

轻型柴油车实际道路瞬时排放模拟研究

黄成¹, 陈长虹^{1*}, 戴璞², 李莉¹, 黄海英¹, 程真¹, 贾记红²

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 系统介绍了 CMEM 模型及其计算原理, 以轻型柴油车为研究对象, 给出了模型的主要输入参数, 并计算了车辆在实际道路上的瞬时排放结果, 并根据实测数据对模拟结果进行了验证. 测试车辆的 CO、THC、NO_x 和 CO₂ 排放因子为 0.81、0.61、2.09 和 193 g·km⁻¹, 相同线路模拟所得的排放因子分别为 0.75、0.47、2.47 和 212 g·km⁻¹, 相关系数分别达到 0.69、0.69、0.75 和 0.72. 通过模拟发现, 轻型柴油车在实际道路微观区域内的排放水平随交通条件和行驶状态波动明显, 采用 CMEM 模型能够较好地反映该车排放随行驶工况的瞬时变化趋势. 应用 CMEM 模拟发现, 改善典型交叉口区域的交通条件后, 轻型柴油车在模拟区域内的 CO、THC、NO_x 和 CO₂ 排放量分别削减了 50%、47%、45% 和 44%, 排放改善效果显著. 从研究结果来看, 利用微观尺度模型来分析混合车流在一些典型交通区域的瞬时排放变化是必要的, 也是可行的, 对于评价道路交通规划的环境效果具有一定的指导意义.

关键词: CMEM 模型; 轻型柴油车; 微观排放模拟; 车载排放测试

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2975-08

Real World Instantaneous Emission Simulation for Light-Duty Diesel Vehicle

HUANG Cheng¹, CHEN Chang-hong¹, DAI Pu², LI Li¹, HUANG Hai-ying¹, CHENG Zhen¹, JIA Ji-hong²

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Resources and Environmental Engineering Institute, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Core architecture and input parameters of CMEM model were introduced to simulation the second by second vehicle emission rate on real world by taking a light-duty diesel car as a case. On-board test data by a portable emission measurement system were then used to validate the simulation results. Test emission factors of CO, THC, NO_x and CO₂ were respectively 0.81, 0.61, 2.09, and 193 g·km⁻¹, while calculated emission factors were 0.75, 0.47, 2.47, and 212 g·km⁻¹. The correlation coefficients reached 0.69, 0.69, 0.75, and 0.72. Simulated instantaneous emissions of the light duty diesel vehicle by CMEM model were strongly coherent with the transient driving cycle. By analysis, CO, THC, NO_x, and CO₂ emissions would be reduced by 50%, 47%, 45%, and 44% after improving the traffic situation at the intersection. The result indicated that it is necessary and feasible to simulate the instantaneous emissions of mixed vehicle fleet in some typical traffic areas by the micro-scale vehicle emission model.

Key words: CMEM model; light-duty diesel vehicle; micro-scale emission simulation; on-board emission measurement

随着机动车污染控制的不断深入和细化, 微观尺度的交通与环境领域研究正日益受到重视^[1,2]. 已有的研究表明, 机动车在实际道路上行驶时工况复杂, 负荷多变, 尾气排放随车速、加速度、比功率^[3] (vehicle specific power, VSP) 等运行参数变化明显^[4~6]. 目前应用较广泛的 MOBILE^[7]、COPERT^[8] 或 IVE^[9] 等排放模型可以估算车队的平均排放因子, 而难以描述车辆在街道峡谷、交通路口等微观区域内的瞬时排放特征^[10]. 采用台架测试或道路实测方法可以获得车辆排放随路况的瞬态变化, 但是检测条件过于苛刻使这类方法很难灵活应用于微观区域的交通环境管理研究. 为此, 一些适用于微观尺度的机动车排放模型相继被开发和应用^[11,12], 其中最具代表性的是美国加州大学河畔分校开发的综合模式排放模型 (comprehensive modal emission model, CMEM)^[13]. 目前国内对该模型的应用很少, 对模型

的适用性及特点仍缺乏了解. 本研究以车载排放实测数据为参数, 应用 CMEM 模型模拟了轻型柴油车在典型交通区域内的瞬时排放变化, 旨在为微观模型在交通环境管理的应用提供科学基础.

1 CMEM 模型介绍

1.1 模型简介

CMEM 模型是 1995 年在美国国家合作公路研究项目 (NCHP) 的资助下, 由加州大学河畔分校工程学院环境研究与技术中心 (CE-CERT)、密歇根大学和劳伦斯·伯克利国家实验室 (Lawrence Berkeley

收稿日期: 2007-10-30; 修订日期: 2008-01-14

基金项目: 上海市交通环境可持续发展指标体系项目 (00138.07)

作者简介: 黄成 (1980~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为机动车污染控制与交通环境可持续发展. E-mail: huangc@saes.sh.cn

