

不同行驶工况下轻型柴油车瞬时排放的 CMEM 模拟研究

戴璞^{1,2}, 陈长虹^{1*}, 黄成¹, 李莉¹, 贾记红², 董艳强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:以轻型柴油车为研究对象, 给出了轻型柴油车瞬时排放计算模型的结构和主要输入参数, 并将车辆在实际道路上的瞬时排放计算结果与实测数据作了对比验证. 结果表明, THC、CO 以及 NO_x 排放的相对误差分别为 14.2%、3.7% 和 32.7%, 相关系数分别达到 0.73、0.72 和 0.87, 表明 CMEM 模型能够较好地反映车辆在实际道路上排放的瞬时变化. 对车辆在日本 10-15 工况、欧洲 ECE 工况、美国 FTP 城区工况及上海城市主干道路况上的排放和燃油经济性进行了模拟计算. CMEM 模拟结果发现, 污染物排放水平随着车速的提高而下降; 特别是超低速段 0~10 km·h⁻¹ 向 10~20 km·h⁻¹ 过渡时, 污染物排放水平变化显著. 车辆的加速过程在污染物排放过程中起主导作用, 其对污染物排放的贡献在 30% 以上, 个别甚至超过 70%. 上海城市主干道路况的怠速过程对 THC 和 CO 的贡献率分别接近 40% 和 30%, CO、THC、NO_x 排放因子分别是欧美日的 1.3、1.5、1.4 倍, 1.5、2.1、1.9 倍以及 1.2、1.3、1.3 倍. 模拟车辆在上海城市主干道路上的燃油经济性最差, 仅 9.56 km·L⁻¹. 国外行驶工况不能真实地反映我国机动车在实际道路上的行驶状况.

关键词:轻型柴油车; 排放模拟; CMEM 模型

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1520-08

Instantaneous Emission Simulation for Light-Duty Diesel Vehicle with Different Driving Cycles by CMEM Model

DAI Pu^{1,2}, CHEN Chang-hong¹, HUANG Cheng¹, LI Li¹, JIA Ji-hong², DONG Yan-qiang²

(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: CMEM model for calculating time based instantaneous emission from light duty diesel vehicle and its input parameters were introduced. On-board test data were used to validate the simulation results. The relative error of THC, CO, and NO_x are 14.2%, 3.7% and 32.7%, respectively, while the correlation coefficients reach 0.73, 0.72 and 0.87. The instantaneous emissions of the light duty diesel vehicle simulated by CMEM model are strongly coherent with the transient driving cycle in Shanghai. The simulation of instantaneous emissions and fuel economy under the ECE-15 cycle, FTP cycle, Japan 10-15 cycle and the cycle of shanghai arterial road show that the instantaneous emissions decline with the increase of the vehicle speed, especially from 0-10 km·h⁻¹ to 10-20 km·h⁻¹. The acceleration process dominated the whole emissions, which contributes over 30% of the total emission, and sometimes it even reaches over 70%. The contributions of shanghai arterial road for idle condition are 40% and 30%, emission factors of CO are 1.3, 1.5 and 1.4 times of ECE-15 cycle, FTP cycle, Japan 10-15 cycle respectively; THC are respectively 1.5, 2.1 and 1.9 times of above cycles; and emission factors of NO_x are respectively 1.2, 1.3 and 1.3 times of ECE-15 cycle, FTP cycle and Japan 10-15 cycle. The fuel economy of the light-duty diesel car on shanghai arterial road is the worst, which is 9.56 km·L⁻¹. The driving cycles used on abroad can not reflect the actual driving conditions in China.

Key words: light-duty diesel vehicle; emission simulation; CMEM model

大气中机动车排放的污染物占污染物总排放量的比例越来越大, 机动车尾气已成为城市大气污染的主要来源^[1]. 美国 EPA 推荐使用 Mobile^[2] 和 MOVES^[3] 2 种模型来定量估算机动车污染物的排放量. 这些模型考虑了机动车技术参数、运行状况、道路条件、环境条件等对排放的影响, 但由于车辆的排放因子与机动车的输出功率或行驶工况有着密切关系^[4,5], 因此, 采用平均排放因子的方法来计算机动车在道路上的瞬时排放状况会造成很大的不准确性^[6,7], 更不能反映机动车的实时排放状况^[7]. 随着

机动车污染控制研究的日益深入, 微观尺度的研究正逐渐受到关注^[8,9].

