

国六 LNG 与柴油重卡经济性及排放特性的对比分析

杨保华¹, 李源¹, 李园², 方艳林¹, 吴昊明¹, 刘树成^{1*}

1. 山东省机动车排气污染监控中心, 山东 济南 250100; 2. 济南汽车检测中心有限公司, 山东 济南 250100

摘要:为研究不同燃料国六重型卡车的经济性和实际排放特性,以国内重卡中占比最高的液化天然气(liquefied natural gas, LNG)重卡和柴油重卡为研究对象,深入调研两种重卡的购买、使用及维修保养等成本,对比分析两种重卡的经济性;对新生产和在用的 40 辆国六 LNG、柴油重卡进行实际道路排放试验,对具有代表性的 LNG、柴油重卡发动机进行原始排放测试,分析两种重卡整车道路实际排放和发动机原始排放。结果表明:在年运行里程为 20 万 km 的情况下, LNG 重卡首年综合经济效益比柴油重卡高 122 800 元;新生产 LNG 重卡的实际道路 NO_x 比排放低于柴油重卡,但在用 LNG 重卡的实际道路 NO_x 比排放高于柴油重卡, LNG 重卡的实际道路 CO 比排放始终高于柴油重卡; LNG 发动机的 NO_x、THC、CO 原始排放均明显高于柴油发动机,其中 CO 排放的差异尤为显著。

关键词: LNG 重卡; 柴油重卡; 经济性分析; NO_x 排放; CO 排放

中图分类号: U461.8; TK421.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2025)02-0086-05

引用格式: 杨保华, 李源, 李园, 等. 国六 LNG 与柴油重卡经济性及排放特性的对比分析[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(2): 86-90.

YANG Baohua, LI Yuan, LI Yuan, et al. Comparative study on economic performance and emission characteristics of CHINA 6 LNG and diesel heavy-duty trucks [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2): 86-90.

0 引言

自 2023 年 7 月 1 日起,我国全面实施重型车国六排放标准^[1]。为满足国六标准对颗粒物(particulate matter, PM)和 NO_x 排放的严格控制,国六重型柴油车一方面采用更高精度的高压共轨喷油技术以提高燃烧效率,另一方面配备选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)系统降低 NO_x 排放。然而, SCR 系统需要持续添加尿素溶液才能维持正常工作,其高昂的使用成本使得部分运营车主难以承受。在此背景下,更具经济性的液化天然气(liquefied natural gas, LNG)重卡市场快速增长^[2]。

LNG 重卡及其配套基础设施在我国交通运输领域中的应用规模持续扩大,2023 年,我国 LNG 重卡销量为 15.19 万辆,相比 2022 年的 3.73 万辆,净增 11.46 万辆,增幅高达 307%^[3]。截至 2023 年底,全国 LNG 重卡保有量约为 63 万辆^[4],车用 LNG 加气站达到 6 033 座^[5]。2024 年上半年 LNG 重卡销量高达 10.88 万辆,实现同比翻倍增长^[6]。从区域分布特征来看, LNG 重卡的保有量主要集中在气源供给丰富的城市,这些地区物流需求旺盛,且地方政府积极落实环保政策,严格执行排放监管,有力推动了 LNG 重卡的普及。此外,随着我国双碳目标的深入推进,地方政府对新能源车辆实施的补贴政策及环保限行措施,也为 LNG 重卡市

收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QF063)

第一作者简介: 杨保华(1982—),女,四川射洪人,工程师,主要研究方向为移动源污染防治技术, E-mail: 17763163@qq.com。

* 通信作者简介: 刘树成(1970—),男,济南人,工程技术应用研究员,主要研究方向为移动源污染防治技术及管理, E-mail: 1452953087@qq.com。

场的渗透提供了坚实的制度保障和政策支持。

LNG 重卡与柴油重卡燃料不同,在实际使用过程中,两者在经济性和排放性上差异显著。本文中对分析 LNG 与柴油重卡在实际运行中的经济性,以及新生产和在用不同行驶里程的两种燃料重卡的排放性能,揭示两种燃料重卡在不同使用场景下的性能特点,为 LNG 重卡的科学推广应用提供理论依据和实践参考,助力清洁能源车辆在交通运输领域的可持续发展。

