

An Evaluation of the Life Cycle Economic Dynamic Difference between the LNG and Diesel Heavy Commercial Vehicles

Yisong Chen^{1,2}, Jinqiu Ma^{1,2}, Hao Chen^{1,2}, Xiaoyue Tu^{3,4}

¹School of Automobile, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

²Transport New Energy Development, Application and Key Laboratory of Automobile Energy Conservation in Shanxi Province, Xi'an Shaanxi

³C & C Trucks, Wuhu Anhui

⁴Hunan University, Changsha Hunan

Email: chenysisong@163.com, wdxkmjq@126.com

Received: May 3rd, 2018; accepted: May 21st, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

This paper creates a model based on system dynamic to assess the economic difference between Liquefied Natural Gas (LNG) heavy duty commercial vehicles and diesel engine heavy duty commercial vehicles. According to this model, a case study has been conducted, which selected the two types of agitating lorry in the same class from market. This research quantitatively evaluates the economic difference while some significant parameters (such as gas/diesel cost ratio, gas/diesel consumption ratio and mileage) are in dynamic situation. In conclusion, the results show the economic difference between LNG agitating lorry and diesel agitating lorry is much affected by the gas/diesel cost ratio and gas/diesel. Further, the economic effect is more significantly along with the mileage increase.

Keywords

LNG, Diesel Heavy Commercial Vehicle, Dynamic System, Economic Difference, LCA

LNG和柴油重型商用车全生命周期经济性差异动态评价

陈轶嵩^{1,2}, 马金秋^{1,2}, 陈昊^{1,2}, 涂小岳^{3,4}

¹长安大学汽车学院, 陕西 西安

²交通新能源开发、应用与汽车节能陕西省重点实验室, 陕西 西安

³集瑞联合重工有限公司, 安徽 芜湖

⁴湖南大学, 湖南 长沙

Email: chenysisong@163.com, wdxkmjq@126.com

收稿日期: 2018年5月3日; 录用日期: 2018年5月21日; 发布日期: 2018年5月28日

摘要

为了对液化天然气(LNG)汽车的经济性做一个全面的分析, 探明LNG汽车相对于传统燃油汽车的经济效益, 建立了LNG和柴油重型商用车全生命周期经济性差异评价的系统动力学模型, 并运用该模型对某企业已生产销售的同级别LNG搅拌车和柴油搅拌车的经济性差异进行实证研究, 量化评价了气油价格比、气油耗比、车辆行驶里程等因素变化时两款车的全生命周期经济性差异变化情况。研究表明, 气油价格比、气油耗比的变化对LNG重型商用车与柴油车的经济效益差异影响明显, 并且行驶里程越长, 影响越显著。从生命周期角度来看, LNG重型商用车相比于传统柴油重型商用车于使用者而言具有更可观的经济效益。

关键词

LNG, 柴油重型商用车, 系统动力学, 经济性差异, 生命周期评价

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然气行业的技术创新推动了压缩天然气(CNG)和液化天然气(LNG)的蓬勃发展, 天然气能源的使用已成为现阶段工业社会向“低碳未来”转型的一种有效路径[1]。近年来, LNG逐渐作为新兴的替代能源广泛的被应用于交通运输领域中[2], 国内陕汽、华菱、集瑞等厂家生产的LNG重型商用车已在市场上推广运营。但目前LNG汽车产业相关技术尚不成熟, 仍处于起步发展阶段, 因此从各方面科学、合理地对LNG汽车进行研究评估于LNG汽车产业的发展具有重要的指导意义。

