

天然气-柴油双燃料发动机改造 关键技术研究

黄宇

中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028

摘要:随着国家环保部门对燃油汽车限行管理与排放要求的不断提高,天然气汽车、新能源电车成为当今汽车行业的发展趋势。天然气汽车具有低排放、抑制温室效应和摆脱对石油依赖的三大优点,正在世界范围内得到普及和推广。国内大型农用机械发动机功率大,存在高能耗和高排放问题,为进一步响应环保要求,以典型农用机械柴油发电机为研究对象,分析天然气-柴油双燃料发动机改造的供气方式、气源比选、技术方案、经济性等关键技术指标,论证项目的可行性,为后续农用机械双燃料发动机改造提供技术参考,也为今后船用发动机天然气-柴油双燃料改造和LNG船舶加注打下坚实的研究基础。

关键词:双燃料改造;LNG;CNG;柴油发动机;ECU

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.05.019

Research on Core Renovation Technology of Natural Gas/Diesel Dual Fuel Engine

Huang Yu

CNOOC Gas & Power Group, Beijing, 100028, China

Abstract: With the constant improvement of the national environmental protection department's requirements on the management and emission of fuel vehicles, natural gas vehicles and new energy trams have become the development trend of the automobile industry. Natural gas vehicles have the advantages of low emission, greenhouse restraining and non-reliance on oil. Large domestic agricultural machinery engine has high power with the problem of high energy consumption and high emissions. In response to the environmental requirement, based on typical diesel engine of agricultural machinery as the research object, the key technical indicators of the dual fuel engine renovation are analyzed, such as the gas supply methods, gas sources selection, technical scheme and economy. The feasibility of the project is demonstrated as well to provide the technology reference for renovation of agricultural machinery dual-fuel project in the future, and provide basis for the research of marine engine gas/diesel dual fuel renovation and LNG injection in the future.

Keywords: Dual fuel renovation; LNG; CNG; Diesel engine; ECU

收稿日期:2019-01-03

基金项目:中国海油集团公司科技项目“LNG移动加注船加注系统关键技术研究”(CNOOC-KJ135KJXM QD 2018-004)

作者简介:黄宇(1989-),男,黑龙江大庆人,工程师,硕士,主要从事LNG接收站项目设计与天然气设备设施研究工作。

0 前言

国内天然气-柴油双燃料发动机研究始于 21 世纪初,即在柴油机基础上增加一套压缩天然气(Compressed Natural Gas, CNG)供气系统,实现双燃料发动机运行^[1]。液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)-柴油双燃料发动机研究最早出现在船舶发动机领域^[2],通过电子控制单元(Electronic Control Unit, ECU)硬件与软件的开发、柴油机设计、实验室标定试验最终实现双燃料发动机系统改造,改造后的发动机可在纯柴油模式和 LNG-柴油混燃模式自由切换,保持原发动机的最大功率,有效降低燃料成本^[3]。

随着国家环保压力的不断提高,各地方政府加大秸秆禁烧工作监管力度,研究科学有效的秸秆处理方式,发展生物质气(沼气)项目是解决秸秆焚烧的有利途径,能够提高秸秆综合利用率^[4],通过厌氧发酵技术获得沼气,再提纯获得生物质天然气,根据市场需求进一步加工成 CNG 或 LNG,沼渣做成有机肥料,该模式的能源利用方式已在国内多个项目应用,成为未来发展趋势^[5]。

目前,我国农业机械化装备水平处于世界前列,大型农场的田间作业机械化率达 98% 以上,大功率拖拉机以现代化大型进口农机为主,机型主要包括 135-535 HP 的美国迪尔、美国凯斯、美国福格森、英国纽荷兰、德国克拉斯等大型轮式拖拉机,本文以典型美国迪尔 7830 型号拖拉机为目标机型进行双燃料发动机改造的可行性研究。

