

耦合元胞自动机的尾气排放规律数值模拟

冯焕焕, 邓建华

(苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘 要: 为分析城市道路实际交通条件下汽车尾气的排放规律, 对元胞自动机的 MCD 模型和 STCA 模型进行改进, 构建一种基于速度-加速度查询表耦合交通流元胞自动机的汽车尾气排放量统计模型。在不同交通流服务水平下运行该耦合模型, 以获取速度、加速度及工况。对单车的工况分布、3 种典型尾气排放历程及 1 h 与 1 km 排放总量进行统计分析, 结果表明, 该模型耦合机理清晰, 可用于实际交通服务水平下单车及车流尾气排放规律的分析。

关键词: 城市道路; 元胞自动机; 速度-加速度查询表; 工况分布; 尾气排放规律

中文引用格式: 冯焕焕, 邓建华. 耦合元胞自动机的尾气排放规律数值模拟[J]. 计算机工程, 2018, 44(6): 311-315.

英文引用格式: FENG Huanhuan, DENG Jianhua. Numerical simulation of exhaust emission regularity coupled with cellular automaton[J]. Computer Engineering, 2018, 44(6): 311-315.

Numerical Simulation of Exhaust Emission Regularity Coupled with Cellular Automaton

FENG Huanhuan, DENG Jianhua

(College of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China)

[Abstract] In order to analyze the exhaust emission regularity under the actual traffic conditions of urban roads, the MCD and STCA models of cellular automaton are improved, on this basis, a model based on the speed-acceleration query table coupled with traffic flow cellular automaton is built for vehicle emission statistics. The coupling model is implemented under different traffic flow service levels, and the speed, acceleration and working conditions are obtained. The distribution of the vehicle's working conditions, three typical exhaust emission processes, and the total emissions of 1 h and 1 km are statistically analyzed. The results show that the coupling mechanism of the model is clear, and it can be applied to analyze the discharge regularity of single vehicle and vehicle flow under the actual traffic service levels.

[Key words] urban road; cellular automaton; speed-acceleration query table; working conditions distribution; exhaust emission regularity

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047478

0 概述

城市道路上汽车尾气的排放对大气环境造成严重影响, 如何设计一种能有效分析实际交通流条件下尾气排放规律的方法, 已成为国内外学者共同面对的重要课题^[1-3]。目前, 用于测定道路上车辆行驶状态下尾气排放量的模型, 主要是基于速度-加速度统计排放率, 国外研究者对该模型的建立步骤为: 在对本地区车辆类型、燃油种类、道路及交通流条件等各种因素细分的基础上, 进行大量排放数据实测, 然后通过统计分析建立速度-加速度矩阵与平均油耗排放率相对应的查询表模型^[3]。美国环保署(EPA)最新发布的 MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) 就是

其中的典型代表^[2-4]。目前, 国内较少建立基于本地化实测数据的查询表模型, 在测定某道路实际交通流状态下的尾气排放时, 一般采用移动车载尾气分析仪对实验车的排放进行实测, 测定实验车跟随交通流行驶过程中排放的几种典型尾气的体积百分比, 同时通过车载 GPS 获取实验车同步行驶特征数据^[5-6]。该方法实质上是以某时段内实验车的排放规律来近似测试路段车流的整体排放情况, 因此, 其存在一定的局限性。

随着商业化交通微观仿真软件的发展, 近年来, 许多学者开始通过交通仿真来获取车辆的行驶状态数据, 将其用于车辆尾气排放规律的测定^[6-8]。该方法可以克服查询表模型本地化过程的复杂性及实测

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151201); 苏州科技大学基金(341311108, XKQ201305)。

作者简介: 冯焕焕(1979—), 女, 副教授、硕士, 主研方向为网络优化、交通仿真; 邓建华, 副教授、硕士。

收稿日期: 2017-06-05 **修回日期:** 2017-07-15 **E-mail:** huanhuan0315@126.com

法的局限性问题。其中,基于元胞自动机理论的交通流微观仿真模型具有在时间、空间上能实现任意分辨率离散的特点^[9],因此,本文提出一种基于速度-加速度查询表耦合交通流元胞自动机改进模型的汽车尾气排放量统计方法,并建立适合测定、分析不同交通流条件下城市道路上汽车尾气排放规律的数值模拟平台。

