

城市交通控制中的数据采集研究综述

王殿海*, 蔡正义, 曾佳棋, 张国政, 郭佳林

(浙江大学 建筑工程学院 智能交通研究所, 杭州 310058)

摘要: 过去几十年来,城市交通控制技术为适应不断增长的交通需求和日益复杂的管理目标有了长足发展.作为城市交通控制策略制定和控制算法设计的基础,交通数据决定了城市交通控制的适用性、可靠性和先进性.数据采集技术的发展为城市交通控制能力的提升带来了机遇和挑战.本文回顾交通控制系统中数据采集与参数估计的基本方法,分析评述检测数据方法从固定式无标识数据、移动式检测数据到固定式有标识数据的演变,指出它们给交通参数估计带来的变革.结合20世纪末出现的移动式检测技术,分析评述了对应的两种交通参数估计方法,即基于概率论的方法和基于交通流激波理论的方法给交通控制带来的影响.针对近年来出现的固定式有标识检测数据,分析其对城市交通需求估计及交通控制策略参数估计研究带来的新任务.最后,分析指出我国未来交通控制研究的三个方向:一是城市交通控制系统的信息范围已扩展到区域和路网层级,二是交通参数估计研究的重点随着数据采集方式的演变已转向提高参数估计的实时性与精度等领域,三是交通参数研究理论与实践存在差异,如何结合我国城市交通系统运行中检测环境差异导致数据误差率的变化,交通流到达规律的变化,道路上不同类型交通流间的交叉干扰等实际应用因素,使方法与模型能有效地指导我国复杂的交通控制实践是重要方向.

关键词: 智能交通;城市交通控制;交通数据;交通参数

Review of Traffic Data Collection Research on Urban Traffic Control

WANG Dian-hai, CAI Zheng-yi, ZENG Jia-qi, ZHANG Guo-zheng, GUO Jia-lin

(Institute of Intelligent Transportation, College of Civil Engineering and Architecture,
Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Over the past few decades, urban traffic control technology has evolved to meet growing traffic demands and increasingly complex management objectives. As the basis of urban traffic control strategy and control algorithm, traffic data determines the applicability, reliability and advancedness of urban traffic control system. The development of data collection technology has brought opportunities and challenges to the improvement of urban traffic control. This paper reviews the basic methods of data collection and parameter estimation in traffic control systems. It analyzes the evolution of detection data methods from fixed unmarked detection data methods, probe vehicle-based data to fixed unique data. Combined with the probe vehicle-based data that emerged at the end of the 20th century, the impact of two corresponding traffic parameter estimation methods (stochastic method and shockwave-based method) are analyzed and reviewed. In view of the fixed unique detection data that has appeared in recent years, this paper analyzes the new tasks on urban traffic demand estimation and parameter estimation in traffic control. The paper then points out three directions of future traffic

收稿日期: 2020-03-21

修回日期: 2020-05-09

录用日期: 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(61773338,71901193); 中央高校基本科研业务费专项资金/Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China(2020QNA4026).

作者简介: 王殿海(1962-),男,吉林大安人,教授.

*通信作者: wangdianhai@zju.edu.cn

control research in China: first, the information scope of urban traffic has been extended to regional and road network levels; second, with the evolution of data collection methods, the focus of traffic parameter estimation research has shifted to improving the real-time and accuracy of parameter estimation; third, there are gaps between the theory and practice in traffic parameter estimation. It is an important direction in urban traffic control research on how to use those methods and models to better guide the complex traffic control practice in China and consider the data error caused by the detection under different urban transportation environment, traffic flow arrival rules, and cross-interference between different types of traffic flows.

Keywords: intelligent transportation; urban traffic control; traffic data; performance indices

0 引言

随着城市化和出行机动化进程的发展,城市交通拥堵已成为各大城市面对的共同问题.城市交通拥堵趋势已经从高峰时段拥堵演变为全天候拥堵,成为城市尤其是大城市交通的常见现象,缓解交通拥堵成为城市管理者迫切需要解决的问题.国内外实践证明,单纯依靠道路建设不能有效解决城市交通拥堵问题,采用先进的城市交通控制技术和手段调整交通流,提高交通效率并缓解交通拥堵,越来越被交通管理者所重视.

