

车联网环境下快速路入口匝道控制研究初探

张丽岩, 葛静, 马健*

苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州

Email: *mjzlyhh@163.com

收稿日期: 2020年8月25日; 录用日期: 2020年9月10日; 发布日期: 2020年9月17日

摘要

快速路的入口匝道控制问题一直是交通领域研究的热点问题之一, 研究人员尝试采用不同的控制方法来缓解快速路交通拥堵, 减少出行延误。车联网技术的发展为快速路系统的管理与控制提出了新的可能性, 但是目前的控制方法大多针对传统环境, 车联网环境下的控制研究还存在诸多局限。本文通过分析车联网环境下控制系统的特性, 提出了车联网环境下入口匝道控制系统的架构, 针对当前交通状态获取存在的缺陷, 提出通过交通流模型的估计方法进行实时交通状态预测以增加控制系统的可靠性。

关键词

车联网, 入口匝道, 优化控制, 系统架构

Discussion on Expressway On-Ramp Control Methods in the Presence of Internet of Vehicles

Liyan Zhang, Jing Ge, Jian Ma*

Department of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu

Email: *mjzlyhh@163.com

Received: Aug. 25th, 2020; accepted: Sep. 10th, 2020; published: Sep. 17th, 2020

Abstract

The on-ramp control of expressway is one of the hot issues in the field of transportation. The researchers tried to use different control methods to alleviate traffic jams and reduce travel delay.

*通讯作者。

The development of the Internet of vehicles technology has brought new possibilities for the control of on-ramp and upstream and downstream vehicles of expressway, but the research on the control of on-ramp in the presence of the Internet of vehicles is not in-depth at present. This paper analyzes the actual demand of on-ramp control system of expressway in the presence of Internet of vehicles, and puts forward the framework of on-ramp control system in the presence of Internet of vehicles. In view of the shortcomings of current traffic state acquisition methods, it proposes a real-time traffic state prediction method based on traffic flow model estimation, which can increase the reliability of the control system of the Internet of vehicles.

Keywords

Internet of Vehicles, On-Ramp, Optimized Control, System Framework

Copyright © 2020 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

快速路的建设一定程度上缓解了城市交通拥堵现象,然而随着交通需求的不断增加,快速路系统的运行效率逐渐降低,匝道控制是目前应用最广、效果最好的一种快速路交通控制手段[1]。但传统的控制手段面临着车辆状态收集设施不完备、数据处理和分析能力差等问题,随着城市交通智能化运行的加快,车联网技术的高速发展对于车辆在快速路系统中的精准控制具有重要意义。本文提出了车联网环境下快速路入口匝道控制系统的逻辑框架,理论上该控制系统可有效优化目前快速路采用的固定限速控制及人工匝道控制等,对于快速路联网自动控制的研究具备一定的意义。

2. 车联网的概念

车联网(Internet of Vehicles, IOV)是指车辆配备电子传感设备、智能终端及信息处理系统,利用无线通信技术[2],实现车-X(X:人、车、路、通信和服务平台)之间的互联,完成对人-车-路的实时监控,进而提高交通管理效率。车联网是由物联网(Internet of Things, IOT)融合智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)发展而来,是物联网技术在交通领域的重要应用。

3. 快速路控制系统

3.1. 主线控制系统

3.1.1. 可变限速控制法

可变限速(Variable Speed Limits, VSL)控制是在快速道路主线沿线设置可变限速标志,向驾驶人预告前方的交通阻塞状况,引导其按指示的限速行驶,以保证主线车流平稳,缓解交通拥堵,减少交通事故的发生,保障行车安全,提高道路通行能力。

3.1.2. 车道封闭控制法

主线车道封闭是指通过车道封闭标志禁止车辆进入快速路的控制方法,一般是当主线某车道发生事故或因维护施工等使通行能力下降时采用,此时主线各车道上垂直的绿箭头改为红色“X”标志。此方法的控制效果受交通需求的变化影响较大,一般在高峰期采用车道封闭带来的收效甚微。

3.1.3. 可逆车道控制法

当快速路在高峰期, 主线车流出现很大的方向不平衡性且将来会继续存在时, 可采用设计可逆车道的方法, 改变主线不同方向上的通行能力以适应高峰时某一方向的交通需求。在快速路主线恰当地使用可逆车道控制能够更加经济地使用道路空间和通行权。