近年来, 我国机动车保有量发展十分迅速. 到 2007 年底, 全国机动车保有量达 1.598 亿辆, 相比 2006 年增长了 10.0%^[10,11]. 机动车保有量的迅猛增

收稿日期: 2008-05-29; 修订日期: 2008-07-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z409); 上海市环境保护科研项目(沪环科 0807)

作者简介: 戴璞(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为机动车污染控制与交通环境, E-mail: bachsapple@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chench@saes.sh.cn

加,使得城市道路交通日趋拥挤.采用标准行驶工况对机动车排放进行研究已难以准确反映机动车在实际道路上的行驶状况^[12,13].因此,采用欧洲标准工况进行国内机动车污染物排放研究一直受到人们的质疑^[6,7,14].传统的车辆排放测试采用台架测试或道路实测的方法来获得车辆在给定工况下的排放状况,但此类方法对测试条件和器材要求苛刻,且费时费力,难以灵活地应用于微观区域的交通环境管理研究.为此,本研究采用 CMEM 模型来研究不同标准工况下车辆的排放差异,旨在为大气污染的源解析及其健康风险提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 CMEM 模型

CMEM 是美国加州大学河畔分校开发的、来计算机动车尾气污染物瞬时排放的微观模型 (comprehensive modal emission model)^[15],它可用来计算不同类型轻型车在各种行驶条件下尾气污染物的瞬时排放和燃油消耗,可帮助人们从微观角度来研究单车或综合车队在不同行驶条件下燃油消耗和 CO、HC、NO_x 的排放本质^[16,17].

模型要求输入 2 组参数,它们分别为车辆物理参数和行驶工况参数.模型输出为尾气排放物的排放速率和燃料消耗速率可用下式来表示:

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

式中,ER 为尾气污染物瞬时排放速率($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$);FR 为燃料消耗率($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$); $g_{\text{emission}}/g_{\text{fuel}}$ 为发动机单位燃料消耗所产生的污染物排放量($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$);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排放量.

模型由 6 个模块组成,它们分别为:①发动机功率,②发动机转速,③空燃比,④燃料消耗,⑤发动机排放,⑥催化剂通过分数;柴油发动机的 CMEM 模型结构见图 1.柴油机排放模型和汽油机排放模型的区别主要在于燃料消耗和发动机排放输出模块,以及反映柴油机特性的一些发动机和燃油参数.如,没有空燃比控制模块^[18];此外,模型默认其尾气排放等于发动机排放,即无排放后处理装置.模型中除了包括加速、减速、等速和怠速等工况外,还包括(a)热浸时间、(b)理想运行、(c)富燃运行以及(d)贫燃运行 4 个工况.

1.2 计算模拟工况

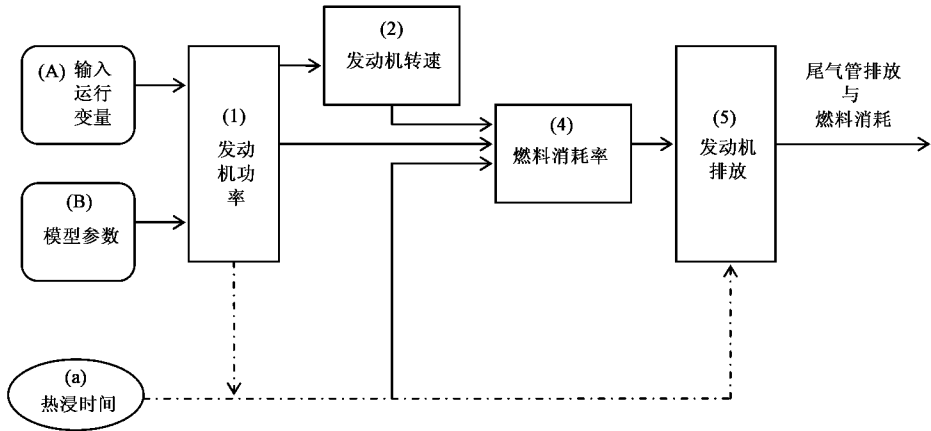


图 1 CMEM 中关于柴油发动机的模型结构
Fig.1 CMEM model structure for diesel engines

目前,世界范围内广泛使用的标准机动车排放测试工况有 3 种:美国联邦测试程序 (federal test procedures, FTP)、新欧洲运转循环 (new European driving cycle, NEDC) 和日本行驶工况 (JDC)^[19].FTP 工况由 55%的城市工况和 45%的高速工况构成,城市工况最高车速为 $90\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,高速工况最高车速为 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.相对于 FTP,NEDC 的速度、加速度相对稳定,它由 4 个城市工况 (ECE-15) 和 1 个高速工况

组成,市区最高车速为 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,高速路最高车速可达 $120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.它主要用于在底盘测功机上对轻型车进行法规排放测试.我国现行采用的标准测试工况就是 NEDC.JDC 同样由 4 个城市工况 (即 10 工况)和 1 个高速工况 (即 15 工况)组成,简称 10-15 工况.表面上它和 NEDC 类似,但其速度更低,市区最高时速仅为 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,高速公路的最高速度只有 $75\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