交通信号控制是针对在空间上无法实现分离的地方采用在时间上给交通流分配通行权的一种交通管理措施^[1].交通数据、控制策略和控制算法是交通信号控制系统三要素,其中,交通数据是控制策略制定和控制算法设计的基础,决定了交通控制系统的适用性、可靠性和先进性.

随着信息采集技术、计算机技术、通信技术与网络技术的飞速发展,交通数据采集途径和方法不断革新,使交通控制系统发生了一系列变化.交通控制已逐步由传统的定时方案控制转向依据检测设备得到的交通流运行特性实时进行优化的智能控制.已有研究表明^[2],交通控制系统在发展过程中不得等待技术进步来实现性能方面的阶段性改变.在大数据背景下,从数据演变视角对交通控制系统进行深度分析,总结城市交通控制数据采集和方法研究,探讨城市交通控制的未来演变方向,具有重要的意义.

1 用于交通控制的交通数据采集与处理

交通数据采集是交通控制系统的初始环节,为控制策略和控制算法提供基础数据.常见的数据采集手段有线圈、微波、超声波、视频、车载GPS、电子标签等,采集数据主要包括交通流量、饱

和流率、时间占有率、速度、行程时间等.检测数据按照检测器是否固定和数据是否有车辆标识可归纳为3种:固定式无标识数据、移动式检测数据和固定式有标识数据.

1.1 固定式无标识检测数据

1.1.1 线圈检测数据

环形线圈是一种技术成熟、应用十分广泛的传统车辆检测设备,也是目前应用最广泛的检测设备.将带有一定工作电流的环形线圈埋入地下,根据车辆经过线圈引起线圈内电流变化检测并计算车流量、速度、占有率、车长等信息.环形线圈检测特点主要有:检测精度较高,受环境影响较小,技术成熟,应用广泛.环形线圈也存在以下缺点:一是安装时施工量大,施工过程破坏路面,影响道路使用寿命;二是容易受到路基下沉、冰冻等因素影响,后期维护费用昂贵;三是受检测原理限制,在拥堵条件下,检测精度大幅降低.

环形线圈用于交通检测的研究始于上世纪60年代.W. Schempers^[3]和 Anderson R. L.^[4]分析了用于交通控制的线圈检测器的类型和3种检测原理,证明了感应线圈用于交通检测的可行性.感应线圈分为通过型和存在型两种,通过型感应线圈主要检测车流量,存在型感应线圈还可以检测占有率、饱和度等.Woods D. L.等^[5]详细论述了利用双线圈检测器计算车速、车长等数据的可行性,并分析了车型、车长、线圈距离、线圈匝数等因素对检测精度的影响,扩大了线圈采集数据的范围.

在速度检测方面,早期采用的线圈多是单线圈,无法满足交通控制对速度、车长等数据检测的需求,而将单线圈升级为双线圈费用昂贵,这引发了大量利用单线圈检测车辆速度的研究.Athol等^[6]首先提出单线圈速度计算模型,其主要思路是将占有率转化为密度,利用速度—密度—流量关系计算速度;该方法在车型比较复杂的路段中,由于

车辆长度的差异无法取得满意的速度估计值。Carlos Sun等^[7]提出了一种基于提取车辆到达和离开时线圈采集的电流波形的变化率特征分析相关指标的方法,通过研究该特征与车速的相关关系推算车辆速度,最后采用线性回归的方式得到拟合曲线;将拟合数据与实际数据对比后发现,该方法较之前方法,精度有显著提高。遗憾的是,如果需要得到更精确的速度值,依然需要使用双线圈检测器。Dailey^[8]和 Zhirui Ye^[9]等采用时间序列分析方法处理交通流参数,采用扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波方法对速度估计的非线性模型进行滤波处理,得到了速度估计模型。金盛等^[10]基于贝叶斯网络,采用EM算法完成参数训练,建立了使用单线圈检测密度的模型。

在排队检测方面,既有方法可以分为两大类^[11]。第一类是输入输出模型,重点考察从交叉口的到达和离开过程的累积到达队列长度;另一类是基于交通流激波模型,该模型通过对交叉口处队列形成和消散过程建模估计队列长度。

