

# 周期与流量对交叉口排放和延误的影响

项俊平<sup>1,2</sup>, 唐克双<sup>3</sup>, 陶晶晶<sup>4</sup>

(1. 中国科技大学 自动化系, 安徽 合肥 230027; 2. 连云港杰瑞电子有限公司, 江苏 连云港 222007;  
3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 4. 兰州市城市建设设计院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 考虑车辆到达类型(可表征交叉口信号联动质量), 基于交通波理论重构交叉口车辆运行轨迹, 进而应用机动车比功率模型(VSP)开发了信号控制交叉口排放估计算法, 并结合 HCM 2010 延误模型, 分析了不同到达类型下信号周期和流量对交叉口排放及延误的影响及排放和延误的博弈关系。结果表明, 在相同条件下, 交叉口联动质量越好, 交叉口车均排放和延误越小; 周期增大, 车均排放减小, 延误先减小后增大, 其中, 交叉口联动质量越好, 基于延误最小的最优周期越大; 车均排放对流量的变化较不敏感, 而延误受流量影响较大。

**关键词:** 信号交叉口; 到达类型; 交通排放; 延误

**中图分类号:** U491.1

**文献标志码:** A

## Impacts of Cycle Length and Volume on Traffic Emissions and Delay at Signalized Intersections

XIANG Junping<sup>1,2</sup>, TANG Keshuang<sup>3</sup>, TAO Jingjing<sup>4</sup>

(1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Lianyungang JARI Electronics Co., Ltd., Lianyungang 222007, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. Lanzhou Urban Construction Design Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Considering different arrival types which can represent the quality of the progression, this study developed an emission estimation algorithm at signalized intersections by reconstructing the vehicle trajectory based on shock wave theory and applying Vehicle Specific Power Model. Then, the delay model proposed in HCM 2010 was combined to analyze the impacts of signal cycle length and traffic demand on emissions and delay, what's more, the game relationship between emissions and delay was discussed. Results indicate that both emissions and delay per vehicle become smaller when signalized intersections experiencing a more favorable progression under equal condition. As cycle length increases,

the per-vehicle emissions decrease while the delay decreases and then increases, specifically, the higher quality of the progression, the larger the optimal cycle corresponding to the minimum delay. The impact of traffic flow on per-vehicle emissions was found to be insignificant, however, control delay is much more sensitive to traffic demand than emissions.

**Key words:** signalized intersections; arrival type; traffic emission; delay

目前交叉口运行效率多从延误、排队长度及通行能力等指标考虑, 很少将交通排放污染作为评价指标。随着近些年全球环境污染严重的问题及城市交通可持续发展理念的倡导, 越来越多的人开始关注交通环境污染。而交叉口作为城市道路网的重要节点, 研究其交通污染排放尤为重要。

对于排放估计, 很早以前便有很多学者和相关管理部门开始研究。交通排放模型是进行交通排放量估算的必要工具, 早期的宏观排放模型(如: 美国环保局的机动车源排放因子 MOBILE 模型、加州空气资源局的 EMFAC 模型)中, 相关的交通参数只有平均速度, 并将此参数作为输入变量, 而这种办法并不能有效地体现车辆在行驶过程中的动态性, 因而估计的排放结果存在较大误差。为了较为准确地反映车辆的运行特征, 一些主流的微观排放模型由此产生, 如: CMEM (Comprehensive Modal Emission Model)、MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator)模型及机动车比功率(VSP)模型等。微观模型以瞬时速度和瞬时加速度作为输入变量, 更准确地反映车辆的运行状态。对于交叉口或干线上的交通污染排放研究, 主要有以下思路:

(1)应用已有交通排放模型估计排放。主要是采

收稿日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61673302)

第一作者: 项俊平(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为模式识别、智能交通系统。E-mail: jari\_its@163.com

通讯作者: 唐克双(1980—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统、驾驶行为。E-mail: tang@tongji.edu.cn

用一些排放模型对城市道路排放进行测算或者对排放因子进行模拟<sup>[1]</sup>;最近,我国也有相关研究<sup>[2]</sup>,应用 VSP 变量建立尾气排放模型,以实测数据和仿真数据对模型进行验证和评价。

(2)基于微观交通仿真软件和排放模型。该方法主要依赖于微观交通仿真软件(如:VISSIM、TSIS 等)和微观排放模型(MOVES、CMEM、VT-Micro 等)。其思路是将实时的车辆运行参数(瞬时速度、瞬时加/减速度)作为输入数据导入到排放模型中计算瞬时排放率,再求积分得到总的排放量。如:Park 等<sup>[3]</sup>用该方法估计污染物排放。Servin 等<sup>[4]</sup>估计并实证验证了在不同高速拥堵条件下,采取智能速度适应策略产生的燃油消耗和排放。Ahn 等<sup>[5]</sup>用该方法对比了十字交叉口和环形交叉口的排放。Hallmark 等<sup>[6]</sup>应用仿真软件 aaSIDRA 和排放模型 MOBILE6.2 研究了十字交叉口的 CO、NO<sub>x</sub> 排放率高于环形交叉口。Stanek 等<sup>[7]</sup>应用交通仿真模型计算交叉口 CO<sub>2</sub> 排放量,并采用多元回归分析法得到不同控制类型交叉口的 CO<sub>2</sub> 排放估计方法。

虽然该方法克服了宏观模型的缺点,可更容易获取瞬时的车辆行驶数据,并可通过微观排放模型计算瞬时排放,但对于不同的交通场景不具有普遍适用性。文献<sup>[8]</sup>解释了应用该方法不合适的原因,并提出了改进建议。

(3)建立分析模型。该方法主要是基于交通波理论和物理运动学建立排放估计模型。该方法的缺点是建立模型的理论假设对估计结果造成的误差较大。Ahn 等<sup>[9]</sup>将车辆瞬时速度、加速度作为输入变量开发数学模型来预测车辆油耗和排放。Papson 等<sup>[10]</sup>估计了车辆在每种运行模式下的时间,并结合排放因子来估算排放。应用线圈检测器数据和信号配时数据,Skabardonis 等<sup>[11]</sup>提出分析模型,预测车辆在非过饱和与过饱和条件下的干线交通排放。Shabihkhani 等<sup>[12]</sup>通过计算交叉口停车次数和怠速、匀速状态的时间,应用 MOVES 排放模型估计交叉口的排放量。Chiou 等<sup>[13]</sup>整合排放模型和扩散模型,研究混合交通条件下的排放,并对比了不同交通条件和信号配时条件下交叉口的排放。Khalighi 等<sup>[14]</sup>通过计算小汽车和公交车在交叉口 4 种运行模式的时间,应用 VSP 模型计算排放。Salamat 等<sup>[15]</sup>将交通需求、通行能力、路段长度和信号配时等作为输入参数,应用 VSP 模型对比环形交叉口和十字交叉口的排放,得到不同饱和度下 2 种交叉口类型的排放变化。影响该方法结果精度的一个主要因素是估计车辆在各种运行模式下的时间的准确程度。

