

高速公路交通流状态估计方法研究^{*}

龙科军, 周政川, 姚午开

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 4100114)

摘要: 为了估计高速公路交通流状态, 针对中国当前高速公路交通流监测技术和检测数据细度不足的情况, 利用高速公路主线断面交通量数据, 提出基于出入量法的交通状态估计方法。采集湖南省长益(长沙—益阳)高速公路 8 个主线交通流检测站实时数据, 以 5 min 为统计间隔, 得到 5 周的交通流量数据; 采用出入量法计算各路段区间实时密度, 考虑出入口匝道的影响, 引入驶入、驶出率 β 、 α 修正密度计算方程, 绘制流量—密度散点图, 得到流量—密度方程。研究结果表明, 在中国目前高速公路交通流检测设备安装密度较低、检测数据不完备、检测频率低的情况下, 结合采用饱和度和密度两个指标, 能较好地对高速公路交通状态进行估计。

关键词: 公路交通; 高速公路; 交通流状态; 出入量法; 密度; 流量—密度方程; 饱和度

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0025-04

随着高速公路拥挤度的不断增加, 实时检测、估计交通拥堵变得十分必要。交通拥堵状态估计与检测主要基于交通流参数(流量、密度、速度)来完成。

针对交通流状态检测与估计, Coifman B. 利用双回路道路检测器, 基于基本交通流理论估算了道路的行程时间与车辆轨迹; Mehmet Y. 等基于历史和实时检测器提供的交通流数据, 利用统计预测算法对路段行程时间进行了预测、对交通流状态进行了估计; Shen L. 等利用高速公路断面检测器数据, 通过时间平均速度向空间平均速度转换, 获得了路段行程时间; Mingjun Deng 等基于流量的空间分布与路段行程时间之间的相关性, 以预测误差方差最小为目标建立了组合预测模型; Hyun Kyung 等利用感应线圈检测器获得车头位置数据, 分析了不同车辆类型之间的相互作用与碰撞风险的相关性; Ramezani M. 等考虑 GPS 数据的多样性, 通过马尔科夫链过程描绘浮动车所经历的路段行驶时间的二维图, 再通过对连续路段与二维图状态的相关性进行积分, 得到了路径行程时间概率分布结果; 张俊婷等将马尔可夫链应用于行程时间预测, 对路段交通状态进行了估计; Zhan X. 等基于出租车等 GPS 数据, 基于贝叶斯混合模型估计了道路交通状态, 计算了短期路段交通运行时间; Woodard D. 等从移动客户端的 GPS 数据出发, 采用 TRIP 方法对路网中任意时间和路段上的交通流行程时间、交通状态进行

预测, 提升了大规模路网下交通状态估计的准确性; Hareesh Bahuleya 等利用 GPS 数据的多样性特点, 提出了利用历史数据和实时数据对路网交通状态进行预测的城市干线网络行程时间预测模型; Bargera H. 利用移动客户端信令数据对道路运行速度与行程时间进行了检测。现有研究大多基于完备的交通流检测数据(如交通量、密度、占有率), 且对交通流数据细度要求较高(如 30 s、1 min)。由于数据传输成本、数据存储容量的约束, 实际交通流检测数据极不完备, 现有研究方法无法适应这一特点。在高速公路交通状态估计与预警上, 浮动车数据与 GPS 数据的实时传输成本太高, 难度较大, 而公路上埋设的线圈等检测设备具有实时传输交通流数据的功能。该文以长益(长沙—益阳)高速公路为对象, 采集收费站和主线交通量历史数据, 针对交通量单一数据源, 应用出入量法得到路段密度计算方法, 结合饱和度指标对高速公路交通流状态进行综合评估, 以减少数据采集频率和传输量。

1 数据采集与预处理

长益高速公路为双向四车道, 设计速度为 100 km/h, 起于长沙西收费站, 终于益阳北, 依次设置友仁、关山、金洲、宁乡、益阳、泉交河、朝阳 7 个收费站, 金桥、友仁、关山、金洲、宁乡、泉交河、朝阳、益阳北 8 个交通流检测站(见图 1、表 1)。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(5167076)