输入输出模型是一种常用的估计车辆排队方法,如 Jiang^[12]和 Das^[13]的研究,在路段上下游设置检测器,认为上游累计到达与下游累计流出车辆的差值是排队长度;该方式为避免换道带来的影响,上游检测器距离下游检测器不能过远,而过近又可能导致队尾超出上游检测器。Muck J.^[14]和 Henry X. Liu等^[15]结合交通波理论,利用与交叉口有一定距离的单线圈采集得到的交通数据估算排队长度,推断排队最远点。Qing Cai等^[16]结合固定检测器数据和浮动车数据,运用交通波理论,提出适合低饱和、欠饱和及过饱和和交通状态的排队长度估计方法。祁宏生等^[17]提出一种利用固定检测器结合交通状态检测排队长度的方法,可以对车辆不均匀到达情形进行修正,仿真表明,其模型在一定检测间隔下具有较好的估计效果。Yilong Ren等^[18]提出在路段上游设置线圈检测器检测速度数据进行自适应控制配时,防止排队溢出;检测器设置在路段上游的合适位置,在排队形成期间,一旦检测速度值低于某个计算得到的临界速度值,表明排队即将到达检测器,可能发生排队溢出;在排队消散期间,为防止排队溢出,当检测器检测得到速度不为0时,则上游才可以释放车辆;实际应用

时,可根据上游检测器速度,对进入路段的车辆相位提前截止或绿灯补偿。不过,该研究只考虑了孤立交叉口在固定信号周期和绿信比的情况下的自适应配时,难以用于区域协调配时研究。金盛等^[19]综合考虑了影响检测器布设的各种因素,通过系统分析不同交叉口流量之间的时空关系,提出一种基于交通流路段相关性的检测器优化布设方法。

1.1.2 地磁检测数据

地磁传感器是一种通过检测地磁因车辆经过而产生变化来记录交通流信息的车辆检测设备,其使用方式和采集信息方式与线圈法相似。由于低速车辆引起的地磁变化微弱,地磁检测器无法检测静止车辆和低速车辆。

地磁检测器被提出并用于交通检测是在上世纪90年代。1991年加州大学伯克利分校 Shladover^[20]提出一种利用地磁检测车辆位置的方法,由于邻道车辆干扰等原因,数据检测精度较低。Sing Yiu Cheung等^[21]研究了磁性传感器用于检测流量、速度时的精度问题,利用三轴地磁传感器的X和Z轴波形获得车辆类型等数据;他们通过分析伯克利大道采集的数据后发现,地磁传感器能够检测到99%的车辆,车速与车长的检测精度也超过90%;对同一地点的通过车辆进行分类,单检测器下的分类精度可达60%。Christopher M. Day等^[22]测试了地磁传感器和线圈传感器的精度,实验发现,两种传感器的漏检和错检情况相近。

在速度检测和排队估计方面,地磁检测器与线圈检测器检测技术相似。Li H.等^[23]提出利用单地磁检测器检测车辆速度的3种方法:根据检测器得到的车辆分类结果确定车辆长度,结合通过检测器时间计算速度;利用双芯片地磁传感器中记录的具有一定时间间隔的双波形,结合两芯片之间的距离计算速度;以两个波形结合车辆长度计算得到的速度均值作为车辆速度。实验效果表明,3种速度计算方法的精度依赖于车辆类型的准确检测。Haijian Li等^[24]提出一种利用停止线处单地磁检测器估计排队长度的方法,根据车辆跟驰理论计算车队中每辆车在绿灯启亮后通过停止线处检测器的理论占用时间,如果理论占用时间与实际占有时间误差在一定范围内,则认定该车属于

排队中的车辆,否则认为前一辆车为排队队尾,统计得到排队车辆数和排队长度。

地磁检测器可以利用三轴特性对车辆进行唯一标识并结合上下游匹配计算车辆的路段行程时间。2010年 Kwong K. 等^[25]利用三轴检测器检测得到的 XYZ 三轴波形的 6 个峰值对车辆建立标签,结合速度信息和理论旅行时间建立了上游检测得到的车辆和下游车辆的匹配模型,最后由匹配车辆计算路段旅行时间。