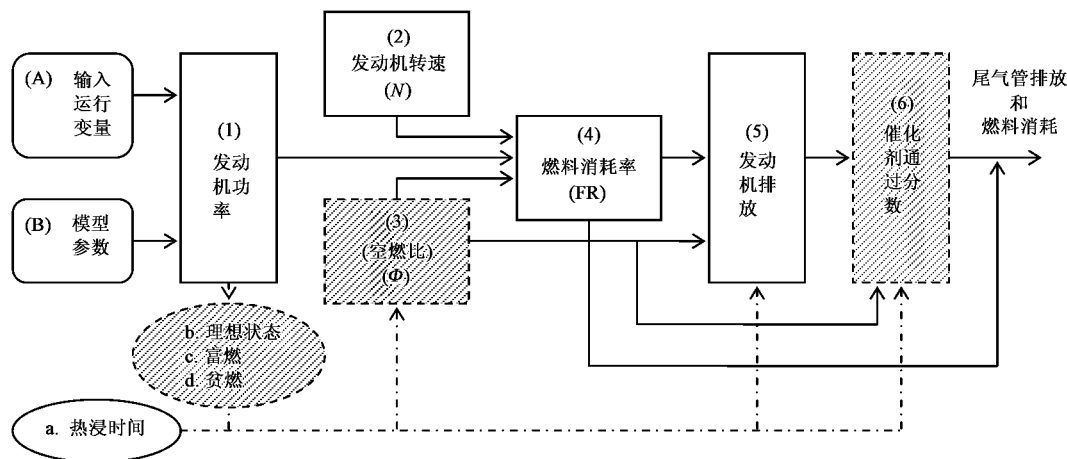
* 通讯联系人, E-mail: chench@saes.sh.cn

National Laboratory)共同开发的微观机动车尾气排放模型.该模型能够对尾气排放进行参数化解析,可以计算不同类型轻型机动车辆或车队在不同行驶条件(如加速、减速、怠速或匀速)下的尾气管排放值和燃油消耗量的瞬态变化^[14,15].

1.2 基本原理

CMEM 模型将机动车排放过程分解为不同的模

块,分别用于模拟机动车在行驶过程中与排放相关的物理参数变化,根据车辆的运行状况,利用各模块的解析式计算出来.模型由 6 个主要模块构成:①发动机功率;②发动机转速;③空燃比;④燃料消耗率;⑤发动机排放;⑥催化剂通过分数.其中,第③和第⑥模块为汽油车专用^[16].图 1 所示为 CMEM 的主要模型结构.



虚线框与阴影部分为汽油车专用模块

图 1 模型主要结构

Fig.1 Modal emissions model structure

模型的瞬时尾气排放速率(ER)利用该时刻燃料消耗率(FR)乘以发动机单位燃料消耗的比排放量($g_{\text{emission}}/g_{\text{fuel}}$),再根据催化剂通过分数(CPF)计算所得:

$$ER = FR \cdot (g_{\text{emission}}/g_{\text{fuel}}) \cdot CPF \quad (1)$$

式中,FR 为燃料消耗率(g/s); $g_{\text{emission}}/g_{\text{fuel}}$ 为发动机单位燃料消耗所产生的污染物排放(g/g);CPF 为催化剂通过分数(%),指发动机污染物排放经催化剂后的尾气管排放量.

1.2.1 发动机功率模块

发动机功率是影响发动机排放的主要因素,越来越多的机动车排放模型开始利用单位质量比功率来模拟车辆在负荷多变的复杂工况下的污染物排放^[17,18].CMEM 模型中发动机功率计算方法如式(2)和(3)所示:

$$P = \frac{P_{\text{tract}}}{\epsilon} + P_{\text{acc}} \quad (2)$$

$$P_{\text{tract}} = A \cdot v + B \cdot v^2 + C \cdot v^3 + M \cdot (a \cdot 0.200 + g \cdot \sin\theta) \cdot v \cdot 0.719/1000 \quad (3)$$

式中, P 为发动机功率(kW); P_{tract} 为车辆牵引功率(kW); P_{acc} 为车辆相关附件使用所产生的附加功率

(kW),如空调使用等; ϵ 为机动车动力传动系数; M 为机动车质量(kg); v 为车速($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$); a 为加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); g 为重力加速度(取 $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$); θ 为道路坡度角(本研究假定地势平坦,坡度为 0°); A 、 B 、 C 分别为滚动阻力、滚动阻力的车速修正以及空气阻力系数,计算方法见式(4)~(6).

$$A = 3.23 \times 10^{-3} \text{Trlhp} \quad (4)$$

$$B = 1.15 \times 10^{-5} \text{Trlhp} \quad (5)$$

$$C = 7.87 \times 10^{-7} \text{Trlhp} \quad (6)$$

式中,Trlhp 为车辆惯性滑行功率(kW),CMEM 模型中假定 A 、 B 、 C 均与车辆惯性滑行功率呈线性相关.

1.2.2 发动机转速模块

除发动机功率外,发动机转速是决定发动机工作条件和燃烧状况的另一重要指标.CMEM 模型中发动机转速的计算方法如下:

$$N(t) = S \cdot \frac{R(L)}{R(L_i)} \cdot v(t) \quad (7)$$

式中, $N(t)$ 为 t 时刻发动机转速(r/min); S 为最高齿轮比时的发动机转速与车速比 $[(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})]$; $R(L)$ 为第 L 档位的齿轮比, $L = 1, 2, \dots, L_i$; $v(t)$ 为 t 时刻车速

($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$).