1 交通流仿真耦合排放率模型

文献[10]发现汽车油耗排放率与车辆行驶过程需要输出的功率大小有关,并提出机动车比功率(Vehicle Specific Power, VSP)的概念,来表述发动机每移动 1 t 质量所输出的功率。

MOVES 模型对其他参数标定后的 VSP 进行简化,如式(1)所示,车辆瞬时油耗排放率 ER 与 VSP 的关系^[10]如式(2)所示。

$$VSP = (1.1a + 0.132)v + 9.8 \times \alpha + 0.000302v^3 \quad (1)$$

$$ER = f(VSP) =$$

$$f((1.1a + 0.132)v + 9.8 \times \alpha + 0.000302v^3) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知:

$$ER = f(v, a, \alpha) \quad (3)$$

其中, v 、 a 、 α 分别表示车辆的速度、加速度、道路的坡度。

由式(3)可知,在道路坡度一定的情况下,车辆瞬时油耗排放率与车辆行驶过程中某时刻的瞬时速度和加速度有关,该关系表示交通仿真模型耦合排放率模型是可行的。

2 基于交通仿真模拟的排放量测定方法

根据 MOVES 系统基于速度-加速度查询表中汽车尾气排放量的统计方法,本文提出一种适合交通流仿真耦合排放率模型的单车基准排放率及车流排放总量测定方法,该方法步骤如下:

1) 通过元胞自动机模型对交通流进行仿真,获取车辆运行信息,如瞬时速度、加速度、匀速运行时间、怠速时间等,同时自动统计车辆加速、减速、匀速、怠速 4 种工况的区间分布。

2) 在不考虑燃油、气象等修正信息的情况下,根据车辆运行信息与每个工况区间的对应关系,导入 MOVES 默认的基准排放率,并在元胞自动机模型中建立查询表。

3) 累计测定车辆运行过程中每秒的尾气排放量,并测定单车在整个排放历程中的排放量。

4) 将测定时间内、测定目标路段上所有车辆的排放量累加,得到车流排放总量。

由上述步骤可知,车辆运行工况分布是测定车辆瞬时排放率的又一重要参数。本文通过改进元胞自动机交通流模型,使其能获取任意车辆在整个排放历程中的瞬时速度、加速度,同时得到运行工况的详细分布。

3 耦合排放率的交通流元胞自动机模型

3.1 交通流元胞自动机模型选取

自首个基于元胞自动机理论的 NaSch 模型被建立以后,先后出现了引入慢启动机制的 TT 模型、BJH 模型、VDR 模型、近似考虑前车速度效应的 VE 模型,以及因考虑司机驾驶策略影响而引入前车刹车效应的 CD 模型、MCD 模型^[11]。经过不断改进,模型模拟车辆行驶速度、加减速状态越来越精细^[12-13]。文献[11]通过引入换道规则,提出对称双车道元胞自动机(Symmetric Two-lane Cellular Automaton, STCA)模型。为克服车辆出现“急刹急停”的现象,近年来出现了弹性换道规则模型,其能较好地模拟驾驶员在同步流中的驾驶行为。本文结合 MCD 模型和具有跟驰效应的 STCA 模型,提出一种改进的 MCD-STCA 模型。

3.2 改进 MCD-STCA 模型

3.2.1 模型设置

改进 MCD-STCA 模型设置如下。

1) 单位元胞尺寸:元胞自动机模型时空离散度越高,表示车辆行驶状态的分辨率越高(即获取瞬时车速、瞬时加减速状态及相应工况分布的精度越高),越适合与尾气排放率模型耦合,结果越精确。以典型城市主干路为例,假设道路设计速度为 60 km/h = 16.67 m/s,为获取足够高分辨率的瞬时速度,设置模型中车辆的一次更新最大为 15 格 = 16.67 m/s。车辆非怠速状态时至少前进一格,速度为 16.67/15 ≈ 1.11 m/s ≈ 4 km/h。本模型设单位元胞尺寸长为 1.11 m,宽为一个车道宽度,轻型车身长为 5 格 ≈ 5.55 m。