1.1.3 微波检测数据

微波检测器是一种非接触式交通检测设备,通过发射微波并接收反射波检测车流量、速度、占有率和车型等交通信息。微波检测器分为连续波雷达检测器和调频雷达检测器:连续波雷达检测器运用微波的多普勒效应检测车辆速度,但无法检测低速和静止车辆;调频雷达检测器利用车辆反射波与背景反射波的差异检测车辆位置,进而检测流量、密度、排队长度等信息,但无法获得旅行时间与延误信息。雷达检测器安装在路侧时虽可以检测多车道,但大型车阻挡小型车反射波时会产生检测误差;将检测器安装在路中则需要布设龙门架,为保证检测区域,雷达检测器的布置高度不宜过低,限制了雷达检测器在城市道路中的应用。

Denning N. E.^[26]在研究了微波检测器与线圈检测器检测的速度数据后发现:雷达检测得到的速度值低于线圈数据,并提出引入校正因子进行修正的计算思路;校正后的雷达数据与线圈数据的检测效果相近,证明使用雷达检测器的可行性;同时指出雷达检测器对低速车辆漏检、误检率高,易受大车阻挡和路旁构筑物影响等缺点。Seoungbum Kim^[27]研究了 SpeedInfo 公司生产的无线微波雷达检测器在交通检测中的适用性,同样发现,交通检测性能与线圈相近,但易受天气因素影响。

总的来看,固定无标识检测数据只能提供在离散空间点测得的交通流信息^[28],需要建立特殊模型来估计其他空间位置的交通状态。目前还没有任何流量模型或估算方法是完美的,融合不同来源的交通流量信息以提高估算精度^[29]可能是未来的发展方向。

1.2 移动式检测数据

装备了无线定位设备的车辆称为探测车(Probe Vehicle, PV)。探测车产生的轨迹数据作为一种新的数据源,吸引了大量的研究工作。相比于固定检测器,探测车的优点主要在于安装灵活,理论简单,可以获得更详尽的车辆行驶状态信息^[30]。早期的现场试验表明^[31-32],GPS 信息能较好地满足交通信息收集的需要。较低的 GPS 探测车渗透率,就能较准确地估计交通参数;这些现场实验为 GPS 探测车数据的应用打下了坚实基础。

与网联车辆(Connected Vehicle, CV)不同的是,探测车不与交叉口控制设施相连(V2I),因此现有的研究通常将 GPS 产生的轨迹数据转化为交通流量、行程时间、延误模式、排队长度等参数,用于交通信号的离线优化。

使用探测车数据进行交通参数估计的方法主要有两种:基于概率论的方法和基于交通流激波理论的方法。

交通流量和排队长度是交通控制的重要参数。基于探测车的流量和排队估计,大多基于车辆到达服从一定的概率分布,在探测车渗透率已知等假设下进行建模。利用探测车数据,Comert 等^[33]证明了当探测车渗透率已知,且探测车在车流中均匀分布时,排队长度只与队列中最后一辆探测车的位置有关,并给出排队长度边际概率分布已知时的排队长度的期望与方差的解析式。

此外,为应对周期内无探测车的情况,Comert^[34]融合停车线检测器和探测车的信息,将探测车渗透率、车辆到达速率作为已知条件,假设交叉口车辆到达是一个泊松过程,建立了交叉口车辆到达流率期望值解析式,比较几种在不同已知信息组合下的探测车渗透率和交叉口车辆到达流率的期望解析式。

考虑到“车流到达是泊松过程”这一确定性假设忽略了交通流随机性且不能完全描述城市干线交通流特征,Hao 等^[35-36]分别用非齐次泊松过程和对数正态分布描述车队到达和释放,并应用贝叶斯网络方法捕捉交通流的随机性,估计探测车的车辆索引(Vehicle Index,定义为探测车在一个周期车队释放时的顺序编号),最终得到车辆索引的概

率分布.该模型被进一步拓展到逐周期的交叉口排队长度分布估计.Zheng等^[37]假设车辆到达过程服从时变的泊松分布,使用期望最大化(EM)算法估计交通流量,该方法在较低的渗透率(低于12%)下也可获得较好效果,不过计算出的流量颗粒度较粗(以30 min和1 h为间隔的MAPE为9%~12%,以10 min为间隔的MAPE为19%).Zhao等^[38]针对需要预设探测车渗透率或排队长度分布等信息的局限性,分析了探测车排队位置的统计分布,建立了基于贝叶斯理论的排队长度分布.