1.2.3 燃料消耗计算模块

CMEM 模型中的燃料消耗计算模块综合考虑了发动机功率与转速以及发动机燃烧条件(如理论空燃比燃烧、富燃、贫燃、冷启动运行等)等影响因素,并在计算柴油车时作了修正,未考虑发动机燃烧条件的影响.与本研究相关的柴油车燃油消耗计算方法如下:

$$\text{FR} \approx \left(K \cdot N \cdot V + \frac{P}{\eta} \right) \cdot \frac{1}{43.2} \cdot \left[1 + b_1 \cdot (N - N_0)^2 \right] \quad (8)$$

$$K = K_0 \cdot [1 + C \cdot (N - N_0)] \quad (9)$$

$$N_0 \approx 30 \cdot \sqrt{\frac{3.0}{V}} \quad (10)$$

式中, K 为发动机单位循环和排气克服摩擦系数, K_0 一般为 $0.19 \sim 0.25 \text{ kJ}$; V 为发动机排气量(L); η 为柴油发动机指示效率的测量值, $\eta \approx 0.45$; b_1 、 C 分别为计算参数, $b_1 \approx 10^{-4}$, $C \approx 0.001 \text{ 25}$.

1.2.4 发动机排放模块

CMEM 模型的主要模拟对象为气态污染物,包括 CO 、 THC 和 NO_x , 各类污染物的发动机排放与燃油消耗及发动机燃烧状况密切相关. CMEM 模型在计算柴油车发动机排放时作了简化处理,假定发动机排放与燃油消耗率呈线性相关,计算方法如下:

$$\text{CO} = a_{\text{CO}} \cdot \text{FR} + r_{\text{CO}} \quad (11)$$

$$\text{HC} = a_{\text{HC}} \cdot \text{FR} + r_{\text{HC}} \quad (12)$$

$$\text{NO}_x = a_{\text{NO}} \cdot \text{FR} + r_{\text{NO}} \quad (13)$$

式中, a_{CO} 、 a_{HC} 、 a_{NO} 和 r_{CO} 、 r_{HC} 、 r_{NO} 分别为发动机排放与燃料消耗线性回归所得的系数.

1.3 车型分类

CMEM 模型可模拟车辆共分为 26 类,其中 12 类为正常排放汽车,9 类为正常排放卡车,其余 5 类为高排放车辆.分类原则主要综合考虑了排放控制水平、燃料配送系统、累计行驶里程、功率质量比以及车辆质量等因素.高排放车辆分类原则为车辆工作条件,即贫燃、富燃、失火、催化剂失效或极度富燃等条件.表 1 所示为模型中正常排放的车辆分类.

2 测试与模拟方法

2.1 测试方法

测试车辆为上海市随机选择的江铃宝典轻型柴油皮卡,该车装备 JX493Q1 柴油发动机,最大输出功率为 57 kW ,整备质量为 $1\,670 \text{ kg}$,允许总质量为

表 1 模型正常排放的车辆技术分类

Table 1 Normal emitting vehicle technology modeled categories		
分类	序号	指标
正常排放汽车技术类型	1	无催化剂
	2	二元催化剂
	3	三元催化剂,化油器
	4	三元催化剂,电喷,总行驶里程 $> 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 ¹⁾ < 0.039
	5	三元催化剂,电喷,总行驶里程 $> 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 > 0.039
	6	三元催化剂,电喷,总行驶里程 $< 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 < 0.039
	7	三元催化剂,电喷,总行驶里程 $< 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 > 0.039
	8	符合 Tier 1 标准,总行驶里程 $> 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 < 0.042
	9	符合 Tier 1 标准,总行驶里程 $> 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 > 0.042
	10	符合 Tier 1 标准,总行驶里程 $< 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 < 0.042
	11	符合 Tier 1 标准,总行驶里程 $< 8 \times 10^4 \text{ km}$,功率/质量 > 0.042
正常排放卡车技术类型	24	符合 Tier 1 标准,总行驶里程 $> 16 \times 10^4 \text{ km}$
	12	1979 前(总质量 $\leq 8\,500 \text{ GVW}$ ²⁾)
	13	1979 ~ 1983(总质量 $\leq 8500 \text{ GVW}$)
	14	1984 ~ 1987(总质量 $\leq 8\,500 \text{ GVW}$)
	15	1988 ~ 1993(总质量 $\leq 3750 \text{ LVW}$ ³⁾)
	16	1988 ~ 1993(总质量 $> 3\,750 \text{ LVW}$)
	17	符合 Tier 1 标准, LDT2/3 ($3\,751 \sim 5\,750 \text{ LVW}$ 或 Alt. LVW)
	18	符合 Tier 1 标准, LDT4 ($6001 \sim 8\,500 \text{ LVW}$ 或 $> 5\,750 \text{ Alt. LVW}$)
	25	以汽油为燃料, LDT ($> 8\,500 \text{ GVW}$)
	40	以柴油为燃料, LDT ($> 8\,500 \text{ GVW}$)

1) 功率质量比,单位为 hp/lb ; 2) GVW 为车辆总质量,单位为 lb ; 3) LVW 为含载货车重,单位为 lb

$2\,475 \text{ kg}$,车辆出厂年限为 2003 年,符合欧 II 排放标准,累计行驶里程达到 $48\,573 \text{ km}$.实验采用美国 Sensors 公司生产的 SEMTECH-D (Sensors Emission Technology-Diesel) 车载排放测试仪开展.详细测试方法见文献[19].

2.2 模拟方法

CMEM 模型模拟时需要输入车辆物理参数和瞬时工况两大模块.物理参数包括发动机排量、整车质量、发动机最大功率、发动机最大扭矩以及车辆惯性滑行功率等.本研究模拟对象为轻型柴油卡车,选取模型中第 40 类车型进行计算,并用车辆实际数据替换模型默认值,部分未知参数沿用默认值.模型中输入的各项物理参数见表 2.