1.3 车辆参数

利用 CMEM 模型模拟,需要输入车辆的物理参数和瞬时工况.物理参数包括发动机排量、整车质量、发动机最大功率、发动机最大扭矩等^[17].本研究模拟的车辆为江铃宝典轻型柴油车,该车装备 JX493Q1 型柴油发动机,最大输出功率为 57 kW,整

车质量为1 670 kg,允许总质量为2 475 kg,车辆出厂年限为 2003 年,符合欧 II 排放标准,累计行驶里程为48 573 km. CMEM 模型中所对应的车辆类型为第 40 类,具体物理参数输入车辆的实际参数,部分未知参数沿用模型的默认值.模型中输入的各项物理参数见表 1.

表 1 模型输入的物理参数

Table 1 Input operating variables in the model				
编号	参数	数值	数据来源	描述
1	Sload/r•min ⁻¹	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	Ed/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•min ⁻¹)/(km•h ⁻¹)]	18.77	默认值	发动机转速与车速比
7	SH(格令 H ₂ O/磅干空气)	75	实际值	环境湿度
8	N _m /r•min ⁻¹	2 000	实际值	发动机最大扭矩时的转速
9	Q _m /ft•lb	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 ⁻¹	3 600	实际值	发动机最大功率时的转速
12	I _{dic} /r•min ⁻¹	867	默认值	怠速时的发动机转速
13	n _g (gears)	5	实际值	齿轮数

2 结果与讨论

2.1 CMEM 对机动车瞬时排放的再现

为了解 CMEM 模型与实际车辆排放的符合程度,本研究用实测得到的行驶工况作为计算条件,模拟江铃宝典轻型柴油车尾气污染物的瞬时排放状况,并将计算结果与实测得到的污染物排放数据作比对.本研究城市主干道的排放测试实验在上海进行,测试道路为漕宝路,测试总长 14.35 km,车辆排放测试仪器为美国 SENSOR'S 公司生产的 SEMTECH-D 车载排放测试仪.实验过程中,测试车辆随车流行进,在 1 d 内先后进行 2 次平行实验,以真实反映车辆在上海城市道路上的工作状况.详细的测试资料见文献[20].将车辆的实际参数和实测得到的行驶工况输入 CMEM 模型后,计算该车辆尾气污染物的瞬时排放状况,之后与测试结果作对比,结果见图 2.

由图 2 可见,模拟结果与 SEMTECH-D 实测结果的变化趋势十分吻合,且模拟值与实测值基本一致,THC、CO 以及 NO_x 的相对误差分别为 14.2%、3.7%和 32.7%,其相关系数分别为 0.73、0.72 和 0.87,经检验模拟值与实测值显著相关.说明 CMEM 能较好地反映车辆在实际道路上排放的瞬时变化,该模拟结果与黄成等^[21]的研究结果一致.

2.2 各工况的行驶特征比较

分别选取 10-15 工况、NEDC 城区工况(ECE)、FTP 城区工况以及文献[19]中的上海城市主干道行驶工况进行排放模拟对比.本研究将加速度>0.1 m•s⁻²和<-0.1 m•s⁻²的过程分别定义为加速和减速.加速度绝对值<0.1 m•s⁻²且车速不为 0 的连续过程为匀速.发动机处于工作状态,但车速为 0 的过程为怠速.

表 2 给出了模型所采用工况的特征值.从中可见,FTP 工况平均速度最高,达 34.1 km•h⁻¹,最高速度可至 91.2 km•h⁻¹,怠速比最低,不到 20%,说明其具有较好的道路条件;ECE 工况的怠速比最高,达 32.99%.上海城市主干道的平均车速最低仅为 10.3 km•h⁻¹,怠速比近 30%,车辆匀速比较低,而加、减速比较高,说明车辆在行驶过程中受外界干扰频繁,车辆的行进主要是依靠频繁加减速来完成的.

表 2 同时给出了 FTP、ECE 和 10-15 工况中加速、减速及匀速过程的平均速度.从中可见,在所有行驶状态中,FTP 的平均车速最高,其他依次为 10-15 和 ECE;上海加速工况下的平均速度仅为 15.5 km•h⁻¹,匀速工况下的平均速度甚至低于 ECE 的 50%.

