



柴油/天然气双燃料发动机控制策略研究

吴光耀

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 介绍了柴油/天然气双燃料发动机控制系统的工作原理。对于不同的电控双燃料发动机, 如泵喷嘴、单体泵和高压共轨电控发动机的不同断油控制策略做了分析, 并通过高压共轨发动机路试, 对比了两种不同控制策略的效果。介绍了两种引燃油量标定方法——比例计算法和 MAP 查表法, 路试比较显示: 前者占优。根据某型机的路试数据统计得出, 该型双燃料发动机的燃料替代率平均可达 79%; 平均百公里可节约费用 128 元。

关键词: 双燃料发动机; 控制策略; 断油; 引燃油量

中图分类号: U464. 173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 4357(2011)04 - 0039 - 05

Research on Control Strategies of Diesel/NG Dual Fuel Engines

Wu Guangyao

(Mechanical Engineering Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: The working principle of the control system for diesel oil/natural gas dual fuel engine is introduced. The varied cutting-oil control strategies are studied for three different electronic-controlled dual fuel engines, namely pump nozzle, unit pump and high pressure common rail engines. And through the road test on a high-pressure engine, the effect of two control strategies is compared. Moreover, two calibration methods for pilot ignition quantity are introduced, which are proportion computation method and MAP method, and the former one get better results from road test. According to the data statistics of a dual fuel engine's road tests, the fuel substitute rate can reach up to 79%, and save 128RMB per hundred kilometers.

Keywords: dual-fuel engine; control strategy; cutting fuel; leading fuel quantity

0 引 言

燃气汽车由于其排放性好、运行成本低、技术成熟、安全可靠, 被世界各国公认为最理想的替代燃料汽车, 在我国代用燃料汽车中占到 90% 左右^[1]。

目前商用车市场上的重型载货车辆的发动机基本上都是大功率柴油机, 但随着柴油价格的不断上涨, 车辆运营成本也越来越高。因此, 如何在不改变原有柴油机机械结构的前提下降低燃料成本是所有商用车用户面临的一大难题。双燃料发动机控制系统的研发成功很好地解决了这一问题, 保证了原

柴油机的机械结构与性能不发生大的改变。该系统可使柴油和天然气混合燃烧, 也可在天然气使用完的情况下正常的燃烧柴油。其最大的优点是: 在不改变原有动力性的前提下, 使燃料成本降低 40% 以上^[2]。

从排放方面来讲, 柴油的排放远远高于天然气的, 尤其是碳烟的排放, 对环境污染以及人类的健康带来了极大的威胁。从储量方面来讲, 天然气的使用期限至少要比石油多 50 年。在中国新疆地区, 越来越多的油田气、气田气以及泥火山气被发现, 极大地鼓舞了人们使用天然气的信心。在价格方面, 天然气刚刚由家用天然气向车用天然气转型,

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-04-20
作者简介: 吴光耀(1984 -), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油/天然气双燃料发动机, E-mail: guangyao610@126. com。

其固定使用量还处于上升时期，其价格虽有上升的趋势，但百公里费用远远低于柴油价格^[3]。

1 双燃料发动机控制系统的工作原理

柴油/天然气双燃料发动机技术是在不改变原来发动机机械构造的基础上进行的，它是在原柴油机上增加燃气进气系统、油气转换系统以及电控模块 ECU 来实现的。

图 1 所示，双燃料发动机由两块电控 ECU 共同控制。一个是原柴油机 ECU，控制柴油机喷油嘴的实时通断以及其他的执行器件；另一个就是自主开发的双燃料 ECU，它需要采集柴油机的各种信号，如发动机转速、冷却液温度、油门踏板位置、氧传感器信号和原始喷油脉宽信号等，同时发出指令给执行器件。