2) 元胞空间:纵向设置 12 000 个元胞单元,代表模拟路段长度为 13.32 km,采用周期边界;横向两元胞表示双车道。

3.2.2 模型演算规则

在 MCD-STCA 模型中,将典型 4 种工况定义为枚举变量 $wc = \text{enum}(A, D, U, I)$,其中, A 表示加速工况, D 表示减速工况, U 表示匀速工况, I 表示怠速工况。

以第 i 个车辆作为描述对象,第 $i+1$ 车辆表示 i 更新目标车道的紧邻前车。基于 MCD 模型考虑前车刹车灯状态、随机慢化的更新演化规则如下:

1) 确定慢化概率 p :

$$p = \begin{cases} p_b, b_{i+1}(t) = 1, t_h < t_s \\ p_0, v_i(t) = 0, t_{st} < t_c \\ p_d, \text{others} \end{cases}$$

其中, p_0 、 p_b 、 p_d 分别表示前方车辆停止、尾灯开启、其他情况引起的随机慢化概率, $b_{i+1}(t) = 1$ 或 0 表示前车 $i+1$ 刹车灯亮或灭, $t_h = d_i/v_i(t)$ 表示车头时距, $t_s = \min[v_i(t), h]$ 表示安全时间间距, h 表示设定的刹车灯影响范围, t_{st} 表示车辆停止时间, t_c 表示车辆慢启动时间。

2) 加速:

if ($b_{i+1}(t) = 0$ or $t_h \geq t_c$) and ($v_i(t) > 0$) then:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 2, v_{\max})$$

else if ($v_i(t) = 0$) then:

$$v_i(t+1) = \min(v_i(t) + 1, v_{\max})$$

else:

$$v_i(t+1) = v_i(t)$$

其中, v_{\max} 是车辆最大速度。

3) 减速:

$$v_i(t+1) = \min(d_i^{\text{eff}}, v_i(t+1))$$

其中, $d_i^{\text{eff}} = d_i + \max(v_{\text{anti}} - g_{\text{safety}}, 0)$ 表示有效距离, $d_i = x_{i+1} - x_i - l_{\text{veh}}$ 是第 i 辆车与紧邻前车间的空元胞数, l_{veh} 是车长, $v_{\text{anti}} = \min(d_{i+1}, v_{i+1})$ 是前车 $i+1$ 的期望速度, g_{safety} 是为确保不会撞车的最小安全车距。

4) 随机慢化:

if ($\text{rand}() < p$) then: $v_i(t+1) = \max(v_i(t+1) - 1, 0)$

5) 确定刹车灯状态 $b_i(t+1)$ 、工况 $wc_i(t+1)$ 、加速度 $ad_i(t+1)$:

if ($v_i(t+1) < v_i(t)$) then: $b_i(t+1) = 1; wc_i(t+1) = D$

if ($v_i(t+1) > v_i(t)$) then: $b_i(t+1) = 0; wc_i(t+1) = A$

if ($v_i(t+1) = v_i(t)$ and $v_i(t) \neq 0$) then: $b_i(t+1) = b_i(t); wc_i(t+1) = U$

if ($v_i(t+1) = v_i(t)$ and $v_i(t) = 0$) then: $b_i(t+1) = b_i(t); wc_i(t+1) = I$

$$ad_i(t+1) = v_i(t+1) - v_i(t)$$

其中, $ad_i(t+1)$ 是第 i 辆车第 $t+1$ 时刻的加速度。

6) 确定停止时间 t_{st} :

if ($v_i(t+1) = 0$) then: $t_{st} = t_{st} + 1$

if ($v_i(t+1) > 0$) then: $t_{st} = 0$

7) 车辆位置更新:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$$

8) 改进 STCA 模型的换道规则, 其中包含 2 个判断条件:

(1) 换道动机, $d_i^{\text{eff}} < \min(v_i + 1, v_{\max})$ and $d_{i,\text{other}}^{\text{eff}} > d_i^{\text{eff}}$ 。