图 3 给出了 4 种工况的速度-加速度工况点分布.从中可见,10-15 与 ECE 工况的工况点分布均

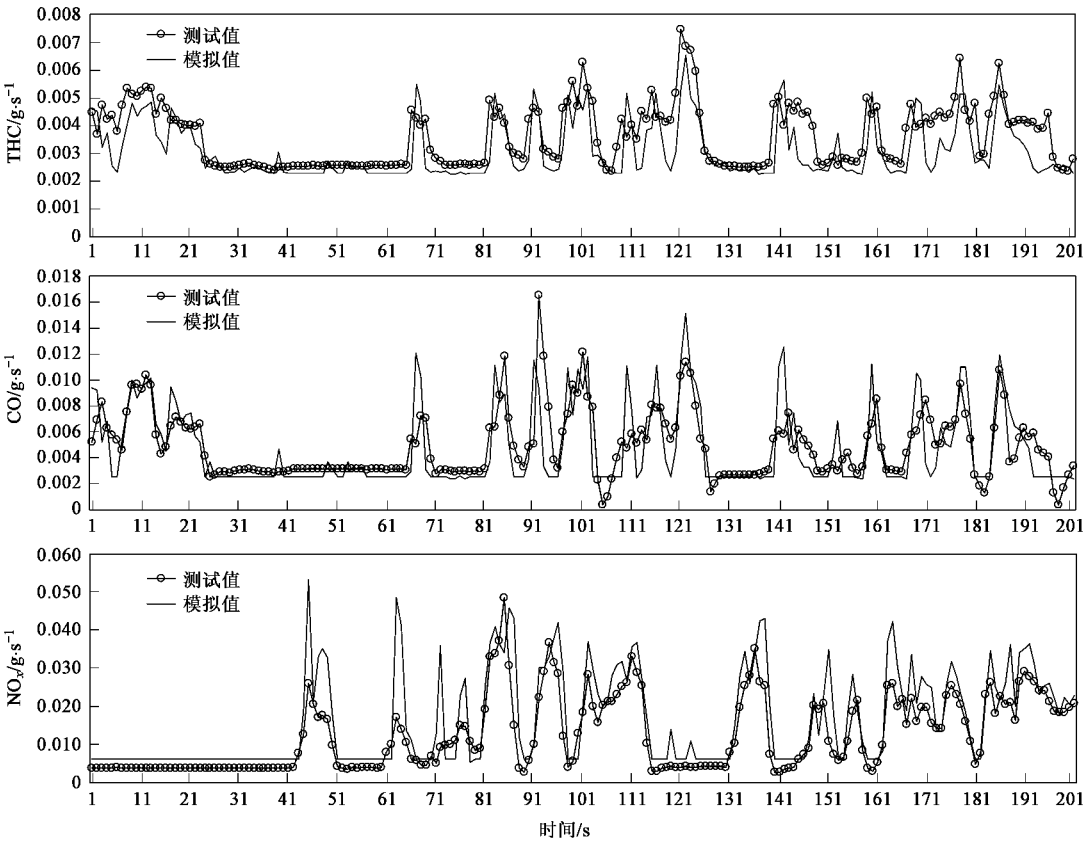


图 2 测试车辆污染物瞬时排放速率实测结果与模拟值比较
Fig.2 Comparison of transient vehicle emission rates against simulation data

表 2 不同工况的行驶特征值
Table 2 Driving eigenvalues for different cycles

工况类型	平均速度 /km·h ⁻¹	最高速度 /km·h ⁻¹	加速过程平均 速度/km·h ⁻¹	减速过程平均 速度/km·h ⁻¹	匀速过程平均 速度/km·h ⁻¹	怠速比 /%	加速比 /%	匀速比 /%	减速比 /%
日本 10-15	27.8	70.0	40.9	33.1	46.1	30.71	27.17	20.92	21.20
欧洲 ECE	18.2	50.0	21.9	19.9	34.1	32.99	21.32	28.93	15.86
美国 FTP	34.1	91.2	40.8	39.0	52.3	18.16	39.41	7.84	34.59
上海城市主干道	10.3	41.0	15.5	12.4	15.0	29.68	34.02	7.31	29.09

匀,其加减速工况点具有长时间、持久性和连续性的特点,加速度区间为 $\pm 2.0 \sim \pm 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.与上海城市主干道的工况点分布相比,上述工况在车辆的实际行驶过程中很少出现.相比之下,FTP 工况点分布与实际车辆的行驶工况较为接近,基本没有连续长时间加速或减速过程.可见,NEDC 并不能真实地反映我国机动车在实际道路上的行驶状况.

2.3 不同车速下的各工况排放比较

车辆在实际道路上行驶时,各种污染物的排放会随车速和负载发生变化^[22,23].国内外许多研究表明,车速是影响汽车污染物排放的重要因素^[24,25].

