

车用柴油/天然气双燃料发动机的开发*

张红光 盛宏至 潘奎润 张锐

【摘要】 为了降低发动机的有害排放物,以车用 X6130 柴油机为基础,研究开发了车用柴油/天然气双燃料发动机。首先确定双燃料发动机的技术方案,然后进行天然气/空气混合器的设计与实验,最后进行双燃料发动机的台架性能实验。实验结果表明:在全负荷时,与原型柴油机相比,双燃料发动机排气烟度明显降低,天然气替代率可超过 70%,而输出转矩和输出功率并没有降低。同时证明提出的双燃料发动机技术方案是切实可行的。

关键词: 双燃料发动机 柴油 天然气 台架试验

中图分类号: U 464 173 **文献标识码:** A

Development of Diesel/CNG Dual Fuel Engine for Automobiles

Zhang Hongguang

Sheng Hongzhi

(Beijing University of Technology) (Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences)

Pan Kuirun Zhang Rui

(Institute of Engineering Thermophysics, the Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In order to reduce harmful emissions of engines, in this paper, on the basis of X6130 type diesel engine, a X6130 type diesel/CNG dual fuel bus engine was developed. The technical program was determined, a mixer of air and natural gas was designed and tested and a X6130 type diesel/CNG dual fuel engine was tested. The test results showed that at full load the exhaust smoke of the diesel/CNG dual fuel engine was reduced effectively as compared with a prototype diesel engine, the rate of the natural gas to the fuel (including natural gas and diesel oil) was over 70%, although the output torque and power of the diesel/CNG dual fuel engine were not lower than that of the prototype diesel engine. According the test results, the technical program for the diesel/CNG dual fuel engine presented in this paper proved practical and feasible.

Key words Dual Fuel Engine, Diesel oil, Compressed natural gas (CNG), Bench tests

引言

天然气作为一种清洁的车用燃料而日益受到人们的重视。在我国,出于环境保护和调整能源消费结构的需要,天然气汽车发动机的数量也越来越多。本文以 X6130 柴油机为基础,将其改造成为车用柴油/天然气双燃料发动机。

1 双燃料发动机的技术方案

车用 X6130 柴油机改造成 X6130 车用柴油/天然气双燃料发动机的总体技术方案如图 1 所示^[1]。

1.1 双燃料发动机的工作方式

X6130 双燃料发动机有两种工作方式:纯柴油工作方式和天然气工作方式。驾驶员通过燃料选择开关 25 选择工作方式后,通过电控单元 24 和双燃

收稿日期: 2002-05-30

* 北京市科委资助项目(项目编号: 953200500)和北京工业大学引进博士后启动经费资助项目(项目编号: 6050121)

张红光 北京工业大学环境与能源工程学院 副教授 博士, 100022 北京市

盛宏至 中国科学院力学研究所 研究员 博士生导师, 100080 北京市

潘奎润 中国科学院工程热物理研究所 研究员, 100080 北京市

张锐 中国科学院工程热物理研究所 副研究员

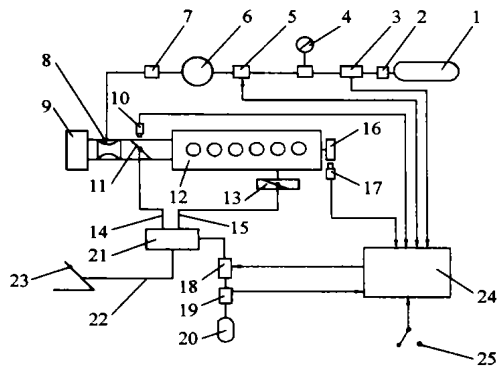


图1 X6130双燃料发动机总体技术方案简图

1. 压缩天然气贮气瓶 2. 天然气手动开关阀 3. 天然气压力传感器 4. 天然气压力表 5. 天然气电磁开关阀 6. 天然气减压阀 7. 天然气最大流量限制阀 8. 混合器 9. 空气滤清器 10. 混合气节流阀位置传感器 11. 混合气节流阀 12. X6130双燃料发动机 13. 柴油喷油泵 14. 混合气节流阀调节手柄拉线 15. 喷油泵调节手柄拉线 16. 发动机飞轮 17. 发动机转速传感器 18. 压缩空气电磁阀 19. 压缩空气压力传感器 20. 压缩空气储气瓶 21. 双燃料控制机构 22. 加速踏板拉线 23. 加速踏板 24. 电控单元 25. 燃料选择开关

料控制机构 21 等来实现工作方式的切换, 并协调控制混合气节流阀 11 的开度和柴油喷油泵调节手柄的角位移量。选择天然气工作方式后, 当双燃料发动机采用天然气作燃料时, 由喷油器向气缸内喷射少量柴油来引燃天然气/空气混合气。

