

文章编号:1671-1637(2019)06-0182-09

## 考虑交通事件影响的动态交通信号控制策略

俞 灏<sup>1,2,3</sup>, 刘 攀<sup>1</sup>, 柏 璐<sup>1,2</sup>, 路小波<sup>2</sup>

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096;

3. 夏威夷大学马诺阿分校 土木与环境工程系, 夏威夷 檀香山 96822)

**摘要:**采用数值仿真方法评价了固定式信号控制、延误最小自适应信号控制与通行能力最大自适应控制3种典型信号控制策略下的路网动态运行效率;采用双排队模型构建了动态交通流仿真平台,提出了交叉口流量传输优化模型,分析了双排队模型中交叉口内交通流运行的状态;假定用户依据瞬时用户最优原则选择路径,提出了考虑信号控制惩罚时间的瞬时用户最优约束;以系统总行程时间、有无交通事件影响的行程时间为评价指标,研究了低、中、高3级不同交通需求下的信号控制效果。试验结果表明:在低、中级交通需求下延误最小自适应控制策略的系统总行程时间最小,比通行能力最大自适应控制在无交通事件影响下总行程时间分别降低0.45%和0.18%,在有交通事件影响下总行程时间分别降低5.95%和2.52%;在高级交通需求下,通行能力最大自适应控制总行程时间最小,对比延误最小自适应控制,在有、无交通事件影响下系统总行程时间分别降低5.46%、5.31%;对比有无交通事件影响下系统总行程时间变化幅度,固定式信号控制在不同交通需求下均表现出最高的稳定性;在低、中级交通需求下,延误最小自适应控制策略较通行能力最大自适应信号控制策略更稳定,在高级交通需求下,两者的稳定性无显著差异。可见,当交通需求较大时,应提升交叉口通行能力,当交通需求较小时,应降低车辆延误。

**关键词:**交通控制;双排队模型;交通事件;交通仿真;效果评价

**中图分类号:**U491.51 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.017

## Dynamic traffic signal control strategies considering traffic incidents

YU Hao<sup>1,2,3</sup>, LIU Pan<sup>1</sup>, BAI Lu<sup>1,2</sup>, LU Xiao-bo<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Hawaii at Manoa, Honolulu 96822, Hawaii, USA)

**Abstract:** The numerical simulation approach was applied to evaluate the dynamic operation efficiency of road network under 3 typical traffic signal control strategies, including the fixed traffic signal control (FSC), the adaptive signal control minimizing vehicle delay (ASC-VD), and the adaptive signal control maximizing intersection capacity (ASC-IC). The dynamic traffic simulation platform was constructed by the double queue (DQ) model. An intersection traffic flow transfer optimization model was proposed, and the running state of traffic flow at the intersection in the DQ model was analysed. It was assumed that the users selected their routes according to the instantaneous user optimal (IUO) principle, and the IUO constraint was proposed considering the penalty term caused by the traffic signal control. The system total travel

收稿日期:2019-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(61803083)

作者简介:俞 灏(1988-),男,江苏扬州人,东南大学博士后,从事智能交通系统研究。

通讯作者:刘 攀(1979-),男,江苏扬州人,东南大学教授,工学博士。

time and the travel time affected by traffic incidents or not were taken as evaluation indexes, the signal control effects under low, medium and high levels of traffic demands were studied. Analysis result shows that under the low and medium levels of traffic demand conditions, the system total travel time of ASC-VD is the lowest. Compared to the ASC-IC, the ASC-VD reduces the system total travel times by 0.45% and 0.18% without the influence of traffic incidents, respectively, and by 5.95% and 2.52% with the influence of traffic incidents, respectively. Under the high levels of traffic demand condition, the system total travel time of ASC-IC is the lowest. Compared to the ASC-IC, the ASC-VD reduces the system total travel time by 5.31% without the influence of traffic incidents, and by 5.46% with the influence of traffic incidents. Compared with the change range of system total travel time with or without the influence of traffic incidents, the FSC shows the highest stability under different traffic demands. Under the low and medium levels of traffic demand conditions, the ASC-VD performs more stable than the ASC-IC, while under the high level of traffic demand condition, the stabilities of the two strategies have no significant difference. Therefore, when the traffic demand is high, the intersection capacity should be improved, and when the traffic demand is low, the vehicle delay should be reduced. 4 tabs, 3 figs, 30 refs.

**Key words:** traffic control; double queue model; traffic incident; traffic simulation; performance evaluation

**Author resumes:** YU Hao(1988-), male, postdoctor, seu\_darwin@126.com; LIU Pan(1979-), male, professor, PhD, liupan@seu.edu.cn.