针对LNG汽车产业目前发展面临的众多问题及未来发展的不确定因素, 我国LNG汽车产业发展的总体情况与趋势得到了相关人士的广泛关注[3] [4] [5] [6]。从环境方面来看, 部分学者针对本国的LNG车辆进行了全生命周期的环境分析[7] [8] [9], 例如南昆士兰大学的Barnett等人对澳大利亚的液化天然气生产与使用过程的生命周期内环境影响进行了相关研究与论述, 总结了LNG使用对本国环境的多方位影响并提出相关合理建议对策[10]; 国内湖南大学涂小岳等人通过全生命周期评价方法(LCA)对比分析了中国LNG车辆与传统燃油商用车的能源消耗和环境排放结果, 发现LNG汽车在节能减排方面具有很好的应用前景[11] [12] [13]。此外, 针对商用车特殊用途, 车辆燃料经济性因素也得到关注, 国内外已有部分学者对LNG重型商用车的经济性和可行性做了定性论述[14] [15] [16], 或从燃料角度对CNG和LNG客车的使用成本做了计算等, 但迄今为止专门从动态视角针对LNG和柴油重型商用车做经济性差异对比的研究还尚未发现。

本文基于系统动力学方法建立了LNG和柴油重型商用车经济性差异动态评价模型, 并选取某公司已

生产销售的同级别 LNG 和柴油搅拌车作为实证研究对象,运用该模型分析了气油价格比、气油耗比、车辆行驶里程等因素的动态变化对 LNG 和柴油重型商用车经济性差异变化的影响,以期为国家制定未来 LNG 汽车产业发展战略决策提供参考,也可为相关企业开拓新市场提供帮助。

2. 系统动力学模型

2.1. 确定边界

本文建立的 LNG 和柴油重型商用车全生命周期经济性差异评价系统动力学模型由重型商用车运营收入和重型商用车运营成本两个子系统构成,运营收入子系统主要计算重型商用车在整个生命周期内能为用户带来的经济收入,而运营成本子系统则用于计算用户在使用重型商用车时所需付出的各种运营成本。上述两个子系统之间存在众多互相影响、相互反馈的联系,此外也存在诸多影响子系统的外部条件。为方便研究讨论,本模型在确定边界时,仅研究两个子系统之间的逻辑关系以及 LNG 和柴油重型商用车之间的差异关系,对于外部条件和非差异关系不予考虑。

2.2. 选取变量

根据已确定的系统边界,本文根据如下原则选取变量:1) 所选变量能够从宏观上描述整个重型商用车经济性的发展变化规律,而不仅仅针对某一款车;2) 所选变量动态变化时能够充分反应出 LNG 重型商用车和柴油重型商用车的经济性差异变化规律,对于非差异变化不予考虑;3) 所选变量能够充分反应重型商用车行业普遍关注的焦点问题。

通过与企业深入合作、进行市场调研并召开专家研讨会进行反复讨论,本模型选取柴油价格(元/升)、天然气价格(元/立方米)、气油价格比[天然气价格(元)/柴油价格(元)]、气油耗比[百公里气耗量(千克)/百公里油耗量(千克)]、车辆行驶里程(公里)五个因素作为变量[17]来研究各个变量动态变化时 LNG 和柴油重型商用车的经济性差异变化规律。

2.3. 建立流图

根据系统边界和已选取的变量,首先使用基于系统动力学的 Vensim 软件定义各种状态量、速率量及其它变量,然后根据运营收入和运营成本两个子系统之间的内在联系,对各变量之间的关系进行深入分析,理清系统各变量间的因果关系,在此基础上建立 LNG 和柴油重型商用车经济性差异的系统流图,并召开专家论证会对流图的正确性进行充分论证。最终构建好的 LNG 和柴油重型商用车全生命周期经济性动态差异分析模型的系统流图如图 1 所示。

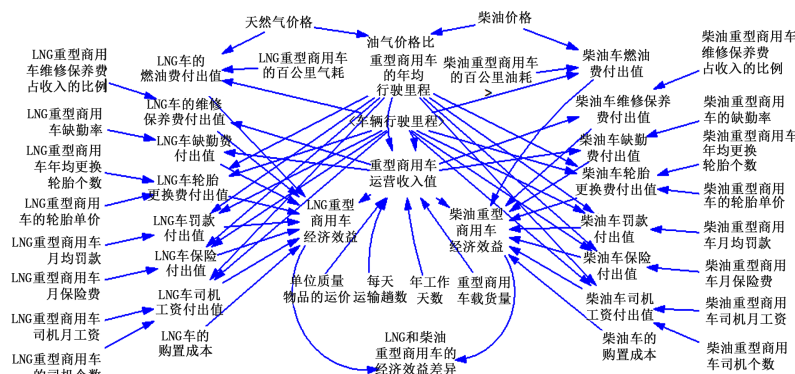


Figure 1. Dynamic life cycle economic difference analysis system flow chart of LNG and diesel heavy commercial vehicles
图 1. LNG 和柴油重型商用车的全生命周期经济性动态差异分析系统流程图