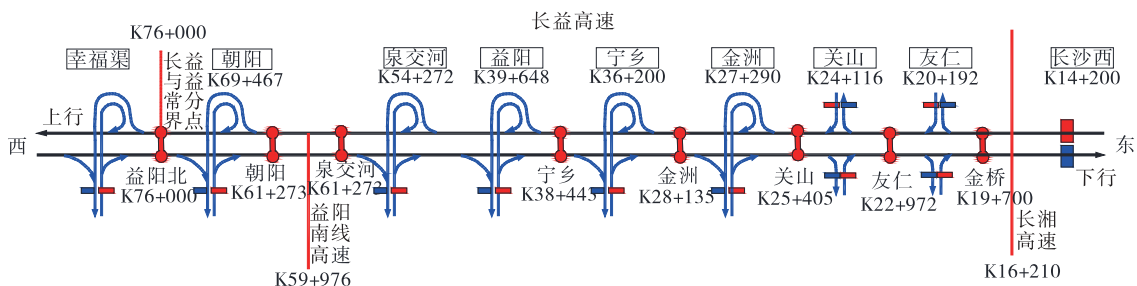


图1 长益高速公路收费站与交通流检测点设置位置

表1 长益高速公路主线交通流检测点

检测点名称	代表路段	检测点名称	代表路段
金桥	长沙西—长湘	宁乡	金洲—宁乡
友仁	长湘—友仁	泉交河	宁乡—泉交河
关山	友仁—关山	朝阳	泉交河—朝阳
金洲	关山—金洲	益阳北	朝阳—益阳北

研究数据来源于上述交通流检测站和收费站的流水数据,主线交通流数据采用射频技术采集,采集间隔为 5 min。其中:主线交通流检测站数据量为 4 个星期的数据,数据日期为从 6 月 14—28 日、8 月 13—28 日,保存为 Excel 格式;收费站数据为 2—4 月的数据,保存为 TXT 格式。运用 MATLAB 程序对收费站数据进行初步处理,得到各收费站点之间的 OD 流量。

2 高速公路交通流模型

2.1 基于出入量法的交通流量—密度近似估计

以图 2 为例,在统计间隔 $t=5 \text{ min}$ 内, T_1 时刻检测站 A 的驶入流量为 $Q_1(T_1)$,检测站 B 的驶出流量为 $Q_2(T_1)$;两检测站之间有出入口匝道,出口匝道流量驶出率为 α , $\alpha = \text{驶出流量}/Q_1$;入口匝道流量驶入率为 β , $\beta = \text{驶入流量}/Q_1$ 。两检测站之间的路段密度可采用出入量法近似估计:初始时刻 T_0 时, AB 路段内车辆数为 $N(T_0)$,一般 T_0 为凌晨时, $N(T_0)$ 可近似取零;第 1 个统计间隔 5 min 后, AB 路段内车辆数 $N(T_1)$ 和密度 $K(T_1)$ 分别见式(1)、式(2);同理,第 i 个统计间隔后, AB 路段内车辆数 $N(T_i)$ 和密度 $K(T_i)$ 分别见式(3)、式(4)。