当驾驶员选择纯柴油工作方式时, 混合气节流阀 11 一直处于最大开度, 以避免对进气节流, 通过控制加速踏板 23 的行程, 从而控制柴油喷油泵调节手柄的角位移量。天然气电磁开关阀 5 和压缩空气电磁阀 18 都处于断电关闭状态。

当选择天然气工作方式时, 压缩空气电磁阀 18 通电, 压缩空气进入双燃料控制机构 21 的气缸内。在双燃料发动机怠速时, 混合气节流阀 11 和柴油喷油泵调节手柄都处于初始位置, 发动机只采用柴油作为燃料, 天然气电磁开关阀 5 断电关闭。在增大发动机的负荷(增大加速踏板 23 的行程)的过程中: 当加速踏板 23 的行程小于某一定值(设为 x_1) 时, 混合气节流阀 11 的开度和柴油喷油泵调节手柄的角位移量同步增加, 天然气电磁开关阀仍然断电关闭, 发动机只采用柴油作燃料; 当加速踏板 23 的行程达到 x_1 时, 天然气电磁开关阀通电开启, 发动机开始采用天然气作燃料, 此后, 随着加速踏板 23 行程的继续增大, 混合气节流阀 11 的开度和柴油喷油泵调节手柄的角位移量继续同步增加, 当加速踏板行程等于某一定值(设为 x_2) 时, 柴油喷油泵调节手柄角位移量达到最大限位值, 不能再继续增大, 而混合气节流阀 11 的开度仍可随加速踏板 23 行程的增大而

继续增大, 直至全负荷时的最大开度。通过发动机台架实验发现, X6130 双燃料发动机在天然气工作方式的小负荷时, 为了保证柴油的引燃效果, 使天然气/空气混合气尽可能充分燃烧, 双燃料发动机单缸每循环的柴油供给量应不低于 9.5 mg , 据此来确定 x_1 的值; 受喷油泵供油特性和混合气供气特性的影响, 双燃料发动机在大负荷和全负荷时, 可能需要适当增大柴油的喷射量来保证动力性能, 此时柴油不仅起引燃作用, 还起到弥补功率差额的作用, 据此来确定 x_2 的值。

1.2 燃料供给系统^[2]

X6130 柴油/天然气双燃料发动机采用压缩天然气的贮气方式, 天然气最大流量限制阀 7 通过调节管路的流通截面积控制天然气的最大供给量。

本文采用了天然气/空气混合气的量调节方式, 与汽油机的量调节方式相类似, 即在混合器 8 的后面安装混合气节流阀 11, 根据发动机的负荷情况来调节混合气节流阀 11 的开度。发动机在小负荷时, 虽然吸入的天然气体积较少, 但吸入的空气量也较少, 从而使天然气/空气的混合气浓度不致过稀, 有利于柴油引燃天然气/空气混合气。采用天然气/空气混合气的量调节方式, 有利于双燃料发动机拓宽采用天然气运行的负荷范围, 从而提高天然气替代率。天然气/空气混合气节流阀 11 为蝶阀结构, 在蝶阀的中央开有一个进气孔, 以保证发动机在怠速时能够吸入一定量的空气。

柴油喷油泵采用两级调速方式, 为了兼顾 X6130 双燃料发动机两种工作方式的性能, 与原型柴油机相比, 将双燃料发动机柴油喷油泵的供油提前角增大 4°CA ; 供油提前角调整后, 在天然气工作方式的全负荷状态, 发动机最高排气温度可降低 70°C 左右, 热效率可提高 $2\sim 3$ 个百分点。

1.3 电控装置

X6130 双燃料发动机的电控装置主要包括传感器、电控单元组件和执行机构。

传感器包括: 发动机转速传感器 17, 混合气节流阀位置传感器 10, 压缩空气压力传感器 19, 天然气压力传感器 3。

执行机构包括: 天然气电磁开关阀 5, 工作电压为 12VDC , 只有选择天然气工作方式, 并且混合气节流阀的开度超过一定值时, 该阀才能通电开启。如果发动机转速超过电控单元设定的最高限值 (2000 r/min), 该阀断电关闭, 防止发动机飞车。在天然气工作方式时, 如果压缩空气压力较低, 则无法对喷油泵调节手柄进行有效的限位, 容易使喷油量超过最大限值, 此时必须关闭天然气电磁开关阀 5,