(4)构建车辆轨迹进行排放估计。该法是用不同

的交通数据源构建车辆运行轨迹,获取更接近实际的速度和加速度,继而实现排放估计。优点是:相比分析模型,不存在较多的理论假设,缺点是对数据源的要求较高。如:Sun 等<sup>[16]</sup>应用移动检测数据构建车辆运行轨迹,进而估计城市干线交叉口的排放。

综上,以上研究应用了不同方法对排放进行估计。而排放是一个受到很多因素综合影响的指标,很多学者在这方面也做了很多相关探索。如:应用 VISSIM 仿真和 CMEM 排放模型,Stathopoulos 等<sup>[17]</sup>分析了交通流量改善对排放和油耗的影响。Nam 等<sup>[18]</sup>研究驾驶员的激进行为对排放的影响。Ahn 等<sup>[19]</sup>结合 GPS 数据和微观仿真模型研究了路径选择决策行为对油耗和排放的影响。Chamberlin 等<sup>[20]</sup>整合 MOVES 和 PARAMICS 研究了信号控制方式变化对排放的影响。De Coensel 等<sup>[21]</sup>通过大量仿真试验研究了交通密度、信号配时和信号协调参数对排放的影响。Ghafghazi 等<sup>[22]</sup>应用仿真方法探索了不同交通稳静化措施对交通排放的影响。

目前针对交叉口车辆不同到达类型条件下的排放估计研究较少,且不同到达类型之间的界限较不清晰,为研究带来一定困难。此外,在现实交通状态中,交叉口车辆的到达类型具有很大的随机性和不确定性,究其原因,主要有:①客观方面。交通状态(是否通畅);上游交叉口驶入该进口道的不同转向车辆比例及其相应的信号控制方案;上游交叉口车辆主流方向和该进口道主流方向在通行权上的时间差及相邻交叉口间路段长度;相邻 2 个交叉口之间沿线出入口车辆的影响;②主观方面。驾驶员的性别、年龄、驾龄(熟练程度)及属于激进型与否等。综合以上各因素,并考虑到车辆由上游交叉口到下游交叉口进口道的行驶过程存在车队离散和集聚,使得车辆到达下游交叉口的状况具有较强的随机性。但这并不代表无规律可循,交叉口车辆到达类型为绿灯期间车道组到达流量占整个信号周期到达流量的比例。该比例越大,到达交叉口且直接通过的车辆数越多,则交叉口运行效率越好,特别是在干线协调信号控制交叉口,该优势更加明显。

因此,本文以交叉口车辆到达类型为出发点,研究不同类型条件下的交叉口排放估计及不同到达类型条件下周期和流量对排放、延误的影响。

## 1 交叉口排放估计与延误算法

### 1.1 交叉口排放估计算法

#### 1.1.1 基本思路

很多研究表明,在信号控制交叉口,由于排队等

候或者等待绿灯通行权造成的车辆停车并再次启动加速通过交叉口的过程会大幅增加交叉口排放。其主要原因是:相比匀速、减速和怠速过程,车辆在启动加速过程中,对车辆排放产生很重要的影响<sup>[23]</sup>。特别是在怠速结束加速启动刚开始的过程中,污染物排放率最大<sup>[24]</sup>。

很明显,在周期长度、相位绿灯时间和交叉口流量不变的情况下,如果车辆在绿灯相位内到达并直接通过的比例越大,则停车次数越少,产生加速过程的车辆数减少,有效减小交叉口排放量。故周期内车辆在绿灯相位内到达的比例(到达类型)对交叉口排放具有很大影响。因此,考虑车辆进入交叉口的到达类型,以建立交叉口排放估计算法。

### 1.1.2 算法

基于车辆通过交叉口的运行状态(匀速、怠速、启停)对排放有着不同的影响,本文提出的交叉口排放估计算法是利用交通波理论,在不同车流到达类型条件下,计算周期内总的停车车辆数、直接通过交叉口的车辆数和各运行状态的时间,以此构建车辆通过交叉口的运行轨迹,并结合 VSP 排放变量估计交叉口排放。本文只考虑未饱和交通状态,故包括一次停车的车辆排放和直接通过交叉口的车辆排放。

#### 1.1.2.1 车辆通过交叉口的运行轨迹

对于每辆进入交叉口的车辆,一是加入排队等待通过,二是直接通过交叉口。考虑到不同转向车辆通过交叉口的运动特性不同(特别是转向车流对整个交叉口的交通状态有着重要的影响),将车辆运行轨迹分为左转、直行和右转 3 种。

(1)直行轨迹。对直行车而言,车辆通过交叉口的轨迹可用图 1 描述,图中虚线表示加减速过程。

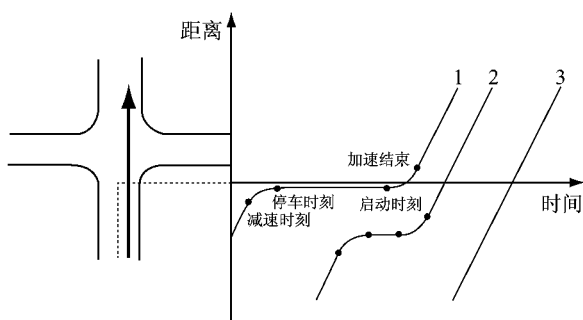


图 1 直行车辆轨迹

Fig. 1 Vehicle trajectories for through movement

对于因为信号控制(1 车)或者排队原因(2 车)导致的停车车辆,先是由路段自由流速度减速至零,然后等待绿灯或者前车启动而开始加速并加速至路段自由流速度。对于直接通过交叉口的车辆(3 车)

假设其以路段自由流速度匀速通过。

(2)左转轨迹。对因信号控制或者排队引起的左转停车车辆,其轨迹根据车辆完成转向时的速度是否达到转速极限(turning speed limit)如图 2(图中,黑色虚线到停车线的距离为车辆转向段,A 点和 B 点表示车辆达到转速极限)分为两类:一类是当车辆完成转向时速度还没达到转速极限(4 车),即车辆以一定的加速度加速至自由流行驶状态;另一类是当车辆转向完成时速度已经达到转速极限(5 车),即车辆先加速至转速极限并匀速,完成转向后再加速至自由流速度。

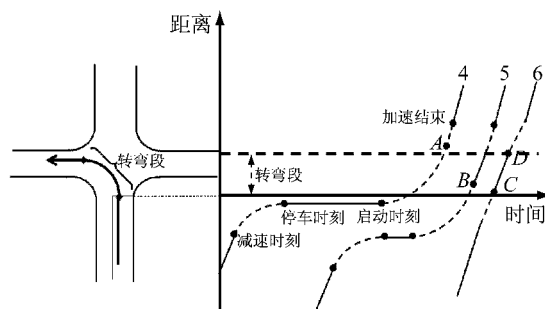


图 2 左转车辆轨迹

Fig. 2 Vehicle trajectories for left-turn movement

对于直接通过的左转车,假设进入交叉口后,速度已减至转速极限,在转向段以该速度匀速行驶(CD 段),完成转向后又加速到自由流行驶速度(6 车)。

(3)右转轨迹。本文假设右转车不受信号控制约束。因为右转车受到路侧行人、非机动车等的影响,经过交叉口时的速度也会减缓(图 3 中 CD 段),其运动轨迹如图 3。