瞬时工况参数可以包括逐秒速度、加速度、道路坡度、空调启用/关闭情况等数据,其中,仅车辆逐秒

表 2 模型输入的物理参数

Table 2 Input operating variables in the model					
编号	参数	单位	数值	数据来源	描述
1	Sload	r/min	1.187 798	默认值	发动机附加负荷,如空调使用等
2	Tsoak	min	0	实际值	车辆浸滞时间
3	E_d	L	2.77	实际值	发动机排量
4	Masskg	kg	2 475	实际值	车辆总质量
5	Trlhp	kW	15.37	默认值	车辆惯性滑行功率
6	S	$(r \cdot \min^{-1}) / (km \cdot h^{-1})$	18.77	默认值	发动机转速与车速比
7	SH(H_2O /dry air)	grains/lb	75	实际值	环境湿度
8	N_m	r/min	2 000	实际值	发动机最大扭矩时的转速
9	Q_m	Nm	204	实际值	发动机最大扭矩
10	Z_{max}	kW	57	实际值	发动机最大功率
11	N_p	r/min	3 600	实际值	发动机最大功率时的转速
12	Idle	r/min	867	默认值	怠速时的发动机转速
13	ng	gears	5	实际值	齿轮数

速度为必选项.本研究输入的瞬时工况参数为车辆在测试过程中 GPS 记录的逐秒速度和加速度,考虑到上海市区地势平坦,且测试过程中未经过高架道路,无明显坡度变化,故模拟时不输入道路坡度参数.图 2 为模型输入的速度加速度片断.

3 模型验证

3.1 轻型柴油车瞬时排放模拟结果与实测值比较

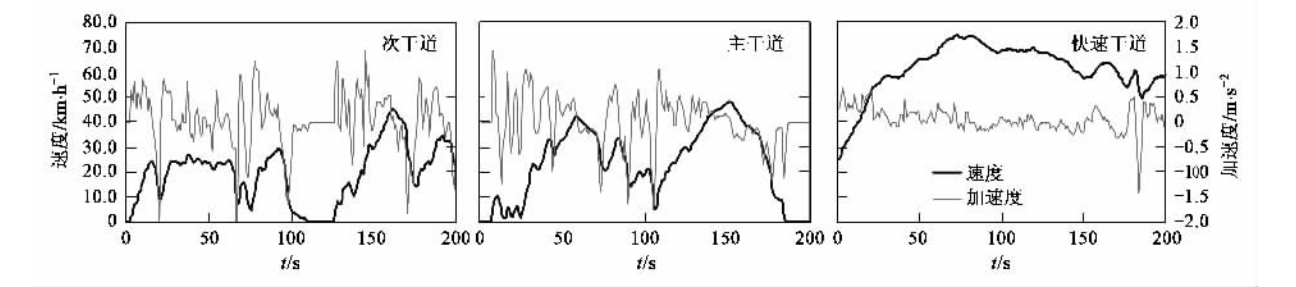


图 2 模型输入的速度加速度瞬时工况片断

Fig.2 Fragment of input transient driving cycle data of speed and acceleration

方式等因素有一定关系,需要在今后的研究中进一步探讨.

3.2 轻型柴油车排放因子模拟结果与实测值比较

表 3 为测试车辆在各种道路类型上模拟和实测所得的排放因子,并分别计算了各模拟值与实测值的相关系数(r)以进行定量化验证,计算方法如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (14)$$

式中, x_i 、 y_i 分别代表模拟值和实测值, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别代

图 3 所示为测试车辆逐秒 CO 、 THC 、 NO_x 和 CO_2 排放速率实测与模拟的结果比较.由图 3 可见, CMEM 模型的模拟结果能够较好地反映测试车辆排放随工况瞬时变化的趋势.在复杂多变的工况下,模拟值可以反映某些极端工况下的高排放现象,与 Silva 等^[20]的研究结果相近.应当指出的是在部分时间里,模拟结果与实测结果仍存在一定的偏差,在快速干道上这种偏差更为明显,这可能与驾驶员操作

表模拟和实测结果的平均值.

测试车辆的实测 CO 、 THC 、 NO_x 和 CO_2 排放因子分别为 0.81、0.61、2.09 和 $193 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,模拟所得 CO 、 THC 、 NO_x 和 CO_2 排放因子分别为 0.75、0.47、2.47 和 $212 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,模拟与实测的排放因子之比分别为 0.93、0.77、1.18 和 1.10,相关系数分别达到 0.69、0.69、0.75 和 0.72,基本反映了车辆实际道路排放水平.从道路类型来看,次干道和主干道模拟值与实测值的相关系数普遍高于 0.70,模拟结果显著优于快速干道,特别是 CO 和 THC 排放因子,在车速相对较快的快速干道上的模拟结果分别较实测值低