## 0 引言

交叉口信号控制是决定城市路网安全高效运行的关键因素。城市交通运行容易受到各种交通事件干扰,产生额外延误。研究表明,城市中超过50%的交通拥堵是由突发交通事件导致的<sup>[1]</sup>。在城市交通运行过程中,交通信号控制效果往往与个体驾驶人出行行为等因素密切相关,因此,在对交通信号控制策略进行评估的时候需要综合考虑路网交通需求、驾驶人选择行为以及网络交通流的动态特性,特别是当路网中出现随机产生的交通事件时,这种关联性就尤为显著<sup>[2-5]</sup>。

近年来,国内外学者在动态交通控制及其运行效果评价方面进行了大量研究,并取得较多的研究成果。在信号控制策略方面,Yao等基于经典罗伯逊模型提出了异构车队扩散模型,能够高效匹配实时信号控制下的车队运行特征<sup>[6]</sup>;Ding等利用高精度交通流数据分析了驾驶人在信号控制交叉口的行为特性,并提出能够描述复杂交通环境下个体驾驶人行为的梯度提升决策模型<sup>[7]</sup>;Yu等建立了连续交通流环境下考虑动态用户均衡的实时信号控制优化模型<sup>[8]</sup>;Chen等基于动态规划算法针对实时车道到达预测以及配时优化2个方面,提出了改进的自适应

信号控制<sup>[9]</sup>。在运行效果评价方面,Hunter等通过基于浮动车技术的事前事后对比研究,分析了悉尼自适应协调交通系统(Sydney Coordinated Adaptive Traffic System, SCATS)信号控制策略与分时段优化策略在工作日与非工作日、高峰时段与非高峰时段的运行效果<sup>[10]</sup>;Yu等基于PARAMICS微观仿真平台对动态路径优化与信号控制协同模型的运行效果进行评价<sup>[5]</sup>;Hu等实地采集行程时间,综合运用 $t$ 检验、Pearson相关性分析等多种统计手段,分析了当地信号控制策略运行效果<sup>[11]</sup>。

到目前为止,有关交通信号控制的相关研究在信号控制策略以及运行效果评价方面取得了较多成果,但是针对交通事件条件下的信号控制效果评价的研究十分匮乏<sup>[12-14]</sup>。交通事件条件下的信号控制效果评价研究主要有三方面难点:首先,突发交通事件引起车辆排队,时常导致上游路段驶出流量受限,然而现有动态交通网络加载模型很少能够准确描述排队溢出现象<sup>[15]</sup>;其次,信号控制条件下驾驶人通过路段的时间不仅与实时交通流状况有关,还受到当前路段信号控制状态的影响,合理构建信号控制条件下用户路径选择行为,准确估计路段行程时间对路网运行效率有显著影响;最后,在驾驶人选择行为与信号控制策略综合作用下,路网运行效果具有

随机性,难以从理论角度进行分析。

本文选取 3 种典型交通信号控制策略进行分析,包括固定式信号控制(Fixed Signal Control, FSC),延误最小自适应信号控制(Adaptive Signal Control Minimizing Vehicle Delay, ASC-VD)<sup>[16-20]</sup>,通行能力最大自适应信号控制(Adaptive Signal Control Maximizing Intersection Capacity, ASC-IC)<sup>[21-24]</sup>。构建基于双排队模型(Double Queue, DQ)<sup>[8,25-26]</sup>的动态流量加载仿真平台,用户在进行路径选择时遵从瞬时用户最优原则<sup>[27]</sup>,即最优路径由瞬时路段行程时间与由信号控制产生的惩罚时间共同决定,同时通过降低预定路段通行能力模拟路网中突发事件影响。本文首次将双排队模型应用于动态交通信号控制效果评价;通过统计分析克服在仿真评价中由用户选择行为产生的随机误差;研究同时包含正常情况及突发事件下动态交通信号控制效果的评价。通过测试不同信号控制策略在正常情况及突发事件下的系统运行状态,分析了不同交通状态下运行效率差异的成因,研究成果对现有信号控制策略进行优化,依托现有控制策略提升交通运行效率,并对交通事件影响下交叉口信号控制策略的选取与优化提供支撑。

## 1 交通信号控制策略

### 1.1 固定式信号控制

固定式信号控制在工程实践中得到广泛应用。在固定式信号控制中,管理者使用历史数据设置信号配时参数,包括周期时长与绿信比信息。众所周知,固定式信号控制难以应对实时变化的交通量,无法为动态交通环境提供适宜的配时。本文预设各交叉口信号周期为 2 min,根据各进口道平均驶出流率计算绿信比。根据静态最短路径将交通需求分配到路网上,得到各路段驶出流率估计值,再根据该估计值计算路段饱和度,按比例分配绿灯时长。

### 1.2 延误最小自适应信号控制

自适应信号控制系统根据不同优化目标对绿信比进行动态调节。诸多优化目标中,优化车辆行驶延误受到广泛重视<sup>[17-20]</sup>。通过实时监测数据计算实时车辆延误,研究者通过重新分配绿信比或动态切换相位实现延误降低。本文研究采用基于点排队模型延误计算方法<sup>[21]</sup>,路段  $a$  周期  $c$  的平均车辆排队延误  $d_{a,c}$  为

$$d_{a,c} = \frac{Q_{a,c}}{S_a g_{a,c}} \quad (1)$$

式中: $Q_{a,c}$ 为路段  $a$  周期  $c$  的平均排队长度; $S_a$ 为路段  $a$  的饱和流率; $g_{a,c}$ 为路段  $a$  周期  $c$  所占绿信比之和。

式(1)中延误当视作一种稳定状态模型,是对实际车辆延误的简化估计,在动态网络流研究领域较为常见。相位内同时放行的多个进口道排队延误之和即为该相位的延误,当前周期结束,下一周期各相位绿灯时长由总周期时长按当前周期各相位延误占总延误比例分配。

