

1-8-2019

Inputting Strategy Simulation of Multi-ramp Coordinated Control Signal for Urban Expressway

Mingbao Pang

School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

Zemin Xia

School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

Yanhai Luan

School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Inputting Strategy Simulation of Multi-ramp Coordinated Control Signal for Urban Expressway

Abstract

Abstract: Based on the analysis of the driver's reaction when the urban expressway is in traffic jamming state and stated preference survey (SP) investigating, the key parameters' variation trends when the driving behavior adjusts and the possible path changing probability for a driver in each state are determined. A cellular automaton model of coordinated control section on urban expressway is established, where the driving behaviors are described accurately. The characteristics of traffic flow is discussed via the simulation experiments after inputting coordination control signals with different on-ramp numbers upstream of jamming point. The effects of each coordinated control modes on road flux are analyzed contrastively under different traffic demands respectively. The optimal strategies of inputting coordinated control signal are given. The results of the examples indicate that as a basic management tool of urban expressway for the multi-ramp coordinated control, the impact of congestion can be reduced at the utmost and the goal of enhancing road flux can be realized only by adopting the appropriate control strategies of inputting signal according to different traffic demands and states.

Keywords

traffic simulation, cellular automaton model (CAM), urban expressway, multi-ramp coordinated control, traffic jamming

Recommended Citation

Pang Mingbao, Xia Zemin, Luan Yanhai. Inputting Strategy Simulation of Multi-ramp Coordinated Control Signal for Urban Expressway[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3050-3057.

城市快速路多匝道协调控制信号施加策略仿真

庞明宝, 夏泽民, 栾燕海

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 在司机对城市快速路出现交通拥堵反应分析和SP调查基础上, 确定各交通状态下驾驶行为调整时关键参数变化趋势和路径改变概率; 建立能精确描述驾驶行为城市快速路协调控制的元胞自动机模型, 对拥堵点上游不同入口匝道数量协调控制信号施加后的交通流特性进行仿真, 对比分析不同需求下各协调控制信号方式对道路流量的影响, 得到最佳协调控制信号施加策略。结果表明多匝道协调控制作为城市快速路管理的基本手段, 只有针对不同需求和状态采取合适的控制信号施加策略, 才能最大限度降低交通拥堵影响, 从而实现提高道路流量的目的。

关键词: 交通仿真; 元胞自动机模型; 城市快速路; 多匝道协调控制; 交通拥堵

中图分类号: TP273.5; U491.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3050-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808028

Inputting Strategy Simulation of Multi-ramp Coordinated Control Signal for Urban Expressway

Pang Mingbao, Xia Zemin, Luan Yanhai

(School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Based on the analysis of the driver's reaction when the urban expressway is in traffic jamming state and stated preference survey (SP) investigating, the key parameters' variation trends when the driving behavior adjusts and the possible path changing probability for a driver in each state are determined. A cellular automaton model of coordinated control section on urban expressway is established, where the driving behaviors are described accurately. The characteristics of traffic flow is discussed via the simulation experiments after inputting coordination control signals with different on-ramp numbers upstream of jamming point. The effects of each coordinated control modes on road flux are analyzed contrastively under different traffic demands respectively. The optimal strategies of inputting coordinated control signal are given. The results of the examples indicate that as a basic management tool of urban expressway for the multi-ramp coordinated control, the impact of congestion can be reduced at the utmost and the goal of enhancing road flux can be realized only by adopting the appropriate control strategies of inputting signal according to different traffic demands and states.

Keywords: traffic simulation; cellular automaton model (CAM); urban expressway; multi-ramp coordinated control; traffic jamming

引言

协调控制作为城市快速路交通管理的基本手



收稿日期: 2016-10-21

修回日期: 2017-01-07;

基金项目: 国家自然科学基金(50478088), 河北省自然科学基金(E2015202266);

作者简介: 庞明宝(1966-), 男, 河南西峡, 博士, 教授, 研究方向为智能交通系统、交通系统工程。

段^[1-2], 由控制信号施加条件、协调控制信号施加策略和协调控制算法三部分组成^[3-4], 其中在多大范围内施加协调控制信号(本研究定义为协调控制信号施加策略)是其重要步骤。这是因为城市快速路的相对封闭性使拥堵传播的速度非常快, 上游受影响路段车辆可供选择的又非常有限, 影响范围会更广^[4], 特别是上下班等交通需求较高时

