用经典交通波理论,对新模型构建和新估算方法探索较少;对指标的研究相对独立,没有与信号交叉口评价及优化紧密结合。

3.2 信号交叉口运行评价面临的挑战

(1) 评价指标获取。传统指标获取方法呈重模型、轻数据的状态,只利用少量特征数据,在理想的交通环境及特定交通运行状态下进行指标估算,模

表 4 信号交叉口评价指标部分研究文献

评价指标	作者	时间	研究对象	数据来源	时间窗口	模型/算法
排队长度	高云峰等	2007	单点、交叉口群	仿真数据	—	改进 Robertson 模型
	Zhongyu Wang	2015	单点	浮动车、线圈	周期级	改进交通波动理论
	Haijian Li 等	2017	单点	地磁	周期级	新建
	王东柱等	2012	单点	浮动车	30 min	新建
	庄立坚等	2013	单点	浮动车	10 min	新建
	羊钊等	2015	单点	—	—	交通冲击波模型
	朱超军	2014	单点	视频	—	边缘检测和背景差分
	王进等	2015	单点	—	—	改进交通波动理论
	王钰等	2016	单点	浮动车(自组车队)	周期级	交通波动理论
	Henry X. Liu 等	2009	单点	线圈	周期级	交通波动理论
	Dakic I.等	2017	单点	仿真数据	15 min	新建
	陈百旺	2017	单点	浮动车、线圈	周期级	BP 神经网络
	邹志云	2015	相邻交叉口	—	—	交通波动理论
	陈河明等	2013	单点	—	周期级	新建/期望交通延误模型
延误	Jian Sun	2016	干线交叉口	不明确	30 min	新建/车辆累计曲线+概率论
	王华等	2014	单点	实测	60 min	新建
	Jianyang Zheng	2014	单点	视频	—	新建
停车次数	高云峰等	2007	单点、交叉口群	仿真数据	—	改进 Robertson 模型
行程时间	Jian Sun	2016	干道交叉口	不明确	30 min	新建/车辆累计曲线+概率论
绿灯车辆平均到达率	Dakic I.等	2017	单点	仿真数据	15 min	新建

型需要精准和完备的流量、饱和度、车辆到达率等交通参数信息。但城市信号交叉口交通需求具有时空多变性,参数的精准获取和预测难度较大,故模型的鲁棒性、普适性较差,不易满足实际工程应用需要。如何整合多源数据资源,从研究实际数据特征入手,结合信号交叉口交通运行特性,直接、客观地提取交叉口运行效率评价指标是一大难点。

(2) 评价方法构建。信号交叉口运行评价呈现单一指标向多元指标变化的趋势。已有研究表明,多元评价指标之间存在弱关联或强关联。利用规范建议的信号交叉口服务水平评价标准,单一指标评价结果不够精细,难以全面反映交叉口时空资源利用效率;多元指标评价中未对指标分布特征及指标间的物理关联特性进行分析,而是直接利用纯数学理论方法计算各指标权重,评价结果没有体现多指标评价的优势,也未弥补单一指标评价的不足。构建实用、可行的交叉口多指标运行水平判定方法是面临的一大难题。

(3) 面向方案选择及优化的综合评价指标确立。信号交叉口运行评价要以明确的评价目标为导向。在中国城市信号交叉口多数采用分时段信号控制多方案的背景下,一味地追求短时或实时的指标精准估算,不仅算法实施难度较大,也没有与实际应用需求相结合。随着城市交通海量数据的深度挖掘应用,信号交叉口评价不仅要实现交叉口服务水平及交通状态判别,还要反映不同分析时段内交叉口信号控制方案存在的问题,为交叉口交通组织改善、信号控制方案制订及优化提供支持。因此,提出并确立面向控制方案问题辨识的客观、实用的综合评价指标和方法至关重要。

