

文章编号:1671-6833(2014)06-0086-05

基于运行模式分布的平面交叉口汽车排放评估

邱兆文¹, 张广昕², 郝艳召¹

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 聊城职业技术学院 汽车学院, 山东 聊城 252000)

摘要: 为了高分辨率地评估微观交通区域汽车污染物的排放清单, 引入了美国新一代交通排放模型 MOVES, 并分析了 3 种交通运行参数的敏感性; 以典型平面信号交叉口为研究对象, 通过实测及统计分析得到了反映汽车交叉口运行特征的运行模式分布; 考虑交叉口信号灯不同方向的配时权重, 运用 MOVES 模型评估了典型平面交叉口的 $PM_{2.5}$ 和 CO 排放清单; 最后模拟了压缩天然气 (CNG) 替代常规燃料后交叉口 $PM_{2.5}$ 、CO 的量化减排效益. 研究结果表明, 基于运行模式分布的排放评估更能反映交叉口汽车运行特征, 计算结果更精确; CNG 在公交车上推广后, 案例中交叉口区域的 $PM_{2.5}$ 和 CO 排放清单分别降低 66% 和 5%.

关键词: 交通工程; 平面交叉口; 汽车排放评估; 运行模式分布; MOVES 模型

中图分类号: U491.9 **文献标志码:** A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.021

0 引言

作为城市道路交通系统中的重要部分, 平面交叉口不仅是人、车密集活动的区域, 也是交通污染的热点 (Hot-spot) 之一^[1]. 交通源细粒子 $PM_{2.5}$ (直径小于或等于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物) 主要源于汽车尾气、刹车片磨损和轮胎路面磨损及扬尘^[2], 其对呼吸系统和心血管系统健康有直接的危害, 长期处于 $PM_{2.5}$ 的暴露下甚至会缩短人的寿命^[3]. 一氧化碳 (CO) 是一种汽车发动机含碳燃料不完全燃烧产生的污染物. CO 浓度的上升, 尤其在交通微环境 (城市道路交叉口、公交车站、拥堵路段两侧等局部区域) 内, 将会增加公众死亡率, 加剧心血管疾病发生以及诱发其他健康问题^[4-5]. 环境评估可以促进交通污染控制技术进步, 但是当前基于固定监测点的环境评估是从宏观上反馈交通污染控制效果, 而不适用于道路交叉口这类微观交通环境下空气质量评估的需要^[6-7]. 因此, 有必要开展微观交通环境空气质量评估的研究. 精确量化交通污染物排放清单是微观交通空气质量评估的关键环节, 将为建立空气质量模型提供可靠的排放源强数据.

交通排放模型是量化交通污染物排放的工具, 目前较为成熟地应用于微观交通环境评估的模型主要有美国的 CMEM (综合模式排放模型)、IVE (国际排放模型)、MOVES 模型, 欧洲的 COPERT 系列模型、ARTEMIS (交通排放模型清单评估系统) 等. 我国学者主要依托国外模型, 通过对其重要参数修正进行模拟研究^[8]. 由于 MOVES 模型拥有一个系统完整的机动车排放数据库, 这就给我们在当前中国机动车排放数据库尚未建立的前提下评估交通污染物排放清单提供了借鉴. 为此, 引入美国新一代交通排放模型 MOVES, 对 3 种交通运行参数方法进行了对比分析, 运用基于运行模式分布的排放评估方法测算了典型平面交叉口的 $PM_{2.5}$ 和 CO 排放清单, 并模拟了公交车用 CNG 替代常规燃料后的减排效果. 研究成果对微观交通环境评估具有重要的理论意义和实用价值.

1 MOVES 排放模型及其 3 种交通运行输入参数

1.1 MOVES 模型

MOVES (MOTOR Vehicle Emission Simulator) 模

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-09-18

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2013M532006); 陕西省博士后科研资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (0009-2014G1221022)

作者简介: 邱兆文 (1975-), 男, 江苏徐州人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事汽车排放与交通环境研究, E-mail: qzw@chd.edu.cn.

