

深圳市液化天然气与混合动力巴士排放试验研究

高谋荣 黄文伟 孙龙林 万霞

(深圳职业技术学院 深圳 518055)

摘要 利用高精度的移动排放测试仪,对液化天然气巴士和混合动力巴士进行城市典型道路工况下的排放测试,对比分析车辆的排放特征。试验结果表明:液化天然气车较之混合动力车的一氧化碳排放有较大下降,氧化氮排放较为接近,而碳氢化合物排放远高于混合动力巴士;总体而言,LNG 车三种污染排放因子随着车速的增加而不断减少,但三种污染物排放速率却随着车速和加速度的变化增减不一;混合动力车因其纯电动起步模式和加速时采用电机辅助驱动,使得其三种污染物在 15~20 km/h 排放达到最佳,在加速度为 0 时一氧化碳和碳氢化合物排放达到最大值,而氧化氮在加速度 0.5 m/s² 附近达到最大。

关键词 LNG; 混合动力; 排放; 试验研究

中图分类号 X 734.2 **文献标志码** A

Experimental Research on the Emission Characteristics of Liquefied Natural Gas and Hybrid Bus in Shenzhen

GAO Mourong HUANG Wenwei SUN Longlin WAN Xia

(Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract The emission experiments of LNG (Liquefied Natural Gas) bus and Hybrid bus on urban roads were carried out with high-precision mobile emission tester. Then the vehicles' emission characteristics were analyzed. Experimental results show that the CO emission of the LNG vehicle is less than that of the hybrid vehicle, and NO_x emissions are relatively close to each other, while the HC emission of the LNG bus is far higher than that of the hybrid bus. Three emission factors of LNG vehicle decrease with the increase of speed, but the emission rates are different with the change of speed and acceleration. Due to the mode of pure electric start and motor auxiliary accelerating of the hybrid bus, the emissions of the three pollutants achieve the least at the speed of 15-20 km/h, and CO and HC emissions reach their maximums at the acceleration of 0 while the NO_x emission reach its maximum at the acceleration of around 0.5 m/s².

Keywords LNG; hybrid; emission; experiment

1 引言

目前,机动车的尾气排放已经成为影响城市

空气质量的最重要污染源之一。同时,我国的能源越来越紧缺,2013 年中国原油进口 28195 万吨,对外依存度上升至 57.39%,石油安全形势进一步加剧^[1]。液化天然气(Liquefied Natural

收稿日期:2014-11-7 修回日期:2014-11-11

基金项目:深圳职业技术学院科技基金(2213k3100003)

作者简介:高谋荣(通讯作者),副教授,研究方向为汽车排放与控制技术、道路交通污染控制技术,E-mail:mourong@szpt.edu.cn;黄文伟,教授,研究方向为汽车排放与控制技术、新能源汽车技术;孙龙林,讲师,研究方面为汽车排放与控制技术、汽车政策研究;万霞,讲师,研究方面为汽车排放与控制技术、汽车电子技术。

Gas, LNG) 车和混合动力汽车有效地缓解了环境与能源的问题。近年来, 深圳市作为清洁能源示范性城市大力推广 LNG、混合动力和纯电动汽车的使用。深圳某公共汽车有限公司提供的数据显示: 截至 2013 年, 该公司共有公交巴士 3908 辆, 其中混合动力巴士 526 辆, 纯电动巴士 76 辆, LNG 巴士 50 辆。而近 5 年深圳购买的公交巴士又以 LNG 巴士、混合动力巴士及纯电动巴士三种为主, 因此, 针对 LNG 和混合动力巴士排放的研究具有重要的现实和科学意义。

目前国内外不少专家学者对 LNG 车和混合动力车辆的排放进行了研究, 如澳大利亚的 Beer 等^[2]对清洁能源车辆在道路工况下排放的研究和美国社会汽车工程师^[3]对混合动力汽车与传统汽车的排放进行比较等; 国内葛蕴珊学者对 LNG 发动机排放颗粒物粒径分布特性进行研究^[4], 学者李孟良、王领辉等分别对混合动力车的排放特性及油耗特性等进行了研究^[5,6]。但总体而言, 对 LNG 车和混合动力车在实际道路工况下排放规律的研究较为匮乏。通过学者的研究发现, LNG、混合动力车与传统能源车辆排放特性有较大差异, 由于各个城市道路、环境等相差较大, 其排放影响也较大, 因此在深圳市实际道路工况下对 LNG 和混合动力巴士的排放特性进行