3.2. 入口匝道控制系统

3.2.1. 封闭匝道法

只有在特殊情况下才会考虑将部分入口匝道进行暂时或永久性关闭, 如: 恶劣天气条件下为了避免交通事故; 互通式立交距离非常接近, 存在严重的交织问题; 匝道排队车辆过多, 而没有多余容量提供时, 可封闭匝道[3]。但此控制方式缺乏灵活性, 易引起公众的反对。

3.2.2. 定时控制法

匝道定时控制是最简单的控制形式, 适用于交通流变化不大的情况, 采用固定的控制周期和相位。该方法将一天分为多个时段, 假定每个时段的交通流处于稳定状态, 从而确定匝道调节率, 以实现优化目标。此方法易于实现且控制成本低, 但无法对实时交通的变化做出相应处理, 从而影响其控制效果。

3.2.3. 实时感应控制法

控制方式是根据快速路系统实际检测的交通数据来确定调节率, 克服了定时控制无法应对交通流实时变化和突发性拥挤的问题, 目前该方法已在外国取得了广泛应用, 但其实现所需的检测设备较多, 工程及养护成本高。

3.3. 出口匝道控制系统

理论上, 快速路出口匝道控制通常可采用两种方法: 控制出口匝道车流以及关闭出口匝道[4]。第一种控制方法可缓解快速路交叉口附近的拥堵, 但是也使交通事故的风险增大。匝道关闭可有效减少因车辆交织带来的安全问题, 但同时也大大增加了驾驶人的行车时间和绕行距离, 因此极少采用。

4. 车联网环境下快速路匝道控制系统逻辑架构

4.1. 功能需求分析

交通信息是车联网系统中的核心内容, 其应用开发基本组成了车联网系统的各个功能模块。随着物联网及大数据的日益发展, 交通数据信息的有效性获得了极大的提高, 车联网环境下的匝道控制系统也对交通信息的感知与交互提出了进一步的要求。

4.1.1. 交通信息感知

驾驶员在传统驾驶环境主要通过感觉器官获取外部交通信息, 如车辆运行的工况信息及道路环境信息、指示信息等。而在车联网环境下, 驾驶员还可通过车载系统获取信息, 通过车车通信共享车辆的位置、速度、加速度等信息, 这大大减少了传统信息感知的误差。交通信息感知的具体内容有: 1) 对车辆运行中各种工况信息的感知; 2) 对快速路环境的感知; 3) 车与物之间的感知; 4) 对车辆位置的感知。

4.1.2. 交通信息交互

交通信息交互是一个信息传输、共享与交换的过程, 通过信息交互, 车联网的各个节点都能够自主获取环境和其他节点的信息[5]。车联网系统的通信主要有车-车(V2V), 车-基础设施(V2I), 车-行人(V2P)、车-外部网络(V2N)。V2X 是未来智能交通系统的关键技术, 它可使车辆与环境之间实现实时数

据交换,从而获取实时路况、道路信息等一系列交通信息,提高驾驶安全性,减少交通拥堵,提高通行效率。

4.2. 控制系统整体设计

本文提出一种车联网环境下的快速路主线及入口匝道联合控制系统的框架,包括主线控制系统、入口匝道控制系统和车载控制系统。如图 1 所示。其中主线控制系统由交通信息管理控制中心和路侧单元(Road Side Unit, RSU)组成,主要用于获取快速路主线各处的实时交通状态,包括流量、速度、占有率等。控制中心根据 RSU 所获取的车辆行驶基本信息与路面交通流状况,确定出入匝道的车辆数以确保匝道附近主线车辆的平稳运行。入口匝道控制系统主要负责确定车辆进入匝道的过程,控制中心根据匝道层路侧单元所获取的入口匝道实时交通状态确定控制策略(即单位控制周期内入口匝道放行的车辆数)。匝道层控制系统根据控制策略并结合匝道车流实际运行状况,计算匝道车流汇入主线的情况,通过车载控制系统将指令发送给车辆。车载控制子系统是由匝道控制区域内配备车载设备的车辆组成,其主要功能是向路侧单元发送车辆信息的同时接受匝道层控制系统发送的指令,按照所给的通行策略依次通过匝道。