型是由美国 EPA 的 OTAQ (Office of Transportation and Air Quality) 组织开发,用于多尺度评估道路移动源排放清单的评估. MOVES 模型是基于机动车比功率 (VSP , Vehicle-specific power) 原理开发的, VSP 参数量化了与各种机动车和运行工况特征相关的汽车排放和油耗^[9]. VSP (单位:吨功率) 定义为单位质量机动车的瞬时功率,它表示发动机克服车轮旋转阻力、空气动力学阻力做功以及机动车的动能和势能所需要输出的功率和因内摩擦阻力造成的传动系统的机械损失功率. 其数值与速度和减速度有关,如式(1)所示.

$$VSP = \frac{A_r + BV^2 + CV^3 + MV(a + g\sin\theta)}{M} \quad (1)$$

式中: V 为车速, m/s ; a 为车辆加速度, m/s^2 ; A_r 为滚动阻力系数, $kW/(m \cdot s^{-1})$; B 为滚动阻力系数的速度调整系数, $kW/(m \cdot s^{-2})$; C 为空气阻力系数, $kW/(m \cdot s^{-3})$; M 为车辆质量, t ; g 为重力加速度常数, $9.81 m \cdot s^{-2}$; θ 为道路坡度, $(^\circ)$.

基于 VSP 公式(1)可以计算出机动车的运行模式分布. MOVES 模型正是基于运行模式与排放率之间的模态函数关系评估排放的. 这些模态函数是基于 VSP bin (区间) 的方法建立. MOVES 模型根据 VSP 和速度的对应关系将机动车所有的 VSP 分成了 23 个 Bin, 即 23 个运行工况区间^[10]. 根据排放过程和排放污染物的不同影响因素, 将机动车活动信息分布到不同的运行模式区间上. MOVES 给每一个唯一的排放源和运行模式组合分配一个排放率, 以计算该运行模式下的排放. 最后通过温度、空调状况、燃油等因子的修正, 得到总排放率, 如式(2)所示. 与上一代排放模型 MOBILE 相比, MOVES 具有以下特点: 基于 MySQL 关系数据库构建、具有替代燃料和车辆类型、计算总排放清单和排放因子、评估温室气体和能源消耗、多种污染物和各种排放过程的模拟计算功能.

$$TE_{process, sourcetype} = (\sum ER_{process, bin} \times Ac_{bin}) \times Aj_{process} \quad (2)$$

式中: TE 为总排放量; $process$ 为排放过程; $sourcetype$ 为排放源类型; bin 为排放源和工况区间; ER 为排放速率; Ac 为行驶特征; Aj 为调整因子.

1.2 3 种交通运行参数

根据评估路段的已有车辆交通数据信息, 对于微观交通排放评估, MOVES 提供了 3 种交通运行参数输入方式来描述速度、加速度和车辆模拟功率, 即平均速度、驾驶循环行程和运行模式分布. MOVES 使用导则^[10]中建议, 对于给定路段,

当有多种方式均可输入时, 将优先使用运行模式分布数据, 驾驶循环行程次之, 路段平均速度在没有其他可用数据的情况下也可以用于评估.

MOVES 定义了 16 个速度区间, 分别定义了不同道路类型或路段/不同时段的车平均行驶速度. 模型以输入的平均速度为基础, 运用内置的驾驶循环和插值算法得到一个缺省的运行模式分布, 然后在基于上述原理计算排放. 由于输入的平均速度与默认数据库中的驾驶循环不能精确反映机动车的实际路段行驶状况, 因此, 平均速度作为 MOVES 交通参数的计算结果在三者中准确性最差.

运行模式是指具有特定排放率的机动车活动模式, 即用上式(1)表征的 VSP 区间分布特征. 如行驶活动模式是以 VSP 和瞬时速度为特征的, 启动活动模式是以车辆静置时间 (即浸时, soak time) 为特征. 对于给定的排放源类型、道路路段和污染物/产生过程, 运行模式分布值之和必须为 1. MOVES 内置排放率是 VSP 的直接函数, 测试已表明 $VSP0$ 与排放率之间比平均速度有更好的相关性^[11] (USEPA, 2002). 因此, 基于运行模式运用 MOVES 评估微观交通排放充分发挥了 MOVES “高分辨率” 的优势, 可以通过直接测试逐秒车速得到当地的 VSP 区间分布, 使得评估预测结果准确.