1 供气方式

生物质气是以农作物秸秆、林木废弃物、酒糟药渣、禽畜粪便等含有生物质体的物质为原料,在高温环境或细菌发酵的作用下,热解或者气化解产生的一种可燃性气体。生物质气的主要成分包括 CO、H₂、N₂、CH₄ 以及一些高分子的碳氢化合物和少量焦油。根据生物质气项目所在地和用途的不同,生物质气的利用方式也不尽相同。农村地区未经处理的生物质气一般直接燃烧用于做饭和取暖;而用于工业用途的生物质气因含杂质较多需要进行脱硫、脱酸等净化处理,剩余主要成分为 CH₄,可用于燃气发电、压缩制 CNG、液化制 LNG。

国家能源局《生物质能发展“十三五”规划》中指出:到 2020 年,生物质能基本实现商业化和规模化利用,初步形成一定规模的绿色低碳生物天然气产业,年产量达到 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$,建设 160 个生物天然气示范县和循环农业示范县,替代化石能源总量约 $5\,800 \times 10^4 \text{ t}$,年减排 CO₂ 约 $1.5 \times 10^8 \text{ t}$,减少粉尘排放约 $5\,200 \times 10^4 \text{ t}$,减少 SO₂ 排放约 $140 \times 10^4 \text{ t}$,减少氮氧化物排放约 $44 \times 10^4 \text{ t}$ 。

通过提前规划产业布局,在原材料丰富的地区就近

选址,可将生物质气合理利用成为优质天然气资源。本文以黑龙江某农垦地区的生物质资源和农机现状为研究对象,进行天然气-柴油双燃料发动机改造关键技术和经济型研究,项目成果可在生物质气项目地区实现推广。

1.1 气源比较

CNG 是常压天然气加压以气态形式存储在气瓶中的天然气,储存压力通常为 20 MPa,体积通常为常压的 1/220。LNG 是常压天然气液化后以液态存储在气瓶中的天然气,储存压力通常为 1.6 MPa,体积通常为常压的 1/625。两种气源的主要成分均为 CH₄^[6]。CNG 与 LNG 供气系统见图 1。

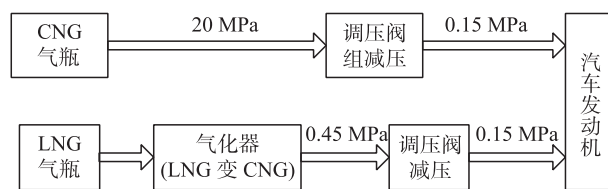


图 1 CNG/LNG 供气系统图

从图 1 可看出,CNG 与 LNG 供气系统的主要区别在于气源储存方式不同,LNG 需要经过气化器变为 CNG,因气化后的压力约 0.45 MPa,调压阀设置相对简单,LNG 供气系统虽比 CNG 复杂,但能有效降低高压所带来的风险。

1.2 技术比较

LNG 利用中压低温气瓶储存,CNG 利用高压常温钢瓶储存,单个 450 L 的 LNG 气瓶重量为 300 kg,是相同容积 CNG 气瓶重量的 60%,装载的天然气是 CNG 气瓶的 3 倍,使用 LNG 作为燃料更能满足长途驾驶的需要^[7]。两种燃料的加注时间也不同,加注相同体积的 LNG 时间比 CNG 节省 1/2 以上。当 LNG 处于长时间储存、运输状态时,会因组分密度不同导致 LNG 分层或漏热产生蒸发气 BOG,车用 LNG 供气系统尚不具备回收和再液化工艺,采取直接放空到大气的措施,造成天然气浪费,车辆气耗增大。

1.3 标准比较

国家针对 CNG 汽车及配件设计提出严格要求,如:GB 18047-2017《车用压缩天然气》、GB 17258-2011《汽车用压缩天然气钢瓶》、Q/SY 1260-2010《压缩天然气加气站建设规范》等涵盖了储气瓶设计、改车部件制造到安装调试、加气站设计等各个环节,标准体系健全^[8]。相比之下,LNG 相关技术正逐步实施标准化,GB/T 26980-2011《液化天然气(LNG)车辆燃料加注系统规范》、NB/T 1001-2011《液化天然气 LNG 汽车加气站技术规范》的颁布也对 LNG 汽车、加气站提出要求,但标准化建设相对滞后已制约行业的发展^[9]。