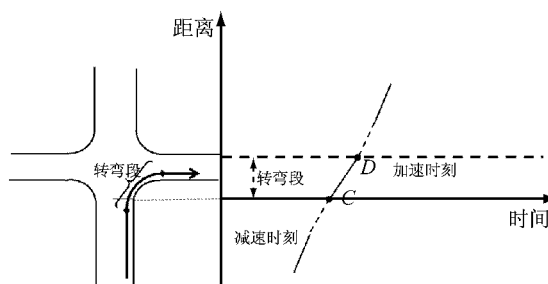


图 3 右转车辆轨迹

Fig. 3 Vehicle trajectories for right-turn movement

基于交通波理论,计算不同到达类型条件下停车车辆数和直接通过车辆数,并结合信号配时方案重构 3 种转向车流的运动轨迹,进而获得车辆运行过程中的运动参数(速度、加速度)。

对于以上 3 种转向车流的任何轨迹运行形式,

都是在理想环境下的,而在实际交通情况下,常常因为对向左转车或者非机动车的干扰、换道及超车行为、路侧行人和非机动过街行为、交通违章行为以及驾驶行为特性等因素,使得实际车辆轨迹并不完全按照理想情况运行,而是具有很强的随机性和不确定性. 受限于现实条件,本文不能对每辆车运行过程中的不确定进行详细描述. 因而,将通过交叉口的车辆分为 2 类,一类是停车车辆,假设具有相同的行驶特性(加减速过程中加速度相同,匀速过程中速度为定值),另一类是直接通过车辆,其速度为定值.

### 1.1.2.2 VSP 排放变量

VSP 是单位质量机动车的瞬时功率,是发动机为了克服滚动阻力和空气阻力增加机动车动能和势能所需要输出的功率,其数值(假设为  $m$ )和车辆行驶的速度和加速度有关,其表达式为:

$$m = v(1.1a + 0.132) + 0.000302v^3 \quad (1)$$

式中:  $v$  为行驶过程中的瞬时速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $a$  为行驶过程中的瞬时加速度大小,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

相比其他排放模型, VSP 变量可较为详尽地反映机动车的污染物排放. 因为大型车和轻型车在运行过程中输出功率有较大区别,其排放率也有所差别,本文只考虑轻型车的排放. 根据上文得到的车辆行驶速度、加速度得到  $m$  值,并依据相应的 VSP 区间得到对应的污染物排放率<sup>[25]</sup>,如表 1.

表 1 轻型车的 VSP 区间及各污染物排放率

Tab. 1 Definition of VSP intervals and emissions rates for NO, HC, CO and CO<sub>2</sub> for light-duty vehicles ( $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$ )

VSP 区间	NO	HC	CO	CO <sub>2</sub>
$m < -2$	0.9	0.5	7.8	1.7
$-2 \leq m < 0$	0.6	0.3	3.9	1.5
$0 \leq m < 1$	0.3	0.4	3.3	1.1
$1 \leq m < 4$	1.2	0.4	8.3	2.2
$4 \leq m < 7$	1.7	0.5	11.0	2.9
$7 \leq m < 10$	2.4	0.7	17.0	3.5
$10 \leq m < 13$	3.1	0.8	20.0	4.1
$13 \leq m < 16$	4.2	1.0	29.0	4.6
$16 \leq m < 19$	5.1	1.1	36.0	5.2
$19 \leq m < 23$	5.9	1.4	55.0	5.6
$23 \leq m < 28$	7.6	2.1	114.0	6.5
$28 \leq m < 33$	12.1	3.4	208.0	7.7
$33 \leq m < 39$	15.5	4.9	442.0	9.0
$39 \leq m$	17.9	10.9	882.0	10.9

### 1.1.3 排放估计

基于以上车辆行驶轨迹和 VSP 排放变量,可对交叉口的排放进行估计.

假设信号控制交叉口相位  $i$  的周期交通量为  $q_i$ , 绿灯启亮后,车辆以饱和流率  $S$  通过. 设某车队以车

速  $v_i$  匀速到达交叉口,遇到红灯后以减速度  $a_{\text{dec}}$  减速至零并排队,绿灯启亮后,停车车辆依次以加速度  $a_{\text{acc}}$  加速至正常行驶速度  $v_i$  并驶离交叉口. 信号周期时间为  $C$ ,相位  $i$  的绿灯时长为  $g_i$ ,排队车辆消散时间为  $t_{\text{si}}$ ,如图 4 所示. 图中,取交叉口停车线上游路段  $L_1$  和停车线下游路段  $L_2$ ,  $L_1$  长度需要保证最大排队长度,  $L_2$  长度需要满足车辆启动加速到正常匀速行驶状态. 即需要满足如下约束:

$$L_1 \geq N_m \cdot k_j \quad (2)$$

$$L_2 \geq v_{\text{cr}} \cdot t_{\text{acc}}/2 \quad (3)$$

式中:  $N_m$  为进口道最大停车车辆数;  $k_j$  为排队时的阻塞密度;  $v_{\text{cr}}$  为车辆自由行驶速度;  $t_{\text{acc}}$  为车辆加速度.

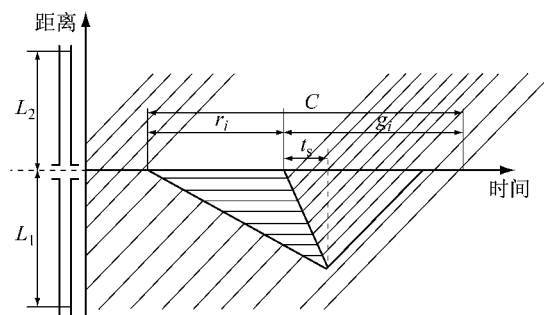


图 4 交叉口车辆运行时空

Fig. 4 Time-space diagram of vehicle running at intersections

图 4 未考虑车辆从减速开始到停车和启动加速至自由流车速的过程,图 5 为修正减速和加速过程后的单车轨迹.

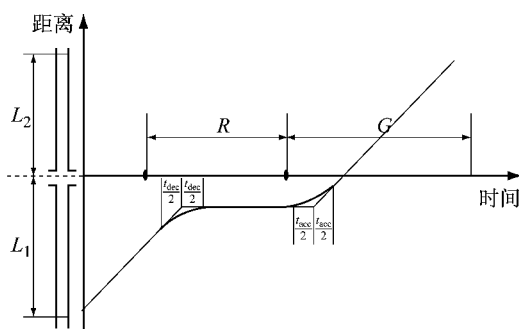


图 5 车辆减速和加速过程

Fig. 5 Process of vehicle' deceleration and acceleration

因此,交叉口车均排放估计算法分为一次停车车辆排放估计算法和直接通过交叉车辆的排放估计算法.