(2) 安全条件, $d_{i,\text{back}} > g_{\text{safety}}$ 。

其中, 考虑跟驰效应, 设 $d_{i,\text{other}}^{\text{eff}}$ 为车辆与换道目标车道上紧邻前车间的有效距离, 因驾驶员对紧随的后车速度相对不敏感, 设 $d_{i,\text{back}}$ 为车辆与换道目标车道上紧随后车间的空元胞数。当同时满足上述 2 个条件时, 车辆换道并确定目标车道编号。

9) 换道后速度更新:

车辆换道时要加速, 换道后速度更新采用规则 2)、规则 5) 和规则 6); 纵向位置更新采用规则 7), 同时完成横向换道。

3.2.3 排放率查询表

车辆完成换道后进行速度更新时, 模型将输出 $VSP_i(t+1)$ 与 $t+1$ 时刻的工况, 查询由 MOVES 模型所得的排放率查询表 (见表 1), 获取每辆车在行驶过程中对典型气体 NO_x 、HC、CO 每秒的排放量。

表 1 排放率查询表

运行模式	NO_x	HC	CO
怠速	0.000 10	0.000 50	0.000 089
$VSP < 0$	0.000 34	0.001 30	0.017 690
$0 \leq VSP < 3$	0.000 52	0.000 10	0.028 880
$3 \leq VSP < 6$	0.001 22	0.000 19	0.026 620
$6 \leq VSP < 9$	0.002 15	0.000 26	0.038 200
$9 \leq VSP < 12$	0.003 81	0.000 36	0.055 390
$VSP \geq 12$	0.007 94	0.000 58	0.093 470

4 模型运行与单车排放分析

V/C 值是表征道路交通流服务水平的重要指标, V/C 值越大, 表示交通服务水平越低。模型运行时, 按照 V/C 值从 0 逐次递增 0.1 向系统内输入随机到达的车辆队列, 每种 V/C 条件运行 100 000 s, 以确保系统运行趋于稳定。为便于阐述, 随机选取一辆车作为尾气排放规律分析对象, 取最后 3 600 s (1 h) 的输出数据进行排放分析, 以检验本文耦合模型的有效性。

4.1 单车工况分布与排放时间历程分析

MOVES 模型工况区间是基于实测 1 min 内每秒速度的平均值来划分速度区间的。本文模型能获得每秒的瞬时速度及工况, 可以更准确地表达车辆微观驾驶行为对排放的影响。本文通过对输出数据的统计分析, 得出表 2 所示的不同 V/C 条件下单车 1 h 内每种工况的时间分布, 以及图 1 所示的工况分布规律。不同 V/C 条件下单车 1 h 内排放 NO_x 、HC、CO 的历程如图 2 ~ 图 4 所示 (图中横坐标代表时间, 以 60 s 为基本单位, 排放历程共 3 600 s)。

表 2 不同 V/C 条件下的 4 种工况时间分布

V/C 值	怠速/s	匀速/s	加速/s	减速/s
0.1	0	1 885	1 382	333
0.2	12	364	2 389	835
0.3	70	557	1 955	1 018
0.4	333	660	1 602	1 005
0.5	777	515	1 348	960
0.6	1 295	395	1 035	875
0.7	2 053	227	691	629
0.8	2 749	75	390	386
0.9	3 600	0	0	0
1.0	3 600	0	0	0