2.4. 输入方程

根据已构建的系统流程图，将运营收入子系统和运营成本子系统的各个计算方程和方程参数分别代入流程图。

1) 运营收入子系计算方程

设 e 为重型商用车单位质量物品的运价(元/吨), v 为该款车的载货量(吨/趟), T 表示满勤工作天数(天), q 表示每天运输趟数(趟), L 表示生命周期总行驶里程(公里), s 为年均行驶里程(公里), 则运营收入 INV (万元)的计算方程为:

$$INV = e \times v \times T \times q \times L / s \quad (1)$$

2) 运营成本子系计算方程

用户使用重型商用车时所需付出的成本构成如图 2 所示。则运营成本 $OUTC$ (万元)的计算方程为:

$$OUTC = \sum_{i=1}^7 C_i \quad (2)$$

$i = 1 \sim 7$ 分别表示图 2 所示的购置成本、燃料成本、维修保养成本、缺勤成本、轮胎更换成本、罚款与保险费和司机工资。

运营收入和运营成本之差即为重型商用车的经济效益, 在本模型中用来反映重型商用车的经济性, 并将经济效益差异定义为 LNG 重型商用车的经济效益减去柴油重型商用车的经济效益。

2.5. 检查调试

将各个变量的计算方程输入系统流程图后, 检查各方程的参数和语法, 对模型进行初步调试。运用 Vensim 软件自带的纠错功能修改方程、修正参数, 保证模型能够顺利运转, 模型的计算准确性和精度需结合实证数据再进行检验与调试(详见 3.2)。至此, LNG 和柴油重型商用车经济性差异评价的系统动力学模型已构建好, 该模型具有普适性和通用性, 可定量研究各因素变化时, 各类型 LNG 和柴油重型商用车(包括牵引车、自卸车、搅拌车等)经济性差异的变化规律。

3. 实证研究

3.1. 实证对象选择

本文选择评价对象按照以下原则: 1) 为同一级别的车型, 车身外廓尺寸相同, 重量差别较小; 2) 各自能源动力系统的代表性车型, 动力、排放技术处于同级别车领先水平, 气体发动机和柴油发动机的额定功率相近; 3) 两种类型的车辆具有相同或尽可能接近的驾乘感受、动力性、舒适性、安全性。

经过符合上述原则的筛选, 本文选定某企业生产并已投入市场运营的某款 LNG 搅拌车和柴油搅拌车作为代表性车型进行评价, 通过实地调研, 得到本文研究车型的基本参数如表 1 所示。

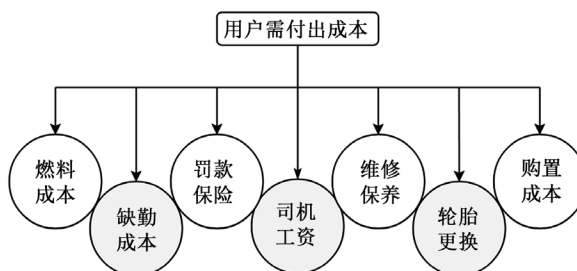


Figure 2. Operation cost of heavy commercial vehicles

图 2. 重型商用车运营成本构成

Table 1. The basic model parameters**表 1.** 车型基本参数表

车 型	柴油车搅拌车	LNG 搅拌车
型 号	SQR5250GJBD6T4-1	L51TB
外形尺寸 长 × 宽 × 高 (mm × mm × mm)	10,055 × 2500 × 3980	10,055 × 2500 × 3980
搅拌罐容积(m ³)	12	12
满载质量(kg)	45,030	45,176
供给系统容积(L)	300	375
百公里油、气耗(L)	58.1	120