#### 1.1.3.1 经过一次停车的车辆排放估计算法

应用交通流理论,首先得到对应不同的到达类型其周期内相位  $i$  内停车车辆总数  $q_i$ ,然后计算车辆

各运行模式的时间及相应的排放. 周期内停车车辆总数  $N_s$  为

$$N_s = q_i \cdot (1 - P) + q_i \cdot P \cdot \frac{t_{si}}{g_i} \quad (4)$$

式中:  $P$  为绿灯时间通过车辆数占周期通过车辆数的比例;  $t_{si}$  为排队车辆消散时间, s, 计算如下:

$$t_{si} = \frac{q_i \cdot C \cdot (1 - P)}{\frac{S}{3600} - \frac{q_i \cdot P}{g_i}} \quad (5)$$

式中:  $C$  为信号周期时长, s;  $g_i$  为相位  $i$  的绿灯时长, s;  $S$  为饱和流率,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ .

(1) 减速过程排放量估计. 对于停车车辆的减速过程, 其排放为瞬时排放率在减速过程中的积分, 即

$$E_{is-\text{dec}} = \sum_{i=1}^{N_s} \int_0^{t_{\text{dec}}} e_{is-\text{dec}} \cdot dt \quad (6)$$

式中:  $t_{\text{dec}}$  为车辆减速时间;  $e_{is-\text{dec}}$  为减速过程中瞬时排放因子.

(2) 怠速过程排放量估计. 在车辆怠速过程中, 由于其速度和加速度都没有发生变化, 其瞬时排放因子相同, 故每辆车的怠速排放量为怠速时间和排放因子的乘积. 鉴于确定每辆车的怠速时间不易, 本文计算了所有停车车辆的总的怠速时间  $T_{id}$ .

$$T_{id} = \frac{1}{2} \cdot (R - \frac{t_{\text{acc}} + t_{\text{dec}}}{2}) \cdot N_s \quad (7)$$

式中:  $R$  为红灯时长, s. 因此, 怠速过程总的排放量为

$$E_{is-id} = e_{is-id} \cdot T_{id} \quad (8)$$

式中:  $e_{is-id}$  为怠速过程的排放因子.

(3) 加速过程排放量估计. 在加速过程中, 车辆的排放量为瞬时排放因子在加速过程中的积分, 故所有加速车辆总排放量为

$$E_{is-\text{acc}} = \sum_{i=1}^{N_s} \int_0^{t_{\text{acc}}} e_{is-\text{acc}} \cdot dt \quad (9)$$

式中:  $e_{is-\text{acc}}$  为加速过程中的瞬时排放因子.

(4) 匀速过程排放量估计. 对于每辆停车车辆, 其通过交叉口匀速过程的时间为

$$t_{cr} = \frac{L_1 + L_2 - L_{\text{dec}} - L_{\text{acc}}}{v_f} \quad (10)$$

式中:  $L_{\text{dec}}$  为减速过程行驶的路程, m;  $L_{\text{acc}}$  为加速过程行驶的路程, m. 故所有停车车辆总的匀速时间为

$$T_{cr} = t_{cr} \cdot N_s \quad (11)$$

在匀速过程中, 排放因子为常数, 因此, 匀速过程中总的排放量为

$$E_{is-cr} = e_{is-cr} \cdot T_{cr} \quad (12)$$

式中:  $e_{is-cr}$  为匀速过程中的瞬时排放因子.

综上, 对于相位  $i$ , 通过计算每种运行模式的排放, 得到所有停车车辆的排放为

$$E_{is} = E_{is-cr} + E_{is-\text{dec}} + E_{is-id} + E_{is-\text{acc}} \quad (13)$$

### 1.1.3.2 直接通过交叉口的车辆排放估计算法

对于直接通过交叉口的车辆, 假设以自由车速通过, 其排放量为通过交叉口范围内的匀速过程中的排放.  $N_p$  为周期内直接通过车辆数,  $v_{cr}$  为车辆自由行驶的速度. 通过交叉口范围的时间为

$$T_{ip} = N_p \cdot \int \frac{L_1 + L_2}{v_{cr}} \cdot dv \quad (14)$$

因此, 相位  $i$  内直接通过车辆的排放为

$$E_{ip} = E_{ip-cr} = e_{ip-cr} \cdot T_{ip} \quad (15)$$

综上所述, 周期内交叉口车均排放为

$$E = \frac{\sum_i E_i}{\sum_i q_i} = \frac{\sum_i (E_{is} + E_{ip})}{\sum_i q_i} \quad (16)$$

### 1.2 交叉口延误估计算法

交叉口延误计算采用 HCM 2010<sup>[26]</sup> 中延误计算方法, 利用信号调整因子 (PF) 得到交叉口车辆在不同到达类型条件下的延误, 这里只研究未饱和状态, 不涉及到初始排队延误, 故计算如下:

$$d = d_1 P_F + d_2 \quad (17)$$

$$d_1 = \frac{0.5C(1+\lambda)^2}{1 - \min[1, x]\lambda} \quad (18)$$

$$d_2 = 900T[(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8ex}{cT}}] \quad (19)$$

式中:  $P_F$  为信号调整因子;  $d$  为交叉口车均控制延误,  $\text{s} \cdot \text{pcu}^{-1}$ ;  $d_1$  为均匀延误, 即车辆均匀到达所产生的延误,  $\text{s} \cdot \text{pcu}^{-1}$ ;  $d_2$  为随机附加延误, 即车辆随机到达并引起超饱和周期所产生的附加延误,  $\text{s} \cdot \text{pcu}^{-1}$ ;  $\lambda$  为所计算车道绿信比;  $c$  为所计算车道通行能力,  $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $T$  为分析时段持续时长, 取 0.25 h;  $e$  为单个交叉口信号控制类型校正系数, 定时信号取  $e=0.5$ ;  $x$  为进口道饱和度.

## 2 实证参数标定

交叉口车均排放和车均延误算法需要标定以下参数.

### 2.1 到达类型

通过交叉口车辆的到达类型可用信号联动质量表示, 信号联动质量的表征参数  $P$  是指在相位绿灯时间内, 车道组在绿灯时间内到达交叉口的车辆数占周期内到达车辆数的比例. 选取 HCM 2010<sup>[26]</sup> 中定义到达类型范围的中数 (除到达类型 5、6 之外),