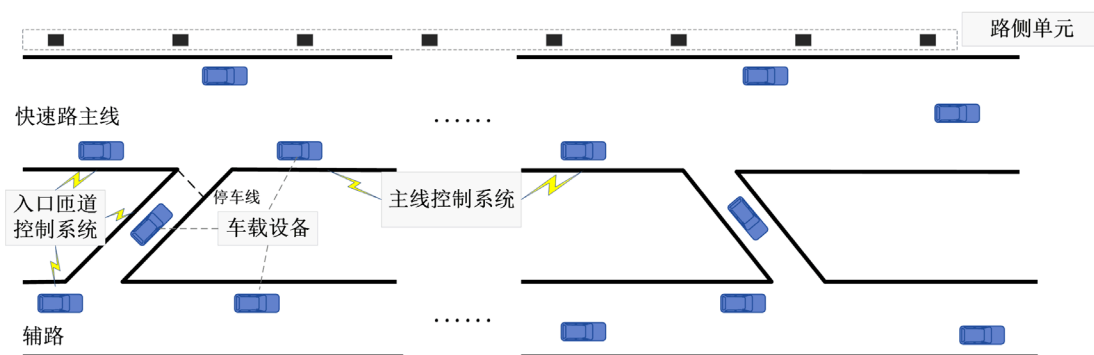


Figure 1. Schematic diagram of the ramp control system in the presence of Internet of Vehicles

图 1. 车联网环境的匝道控制系统示意图

4.3. 入口匝道控制系统设计

入口匝道控制系统负责将匝道控制指令发送给控制区域的车辆,保证瓶颈路段通过的流量最大以及确保匝道排队长度不会过长。入口匝道控制系统包括入口匝道路侧单元、主线路侧单元、入口匝道控制节点和匝道排队检测器等。其中主线和入口匝道 RSU 设备主要分别用于采集入口匝道主线上游车辆以及匝道车辆的位置和速度信息并传递给入口匝道控制节点。排队检测器布设于距离入口匝道处位置的 2/3 匝道长度处,一般为摄像头或者检测线圈,负责采集入口匝道车辆排队长度信息并反馈给控制节点。入口匝道控制节点根据获取的交通信息制定车辆控制策略并生成指令,通过路侧单元传递给快速路主线和匝道车辆。入口匝道控制子系统如下图 2 所示。

5. 车联网环境下快速路匝道协同控制系统

5.1. 宏观交通流模型

上文阐述了快速路实时交通状态获取方法,即通过 RSU 记录检测范围内车辆的信息,并据此计算路段交通状态。但在实际运行中,并不一定能保证 RSU 的布设满足系统要求,其次 RSU 设备可能会出现故障,使得某些路段的交通数据无法检测到,从而导致系统失效。因此,为解决这样的问题,本文提出通过交通流模型的估计方法进行实时交通状态预测以增加车联网控制系统的可靠性。

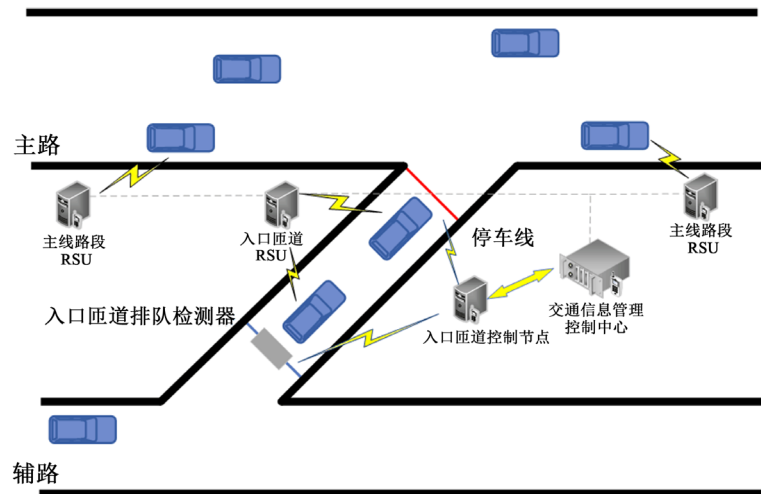


Figure 2. Subsystem of on-ramp control
图 2. 入口匝道控制子系统

5.1.1. 交通流模型

METANET 模型可用于描述道路宏观交通流运行状态，其主要思想是对交通波进行离散化，将快速路交通流划分成若干结点和路段，根据每个路段当前的交通状态，结合相邻路段之间的联系预测下一时刻各路段的交通状态，以此实现对交通流状态和基本参数的估计。模型划分节段 i 如下图 3 所示。