数据来源：企业的实地采集和调研。

本文实证研究数据来源为该企业 2016 年 7 月~2017 年 10 月间生产销售的 LNG 搅拌车和柴油搅拌车。其中：车辆运行数据选取了武汉、重庆、昆明、合肥、深圳、惠州 5 个试验单位有完整数据记录的 62 台车超过 35,000 公里的试验数据，并设 LNG 搅拌车和柴油搅拌车的寿命为 5 年(40 万公里)，在综合工况下将其二者进行比较。

3.2. 模型检验与调试

根据已构建好的模型，在初步检查调试的基础上，运用 Vensim 软件强大的调试功能，结合实证对模型再次进行检验和调试。首先将 LNG 搅拌车和柴油搅拌车的基本参数代入模型进行计算，再根据计算结果修改方程、修正参数，并通过多次仿真模拟，提高模型的计算精度。

经过检验与调试后，计算得出搅拌车经济收入值 $INV = 338.4$ 万元，成本付出值如表 2 所示。

从计算结果可以发现，虽然 LNG 搅拌车的购置成本比柴油搅拌车多了 7.93 万元，维修保养成本多了 0.677 万元，但燃料成本却比柴油搅拌车少了 52.44 万元。最终得出的 LNG 和柴油搅拌车带来的经济效益分别为 56.788 万元和 12.955 万元，LNG 比柴油搅拌车多了 43.833 万元，对使用寿命仅 5 年的搅拌车用户而言，LNG 搅拌车表现出了巨大的经济性优势。

同时还可以看出，经过反复调试后，该系统动力学模型进行静态计算的结果与运用数学方法计算得出的结果误差在 0.1%之内，说明该模型可以进行十分准确的动态仿真与模拟。

3.3. 动态模拟与分析

根据已构建的系统动力学模型，分别研究柴油价格、天然气价格、气油价格比、气油耗比、车辆行驶里程变化时，LNG 和柴油搅拌车经济性差异(此处定义为 LNG 重型商用车的经济效益减去柴油重型商用车的经济效益)的变化规律。下面将从以下 5 中情况分别进行讨论说明。

1) 天然气价格不变，柴油价格变化

在动态模型中，将柴油价格作为自变量，其他因素作为常量，模拟柴油价格从当前的 7.61 元/升线性连续增长到 8.61 元/升时，LNG 和柴油搅拌车的经济效益差异变化趋势，如图 3 所示。

从图 3 中可以看出，当柴油价格从 7.61 元/升增长到 8.61 元/升时，LNG 和柴油搅拌车的经济效益差异值从 43.8336 万元增加到 67.0736 万元，增加值为 23.24 万元。

2) 柴油价格不变，天然气价格变化

在动态模型中，将柴油价格作为自变量，其他因素作为常量，模拟天然气价格从当前的 4.32 元/立方米线性连续增长到 5.32 元/立方米时，LNG 和柴油搅拌车的经济效益差异变化趋势，如图 4 所示。

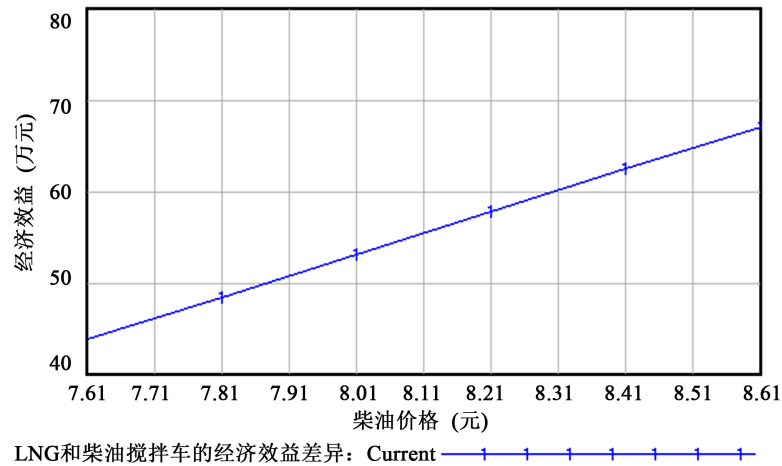


Figure 3. The variation trend of economic benefits difference between LNG and diesel agitator lorry as a function of diesel prices