部分学者结合交通流激波理论和探测车数据研究了交通控制输入参数.Yao等^[39]提出一种利用探测车轨迹估计交叉口流量的方法,使用激波理论估算排队车辆的数量,假定车辆到达速率服从时变的泊松分布,以估计不排队通过交叉口的车流量;与Zheng等^[40]的结果对比,其方法可动态获取逐周期的流量,对渗透率的鲁棒性更优.

少量研究通过探测车信息推导交通参数用于信号控制优化.Zhang等^[41]提出一种利用探测车轨迹数据进行逐周期信号相位优化的方法,利用轨迹数据更新自由流速度和交叉口通行能力,并应用轨迹临界点的概念计算最大排队长度,作为实时相位调整的参数;仿真实验表明,该理论具有一定实用价值.Yao等^[42]提出一种干道协调控制模型,根据激波理论计算所有探测车在信号交叉口的延误,以所有探测车延误之和最小为目标,用多子群粒子群优化(multi-sub-swarm Particle Swarm Optimization)算法优化干道信号配时.

总的来看,大多数关于探测车数据的早期尝试都研究了使用无线定位技术的基于探测车的交通监控系统.无线定位技术或全球定位系统(GPS)被用来记录这些探测车辆及其行程中的特定位置(纬度/经度);基于采样数据估计交通流量的具体测量值(如排队长度和行程时间)^[43].与固定式无标识传感器相比,移动式检测方法能够提供更多的交通流信息,提高了交通状态感知能力.

1.3 固定式有标识检测数据

固定式有标识检测数据检测设备包括蓝牙、RFID和高清摄像头,该类检测器均能够识别车辆ID,布设在路侧或道路上方,对通过车辆进行扫描或识

别.检测数据分别为蓝牙数据、自动车辆识别数据和自动车牌识别数据.

每个蓝牙设备都有一个唯一的电子标识符,即MAC地址.上下游断面的蓝牙扫描仪通过MAC地址识别车辆内的蓝牙设备.但蓝牙数据由于通过时刻不精确,噪音数据难以剔除等问题在交通场景下还没有得到广泛应用.

自动车辆识别数据和自动车牌识别数据都是基于自动识别技术获取通过车辆的ID和通过时刻数据.自动车辆识别利用安装在路侧或者道路上方的射频识别(Radio frequency identification, RFID)读取器读取通过车辆上的电子标签,其样本量取决于RFID读取器站点的建设和电子标签的渗透率.自动车牌识别对高清摄像头捕获的通过车辆的照片进行光学字符识别,记录车辆车牌和通过时刻、车道号等信息,其样本量取决于高清摄像头的安装点位数量和捕获率^[44].

近年来,我国许多城市大量安装自动违法抓拍系统,主要目的是记录闯红灯行为,附带自动车牌识别功能.高清摄像头位于停车线上游约10 m处.该系统可以收集许多交通参数,如交通流量、占用率、车辆牌照,驶离停车线时间.

相比传统检测器,自动车牌识别系统可记录任何通过停车线车辆的牌照和相应的时间点^[45-46].这种数据优势引发了越来越多的研究,例如车辆出行OD识别,出行轨迹重建,基于行程时间的排队长度估计等.孙剑等^[47]提出一种车牌自动识别环境下的车辆出行矩阵估计方法.阮树斌等^[48]对出行轨迹进行补全重构,提出基于车牌识别数据的机动车出行轨迹提取算法,可支撑城市交通需求结构和时空分布特性研究.付凤杰^[44]利用基于高清智能卡口的自动车牌识别数据研究城市道路路段行程时间及路径行程时间.