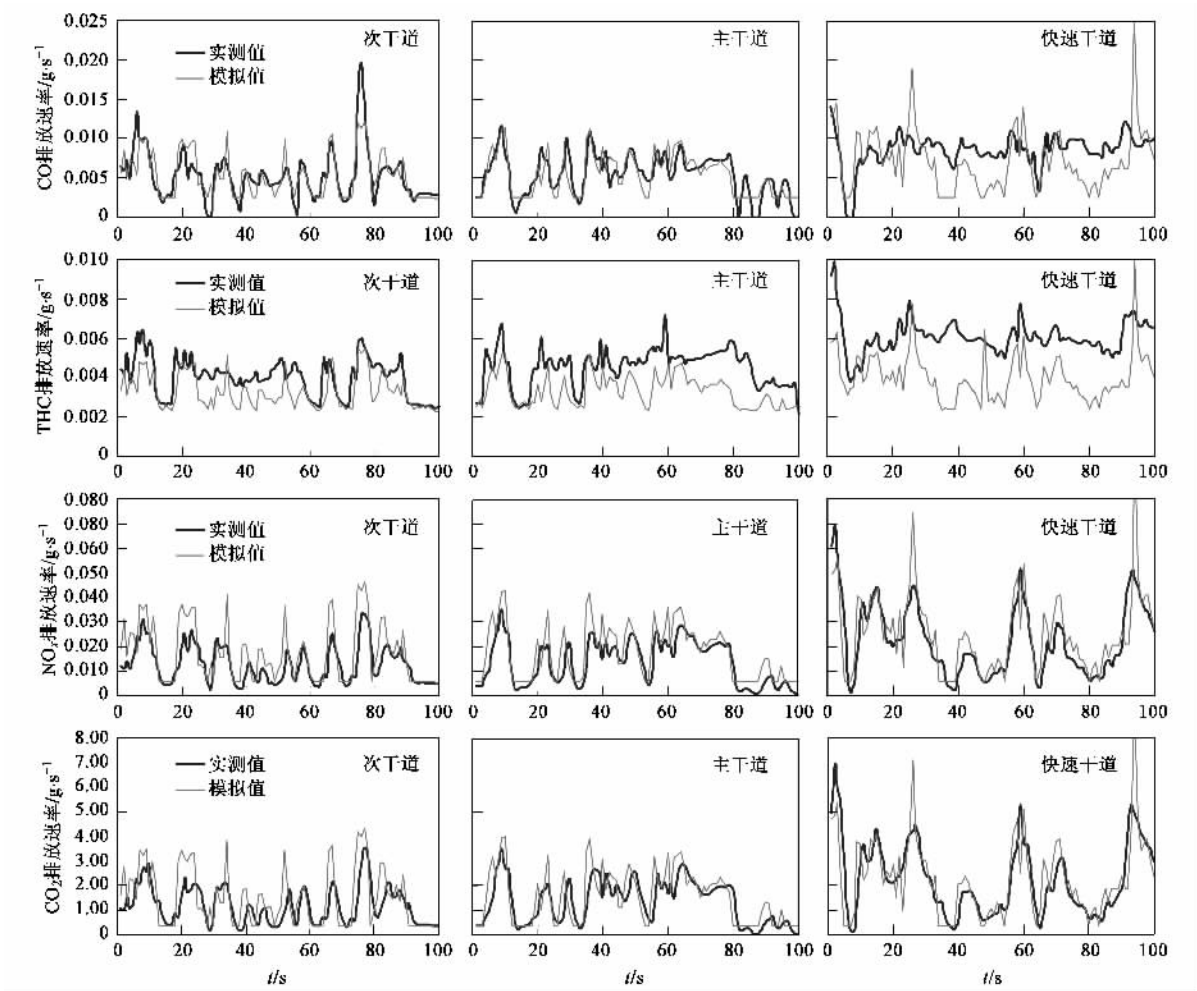


图 3 测试车辆污染物瞬时排放速率实测结果与模拟值比较

Fig.3 Comparison of transient vehicle pollutant emission rates against simulation data

表 3 各道路类型排放因子的模拟值与实测值比较

Table 3 Comparison of simulating vehicle emission factors against test results on various road type

道路类型	CO 排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$			THC 排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$			NO_x 排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$			CO_2 排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$		
	模拟	实测	r	模拟	实测	r	模拟	实测	r	模拟	实测	r
次干道	0.83	0.83	0.74	0.52	0.64	0.73	2.75	2.28	0.78	236	212	0.75
主干道	1.03	1.10	0.71	0.68	0.85	0.72	3.29	2.74	0.75	276	245	0.72
快速干道	0.44	0.55	0.47	0.25	0.38	0.43	1.53	1.36	0.67	136	132	0.62
综合	0.75	0.81	0.69	0.47	0.61	0.69	2.47	2.09	0.75	212	193	0.72

20%和 34% .

4 结果与讨论

4.1 微观尺度机动车瞬时排放变化的模拟分析

图 4 抓取了轻型柴油车在典型街道测试时的行驶条件进行模拟. 图 4 中所示黑点为测试车辆逐秒行车轨迹. 当车辆行径交叉路口时, 行驶轨迹相对密集, 说明车辆行驶缓慢或处于怠速等待过程.

为进一步分析车辆在道路上行驶时的排放水平, 本研究基于车辆在该路段上的行驶工况, 利用

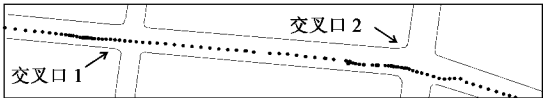


图 4 轻型柴油车经历的微观街道片断与行驶轨迹

Fig.4 Segment of micro-scale street during light duty vehicle test and its running trace

CMEM 模型模拟了车辆的排放水平, 见图 5. 车辆在微观街道上行驶时排放水平的波动较大. 对比车行速度可以发现, 当车辆经过交叉口时, 车辆为避让行

人和非机动车的干扰,频繁加速与制动,使得车辆在单位行驶距离上的累积排放量明显升高.其中,车辆在经过交叉口 2 时用了 44 s 怠速等待时间,且受拥

堵车流影响,车辆起步困难,处于低速缓行状态,使该区域内车辆排放水平显著升高,并对该区域内的局地环境造成严重影响.