图 3. LNG 和柴油搅拌车经济效益差异随柴油价格的变化趋势

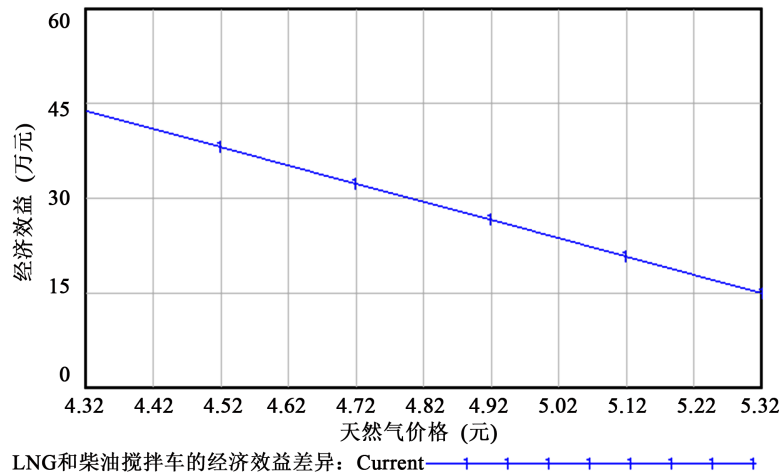


Figure 4. The variation trend of economic benefits difference between LNG and diesel agitator lorry as a function of nature gas prices

图 4. LNG 和柴油搅拌车经济效益差异随天然气价格的变化趋势

Table 2. The cost composition of LNG and diesel agitator lorry

表 2. LNG 和柴油搅拌车的成本付出值

成本付出值(万元)	LNG 搅拌车	柴油搅拌车	差异
购置成本	38.440	30.510	7.930
燃料成本	124.420	176.860	-52.440
维修保养成本	10.152	9.475	0.677
缺勤成本	37.600	37.600	0.000
轮胎更换成本	11.000	11.000	0.000
罚款与保险	24.000	24.000	0.000
司机工资	36.000	36.000	0.000
合计	281.612	325.445	-43.833

从图4中可以看出,当天然气价格从4.32元/立方米变化到5.32元/立方米时,LNG和柴油搅拌车的经济效益差异值从43.8336万元减少到15.0336万元,减少值为28.80万元。

观察图3和图4,可以发现图3中曲线的斜率大于图4中曲线的斜率,即LNG和柴油搅拌车的经济效益差异值变化规律中,当气价上涨1元时二者经济效益的差异值大于油价上涨1元的差异值。根据实地调研情况,目前我国柴油价格变化在1元内波动,而气价的涨幅也通常不超过1元,因此在油价、气价按此规律变化的情况下,气价的变化对LNG和柴油搅拌车经济效益差异更加敏感。

3) 气油价格比变化

在动态模型中,将气油价格比作为自变量,其他因素作为常量,研究气油价格比变化引起的LNG和柴油搅拌车燃料费差异变化情况。在此,LNG和柴油搅拌车的燃料费差异变化率 = (LNG搅拌车的燃料费 - 柴油搅拌车的燃料费)/LNG搅拌车的燃料费,模拟气油价格比从0.5线性连续变化到1.0时,LNG和柴油搅拌车的燃料费差异变化率的变化情况,如图5所示。

从图5中可以看出,当气油价格比从0.50变化到1.0时,LNG和柴油搅拌车的燃料费差异变化率从-61.3889%变化到了19.3056%,变化值为80.6945%,当气油价格比大于0.8067时,变化率由负值变为正值,即LNG搅拌车的燃料费将高于柴油搅拌车,而目前我国大部分地区的气油价格比都不超过0.580 [18],因而LNG搅拌车的经济性优势十分明显。