从而切断天然气的供应,以确保发动机安全运行。

压缩空气电磁阀 18,是一个两位三通阀,工作电压为 12VDC,控制压缩空气进出双燃料控制机构 21 内部的气缸。

电控单元组件主要包括电控单元 24、天然气压力显示屏、压缩空气压力显示屏和燃料选择开关 25, 四者集成为一体。电控单元以 80C51 单片机为核心,燃料选择开关有两挡,即纯柴油工作方式和天然气工作方式,可根据实际情况来选择。

1.4 双燃料控制机构

X6130 柴油/天然气双燃料发动机的双燃料控制机构 21 应实现以下主要功能: 协调控制混合气节流阀 11 的开度和柴油喷油泵调节手柄的角度位移。在天然气工作方式时,对柴油喷油泵调节手柄起限位作用。双燃料发动机在纯柴油工作方式和天然气工作方式时,保证加速踏板 23 的全行程相同。

燃料控制机构 21 的主要组件有: 喷油泵调节手柄拉线组件、混合气节流阀调节手柄拉杆组件、总拉杆组件、气缸组件、外壳组件。

采用双燃料控制机构 21 后,X6130 双燃料发动机柴油喷油泵的供油量特性如图 2 所示。

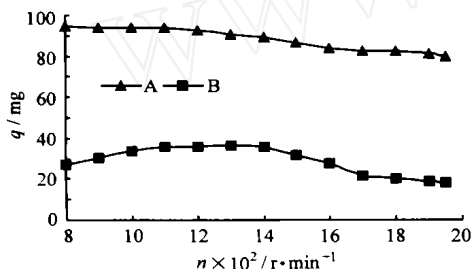


图 2 X6130 双燃料发动机柴油喷油泵供油量特性

图中:A 为纯柴油工作方式,全负荷时单缸每循环供油量 q 随发动机转速 n 的变化情况;B 为天然气工作方式,全负荷时单缸每循环供油量 q 随发动机转速 n 的变化情况。

2 天然气/空气混合器的设计与实验

X6130 双燃料发动机的天然气/空气混合器采用文丘里喉管和环腔腮孔方式,混合器的作用有两个: 空气流经混合器的喉口时,流速增加,压力降低,形成一定的真空度,从减压阀的出口吸入天然气。在混合器内将空气与天然气均匀混合,形成混合气。

为了初步验证混合器的设计效果,在发动机台架实验之前,进行了混合器的模拟吹风实验。混合器模拟吹风实验装置如图 3 所示,气道 1 模拟发动机上的空气进气道(从空气滤清器出口至混合器),气

道 2 模拟发动机上的天然气进气道(从减压阀出口至混合器)。节流阀 A 的作用是调节总的气体流量,虽然在整个系统后端的混合气节流阀也能调节总的气体流量,但两者是有差别的。因为在发动机台架实验时,如果混合气节流阀开度不变,随着发动机转速的变化,气体流量也会发生变化。为了模拟发动机速度特性实验时的进气状况,所以采用节流阀 A。节流阀 B 与节流阀 C 起微调作用,主要用于调节气道 1 和 气道 2 内的滞止压力,两者滞止压力的差值可通过压差计 B 反映出来,用压差计 A 测量流量计 B 的压力损失。

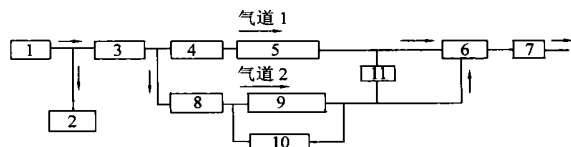


图 3 混合器模拟吹风实验装置示意图

1. 吹风机 2. 防喘振出口 3. 节流阀 A 4. 节流阀 B 5. 空气流量计 A 6. 混合器 7. 混合气节流阀 8. 节流阀 C 9. 空气流量计 B 10. 压差计 A 11. 压差计 B

通过混合器模拟吹风实验装置得到的实验结果显示: 随着混合气节流阀开度的增加(发动机负荷增大),混合气有变稀的趋势。

之后,又在发动机台架上进行了混合器的流量特性实验,虽然从混合器环腔腮孔吸入的并不是天然气,而是周围环境的空气,但与模拟吹风实验相比,可进一步接近双燃料发动机的实际工作情况,某混合器的部分实验结果如表 1 如所示。通过实验可发现: 在混合气节流阀开度不变的情况下,随着发动机转速 n 的上升,混合气变稀。在发动机转速 n 不变的情况下,随着发动机负荷的提高,混合气有变稀的趋势。这与混合器模拟吹风实验得到的结论相同。