### 1.3 通行能力最大自适应信号控制

1979 年,Smith 等提出以通行能力最大为优化目标的自适应控制<sup>[21-23]</sup>;Lammer 等将行人自适应行为理论代入信号控制领域,推导得到相同控制策略<sup>[24]</sup>。通行能力最大信号控制决策变量为相位压力,即

$$P_{i,m,c} = \sum_a \frac{\delta_{a,i,m} Q_{a,c}}{g_{a,c}} \quad a \in L_{i,1} \quad (2)$$

式中: $P_{i,m,c}$ 为信号控制交叉口  $i$  在周期  $c$  相位  $m$  的相位压力; $L_{i,1}$ 为所有驶入交叉口  $i$  的路段集合; $\delta_{a,i,m}$ 为指示变量,表征驶入交叉口  $i$  的路段  $a$  在相位  $m$  是否有通行权,1 代表有,0 代表无。

为便于与固定式信号控制以及延误最小自适应信号控制进行对比,本次研究对由 Smith 提出的通行能力最大自适应信号控制策略在实施细节上进行调整<sup>[22]</sup>,即未来周期的绿信比将由当前周期相位压力计算得到。将式(1)代入式(2)得交叉口  $i$  在第  $c+1$  个周期内相位  $m$  的相位压力为

$$P_{i,m,c+1} = \sum_a \frac{\delta_{a,i,m} Q_{a,c}}{g_{a,c}} \quad a \in L_{i,1} \quad (3)$$

依据式(3)计算相位压力,并根据各相位的相位压力占总相位压力比例更新该相位绿信比。

## 2 试验设计

本文综合考虑控制策略实施难易、仿真环境可控性以及仿真精度、计算量等方面的因素,选取 DQ 模型为动态仿真环境。一方面相比常用商业仿真软件,如 VISSIM、PARAMICS,或是典型开源仿真软件,如 Sumo、DTALite 等,基于 DQ 模型的动态仿真平台具有较高的自由度,可以高效地实现各种信号控制策略以及动态路径选择行为;另一方面对比诸如元胞传输模型或点排队模型这些常用解析模型,DQ 模型能够在保持相同仿真精度的情况下,大幅降低仿真模型参数数量与计算量,并模拟交通流基本关系,捕捉路网中排队回溯现象。研究依托 DQ 模型仿真平台,在测试路网中实施所选 3 种信

号控制策略,并根据仿真结果对信号控制策略进行效果评价。

在延误最小自适应信号控制和通行能力最大自适应信号控制中,可能出现某相位平均排队长度为0或某相位的相位压力为0的情况,此时根据控制策略,该相位绿灯时长为0。为避免绿灯时长为0的情况,做如下假设:若所有相位平均排队长度均为0,则该周期时长平均分配给各个相位;若部分相位排队为0,则设置该相位绿灯时长为最小绿灯时长,其它相位则按比例分配剩余绿灯时长。

## 2.1 双排队模型机理

双排队模型利用路段下游排队长度以及虚拟上游排队长度刻画路段内交通流动态特性,分别为<sup>[8,25]</sup>

$$q_{1,a,s,r} = \begin{cases} 0 & r < \tau_{a,1} \\ \sum_{\xi=1}^{r-\tau_{a,1}} u_{a,s,\xi} - \sum_{\xi=1}^r v_{a,s,\xi} & r \geq \tau_{a,1} \end{cases} \quad (4)$$

$$q_{2,a,s,r} = \begin{cases} \sum_{\xi=1}^r u_{a,s,\xi} & t < \tau_{a,2} \\ \sum_{\xi=1}^r u_{a,s,\xi} - \sum_{\xi=1}^{r-\tau_{a,2}} v_{a,s,\xi} & t \geq \tau_{a,2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $q_{1,a,s,r}$ 、 $q_{2,a,s,r}$ 分别为时间步 $r$ 内路段 $a$ 下游及上游目的地 $s$ 的车流排队长度; $u_{a,s,r}$ 、 $v_{a,s,r}$ 分别为时间步 $r$ 内路段 $a$ 目的地 $s$ 的驶入、驶出车辆数; $\tau_{a,1}$ 、 $\tau_{a,2}$ 分别为路段 $a$ 自由流行程时间和拥挤冲击波回溯时间; $\xi$ 为任一时间步。

对于任一信号控制交叉口 $i$ ,各驶入及驶出流量遵从如下约束。

(1) 流量驶出驶入守恒约束

$$\sum_b v_{b,s,r} = \sum_a u_{a,s,r} \quad a \in L_{i,2}, b \in L_{i,1}, s \in S \quad (6)$$

$$\sum_b v_{b,s,r} p_{a,b,s,r} = u_{a,s,r} \quad a \in L_{i,2}, b \in L_{i,1} \quad (7)$$

(2) 驶出流路段实际流量约束

$$v_{a,s,r} \leq \min\{q_{1,a,s,r}, S_a \varphi_{a,r}\} \quad a \in L_{i,1} \quad (8)$$