4) 气油耗比变化

在动态模型中,将气油耗比作为自变量,其他因素作为常量,研究由气油耗比变化引起的LNG和柴油搅拌车燃料费差异变化情况。模拟气油耗比从1.100线性连续变化到1.200时,LNG和柴油搅拌车的燃料费差异变化率的变化情况,如图6所示。

从图6中可以看出,当气油耗比从1.100变化到1.200时,LNG和柴油搅拌车的燃料费差异变化率从-46.1624%变化到了-33.9822%,变化值为12.1802%,说明在当前众多企业的气油耗比能做到1.100到1.200水平时,LNG搅拌车的燃料费小于柴油搅拌车,依旧具有经济性优势。

5) 车辆行驶里程变化

在动态模型中,将车辆行驶里程作为自变量,其他因素作为常量,模拟车辆行驶里程由0公里到400,000公里连续变化时,LNG和柴油搅拌车经济效益的变化情况,如图7所示。

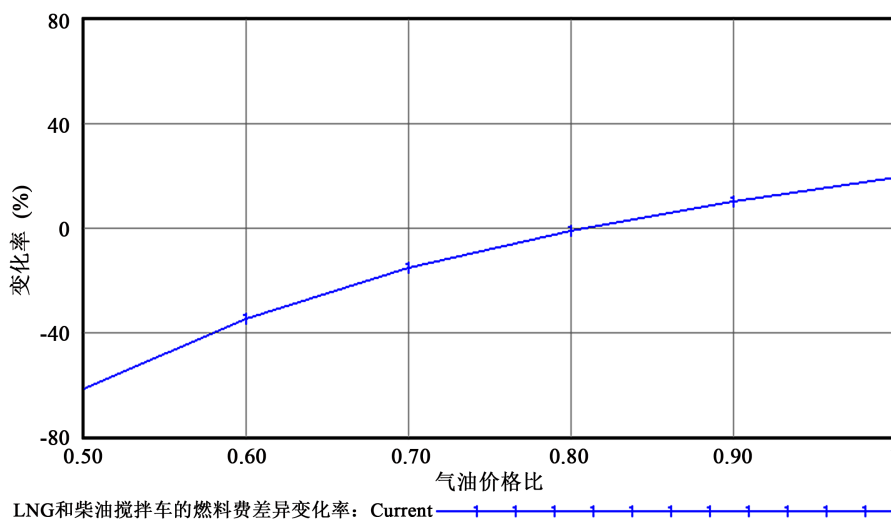


Figure 5. The variation trend of the change rate of difference in fuel cost between LNG and diesel agitator lorry as a function of gas/diesel price ratio

图5. LNG和柴油搅拌车燃料费差异变化率随气油价格比的变化趋势

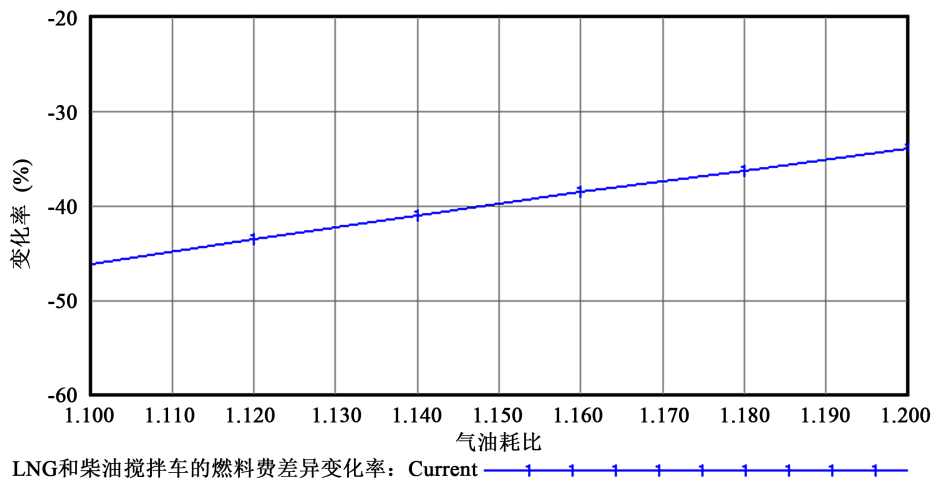


Figure 6. The variation trend of the change rate of difference in fuel cost between LNG and diesel agitator lorry as a function of gas/diesel costs ratio