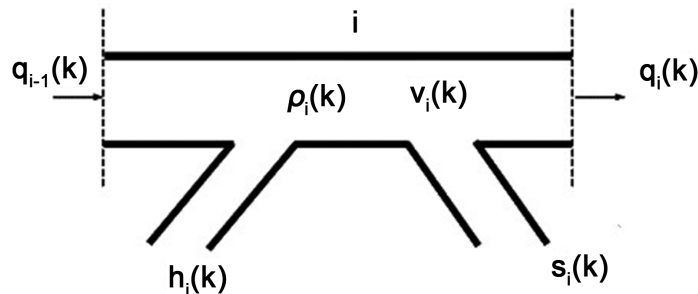


Figure 3. Schematic diagram of road section of METANET model
图 3. METANET 模型划分路段示意图

METANET 模型的构建主要是针对交通流三参数进行，路段模型如下：

$$q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k) \lambda_i \tag{1}$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \cdot \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + h_i(k) - s_i(k)] \tag{2}$$

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau_i(k)} \{v[\rho_i(k)] - v_i(k)\} - \frac{T}{L_i} v_i(k) [v_i(k) - v_{i-1}(k)] + \frac{\gamma_i(k) T}{\tau_i(k) L_i} \cdot \frac{\rho_{i+1}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \sigma} \tag{3}$$

式中， $q_i(k)$ 为节段 i 在 k 时刻的流量，veh/h； $v_i(k)$ 为节段 i 在 k 时刻的平均速度，km/h； λ_i 为节段 i 的车道数； $\rho_i(k)$ 为节段 i 在 k 时刻的平均密度，veh/km/lane； T 为采样周期，h； L_i 为节段 i 的长度，km； $h_i(k)$ 为节段 i 在 k 时刻的入口匝道汇入量，veh/h； $s_i(k)$ 为节段 i 在 k 时刻的出口匝道分流流量，veh/h；

$v[\rho_i(k)]$ 为期望速度值, km/h; $\gamma_i(k)$ —— 路段 i 在 k 时刻的敏感系数; $\tau_i(k)$ —— 驾驶员调整延迟系数; σ —— 补偿系数, 可取常数。

$$h_i(k) = h_i(k-1) + K_R [O_{cr} - O_i(k-1)] \quad (4)$$

$$O_i(k-1) = l\rho_i(k-1) \quad (5)$$

式中, K_R 为反馈增益函数; O_{cr} 为主线位于匝道下游的关键占有率; $O_i(k-1)$ 为路段 i 在 $(k-1)T$ 时刻的占有率; l 表示车辆平均长度, km。

METANET 模型中期望速度的计算公式一般为:

$$v[\rho_i(k)] = v_{f,i} \cdot \exp \left[-\frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{\rho_i(k)}{\rho_{cr,i}} \right)^{\alpha_i} \right] \quad (6)$$

式中, $v_{f,i}$ —— 自由流速度, km/h; $\rho_{cr,i}$ —— 关键密度, veh/km/lane; α_i —— 模型参数, 需预先设定。

5.1.2. 目标函数

选取的目标函数是使控制周期内总行程时间(Total Travel Time, TTT)最小[6], 建立目标函数如下:

$$J = \min TTT = \min T \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^M \lambda_i L_i \rho_i(k+j) \quad (7)$$