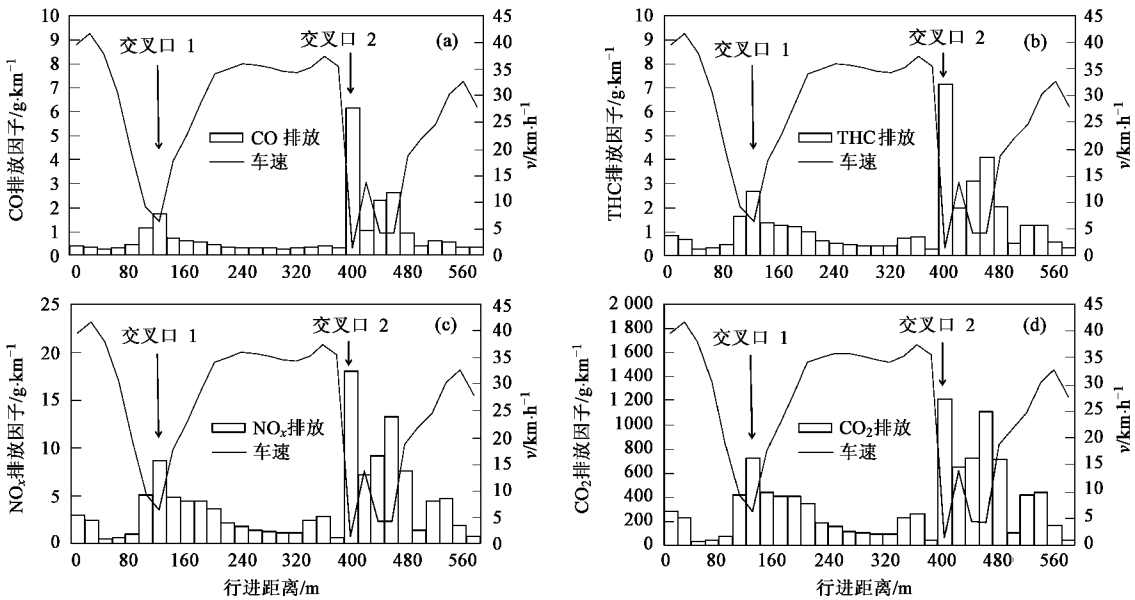


图 5 轻型柴油车在微观街道上的污染物排放水平随车速的变化
Fig.5 Light duty diesel vehicle's transient air pollutant emissions against vehicle speed on the micro-scale street

4.2 典型微观尺度机动车排放变化的模拟分析

4.2.1 实际道路行驶方式对排放的影响

从轻型柴油车的瞬态模拟结果可知,行驶条件或驾驶员操作方式是影响车辆排放水平的主要因素之一.为此,图 6 模拟了 DC1、DC2、DC3 这 3 类典型的驾驶方式,分别表示匀速、普通变速操作以及相对激烈的变速操作,平均车速均为 20 km·h⁻¹.图 7 为各方式的 NO_x 排放速率及平均排放因子.车辆减速

时,NO_x 始终保持在低排放水平;加速时,NO_x 排放急剧增加,且加速操作越为剧烈,排放速率波动幅度越大;车辆匀速行驶时 NO_x 排放速率保持在较低水平.模拟时段内的 NO_x 排放因子之比(即 DC1:DC2:DC3)为 1:1.3:2.1.可见,保障车流匀速行驶,减少剧烈的加速操作,可以有效降低污染物排放水平.如果仅采用平均车速来评估车辆的排放因子,必然会产生一定的偏差.

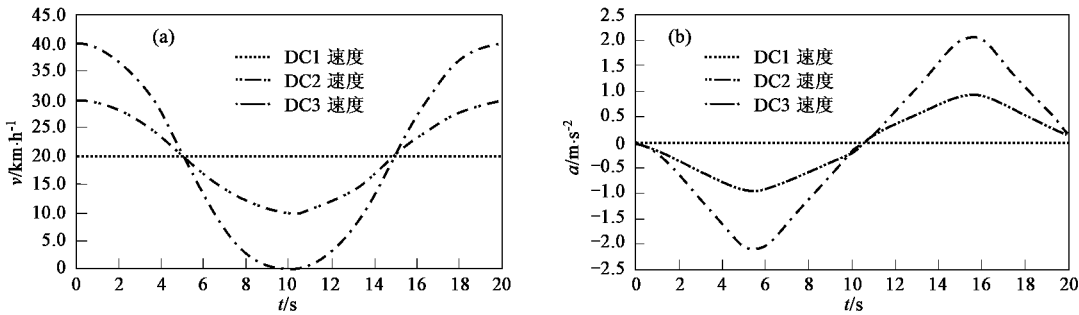


图 6 平均车速为 20 km·h⁻¹时的 3 种驾驶方式的速度、加速度模拟曲线
Fig.6 Simulation speed and acceleration curves of three kinds of driving behaviors with the same average speed of 20 km·h⁻¹

4.2.2 交叉口通过方式对排放的影响

交叉口是车流的集散交汇点,是城市中机动车尾气排放污染最为严重的区域^[22, 23].为探讨交叉口行驶方式对排放的影响,图 8 模拟了轻型柴油车在

3 种交叉口通过方式下的排放特征,int1 表示车辆减速至 15 km·h⁻¹不经停留直接通过路口;int2 和 int3 表示车辆分别怠速等候信号灯 20 s 和 40 s 后,以相同工况加速驶出.图 9 为各方式下停靠点前后 60 m