在交通参数获取方面,如果来自上游交叉口的车辆牌照可以与离开下游停车线的车牌相匹配,则可基于匹配时间差进一步计算下游路段上每个车道中所有车辆的路段行程时间^[49].这些数据可用于导出其他基于车道的参数,例如最大队列长度.基于路段行程时间提取交通流量参数并估算交通状态正成为研究热点.Ban等^[50]通过路段采

样的车辆行程时间研究了交叉路口延迟模式,发现每个周期中排队的车辆,其行程时间从红灯开始后的最大值开始线性减少,这种一个周期的行程时间减少的下降趋势与交通需求呈正相关,可使用线性形式拟合,称之为行程时间减少率模型。Ban等^[43]分析了引起这些延迟模式的原因,提出基于延迟模式的周期排队长度计算方法。

Zhan^[51]结合交通波模型和车辆到达—驶离规律,利用车牌识别数据,提出一种车道级的排队估计方法。该模型结合输入—输出和交通波模型的优点,利用高斯插值重构累计的车辆到达—驶离曲线,利用完整的到达和离开信息,基于行车跟踪的仿真方法估算每个车道的实时队列长度。

Ma D.^[52-53]在Ban等提出的行程时间减少率模型基础上建立了一个虚拟信号周期概念下车辆检测到达排队模型。虚拟周期指的是在一个虚拟周期内进入路段的所有车辆刚刚在一个信号周期内从下游停车线释放。改进了每个周期中排队车辆的出行时间减少率模型,并提高了不同条件下估算基于车道的交通需求的算法精度。

2 讨论与研究展望

从上述研究可以看出,城市交通控制系统的数据采集方式经历了固定式无标识数据到移动检测数据再到固定式有标识数据的演变。在与之相对应的交通参数获取模型的研究领域,基于固定式无标识数据的相关交通参数模型已基本成熟,而基于移动检测数据和固定式有标识数据研究正在成为当前的研究热点并不断取得新的成果。

根据研究现状分析,未来城市交通控制系统的数据采集和交通参数研究仍然存在发展空间和现实需求,其要点可以归纳为:

(1) 宏观上,城市交通控制系统的重要趋势是其信息范围已经扩展到区域和路网层级,例如,基于自动车牌识别数据能够获取区域出行时空分布和出行路径,这些信息为制定新的控制策略和控制算法提供了思路。现有不少研究仍集中于单点控制、干线协调控制等基于固定式检测数据的交通控制框架上,缺少对交通网络控制等新控制策略和控制算法的研究,这值得引起注意。

(2) 随着数据采集方式的演变,交通参数估计研究的重点已转向提高参数估计的实时性与精度等领域,如排队长度、车辆延误等指标的估计精度,直接关联于交通控制与交通管理的效率与水平。如何结合交通检测技术的新进展,研究提出新的交通参数估计模型与交通控制策略是未来的一个重要研究方向。

(3) 整体上看,城市交通控制中的交通参数研究仍然过于理论化。虽然部分研究开展了一些案例分析,但如何结合我国城市交通系统运行中的不确定性因素,如检测环境差异导致的数据误差率的变化,交通流到达规律的变化,道路上不同种类交通流间的交叉干扰等实际应用因素,使方法与模型能有效地指导我国复杂的交通控制实践仍任重道远。

参考文献:

- [1] 王殿海, 金盛, 祁宏生, 等. 城市交通控制理论与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017. [WANG D H, JIN S, QI H S, et al. Urban traffic control: Theory and methodology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.]
- [2] HAMILTON A, WATERSON B, CHERRETT T, et al. The evolution of urban traffic control: changing policy and technology[J]. Transportation Planning and Technology, 2013, 36(1): 24-43.
- [3] LINGENFELSER P P, THILO P P. Loop detectors for measuring road traffic[J]. Siemens Review, 1970, 37(6): 332-337.
- [4] ANDERSON R L. Electromagnetic loop vehicle detectors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1970, 19(1): 23-30.
- [5] WOODS D L, CRONIN B P, HAMM R A. Speed measurement with inductance loop speed traps[R]. College Station Texas: Transportation Institute, 1994.
- [6] ATHOL P. Interdependence of certain operational characteristics within a moving traffic stream[J]. Highway Research Record, 1965(72): 58-87.
- [7] SUN C, RITCHIE S G. Individual vehicle speed estimation using single loop inductive waveforms[J]. Journal of Transportation Engineering-ASCE, 1999, 125(6): 531-538.
- [8] DAILEY D J. A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements[J]. Transportation Research Part B, 1999,