驾驶循环行程是指在特定路段上, 可以定义精确的速度和坡度作为时间 (单位: s) 的函数, 可以通过实测车速分布解析得到. 由于 MOVES 系统中内置了用于微观层面评估用的一个缺省驾驶循环行程库, 而且对应着不同的交通拥堵水平和各种道路类型, 这样建立的特定路段驾驶循环与平均速度相比, 能够较准确地匹配到内置缺省驾驶循环, 但是这种预先研究设定的驾驶循环行程仍然不能反映真实的机动车运行状况, 因此评估精度介于平均速度和运行模式分布之间.

2 平面交叉口机动车运行模式分布

以上分析表明, 基于运行模式分布的 MOVES 模型评估精度是最高的. 下面以城市典型平面交叉口——西安市小寨十字平面交叉口 (如图 1 所示) 为调查对象, 通过实测及统计分析得到了反映汽车交叉口非高峰时段运行特征的运行模式分布. 为了精细化地评估交叉口的排放清单, 根据机动车运行工况将交叉口路段划分为 20 个路段 (link). 然后用 GPS 跟车测试了交叉口各个路段

的车速分布情况,进行了多次试验,能够反映遇到红灯和遇到绿灯两种情况下的运行工况. 计算小时排放清单时,考虑交叉口信号灯不同方向的配时权重. 最后根据式(1)计算各个路段的 VSP ,按照运行模式分布表^[10]中的 VSP 以及瞬时速度区间的划分分别统计各路段 $OpModeID$ 的数量,得到各个路段不同 $OpModeID$ 所占的比例,该比例就是交叉口各路段运行模式分布. 由于直行车辆和左转车辆会受到红灯的影响,在计算轻型车和重型车的运行模式分布比例时,分为红灯和绿灯两种交通条件下的运行模式分布. 以 link1(直行路段)、link13(右转路段)、link17(左转路段)为例,图2给出了车流遇到红灯情况下的运行模式分布,其他路段的运行模式分布以及绿灯情况数据处理方法相同,不再赘述.

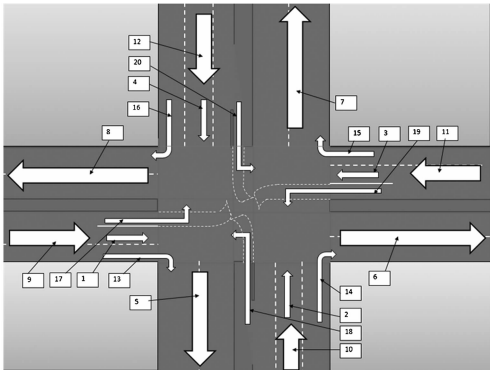


图1 小寨十字平面交叉口示意图

Fig.1 Sketch map of Xiaozhai at-grade intersection

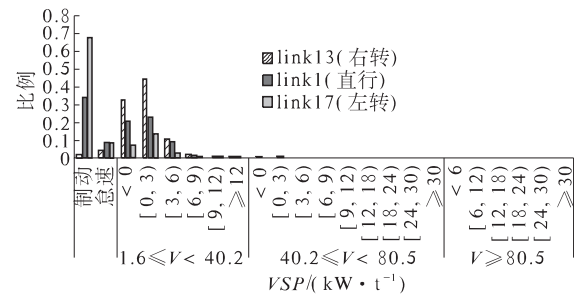


图2 Link1、Link13、link17 轻型车运行模式(OpMode)分布

Fig.2 Profile of light vehicles operating mode distribution at link1, link13 and link17

3 典型平面交叉口 $PM_{2.5}$ 和 CO 排放清单评估

3.1 基于运行模式分布的 MOVES 模型评估步骤

第一步,收集建模数据. 主要包括交通数据(小时交通量、道路坡度及用户定义的路段分

区)、与 MOVES 匹配的车型比例、车龄分布、气象数据(温度和湿度)、燃油属性及其市场占有率. 在无法得到某些参数时,可以选择系统缺省默认数据.

第二步,选择 MOVES 模型中 Project level 建模,选择评估时段、路段类型(限制道路和非限制道路),根据车辆和燃油数据确定模型中车型与燃油匹配,选择评估污染物及其产生过程(可选运行、起动、怠速、蒸发、曲轴箱、轮胎磨损、制动磨损等).

第三步,建立输入数据库和计算结果输出数据库,输入数据库管理面板包括了燃油类型、气象、I/M 制度、运行模式分布、车龄分布、路段交通量及车型比例等输入界面. 评估计算结果可以在 MySQL 数据库系统中查询.