如表 2 所示。

表 2 不同到达类型参数值

Tab. 2 Parameter values for different arrival types

类型 1	类型 2	类型 3	类型 4	类型 5	类型 6
0.10	0.40	0.50	0.60	0.85	0.95

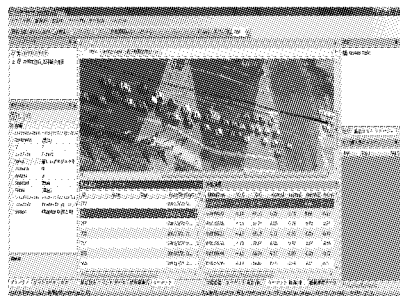
## 2.2 车辆行驶轨迹参数

车辆进入交叉口有 2 种行驶状态,一是以路段行驶速度直接通过,二是遇到排队,先减速后加速并通过。路段运行速度可假设为路段的自由流车速。

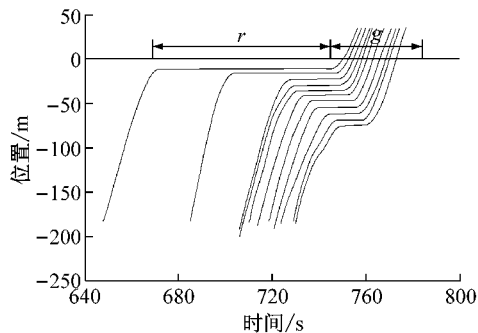
选取上海市四平路大连路交叉口,通过将 AVI (audio video interleaved) 格式视频数据导入到轨迹提取软件 George 2.1 中,提取交叉口到达车辆的实际运行轨迹(包括车辆实时的行驶速度、加速度和减速度大小等参数),见图 6。依据文献[12]中对匀速过程、减速过程及加速过程的定义,得到实测的速度和加减速大小(样本量均为 130 个),具体见表 3。



a 交叉口实景图



b 轨迹提取数据



c 实际车辆运行轨迹

图 6 车辆轨迹数据采集与处理

Fig. 6 Vehicle trajectory data' acquisition and processing

表 3 各参数的分布拟合

Tab. 3 Distribution fitting of several parameter

参数	车辆行车位置	数据拟合	
		均值	方差
速度	交叉口上游 135~55 m	$40.05 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$	$5.36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$
减速度	停车线上游减速路段	$1.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
加速度	停车线下游加速路段	$0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	$0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

由此,对于到达交叉口的车辆,匀速过程中速度大小取  $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,减速度取  $1.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,加速度取  $0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

## 2.3 交叉口特征参数

交叉口的特征主要包括各进口道渠化设计、进口道转向比和流量、交叉口范围等。

### 2.3.1 交叉口各进口道渠化设计

取东西方向为主路协调方向,南北方向为次路,其渠化设计如图 7。

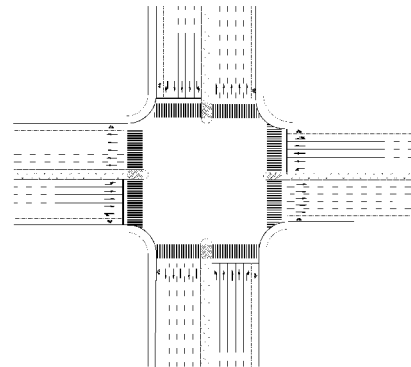


图 7 交叉口渠化设计

Fig. 7 Design pattern of the intersection

### 2.3.2 交叉口转向车流比例及流量

交叉口转向车流比例对交叉口排放也有一定的影响,主要探讨排放随周期的变化规律,故设定转向车流比例为定值,这里取 30%,其中左右转比例为 1:2,因此,交叉口进口道各方向车流比例取值为 1:7:2。

由图 7 可知,东进口和西进口、南进口和北进口的渠化设计一致,为了方便计算排放,假设东西进口道的流量一样,南北进口道的流量也一样,在此条件下,研究不同流量下(表 4)交叉口排放的变化规律。

### 2.3.3 交叉口范围

依据城市道路交通设计指南,交叉口范围应该包括各进口道展宽段、渐变段及向外延伸 10~20 m 的总和。对于城市主干路上采用信号联动控制的交叉口,取展宽段 80 m,渐变段 60 m,延伸段 10 m。考虑到以上 3 种情景下,当交叉口小时流量为最大且到达类型为 1 时,停车车辆数最多,此时,最大排队车辆数为 26 辆(3 条车道),取  $k_j = 8 \text{ m}$ ,则最大排队

表 4 交叉口流量

Tab. 4 Different flows for the intersection

场景	进口道	方向	转向流量/(pcu · h <sup>-1</sup> )	流量/(pcu · h <sup>-1</sup> )
场景 1	东/西	左	135	5 400
		直	945	
		右	270	
	南/北	左	135	
		直	945	
		右	270	
场景 2	东/西	左	180	6 300
		直	1 260	
		右	360	
	南/北	左	135	
		直	945	
		右	270	
场景 3	东/西	左	225	7 200
		直	1 575	
		右	450	
	南/北	左	180	
		直	840	
		右	180	

长度为 72 m,因而取  $L_1=150$  m.

当车辆以加速度  $0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  加速至  $v_f$  时,加速距离为 75 m,考虑对向行车线间的距离,这里取  $L_2=210$  m.

### 3 交叉口排放和延误关系

交叉口运行效率受到交通量和信号配时参数很大影响.对于特定交叉口,信号周期不变,交通量变小时,可能造成交叉口车均延误相对增大;当交通量增大时,可能会形成较长排队,造成交通排放污染的增加.而交叉口交通量不变,信号周期变小时,可能造成车辆停车次数增多,使得交通排放量上升;当信号周期增大时,可能会增加部分车辆的等待时间.因而,交叉口的交通量和信号配时参数会对交叉口排放及延误产生较大的影响.研究在不同流量和周期条件下排放和延误的博弈关系显得尤为重要,这对于信号优化也具有重大意义.

#### 3.1 周期对车均排放和延误的影响

将以上各参数代入到交叉口排放估计算法和延误计算方法中获得不同到达类型条件下交叉口小时车均排放和小时车均延误.

图 8 为情景 2 中到达类型为 3 时交叉口污染物车均排放和车均延误关于周期的变化趋势.其他到达类型条件下周期对排放和延误的影响趋势类同.

由图 8 可直观看到,周期对交叉口车均排放和车均延误的影响规律.

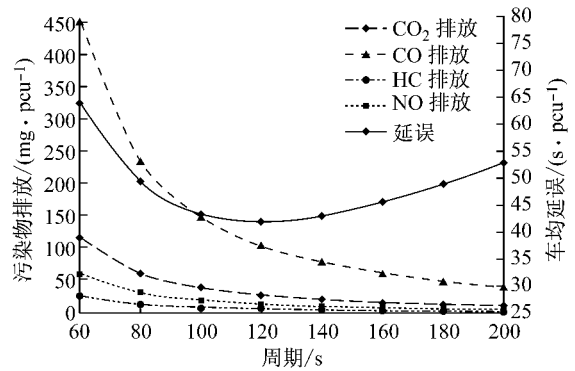


图 8 周期长度对污染物车均排放和车均延误的影响

Fig. 8 Impact of cycle on emissions and delay

#### 3.1.1 周期对车均排放的影响

##### 3.1.1.1 到达类型确定

随着周期长度增加,车均排放污染物呈现减小的趋势,可以解释为周期增大,小时内损失时间和停车次数减小,而停车次数对排放有很大的影响<sup>[23]</sup>.

表 5 为情景 2 条件下到达类型为 3 时的车均排放污染物随周期变化的减小率.

表 5 各排放物随周期的减小率

Tab. 5 Percentage decrease in emissions as function of cycle

周期	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO
80	47.46	48.27	48.09	48.16
100	35.91	36.48	35.28	36.78
120	29.40	29.90	28.38	30.34
140	24.91	25.39	23.76	25.89
160	21.59	22.04	20.40	22.57
180	19.01	19.45	17.83	19.99
200	16.96	17.38	15.80	17.93
平均减小率	20.62	21.07	19.45	21.59

由表 5 知:①随着周期长度的增加,车均排放逐渐减小,且减小率也呈下降趋势,说明周期增大对减小车均排放的边际效益在减小;②4 种污染物对周期变化的敏感度由强到弱分别为: NO、CO、CO<sub>2</sub>、HC,如图 9 所示.