综上所述,农机双燃料发动机改造的两种供气方式各有优势,见表 1。

表1 供气方式对比表

供气方式	优点	缺点	适用车辆
LNG	加气速度快、持续供气时间长、低温启动性能好	技术要求高、改造价格相对高	大型、长途运输车辆(如公交车、长途运输卡车、工程车辆等)
CNG	改造价格低、技术要求低	储存量低、续航里程低、持续供气时间不足	城市汽车(出租车)

2 双燃料发动机改造方案研究

农机的柴油发动机改造成为可燃天然气的发动机有两种方式:天然气单燃料发动机和天然气-柴油双燃料发动机^[10]。

2.1 天然气单燃料发动机

原车柴油发动机变为纯天然气发动机,主要改装内容是发动机再制造和发动机总成互换,包括设置火花塞点火系统,重新确定压缩比,并对燃烧室、汽缸、活塞盖、排气管、进气门、座圈、凸轮轴等进行改进设计^[11]。柴油汽车改装为单一燃料天然气汽车,改装难度大、成本高,技术要求也高,通常情况下不是柴油机改造的首选方案。美国迪尔7830型号拖拉机采用进口发动机,设备价格昂贵,一旦改装后无法继续烧柴油。使用该机型的区域一般属于大型农垦地区,作业期间农机工作强度大,任务重,采取24 h连续工作、人不停车的作业策略^[12]。改造为单燃料后的农机如供气不足时无法作业会对农垦作业造成严重影响;当需要农机进行跨区作业,如无法进行天然气补给,也会造成经济影响,不推荐改为单燃料系统。

2.2 天然气-柴油双燃料发动机

天然气-柴油双燃料发动机技术的基本原理基于原柴油机基础上,不改变发动机主体结构,增加1套LNG

供气系统(包括LNG气瓶、气化器、减压阀及天然气喷射阀等或CNG供气系统包括CNG气瓶、减压阀组等)、电控系统ECU及传感器等,将原有柴油机改装成既能单烧柴油又能天然气-柴油掺烧的两用发动机^[13]。系统正常工作时,柴油由原柴油供给系统提供固定量的柴油,柴油被压缩引燃天然气混合气,当负荷增加时,通过增加天然气的喷气量实现发动机输出功率扭矩的增加^[14]。该系统无需在柴油机基础上增加点火系统。通常在典型工况下掺烧70%左右的天然气;在高负荷和高转速时进行保护,切换到纯柴油模式(防止缸内温度和压力过高)。经天然气-柴油双燃料发动机改造后的发动机经济性提高,SO_x等废气排放降低,但掺烧天然气时不能达到最佳燃烧状态,导致发动机效率比原机低,不完全燃烧的CH₄在扫气时会被排出,与成品双燃料发动机存在差距^[15]。

综合考虑上述研究方案,美国迪尔7830型号拖拉机拟采用天然气-柴油双燃料发动机的改造方案。

3 气瓶放置方案

3.1 气瓶选型

CNG/LNG气瓶选用市场常见的规格型号,对改造费用进行初步估算,分析见表2。

表2 气瓶规格方案对比表

项目	气瓶规格			
	205 L	230 L	405 L	450 L
空瓶重量/kg	149	162	252	270
气瓶尺寸/mm	1 831×420	2 010×420	2 009×656	2 177×656
框架尺寸(两气瓶一组)/mm	2 000×1 200×600	2 100×1 200×600	2 100×1 500×800	2 200×1 500×800
工作压力/MPa	20.0	20.0	1.6	1.6
内胆材质	30 CrMo	30 CrMo	30 CrMo	30 CrMo
单个气瓶价格/元	4 000	4 500	26 000	28 000
估算改造费用(含气瓶费用,不含检验等费用)/元	28 000	30 000	75 000	80 000

3.2 气瓶方位

气瓶放置位置直接影响农机平衡、载重能力和司机视野^[16],现对气瓶放置的三个方案进行分析。

方案一:气瓶置于农机下部。由于农机作业时地势不平坦,可能造成气瓶与地面发生碰撞,导致天然气泄漏的风险,故不推荐安装在下部位置。

方案二:气瓶置于发动机室前部。农机自带900 kg

的配重铁,在配重铁位置放置气瓶组,承重能力满足要求。该设置方案需要更换前灯位置,充放气和气瓶置换方便,但由于气瓶组的框架略高会影响驾驶员视线,视线影响距离在原视线距离情况下增加了0.5倍。