了研究。

2 试验设计

2.1 测试系统

研究采用美国 Sensors 公司生产的 SEMTECH-DS 车载排放分析仪, 在城市道路上进行选定车型的排放测试。试验原理如图 1 所示, 测试车辆排放的废气经过排气管后由连接管道全部进入废气流量计测量废气的总流量和排气温度, 废气流量计内部的取样管对废气进行取样, 并传递给车载排放分析仪进行分析。同时, 安装在车辆上的温度湿度计和 GPS 分别对环境空气的温度、湿度以及测试车辆的行驶速度进行测量, 并将信号传递给车载排放分析仪。与车载排放分析仪相连的笔记本电脑可以进行系统的调零、标定和监控, 并收集试验数据。

2.2 试验车辆

本研究采用的测试巴士为深圳市最为普遍使用的混合动力巴士和 LNG 巴士, 混合动力巴士装配最大功率为 136 kW 的发动机和最大功率为 90 kW 的驱动电机, LNG 巴士和普通柴油巴士分别采用最大功率为 191 kW 和 192 kW 的发动机, 测试巴士的具体参数如表 1 所示。

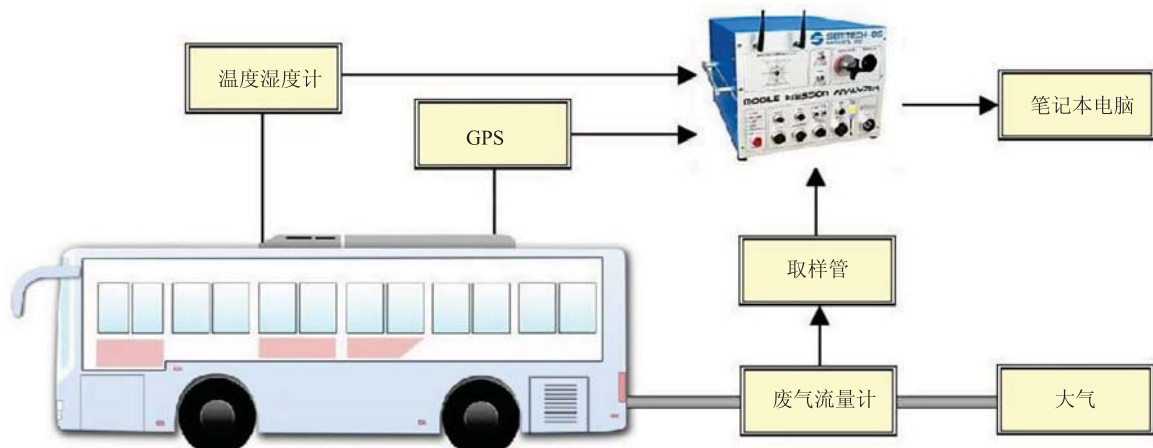


图 1 测试系统简图

Fig. 1 Test system diagram

表 1 测试车辆参数

Table 1 Test vehicle parameters

参数	LNG 车	混合动力车	普通柴油车
发动机功率 (kW)	191	136	192
电动力系统净功率 (kW)	0	90	0
行驶里程 (万公里)	25	23	23
整备质量 (kg)	10500	10500	11000

2.3 试验方法

本研究的试验方法采用道路工况法进行实际行驶工况测试, 试验道路选择深圳市具有代表性的混合型道路深南路作为测试线路。测试从世界之窗起始到上步南路为止, 全长约 15 公里。测试线路如图 2 所示。