- 33(5): 313–322.
- [9] YE Z, ZHANG Y, MIDDLETON D, et al. Unscented Kalman filter method for speed estimation using single loop detector data[J]. *Transportation Research Record*, 2006, 1968(1968): 117–125.
- [10] 金盛, 王殿海, 祁宏生. 单线圈检测器速度估计的贝叶斯网络模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(1): 54–58. [JIN S, WANG D H, QI H S. Bayesian network method of speed estimation from single-loop outputs[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(1): 54–58.]
- [11] LIU H X, WU X, MA W, et al. Real-time queue length estimation for congested signalized intersections[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(4): 412–427.
- [12] JIANG Y. A model for estimating traffic delays and vehicle queues at freeway work zones[C]. *Journal of the Transportation Research Forum*, 2001.
- [13] DAS S, LEVINSON D. A queuing and statistical analysis of freeway bottleneck formation[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2004, 130(6): 787–795.
- [14] MUECK J. Using detectors near the stop-line to estimate traffic flows[J]. *Traffic Engineering and Control*, 2002, 43(11): 429–434.
- [15] LIU H X, WU X, MA W, et al. Real-time queue length estimation for congested signalized intersections[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2009, 17(4): 412–427.
- [16] CAI Q, WANG Z, ZHENG L, et al. Shock wave approach for estimating queue length at signalized intersections by fusing data from point and mobile sensors[J]. *Transportation Research Record*, 2014, 2422(2422): 79–87.
- [17] 祁宏生, 王殿海. 路段排队最远点估计方法研究[J]. *交通与计算机*, 2008, 26(6): 47–51. [QI H S, WANG D H. Estimation method of road queue back[J]. *Computer and Communications*, 2008, 26(6): 47–51.]
- [18] REN Y L, WANG Y P, YU G Z, et al. An adaptive signal control scheme to prevent intersection traffic blockage [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 18(6): 1519–1528.
- [19] 金盛, 徐程, 王殿海. 城市路网交叉口检测器均衡布设优化方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(3): 515–521, 564. [JIN S, XU C, WANG D H. Optimal traffic detector locations for equal distribution at urban network intersections[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(3): 515–521, 564.]
- [20] SHLADOVER S E, DESOER C A, HEDRICK J K, et al. Automated vehicle control developments in the PATH program[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(1): 114–130.
- [21] CHEUNG S Y, COLERI S, DUNDAR B, et al. Traffic measurement and vehicle classification with single magnetic sensor[J]. *Transportation Research Record*, 2005, 1917(1): 173–181.
- [22] DAY C M, PREMACHANDRA H, BRENNAN T M, et al. Operational evaluation of wireless magnetometer vehicle detectors at signalized intersection[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2192(1): 11–23.
- [23] LI H, DONG H, JIA L, et al. Some practical vehicle speed estimation methods by a single traffic magnetic sensor[C]. *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2011.
- [24] LI H, CHEN N, QIN L, et al. Queue length estimation at signalized intersections based on magnetic sensors by different layout strategies[J]. *Transportation Research Procedia*, 2017(25): 1629–1647.
- [25] KWONG K, KAVALER R, RAJAGOPAL R, et al. Real-time measurement of link vehicle count and travel time in a road network[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(4): 814–825.
- [26] DENNING N E. Implementation and validation of a cost-effective networked radar-based highway traffic speed measurement system[C]. *Aip Conference*, 2007.
- [27] KIM S, COIFMAN B. Assessing the performance of SpeedInfo radar traffic sensors[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2017, 21(3): 179–189.
- [28] SUN Z, BAN X. Vehicle trajectory reconstruction for signalized intersections using mobile traffic sensors[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013(36): 268–283.
- [29] BERKOW M, MONSERE C, KOONCE P, et al. Prototype for data fusion using stationary and mobile data: Sources for improved arterial performance measurement[J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2099(2099): 102–112.
- [30] KOLBL R. Probe vehicle: A comparison of motorway performance measure with other motorway flow detection techniques[C]. *Eleventh International Conference on Road Transport Information and Control*, London: Institution of Engineering and Technology, 2002.
- [31] CHEU R L, XIE C, LEE D, et al. Probe vehicle population and sample size for arterial speed estimation[J]. *Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2002, 17(1): 53–60.
- [32] FERMAN M A, BLUMENFELD D E, DAI X. An analytical evaluation of a real-time traffic information system using probe vehicles[J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2005(9): 23–34
- [33] COMERT G, CETIN M. Queue length estimation from