(3) 驶出流路段通行能力约束

$$v_{a,r} \leq S_a \varphi_{a,r} \quad a \in L_{i,1} \quad (9)$$

(4) 驶入流路段承载能力约束

$$u_{a,r} \leq \min\{S_a, Q_a - q_{1,a,r} + v_{a,r-\tau_{a,1}}\} \quad a \in L_{i,2} \quad (10)$$

$$q_{1,a,r} = \sum_s q_{1,a,s,r} \quad (11)$$

$$q_{2,a,r} = \sum_s q_{2,a,s,r} \quad (12)$$

(5) 驶入流路段通行能力约束

$$\sum_s u_{a,s,r} \leq S_a \quad a \in L_{i,2} \quad (13)$$

(6) 驶入驶出流量守恒约束

$$u_{a,r} = \sum_s u_{a,s,r} \quad a \in L_{i,2} \quad (14)$$

$$v_{b,r} = \sum_s v_{b,s,r} \quad b \in L_{i,1} \quad (15)$$

(7) 流量非负约束

$$u_{a,s,r}, v_{b,s,r} \geq 0 \quad a \in L_{i,2}, b \in L_{i,1} \quad (16)$$

式中: $L_{i2}$ 为所有驶出交叉口 $i$ 的路段集合; $S$ 为所有终点的集合; $p_{a,b,s,r}$ 为指示变量,表征时间步 $r$ 内路段 $b$ 是否在从其上游路段 $a$ 到终点 $s$ 的最短路径上,1表示在,0表示不在; $\varphi_{a,r}$ 为指示变量,表征路段 $a$ 下游交叉口在时间步 $r$ 的信号控制状态,1表示绿灯,0表示红灯; $q_{1,a,r}$ 、 $q_{2,a,r}$ 分别为时间步 $r$ 路段 $a$ 下游及上游车流排队长度; $u_{a,r}$ 、 $v_{a,r}$ 分别为时间步 $r$ 内路段 $a$ 的驶入、驶出车辆数; $Q_a$ 为路段 $a$ 的最大排队长度。

$Q_a$ 可由路段通行能力以及自由流行程时间、拥挤冲击波回溯时间计算得到,推导过程参见文献[25]。

$$Q_a = (\tau_{a,1} + \tau_{a,2}) S_a \quad (17)$$

同时,在时间步 $r$ 内,构建交叉口 $i$ 总吞吐量 $Z_{i,r}$ 优化模型,即

$$\max Z_{i,r} = \sum_a \sum_s v_{a,s,r} \quad a \in L_{i,1} \quad (18)$$

约束条件为式(6)~(16)。

通过求解交叉口总吞吐量优化模型,得到当前时间步交叉口内部流量传输信息。考虑到实际交通运行过程中,进口道车辆通行数量均为整数,上述模型还要求所有变量为整数,即由式(18)所构建最优优化模型实质上为整数规划问题。整数规划问题是典型的 NP-hard 问题,其经典求解方法是分支定界法<sup>[28]</sup>。在分支定界法中,每计算一步,都需要重新构建若干子规划问题,分别计算各子问题的最优解。为了优化求解流程、减小计算复杂度,研究采用随机生成方式寻求上述模型次优整数解:首先,利用单纯形法求解原问题,得到实数解集 $v_{a,s,r}$ ;其次,为任一非整数项 $v_{a,s,r}$ 生成一个(0,1)之间的随机小数,并与该非整数项的小数部分进行对比,若小数部分大于随机数,则该非整数项向上取整,并判断是否违背约束式(8)~(12),若不符合现有约束,则原非整数型向下取整,若小于随机数,则该非整数项向下取整。此方法模拟真实驾驶人在绿灯结束时交叉口进口道犹豫区内选择过程。类似方法在其他研究中也应用<sup>[29-30]</sup>,有效提升了原整数规划求解效率,且所得可行解逼近全局最优解。



## 2.2 考虑信号控制惩罚时间的瞬时用户最优路径

瞬时用户最优约束下,最短路径由瞬时路段行程时间与信号控制导致的惩罚时间共同决定,即路段  $a$  下游出口处目的地  $s$  的行程时间  $\varphi_{a,s,r}$  为

$$\varphi_{a,s,r} = \min_b (\varphi_{a,b,r} + \tau_{b,r} + \varphi_{b,s,r+\tau_{b,r}+\varphi_{a,b,r}}) \quad b \in L_{i,2} \quad (19)$$

$$\tau_{b,r} = \tau_{b,1} + \frac{\sum_s q_{2,b,s,r}}{S_b g_{b,c}} \quad (20)$$

式中:  $\varphi_{a,b,r}$  为从路段  $a$  到路段  $b$  在时间步  $r$  的信号控制惩罚时间;  $\tau_{b,r}$  为时间步  $r$  路段  $b$  的行程时间估计值。

使用 Floyd 算法求解路网所有点对间最短路径,并将输出结果保存在指示变量  $p_{a,b,s,r}$  中。在时间步  $r$  内驶出路段  $a$  的流量将通过变量  $p_{a,b,s,r}$  确定该流量的行驶路径。