图 4 给出了 4 种工况不同车速时的污染物排放和燃油消耗.从中可见,污染物排放水平随车速的提

高而下降;特别是从超低速段 $0 \sim 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 向 $10 \sim 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 过渡时,污染物排放水平的变化尤为显著.当处于 $0 \sim 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 车速区间时,10-15、ECE 和 FTP 工况的 NO_x 、CO 和 THC 排放水平分别是 $10 \sim 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的 7.7、4.1、3.4、10.1、5.1、4.4 倍和 14.6、7.3、6.8.因为车速区间 $0 \sim 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 中包括了车辆冷、热启动过程以及车速为 0 的怠速过程,因此这是该车速段污染物排放水平较高的主要原因.

相对其它工况,上海城市主干道上的污染物排放水平变化较小,当车速从 $0 \sim 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 向 $10 \sim 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 过渡时,THC、CO 和 NO_x 排放量分别减少了 80.1%、75.9%,和 71.6%.车速从 $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 提高至 $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 之后,污染物的排放变化趋于稳定,THC

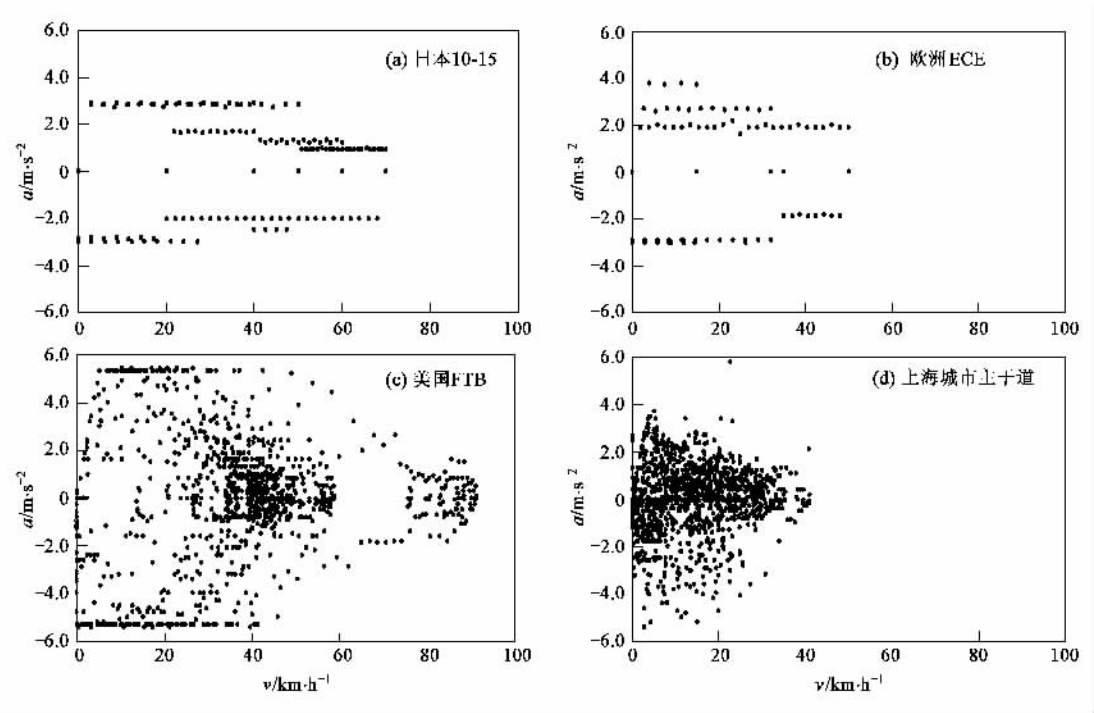


图 3 各个工况条件下速度-加速度工况点分布

Fig.3 Distribution of velocity-acceleration with different driving cycles

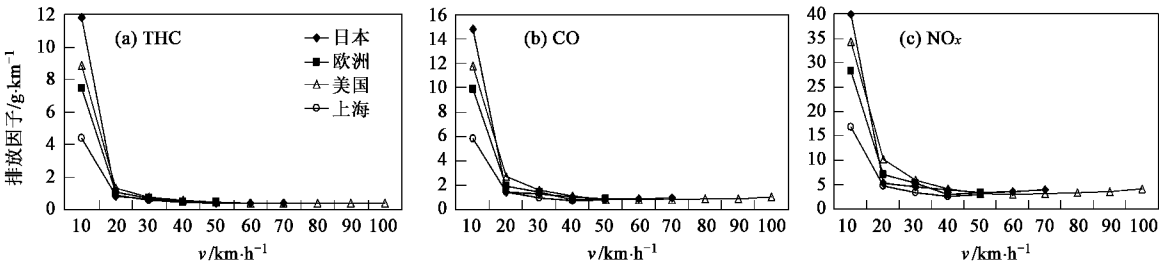


图 4 不同车速下的各工况排放

Fig.4 Emissions of different velocities

和 NO_x 的排放因子变化较小, 分别处于 $0.4 \sim 0.55 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $3.0 \sim 3.5 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间; CO 的排放因子则在 $0.75 \sim 0.95 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 区间内变化。