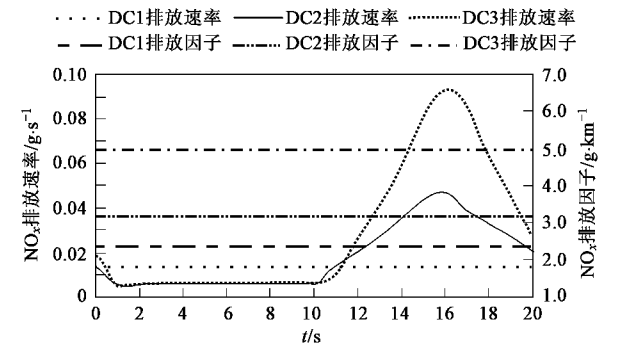


图 7 3 种驾驶方式下的 NO_x 排放速率与排放因子的模拟结果比较

Fig.7 Comparison of simulating NO_x emission rates and factors under three kinds of driving behaviors

处的 NO_x 排放模拟结果. 车辆在直接通过交叉口时, NO_x 在加速过程有所增加; 而车辆在等候信号灯时, 由于怠速排放积聚, 停靠点处 NO_x 排放显著增加, 且等候时间越长, 排放增长越明显. 研究通过模拟说明优化交通路口行驶条件、减少怠速等候时间对于改善该区域交通环境具有重要作用, 也体现了 CMEM 模型对准确评价道路交通规划环境影响的指导意义.

4.3 交通条件改善后的机动车瞬时排放变化

从上述分析可知, 轻型柴油车在实际道路上行驶时, 排放受车流或路口的交通组织影响较大, 在交叉口的累积排放量普遍高于其他区域. 交通条件改善以后, 假定车辆以 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速匀速经过交叉口, 即平均车速将由原来的 $12.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 上升到 $27.3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 见图 10(a). 此时车辆在交叉口处的高排放负荷得到了有效缓解, 模拟所得 CO 、 THC 、 NO_x 和

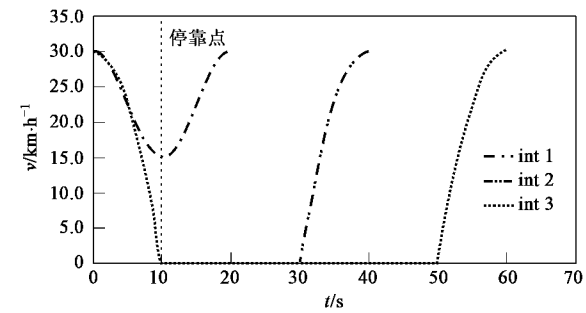


图 8 车辆在 3 种信号灯等候时间条件下的车速模拟曲线

Fig.8 Simulation speed curves of three kinds of signal waiting time

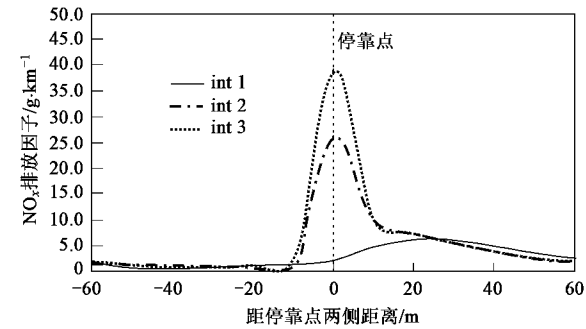


图 9 车辆在 3 种信号灯等候时间条件下的 NO_x 排放因子的模拟结果比较

Fig.9 Comparison of simulating NO_x emission factors under three kinds of signal waiting time

CO_2 排放量分别削减了 50%、47%、45% 和 44%, 见图 10(b). 需要指出的是, 确保一定的信号灯等候时间对于保障车辆和行人安全仍然是必要的. 在这个基础上, 改善交通条件可有效降低车辆的排放水平, 进而改善这些区域的交通环境状况.

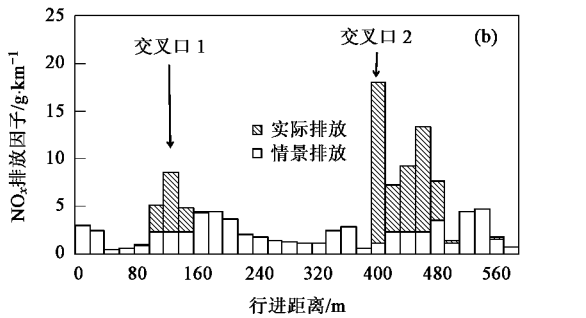
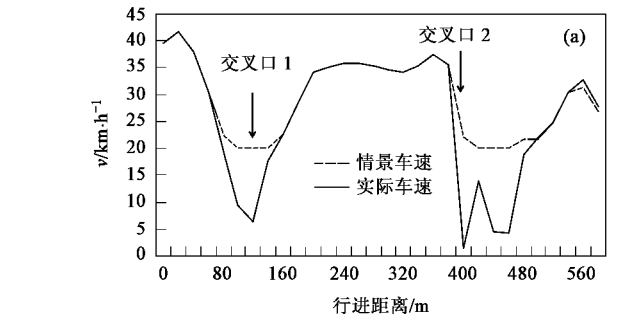