信号控制惩罚时间  $\varphi_{a,b,r}$  为当前时间步与相邻绿灯时间步的最小时间差。表 1 为示意案例,其中示例交叉口为两相位信号控制,周期时长为 5 时间步,相位 1 为 2 时间步,相位 2 为 3 时间步。路段  $a$ 、 $b$  为驶入路段,路段  $a$  在相位 1 获得路权,路段  $b$  在相位 2 获得路权。路段  $a$ 、 $b$  随时间变化的信号控制惩罚时间如表 1 所示。在时间步 1 内系统处于相位 1,路段  $a$  获得通行权,惩罚时间为 0,此时距相位 2 还有 2 时间步,因此,路段  $b$  在时间步 1 内的信号控制惩罚时间为 2;在时间步 3 内系统处于相位 2,路段  $b$  获得通行权,惩罚时间为 0,此时距相位 1 还有 3 时间步,因此,路段  $a$  在时间步 2 内的信号控制惩罚时间为 3。此后,信号控制惩罚时间依次类推。

表 1 信号控制惩罚时间

Tab. 1 Penalty times of signal control

路段	时间步									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$a$	0	0	3	2	1	0	0	3	2	1
$b$	2	1	0	0	0	2	1	0	0	0

## 2.3 突发交通事件模拟

为研究突发交通事件对动态交通流运行的影响,在事件影响时段内仿真平台将降低突发交通事件所在路段通行能力,从而模拟由交通事件引发的路段关闭效果。因而,路段所能保有的最大排队长度也相应变化,但是考虑到交通事件的突然性,认为信号控制系统在为各个交叉口计算配时时,不对交通事件进行反应,即在指导信号控制策略时预设路段通行能力不变。

## 2.4 基于双排队模型仿真平台的信号控制

基于双排队模型仿真平台的信号控制状态更

新流程如图 1 所示,在进入新时间步时,首先,遍历所有交叉口,记录上一时间步结束时路段排队信息、驶入驶出流量,判断周期是否结束。若周期未结束,则根据配时方案更新各交叉口信号控制状态;若周期结束,则根据上一周期所记录排队及流量信息,根据对应信号控制策略确定下一周期各相位绿灯时长,更新配时方案,计算下一周期各时间步进口道信号控制惩罚项。最后,求解以式(18)为优化目标的整数规划模型,得到该时间步后该交叉口的驶入驶出流量,依据式(4)、(5)更新各进口道排队信息。

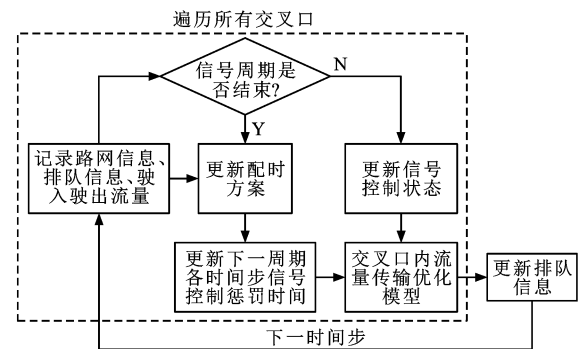


图 1 基于双排队仿真平台的信号控制流程

Fig. 1 Signal control process based on DQ simulation platform

## 3 计算与结果分析

根据所设计试验,利用测试路网对不同信号控制策略进行分析。测试路网如图 2 所示,由 10 个起讫点与 6 个信号控制交叉口组成。图 2 中各路段括号里 3 个数字信息分别为路段自由流行程时间、回溯时间和车道数,如(3,6,3)表示当前路段自由流行程时间为 3 min,回溯时间为 6 min,车道数为 3。各信号交叉口采用两相位信号控制。各车道饱和和流率均为每车道  $1\ 680\ \text{veh} \cdot \text{h}^{-1}$ 。每一时间步长为 15 s,因而,各车道饱和和流率为每时间步每车道 7 veh,各信号控制交叉口周期时长为 8 时间步,且对自适应信号控制策略中计算得到的绿灯时长以时间步为单位取整。

研究根据固定式信号控制下路网拥堵状态,将不同交通需求划分为低、中、高三级。低级交通需求下 OD 矩阵见表 2,中、高级交通需求则是在低级交通需求的基础上分别乘系数 1.5 和 2.0,其中在低级交通需求下,各交叉口均为非饱和状态;在中级交通需求下,交叉口处于非饱和状态的比例为 83.33%,而有 16.67%的交叉口处于过饱和状态;高级交通需求下,有 83.33%的交叉口处于过饱和状态。

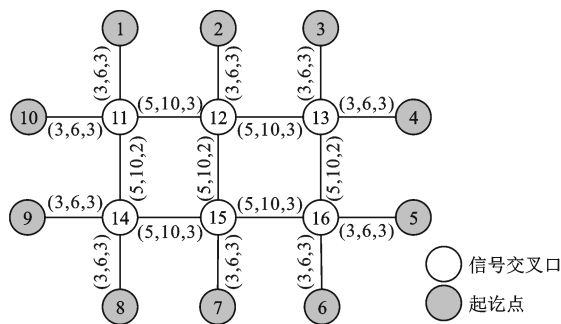


图 2 测试路网

Fig. 2 Testing road network

表 2 低级交通需求下 OD 矩阵

Tab. 2 OD matrix under low traffic demand condition veh · h<sup>-1</sup>

终点	起点									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	480	0	240	480	0	240
2	240	0	0	240	0	480	0	0	240	0
3	0	0	0	0	0	240	0	480	240	0
4	240	0	0	0	240	240	0	240	240	240
5	480	0	0	0	0	240	0	240	480	0
6	0	0	240	0	240	0	240	0	0	240
7	240	480	0	240	0	0	0	0	0	240
8	240	240	0	0	240	0	240	0	0	240
9	0	240	240	480	0	0	240	0	0	240
10	0	0	240	240	0	240	0	0	0	0