<http://www.china-simulation.com>

• 3050 •

段。若对拥堵不予理睬或缩小控制范围,车辆不能迅速通过,可能造成长时间大范围的拥堵;而若过分扩大管控范围,使很多车辆转移到城市一般道路上,造成这些本来已经拥挤的城市一般道路更加拥堵,也不是交通管理的目的。而在一般连续交通流道路协调控制理论研究方面^[1-2, 5-6],包括多匝道间、匝道与主线间、城市快速路与一般道路间的协调控制。这些研究的核心是控制器算法,包括一体化匝道协调控制、启发式协调控制和大系统分解协调的模型及算法等,具体控制信号施加以“密度(或其它占用率)大于临界密度 ρ_c 的负邻域-期望密度 ρ_d ”作为条件^[2-3, 5-6],均不涉及控制信号施加策略问题;少量高速公路协调控制信号施加策略研究仅限于单一主线和单一匝道间^[3],尚未面向城市快速路多匝道间。

元胞自动机模型(cellular automaton model, CAM)由于概念简单、规则易于修改和计算效率高等特点近年来成为研究交通问题的重要仿真工具^[7-11],而如何针对具体交通问题,分析驾驶员在不同状态下的心理及操作行为变化,进一步细化、扩展车辆行驶规则,建立更加精确的映射车辆等在具体交通行为过程中非线性行为特点的CAM,成为研究复杂交通问题的新方向。基于此,并考虑到已有CAM研究尚不涉及城市快速路多匝道协调控制仿真^[7-11],本研究将城市快速路作为研究对象,在司机心理行为调查基础上,确定各状态下驾驶行为调整关键参数变化趋势和路径改变概率,建立能精确描述驾驶行为的CAM,对拥堵点上游实施不同匝道控制信号策略下的交通流特性进行仿真,确定最佳施加策略,为城市快速路的交通管控提供参考。

1 行驶行为调整调查和关键参数变化

驾驶员在城市快速路行驶途中或由其它道路拟进入快速路的过程中,依据所了解的道路信息状态和自身属性信息,按照效用值最大化原则对驾驶行为进行调整,特别是交通拥堵情况下。为确定这

一规则变化,建立更加精确地CAM,本研究采用SP(stated preference survey)调查方法^[12-13]得到驾驶行为可能调整时关键参数变化趋势。

(1) 安全距离 d_{safe}

正常行驶下,该值较大;拥堵下车速降低,安全间距减少,在停车时,安全距离更小,宜采用动态安全距离的方式。考虑到安全车头时距2s的基本要求和本研究1m为1个元胞,定义:正常情况下 $d_{safe}=2v(i,t)$ 且 $d_{safe} \geq 2$ m;若前车速度为0, $d_{safe}=2$ m,其中 $v(i,t)$ 为车辆 i 在 t 时速度。

(2) 换道概率

①一般换道概率及换道机会。考虑到拥堵状态下车速降低,在满足换道条件下驾驶员会频繁换道,即以更大概率 $p1_change$ 换道至目标车道,因此 $p1_change$ 是一个随车速减少而递增的值。

定义:当速度大于60km/h时,该值为固定值 $p1_{min}$;当低于60km/h(拥堵)时, $p1_change=p1_{min}+(1-v(i,t)/60) \times (1-p1_{min})$ 。

②拥堵状态下密度增加,车速降低,虽然换道概率增大但满足换道条件的机会在减少。在经过匝道出入口时,驾驶员为避免与出入口车辆交织,主线最右侧车道上车辆采用不对称换道规则,即以较大概率换到左车道,为简化本文取概率为固定值 $p2$ 。

③出快速路车辆换道概率。对拟离开快速路主线车辆,在抵近出口匝道时,驾驶员会先换道至主线右侧车道;若满足换道条件,则以逐步增加的概率换道至分流车道;若拥堵至分流车道末端依然不能换道,最后强制换道。具体换道概率定义为一个单调递增函数: $P_{HDI}=x(i,t)/L_A$ 。其中 L_A 为分流车道长度, $x(i,t)$ 为车辆与分流车道开始位置间的距离。

(3) 路径调整

部分驾驶员在出行途中依据交通状态调整出行路径,包括快速路上车辆提前从出口匝道离开和拟进入快速路的车辆不再进入。而这一调整使得通过匝道进出快速路的需求发生变化,即CAM边界条件中的实际进车量改变。特别在拥堵条件下,拥

堵路段上游的实际入口流量要小于若不拥堵的交通需求，实际出口流量要大于若不拥堵的交通需求。为定量确定这一变化，本研究对 SP 调查结果进行简化处理^[12-13]。

一是路径可能调整的影响因素。快速路上车辆为驾驶员性格 x_1 、路网了解程度 x_2 (先验历史信息)、行驶速度 x_3 、出行时段 x_4 、现拥堵了解程度 x_5 (实时信息)；拟进入快速路车辆为驾驶员性格 x_1 、路网了解程度 x_2 、出行时段 x_4 、现拥堵了解程度 x_5 、匝道排队情况 x_6 。