4 交通多源轨迹数据环境

4.1 多源轨迹数据特征

现有交通检测数据中能还原车辆轨迹的主要有浮动车数据、车牌识别数据。鉴于车牌识别设备多数布设于城市干线路段,不易应用于交叉口评价指

标提取,根据传统浮动车数据(出租车、公交车)和车联网 GPS 数据实现指标提取并进行数据层融合。

4.1.1 总体特征描述

浮动车 GPS 数据具有覆盖范围广、数据连续、稳定的特点,其主要回传信息通常包括车辆经纬度、时刻、速度、方向角等,是互联网公司(高德地图、百度地图等)进行道路交通状态判别的主要数据源。图 1 为重庆市主城区晚高峰(17:00—19:00)出租车、公交车及车联网(驾图)回传的轨迹点数据分布。从图 1 可见:出租车主要分布在城市中心区,极少数分布在对外通道;公交车主要分布在城区主、次干道骨架路网及少数支路,集中分布在中心城区;驾图总体分布较分散,但中心城区也较活跃。除驾图外,出租车和公交车数据较稳定,分别以 15 和 10 s 为间隔均匀回传,而驾图以 0~30 s 的时间间隔连续回传。表 5 为工作日高峰时段主城区数据情况。

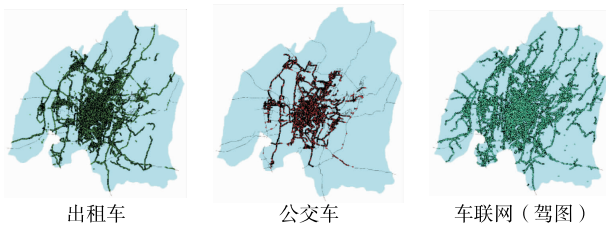


图 1 重庆市主城区浮动车 GPS 轨迹点分布
(2017—10—18 晚高峰)

表 5 重庆市主城区高峰小时浮动车数据抽样统计

车辆种类	在网车辆数/辆	数据回传量/万条
出租车	13 000	240
公交车	7 800	214
车联网	18 000	200

4.1.2 单个交叉口样本量统计

交叉口单位时间内样本量分布直接影响评价指标的提取精度,也是制约以交通波为代表的数学模型应用于短时指标估算及预测的一大难点,一旦样本缺失,模型将不再适用。为进一步掌握分析时段内通过单个交叉口的样本量分布,选取重庆市两个典型信号交叉口(分别为一次干道相交的十字形交叉口、主—主相交的 T 形交叉口),两个交叉口的信号周期不同,对早高峰(07:00—09:00)和晚高峰浮动车数据进行分类抽样统计,统计结果(见表 6)显示,高峰时段约 1 350 辆浮动车通过交叉口,即约 675 veh/h。

4.2 基于多源轨迹数据的评价优势

传统的地磁、线圈、卡口等固定检测设备多用来采集流量、占有率,主要是检测点或断面交通参数,通常布设在交叉口进口车道,在交叉口出口未布设,不仅难以满足对交叉口各进口或转向的交通分析,而且检测设备运维费用较高。而多源轨迹数据能实

表 6 典型信号交叉口通过浮动车样本量抽样统计

交叉口类型	出租车				车联网				公交车			
	早高峰		晚高峰		早高峰		晚高峰		早高峰		晚高峰	
	$Q_{总}$	$Q_{停}$	$Q_{总}$	$Q_{停}$	$Q_{总}$	$Q_{停}$	$Q_{总}$	$Q_{停}$	$Q_{总}$	$Q_{停}$	$Q_{总}$	$Q_{停}$
十字形交叉口	699	479	774	563	208	107	283	164	425	316	471	324
T 形交叉口	708	511	780	531	268	119	217	114	507	384	486	347

注: $Q_{总}$ 为通过交叉口的总车辆数; $Q_{停}$ 为经过交叉口时发生停车的车辆数。

现全方位、连续、稳定的数据采集,储备海量的数据样本,同时能表征信号交叉口车辆运行特征,便于直接提取并融合排队长度、交叉口通行时间等时空指标,实现对交叉口运行水平的全面分析和挖掘。

5 基于多源轨迹数据的信号交叉口运行评价指标与方法

5.1 车辆运行特性分析

城市交通流为典型的间断流,受交叉口信号控

制影响,除部分车辆不停车通过交叉口外,大多数车辆会经历减速、停车、加速过程,在过饱和状态下,车辆的运动变化更复杂。由于车辆到达交叉口具有随机性,不同交通条件和信号状态下会呈现不同的运动规律,交叉口排队长度和延误也会产生很大差别。图 2 为车辆在信号交叉口的时空轨迹典型场景,其中 A、B、C、D 为不同情形下的四类车辆,其主要与车辆到达交叉口时前方排队情况和信号状态有关。表 7 为车辆在绿灯或红灯到达时可能经历的延误,