图 2 测试路线

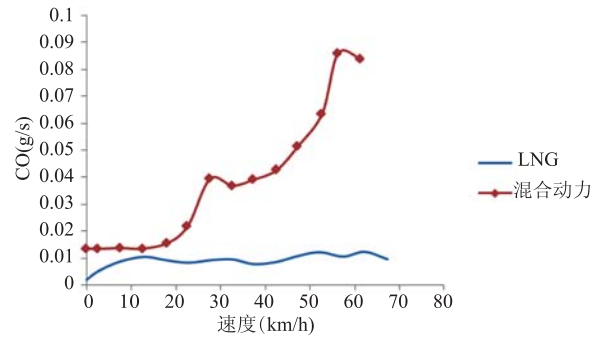
Fig. 2 Test line

3 排放特征分析

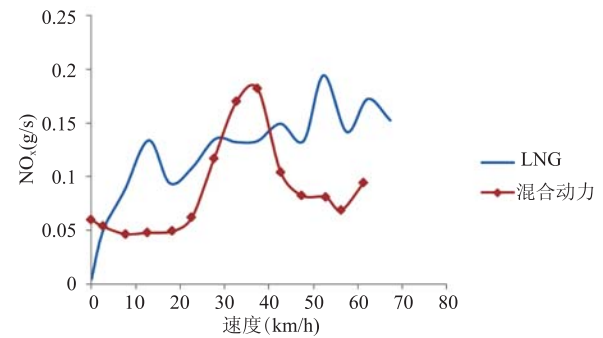
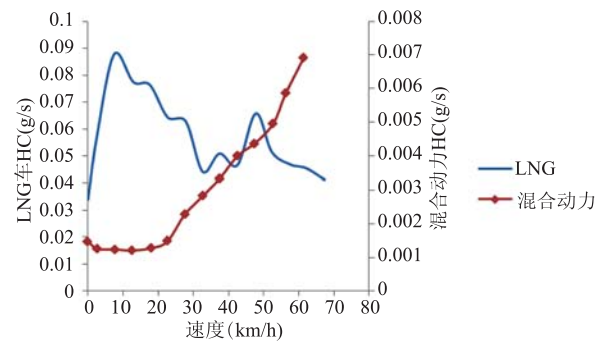
3.1 排放速率分析

排放速率是指单位时间内机动车污染物的排放量。排放速率是最直观的机动车排放结果, 是从机理上分析排放特征并进行排放模拟的有效表现形式。

研究对测试数据进行区间统计, 以 5 km/h 为间隔, 将数据划分为怠速(速度为 0)、(0, 5]、…、(65, 70] 和 >70 等共 16 个区间, 分别求取区间内的一氧化碳(CO)、氧化氮(NO_x)和碳氢化合物(HC)的平均排放速率。LNG 巴士和混合动力巴士的排放数据经过统计整理后如图 3 所示。



(a) CO 的排放速率曲线

(b) NO_x 的排放速率曲线

(c) HC 的排放速率曲线

图 3 各种污染物的排放速率特性

Fig. 3 Characteristics of emission rates of three pollutants

由图 3(a) 可见, 随着车速上升, LNG 巴士的 CO 的排放逐渐增加, 但在 (5, 10] 区间后相对比较平稳, 表现为开始时排放低而后排放较平稳的特征。主要原因可能是在低速时特别是在怠速附近时, 燃料供给少, 生成的 CO 也较少。混合动力巴士的 CO 排放总体呈现出随车速上升而增加的趋势, 在 (0, 20] 区间保持相对稳定, 而在 (20,

30]区间有一个小的瞬间排放尖峰。主要原因可能是在 20 km/h 之前只有驱动电机参与驱动车辆, 而 20 km/h 后, 发动机启动参与直接驱动车辆且给予电池充电, 导致 CO 排放突然增加, 随着车速继续增加、负荷增加, CO 排放也随之增加。

图 3(b) 为 NO_x 的排放速率曲线, 从图可看出, 随着车速的上升, LNG 的 NO_x 排放增加较为明显, 主要原因是车速不断提高, 车辆的燃烧温度随之升高, NO_x 的排放量也增加。混合动力巴士在怠速和低速区间 (0~20 km/h), NO_x 排放量保持稳定, 主要原因亦为混合动力巴士在该速度区间采用纯电动驱动模式, 因而混合动力巴士发动机燃烧室温度相对较低, NO_x 排放较少, 且增加不明显。在混合动力巴士发动机开始接替驱动电机实现对车辆的直接驱动之后, 发动机温度急剧上升, 且车辆加速相对激烈而驱动模式的切换中可能存在不够平顺的情况, 导致 NO_x 排放出现较高的峰值。之后随着负荷增大, 发动机和电机同时对车辆直接驱动, 使得发动机负荷有所下降并且发动机运行更加平顺, 导致 NO_x 排放下降。