表 3 系统总行程时间

Tab. 3 System total travel times

控制策略	交通需求	有无交通事件影响	最小时间步	最大时间步	期望时间步	时间步标准差	<i>t</i>	<i>p</i>
FSC	低	无	1 658 437	1 672 055	1 665 567	2 710	2. 649	0. 008
		有	1 658 870	1 673 400	1 666 180	2 944		
	中	无	2 353 151	2 367 275	2 360 012	3 117	2. 131	0. 034
		有	2 353 818	2 367 323	2 360 545	3 016		
	高	无	8 091 426	8 170 419	8 132 731	17 929	2. 378	0. 018
		有	8 097 779	8 173 129	8 135 958	15 199		
ASC-VD	低	无	1 402 641	1 424 157	1 410 377	5 080	6. 581	<0. 001
		有	1 400 369	1 428 398	1 414 790	10 444		
	中	无	1 789 061	1 855 236	1 821 236	18 266	2. 058	0. 040
		有	1 775 724	1 862 327	1 824 170	16 607		
	高	无	6 704 896	7 492 216	7 194 811	186 930	1. 280	0. 201
		有	6 790 442	7 454 694	7 215 798	213 710		
ASC-IC	低	无	1 403 790	1 436 459	1 416 767	11 460	7. 683	<0. 001
		有	1 412 230	1 432 350	1 423 212	8 933		
	中	无	1 776 424	1 894 483	1 824 600	47 911	8. 281	<0. 001
		有	1 791 109	2 001 795	1 870 259	82 607		
	高	无	6 552 413	7 150 553	6 813 046	227 472	0. 570	0. 569
		有	6 580 594	7 093 754	6 822 835	191 534		

为了降低求解优化模型过程中随机因素的影响,各交通需求下各信号控制策略分别进行 300 次仿真,总计仿真 2 700 次。在每次仿真中,前 400 时间步为交通需求加载时间,预设交通事件在第 200 时间步发生在路段(14,15)上,持续 120 时间步,该路段通行能力从 5 040 veh · h<sup>-1</sup>下降为 2 520 veh · h<sup>-1</sup>。

3.1 系统行程时间

系统行程时间作为交通系统运行效果评价指标受到广泛应用。在本文所设计的仿真环境下,由于总交通需求固定,系统行程时间能够量化地描述在不同路网交通运行状态下信号控制策略的效率差异。表 3 是对 2 700 次仿真试验按照控制策略、交通需求等级进行分类统计描述,包括时间步最小值、最大值、期望值、标准差。对相同控制策略与相同交通需求等级下的系统总行程时间进行 *t* 检验,测试交通事件是否对系统总行程时间产生显著影响(其中原假设为交通事件对总行程时间无显著影响)。表 3 中 *t* 为 *t* 检验统计量,*p* 为原假设为真的概率,根据 *t* 查询相应界值表得到 *p*。由表 3 可知:延误最小自适应信号控制在低、中级交通需求下系统总行程时间最小,通行能力最大自适应信号控制稍高,在无交通事件影响下分别增加 0. 45% 和 0. 18%,在有交通事件影响下分别增加 5. 95% 和 2. 52%;在高级交通需求下,通行能力最大自适应信号控制策略相对其他 2 种信号控制策略有一定优势,对比延误最小

自适应控制,在无交通事件影响下系统总行程时间减小 5.31%,在有交通事件影响下系统总行程时间减小 5.46%;此外,固定式信号控制策略在系统行程时间的对比中均高于另外 2 种自适应感觉式信号控制。

进一步分析 2 种自适应信号控制策略间的差异,对其控制下系统总行程时间进行  $t$  检验,测试 2 种策略的运行效果在不同交通需求等级以及交通事件发生与否条件下,是否存在显著差异(其中原假设为 2 种策略的运行效果无显著差异)。如表 4 所示,除了中级交通需求下,在无交通事件影响时,2 种信号控制策略无显著差异外,其他情境下,在 95%置信度条件下均拒绝原假设,即认为 2 种信号控制策略有显著差异。结果表明为了提高整个系统的运行效率,低、中级交通需求下,宜采用以降低车辆延误为目标的控制策略,而处于高级交通需求时,宜采用以提升交叉口通行能力为目标的控制策略。

表 4 有无交通事件条件下系统总行程时间  $t$  检验结果

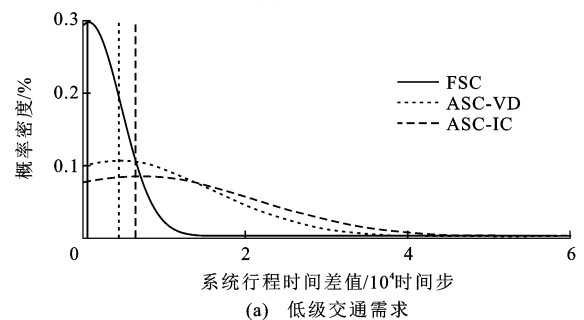
Tab. 4  $t$ -test results of system total travel times with and without traffic incidents