按照国内外双燃料发动机的研发经验，在怠速工况下是纯柴油模式，没有天然气参与燃烧。当发动机工况达到了 ECU 所设定的条件时，双燃料 ECU 发出指令给执行器件，燃气喷射器进而喷射出天然气与空气进行混合。当活塞到达压缩上止点附近时，压燃喷入气缸内的柴油，柴油通过扩散燃烧引燃随空气一起进入气缸的天然气，进而点燃天然气，达到了燃料替代的目的^[4]。

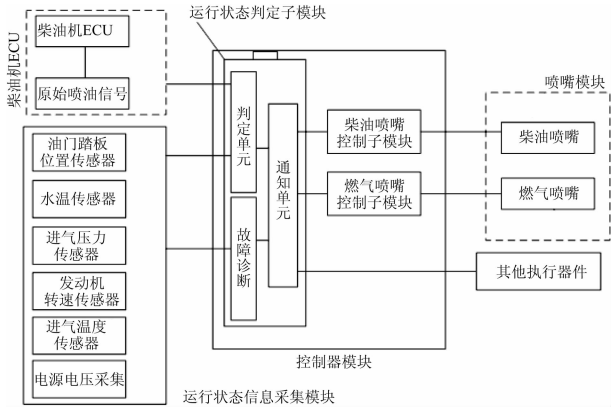


图 1 双燃料发动机信号采集与处理模块

2 双燃料发动机断油控制策略的研究

不同的电控柴油机使用的是不同的电控系统，其喷油方式和喷油频率都是不同的。一般情况下，单体泵和泵喷嘴只有主喷，不存在预喷和后喷的情况，而高压共轨电控柴油机则存在，对于这些不同的喷油方式，需要区别对待^[5]。

2.1 单体泵与泵喷嘴断油控制策略研究

对于泵喷嘴和单体泵电控柴油机，在一个工作循环中，每个缸各参与一次工作，所以需对各个缸

分别进行断油处理。在底层设计上，设置 CPU 的一个计时器口为上升沿触发，在喷油开始时计数器开始计时，计数器到达所标定的引燃油量时，计数器清零，同时双燃料 CPU 发出断油信号，使柴油机喷嘴的信号端断开，完成断油任务。

图 2 为断油控制的原理图，在双燃料模式下，对每个喷油信号都进行断油处理，在每个喷油信号的前段部分是有效喷油时间，也就是引燃柴油量的喷油时间；从断油信号发出到高位喷油信号结束这段时间为无效喷油时间，虽高位有信号指令，但断油开关关断，与低位构不成回路，喷油嘴停止工作。

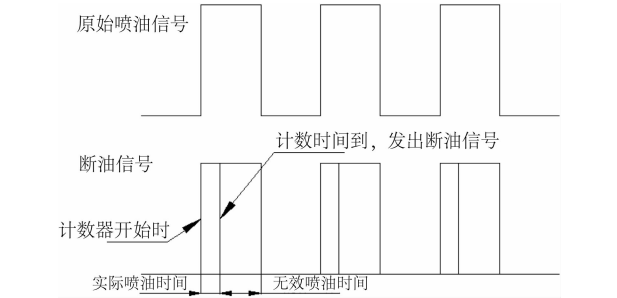


图 2 单体泵发动机断油控制原理图

2.2 高压共轨柴油机断油控制策略研究

在高压共轨系统中，几乎都存在预喷和后喷的情况，目的是为了降低发动机噪声，促进扩散燃烧，减少氮氧化物、可吸入颗粒物的排放量^[6]，

柴油机在不同的负荷有不同的喷油脉冲个数，例如在怠速工况，存在预喷和主喷，那么一个工作循环共有 12 个喷油脉冲个数；稍大负荷时又出现后喷，则一个工作循环有 18 个喷油脉冲个数；大负荷时只存在主喷，则一个工作循环有 6 个喷油脉冲个数。在车辆减速时，发动机会存在一两个缸不工作的情况，检测到喷油脉冲个数为 4 个或 5 个。对于这种电控柴油机，制定出两种断油控制策略。