图 6. LNG 和柴油搅拌车燃料费差异变化率随气油耗比的变化趋势

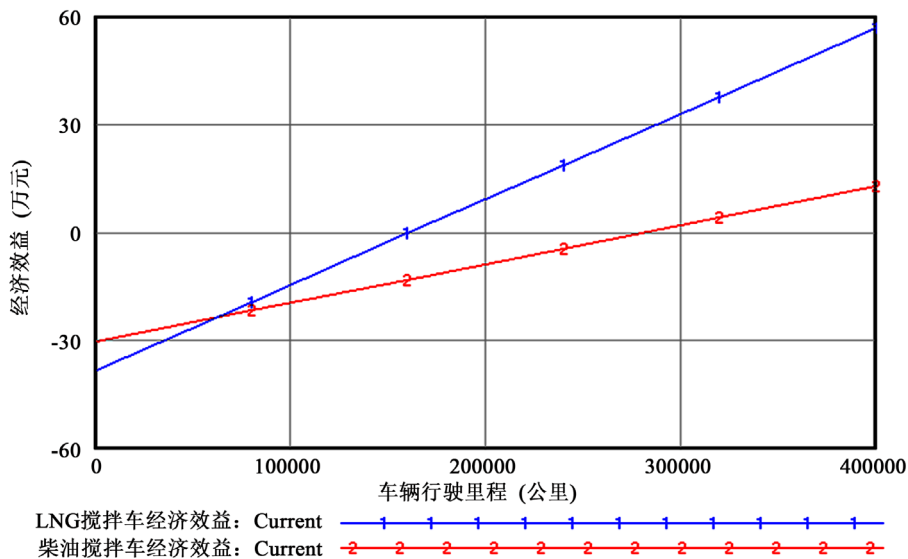


Figure 7. The variation trend of economic benefits difference between LNG and diesel agitator lorry as a function of vehicle mileage

图 7. LNG 和柴油搅拌车经济效益随车辆行驶里程的变化趋势

从图 7 中可以得到线 1 和线 2 交叉点的横坐标为 61,279 公里, 即当车辆行驶里程小于 61,279 公里时, 用户使用 LNG 搅拌车获得的经济效益低于柴油搅拌车, 当行驶里程大于 61,279 公里时, 高于柴油搅拌车。还可看出在 61,279 公里这个交叉点时, LNG 和柴油搅拌车的经济效益都为负值, 说明用户使用搅拌车行驶 61,279 公里时, 付出的成本还未完全收回, 即处于尚未盈利状态。

从图 7 中还可以得到线 1 和线 2 与经济效益 0 元横轴交叉点的横坐标分别为 161,458 公里和 280,755 公里, 说明用户使用 LNG 搅拌车行驶 161,458 公里时即开始盈利, 而柴油搅拌车则为 280,755 公里, 因此 LNG 搅拌车早于柴油搅拌车 119,297 公里就开始盈利, 盈利时间上优于柴油搅拌车。

根据目前我国搅拌车年均行驶里程为 80,000 公里现状推算, 用户使用 LNG 搅拌车不到 1 年时间, 获得的经济效益就将高过柴油车, 而且 LNG 车早于柴油车开始盈利, 对于 LNG 车而言运营 24 个月左右

即可收回成本并开始盈利，而柴油搅拌车则需要运营 42 个月左右才可收回成本进入盈利状态。此外，随着行驶里程的增加，二者的经济效益差异将越明显。

4. 结论

本文通过建立 LNG 和柴油重型商用车经济性差异评价的系统动力学模型，进行了相关实证计算分析，最终得到了基于系统动力学的 LNG 和柴油重型商用车经济性差异评价结果。结果表明：

1) 虽然目前 LNG 重型商用车的购置成本高于柴油车，但结合动态评价法发并是整个生命周期视角来看，使用 LNG 重型商用车的经济效益明显优于传统柴油重型商用车。