交通需求	无交通事件		有交通事件	
	$t$	$p$	$t$	$p$
低	8.830	<0.001	10.615	<0.001
中	1.136	0.256	9.474	<0.001
高	22.459	<0.001	23.717	<0.001

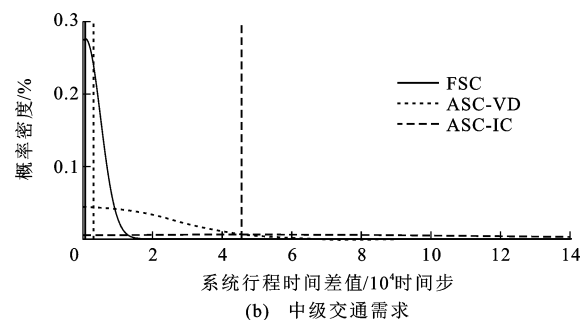
在进行配时决策时,延误最低自适应信号控制策略仅根据路段延误信息,而通行能力最大自适应信号控制策略则需要路段延误信息与饱和流率信息共同决策。根据式(1)、(2),若各进口道延误相同,不同饱和流率路段在延误最小自适应信号控制策略下将获得相等绿灯时长;但在通行能力最大自适应信号控制策略下,饱和流率较大的路段获得较大的绿灯时长,饱和流率较小的路段获得较短的绿灯时长,在此情况下,一部分路段信号控制惩罚时间增加,一部分路段车辆排队等待时间降低。仿真数据表明:当处于高级交通需求时,排队时间的减小量无法抵消信号控制惩罚时间的增加量,导致延误最低自适应信号控制策略表现低于通行能力最大自适应信号控制策略;反之,在交通需求处于中、低级水平时,排队时间的减小量比信号惩罚时间增加后带来的影响更显著,通行能力最大自适应信号控制策略将花费更长通行时间。

### 3.2 系统行程时间稳定性

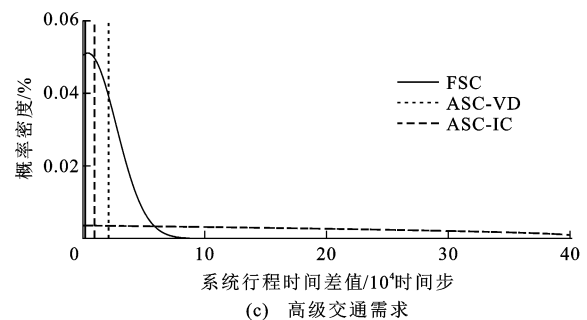
研究使用信号控制策略在有无交通事件影响下系统总行程时间差作为表征信号控制稳定性的指标,差异越小说明信号控制策略越稳定。由表 3 可知,交通事件对信号控制运行效果有显著影响。图 3 是有无交通事件条件下总行程时间差值分布曲线,图中 3 条竖向线条分别为不同信号控制策略下系统总行程时间差的期望值。在低级交通需求下,固定式信号控制的时间差期望值最小,为 612 时间步,其次是延误最小自适应控制,为 4 410 时间步,通行能力自适应控制时间差期望值最大,为 6 451 时间步;在中级交通需求下,3 种策略排序与低级交通需求下相同,时间差的期望值顺次为 533、2 928、45 708 时间步;在高级交通需求下,固定式信号控制的时间差期望值最小,为 3 228 时间步,其次是通行能力自适应控制,为 9 792 时间步,延误最小自适应控制下的时间差期望值最大,为 21 037 时间步。随着交通需求增长,系统行程时间差值的波动逐渐增大,即行程时间稳定性降低;但是系统行程时间期望



(a) 低级交通需求



(b) 中级交通需求



(c) 高级交通需求

图 3 系统总行程时间差值的分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of difference of system total travel time

值与交通需求并非单调递增。试验结果表明:固定式信号控制在本项指标下表现好于2种自适应信号控制策略;在低、中级交通需求下,延误最小自适应信号控制策略比通行能力最大自适应信号控制策略更稳定,而在高级交通需求下,两者的稳定性无显著差异。

## 4 结 语

(1)对3种典型信号控制策略进行试验对比,结果表明:当交通需求较大时,通行能力最大自适应信号控制策略效果较好;而当交通需求较小时,延误最小自适应信号控制策略效果较好。

(2)试验结果显示虽然固定式信号控制在突发交通事件条件下稳定性较高,但是其运行效果远低于自适应信号控制策略。

(3)在突发事件条件下,交通事件自身特性、信号控制交叉口联动关系、驾驶人路径选择行为等因素会影响信号控制系统的运行效率。下一步的研究工作将进一步考虑典型因素对信号控制策略的影响,提出完善的突发事件条件下信号控制策略评价体系。

(4)微观单车行为异质性、冲突车流交互作用、冲突流量规模等因素会对交通流拥堵状态产生影响,需结合突发事件条件下车辆运行特性进一步提升交叉口信号控制策略的运行效率。

## 参考文献:

## References:

- [1] KHATTAK A J, WANG Xin, ZHANG Hong-bing, et al. Primary and secondary incident management: predicting durations in real time[R]. Charlottesville: Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2011.
- [2] MARTIN P T, CHAUDHURI P, TASIC I, et al. Traffic incident management state of the art review[R]. Salt Lake City: University of Utah, 2011.
- [3] KOOREY G, MCMILLAN S, NICHOLSON A. Incident management and network performance[J]. Transportation Research Procedia, 2015, 6: 3-16.
- [4] HOJATI A H, FERREIRA L, WASHINGTON S, et al. Modelling total duration of traffic incidents including incident detection and recovery time[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 71: 296-305.
- [5] YU Hao, LIU Pan, MA Rui, et al. Performance evaluation of integrated strategy of vehicle route guidance and traffic signal control using traffic simulation[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2018, 12(7): 696-702.
- [6] YAO Zhi-hong, ZHAO Bin, QIN Ling-qiao, et al. An efficient

heterogeneous platoon dispersion model for real-time traffic signal control[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2020, 539: 1-12.