从图 3(c) 可看出, LNG 巴士的 HC 排在怠速附近较低, 可能是因为怠速时所供给的燃料较少所致。但在 (5, 10] 区间达到最大值后, HC 排放随速度增加而下降。造成该情况的主要原因可能是, 在低速时燃烧温度较低, 影响了燃点为 650°C 的混合气的燃烧和火焰传播, 这时 HC 排放较多, 而随着温度的上升, 燃烧状况变好, HC 排放减少。混合动力巴士 HC 排放与混合动力巴士 CO 排放趋势相似, 但不同之处是在 (20, 30] 区间并未出现瞬间排放尖峰, 主要原因是在纯电动驱动阶段, 即低速阶段, 发动机 HC 排放保持稳定。发动机直接参与驱动后, 随着车速的增加, 发动机负荷不断增加, 燃烧逐渐恶劣, HC 持续上升。

3.2 排放因子分析

基于行驶里程的排放因子是考察行驶一段距

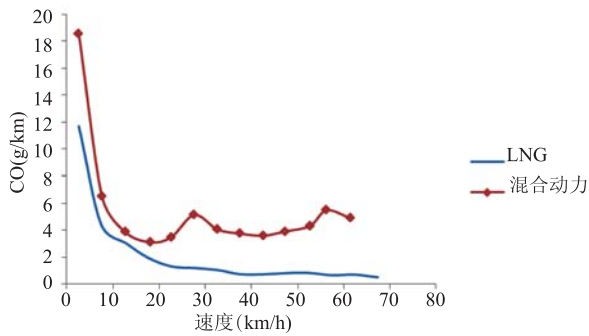
离或完成一个工况的平均排放因子, 即机动车行驶每公里的排放污染物量。这是一种非常直观的表现方法, 但缺点是不能表示汽车处于怠速模式下的排放情况。

与排放速率对数据划分一样, 以 5 km/h 为间隔, 将数据划分 15 个区间, 求取区间内的 CO、 NO_x 和 HC 的平均排放因子。LNG 巴士和混合动力巴士的排放数据经过统计整理后如图 4 所示。

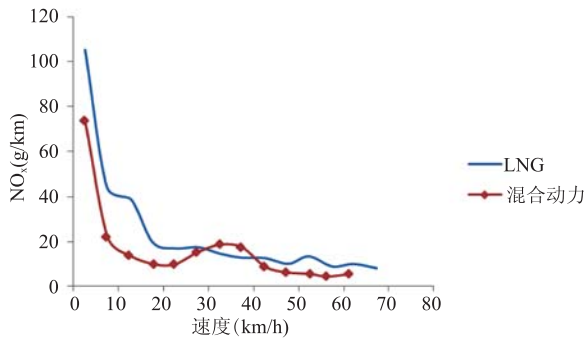
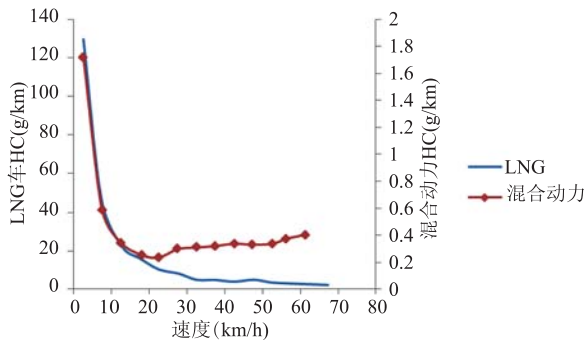
从图 4 的三个图可以看出, LNG 车的 CO、 NO_x 和 HC 排放因子随着车速的增加而明显减小。其中, CO 排放和 HC 排放下降过程无明显的波动, 而 NO_x 在下降过程中出现一定波动。主要原因是: LNG 车富氧燃烧, CO 排放和 HC 排放较为稳定, 下降规律较为明显; NO_x 排放出现波动, 可能是因为 LNG 车在该区间加减速和换挡较频繁。