据此可推断:只有当红灯累计车辆较多时,少数绿灯末尾到达车辆会发生二次停车,经历的延误小于一个信号周期 T ,其余发生二次停车的车辆延误均大于信号周期,且排队长度都大于某一临界值。深入剖析车辆个体及集群在信号交叉口的运动规律,有利于进一步认识排队长度、延误等评价指标的分布特征及规律,为交叉口运行水平评价奠定基础。

5.2 研究思路

根据个体车辆在交叉口的运行特性,结合实际轨迹点数据,提取分析时段内通过交叉口的样本车辆特征指标,构建交叉口评价基本特征指标提取方

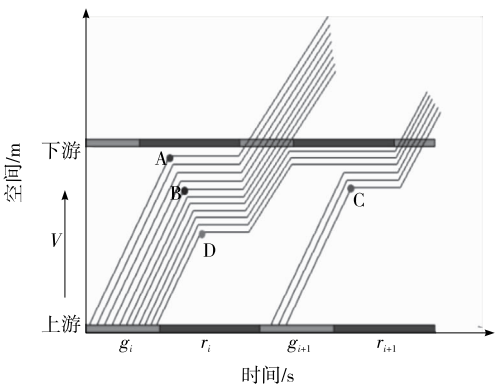


图 2 车辆到达—离开时空轨迹示意图

表 7 信号交叉口车辆到达与延误估计汇总

车辆到达	情景描述	是否在本周期内通过	是否发生二次停车	延误 D 估计
绿灯到达	不停车	是	否	$D=0$
	停车且前面有排队	是	否	$D<g$
	停车且前面有排队	否	是	$r<D<T$
	停车且前面有排队	否	是	$D>T$
红灯到达	停车且前面无排队	是	否	$D<r$
	停车且前面有排队	是	否	$D\leq r$
	停车且前面有排队	是	否	$r<D<T$
	停车且前面有排队	否	是	$D>T$

注: g 、 r 分别为车道组(或相位)绿灯时长和红灯时长。

法。基于特征指标聚类统计分析,确定样本集群存在的共性,同时支持二次停车判别及二次停车率指标的提取方法构建,实现交叉口进口方向级、转向级运行水平综合评价,服务于交叉口信号控制问题研判及方案比选。研究流程见图 3。

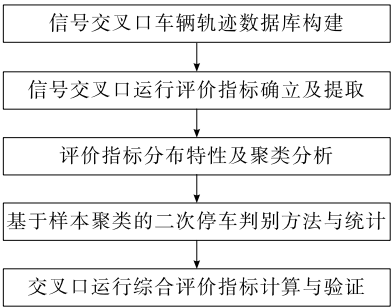


图 3 基于多源轨迹数据的信号交叉口评价

5.3 关键技术

5.3.1 车辆通行时间和排队长度提取分析

现有研究多采用延误作为信号交叉口评价指标,但无论是经典的面积法,还是定义法(先求出交

叉口行程时间,再减去交叉口范围自由流状态行驶时间),均会产生较大计算误差。根据浮动车原始数据的特征和优势,以交叉口通行时间为时间指标、车辆初始排队长度(后面简称排队长度)为空间指标(区别于传统利用交叉口车均延误和固定时刻交叉口进口或车道组车流排队长度),构建多源轨迹大数据的指标批量提取算法。

图 4、图 5 为工作日平峰时段(14:00—16:00)出租车通过上文两个典型交叉口的排队长度和通行时间分布。由图 4、图 5 可知:典型 T 形交叉口由于信号周期较小,约 90% 车辆的通行时间小于 100 s,而典型十字形交叉口受信号配时及车道组织的影响,约 70% 车辆的通行时间小于 100 s;排队长度与通行时间变化趋势一致。对比不同类型、不同信号周期交叉口在不同饱和度下排队长度和通行时间分布,对二次停车判定及总体运行评价具有重要作用。