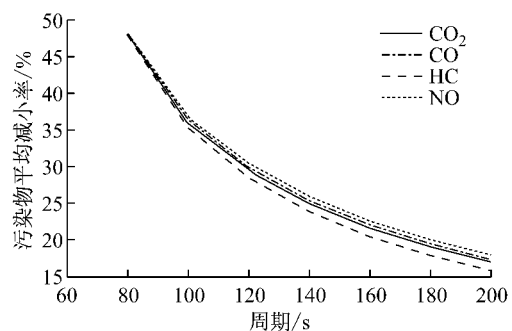


图 9 污染物排放减小率趋势

Fig. 9 Tendency of four emissions' decrease rate

### 3.1.1.2 到达类型不确定

表 6 为情景 2 条件下不同到达类型的平均车均排放减小率。

表 6 平均车均排放减小率

Tab. 6 Emissions' average decrease rate for all

arrival types					%
到达类型	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO	
类型 1	26.81	27.40	25.61	27.97	
类型 2	27.62	28.16	26.70	28.60	
类型 3	27.89	28.42	27.08	28.81	
类型 4	28.16	28.67	27.46	29.01	
类型 5	28.73	29.17	28.28	29.39	
类型 6	28.67	29.06	28.25	29.26	

由表 6 可知:各污染物的平均车均排放减小率先增大后减小,说明信号联动质量越好,对减小各污染物车均排放量的意义越大。到达类型为 6 时,相比类型 5,各污染物的平均排放减小率有所下降。因此,优化信号配时参数(周期和绿信比)提高交叉口信号联动质量,对减小排放有极其重要的意义。

### 3.1.2 周期对车均延误的影响

随着周期长度增加,车均延误呈现先减小后增大的趋势,主要原因为:周期小于最优周期时,会增加车辆停车次数和损失时间,周期大于最优周期时,造成车辆等待时长增加。

#### 3.1.2.1 到达类型确定

图 10 为情景 2 中到达类型为 3 时的延误变化趋势,表 7 为车均延误随周期改变的变化率(符号为正则是增长率,符号为负则是减小率)。

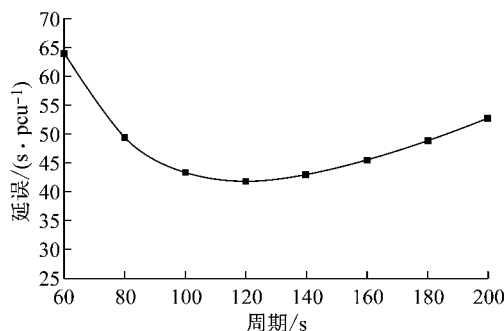


图 10 周期对延误的影响

Fig. 10 Impact of cycle on delay

表 7 延误变化率

Tab. 7 Change rate of delay

周期/s	变化率/%	周期/s	变化率/%
80	-22.74	160	5.88
100	-12.25	180	7.39
120	-3.39	200	7.93
140	2.59		

由表 7 知,延误的减小率减小,而增长率增大,

即变化率的绝对值先减小后增大。综合图 10 和表 7 可知,在信号配时参数中,周期大小与最优周期的绝对值之差越大,延误越大。

#### 3.1.2.2 到达类型不确定

图 11 为不同到达类型的车均延误随周期变化情况,由图可得,信号联动质量越好,对应的最优周期越大,且周期相同时对应的车均延误越小。

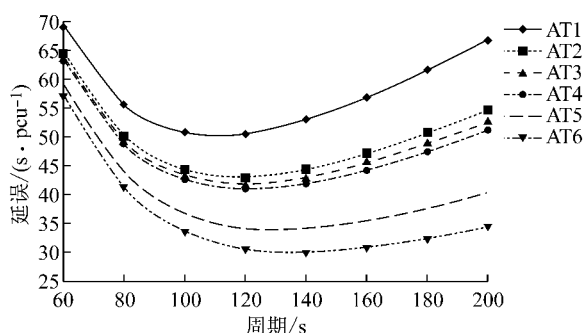


图 11 不同到达类型条件下的延误

Fig. 11 Delay under different arrival types condition

表 8 为周期大于最优周期时,不同到达类型对应的延误平均增长率。显然,信号联动质量越好,延误的平均增长率越小,说明信号配时参数越合理,周期的增大对延误的影响越小。

表 8 不同到达类型的延误平均增长率

Tab. 8 Delay' average increase rate for different arrival type

到达类型	延误平均增长率/%	到达类型	延误平均增长率/%
1	7.17	4	5.79
2	6.16	5	5.78
3	5.95	6	4.86

### 3.1.3 车均延误的博弈关系

对于不同情景和不同到达类型条件下,当周期时长小于最优周期  $C_d$  (延误最小对应的周期时长) 时,车均排放和车均延误都呈现下降的趋势;当周期时长大于最优周期  $C_d$  时,车均排放仍然呈现下降趋势,而延误为增加的趋势。排放和延误的博弈关系是指随着周期长度的增大,排放和延误的变化趋势呈现出相反的社会效益,区间  $[C_d, C_{\max}]$  为博弈区间。因而,研究排放和延误的变化关系对于信号优化有着重要意义。表 9 为情景 2 条件下的博弈区间内到达类型为 3 时的车均排放减小率和车均延误增长率;表 10 和图 12 为博弈区间内不同到达类型的车均排放和车均延误随周期变化的变化率。

由表 9 和表 10 可知,博弈区间内,①在确定的车辆到达类型情况下,周期越大,车均排放减小,其减小率在减小;延误增大,其增长率在增大;说明周



表 9 确定到达类型的车均排放和车均延误变化率

Tab. 9 Emission and delay changes under arrival type 3

周期	排放减小率/%				延误增长率/%
	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO	
140	24.91	25.39	23.76	25.89	2.59
160	21.59	22.04	20.40	22.57	5.88
180	19.01	19.45	17.83	19.99	7.39
200	16.96	17.38	15.80	17.93	7.93

表 10 不同到达类型车均排放和车均延误的平均变化率

Tab. 10 Average variation rate of emissions and delay under different arrival types

到达类型	排放减小率/%				延误增长率/%
	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO	
类型 1	19.97	20.51	18.61	21.17	7.17
类型 2	20.46	20.94	19.24	21.50	6.16
类型 3	20.62	21.07	19.45	21.59	5.95
类型 4	20.77	21.19	19.65	21.68	5.79
类型 5	21.11	21.46	20.12	21.86	5.78
类型 6	21.23	21.54	20.29	21.91	4.86

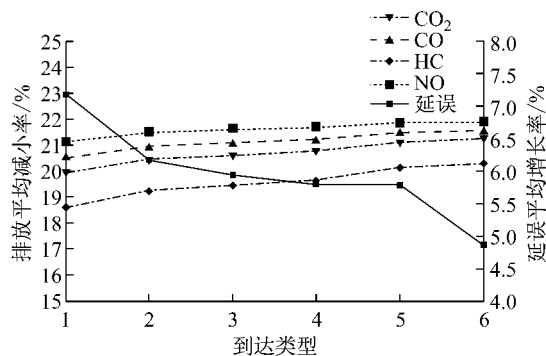


图 12 排放和延误的平均变化率趋势

Fig. 12 Trend of emissions and delay's average variation rate

期增大,排放的减小速度在减弱,且延误增加的速度在增大,故并不是信号周期越长就能达到越好的综合效用(同时考虑排放和延误). ②信号联动质量越好( $P$  值越大),各污染物车均排放减小率越大,延误增加率越小,由此说明信号优化时,除了优化信号周期,还应合理分配各相位的绿信比,尽可能使绿灯相位通过的车辆数最多.