方案三:气瓶置于驾驶室上部。当气瓶阀接头处可燃气体泄漏时,气体上浮升空,远离乘客,更安全;撞车时不会冲击到气瓶;灰尘、水气对气瓶污染腐蚀更小;低

底板重心低,气瓶上置不会对车辆操纵稳定性带来危害;安装、维护方便;驾驶室需增加承重构件。建立以原车顶和驾驶室内框架的结构模型,车顶厚度 2.5 mm,驾驶室顶四周焊接 4 mm 厚的扁钢,纵横方向等距布置两道骨材;驾驶室四角用支柱支撑,为尽量不影响驾驶室视线,支柱采用等边角钢固定在驾驶室角,顶端焊在车顶扁钢下,底部在驾驶室底部焊牢,驾驶室底部相应位置做加强。经过建模计算,最终确定框架扁钢及角钢应力最大值 31.6 MPa,车顶骨架应力最大值 8.17 MPa,普通碳素钢许用应力为 235 MPa,所建框架模型计算结果应力均远小于此值,满足框架结构强度要求。

3.3 用气情况分析

天然气-柴油双燃料发动机原型机为美国迪尔 7830 型号拖拉机发动机。额定功率 173 kW,柴油模式下一般柴油机燃油消耗率 205 g/kW·h。若按天然气对柴油的平均替代率 70% 计算^[17],0#柴油的热值按 42.7 MJ/kg,天然气热值按 36 MJ/m³,柴油模式发动机

效率 0.45,天然气燃料模式发动机效率 0.42。计算可知,柴油模式下发动机消耗热值 1 514 MJ/h,天然气燃料模式下发动机每小时天然气消耗量 = 1 514 × 0.45 ÷ 0.42 ÷ 36 × 0.7 = 31.55 m³。

CNG 的气化比为 220,以 230 L 双 CNG 气瓶组为例,满负荷工作时间为 230 × 2 × 220 ÷ 31.55 ÷ 1 000 = 3.2 h。

LNG 的气化比为 625,以 450 L 双 LNG 气瓶组为例,满负荷工作时间为 450 × 2 × 625 ÷ 31.55 ÷ 1 000 = 17.8 h。

3.4 气瓶加注

由于美国迪尔 7830 型号拖拉机功率较大,且农机本身空间限制,选用 CNG 作燃料时,双 230 L 容积气瓶已是相对最大容积,仅能满足负荷工作 3.2 h;选用 LNG 作燃料时,以双 450 L 容积气瓶为例,能满足负荷工作 17.8 h,即使 LNG 利用率按照 90% 计算,工作时间超过 16 h,若有休息时间,建议使用槽车加注;若连续工作,建议以更换气瓶的方式进行加注,见表 3。

表 3 加注方案对比表

项目	加注时间(气瓶组)/min	优点	缺点
槽车加注 CNG	15 ~ 20	加注时间短,槽车加注方便	加注频繁
更换 CNG 气瓶	约 10	如果有足够的备用气瓶,更换时间会大大缩短	需备用气瓶,增加成本
槽车加注 LNG	约 60	加注频次少	加注时间长
更换 LNG 气瓶	约 10	如果有足够的备用气瓶,更换时间会大大缩短	需备用气瓶,增加成本

4 改造经济性研究

美国迪尔 7830 型号拖拉机发动机的额定功率 173 kW,每小时耗油量约 42.2 L,按现燃料价格,每小时消耗柴油费用为 247 元;按 70% 天然气替代率计算,每小时消耗天然气费用为 200 元,每小时节省约 19% 的燃料费用即 47 元,按 24 h 作业,每年作业 30 d 计算,年节省费用 33 840 元。考虑不能满负荷工作和加注时间等原因,估计年节省费用约 30 000 元。