5.3.2 二次停车判别与指标提取

二次停车是由于信号交叉口进口或车道组供需

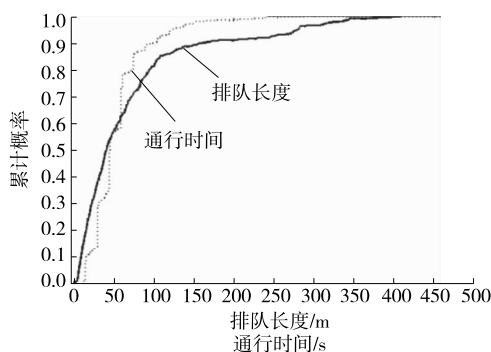


图4 某典型T形交叉口车辆排队长度和通行时间
累计概率分布(样本数563个)

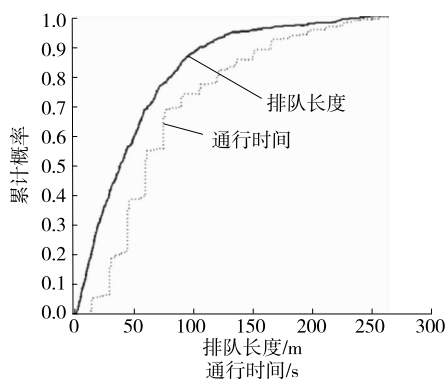


图5 某典型十字形交叉口车辆排队长度和通行时间
累计概率分布(样本数587个)

不匹配,车辆两次停车等候后通过交叉口的交通行为。通常由车速的连续变化特征或车辆在交叉口的延误来判别、测定,实施难度较大。因此,考虑利用交叉口车辆排队长度和通行时间对二次停车进行判别。图6为通行时间与排队长度的密度分布。

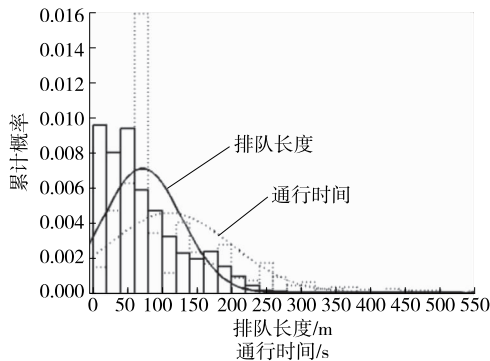


图6 车辆通行时间和排队长度密度直方图
(样本数1042个)

从图6来看,通行时间与排队长度总体服从高斯正态分布。利用改进的高斯混合聚类模型对某交叉口早高峰样本进行聚类,聚类结果见图7。

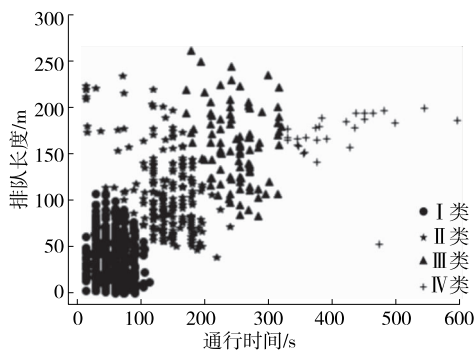


图7 车辆通行时间与排队长度高斯混合聚类分布
(样本数1042个)

由图7可知:随着排队长度的增大,交叉口通行时间增长速度加快,这与饱和或过饱和状态下车流波动及下游交叉口溢出等交通现象有直接关联;I、II类数据之间可能存在某种特征差异。

5.3.3 综合评价指标计算方法构建

构建综合评价指标旨在从信号控制方案本身出发,从微观角度挖掘信号方案可能存在的分配失衡、绿灯利用率低等问题。通过提取和统计分析时段内交叉口车辆通行时间、排队长度和二次停车率,分离各进口、各转向指标取值,融合各项指标并合理设定指标权重,构建综合评价指数 RI 。公式如下:

$$RI = W_l \frac{L_j}{\max\{L_0, L_1, \dots, L_n\}} + W_t \frac{T_j}{\max\{T_0, T_1, \dots, T_n\}} + W_\psi \frac{\psi_j}{\max\{\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_n\}}$$

式中: W_l 为排队长度权重; L_j 为最大排队长度; j 表示交叉口进口道或转向; n 为交叉口进口道或转向个数; W_t 为通行时间权重; T_j 为平均通行时间; W_ψ 为二次停车率权重; ψ_j 为二次停车率。