二是各决策状态的确定。依据多属性(各影响因素或状态，统称为条件属性)决策规则，将各因素离散化处理(区间划分)，具体通过专家咨询确定，见表 1。其中司机类型按固定值属性 x_1 和 x_2 的离散化结果组合可分为 $3 \times 3 = 9$ ，即 9 种； x_5 已知拥堵是通过 VMS、交通广播等方式和已处于拥堵状态取得的。针对每类型司机，进行各种可能状态的排列组合，在快速路上状态为 x_3 、 x_4 和 x_5 的离散化结果组合可分为 $5 \times 3 \times 2 = 30$ ，即 30 种，拟进入快速路上状态为 x_4 、 x_5 和 x_6 的离散化结果组合可分为 $3 \times 2 \times 3 = 18$ ，即 18 种。

表 1 条件属性及其划分
Tab. 1 Condition features and their partitions

变量	释义
x_1	保守型、激进型、不确定
x_2	熟悉、一般、不熟悉
x_3	大于 70, 70-50, 50-30, 30-10, 小于 10
x_4	早晚高峰时段, 平峰时段, 其它
x_5	不知, 已知拥堵
x_6	正常通行、排队较长能进入、不能进入

三是各类型司机不同状态下路径调整概率。依据 SP 结果确定，其中路径调整的概率均值 $p_k = n_k/n$ ， n_k 为在第 k 种状态下调整路径的问卷份数， n 为有效问卷总数。以快速路上的保守型和对路网熟悉的司机为例，若状态“ x_3 小于 10 km/h、 x_4 早高峰时段、 x_5 已知拥堵”，在 360 份有效问卷中，选择提前离开快速路改变路径的有 108 份，则其概率为 $108/360 = 0.3$ ，同时依据调查结果，确定其概率。

在本研究实验对象是天津市快速路西青道和志成道间路段中，调查得到的路径调整概率均值 p_k 部分为：保守型司机，对路网了解一般，早晚高峰时段，若速度低于 10 km/h 且不知拥堵， p_k 为 20%；若速度低于 10 km/h 且已知拥堵， p_k 为 30%。保守型司机，对路网了解一般，早晚高峰时段，若速度 10~30 km/h 且不知拥堵， p_k 为 11%；若速度 10~30 km/h 且已知拥堵， p_k 为 15%。激进型司机，对路网了解一般，早晚高峰时段，若速度低于 10 km/h 且不知拥堵， p_k 为 26%；若速度低于 10 km/h 且已知拥堵， p_k 为 34%。激进型司机，对路网了解一般，早晚高峰时段，若速度 10~30 km/h 且不知拥堵， p_k 为 18%；若速度 10~30 km/h 且已知拥堵， p_k 为 13%。

2 研究对象及 CAM

研究对象如图 1 所示，由多匝道(含入口和出口)、立交桥及其连接它们的主线等组成的。采用 CAM 来映射其非线性交通流过程，其中模型中关键参数变化趋势和路径调整概率依据 1 节所述的调查结果。

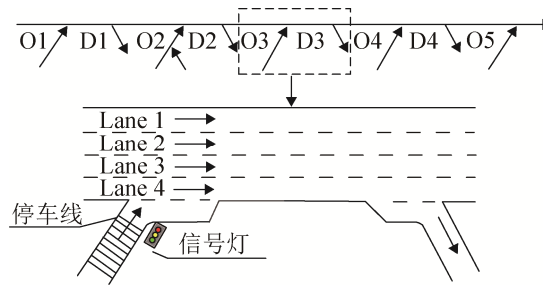


图 1 研究对象
Fig. 1 Studied object

道路中每一元胞或空或被速度 v 的车辆占据， $v=0, 1, 2, \dots, v_{max}$ 等， v_{max} 是最大速度， $v_{max-car}$ 为小汽车， $v_{max-bus}$ 为大巴。 $x(i, t)$ 与 $loc(i, t)$ 分别为车辆 i 在 t 时位置和车头位置； $carlen_1$ 、 $carlen_2$ 分别为小汽车和大车长度； $d(i, t)$ 为 t 时车辆 i 与第 $i+1$ 间空的元胞数； $v_{back}(i, t)$ 与 $v_{front}(i, t)$ 分别为车辆 i 在 t 时旁车道上后车与前车的速度； $d(i, t)_{front}$ 、 $d(i, t)_{back}$ 分别

为主线第 i 车与旁车道上前、后车间的空元胞数。

2.1 车辆一般演化规则

(1) 加速: $v(i,t+1)=\min(v(i,t)+a_1, v_{\max})$; 表明驾驶员期望以最大速度行驶, 其中 a_1 为加速度。

(2) 减速: $v(i,t+1)=\min(v(i,t), d(i,t)-d_{\text{safe}})$; 即为避免和前车碰撞依据状态属性需保持动态安全车距 d_{safe} 而采取减速措施。