1 LNG 和柴油重卡综合经济性分析

1.1 LNG 产量分析

LNG 重卡保有量取决于本地区的 LNG 价格。2024 年中国 LNG 产量排行^[7]如表 1 所示。由表 1 可知:2024 年,内蒙古、陕西的 LNG 产量分别高达 606.90、507.50 万 t,位列我国 LNG 产量排名的第一、二位。内蒙古、陕西两省的 LNG 资源丰富,还具备较完善的天然气开采、液化和运输基础设施,为 LNG 重卡的发展提供了坚实的资源保障。LNG 价格受供需关系、地缘政治风险、货币政策、季节性因素和技术进步等影响,价格波动较大,尤其是自产不足的情况下,各省 LNG 重卡的普及率相差较大。

表 1 2024 年中国 LNG 产量排行

地区	LNG 产量/万 t	占全国总产量的比例/%	地区	LNG 产量/万 t	占全国总产量的比例/%
内蒙古	606.90	24.41	宁夏	142.70	5.74
陕西	507.50	20.41	重庆	103.10	4.15
山西	344.50	13.85	山东	74.20	2.98
新疆	239.30	9.62	湖北	69.00	2.80
四川	169.70	6.82	河北	57.20	2.77

1.2 经济性分析

对 23 家重卡整车生产企业和 16 家重卡销售企业进行调研,细致核算 LNG 和柴油重卡的车辆购置成本、油气价格、维护成本等关键因素,综合对比两种重卡的经济性。

1.2.1 燃料成本

2024 年 9 月国内能源价格数据显示,0 号柴油的平均零售价格为 7.4 元/L,LNG 的平均价格为 4.5 元/kg。在相同载质量(49 t)重卡运营参数方面,柴油重卡百公里消耗燃油 33 L,LNG 重卡百公里消耗 LNG 33 kg;柴油重卡的燃料费用为 2.442 元/km,尿素消耗率为 0.033 kg/km;LNG 重卡的燃料费用为 1.485 元/km。

基于年运行里程为 20 万 km 的典型工况进行测算,柴油重卡和 LNG 重卡的年燃料成本分别为:

$$C_d = p_d q_d L, \quad (1)$$

$$C_L = p_L q_L L, \quad (2)$$

式中: C_d 、 C_L 分别为柴油重卡和 LNG 重卡的年燃料成本,元; p_d 为柴油单价,元/L; q_d 为柴油重卡燃油消耗率,L/km; L 为重卡年营运里程,km; p_L 为天然气单价,元/kg; q_L 为 LNG 重卡燃气消耗率,kg/km。

由式(1)(2)可得: $C_d = 488\,000$ 元, $C_L = 297\,000$ 元。LNG 重卡在燃料经济性方面具有显著优势,与燃油重卡相比,每年可节约燃料成本 $C_{F,S} = C_d - C_L = 191\,000$ 元,每百公里可节省 95.5 元。

1.2.2 排放控制附加成本

SCR 系统尿素溶液消耗率 q_U 为 0.033 kg/km,同期车用尿素单价 p_U 为 3 元/kg,年度尿素消耗成本记为 C_U ,则 $C_U = p_U q_U L = 19\,800$ 元。LNG 重卡因燃料特性无需配备 SCR 系统,故在此项运营成本上实现完全节省,边际效益优势为 19 800 元。

1.2.3 购置成本与年度运费损失

LNG 重卡需配置低温储气罐等专用装置,其初始购置成本较同级柴油重卡高,初始购置成本的差 C_B

为 70 000 元,同时整备质量增加约 600 kg。在当前公路货运市场运价率约为 0.15 元/(t·km)、年运行里程为 20 万 km 的条件下,质量增量导致的 LNG 重卡年度运费损失 F_L 约为 18 000 元。

1.2.4 年度综合经济效益

建立全成本模型进行综合测算,与柴油重卡相比,LNG 重卡首年度净收益

$$P = C_{F,S} + C_U - C_B - F_L \quad (3)$$

由式(3)可得, $P=122\,800$ 元,LNG 重卡的首年度综合经济效益比柴油重卡高 122 800 元。

2 整车及发动机污染物排放测试分析

2.1 测试方法

本文中从整车和发动机两个角度出发,通过实际道路排放试验^[8-11]和台架试验^[12]采集排放中主要污染物。选取新生产车辆,包括 6 辆国六 LNG、18 辆国六柴油重卡,以及不同行驶里程的在用车辆,包括 13 辆国六 LNG、3 辆国六柴油重卡,进行 40 辆重卡的实际道路排放测试,分析整车 NO_x 、CO 排放;选取 4 台具有代表性的不同燃料和排量的发动机进行台架测试,分析发动机 NO_x 、THC、CO 和 CO_2 原始排放。