式中, J 为行程时间目标函数; M 为路段数; N_p 为计算步长。

5.1.3. 约束条件

根据交通流理论的基本原则和城市快速路的实际交通运行状况, 考虑以下约束条件: 主线上游流量小于实际的瓶颈通行能力; 速度的最大最小值限制; 出于安全考虑, 限速值在同一时刻的相邻区间和同一区间的相邻时刻变化均应小于 10 km/h。约束条件如下式所示。

$$\lambda \rho_{i-1}(k) v_{i-1}(k) \leq q_i^{cap} \quad (8)$$

$$v_{\min} \leq v_i(k) \leq v_{\max} \quad (9)$$

$$|v_{i-1}(k) - v_i(k)| \leq 10 \quad (10)$$

$$|v_i(k+1) - v_i(k)| \leq 10 \quad (11)$$

5.2. 车联网环境下快速路匝道协同控制过程

系统的控制流程为:

- 1) 主线和入口匝道 RSU 获取快速路合流区交通状态, 车载设备实时记录车辆的位置及运动信息, 当进入通信区域时, 与路侧设备进行实时信息交互;
- 2) 对于无法检测获取的交通数据, 通过 METANET 模型预测车流速度及占有率;
- 3) 控制中心将所需的交通数据进行标准化处理后, 根据目标函数及约束条件求解得出最优的匝道汇入率和速度引导值;
- 4) 控制中心将计算得到的匝道汇入策略发送给入口匝道控制节点, 控制节点将指令发送至匝道处信号灯, 通过调整绿时长度, 使匝道汇入量达到要求;
- 5) 控制中心将计算得到的速度引导值发送到入口匝道控制节点, 控制节点将可变限速指令发送至可变情报板, 引导车辆按指定速度行驶;
- 6) 当匝道车辆排队超过阈值时, 启用匝道与可变限速联合控制。

6. 仿真分析

为了验证所提出协同控制策略的有效性, 选用 VISSIM 仿真软件模拟交通流的运行状况。本文的仿真路网来自加拿大阿尔伯塔省埃德蒙顿市的一条市内快速路, 该路段全长约 5 km, 包括两个入口匝道和一个出口匝道, 根据 METANET 模型对路段划分要求, 将研究路线划分为 5 个基本路段, 每个路段长约 1 km, 其简化示意图如下图 4 所示。仿真时长为 2 h, 数据采集时间间隔为 20 s。

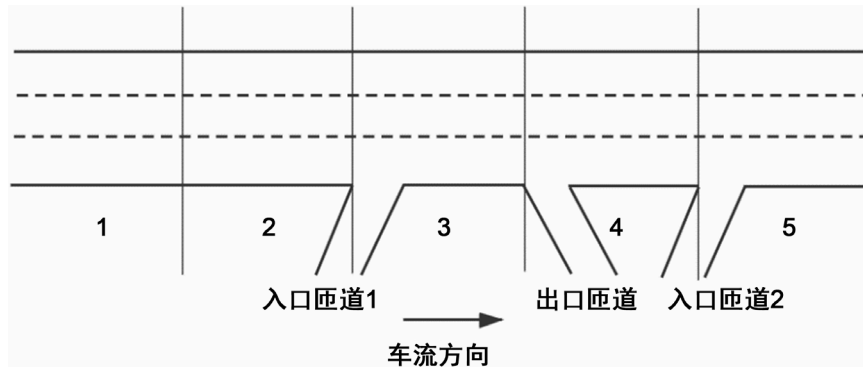


Figure 4. Simplified route diagram

图 4. 路线简化示意图

6.1. 模型参数标定

6.1.1. 模型参数选取

为更准确地对本文提出的协同控制策略进行评价, 需对模型中的相关参数进行标定。参数选取如下表 1 所示。

Table 1. Parameters of METANET model

表 1. METANET 模型参数

系统参数	取值
$\tau (s)$	80
γ	8.5
$\sigma (\text{km}^2/\text{h})$	40
K_R	70
O_{cr}	0.28
α	0.05
$v_{free} (\text{km/h})$	100
$\rho_{cr} (\text{veh/km/lane})$	16

6.1.2. 模型验证

选取速度和密度作为评价指标, 将标定的参数值代入 METANET 模型, 通过数值模拟得到研究路段的仿真结果, 并和实际值比较, 分析 METANET 模型的交通流预测效果。通过对实测数据的分析, 研究范围内路段 3 为交通流拥堵常发区域, 因此以路段 3 为例, 其预测结果如下图 5 所示。