6 结语

信号交叉口评价经过了漫长的研究历程,总体分为三个阶段。阶段一是利用纯数学理论模型构建指标计算公式,并划定评价标准,输入数据靠人工采集或仿真获取;阶段二将交通波理论、车辆到达一消散累计曲线等经典模型应用于交叉口评价指标估算,并尝试分别与各类数据结合运用;阶段三逐步利用多源大数据融合技术探寻更实际、可行的指标和方法。随着大数据技术应用的日渐成熟,结合实际交通运行特性,从数据中探索、挖掘交通本质规律和

所存在的问题是必然趋势。如何借助多源轨迹数据提取信号交叉口评价指标,并构建适宜的评价标准及方法,是今后精准、快速感知交叉口运行水平和解决信号控制方案症结的重要研究方向。

参考文献:

- [1] 刘灿齐.专适用于城市道路网络的交通均衡分配算法[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(4).
- [2] 刘金明.基于多目标规划的城市道路交叉口信号配时研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [3] 杨佩昆,张树生.城市交通控制与管理[M].北京:人民交通出版社,1995.
- [4] 赵强.基于关键交叉口交通状态判别的配时参数计算[D].长春:吉林大学,2007.
- [5] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2000[S].
- [6] 陈群,晏克非.基于遗传算法的城市交叉口实时信号控制研究[J].交通与计算机,2005,23(1).
- [7] 陈百旺,成卫.基于多源数据融合的信号交叉口延误估计研究[J].价值工程,2017,36(10).
- [8] 王进,魏向阳,邹志云.考虑上游交叉口信号设计的排队长度计算[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2015,39(1).
- [9] Chen P, Sun J, Qi H. Estimation of delay variability at signalized intersections for urban arterial performance evaluation [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations, 2017, 21(2).
- [10] 张志松.基于欠采样 GPS 数据的信号交叉口延误估计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] Ban X, Hao P, Sun Z. Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(6).
- [12] Robertson D I. Transyt: a traffic network study tool [R]. Berks: Road Research Laboratory, 1969.
- [13] Viti F. The dynamics and the uncertainty of delays at signals [R]. Delft University of Technology, Netherlands, 2006.
- [14] K Rudy, H Wang H, D Ni. Modeling and optimization of link traffic flow [R]. University of Massachusetts Amherst, 2008.
- [15] Panos G Michalopoulos, Gregory Stephanopoulos, George Stephanopoulos. An application of shock wave theory to traffic signal control [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1981, 15(1).
- [16] Henry X Liu, Xinkai Wu, Wenteng Ma, et al. Real-time queue length estimation for congested signalized intersections [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2009, 17(4).
- [17] G Comert, M Cetin. Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1).
- [18] Yang Cheng, Xiao Qin, Jing Jin, et al. Cycle-by-cycle queue length estimation for signalized intersections using sampled trajectory data [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2257.
- [19] Yang Cheng, Xiao Qin, Jing Jin, et al. An exploratory shockwave approach to estimating queue length using probe trajectories [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012, 16(1).
- [20] Wang Z, Cai Q, Wu B, et al. Shockwave-based queue estimation approach for undersaturated and oversaturated signalized intersections using multi-source detection data [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2017, 21(3).
- [21] Zhongyu Wang, Qing Cai, Bing Wu, et al. Cycle-by-cycle queue length estimation for signalized intersections using multi-source data [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 22(2).
- [22] Xianyuan Zhan, Ruimin Li, Satish V Ukkusuri. Lane-based real-time queue length estimation using license plate recognition data [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 57.
- [23] 朱超军,杨红雨,刘东辉,等.基于实时视频图像处理的车辆排队长度检测[J].计算机技术与发展,2014, 24(4).
- [24] Wolshon B, Taylor W C. Analysis of intersection delay under real-time adaptive signal control [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1999, 7(1).
- [25] 王伟,过秀成.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2011.
- [26] 王伟.道路平面交叉口通行能力的延误分析法[J].中国公路学报,1998,11(增刊).
- [27] 任福田,刘小明,荣建.交通工程学[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [28] 李嘉,岳中琦,李群.灰色聚类的信号交叉口综合质量评价研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2003, 30(1).
- [29] Zheng Xiaoyan, Dou Rui, Ding Heng, et al. Comprehensive evaluation of signalized intersections' level-of-service based on information entropy theory [A]. 11th