2.2 整车排放分析

试验用重卡的行驶里程和两种主要污染物(CO、 NO_x)实际道路排放试验结果如表 2 所示,表中 NL 表示新生产 LNG 重卡,ND 为新生产柴油重卡,UL 为在用 LNG 重卡,UD 为在用柴油重卡。

表 2 试验用重卡的行驶里程和两种主要污染物(CO、 NO_x)实际道路排放试验结果

车辆 编号	行驶 里程/km	比排放/[$\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]		车辆 编号	行驶 里程/km	比排放/[$\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]	
		CO	NO_x			CO	NO_x
NL1	105	310.8	66.9	ND15	177	36.7	86.5
NL2	103	278.3	98.9	ND16	1 471	38.1	65.1
NL3	118	133.0	89.1	ND17	156	64.5	114.9
NL4	157	406.2	127.5	ND18	153	114.5	36.5
NL5	124	102.1	206.2	UL1	80 680	288.2	87.2
NL6	184	249.1	43.8	UL2	70 692	345.0	142.6
ND1	110	2.1	272.4	UL3	73 244	254.5	118.6
ND2	108	30.1	313.6	UL4	49 715	733.0	69.2
ND3	107	2.8	244.7	UL5	45 830	399.4	138.7
ND4	143	17.4	17.1	UL6	57 292	198.5	39.5
ND5	128	80.5	23.4	UL7	59 949	472.6	90.9
ND6	126	75.2	19.8	UL8	106 385	249.1	43.8
ND7	124	282.9	20.4	UL9	117 696	406.2	127.5
ND8	151	557.6	72.0	UL10	206 271	13.2	206.2
ND9	200	439.9	94.2	UL11	90 175	430.9	191.4
ND10	31	72.8	104.2	UL12	57 676	471.3	161.9
ND11	36	3.4	233.5	UL13	196 146	18.3	566.7
ND12	154	12.6	271.2	UD1	121 967	14.3	37.4
ND13	145	37.4	60.1	UD2	99 776	0.8	56.1
ND14	144	20.6	79.1	UD3	71 747	14.3	46.1

由表 2 可知:40 辆重卡实际道路排放测试中,新生产 LNG 重卡的最大 CO、 NO_x 比排放分别为 406.2、206.2 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;新生产柴油重卡的最大 CO、 NO_x 比排放分别为 557.6、313.6 $\text{mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;在用 LNG

重卡的最大 CO 、 NO_x 比排放分别为 733.0 、 $566.7 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;在用柴油重卡的最大 CO 、 NO_x 比排放分别为 14.3 、 $56.1 \text{ mg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;所有重卡的 CO 、 NO_x 比排放均低于排放限值(CO 、 NO_x 的排放限值分别为 $6\,000$ 、 $690 \text{ mg} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)。

40 辆重卡实际道路排放测试的不同车型污染物平均比排放统计如表 3 所示。

表 3 40 辆重卡实际道路排放测试的不同车型污染物平均比排放统计

车型	平均比排放/ $[\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$		车型	平均比排放/ $[\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	
	CO	NO_x		CO	NO_x
新生产 LNG 重卡	246.50	105.40	在用 LNG 重卡	329.25	153.14
新生产柴油重卡	104.95	118.26	在用柴油重卡	9.80	46.53

由表 3 可知:1)新生产柴油重卡 NO_x 比排放高于新生产 LNG 重卡,在用柴油重卡 NO_x 比排放低于在用 LNG 重卡。这是由于在正常使用、规范加油和尿素,以及合理保养的情况下,燃油重卡行驶一定里程磨合后,SCR 系统工作效率持续有效,在用燃油重卡的 NO_x 排放得到了有效控制。LNG 重卡的 NO_x 排放控制策略是利用理论空燃比燃烧,因此变化不大^[13-14]。2)无论是新生产还是在用车辆,LNG 重卡的 CO 比排放始终远高于柴油重卡。原因为:LNG 主要成分是甲烷(CH_4),燃料不充分燃烧的情况下容易产生 CO,且 LNG 重卡在车速急剧变化时,实际空燃比偏离理论空燃比,导致三效催化器效率下降,频繁生成 CO 排放峰值,导致 CO 比排放较高。