从图 4 中还可看出, 与 LNG 巴士相同, 混合动力巴士低速时三种污染物排放因子下降较快, 主要原因是车速较低, 单位里程所耗时间随车速增加而减少, 因此车速越高, 排放因子越低。总体而言, 混合动力车辆 CO 排放较 LNG 车辆大, 与排放速率一样在 (20, 30] 区间有一个小的瞬间排放尖峰, 原因亦相同, 即发动机突然参与直接驱动车辆。从图中亦可以看出, 混合动力车辆 CO 排放最低为 (15, 20] 区间, 也就说明在发动机突然参与直接驱动车辆前, CO 排放达到最低。混合动力车辆 NO_x 排放较 LNG 车辆略小, 与 CO 排放相同, 在 (20, 30] 区间有一个瞬间排放尖峰, 但随后 NO_x 排放不断下降, 说明与 CO 和 HC 相比, NO_x 排放因子增加幅度小, 使单位里程 NO_x 排放随着车速不断下降。

而混合动力车辆 HC 排放远低于 LNG 车 HC 排放, 混合动力车辆 HC 排放开始随着车速增加而下降, 与 CO 排放相似, 在 (15, 20] 区间附近达到最低值。而后平稳增加, 但未出现瞬间排放尖峰, 主要原因为发动机参与直接驱动车辆导致



(a) CO 排放因子曲线

(b) NO_x 排放因子曲线

(c) HC 排放因子曲线

图 4 各种污染物排放因子特性

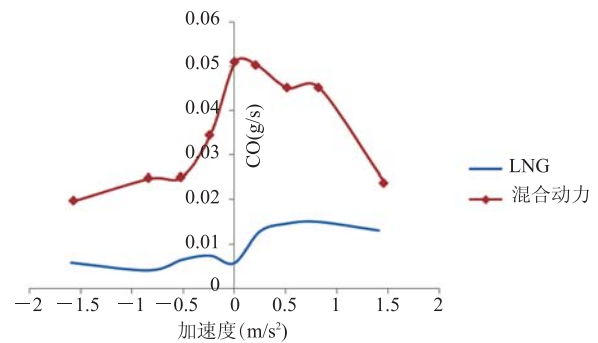
Fig. 4 Characteristics of emission factors

HC 排放增加, 与由于发动机突然参与驱动导致 CO 猛增而出现 CO 瞬间排放尖峰不同, 燃油增加的幅度较为平稳, HC 增加的幅度也较为平稳。

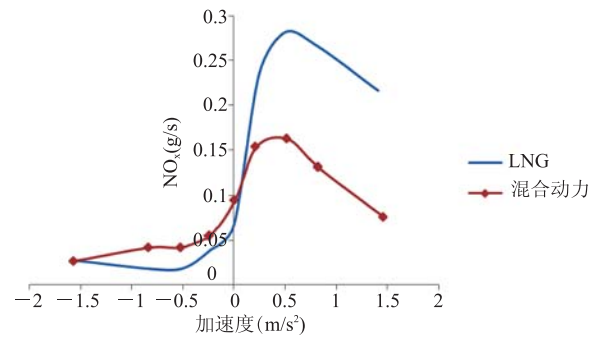
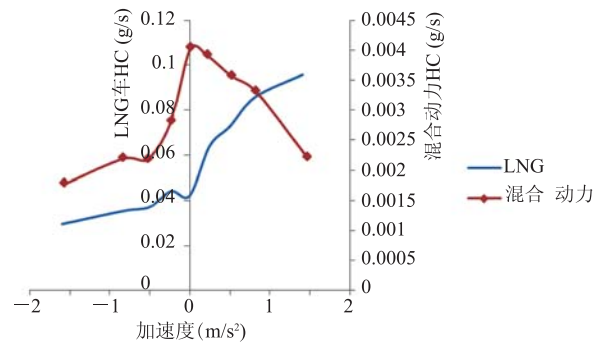
3.3 加速度特性分析