- International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP)[C].2011.
- [30] 马畅,敖谷昌,邵毅明.信号协调控制下城市干道运行效率评价研究[J].交通信息与安全,2012,30(4).
- [31] 李小静,刘立舰.基于灰关联度聚类法的交叉口综合质量评价[J].山东交通学院学报,2013,21(1).
- [32] 高云峰,胡华,陈红洁,等.交叉口群交通控制实时评价模型仿真研究[J].系统仿真学报,2007,19(24).
- [33] Haijian Li, Na Chen, Lingqiao Qin, et al. Queue length estimation at signalized intersections based on magnetic sensors by different layout strategies[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 25.
- [34] 王东柱,陈艳艳,李亚檬.基于浮动车停车点数据交叉口车辆排队长度计算方法[J].公路交通科技,2012,29(12).
- [35] 庄立坚,何兆成,叶伟佳,等.基于浮动车数据的排队长度检测方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(3).
- [36] 羊钊,刘攀,朱仁伟,等.基于冲击波理论的信号交叉口最大广义排队长度计算方法[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(增刊1).
- [37] Dakic I, Stevanovic A, Zlatkovic M, et al. Refinement of performance measures based on high-resolution signal and detection data[J]. Transportation Research Procedia, 2017, 22.
- [38] 王进,邹志云,葛欢,等.考虑上游信号的交叉口延误计算[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(1).
- [39] 陈河明,李硕,高岩,等.信号交叉口期望交通延误模型及计算方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(3).
- [40] 王华,张志松,张晖,等.面向欠采样公交GPS数据的信号交叉口延误估计[J].交通运输系统工程与信息,2014,14(2).
- [41] Jianyang Zheng, Xiaolei Ma, YaoJan Wu, et al. Measuring signalized intersection performance in real-time with traffic sensors[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, 17(4).
- [42] 王钰,徐建闽,林培群.基于GPS数据的信号交叉口实时排队长度估算[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(6).

收稿日期:2018-10-15

(上接第4页)

则回收效果好。原因在于:一方面,余热能整体占比最大,回收效率受其影响分布稳定,不会出现较大波动;另一方面,受部分工况排气背压升高的影响,动力涡轮进口处气体压力大于排气尾管处气体压力,排气流畅性相对降低,导致余压能波动较大,回收效率降低。另外,当发动机在较低和较高转速工况运行时,余动能也常因受到气体紊流现象干扰,对回收效率产生不利影响,但由于余动能占废气总能量比例很小,回收效率受其影响甚微。

5 结论

(1) 柴油机废气总能量为 6.2~31.7 kW,主要表现为余热能。

(2) 在发动机主要运行工况内(中低转速),回收效率逐渐增加,高转速工况有所降低。当发动机转速为 2 800 r/min、转矩为 100 N·m 时,回收效率达到最高的 27.2%。

(3) 余热能做功能力最强且分布最稳定,其能量品质最高。

(4) 高转速工况下回收效率有所降低,系统的废气控制策略和管路布置需进一步优化,以实现废

气能量的高效回收利用。

参考文献:

- [1] Arias D A, Shedd T A, Jester R K. Theoretical analysis of waste heat recovery from an internal combustion engine in a hybrid vehicle[A]. SAE 2006 World Congress & Exhibition[C]. 2006.
- [2] Saidur R, Rezaei M, Muzammil W K, et al. Technologies to recover exhaust heat from internal combustion engines[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8).
- [3] 方金莉,魏名山,王瑞君,等.采用中温有机朗肯循环回收重型柴油机排气余热的模拟[J].内燃机学报,2010,28(4).
- [4] 刘敬平,付建勤,冯康,等.内燃机的排气能量流特性[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(11).
- [5] 张铁鑫,杨建国,王彦岩,等.利用动力涡轮回收利用汽车柴油机的排气余热[J].内燃机与动力装置,2015,32(2).
- [6] 付建勤,刘敬平,冯仁华,等.基于空气动力循环的内燃机废气余热回收方法[J].内燃机工程,2014,35(1).
- [7] 叶磊,游国平.基于多种循环工况的混合动力客车制动能量回收对燃油经济贡献率的研究[J].客车技术与研究,2011(2).

收稿日期:2019-02-15