2.3 发动机原始排放分析

对未加装后处理的相同排量的 LNG、柴油发动机进行台架测试,精确测量发动机原始 NO_x 、CO、 CH_4 、THC、 CO_2 排放,试验结果如表 4 所示。发动机原排可代表污染控制装置失效的整车排放。

表 4 发动机台架排放试验结果

发动机类型	排量/L	比排放/ $[\text{mg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$				
		NO_x	CO	CH_4	THC(NMHC)	CO_2
LNG 发动机	17	9 988.6	22 034.7	3 831.6	316.1	542 105
柴油发动机	17	9 628.7	1 745.9		71.3	595 222
LNG 发动机	15	8 247.2	15 766.1	3 786.7	265.7	561 134
柴油发动机	15	6 546.6	975.4		114.6	776 130

由表 4 可知:相同排量下,LNG 发动机的 NO_x 原排高于柴油发动机,排量为 15 L 的 LNG 发动机 NO_x 原排约为柴油发动机的 1.3 倍;相同排量下,LNG 发动机的 CO 原排远高于柴油发动机,排量为 15 L 的 LNG 发动机 CO 原排约为柴油发动机的 16 倍。在后处理系统失效的情况下,LNG 重卡的 NO_x 、CO、THC 排放均高于柴油重卡。

此外,在双碳背景下,国内外大量学者开始重视对重卡污染物中温室气体(CH_4 、THC、 N_2O)的排放规律和控制方法的研究。大量文献研究显示:LNG 重卡污染物中 CH_4 、 N_2O 含量较高,二者比 CO_2 具有更强的温室效应(分别为 CO_2 当量的 25 倍和 298 倍),因此,应进一步优化 LNG 重卡的排放控制技术,减少温室气体排放^[15-17]。

3 结论

1)通过对车辆购置成本、燃料价格、维护成本等关键因素的综合分析,LNG 重卡在经济性方面具有明显优势。尽管 LNG 重卡的购置成本较高,但由于燃料价格较低且无需添加尿素,在年运行里程为 20 万 km 的情况下,LNG 重卡首年度综合经济效益比柴油重卡高 122 800 元。

2)新生产 LNG 重卡的 NO_x 比排放低于柴油重卡,但在实际运营过程中,由于燃烧控制劣化等因素,在用 LNG 重卡的 NO_x 比排放高于柴油重卡;此外,LNG 重卡的 CO 排放始终高于柴油重卡。因此,LNG 重卡在排放控制方面仍面临技术挑战,尤其是 CO 减排技术亟待优化。

3)LNG 发动机的 NO_x 、THC、CO 原始排放均高于柴油发动机,尤其是 CO 排放远高于柴油发动机。此外,LNG 重卡的温室气体排放较高,这与当前双碳战略下的减排要求存在明显矛盾,应进一步研究 LNG 重卡排放控制技术,以减少其对环境的影响。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段): GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- [2] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报(2023 年)[J]. 环境保护, 2024, 52(2): 48-62.
- [3] 高芸,王蓓,胡逸丹,等. 2023 年中国天然气发展述评及 2024 年展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 166-177.
- [4] 罗艳托,巩凯,于庆良,等. 重卡发展技术路线及电气化进程探讨[J]. 国际石油经济, 2024, 32(6): 62-70.
- [5] 搜狐汽车. 物流新动力:LNG 重卡崛起如何重塑加气站未来[EB/OL]. (2024-11-12) [2024-12-08]. [https:// www.sohu.com/a/825979087_121124362](https://www.sohu.com/a/825979087_121124362).
- [6] 运输人网. 2024 年上半年燃气重卡销量翻倍,下半年市场前景看好[EB/OL]. (2024-08-09) [2024-10-15]. <https://hao.yiche.com/wenzhang/93366535/>.
- [7] 智研咨询网. 2025-2031 年中国液化天然气(LNG)行业市场调查研究及发展前景规划报告[EB/OL]. (2025-02-24) [2025-02-28]. <https://www.chyxx.com/shuju/1213693.html>.
- [8] 张凡,关磊,李梁. 基于实际道路测试的在用重型柴油车排放因子研究[J]. 专用汽车, 2024(12): 14-17.
- [9] 刘加昂,张妮,刘树成,等. 重型柴油车排放远程监控系统设计与应用[J]. 内燃机与动力装置, 2023, 40(3): 39-43.
- [10] 李旭,刘卫林,吴春玲,等. 基于实际道路测试的重型柴油车排放评估方法研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(10): 1380-1386.
- [11] 孙清巍. 基于 PEMS 的重型车实际道路排放特性研究[D]. 青岛:青岛大学, 2018.
- [12] 张腾,刘兴华,靳航,等. 燃气车 PEMS 排放测试与发动机台架 WHTC 测试对比分析[J]. 车用发动机, 2022(3): 82-87.
- [13] WANG J F, WANG R, YIN H Q, et al. Assessing heavy-duty vehicles (HDVs) on-road NO_x emission in China from on-board diagnostics (OBD) remote report data[J]. Science of the Total Environment, 2022, 846: 157209.
- [14] 吕立群,徐龙,尹航,等. 重型柴油车实际道路 NO_x 排放分析方法研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(1): 151-160.
- [15] 葛蕴珊,吕立群,岳崇会,等. 国六重型车实际道路上污染物和温室气体排放特性研究[J]. 环境科学研究, 2023, 36(11): 2118-2125.
- [16] 陈晖,官维,黄豪中. 双燃料发动机温室气体排放预测和影响因素分析[J]. 车用发动机, 2023(4): 86-92.
- [17] 蒋顺豪. 船用 LNG 发动机排放的影响因素研究[J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(2): 51-54.