如果混合器的喉口直径较大,可以吸入相对较多的空气,但由于在喉口处形成的真空度相对较低,所以吸入的天然气体量相对较少,可能无法满足双燃料发动机的功率要求,且不能保证较高的天然气替代率;如果混合器的喉口直径较小,在喉口处形成的真空度较高,则可吸入的天然气体量相对较多,但由于喉口的节流作用较大,可吸入的空气量相对较少,可能导致发动机的排气温度过高。适当增大环腔腮孔的流通面积,对增加天然气的吸入量有利,但环腔腮孔面积增大至一定程度后,对天然气吸入量的改善效果不明显。

根据混合器模拟吹风实验结果和发动机台架实验结果,并经过综合比较,X6130 双燃料发动机所选

表 1 混合器流量特性实验结果

n /r·m in ⁻¹	混合气节流 阀开度/%	天然气通道	空气通道的	两个通道的 流量比(模 拟空燃比)
		的空气流量 /L·s ⁻¹	空气流量 /L·s ⁻¹	
480	100	1.88	44.6	23.7
1 000	100	3.33	89.1	26.8
1 400	100	4.43	122.2	27.6
1 600	100	4.93	137.0	27.8
1 800	100	5.37	151.9	28.3
800	50	2.71	69.3	25.6
1 005	50	3.29	85.9	26.1
1 200	50	3.77	100.7	26.7
1 400	50	4.32	118.9	27.5
1 600	50	4.77	132.1	27.7
1 800	50	5.16	145.3	28.2
800	25	2.63	66.0	25.1
1 000	25	3.15	82.6	26.2
1 200	25	3.50	92.5	26.4
1 400	25	3.86	105.7	27.4
1 600	25	4.12	113.9	27.6
1 800	25	4.27	118.9	27.8
500	0	1.62	37.9	23.4
600	0	1.87	44.6	23.9
800	0	2.24	54.5	24.3
1 000	0	2.45	61.1	24.9
1 200	0	2.62	66.0	25.2
1 400	0	2.72	68.9	25.3
1 600	0	2.81	71.5	25.4
1 800	0	2.84	72.6	25.6

用混合器的喉口直径为 38 mm, 环腔腮孔直径为 1.5 mm, 数量为 16 个。

3 双燃料发动机的台架性能实验

X6130 双燃料发动机(天然气工作方式)和原型

表 2 X6130 双燃料发动机和原型柴油机在全负荷时动力性能

项目	机型	n/r·m in ⁻¹												
		800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900	1 950
T _{iq} /N·m	柴油机	715	720	724	724	713	702	685	667	643	622	606	591	550
	双燃料机	763	780	790	805	799	800	792	749	708	662	635	615	600
P _e /kW	柴油机	59.9	67.9	75.8	83.4	89.6	95.6	100.4	104.8	107.7	110.7	114.2	117.6	112.3
	双燃料机	63.9	73.5	82.7	92.7	100.4	108.9	116.1	117.6	118.6	117.8	119.7	122.4	122.5

表 3 X6130 双燃料发动机和原型柴油机在全负荷时的排气烟度

机型	n/r·m in ⁻¹													Bosch
	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900	1 950	
柴油机	2.1	2.0	1.7	1.4	1.1	0.8	0.8	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	
双燃料机	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	

柴油机在全负荷时动力性能如表 2 所示,可以看出:与原型柴油机相比,双燃料发动机的输出转矩 T_{iq} 提高,最大转矩为 805 N·m (1 100 r/m in),比原型柴油机提高了 11%;额定功率 P_e 为 122.5 kW,比原型柴油机提高了 9.1%。

X6130 双燃料发动机(天然气工作方式)和原型柴油机在全负荷时的排气烟度(Bosch 值)如表 3 所示,可以看出:与原型柴油机相比,双燃料发动机的排气烟度非常低。

X6130 柴油/天然气双燃料发动机(天然气工作方式)在全负荷时的天然气替代率 ϕ_{ng} 如图 4 所示,天然气的替代率 ϕ_{ng} 可超过 70%。与原型柴油机相比,双燃料发动机(天然气工作方式)在全负荷时的热效率降低约 5 个百分点,排气温度 t_r 升高,如图 5 所示。造成以上问题的原因主要有:没有对原型柴油机的气门叠开角进行调整,在气门叠开期间,由于扫气,部分天然气未经气缸内燃烧而直接进入排气管。由于柴油喷油泵的供油提前角要兼顾纯柴油工作方式和双燃料工作方式,所以双燃料发动机在天然气工作方式时,柴油喷油泵的供油提前角并非最佳。