天然气-柴油双燃料改造技术在重卡、公交车等车型上已成功推广应用^[18],美国迪尔 7830 型号拖拉机双燃料发动机改造费用经分析,CNG-柴油改造成本约 30 000 元,LNG-柴油改造成本约 80 000 元,随着中国天然气行业的发展^[19],项目经济效益将更加明显^[20]。

5 结论

通过对纯天然气发动机改造、天然气-柴油双燃料发动机改造方案的论证,推荐把原柴油发动机改造成天然气-柴油双燃料发动机,可在不改变发动机主体结构的基础上,增加一套 CNG/LNG 供气系统和电控系统,可根据改造成本、续航能力、加注条件和当地农垦区条件

情况确定最终气源选择方案;另一方面,需进一步加大农垦地区天然气项目的投资力度,完善天然气加工设施的配套建设,为天然气项目的推广提供气源条件。

现有船舶柴油发动机能效低,易对内河区域的大气和江水造成污染,通过对陆上车用发动机改造的研究和应用,为下一步进行船用发动机天然气-柴油双燃料改造和 LNG 船舶加注打下坚实的研究基础。天然气-柴油双燃料发动机改造不仅降低生产成本,还响应国家环保要求,经济效益、社会效益显著。

参考文献:

- [1] 刘震涛,俞小莉,费少梅. 天然气/柴油双燃料发动机燃气供给系统特性研究[J]. 内燃机工程,2002,23(2):15-19.
Liu Zhentao, Yu Xiaoli, Fei Shaomei. Research on the Characteristics of CNG Supply System of CNG/Diesel Dual Fuel Engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2002, 23 (2): 15 - 19.
- [2] 王德刚,张尊华. 船用 LNG-柴油双燃料动力系统技术应用分析[J]. 航海工程,2015,44(2):107-110.
Wang Degang, Zhang Zunhua. Analysis of Marine LNG-diesel