### 3.2 流量对车均排放和延误的影响

同样,应用以上算法得到不同到达类型下各场景随流量变化的小时车均排放和车均延误,并研究流量对交叉口车均排放和车均延误的影响.

图 13 为到达类型为 3、周期为 100 s 的交叉口车均排放和车均延误的变化趋势,表 11 为各污染物和延误随流量的变化率.

#### 3.2.1 流量对车均排放的影响

##### 3.2.1.1 到达类型确定

由图 13 和表 11 可知,交叉口车均排放对流量

的敏感性较弱,在其他条件不变的情况下,交叉口的交通流量增大,4 种污染物的变化率的绝对值均小于 1%.

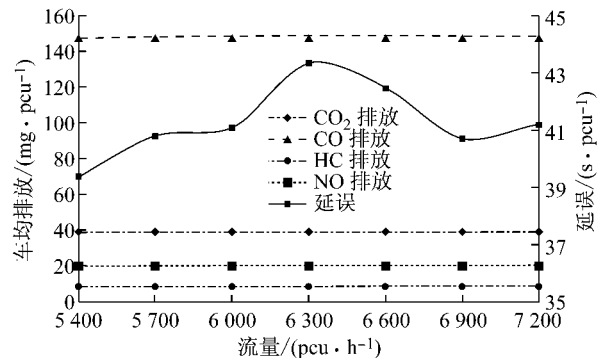


图 13 流量对车均排放和延误的影响

Fig. 13 Impact of flow on emissions and delay

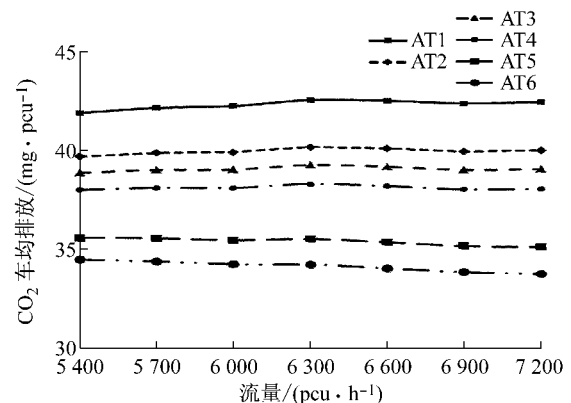
表 11 车均排放和延误随流量变化的变化率

Tab. 11 Variation rate of emissions and delay with flow changing

流量/ (pcu · h <sup>-1</sup> )	车均排放变化率/%				延误变化率/%
	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO	
5 700	0.39	0.38	0.57	0.31	3.62
6 000	0.04	0.07	0.03	0.08	0.70
6 300	0.60	0.57	0.88	0.47	5.47
6 600	-0.21	-0.16	-0.36	-0.09	-2.05
6 900	-0.42	-0.34	-0.68	-0.23	-4.09
7 200	0.15	0.17	0.19	0.16	1.20

#### 3.2.1.2 到达类型不确定

车均排放受流量的影响很小,图 14 为不同到达类型条件下,周期为 100 s 时,流量对 CO<sub>2</sub> 的影响.表 12 为不同到达类型条件下,排放的平均变化率.

图 14 流量对 CO<sub>2</sub> 车均排放的影响Fig. 14 Impact of flow on CO<sub>2</sub> emission

由表 12 可知,信号联动质量对排放的影响较大.其中,联动质量较差时,流量变化会造成车均排放增大;当联动质量很好时,因为流量变化造成的车均排放增大效应减弱;当联动质量较好时,流量变化

表 12 排放随类型变化的平均变化率

Tab. 12 Average variation rate of emissions with flow changing %

到达类型	CO <sub>2</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>
类型 1	0.22	0.27	0.26	0.26
类型 2	0.13	0.17	0.16	0.17
类型 3	0.08	0.12	0.10	0.12
类型 4	0.02	0.05	0.02	0.05
类型 5	-0.21	-0.21	-0.30	-0.18
类型 6	-0.35	-0.36	-0.50	-0.31

注:正值表示增长率,负值表示减小率。

使得车均排放减小,其主要原因是,信号控制协调性变好,减少了停车次数。结合图 14 可知,改善信号联动质量对减小车均排放有重要意义。

### 3.2.2 流量对延误的影响

#### 3.2.2.1 到达类型确定

由图 13 和表 11 可知,相比流量对车均排放的影响,车均延误的变化随着交叉口流量变化具有较大波动性。考虑到流量对排放和延误的影响特征,在实际信号控制策略中,可根据流量变化(如高峰和平峰的变化),更多地从延误角度考虑进行信号优化,获得更高的综合效益。

#### 3.2.2.2 到达类型不确定

图 15 为不同到达类型条件下,周期为 100 s 时,流量对延误的影响。

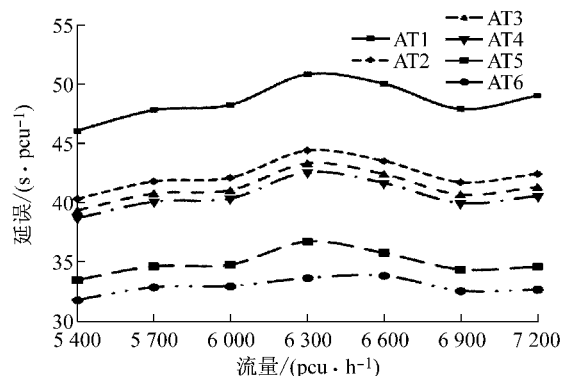


图 15 流量对延误的影响

Fig. 15 Impact of flow on delay

由图 15 可知,流量增大,延误的波动性较大;到达类型对延误也具有重大影响,即信号联动质量越好,改善延误的效果越好。

### 3.2.3 车均排放和车均延误的关系

由上文分析知,车均排放对流量的敏感性较弱,相反,延误对流量的敏感性较强。两者关于流量的博弈关系不明显。故在信号优化时,一是较多地考虑延误,二是采取交通管理策略(诱导或单向通行等)调整交叉口流量大小,达到更好的交叉口运行效益。