交调站改为:检测站。字母斜体,其后的数字为下标。a、b 改为 α 、 β

$$N(T_1) = N(T_0) + (1 - \alpha + \beta)Q_1(T_1) - Q_2(T_1) \quad (1)$$

$$K(T_1) = N(T_1)/L \quad (2)$$

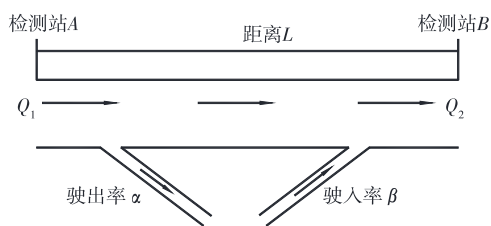


图2 路段交通流出入量示意图

$$N(T_i) = N(T_0) + \sum [(1 - \alpha + \beta)Q_1(T_1) - Q_2(T_i)] \quad (3)$$

$$K(T_i) = N(T_i)/L \quad (4)$$

可见,只要知道路段内的初始车辆数和从 T_0 到 T_i 时刻路段内车辆数,即可计算得到任意 T_i 时刻路段内的实时车辆数,从而得到交通密度。

2.2 参数标定

根据式(3)、式(4),交通密度与驶出、驶入率密切相关,计算路段密度时需考虑各路段的驶出、驶入率。驶出、驶入率与路段和时间都有关系,同一路段不同时间的驶出、驶入率也不尽相同。如周五出城高峰,上行的驶出率比平时高;周末进城高峰,下行的驶入率较高。

对收费站历史数据与主线交通流检测站实时数据进行统计,根据匝道出入口流量与主线流量的比值得到周五、周日和平常工作日每小时的驶出、驶入率。虽然根据基于历史收费数据得到的驶入、驶出率 β 、 α 值估计得到的密度与实际密度有一定误差,但这种误差可以接受;同时该模型的目的是建立密度—流量关系曲线,并利用该曲线评估路段交通流拥堵状态,该密度估计值不会影响拥堵状态的评价结果精度。