为了进一步分析加速度对 LNG 车和混合动力车排放因子的总体影响。根据深圳市 LNG 车和混合动力车的实际行驶工况, 将加速度分为

9 个加速度区间, 分别为: $D_4 < -1.0 \text{ m/s}^2$ 、 $-1.0 \text{ m/s}^2 \leq D_3 < -0.7 \text{ m/s}^2$ 、 $-0.7 \text{ m/s}^2 \leq D_2 < -0.4 \text{ m/s}^2$ 、 $-0.4 \text{ m/s}^2 \leq D_1 < -0.1 \text{ m/s}^2$ 、 $-0.1 \text{ m/s}^2 \leq Z \leq 0.1 \text{ m/s}^2$ 、 $0.1 \text{ m/s}^2 < A_1 \leq 0.4 \text{ m/s}^2$ 、 $0.4 \text{ m/s}^2 < A_2 \leq 0.7 \text{ m/s}^2$ 、 $0.7 \text{ m/s}^2 < A_3 \leq 1.0 \text{ m/s}^2$ 和 $1.0 \text{ m/s}^2 < A_4$ 。图 5 分别给出了 LNG 车和混合动力车 CO、NO_x 和 HC 的加速度特性。



(a) CO 加速度特性曲线

(b) NO_x 加速度特性曲线

(c) HC 加速度特性曲线

图 5 各种污染物加速度特性

Fig. 5 Acceleration characteristics of emissions

图 5(a) 显示, 当 LNG 车加速度为负时, CO 排放较小, 且当 LNG 车加速度为 0 时, 即车辆匀速时, LNG 车 CO 排放速率接近最低。这是因为在匀速时, 燃烧较为稳定, 导致 CO 排放速率接近最低。而混合动力车 CO 排放速率在匀速和小幅度加速时达到最大值。这是因为混合动力车在加速工况时, 电力系统参与驱动汽车, 因此加速瞬间未增加发动机的负荷, 甚至有可能减轻发动机的负荷, 从而出现加速度增加时 CO 排放下降。

从图 5(b) 看出, LNG 车在加速度为负时和加速度为 0 时, NO_x 排放较小, 主要原因是怠速时温度较低, NO_x 排放少, 因此拉低了匀速时 NO_x 的排放量。而又由于车辆高速时速度相对较为平稳, 加速度相对较小, 这导致 NO_x 排放量在加速度较小时达到最大值。与 LNG 车相类似, 混合动力车在加速度较小时达到最大值, 而加速度较大时和加速度为负时, NO_x 排放较小。

而图 5(c) 则看出 LNG 车 HC 排放随着加速度的增加而不断增加, 特别是加速度为正时, HC 排放增加幅度更大。这是因为加速度增加时燃料供给突然增加, 未燃烧的燃料增加导致 HC 排放增加。而混合动力车 HC 排放与其 CO 排放相类似, 由于加速时电力系统参与驱动电机, 减轻了发动机负担, 导致在匀速附近 HC 排放达到最大值。

3.4 排放总量分析

为了能够掌握 LNG 车和混合动力车的总体污染状况, 以目前常用的普通柴油大巴为参考车型, 对所排放的三种污染物进行比较, 结果如图 6 所示。从图中可以看出, LNG 车 CO 平均排放因子远小于普通柴油巴士和混合动力车。其中, 普通柴油车巴士 CO 平均排放因子为 LNG 巴士的 11 倍左右, 混合动力巴士 CO 平均排放因子约为 LNG 巴士的 5 倍。主要原因在于混合动力车电力系统参与工作, 而 LNG 车燃点高于柴油燃点, 从而导致混合动力车 CO 排放小于普通柴