(1) 不论有几个喷油脉冲，都使用相同的引燃油量。这样的控制策略就等同于单体泵和泵喷嘴电控柴油机，只需要一个计时器，即从喷油开始时刻计算给定的喷油时间，喷油时间到时，关掉断油开关，就实现断油控制，其控制原理如图 3 所示。

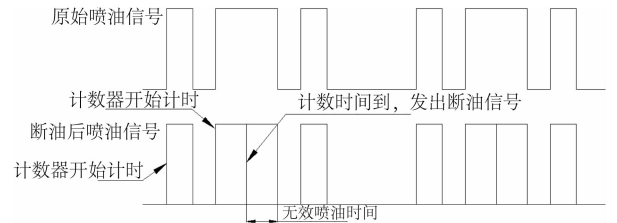


图 3 高压共轨柴油机断油原理图

当引燃油量的标定值大于预喷和后喷的喷油时间时,对预喷和后喷信号不进行任何处理,只是对主喷的喷油信号进行断油处理;如引燃油量的标定值小于预喷和后喷的喷油时间,则对预喷、主喷和后喷都进行断油处理。

(2) 第一种控制策略存在一些缺点,如不能对预喷和后喷实行断油,燃油替代率不高,燃料经济性差,加速过渡不平稳。因为预喷和后喷时间小于主喷时间很多,引燃油量的标定值不能完全照顾到三个喷油脉宽,给标定工作带来很多困难。于是设计出第二种控制策略。

预喷和主喷还按照第一种控制策略实行,即采用给定的油量进行断油;对于后喷,进行屏蔽处理,也就是让双燃料 ECU 断油开关在这段时间一直保持关闭的状态。这种控制策略就需要采用两个计时器,一个计时器用来计算给定的喷油时间,另一个计时器用来屏蔽主喷后出现的后喷,在此时间内断油开关一直处于断开的状态。其断油的原理如图 4 所示。

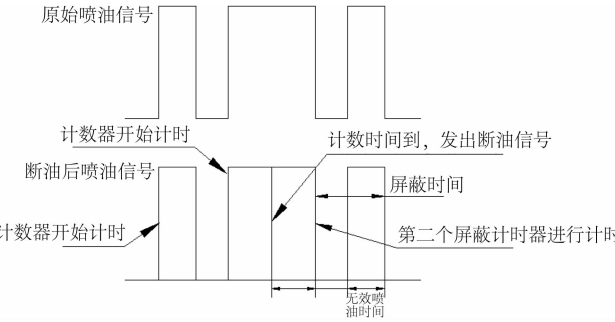


图 4 高压共轨柴油机断油屏蔽后喷原理图

由图 4 可知,如果引燃油量的的标定值大于预喷时间,则只对主喷进行断油,同时屏蔽后喷时间;如果引燃油量的标定时间小于预喷时间,则对预喷和主喷都进行断油。这种策略是在预喷、主喷和后喷都出现时制定的,考虑到随着负荷的变化,预喷和后喷都消失,屏蔽时间如果过长将会对下一工作缸的喷油信号造成干扰,有可能会造成缺缸的现象。通过路试信号采集,其屏蔽时间是远远小于两缸工作时间间隔的,所以这种策略是可行的。

(3) 两种控制策略路试对比

对于两种控制策略,在标定引燃油量时存在一定的区别。第一种控制策略存在一个缸三次喷射燃油的情况,第二种控制策略则不存在。如果假设在相同的工况下,两种控制策略喷射相同的引燃油量,则第一种控制策略喷嘴每次喷的油量要比第二种的喷射量少。当标定的喷嘴打开时间小于一定值

时,喷嘴将不能正常打开,也就不能完成喷油的动作,如果标定喷油时间过大,又会造成引燃油量过多,燃料替代率下降,经济性降低的弊端,所以第二种控制策略在理论上优于第一种。