(3) 以概率 p 随机慢化: $v(i,t+1)=\max(v(i,t)-a_2, 0)$; 反映其它各种不确定因素造成的车辆减速, 其中 a_2 为减速度。

(4) 运动: $x(i,t+1)=x(i,t)+v(i,t+1)$; 车辆按照调整后速度向前行驶, 进入下一步仿真。

2.2 主线车辆换道规则

(1) 换道动机: $d(i,t)<\min(v(i,t)+1, v_{\max})$; 表示车辆在本车道上不能按照期望的速度行驶; $d(i,t)_{\text{other}}>d(i,t)$ 表示旁车道上的行驶条件比本车道上的行驶条件好。

(2) 安全条件: $d(i,t)_{\text{back}}>d_{\text{safe}}$, 此条件保证车辆换道时不会与旁车道上的后车发生碰撞。

在满足换道动机与安全条件下, 驾驶员依据状态属性采用 $p1_change$ 概率换至目标车道; 同时在经过匝道出入口时, 主线右侧车道车辆为避免与出入口车辆交织, 采用不对称换道规则以较大概率 $p2$ 换到左车道。

2.3 入口匝道车辆行驶规则

(1) 一般演化规则同 2.1, 不允许换道。

(2) 对设置入口匝道信号灯的, 若为红灯则排队等待, 待绿灯后进入匝道。

(3) 车辆由缓冲车道汇入主线规则。匝道车辆抵达入匝缓冲车道后, 若同时满足 $d(i,t)_{\text{back}}>d_{\text{safe_back}} \& d(i,t)_{\text{other}}>d_{\text{safe_front}}$, 则换至主线最右侧车道。其中:

$d_{\text{safe_back}}$ 的确定规则是没有后车时, $d_{\text{safe_back}}=0$; 若 $v_{\text{back}}(i,t)\leq v(i,t)$, 主线车道后车速度小于等于汇入车辆速度时, $d_{\text{safe_back}}=d_{\text{safe}}$; 若 $v_{\text{back}}(i,t)>v(i,t)$,

主线右侧车道后车速度大于汇入车辆速度时, 则安全距离 $d_{\text{safe_back}}=1+v_{\max}-\min(v(i,t)+1, v_{\max})$ 。

$d_{\text{safe_front}}$ 的确定规则是没有前车时, $d_{\text{safe_front}}=0$; 若 $v_{\text{front}}(i,t)\leq v(i,t)$, 即主线右侧车道前车速度不大于汇入车辆速度时, $d_{\text{safe_front}}=1+\min(v(i,t)+1, v_{\max})-\min(v_{\text{front}}(i,t)+1, v_{\max})$; 否则, $d_{\text{safe_back}}=d_{\text{safe}}$ 。

(4) 车辆在抵达缓冲车道末端依然不能换道, 采用改进的 STCA 规则强制换道^[14]: 一个条件是 $v(i,t)=0 \& d(i,t)_{\text{front}}>1 \& d(i,t)_{\text{back}}>2$; 另一个条件是 $v(i,t)>0 \& d(i,t)_{\text{front}}>1 \& d(i,t)_{\text{back}}>\min(v_{\text{back}}(i,t), v_{\max})$ 。满足其一, 则换道至主线车道。

2.4 出口匝道车辆运行规则

(1) 车辆从主线进入出匝分流区规则。先换道至主线右侧车道, 若分流车道位置状态为空且满足与前、后车安全条件, 则以概率 P_{HD} 换道; 若不满足换道条件则减速行驶, 等待合适时机; 若在出匝分流区路段换道困难, 在抵达末端时采用 2.3 中的运动规则强制换道。

(2) 出匝分流区和出口匝道规则, 同 2.1 和 2.3, 同时限速和不允许换道。

2.5 立交桥车辆行驶规则

车辆由主线进出立交桥的规则同 2.3 和 2.4; 立交桥上车辆正常演化规则同 2.1 和 2.2。

2.6 边界条件

2.6.1 匝道出入口交通需求的改变

依据 x_1 和 x_2 组合的各种驾驶员类型中随时间变化的各个交通需求(OD), 即动态的各个入口匝道、出口匝道、主线、立交桥等方面的流量, 对车辆进行标定, 作为正常交通状态下出入口边界的交通需求。拥堵状态下, 驾驶员选择路径的改变使得出、入口流量改变, 对出入口流量进行重新调整计算, 具体步骤为:

(1) 对快速路上行驶中已标定的车, 依据其类型、状态和 SP 调查结论得到其路径调整概率 p_k , 产生随机数, 若 $rand()<p_k$, 则该车从最近的出口

匝道出去；否则不改变路径。

(2) 对拟进入快速路车辆，同样依据其类型、状态和 SP 调查结论得到其路径调整概率 p_k ，产生随机数，若 $rand() < p_k$ ，则该车辆不进入研究对象；否则，不改变路径依然进入快速路。