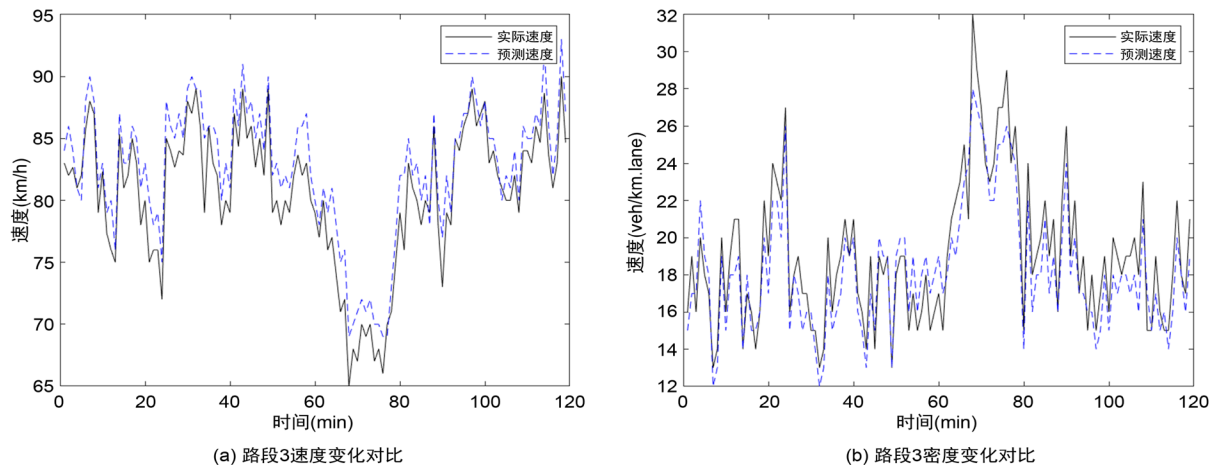


Figure 5. Verification results of prediction of METANET model
图 5. METANET 模型预测验证结果

可以看出, METANET 模型预测值与实际值较为接近, 虽然预测速度值总体上大于实际值, 但是平均误差均小于 15%, 可较好地模拟整个路段车流的速度变化情况。基于以上分析, 可认为 METANET 模型能够较好地模拟交通流的运行状况。

6.2. 仿真结果分析

对路段 3 的瓶颈位置实施可变限速控制, 同时对入口匝道 1 实行匝道控制, 对其控制前后的交通状态变化情况进行分析, 图 6 显示了路段 3 在无控制和协同控制情况下的路段速度、密度变化情况的比较结果。图 7 为可变限速值。

在无控制时, 仿真 60 分钟后的一段时间内产生了明显的交通堵塞状况, 路段密度居高不下, 这是由于主线和匝道车流的持续增加超出了路段的承受能力。而当实施了主线和匝道协同控制后, 可以明显看出路段的交通流状况有了明显改善, 基本不会出现拥堵, 虽然车流的运行速度仍有一定下降, 但相较于无控制情况已得到了明显改善。从路段的密度变化对比图可以看出, 当出现交通拥堵, 无控制时路段的瓶颈密度在极短时间内便达到了峰值, 而控制后则消除了瓶颈, 使密度维持在关键密度附近, 降低路段交通流的波动和不稳定性。