- [7] DING Chuan, WU Xin-kai, YU Gui-zhen, et al. A gradient boosting logit model to investigate driver's stop-or-run behavior at signalized intersections using high-resolution traffic data[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 72: 225-238.
- [8] YU Hao, MA Rui, ZHANG Hong-jun. Optimal traffic signal control under dynamic user equilibrium and link constraints in a general network[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 110: 302-325.
- [9] CHEN Shu-kai, SUN Jian. An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2016, 8(4): 4-14.
- [10] HUNTER M P, WU S K, KIM H K, et al. A probe-vehicle-based evaluation of adaptive traffic signal control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(2): 704-713.
- [11] HU Jia, FONTAINE M D, PARK B B, et al. Field evaluations of an adaptive traffic signal—using private-sector probe data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(1): 04015033-1-9.
- [12] MAJID H, LU C, KARIM H. An integrated approach for dynamic traffic routing and ramp metering using sliding mode control[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018, 5(2): 116-128.
- [13] ASLANI M, MESGARI M S, WIERING M. Adaptive traffic signal control with actor-critic methods in a real-world traffic network with different traffic disruption events[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 85: 732-752.
- [14] BALDI S, MICHAELIDIS I, NTAMPASI V, et al. A simulation-based traffic signal control for congested urban traffic networks[J]. Transportation Science, 2019, 53(1): 6-20.
- [15] NIE Xiao-jian, ZHANG Hong-jun. A comparative study of some macroscopic link models used in dynamic traffic assignment[J]. Networks and Spatial Economics, 2005, 5: 89-115.
- [16] 李瑞敏. 过饱和和交叉口交通信号控制研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 119-126.
- [17] LI Rui-min. Study status and prospect of traffic signal control for over-saturated intersection[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 119-126. (in Chinese)
- [18] ROBERTSON D I, BRETHERTON R D. Optimizing networks of traffic signals in real time—the SCOOT method[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 11-15.
- [19] LIU H X, OH J S, RECKER W. Adaptive signal control system with on-line performance measure for single intersection[R]. Berkeley: University of California, 2002.
- [19] REN Yi-long, WANG Yun-peng, YU Gui-zhen, et al. An



- adaptive signal control scheme to prevent intersection traffic blockage[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(6): 1519-1528.
- [20] SOH A C, RAHMAN R Z A, RHUNG L G, et al. Traffic signal control based on adaptive neural fuzzy inference system applied to intersection[C]//IEEE. 2nd International Conference on Open Systems. New York: IEEE, 2011: 237-242.
- [21] SMITH M, HUANG Wei, VITI F. Equilibrium in capacitated network models with queueing delays, queue-storage, blocking back and control[J]. Procedia—Social and Behavioral Science, 2013, 80: 860-879.
- [22] SMITH M. A local traffic control policy which automatically maximizes the overall travel capacity of an urban road network[J]. Traffic Engineering and Control, 1980, 21: 11-31.
- [23] SMITH M. Traffic signal control and route choice; a new assignment and control model which designs signal timings[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 58: 451-473.
- [24] LAMMER S, HELBING D. Self-control of traffic signal lights and vehicle flows in urban road networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2008(8): 1-34.
- [25] MA Rui, BAN Xue-gang, PANG Jong-shi. Continuous-time dynamic system optimum for single destination traffic networks with queue spillbacks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 68: 98-122.
- [26] MA Rui, BAN Xue-gang, PANG Jong-shi. A link-based differential complementarity system formulation for continuous-time dynamic user equilibria with queue spillbacks[J]. Transportation Science, 2018, 52(3): 564-592.
- [27] RAN Bin, BOYCE D E, LEBLANC L J. A new class of instantaneous dynamic user-optimal traffic assignment models[J]. Operations Research, 1993, 41(1): 192-202.
- [28] 赵 靖, 马万经, 韩 印. 出口车道左转交叉口几何及信号组合优化模型[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 120-127.
- ZHAO Jing, MA Wan-jing, HAN Yin. Integrated optimization model of layouts and signal timings of exit-lanes for left-turn intersections[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 120-127. (in Chinese)
- [29] GAWRON C. An iterative algorithm to determine the dynamic user equilibrium in a traffic simulation model[J]. International Journal of Modern Physics C, 1998, 9(3): 393-407.
- [30] CETIN N, BURRI A, NAGEL K. A large-scale agent-based traffic micro simulation based on queue model[C]//STRC. Proceedings of 3rd Swiss Transport Research Conference. Ascona: STRC, 2003: 1-22.