2.6.2 边界条件

采用开口边界条件。

(1) 入口边界。对快速路主线和立交桥上各车道和匝道实际交通需求，按泊松分布到达产生，其中小汽车比例为 p_1 。设每小时每进口道上游进车 $carsum_0$ ，则该车道进车概率为 $p_0 = (carsum_0 / 3600)$ 。每仿真步更新结束后，随机产生的概率 $rand_1() \geq p_0$ 时不产生车辆；否则产生一辆车，对随机产生的概率 $rand_2() < p_1$ 且入口处空元胞数满足 $l < 2 \times carlen_1 + v_{max_car} + 1$ 时，产生的车辆为小汽车；当 $rand_2() \geq p_1$ 且 $l < 2 \times carlen_2 + v_{max_bus} + 1$ 时，产生的车辆为大车。产生的车辆进入研究对象。

(2) 出口边界。若头车的车头位置 $loc(i, k) > L$ (道路总长度)，车辆驶出研究对象。

3 多匝道协调控制信号施加策略

3.1 协调控制信号施加策略

考虑到研究对象-匝道间距离较短，拥堵状态下道路交通系统依靠自身的自适应性速度已较低，限速作用有限，所以暂不考虑可变速度限制与匝道间的协调，仅研究多匝道协调控制方式，且按照拥堵位置逐步向上游匝道递增的方式确定控制信号施加策略。对距离拥堵点上游的入口匝道，按照距离由近到远编号为 1, 2, 3, ……。具体为 6 种：不施加控制信号(No-control Signal, NCS)、对入口匝道 1 施加控制信号(Ramp Metering Signal, RMS1)、对入口匝道 1 和 2 施加协调控制信号(RMS2)、对入口匝道 1、2 和 3 施加协调控制信号(RMS3)、对入口匝道 1-4 施加协调控制信号(RMS4)、对入口匝道 1-5 及以上施加协调控制信号(RMS5)。

3.2 单匝道控制器算法

单匝道控制方式即 RMS1，控制器算法采用 ALINEA 公式^[4]，具体为：

$$r_1^q(k) = r_1^q(k-1) + K_R(\rho_d - \rho_1(k-1)) \quad (1)$$

$$r_1^w(k) = -1/T_c[w_{max,1} - w_1(k)] + d_1(k-1) \quad (2)$$

$$r_1(k) = \max\{r_1^q(k), r_1^w(k)\} \quad (3)$$

其中 k 为控制时采样周期， K_R 反馈增益， $T_c = nk$ ，($n=1,2,3,\dots$)，在 T_c 内的绿灯时间 $g_1 = r_1(k)/Q_{sat}$ ，其中 Q_{sat} 匝道的最大交通流量，取 $Q_{sat} = 0.5 \text{ veh/s}$ ^[13]； w_{max} 为匝道所允许的最大排队车辆数， $w_1(k)$ 为采样周期 k 内的匝道 1 的排队车辆数； $d_1(k-1)$ 为匝道 1 在采样周期 $k-1$ 内的匝道需求，最终匝道 1 的调解率采用式(3)计算。若 $w_1(k)/w_{max} > 0.8$ 或 $g_1 < 10$ ，则在接下来 g_min 个时步长内采取绿灯放行，其中 g_min 为在一个信号周期中最小绿灯时间。

3.3 多匝道协调控制器算法

多匝道协调控制器算法采用 CORDIN 方式^[1]：若对距离事故点上游最近的 n 个匝道施加控制信号，在对上游最近的入口匝道采用 ALINEA 算法基础上，第 2 个入口匝道采用 $g_2 = a_1 g_1$ ；第 3 及以上各个入口匝道采用 $g_s = a_2 g_1 (s=3,4,5,\dots)$ ，其中 a_1 、 a_2 为 CORDIN 参数，取 $a_1 = 0.75$ ， $a_2 = 0.8$ 。

4 仿真实验分析

采用建立的 CAM 来描述天津市快速路-西青道和志成道间路段的交通流过程。该段长 7 km，5 个入口匝道、4 个出口匝道组成和一座互通式立交桥(与第二个入口匝道相连)。具体参数：主线单向四车道，相邻入口-出口间的距离 $L_1 = 1100 \text{ m}$ ，相邻出口-入口间的距离 $L_2 = 300 \text{ m}$ ，入口匝道长度 $L_r = 200 \text{ m}$ ，交织区长度 $L_{r1} = 150 \text{ m}$ ，信号灯至交织区长度 $L_{r2} = 50 \text{ m}$ ；出口匝道长度 $L_c = 100 \text{ m}$ ，加速缓冲车道长度 $L_{acc} = 160 \text{ m}$ ，减速缓冲车道长度 $L_{dec} = 90 \text{ m}$ 。