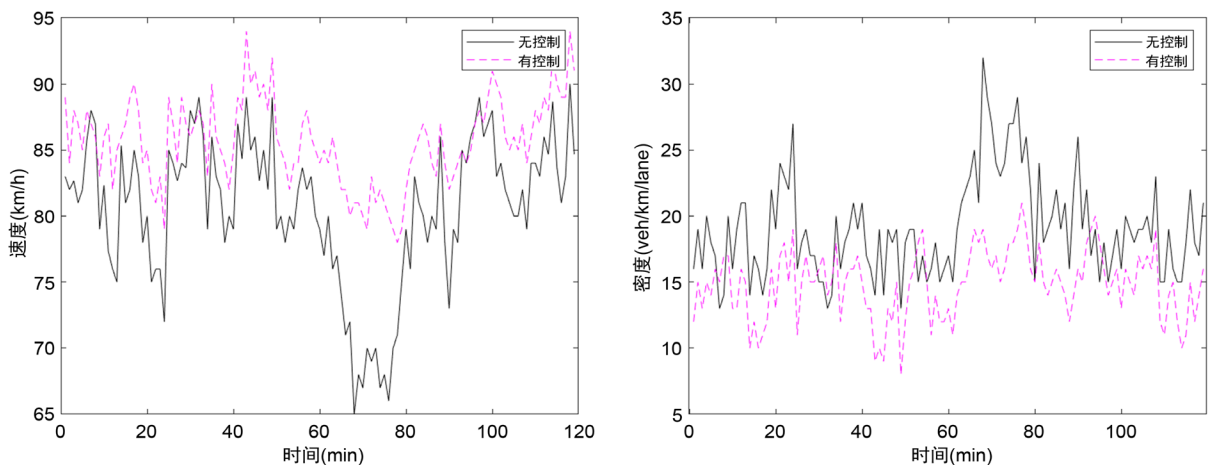


Figure 6. Comparison of speed and density changes of Section 3 before and after collaborative control
图 6. 协同控制前后路段 3 速度、密度变化对比

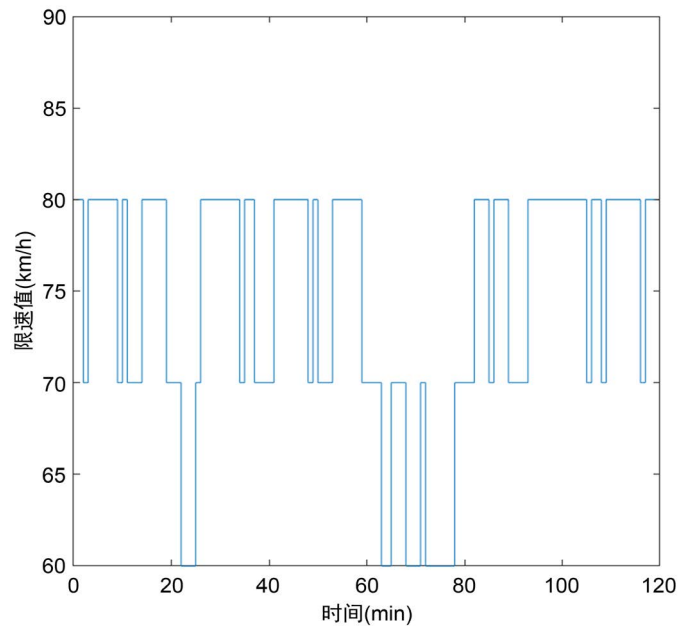


Figure 7. Variable speed limit value

图 7. 可变限速值

通过以上分析可知, 本文提出的车联网环境下基于交通流预测的匝道控制与速度引导协同控制策略可有效改善快速路的运行状况, 缓解交通拥堵, 提高主线通行能力。

7. 结语

相较于传统驾驶环境, 车联网技术为驾驶车辆提供了更加全面的交通信息, 让路面行驶的汽车、交通信息、交通环境等实现信息交互。本文探究了车联网环境下匝道控制系统的基本架构, 明确了匝道入口段收集、传输信息所需的技术与设备, 并提出车联网环境下的匝道控制系统整体设计, 从微观角度设计了快速路入口匝道段汇入控制, 为后续研究奠定基础。

基金项目

江苏省高校哲学社会科学项目(2018SJA1348); 江苏省建设系统项目(2017ZD047、2018ZD258); 苏州市社科基金(Y2020LX017、Y2020LX025); 苏州市科协软科学项目“苏州促进区域支撑协同支撑长三角一体化高质量发展研究”; 江苏省自然科学基金面上项目(BK20151201、BK20160357)支持。

参考文献

- [1] 李毅. 城市快速路匝道控制理论及优化算法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013,.
- [2] 任开明, 等. 车联网通信技术发展现状及趋势研究[J]. 通信技术, 2015, 48(5): 507-513.
- [3] 杜立辉. 城市快速路匝道优化控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.
- [4] 朱文铜. 城市高架路出口匝道设置及与相邻交叉口协调控制研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [5] 胡永利, 孙艳丰, 尹宝才. 物联网信息感知与交互技术[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1147-1163.
- [6] Lu, X.Y., et al. (2010) A New Approach for Combined Freeway Variable Speed Limits and Coordinated Ramp Metering. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Funchal, 19-22 September 2010, 491-498. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625107>