2.3 流量—密度模型

基于采集的流量数据和计算密度可得到长益高速公路各路段的流量—密度散点图,图 3 为部分路段散点图,表 2 为各路段对应的流量—密度方程。

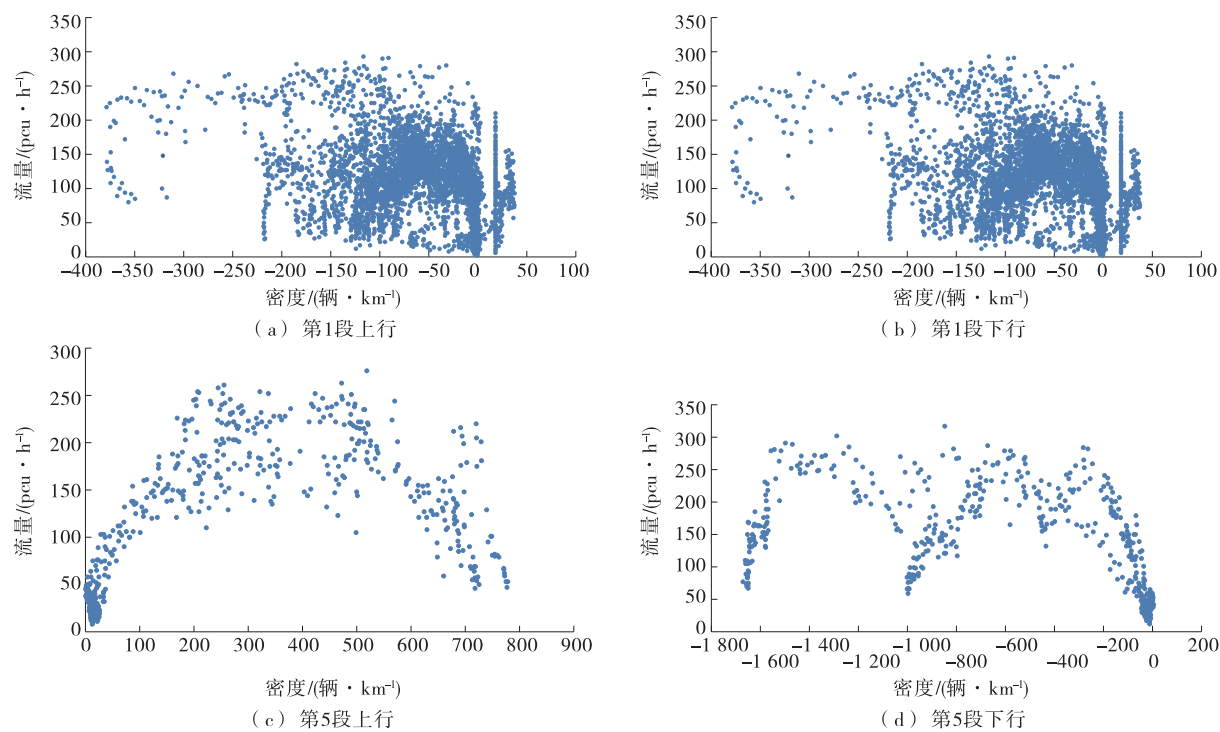


图 3 长益高速公路部分路段的流量—密度散点图

表 2 各路段流量—密度方程

路段编号	路段范围	起止桩号	行驶方向	流量—密度方程
1	长湘—友仁检测站	K22+972—K25+405	东—西(上行)	$Q=-0.518K^2+0.001K+57.951$
	友仁—关山检测站	K25+405—K22+972	西—东(下行)	$Q=-0.201K^2-0.000\ 085\ 5K+81.218$
2	友仁—关山检测站	K25+405—K28+135	东—西(上行)	$Q=-0.009K^2+0.000\ 0049\ 71K+109.780$
	关山—金洲检测站	K28+135—K25+405	西—东(下行)	$Q=-0.03K^2+0.000\ 023\ 25K+115.158$
3	关山—金洲检测站	K28+135—K38+443	东—西(上行)	$Q=-0.026K^2+0.000\ 090\ 95K+101.794$
	金洲—宁乡检测站	K38+443—K28+135	西—东(下行)	$Q=-0.235K^2+89.490$
4	金洲—宁乡检测站	K38+443—K56+496	东—西(上行)	$Q=-0.701K^2-0.001K+69.345$
	宁乡—泉交河检测站	K56+496—K38+443	西—东(下行)	$Q=-0.225K^2+81.490$
5	宁乡—泉交河检测站	K56+496—K61+273	东—西(上行)	$Q=-0.538K^2-0.001K+29.956$
	泉交河—朝阳检测站	K61+273—K56+496	西—东(下行)	$Q=-0.402K^2+45.673$
6	泉交河—朝阳	K61+273—K76+000	东—西(上行)	$Q=-0.363K^2+0.003K+67.016$
	朝阳—益阳北段	K76+000—K61+273	西—东(下行)	$Q=-0.393K^2+0.007K+85.080$

3 高速公路交通拥堵状态判别

3.1 判别指标

(1) 饱和度。饱和度为交通量 V 与通行能力 C 的比值,在交通流达到饱和前,可用来评估交通流的拥挤水平。根据长益高速公路交通流调查数据的采集频率,饱和度按式(5)计算。基于饱和度的交通流服务水平检测简单、直接、方便,流量检测方法成熟,

设备安装简单、经济。但由于交通量具有二值性,同一交通量可对应畅通、拥堵两种状态,单一地基于饱和度和无法评价交通流的拥挤程度或服务水平。

饱和度 $=V_i/C_i=(Q_i\times12)/C_i$ (5)

式中: Q_i 为路段 i 的实时检测流量[pcu/(5 min)],5 min 为统计间隔; C_i 为路段 i 的实际通行能力(pcu/h),由各路段历史交通流检测数据统计得到。

(2) 密度。密度是单位道路长度内的车辆数,

密度越大,车辆之间的间隙越小,车速越低,能反映道路的拥堵状态和服务水平,评估高速公路的交通流状态。但目前交通流量—密度的检测难度相对较大,直接检测成本较高。根据《公路通行能力手册》,饱和度、密度和服务水平的对应关系见表3。