2) 随着行驶里程的增加，LNG 重型商用车所产生的经济效益较传统柴油商用车而言愈发显著，其中经济性差异值的大小主要取决于气油价格比、气油耗比等敏感因素的变化程度。

3) 加大对 LNG 重型商用车的推广应用，提高商用车领域 LNG 的占比，对于使用者而言在全生命周期经济性角度上具有很大的推广价值。

基金项目

教育部社科青年基金(16YJCZH008)；陕西省自然科学基金(2017JQ7003)；陕西省社会科学基金(2016R027)；中央高校基金(310822171001、310822170661)。

参考文献

- [1] Boersma, T. and Jordaan, S.M. (2017) Whatever Happened to the Golden Age of Natural Gas. *Energy Transitions*, **1**, 5. <https://doi.org/10.1007/s41825-017-0005-4>
- [2] 罗夔靓, 颜映果. 公路客车选用 LNG 燃料的经济性分析[J]. 中国西部科技, 2014, 13(6): 55-57.
- [3] 张明锋, 方正, 韩涛, 等. LNG 燃料汽车的应用研究[J]. 能源研究与管理, 2013(2): 49-52.
- [4] 冯陈玥, 段兆芳, 单卫国. LNG 汽车发展现状及相关问题分析[J]. 中国能源, 2014, 36(2): 32-35.
- [5] Tong, F., Jaramillo, P. and Azevedo, I.M.L. (2015) Comparison of Life Cycle Greenhouse Gases from Natural Gas Pathways for Light-Duty Vehicles. *Energy & Fuels*, **29**, 6008-6018. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01063>
- [6] Tong, F., Jaramillo, P. and Azevedo, I.M. (2015) Comparison of Life Cycle Greenhouse Gases from Natural Gas Pathways for Medium and Heavy-Duty Vehicles. *Environmental Science & Technology*, **49**, 7123. <https://doi.org/10.1021/es5052759>
- [7] Abrahams, L.S., Samaras, C., Griffin, W.M., et al. (2015) Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from U.S. Liquefied Natural Gas Exports: Implications for End Uses. *Environmental Science & Technology*, **49**, 3237-3245. <https://doi.org/10.1021/es505617p>
- [8] Barnett, P.J. (2010) Life Cycle Assessment (LCA) of Liquefied Natural Gas (LNG) and Its Environmental Impact as a Low Carbon Energy Source.
- [9] 涂小岳, 杨沿平, 徐建全, 陈轶嵩. LNG 重型商用车和柴油重型商用车全生命周期环境排放差异评价[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1525-1530.
- [10] Shi, J.L., Li, T., Peng, S.T., et al. (2015) Comparative LCA of Remanufactured Liquefied Natural Gas and Diesel Engines in China. *Journal of Cleaner Production*, **101**.
- [11] Shi, J.L., Li, T., Liu, Z.C., et al. (2015) Life Cycle Environmental Impact Evaluation of Newly Manufactured Diesel Engine and Remanufactured LNG Engine. *Procedia Cirp*, **29**, 402-407. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.029>
- [12] 王磊. LNG 与 CNG(柴油)燃料重型卡车经济性对比分析[J]. 化工管理, 2014(17): 44.
- [13] 王惠明, 梁政. LNG 汽车产业发展可行性的模糊分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012(6): 161-168.
- [14] 熊标, 华贲, 徐文东. LNG 汽车在我国的发展优势及其产业链分析[J]. 天然气工业, 2006(6): 146-148, 175.
- [15] 罗东晓. 柴油汽车改用 LNG 燃料的实用技术及其经济性分析[J]. 天然气工业, 2012(9): 92-97.
- [16] 何春蕾, 周国栋, 姜子昂, 等. 全球环境下的中国天然气供应安全[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 123-126.
- [17] 张珺, 黄艳. 中国天然气供应安全指数构建与建议[J]. 天然气工业, 2015, 35(3): 125-128.
- [18] 张晓慧. 我国油气资源——社会经济系统协调发展研究[J]. 中国石油大学, 2008, 30(3): 14-17.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-7924，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jlce@hanspub.org