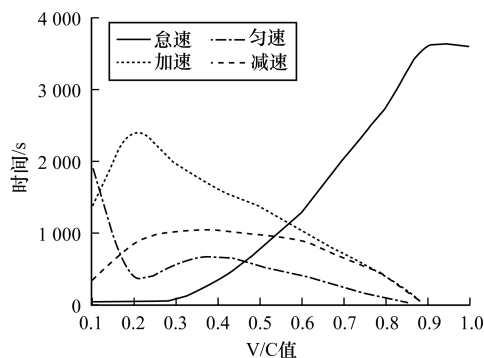
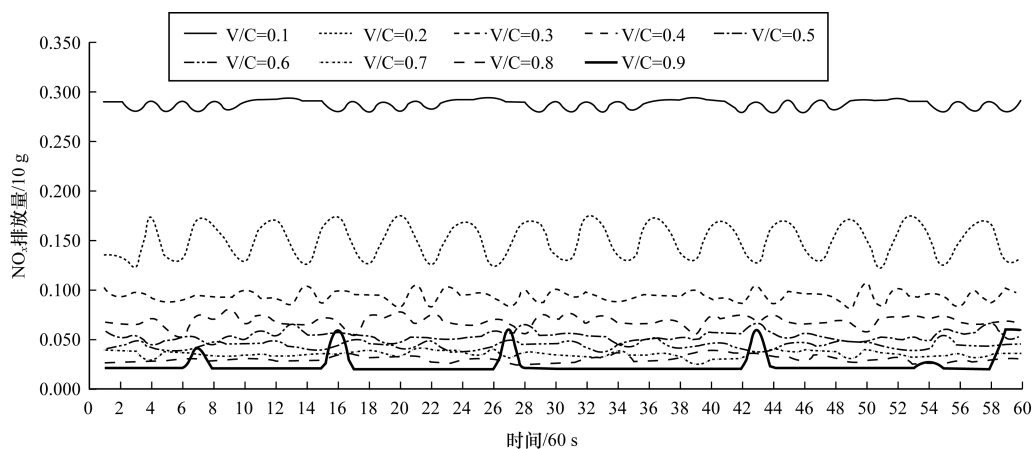
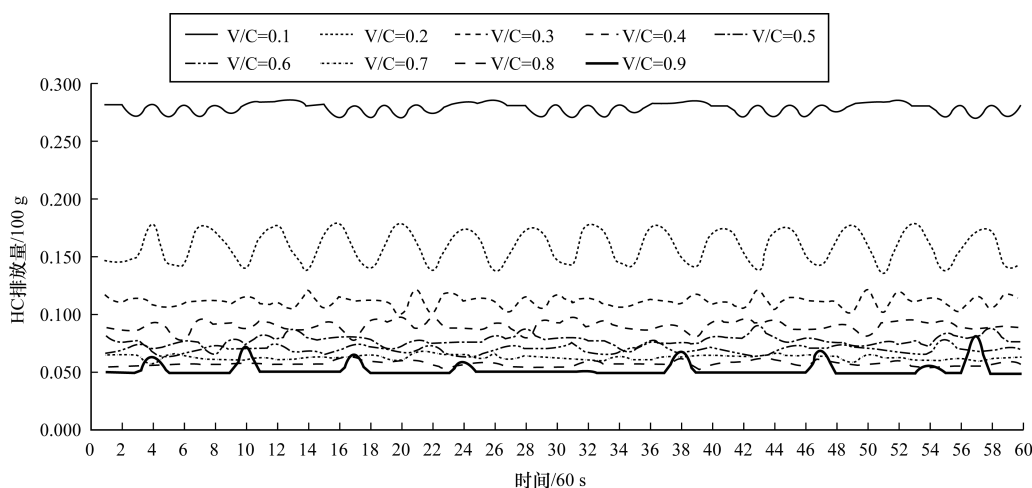
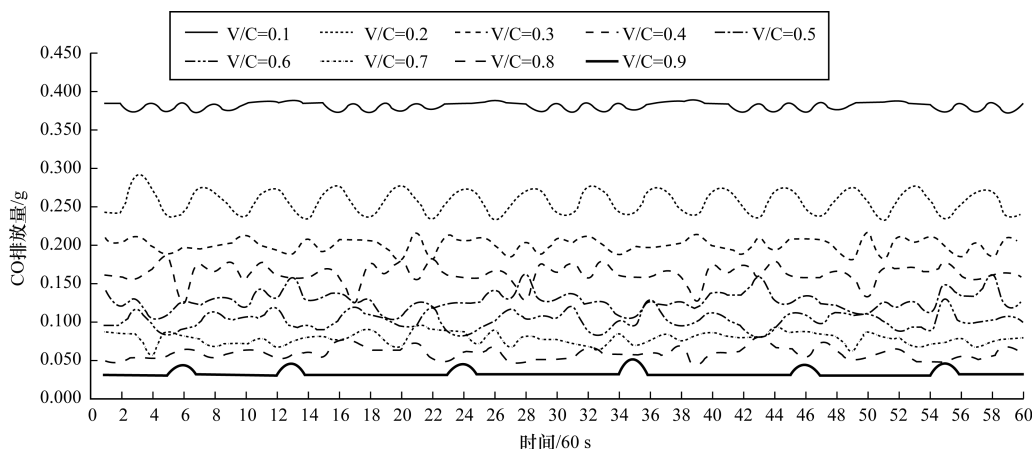