表3 设计速度100 km/h高速公路的交通流状态分级

服务水平	交通流状态	饱和度 V/C	密度/[小客车· (km·车道) ⁻¹]
一级	自由流	0.31	≤7
二级	稳定流上段	0.67	≤18
三级	稳定流	0.86	≤25
四级	饱和流	≈1.0	≤45
	强制流	>1.0	>45

3.2 交通状态判别

基于饱和度或密度的交通流状态判别均存在一定缺陷或不足。为提高判别的准确性,弥补基于单一指标判别方法的缺陷,综合采用饱和度和密度两个指标来评价交通流状态,判别标准表4。

表4 基于饱和度和密度的高速路段拥堵状态判别

基于密度的 评价结果	基于饱和度的 评价结果	综合判断 结果
畅通	畅通	畅通
畅通	基本畅通	畅通
畅通	一般	基本畅通
基本畅通	畅通	畅通
基本畅通	基本畅通	基本畅通
基本畅通	一般	基本畅通
一般	基本畅通	一般
一般	一般	一般
一般	拥挤	一般
拥堵	畅通	拥堵
拥堵	基本畅通	拥堵
拥堵	一般	拥堵
拥堵	拥堵	拥堵

4 结语

该文针对高速公路交通流检测数据缺失、检测数据细度大、部分检测参数不完备等现状,提出一种简易、实用的交通流拥堵状态评估方法。以长益高速公路主线交通流检测数据为基础,针对5 min为间隔的交通量数据,提出基于出入量法的路段区间密度估计方法,并考虑出入口匝道的分合流效应,以分合流比修正路段区间密度值,并以高速公路收费

站历史数据对分合流比进行标定,结合饱和度和密度对高速公路交通流拥挤程度进行综合评判。

但模型中修正参数 β 、 α 的确定方法不够精确,主要原因是互通收费站匝道数据是总的出入数据,没有针对每一条车道。可针对不同时间,利用收费站出入比例来确定各匝道流量,在每个匝道的出入口处设置检测器,提高估计精度。另外,其对交通流的研究仅局限于估计目前的状态,对于缓解实际高速公路的拥挤仍然不够,对交通流量预测方法需作进一步研究。

参考文献:

- [1] Coifman B. Estimating travel times and vehicle trajectories on freeways using dual loop detectors[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2002, 36(4).
- [2] Mehmet Y, Nikolas G. Experienced travel time prediction for congested freeways[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013, 53.
- [3] Shen L, Hadi M. Practical approach for travel time estimation from point traffic detector data[J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(5).
- [4] Mingjun Deng, Shiru Qu, Xiangyu Meng. Road short-term travel time prediction method based on flow spatial distribution and the relations[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(4).
- [5] Hyun Kyung, Tok Andre, Ritchie Stephen G. Long distance truck tracking from advanced point detectors using a selective weighted Bayesian model[J]. Transportation Research Part C: Emergence Technology, 2017, 82.
- [6] Ramezani M, Geroliminis N. On the estimation of arterial route travel time distribution with Markov chains[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(10).
- [7] 张俊婷, 周晶, 徐红利, 等. 基于离散时间马尔科夫链的主干道出行时间估计模型[J]. 系统工程, 2014(5).
- [8] 张俊婷, 周晶, 徐红利, 等. 基于空间型马尔科夫链的行程时间估计模型[J]. 系统工程, 2014, 32(5).
- [9] Zhan X, Ukkusuri S V, Yang C. A Bayesian mixture model for short-term average link travel time estimation using large-scale limited information trip-based data[J]. Automation in Construction, 2016, 72(3).
- [10] Woodard D, Nogin G, Koch P, et al. Predicting travel time reliability using mobile phone GPS data[J]. Tra-

(下转第34页)

对交叉口运行情况的影响;从流量总量上看,优化后流量比优化前高 4.5%。2) 优化后,早晚高峰时段及夜间交叉口平均延误明显减少。3) 优化后,交叉口最大排队长度明显减小。在相同流量甚至流量略有增加的情况下,优化后延误、最大排队长度均得到明显改善。