依据交管部门提供的资料和现场调查：本路段主线和匝道需求具有时间依赖性，其中早晚高峰流量较大，其他时段相对较小；主线需求 q_u 及各匝

道需求出入口(r_d 和 e_d)平均值(平均到每个车道)区间见表 2; 主线与匝道需求在同一时段同时大或同时小(不一定是线性关系), 不会出现“主线需求大, 而匝道需求小或相反”的情况。司机类型保守 46%, 激进 35%; 对路网熟悉 38%, 一般 57%; 车辆类型比例: 早晚高峰时段大为 12%, 其他时段 6%; $p1_{\min}=0.3$, $p2=0.75$; 其它随机慢化概率 p 为 0.3。

表 2 交通需求区间

时段	q_u	r_d	e_d
高峰	1 550	[800,1 350]	[700,1 450]
低峰	900	[300,700]	[270,650]

4.1 实验条件及现状仿真分析

(1) 参数设置。每元胞 1 m, 每辆小汽车占 5 个元胞, 大为 12 个元胞; v_{\max} 主线小汽车 80 km/h, 大为 70 km/h; v_{\max} 匝道 40 km/h。仿真步长为 1 s, 实验中拥堵发生位置设置在第五个路段, $T_c=40$ s, $g_{\min}=10$ s, $w_{\max}=25$ veh。为排除非稳态影响, 所有试验均将前 2 000 个时间步舍去, 即 2 000 个时间步后的试验。

(2) 模型初步校验。图 2 为路段的实际统计数据 and 仿真数据的基本图比较, 可以看出二者基本吻合, 初步验证了本仿真模型的有效性; 同时对本模型的其它参数进行校验。校核后部分参数: 小汽车加速度 $a_{1_car}=3$ m/s², 减速度 $a_{2_car}=3$ m/s², 大为加速度 $a_{1_bus}=2$ m/s², 减速度 $a_{2_bus}=2$ m/s²。

(3) 控制器参数选择。反馈增益 K_R 通过实验确定为 0.2; 控制时采样周期 $k=40$ s; 依据流量-密度基本图得到临界密度 $\rho_c=42$ veh/(km·lane), 其负邻域-期望密度 ρ_d 取 40 veh/(km·lane)。

4.2 主线需求较小各协调信号施加方式分析

图 3 是主线需求较小($q_u=900$ veh/(h·lane))匝道需求在较小值范围内变动时, 各控制信号施加策略下道路流量的比较, 其中主线和匝道需要平均到每车道。

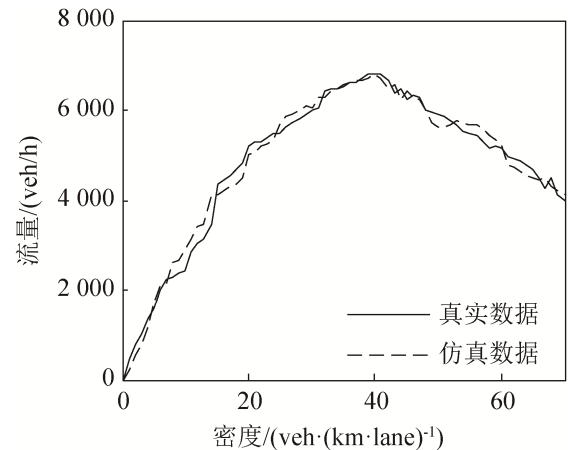
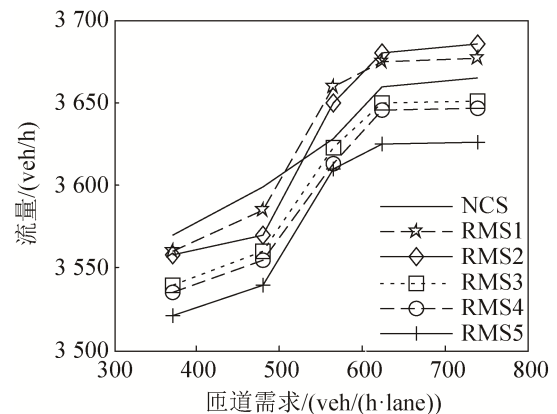


图 2 实际和仿真基本图比较

Fig. 2 Comparison of the basic diagrams between the actual statistics and the simulated result

(1) 当匝道需求 $r_d \leq 500$ veh/(h·lane)时, 不施加任何控制信号道路流量最大; 若采用其它控制方式, 道路流量反而下降; 匝道控制信号施加范围越大, 流量下降越多。这是因为主线和匝道需求在较小范围时, 即使出现局部拥堵但其对道路影响也有限, 道路交通可利用自身的自组织性, 迅速恢复到自由流状态, 拥堵点也快速消散; 而若施加匝道控制信号, 使实际的交通需求变小, 快速路不能发挥其速度快、通行能力大的优势, 反而起到负面作用。因此该情况下, 不应施加任何匝道控制信号。