3.2 小寨十字交叉口机动车 $PM_{2.5}$ 、CO 排放清单评估

运用以上方法对小寨十字交叉口某一天(2012 年 12 月)4 个时段的 CO、 $PM_{2.5}$ 排放清单进行了精细化评估,各时段交通量及排放评估结果见表1,在某一时段(8:00 – 9:00)排放污染物的空间分布结果见表2. 从评估结果可以看出,运用 MOVES 模型可以评估某交叉口的时空分布特性,为建立高分辨率的空气质量模型提供了可靠的排放源清单数据.

表1 小寨十字交叉口 CO、 $PM_{2.5}$ 总排放清单

Tab.1 Total emission inventory of CO and $PM_{2.5}$ at Xiaozhai intersection			
时段	交通量/ ($vel \cdot h^{-1}$)	排放清单/($g \cdot h^{-1}$)	
		CO	$PM_{2.5}$
8:00 – 9:00	7 031	32 256	335
12:00 – 13:00	6 291	30 975	318
18:00 – 19:00	6 587	31 257	287
21:00 – 22:00	5 866	28 943	241

表2 小寨十字交叉口(8:00 – 9:00) CO、 $PM_{2.5}$ 排放清单空间分布

Tab.2 Spatial distribution of CO and $PM_{2.5}$ inventory at Xiaozhai intersection (8:00 – 9:00)				
路段 编号	路段 长度/m	车道总 宽度/m	排放清单/($g \cdot h^{-1}$)	
			CO	$PM_{2.5}$
1	104	5	434	6.875 2
2	94	12	2 621	23.759 7
3	104	5	735	8.896 2
4	94	12	2 508	11.822 5
5	470	15	4 616	29.762 4

续表 2				
路段 编号	路段 长度/m	车道总 宽度/m	排放清单/(g·h ⁻¹)	
			CO	PM _{2.5}
6	440	11	1 991	33.431 8
7	293	15	3 374	30.245 9
8	400	11	2 641	37.991 7
9	330	11	1 730	20.354 5
10	400	15	4 963	53.157 0
11	370	11	2 407	32.664 5
12	223	15	2 967	27.475 0
13	70	3	58	0.757 8
14	70	3	71	1.274 1
15	70	3	105	1.821 4
16	70	3	146	2.711 6
17	87	3	271	2.357 7
18	82	2	217	3.342 5
19	87	3	168	2.482 3
20	82	2	233	4.492 2

4 CNG 在公交车上减排效益量化分析

天然气是一种应用较为广泛的替代燃料,目前在我国城市公交车和出租车上已经得到广泛的应用. 尽管从理论上和相关试验研究上可知,应用天然气替代传统燃料会带来一定的环境效益^[12-14],但未见其在微观交通区域的减排量化效果的报道. 由于 MOVES 模型中提供了燃料车型匹配功能,可以在不改变其他参数的基础上,仅改变车型燃料匹配就可以评估燃料的量化影响. 因此,基于运行模式分布的 MOVES 模型方法可以为精确地评估天然气减排效益、明晰其减排潜力提供量化评估工具,为管理部门提供决策依据.

以小寨十字平面交叉口为研究案例,以上述评估场景为基本场景,由于基本场景中 CNG 已经应用于公共汽车上,为了评估天然气的减排效益,特将模拟场景中公共汽车燃料改为柴油,其他条件不变,这样运用基于运行模式分布的 MOVES 模型,按照以上建模步骤和数据处理方法就可以对燃料改变前后的场景进行评估模拟,模拟结果见表 3,表明在柴油公交车上全面推广 CNG 后,小寨交叉口区域的 PM_{2.5} 和 CO 排放将分别降低 66% 和 5%.

5 结论

(1)在 MOVES 模型原理的基础上,探讨了平均速度、驾驶循环行程及运行模式分布等 3 种交通运行参数的敏感性;为充分发挥 MOVES 模型“高分辨率”评估的特点,应尽量采用运行模式分

布的方法.