两种控制策略在一台发动机上进行了路试对比试验,由于路试时,行驶的路线相同,同时载重量也都在 1 t 的差别之内,增加了对比可信度。

从图 5 可以看出,第一种控制策略百公里耗油量都要大于第二种的百公里耗油量,所以屏蔽后喷的控制策略是优于第一种控制策略的。

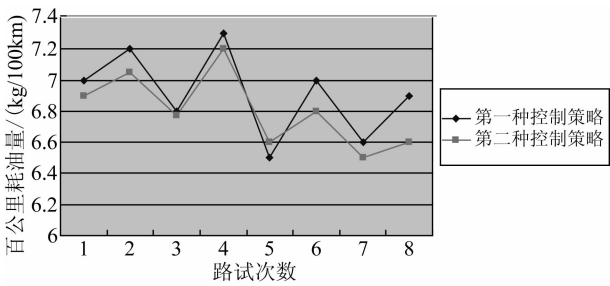


图 5 两种控制策略百公里耗油量对比

3 双燃料发动机引燃油量标定方法

对于双燃料发动机,引燃油量值是一个很重要的标定量。有两种引燃油量标定方法,即 MAP 查表法和比例计算法。

3.1 MAP 查表法

此方法同样也用在喷气流量的确定方式上。这种方法贯穿于整个发动机的各个工况,在发动机运行时,由转速、油门踏板开度、冷却液温度、双燃料开关等信号确定发动机所处的工况,然后再从标定好的 MAP 表中查找此工况点所需的喷油量和喷气量。在台架标定和路试标定时,不可能把每个转速所对应的油门踏板开度值都标定到,只需标定出特殊工况点的值即可,同时也省去了 ECU 的内存空间。这些标定的数据存储在 ECU 的 flash 中。这个表值只包括特殊点的引燃油量值,对于油门踏板和转速不在标定工况点的引燃油量则可由差值法算出。

这种引燃油量方法的确定有一些弊端:

(1) 由于所有引燃油量的标定值都是在车辆正常行驶时确定的,在减速断油时或者加速加浓时,原柴油机的喷油脉宽会发生很大的变化,而引燃油量还是按照表格中的标定值来确定,这就会发生引燃油量过大或者过小的现象。引燃油量过大,燃料经济性变差;引燃油量过小,造成柴油能量太小,不能引燃天然气,从而造成发动机缺缸。

(2) 需要标定出每个特殊工况点的值，标定任务量会增大。

3.2 比例计算法

这种方法就是巧妙利用采集来的原始喷油脉宽，经过一定的比例计算出所对应的百分比引燃油量。百分比值是通过台架标定和路试标定得出的，例如：采集到某一工况点原始喷油脉宽为 1 200，标定百分比为 35%，则此工况的引燃油量就为 $1\,200 \times 35\% = 420$ 。

原柴油机 ECU 在加速补偿和减速断油工况控制策略制定上是优于自主开发的双燃料 ECU，而 这些工况的补偿值最终都表现在喷油脉宽的变化上，所以这种标定方法避免了发动机在减速断油和加速加浓工况引燃油量不足或多余的现象。由于发动机在不同的工况下，其所需要的百分比理论油量是不同的，例如发动机在低速大扭矩时需要多的引燃油量，而在高速小扭矩时很少的引燃油量就可以引燃天然气。所以运用这种方法需要确定不同的工况区域，在不同的工况区域使用不同的百分比，大大减少了标定任务量。

3.3 MAP 查表法与比例计算法路试对比

柴油/天然气双燃料控制策略的研发一开始是用 MAP 查表法来标定引燃油量的，在路试过程中，发现加速无力或者爬坡无力的情况，原因就是在发动机工况发生变化时，引燃油量没有相应的补偿