图 3 q_u 较小施加各控制信号道路流量Fig. 3 Road traffic volumes by inputting different control signals where q_u is relatively small

(2) 当匝道需求 500 veh/(h·lane) $< r_d < 600$ veh/(h·lane)时, RMS1 最佳, 采用其它方式, 均不能使

道路流量达到最大。这是因在该交通需求范围依然不大,即使出现拥堵时,仅对拥堵点最上游的匝道施加控制信号即可;而若扩大控制信号施加范围,使道路实际交通需求变小,道路流量反而下降。

(3)当匝道需求 $600 \text{ veh}/(\text{h}\cdot\text{lane}) \leq r_d < 700 \text{ veh}/(\text{h}\cdot\text{lane})$ 时, RMS2 最佳。这是因在该交通需求下,匝道需求稍大,一旦出现拥堵由于不易消散,使得扩散范围较大。若不施加控制信号或仅施加 RMS1,由于信号施加范围小于拥堵的影响范围,达不到最佳控制效果;若扩大施加范围,使实际交通需求变小,道路流量下降,不能发挥城市快速路的优势。

4.3 主线需求较大各协调信号施加方式分析

图 4 是主线需求较大($q_u=1\ 550 \text{ veh}/(\text{h}\cdot\text{lane})$)匝道需求在较大值范围变动各控制信号施加策略道路流量比较。

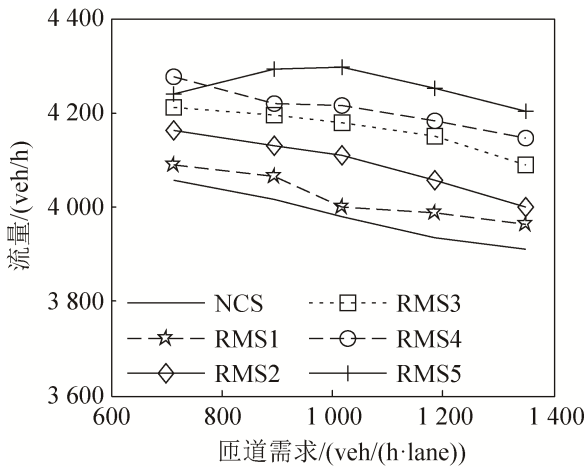


图 4 q_u 较大施加各控制信号道路流量
Fig. 4 Road traffic volumes by inputting different control signals where q_u is relatively large

(1) 当 $r_d < 790 \text{ veh}/(\text{h}\cdot\text{lane})$ 时 RMS4 最佳,道路流量最大。这是因为在该交通需求范围,主线需求大,匝道需求中等,此时若不施加控制信号或仅施加 RMS1 或 RMS2 或 RMS3 信号,由于信号施加范围小于拥堵的影响范围,达不到最佳控制效果;若扩大控制信号施加范围至 RMS5,实际交通需求变小,道路流量下降,也不能发挥城市快速路的优

势;而若施加 RMS4 控制信号,效果最佳。

(2) 当 $r_d \geq 790 \text{ veh}/(\text{h}\cdot\text{lane})$ 后,主线和匝道需求均非常大,若出现拥堵,拥堵扩散不断向上游路段延伸,只有施加 RMS5 控制信号,才能达到减少实际需求、提高道路流量的目的,此时施加 RMS5 效果最佳。

4.4 协调控制信号施加策略

图 5 为以 (q_u, r_d) 为相空间最佳控制信号施加策略的仿真实验结果图。

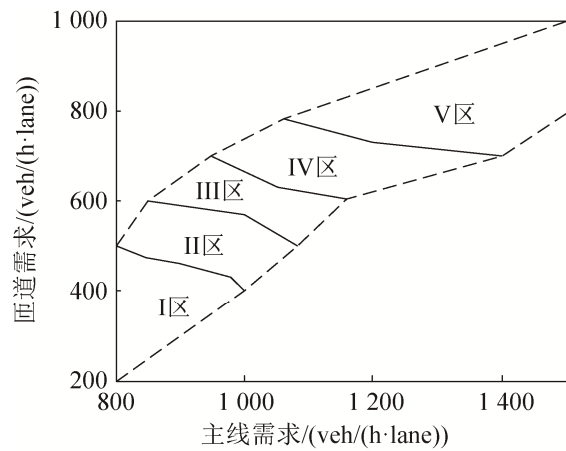


图 5 最佳控制信号施加策略
Fig. 5 Optimal strategy of inputting control signal

(1) 在 I 区中, q_u 与 r_d 均较小,不需要施加匝道控制信号,即依靠系统的自适应能力就可消除可能的拥堵现象;若施加-实施它组织,反而使道路实际交通需求变小,造成流量降低,起到负面作用。