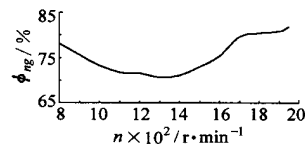


图 4 全负荷时双燃料发动机的天然气替代率

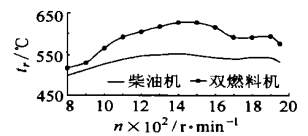


图 5 全负荷时双燃料发动机与柴油机排气温度

(下转第 7 页)

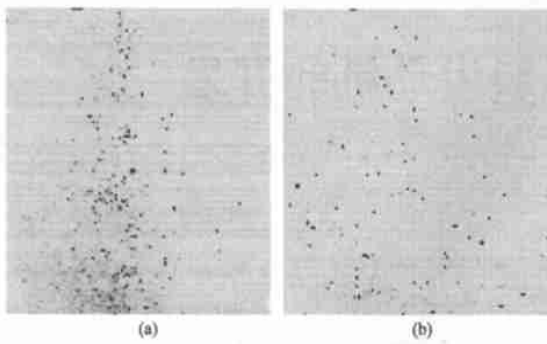


图 7 喷雾图像

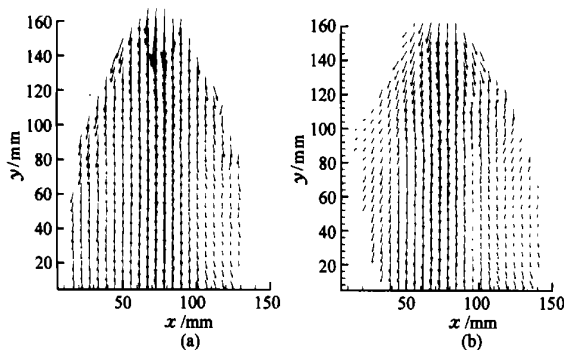
(a) 非荷电情况 (b) $U = 35 \text{ kV}$ 

图 8 喷雾流场速度矢量图

(a) 非荷电情况 (b) $U = 35 \text{ kV}$

进一步证实了煤油荷电存在起始电压的这一特性。对速度场的测试表明,随着荷质比增加,射流扩散角增大,电压每升高 10 kV,喷雾流场扩散角增加 5 左右,且在 60 kV 以上趋于稳定。大颗粒的高速液滴明显减少,喷雾场散开,流场均匀、松散,贯穿距减小,射流中含气量增加,在充分发展的主射流段,速度分布均匀程度改善更加明显。射流边缘可见明显的卷吸和回流区。

4 结论

(1) 采用针状电极可以实现煤油等绝缘介质的荷电,煤油荷电存在起始电压,在超过起始电压后,荷质比与静电电压成正比。

(2) 煤油荷电后,雾化性能得到很好改善,当充电电压为 35 kV 时,雾滴索太尔平均直径仅为非荷电时的 51.4%。

(3) 采用烟气分析仪对燃烧烟气采样并进行对比测量,结果为:当电压为 35 kV 时,HC、CO、CO₂分别为非荷电时 45%、66%、125%。可见,荷电对提高燃烧效率、降低污染排放有显著的作用。

参 考 文 献

- 1 刘大海,高延令,徐绍曾 汽油带电荷改善雾化的初步研究 中国公路学报,1997,10(3): 110~ 113
- 2 金晗辉,王军锋,王泽 静电喷雾研究与应用综述 江苏理工大学学报,1999,20(3): 14~ 19
- 3 闻建龙 荷电两相湍流理论及燃油荷电喷雾燃烧的实验研究:[博士学位论文] 镇江:江苏大学,2002

(上接第 11 页)

4 结论

(1) 采用本文的技术方案,将车用 X6130 柴油机改造成车用 X6130 柴油/天然气双燃料发动机,改造成本较低,并且可保证一定的天然气替代率。采用天然气/空气混合气的量调节方式,有利于提高天然气的替代率。双燃料发动机的全负荷排气烟度明

显低于原型柴油机,对于环境保护具有重要意义。

(2) 由于扫气以及柴油喷油泵供油提前角的原因,X6130 双燃料发动机的全负荷热效率要低于原型柴油机,全负荷排气温度要高于原型柴油机。提高双燃料发动机的性能的最佳途径是采用电磁阀喷气方式和电控燃油喷射方式,以实现天然气供给量、天然气供给时刻、柴油喷射量、柴油喷射时刻的柔性(电子)控制;但发动机改造成本会大大提高。

参 考 文 献

- 1 张红光 车用柴油/天然气双燃料发动机的开发研究与填埋气发电机组开发的相关问题研究:[博士后出站报告] 北京:中国科学院工程热物理研究所,2000 1~ 25
- 2 孙济美 主编 天然气和液化石油气汽车 北京:北京理工大学出版社,1999 48~ 67