Comparative study on economic performance and emission characteristics of CHINA 6 LNG and diesel heavy-duty trucks

YANG Baohua¹, LI Yuan¹, LI Yuan², FANG Yanlin¹,
WU Haoming¹, LIU Shucheng^{1*}

1. Shandong Motor Vehicle Exhaust Pollution Monitoring Center, Jinan 250100, China;

2. Jinan Automotive Testing Center Co., Ltd., Jinan 250100, China

Abstract: To study the economic efficiency and actual emission characteristics of CHINA 6 heavy-duty trucks in different fuel countries, liquefied natural gas (LNG) heavy-duty trucks and diesel heavy-duty trucks, which have

(下转第 96 页)

- [12] 孙文进, 闵永军, 林宇凡, 等. 一种氮氧传感器性能检测装置: CN115015490A[P]. 2022-09-06.
- [13] 高伟, 张振刚, 李继祥, 等. 氮氧传感器性能检测装置设计研究[J]. 中国计量, 2025(3): 117-120.

Design of automatic testing device for NO_x sensor performance

WANG Chuanchuan^{1,2}, ZHANG Zhengang^{1,2*}, WANG Cong^{1,2}, GAO Wei^{1,2},
SUN Hourui^{1,2}, TANG Zhonggang^{1,2}

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. Department of National Internal Combustion Engine Industry Measuring and Testing Center, Weifang 261061, China

Abstract: In order to solve the problems of incomplete, slow and inaccurate performance testing NO_x sensor, the structure, working principle and control process of NO_x sensor are analyzed, and combined with the current status of testing technology, an automatic performance testing for NO_x sensor is designed. This device optimizes the dynamic gas mixing method, the automated structure testing module and the data processing module to solve the problems of "slow" and "incomplete" testing, but the accuracy of the detection results and the stability of the system should also be improved.

Keywords: NO_x sensor; testing technology; automatic testing; dynamic gas mixing

(责任编辑: 胡晓燕)

.....

(上接第 90 页)

the highest proportion of domestic heavy-duty trucks, are selected as the research objects. The purchase, use, and maintenance costs of the two types of heavy-duty trucks are thoroughly investigated, and the economic efficiency of the two types of heavy-duty trucks is compared and analyzed. Actual road emission tests on 40 newly produced and in use LNG and diesel heavy-duty trucks are conducted, and original emission tests on 4 typical LNG and diesel engines are carried on. The actual road emissions and engine original emissions of the two heavy-duty trucks are analyzed. The results indicate that, with an annual operating mileage of 200 000 km, the comprehensive economic benefits of LNG heavy-duty trucks in the first year are 122 800 yuan higher than those of diesel heavy-duty trucks. The actual road NO_x emissions of newly produced LNG heavy-duty trucks are lower than those of diesel heavy-duty trucks, but the actual road NO_x emissions of LNG heavy-duty trucks are higher than those of diesel heavy-duty trucks. The actual road CO emissions of LNG heavy-duty trucks are always higher than those of diesel heavy-duty trucks. The original emissions of NO_x , THC, and CO from LNG engines are significantly higher than those from diesel engines, especially the CO emissions are much higher than those from diesel engines.

Keywords: LNG heavy-duty truck; diesel heavy-duty truck; economic analysis; NO_x emission; CO emission

(责任编辑: 臧发业)