图 10 交通改善情景下轻型柴油车车速以及 NO_x 排放水平瞬时变化与实际情况的比较

Fig.10 Comparison of simulating vehicle speed and NO_x emission factors under scenarios for traffic improve against real situation

5 结论

(1) 本研究利用 CMEM 模型模拟了轻型柴油车在实际道路上的瞬时排放,并通过车载实测资料进行了验证.轻型柴油车实测 CO 、 THC 、 NO_x 和 CO_2 排放因子为 0.81、0.61、2.09 和 $193 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,相同线路模拟所得的排放因子分别为 0.75、0.47、2.47 和 $212 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$,相关系数分别达到 0.69、0.69、0.75 和 0.72.总体而言,CMEM 模型能够较好地反映测试车辆的总体排放水平以及排放随行驶工况的瞬时变化趋势,可用于描述城区微观尺度道路工况下的轻型柴油车瞬时排放变化.

(2) 轻型柴油车在实际道路微观区域内的排放水平随交通条件和行驶状态波动明显.特别是车辆在实际道路上的行驶方式和交叉口通过方式可能对其排放造成重要影响.改善典型交叉口区域的交通条件后,测试车辆的平均车速由原来的 $12.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 上升到 $27.3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;应用 CMEM 模拟发现,轻型柴油车在模拟区域内的 CO 、 THC 、 NO_x 和 CO_2 排放量分别削减了 50%、47%、45% 和 44%,车辆排放水平改善显著.

(3) 受实验条件所限,本研究仅对一辆轻型柴油车在道路上的排放进行了有限测量,所得结果尚不能完整地论证车辆在实际道路上的瞬时排放特性.但是从研究结果来看,利用微观尺度模型来分析混合车流在一些典型交通区域的瞬时排放变化是必要的,研究结果为城市交通环境管理提供了有效的仿真模拟工具.

参考文献:

- [1] Noland R B, Quddus M A. Flow improvements and vehicle emissions: effects of trip generation and emission control technology [J]. *Transportation Research Part D*, 2006, **11**(1): 1-14.
- [2] Chen K, Yu L. Microscopic traffic-emission simulation and case study for evaluation of traffic control strategies [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2007, **7**(1): 93-99.
- [3] José L J. Understanding and qualifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. Massachusetts Institute of Technology, 1999. 53-102.
- [4] de Vlieger I. On-board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(22): 3753-3761.
- [5] 杜青,杨延相,郑伟,等. 机动车实际道路排放特性及若干影响因素的研究[J]. *内燃机学报*, 2002, **20**(4): 297-302.
- [6] 陈长虹,景启国,王海鲲,等. 重型机动车实际排放特性与影响

- 因素的实测研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(7): 870-878.
- [7] USEPA. User's guide to MOBILE 6.1 and MOBILE 6.2: mobile source emission factor model [R]. EPA420-R-02-028, 2003.
- [8] Ntziachristos L, Samaras Z. COPERT III, Computer programme to calculate emissions from road transport, methodology and emission factors (Version 2.1) [R]. Technical Report No 49. Copenhagen: European Environmental Agency, 2000.
- [9] International Sustainable Systems Research Center (ISSRC). IVE model users manual version 1.1.1 [R]. US Riverside, 2004.
- [10] Rakha H, Ahn K. Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM models for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, **30**(6): 1010-1021.
- [11] Koupal J, German J. Real-time simulation of vehicle emissions using VEMISS [A]. In: *CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop*, 1995.
- [12] Rakha H, Ahn K, Trani A. Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions [J]. *Transportation Research Part D*, 2004, **9**: 49-74.
- [13] 王岐东,贺克斌,丁焰. 机动车排放模型的研究进展[J]. *重庆环境科学*, 2003, **25**(12): 185-190.
- [14] Barth M, Carrie M, Younglove T, *et al.* Recent validation efforts for a comprehensive modal emissions model [J]. *Transportation Research Record*, 2001, (4): 13-23.
- [15] Barth M, An F, Younglove T, *et al.* Comprehensive modal emissions model (CMEM) version 2.02 users guide [EB/OL]. <http://www.ucr.edu>, 2001.
- [16] Barth M, An F, Younglove T, *et al.* Development of a Comprehensive Modal Emissions Model [R]. US: NCHRP Project 25-11 Final Report, 2000.
- [17] Constance H. Evaluation of an empirical binning approach for analyzing on-board emission data for MOVES [R]. San Diego, US: CRC Conference, 2002.
- [18] Chris L. Review of MOVES draft design [R]. Novato US: MOVES Workshop, 2003.
- [19] 潘汉生,陈长虹,景启国,等. 轻型柴油车排放特性与机动车比功率分布的实例研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(10): 1306-1313.
- [20] Silva C M, Farias T L, Christopher F H, *et al.* Evaluation of numerical models for simulation of real-world hot-stabilized fuel consumption and emissions of gasoline light-duty vehicles [J]. *Transportation Research Part D*, 2006, **11**(5): 377-385.
- [21] 黄成,陈长虹,景启国,等. 重型柴油车实际道路排放与行驶工况的相关性研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(2): 177-184.
- [22] Hoydysh W, Dabberdt W. Concentration fields at urban intersection: fluid modeling studies [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(11): 1849-1860.
- [23] 李伟,王炜,邓卫,等. 城市交叉口机动车污染物扩散模型研究[J]. *公路交通科技*, 2005, **22**(5): 155-158.