- probe vehicle location and the impacts of sample size[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009(197): 196–202.
- [34] COMERT G. Effect of stop line detection in queue length estimation at traffic signals from probe vehicles data[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013(226): 67–76.
- [35] HAO P, SUN Z, BAN X (JEFF), et al. Vehicle index estimation for signalized intersections using sample travel times[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013(36): 513–529.
- [36] HAO P, BAN X (JEFF), GUO D, et al. Cycle-by-cycle intersection queue length distribution estimation using sample travel times[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014(68): 185–204.
- [37] ZHENG J, LIU H X. Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017(79): 347–362.
- [38] ZHAO Y, ZHENG J, WONG W, et al. Estimation of queue lengths, probe vehicle penetration rates, and traffic volumes at signalized intersections using probe vehicle trajectories[J]. *Transportation Research Record*, 2019(2673): 660–670.
- [39] YAO J, LI F, TANG K, et al. Sampled trajectory data-driven method of cycle-based volume estimation for signalized intersections by hybridizing shockwave theory and probability distribution[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, pp(99): 1–13.
- [40] ZHENG J, LIU H X. Estimating traffic volumes for signalized intersections using connected vehicle data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017(79): 347–362.
- [41] ZHANG J, CHENG Y, HE S, et al. Improving method of real-time offset tuning for arterial signal coordination using probe trajectory data [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(1): 1–7.
- [42] YAO J, TAN C, TANG K. An optimization model for arterial coordination control based on sampled vehicle trajectories: The STREAM model[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2019(109): 211–232.
- [43] 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): 1133–1156.
- [44] 付凤杰. 基于自动车牌识别数据的城市道路行程时间估计[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. [FU F J. Travel time estimation for urban road networks using ALPR data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.]
- [45] SHIRAZI M S, MORRIS B. Vision-based turning movement monitoring: Count, speed & waiting time estimation[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2016, 8(1): 23–34.
- [46] KONDYLI A, SISIOPIKU V P, ZHAO L K, et al. Computer assisted analysis of drivers' body activity using a range camera[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2015, 7(3): 8–28.
- [47] 孙剑, 冯羽. 自动识别环境下车辆的出行矩阵估计新方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011(12): 80–84. [SUN J, FENG Y. A new method of OD estimation based on automatic vehicle identification data[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2011(12): 80–84]
- [48] 阮树斌, 王福建, 马东方, 等. 基于车牌识别数据的机动车出行轨迹提取算法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(5): 836–844. [RUAN S B, WANG F J, MA D F, et al. Vehicle trajectory extraction algorithm based on license plate recognition data[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2018, 52(5): 836–844.]
- [49] CHANG S L, CHEN L S, CHUNG Y C, et al. Automatic license plate recognition[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(1): 42–53.
- [50] BAN X, HERRING R, HAO P, et al. Delay pattern estimation for signalized intersections using sampled travel times[J]. *Transportation Research Record*, 2009, 2130(1): 109–119.
- [51] ZHAN X Y, LI R M, et al. Lane-based real-time queue length estimation using license plate recognition data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015(57): 85–102.
- [52] MA D F, LUO X Q, JIN S, et al. Lane-based saturation degree estimation for signalized intersections using travel time data[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2017, 9(3): 136–148.
- [53] LUO X Q, MA D F, JIN S, et al. Queue length estimation for signalized intersections using license plate recognition data[J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2019, 11(3): 209–220.