(2) 在 II-V 区, q_u 与 r_d 均在一定的范围,可能的拥堵对道路交通造成了严重的影响,须通过适当的它组织,即在不同的需求下,施加不同范围的匝道协调控制信号:在 II 区时,仅对上游最近匝道施加控制信号(RMS1);在 III 区, RMS2 最佳;在 IV 区, RMS4 最佳。若信号施加范围过大,会使快速路的实际交通需求变小,大量车辆转移到一般城市道路,造成其它道路的拥堵,不能发挥城市快速路的优势;若信号施加范围过小,虽在一定程度上缓解了,但作用有限,不能使道路流量达到最大。

(3) V 区 q_u 与 r_d 均非常大,交通拥堵迅速扩散

影响范围非常大, 在该状态下, 需施加尽可能多范围的匝道协调控制信号即 **RMS5**, 才能大幅度减少进入主线车流量, 减缓对主线交通流的影响, 提高整个交通系统的流量。

5 结论

通过对司机各状态下心理和行为调查, 确定各状态下驾驶行为调整时关键参数变化趋势和路径改变概率, 建立城市快速路协调控制 **CAM**, 对拥堵点上游实施不同范围匝道控制信号下的交通流特性进行仿真, 得到不同需求条件下的最佳信号控制策略。本研究仅是初步研究, 尚需将影响范围扩展到整个交通网络, 增加匝道出口控制等, 为具体工程应用创造条件。

参考文献:

- [1] Bhouri N, Haj-Salem H, Kauppila J, et al. Coordinated Ramp Metering: Field Evaluation Results of Travel Time Reliability and Traffic Impact [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2013, 28(3): 155-167.
- [2] Papamichail I, Kotsialos A, Margonis I, et al. Coordinated Ramp Metering for Freeway Networks: A Model Predictive Hierarchical Control Approach [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2010, 18(3): 311-331.
- [3] 庞明宝, 杨敏, 张莎莎. 高速公路协调控制信号施加策略[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(1): 131-138.
PANG Ming-bao, YANG Min, ZHANG Sha-sha. Strategies of Inputting Coordinated Control Signal for Freeway [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(1):131-138.
- [4] Wang Y, Kan Y, Papageorgiou M, et al. Local Ramp Metering with Distant Downstream Bottlenecks: A Comparative Study [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2016, 62: 149-170.
- [5] Carlson R C, Papamichail I, Papageorgiou M. Integrated Feedback Ramp Metering and Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2014, 46: 209-221.
- [6] Wu Y, Yu D, Yu W, et al. Double-Layer Ramp-Metering Model for Incident Congestion on Expressway [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (S2095-7064)*, 2014, 1(2): 129-137.
- [7] Cécile Appert-Rolland, Jérémie Du Boisberranger. Macroscopic Relaxation after On-ramps in Real Data and in Cellular Automata Simulations [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2013, 34(9): 162-175.
- [8] Jun-fang Tian, Ning Jia, Ning Zhu, et al. Brake Light Cellular Automaton Model with Advanced Randomization for Traffic Breakdown [J]. *Transportation Research Part C (S0968-090X)*, 2014, 44(4): 282-298.
- [9] 庞明宝, 陈静, 杨敏. 基于CA模型的中小学放学门口道路交通仿真[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(5): 927-934.
Pang Mingbao, Chen Jing, Yang Min. Traffic Simulation of Elementary and Middle School's Gate Road During Student Departing School Based on CA Model [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(5): 927-934.
- [10] 邝先验, 曹韦华, 吴赞. 考虑混入逆行车辆的非机动车流元胞自动机模型[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(2): 268-274.
Kuang Xianyan, Cao Weihua, Wu Yun. Cellular Automata Model of Non-motor Vehicle Flow Considering Reverse Vehicles [J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(2): 268-274.
- [11] Ming-Bao Pang, Lan-Hang Ye, Ya-Nan Pei. Influence of Bus Stop with Left-turn Lines Between Two Adjacent Signalized Intersections [J]. *Chinese Physics B (S1674-1056)*, 2016, 25(8): 088901-1-11.
- [12] Ma Z, Shao C, Song Y, et al. Driver Response to Information Provided by Variable Message Signs in Beijing [J]. *Transportation Research Part F (S1369-8478)*, 2014, 26:199-209.
- [13] 马飞, 吴群琪, 王炼. 多源诱导信息对驾驶员路径变更行为的影响研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(5): 61-66.
MA Fei, WU Qun-qi, WANG Lian. Impact of Multi-source Guidance Information on Path Change of Drivers [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2014, 14(5): 61-66.
- [14] 赵康嘉, 陈淑燕. 基于元胞自动机的交通事件交通流仿真模型[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(3): 133-138.
ZHAO Kang-jia, CHEN Shu-yan. Cellular Automaton Based Traffic Flow Simulation Model for Traffic Incidents [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(3): 133-138.