图 1 不同 V/C 条件下的 4 种工况分布规律

图 2 不同 V/C 条件下单车 1 h 内 NO_x 排放历程图 3 不同 V/C 条件下单车 1 h 内 HC 排放历程图 4 不同 V/C 条件下单车 1 h 内 CO 排放历程

从相应图表分析可以得出如下规律:

1) 当 $V/C=0.1$ 时,由表 2 和图 1 可知,车辆多数时间处于匀速或加速工况。交通流服务水平高,车流密度小,除少量车辆随机减速外,大部分车辆以自由流速度匀速行驶或换道加速,行驶历程中平均速度高。由图 2~图 4 也可以看出,因车辆行驶速度大,3 种尾气排放率都较大,加速、减速工况会使排放率曲线波动起伏,但波动平缓。

2) 当 $V/C=0.2$ 时,由表 2 和图 1 可知,车辆增多,保持匀速行驶工况的时间急剧下降,车辆间干扰增加,导致减速工况增加。

根据交通流三相理论,随着 V/C 值的增大,车流从自由流相进入同步流相,车流速度降低,由图 2~图 4 也可以看出,尾气排放率比 $V/C=0.1$ 时明显下降,其中, NO_x 平均降低 48.8%, HC 平均降低 44.4%, CO 平均降低 34.0%,说明排放率对速度变化敏感,这

与基于VSP的MOVES模型测定排放原理相吻合。在 $V/C=0.2$ 时加速工况最多,3种气体排放率曲线波动频率与幅度较大,说明加速工况对排放影响较大,与基于实测数据分析的相关研究结论基本一致^[14-15]。

3) 当 $0.3 \leq V/C \leq 0.6$ 时,由表2和图1可知,随着车流密度增加,车流呈宽运动堵塞相,车辆怠速工况增加,匀速、加速、减速工况呈减少趋势,双车道系统中换道车辆增多,平均行驶速度下降,速率趋缓。由图2~图4也可以看出,除CO的排放受 V/C 值、工况影响变动范围较大以外,其他2种气体变动范围较小。

4) 当 $0.7 \leq V/C \leq 0.9$ 时,由表2和图1可知,车辆怠速工况急剧增加,车辆维持匀速、加速的机会较少,大部分时间怠速运行。由图2~图4也可以看出,车辆在单位时间内3种气体排放量随时间的波动较小。

4.2 单车1 h与1 km行程排放量

对不同 V/C 条件下单车1 h行程和1 km行程排放量的影响进行分析,可为道路交通排放管理策略提供依据。根据本文提出的单车基准排放率与车流排放总量测定方法,得到单车在不同 V/C 条件下3种典型气体1 h行程和1 km行程排放量,分别如图5、图6所示。