油车。

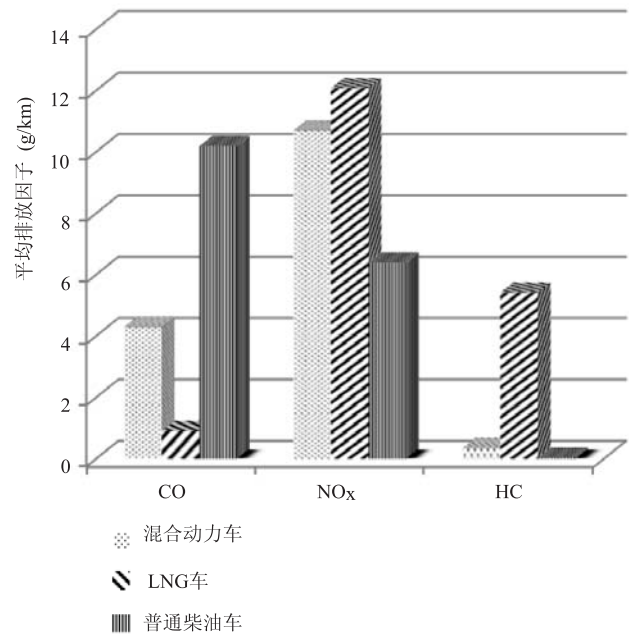


图 6 不同类型车辆各种污染物平均排放因子

Fig. 6 Average emission factors of different types of vehicles

从 NO_x 平均排放因子来看, 混合动力巴士与 LNG 巴士较为接近, 但都高于普通柴油巴士, 这是因为普通柴油车带有 EGR。

从 HC 平均排放因子来看, LNG 车远高于普通柴油巴士和混合动力车。其中, LNG 车 HC 平均排放因子分别为普通柴油巴士的 135 倍和混合动力车的 15 倍。这是因为 LNG 车所供给的燃料为气体, 相对于液态的柴油燃料, LNG 混合气更不均匀。

4 结论

通过以上的研究, 得出以下的结论:

(1) LNG 巴士 CO 排放速率在速度为 0 附近时较低, 从 (5, 10] 区间开始相对比较平稳, 其 NO_x 随着车速的增加而快速增加, 其 HC 排在速度为 0 附近时较低, 在 (5, 10] 区间达到最大值, 之后排放速率逐渐减小; 混合动力巴士的

CO、NO_x 和 HC 排放速率在 (15, 20] 区间之前保持稳定, 而后 CO 和 NO_x 出现排放尖峰, 尖峰之后 CO 不断增加, NO_x 则减少, HC 排放速率在 (15, 20] 区间后随着速度不断增大, 未出现排放尖峰现象。

(2) LNG 车 CO、NO_x 和 HC 排放因子都随着车速的增加而下降, 但 NO_x 在下降过程中有波动; 混合动力车辆 CO 和 HC 排放在 (15, 20] 区间附近达到最低值, NO_x 在该区间也达到一个较低值, 因此在发动机直接参与驱动车辆前为混合动力车排放最佳区域。

(3) 由于电力系统参与工作, 混合动力大巴 CO 和 HC 最大排放值出现在加速度为 0 附近, NO_x 最大值则出现在加速度较小时; LNG 车则在加速度为 0 时 CO 达到最小值, 其 NO_x 最大值在 (0.4, 0.7] 区间, 而 HC 排放则随着加速度的增加而不断增加。

(4) 混合动力车 CO 排放小于普通柴油车, LNG 车 CO 平均排放因子小于普通柴油车和混合动力车; LNG 车和混合动力车 NO_x 平均排放因

子相近, 且大于普通柴油大巴; LNG 车 HC 排放量远高于传统柴油大巴和混合动力大巴。

参 考 文 献

- [1] 中财网. 2013 年中国原油对外依存度达到 57.39% [EB/OL]. [2014-11-11]. <http://www.cfi.net.cn/p20140123000497.html>.
- [2] Beer T, Grant T, Brown R, et al. Life-cycle emissions analysis of alternative fuels for heavy vehicles [C] // CSIRO Atmospheric Research Report, 2000.
- [3] SAE-J2711-2002. Recommended practice for measuring fuel economy and emissions of hybrid-electric and conventional heavy-duty vehicle [S].
- [4] 刘志华, 葛蕴珊, 丁焰. 柴油机和 LNG 发动机排放颗粒物粒径分布特性研究 [J]. 内燃机学报, 2009, 27(6): 518-522.
- [5] 李孟良, 刘伏萍, 陈燕涛, 等. 基于 PEMS 的混合动力客车排放和油耗性能评价 [J]. 江苏大学学报, 2006, 27(1): 27-30.
- [6] 李孟良, 聂彦鑫, 高继东, 等. 混合动力客车与常规客车排放对比研究 [J]. 汽车工程, 2010, 32(3): 193-197.