上述结果显示, 采用欧、美、日和上海城市主干道工况对同一辆机动车在不同车速时的排放进行估算时, 其排放因子随车速的变化趋势基本一致; 但排放因子的绝对值在低速段存在明显差异。

2.4 不同行驶状态下的各工况排放贡献比较

图 5 给出了机动车在欧、美、日和上海城市主干道工况下, 不同行驶状态对污染物排放和油耗的贡献。从中可见, 车辆的加速过程在尾气污染物排放中起主导性作用。加速工况对污染物排放的贡献率均超过 30%, 个别甚至超过 70%。这是因为车辆在加

速过程中, 需要发动机输出的功率较大, 随着进气量和供油量的增大, 空燃比变化很大, 且由于燃烧不稳定, 许多未燃烧的燃料直接从排气管排出, 致使 THC 和 CO 排放量急增; 此时, 又由于燃烧室内 O_2 和 N_2 充足, 且汽缸温度迅速升高, 为 NO_x 的生成创造了有利条件^[18], 因此加速阶段 NO_x 排放较大。

如图 5 所示, FTP 的加速过程对 NO_x 的排放贡献最大, 超过 70%; 其减速过程的污染物排放贡献在 20% 左右, 比例高于其他工况。匀速过程的污染物排放贡献率比例最高的是 ECE 工况, 约占 30%。对上海城市主干道工况, 怠速过程对 THC 和 CO 的贡献分别接近 40% 和超过 30%, 车辆怠速行驶对排放的影响明显高于其他标准工况。

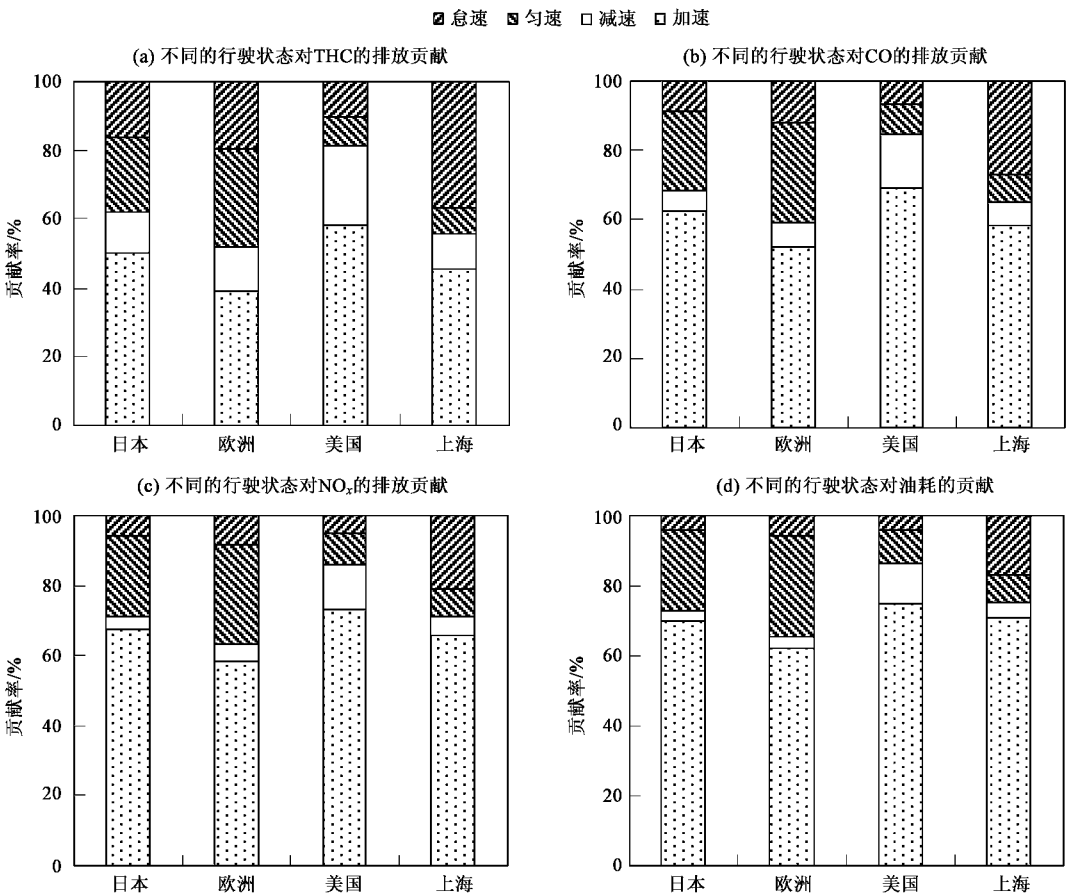


图 5 不同的行驶状态对污染物和油耗的排放贡献

Fig.5 Contribution of emissions and fuel consumptions against different driving states