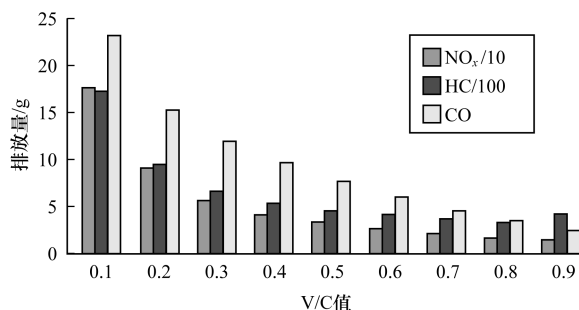


图5 不同 V/C 条件下单车1 h气体排放量

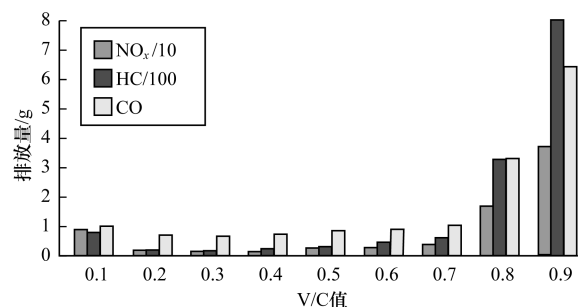


图6 不同 V/C 条件下单车1 km气体排放量

由图5可知, V/C 的大小对单车单位时间排放量的影响较大。随着 V/C 的增大,车辆速度降低,单车小时排放量减少,其中, NO_x 、CO排放量随着 V/C 的增大而减小,且变化趋势一致;HC排放量受怠速工况的影响较大,在 $V/C=0.8$ 时达到极小值,随后排放量变大,其规律与基于实测数据分析的相关研究结论基本一致^[15]。

由图6可知,对于单车1 km排放量,当 $V/C=0.1$ 时,驾驶员以较高发动机转速来维持自由速度行驶,气体排放量比低速运行时大(与图5一致);当 $0.2 \leq V/C \leq 0.7$ 时,排放量较小;当 $V/C \geq 0.8$ 时,车辆80%

以上的时间处于怠速工况,车辆排放量急剧增加。

5 结束语

本文对元胞自动机的MCD模型和STCA模型进行改进,使其更易于获取交通流中任意车辆的瞬时速度、加速度及工况。在此基础上,耦合排放模型,统计道路上单车尾气的基准排放率及车流排放总量。对模型进行模拟运行,结果表明,该模型耦合机理清晰,在建立有本地化实测数据查询表的条件下,可以将其用于道路实际交通服务水平下单车及车流排放规律的分析。为提高模型的适用性,下一步将探索采用实测道路源排放数据,以对该模型进行相关参数的本地化标定。

参考文献

- [1] BORIBOONSOMSIN K, BARTH M. Impacts of freeway high-occupancy vehicle lane configuration on vehicle emissions[J]. Transportation Research, Part D: Transport and Environment, 2008, 13(2): 112-125.
- [2] 胥耀方. 面向路段排放测算的车辆运行模式模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 160-168.
- [3] VALLAMSUNDAR S, LIN J. MOVES versus mobile: comparison of greenhouse gas and criteria pollutant emissions[C]//Proceedings of the 90th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington D. C., USA: [s. n.], 2011: 236-242.
- [4] 郭园园, 曹 罡. 基于深圳本地化 MOVES 模型微观层次敏感性分析[J]. 交通信息与安全, 2015, 33(2): 116-123.
- [5] 郝艳召, 宋国华, 邱兆文. 基于浮动车数据的机动车排放实时测算模型[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 396-402.
- [6] 黄 成, 刘 娟, 陈长虹, 等. 基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3725-3732.
- [7] 黎 明, 宋国华, 于 雷, 等. 基于 VISSIM 的道路交通排放评价可行性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(5): 56-63.
- [8] 陆 涛, 刘 箴, 刘婷婷, 等. 基于跟驰模型的车辆虚拟仿真方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(6): 305-309.
- [9] 邓建华. 自行车 CA 模型的元胞长度动态修正[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 252-254.
- [10] STEVANOVIC A, STEVANOVIC J, ZHANG K, et al. Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions: integrated approach with VISSIM, CMEM, and VISGAOST[J]. Transportation Research Record, 2009, 21(8): 105-113.
- [11] YUAN Y M, JIANG R. Synchronized flow and phase separation in a two-lane cellular automaton model[J]. International Journal of Modern Physics C, 2007, 18(2): 267-279.
- [12] 刘应东, 牛惠民, 王建强. 考虑安全移动距离的交通流元胞自动机模型[J]. 计算机工程, 2015, 41(6): 18-23.
- [13] 邱小平, 于 丹, 孙若晓, 等. 基于安全距离的元胞自动机交通流模型研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(2): 54-60.
- [14] ZHAO Y. Computationally efficient approaches to integrating the MOVES emissions model with traffic simulators[J]. Procedia Computer Science, 2013, 35(5): 882-887.
- [15] 于 雷, 宋国华, 陈旭梅, 等. 交通排放评估与实践案例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.

编辑 吴云芳