## 4 结论与展望

首先,考虑车辆通过交叉口的不同到达类型,基于交通波理论重构车辆运行轨迹,依此结合 VSP 排放变量提出交叉口排放估计算法。然后,结合 HCM 2010 中延误模型计算交叉口延误,并通过实证数据提取了车辆进入并通过交叉口的轨迹,对匀速、减速和加速过程的参数进行实证标定,分别研究了信号周期与流量对排放与延误的影响。主要内容有:①考虑交叉口车辆到达类型。②考虑转向车运行特性对车辆运行轨迹的影响,基于转向车和直行车的不同运行特性,分别对左转、直行和右转车的轨迹进行了探讨。③研究了交叉口排放和延误关于周期/流量的博弈关系。

结果表明:①在相同条件下,交叉口联动质量越好,交叉口车均排放和延误越小;②随着信号周期增大,交叉口车均排放和延误变化趋势存在一致区间和博弈区间(在一致区间内,两者都呈现出减小的趋势;在博弈区间内,车均排放减小而延误增加),对于信号联动质量越好的交叉口,博弈区间的下限值越大,则最优周期值越大;③流量对车均排放的影响较小(流量变化引起的排放变化率其绝对值小于 1%)时对延误的影响较大。为此,在信号优化时,通过调整信号周期和绿信比,使得在绿灯期间通过的车辆数最大化,从而在考虑车辆排放的前提下,提高交叉口运行效率。此外,可通过交通管理策略来改善交叉口整体运行状况。

在排放估计算法中,还存在一些缺陷,如:没有考虑匀速状态下速度的波动性和车型及其比例对交叉口排放的影响,且对过饱和状态下的排放算法未进行分析。后续将针对算法的缺点进行完善。

### 参考文献:

- [1] BURÓN J M, APARICIO F, IZQUIERDO Ó, *et al.* Estimation of the input data for the prediction of road transportation emissions in Spain from 2000 to 2010 considering several scenarios [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (30): 5585.
- [2] 张潇. 交通信号控制策略对机动车尾气排放的影响评价[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.  
ZHANG Xiao. The evaluation of impact of traffic signal control strategy on motor vehicle exhaust emissions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [3] PARK J, NOLAND R, POLAK J. Microscopic model of air pollutant concentrations: Comparison of simulated results with

- measured and macroscopic estimates [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2001 (1750): 64.
- [4] SERVINO, BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. An energy and emissions impact evaluation of intelligent speed adaptation [C]//Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. [S.l.]: IEEE, 2006: 1257-1262.
- [5] AHN K, KRONPRASERT N, RAKHA H. Energy and environmental assessment of high-speed roundabouts [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2009 (2123): 54.
- [6] HALLMARK S, WANG B, MUDGAL A, *et al.* On-road evaluation of emission impacts of roundabouts [J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2011 (2265): 226.
- [7] STANEK D, BREILAND C. A quick estimation method for greenhouse gas emissions at intersections[EB/OL]. [2016-06-02]. [https://www.researchgate.net/publication/292995657\\_A\\_Quick\\_Estimation\\_Method\\_for\\_Greenhouse\\_Gas\\_Emissions\\_at\\_Intersections](https://www.researchgate.net/publication/292995657_A_Quick_Estimation_Method_for_Greenhouse_Gas_Emissions_at_Intersections).
- [8] SONG G, YU L, ZHANG Y. Applicability of traffic microsimulation models in vehicle emissions estimates; Case study of VISSIM[J]. Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2270: 132.
- [9] AHN K, RAKHA H, TRANI A, *et al.* Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels[J]. Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(2): 182.
- [10] PAPSON A, HARTLEY S, KUO K L. Analysis of emissions at congested and uncongested intersections using MOVES2010 [EB/OL]. [2016-06-02]. <http://docs.trb.org/prp/12-0684.pdf>.
- [11] SKABARDONIS A, GEROLIMINIS N, CHRISTOFA E. Prediction of vehicle activity for emissions estimation under oversaturated conditions along signalized arterials[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2013, 17(3): 191.
- [12] SHABIKHANI R, GONZALES E J. Analytical model for vehicle emissions at signalized intersection; Integrating traffic and microscopic emissions models[J]. Digestive Diseases & Sciences, 2013, 58(9):2594.
- [13] CHIOU Y C, CHIOU Y S, HSIEH C W. An integrated emission and dispersion model under mixed traffic conditions[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2013, 10: 1786.
- [14] KHALIGHI F, CHRISTOFA E. Emission-based signal timing optimization for isolated intersections [J]. Transportation Research Record, 2015, 2487: 1.
- [15] SALAMATI K, ROUPHAIL N M, FREY H C, *et al.* Simplified method for comparing emissions in roundabouts and at signalized intersections [EB/OL]. [2016-06-02]. [https://www.researchgate.net/publication/282511392\\_Simplified\\_Method\\_for\\_Comparing\\_Emissions\\_in\\_Roundabouts\\_and\\_at\\_Signalized\\_Intersections](https://www.researchgate.net/publication/282511392_Simplified_Method_for_Comparing_Emissions_in_Roundabouts_and_at_Signalized_Intersections).
- [16] SUN Z, HAO P, BAN X J, *et al.* Trajectory-based vehicle energy/emissions estimation for signalized arterials using mobile sensing data [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 27.
- [17] STATHOPOULOS F, NOLAND R. Induced travel and emissions from traffic flow improvement projects [J]. Transportation Research Record, 2003, 1842: 57.
- [18] NAM E K, GIERCZAK C A, BUTLER J W. A Comparison of real-world and modeled emissions under conditions of variable driver aggressiveness[EB/OL]. [2016-06-02]. [https://www.researchgate.net/publication/228905969\\_A\\_comparison\\_of\\_real-world\\_and\\_modelled\\_emissions\\_under\\_conditions\\_of\\_variable\\_driver\\_aggressiveness](https://www.researchgate.net/publication/228905969_A_comparison_of_real-world_and_modelled_emissions_under_conditions_of_variable_driver_aggressiveness).
- [19] AHN K, RAKHA H. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2008, 13 (3): 151.
- [20] CHAMBERLIN R, SWANSON B, TALBOT E, *et al.* Analysis of MOVES and CMEM for evaluating the emissions impact of an intersection control change [C]//Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington D C: National Research Council, 2011: 11-0673.
- [21] De COENSEL B, BOTTELDOOREN D. Traffic signal coordination: A measure to reduce the environmental impact of urban road traffic [C]//40th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Inter-Noise-2011). Osaka: Institute of Noise Control Engineering Japan, 2011: 4218-4223.
- [22] GHAFGHAZI G, HATZOPOULOU M. Simulating the environmental effects of isolated and area-wide traffic calming schemes using traffic simulation and microscopic emission modeling [J]. Transportation Research Board, 2014, 41 (3): 633.
- [23] RAKHA H, DING Y. Impact of stops on vehicle fuel consumption and emissions [J]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(1): 23.
- [24] ROUPHAIL N M, FREY H C, COLYAR J D, *et al.* Vehicle emissions and traffic measures; exploratory analysis of field observations at signalized arterials [C/CD]//80th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington D C: [s.n.], 2001.
- [25] ZHANG K, FREY H C. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(6): 777.
- [26] Transportation Research Board. Highway capacity manual[M]. Washington D C: Natinal Research Council, 2010.