2.5 各工况的排放水平比较

表 3 中给出了本研究模拟得到的 THC、CO 和 NO_x 的排放水平.从中可见,FTP 的 3 种污染物排放水平最低,而上海城市主干道的污染物排放明显高于其他 3 种工况.对上海城市主干道工况的模拟结果显示,由于该地区的车辆加减速频繁以及汽缸燃烧条件恶劣,致使混合气燃烧不完全,燃油经济性较差,从而导致 THC 和 CO 排放显著增加.上海城市主干道的污染物排放速率虽低于其他工况,但其排放因子却最高,CO、THC、NO_x 的排放因子分别是欧、美、日工况的 1.3、1.5、1.4, 1.5、2.1、1.9 倍和 1.2、1.3、1.3 倍.

造成这一结果的主要原因是,我国城市交通拥堵现象严重,行人和非机动车对行驶车辆的干扰频繁,使得车辆频繁加减速,致使车辆经常处于强加速和紧急制动状态,从而导致柴油车排放状况较差,污染严重,冒黑烟现象突出.这是我国城市交通与欧、美、日的本质区别,也是造成我国车辆排放严重的主要原因之一.

2.6 各工况的燃油经济性比较

图 6 给出了不同工况的机动车燃油经济性的模拟结果.从中可见,同一辆车在不同行驶工况下,其燃油经济性的差异很大^[5,26].模拟结果显示,模拟车辆在上海城市主干道上的燃油经济性最差,仅为 9.56 km•L⁻¹,其他工况均超过 10 km•L⁻¹;其中 FTP 的燃油经济性最好,达 11.6 km•L⁻¹; 10-15 工况次

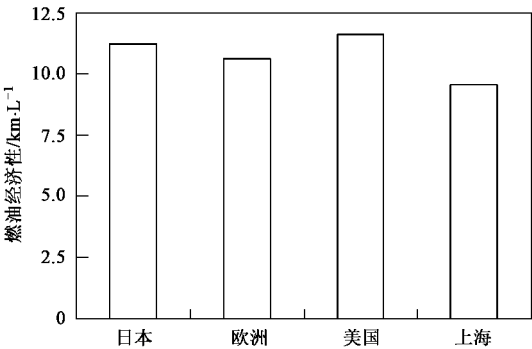


图 6 不同工况的燃油经济性比较

Fig.6 Comparison of fuel economy against different driving cycles

表 3 不同工况的排放水平比较

Table 3 Comparison of emissions against different driving cycles							
工况		THC		NO _x		CO	
		排放速率/mg·s ⁻¹	排放因子/g·km ⁻¹	排放速率/mg·s ⁻¹	排放因子/g·km ⁻¹	排放速率/mg·s ⁻¹	排放因子/g·km ⁻¹
日本	加速	8.2	0.72	79.9	7.04	20.2	1.78
	减速	2.5	0.27	5.9	0.64	2.5	0.28
	匀速	4.6	0.36	35.4	2.76	9.5	0.75
	综合	4.4	0.57	32.2	4.18	8.8	1.14
欧洲	加速	6.8	1.12	16.0	10.27	62.5	2.63
	减速	2.6	0.47	2.5	1.07	5.9	0.46
	匀速	3.6	0.38	6.5	2.37	22.5	0.68
	综合	3.7	0.73	22.8	4.51	6.5	1.30
美国	加速	7.5	0.66	18.1	6.29	71.4	1.60
	减速	3.4	0.31	4.5	1.31	14.2	0.42
	匀速	5.3	0.37	11.6	3.04	44.2	0.80
	综合	5.0	0.53	37.9	4.00	10.2	1.07
上海	加速	4.2	0.97	8.1	6.78	29.2	1.87
	减速	2.6	0.76	2.9	2.12	7.3	0.83
	匀速	3.2	0.75	4.9	3.83	16.0	1.18
	综合	3.1	1.09	15.1	5.28	4.7	1.65

之,为 11.2km; ECE 工况的燃油经济性仅高于上海城市主干道,为 10.6 km•L⁻¹. 计算结果显示,采用 ECE 工况来计算机动车在上海城市主干道上的燃油经济性,其结果可能被高估了 10% 左右.这与李孟良等^[19]的研究结果基本一致.

3 结论

(1) CMEM 的模拟结果与实测结果的变化趋势一致,且模拟值与实测值基本吻合,说明 CMEM 能够较好地反映车辆在实际道路上排放随工况的瞬时变化.