表 3 8:00-9:00 时段评估场景及结果
Tab.3 Evaluation scenarios and results at 8:00-9:00

场景	车型燃料 匹配	排放评估结 果/(g·h ⁻¹)	
		CO	PM _{2.5}
基本场景	公共汽车 - CNG		
	轻型车 - 汽油	32 256	335
	轻型卡车 - 柴油		
	垃圾车 - 柴油		
模拟场景	公共汽车 - 柴油	33 955	989
	其他同上		

(2)通过实际案例研究,描述了建立平面交叉口机动车运行模式分布和排放清单的评估方法,可以看出,MOVES 模型可以评估交叉口区域的排放清单及其时空分布特征.

(3)运用基于运行模式分布的 MOVES 模型,评估了替代燃料的量化减排潜力. 案例评估结果表明,在柴油公交车上全面推广 CNG 后,小寨交叉口区域的 PM_{2.5} 和 CO 排放将分别降低 66% 和 5%.

参考文献:

[1] TOMLIN A S, SMALLEY R J, TATE J E, et al. A field study of factors influencing the concentrations of a traffic-related pollutant in the vicinity of a complex urban junction [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 5027-5037.

[2] GILLIES J A, GERTLER A W, SAGEBIEL J C, et al. On-road particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) emissions in the sepulveda tunnel, los angeles, california [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(6): 1054-1063.

[3] VINZENTS P, MQLLER P, SQRENSEN M, et al. Personal exposure to ultrafine particles and oxidative DNA damage [J]. Environmental Health Perspectives, 2005, 113(11), 1485-1490.

[4] MIN J Y, PAEK D, CHO S, et al. Exposure to environment carbon monoxide may have a greater negative effect on cardiac autonomic function in people with metabolic syndrome [J]. Science of The Total Environment, 2009,407(17): 4807-4811.

[5] MOTT J, WOLFE M, ALVERSON C, et al. National vehicle emissions policies and practices and declining US carbon monoxide - related mortality [J]. Journal of the American Medical Association, 2002,288(8):

- 988-995.
- [6] GULLIVER J, BRIGGS D. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(1): 1-8.
- [7] HANNA B, FRANK B, JAAP K, et al. Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 dutch cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(27): 4234-4242.
- [8] 王歧东. 机动车排放因子识别技术[J]. *中国基础科学*, 2007(6): 18-21.
- [9] SONG G, YU L. Estimation of fuel efficiency of road traffic by characterization of vehicle-specific power and speed based on floating car data [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2009, 2139: 11-20.
- [10] Environmental Protection Agency, US. Motor vehicle emission simulator (MOVES) user guide for MOVES2010b report: EPA-420-B-12-001b [R]. Washington DC: Office of Transportation and Air Quality, 2012.
- [11] Environmental Protection Agency, US. Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle and equipment emission system: EPA-420-R-02-027 [R]. Washington DC: Office of Transportation and Air Quality, 2002.
- [12] 郑建军, 周志恩, 张丹, 等. 城市在用 CNG 汽车排放研究 [J]. *城市环境与城市生态*, 2011, 24(4): 38-42.
- [13] 胡京南, 郝吉明, 傅立新, 等. 应用燃气汽车对北京市机动车排放的影响 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2006, 46(3): 350-354.
- [14] 郑晨, 郑长江. 公交车车速诱导研究与应用 [J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2013, 34(1): 19-22.

Estimation for Vehicles Emissions of At-grade Intersections Based on Operating Mode

QIU Zhao-wen¹, ZHANG Guang-xin², HAO Yan-zhao¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Automobile, Liaocheng Institute of Technology, Liaocheng 252000, China)

Abstract: In order to estimate vehicles inventory in high resolution at a microscopic scale region, the MOVES model of US new version was introduced and the sensitivity of three traffic conditions parameters was analyzed. Taking a typical signal intersection as research object, the operation modes reflecting vehicles running characteristics in intersection were gained through field measurement and statistical analysis. In consideration of timing weight in the different directions, the $PM_{2.5}$ and CO inventories of typical intersection were calculated by MOVES model. Lastly, the efficiency of compressed natural gas (CNG) in the reduction of $PM_{2.5}$ and CO was modeled when the buses conventional fuel was replaced by the alternative fuel (CNG). The results show that, the traffic emission evaluation based on operating mode can better reflect the realistic vehicles' operation nature more, and calculate out more precise values. In the case study, the emission inventories of $PM_{2.5}$ and CO in the intersection region were reduced by 66% and 5% respectively after the bus fuel of CNG was put into use.

Key words: traffic engineering; at-grade intersection; vehicles emissions estimation; operating model profile; MOVES model