- Dual-fuel Power System [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2015, 44 (2): 107 - 110.
- [3] 张新塘, 战蕊, 涂登磊, 等. LNG - 柴油双燃料动力系统技术与应用现状分析[J]. *柴油机*, 2016, 38(6): 6 - 10.
Zhang Xintang, Zhan Rui, Tu Denglei, et al. Analysis of LNG-Diesel Power System Technology and Its Application Status [J]. *Diesel Engine*, 2016, 38 (6): 6 - 10.
- [4] 陈明江, 姜本超, 陈永生, 等. 生物质成型燃料是解决秸秆禁烧难题的一剂良方[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(6): 222 - 225.
Chen Mingjiang, Jiang Benchao, Chen Yongsheng, et al. Biomass Densification Briquetting Fuel is a Prescription to Solve the Puzzle of Straw Burning Prohibition [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35 (6): 222 - 225.
- [5] 陈海平. 生物燃气技术及工程的发展现状[J]. *科技创新导报*, 2013(11): 62.
Chen Haiping. Progress on Biogas Technology and Engineering [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2013 (11): 62.
- [6] 王文凯, 李兆慈, 盖晓峰, 等. LNG接收站BOG再冷凝系统操作参数优化[J]. *天然气与石油*, 2015, 33(2): 46 - 52.
Wang Wenkai, Li Zhaoci, Gai Xiaofeng, et al. Optimization of BOG Recondensation Process at LNG Receiving Terminals [J]. *Natural Gas and Oil*, 2015, 33 (2): 46 - 52.
- [7] 陈叔平, 刘志东, 刘振全. 车用燃料LNG、CNG及汽油的性能比较[J]. *真空与低温*, 2002, 8(4): 47 - 49.
Chen Shuping, Liu Zhidong, Liu Zhenquan. Characteristic Comparison of Automobile Fuels LNG, CNG and Gasoline [J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2002, 8 (4): 47 - 49.
- [8] 冯志刚. 车用LNG气瓶定期检验工艺及评定标准[J]. *中国特种设备安全*, 2013, 29(4): 27 - 31.
Feng Zhigang. Periodical Inspection Process and Evaluation Standard of Vehicle LNG Cylinder [J]. *China Special Equipment Safety*, 2013, 29 (4): 27 - 31.
- [9] 徐婷, 罗东晓. LNG汽车产业技术标准分析[J]. *天然气工业*, 2007, 27(11): 110 - 112.
Xu Ting, Luo Dongxiao. Technical Codes and Standards of LNG Vehicles(LNGV) Industry [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27 (11): 110 - 112.
- [10] 宋钧, 黄震, 张武高, 等. 车用天然气发动机技术及其应用[J]. *天然气工业*, 2002, 22(1): 88 - 92.
Song Jun, Huang Zhen, Zhang Wugao, et al. Natural Gas Vehicle Engine Technique and Its Application [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22 (1): 88 - 92.
- [11] 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, 32(9): 92 - 97.
Luo Dongxiao. Practical Techniques and Economic Analysis of Converting Diesel-fueled into LNG-fueled Vehicles [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32 (9): 92 - 97.
- [12] 程保欣. 约翰迪尔7830型轮式拖拉机及配套农具在粘土地的使用情况与思考[J]. *农业机械*, 2012(26): 108 - 109.
Cheng Baoxin. The Application and Thinking of John Deere 7830 Wheeled Tractor and Related Farm Tools in Clay Land [J]. *Farm Machinery*, 2012 (26): 108 - 109.
- [13] 李捷辉, 张隆基, 刘婧, 等. LNG/柴油双燃料柴油机控制软件模块化设计[J]. *船舶工程*, 2017, 39(12): 60 - 64.
Li Jiehui, Zhang Longji, Liu Jing, et al. Modular Design of Control Software for LNG/Diesel Dual Fuel Diesel Engine [J]. *Ship Engineering*, 2017, 39 (12): 60 - 64.
- [14] 张纪鹏, 夏元东, 孙志军, 等. 天然气柴油双燃料准均质燃烧过程的研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2004, 10(2): 146 - 148.
Zhang Jipeng, Xia Yuandong, Sun Zhijun, et al. Study on Para-Homogeneous Charge Compression Ignition Process of the Dual Fuel [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2004, 10 (2): 146 - 148.
- [15] 张武高, 李希浩, 欧阳明高. 引燃柴油供给系统对双燃料发动机性能的影响[J]. *内燃机工程*, 2000, 21(4): 28 - 34.
Zhang Wugao, Li Xihao, Ouyang Minggao. The Influence of Pilot Fuel Supply System on the Performance of Diesel/CNG Dual Fuel Engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2000, 21 (4): 28 - 34.
- [16] 张完全, 杨磊. LNG牵引汽车整车布置分析[J]. *企业科技与发展*, 2014(10): 50 - 52.
Zhang Xianquan, Yang Lei. Analysis on the Layout of LNG Traction Vehicle [J]. *Sci-Tech & Development of Enterprise*, 2014 (10): 50 - 52.
- [17] 姚勇. CNG发动机和汽油机燃烧的比较分析[J]. *车用发动机*, 2005(5): 34 - 36.
Yao Yong. Comparison and Analysis on the Combustion of CNG Engine with that of Petrol Engine [J]. *Vehicle Engine*, 2005 (5): 34 - 36.
- [18] 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.
Wang Lei. Comparative Economy Analysis of LNG and CNG (Diesel) Fuel Heavy Truck [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2014 (17): 44.
- [19] 王震, 赵林. 新形势下中国天然气行业发展与改革思考[J]. *国际石油经济*, 2016, 24(6): 1 - 6.
Wang Zhen, Zhao Lin. The Development and Reform of China's Natural Gas Industry Under the New Situation [J]. *International Petroleum Economics*, 2016, 24 (6): 1 - 6.
- [20] 周淑慧, 杨义, 王占黎. 加快LNG汽车推广, 促进交通运输行业绿色低碳发展[J]. *国际石油经济*, 2012, 20(6): 33 - 40.
Zhou Shuhui, Yang Yi, Wang Zhanli. Accelerate the Popularization of LNG Vehicles to Promote the Development of the Transportation Industry on a Green and Low-carbon Basis [J]. *International Petroleum Economics*, 2012, 20 (6): 33 - 40.