(2) 各国实际道路交通情况不同,各标准工况的特征值差异很大.对比结果可见,FTP 工况点与上海城市主干道的工况点的分布较为接近,但上海工况的行驶速度绝大部分集中在低速段,且平均速度仅为 10.3 km•h⁻¹,而 FTP 工况点则分布在中高速段;ECE 工况与 10-15 工况的加减速具有长时间、持久性和连续性等特点,与实际路况相差明显.

(3) 加速和怠速工况对上海实际路况的排放贡献比较大.对 CO 排放而言,3 种标准工况中怠速对于 CO 排放的贡献率普遍低于 10%;而上海实际路况,怠速对于 CO 排放的贡献率高达 30%.

(4) 上海城市主干道路况的污染物排放速率虽低于其他工况,但由于车辆行驶速度较低,且加减速频繁,使得上海实际道路的污染物排放量显著高于其他标准工况,因此 NEDC 等工况难以确切反映上海在用车辆的实际道路上的排放特点.

(5) 上海城市主干道上的车辆燃油经济性最差,仅为 9.56 km•L⁻¹;与 NEDC 标准测试工况对比发现,若采用 NEDC 工况测算实际的燃油经济性可能被高估了约 10%.

(6) 颗粒物是柴油车尾气排放物中的特征污染物,然而,由于受模型功能的限制,本研究未能给出颗粒物的模拟结果,这方面的研究有待于今后进一步补充与完善.

参考文献:

[1] 谢绍东,张远航,唐孝炎.我国城市地区机动车污染现状与趋势[J].环境科学研究,2000,13(4):22-25.

[2] U.S.EPA.MOBILE6 user's manual [M].Washington: U.S.EPA,2002.11-15.

[3] John K,Mitch C.Draft design and implementation plan for EPA's multi-scale motor vehicle and equipment emission system (MOVES) [R].Washington: U.S.EPA,2002.2-6.

[4] 王海鲲,陈长虹,黄成,等.应用 IVE 模型计算上海市机动车污染排放[J].环境科学学报,2006,26(1): 1-9.

[5] Kyoungho A,Hesham R.The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment,2008,13(3): 151-167.

[6] Wang H K,Chen C H,Huang C, et al .On-road vehicle emission inventory and its uncertainty analysis for Shanghai,China[J].Science of the Total Environment,2008,398(1-3): 60-67.

[7] Davis N,Lents J,Osses M, et al .Development and application of an international vehicle emissions modal [A]. In: Transportation Research Board 81st Annual Meeting[C].Washington DC, 2002.

[8] 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.

- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国国家统计局[EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/>, 2008.
- [11] 中华人民共和国公安部[EB/OL]. <http://www.mps.gov.cn/>, 2008.
- [12] 张建伟, 李孟良, 艾国和, 等. 车辆行驶工况与特征研究[J]. *汽车工程*, 2005, **27**(2): 220-245.
- [13] 周泽兴, 袁盈, 刘希玲, 等. 北京汽车行驶工况和污染物排放系数调查研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **20**(1): 48-53.
- [14] 刘希玲, 丁焰. 我国城市汽车行驶工况调查研究[J]. *环境科学研究*, 2000, **13**(1): 23-27.
- [15] 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.
- [16] Barth M, Carrie M, Younglove T, *et al.* Recent validation efforts for a comprehensive modal emissions model [J]. *Transportation Research Record*, 2001, **1750**(4): 13-23.
- [17] 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.
- [18] Barth M, An F, Younglove T, *et al.* Development of a Comprehensive Modal Emissions Model [R]. US: NCHRP Project 25-11 Final Report, 2000.
- [19] 李孟良, 张建伟, 张富兴, 等. 中国城市乘用车实际行驶工况的研究[J]. *汽车工程*, 2006, **28**(6): 554-557.
- [20] 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.
- [21] 黄成, 陈长虹, 戴璞, 等. 轻型柴油车实际道路瞬时排放模拟研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2975-2982.
- [22] 袁盈, 肖亚平, 傅立新. 机动车污染控制 100 问[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [23] 郝吉明, 傅立新, 贺克斌, 等. 城市机动车排放污染控制: 国际经验分析与中国的研究成果[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000. 12.
- [24] Holmen A B, Niemeier A D. Characterizing the effects of driver variability on real-world vehicle emissions [J]. *Transportation Research Part D*, 1998, **3**(2): 117-128.
- [25] Lim M C H, Ayoko G A, Morawska L, *et al.* The effects of fuel characteristics and engine operating conditions on the elemental composition of emissions from heavy duty diesel buses [J]. *Fuel*, 2007, **86**(12-13): 1831-1839.
- [26] 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.