8 结论

(1) 基于上下游相关信息构建交叉口相关输入和约束,并相应调整相序及参数值,能更好地适应实际情况的变化。

(2) 通过通行能力系数区分交叉口运行状态,并针对不同状态制定相应信号控制策略,能避免因模型复杂导致的求解难度增加,同时均衡考虑控制方案的稳定性和灵活性,可依据经验、道路权重等对各相位设置不同的容忍饱和度和调节控制力度,实施可控性强。

参考文献:

- [1] 李珣,刘瑶,周健,等.基于改进遗传算法的交通信号配时优化模型[J].工业仪表与自动化装置,2017(4).
 - [2] 李悦,郝宇,刘洪涛.基于优化算法的城市相邻两交叉口信号配时[J].自动化仪表,2016,37(8).
 - [3] 张萌萌,贾磊,邹难.单点定时信号配时的多目标优化模型[J].计算机工程,2011,37(6).
 - [4] 唐德华,许伦辉,林泉.过饱和信号交叉口的多目标控制模型[J].科学技术与工程,2009,9(19).
 - [5] 李明伟,康海贵,周鹏飞.基于混沌云粒子群算法的交叉口信号智能配时优化[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013,37(1).
 - [6] 安艳召,成卫,袁满荣.基于 NSGA-II 算法的单点过饱和交叉口信号控制[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2015,39(4).
 - [7] 陈娟,耿俊杰,贾明星.交叉口车流多目标运行效率决策研究[J].计算机仿真,2016,33(4).
 - [8] 王力,张立立,李敏,等.考虑延误与通行能力的交叉口信号周期优化[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(4).
 - [9] National Electrical Manufacturers Association. Traffic controller assemblies with NTCIP requirements, ver. 02.06[S].
 - [10] 朱海峰,刘畅,温熙华,等.均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制[J].控制理论与应用,2019,36(5).
 - [11] 张永忠,张福生,刘小明,等.城市交通信号优化控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
 - [12] 耿焕同,朱海峰,张茜,等.均衡分布性与收敛性的协同进化多目标优化算法[J].控制与决策,2013,28(1).
 - [13] 金勇.平面交叉口转弯车流交通组织优化方法研究[D].长春:吉林大学,2006.
 - [14] 钱萍,邓建华.连续流交叉口左转车道交通适用条件研究[J].交通科技与经济,2018,20(5).
 - [15] 贺文彪.不同相位条件下交叉口通行能力调查与分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
 - [16] 杜学艳.基于遗传算法的 OD 矩阵推算和混合交通信号相位优化研究[D].杭州:浙江大学,2006.
 - [17] 何兆成,招玉华,赵建明,等.基于状态判别的单点交叉口信号配时优化方法[J].公路交通科技,2010,27(7).
 - [18] 王威,王秋平.基于遗传算法的城市单点交叉口信号控制研究[A].第四届全国土木工程研究生学术论坛论文集[C].2012.
- 收稿日期:2018-12-17
-
- *****
- (上接第 28 页)
- nsportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 75.
- [11] Hareesh Bahuleyan, Lelitha Devi Vanajakshi. Arterial path-level travel-time estimation using machine-learning techniques[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(3).
 - [12] Barger H. Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: a case study from israel[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(6).
 - [13] 盛春阳,张元.基于贝叶斯网络模型的交通状态预测[J].公路与汽运,2008(1).
 - [14] 刘好德,杜荣华,王勇.基于 FCD 的城市道路交通状态信息服务系统设计与实现[J].公路与汽运,2011(5).
 - [15] 陈贵霞.基于浮动车辆数据的高速公路交通流状态估计方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.
 - [16] 王昊,杨万波.速度梯度模型的高速公路交通流状态估计方法[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(9).
 - [17] 罗赞文,吴志坚,韩曾晋.高速公路交通流宏观模型的一种分类辨识算法[J].清华大学学报:自然科学版,2001,41(7).
- 收稿日期:2018-11-27