值；使用比例计算法则减少了这种情况。对于两种标定方法，在路试过程中进行了对比试验(图 6)。

如图 6 所示为两种引燃油量标定方法的路试结果，从结果可以看出，比例计算方法的燃油替代率是优于 MAP 查表方法的。

通过多次路试，两种引燃油量标定方法的稳定性都是很高的，燃油替代率都稳定的正常的范围之内；但由于比例计算方法直接以柴油机喷油脉宽为基础，在加速时喷油脉宽会有很大的变动，所以比例计算法的加速性要优于 MAP 查表法。

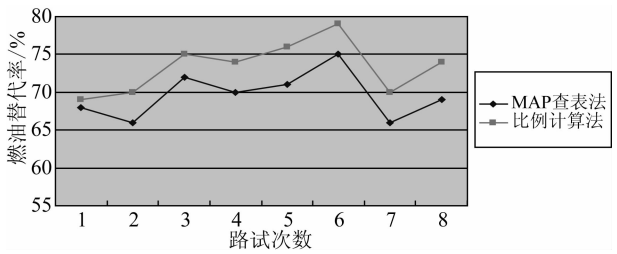


图 6 对比路试图

4 双燃料发动机路试结果及数据分析

目前，此双燃料控制技术已成功应用在斯堪尼亚泵喷嘴发动机、奔驰单体泵发动机和潍柴高压共轨柴油机上。以潍柴高压共轨发动机的路试得出以下结果(表 1)。

表 1 双燃料车辆路试结果

车辆负荷/t	行驶里程数/km	耗油量/L	耗 CNG 量/dm ³	实际百公里耗油量 (L/100 km)	实际百公里耗 CNG 量 /(dm ³ /100 km)
33	276	23.3	91.1	8.44	33
33	189	16.39	60.48	8.67	32
33	370	30.56	122.1	8.26	33
53	95	8.66	33.25	9.12	35
53	265	23.55	87.45	8.89	36
33	210	16.59	69.3	7.9	33
53	190	17.33	64.6	9.12	34
33	95	8.4	30.4	8.86	32

此车辆于 2010 年 5 月中旬在山东烟台地区路试成功后，在半年时间内，行驶已 4 万余公里，其中载重既有轻载 33 t，也有重载 53 t，路况有山地、平原、丘陵、高原等。由此得出柴油/天然气双燃料车辆的燃油替代率和百公里经济性等数据。

4.1 双燃料车辆燃油替代率

燃油替代率，就是在相同的载重和路况条件下，双燃料模式相比于纯柴油模式节省燃油的效率。

如：在纯柴油模式下百公里耗油量 A(L)；双燃料模式百公里耗油量 B(L)；则燃油替代率 = (A - B)/A。

由于在路试中，车辆的仪表上既可以显示出行驶里程数，也可以显示出在已行驶里程内，纯柴油模式下的百公里耗油量，这为计算燃油替代率提供了方便。经过近 2 000 km(负荷有轻载、重载；路况有平原、山地、高原等)的路试，8 次数据记录，得到如下燃油替代率，见图 7。

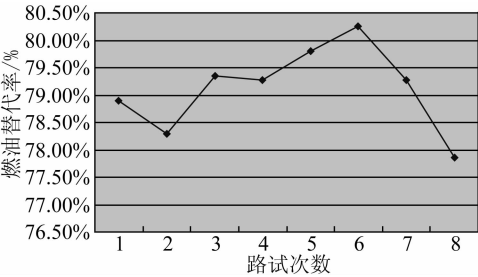


图 7 潍柴双燃料发动机燃油替代率

由图 7 可以看出，8 次的燃油替代率都达到了 77% 以上，并且平均燃油替代率达到了 79%。也就是说，在双燃料模式下，百公里只需要用到在纯柴油模式下 21% 的柴油，其他的燃料都用天然气来代替。

4.2 双燃料车辆百公里经济性

百公里经济性，可直接反应出在双燃料模式下，百公里可节省的费用。按照目前市场每升柴油 7.27 元，每方天然气 3.5 元计算，则得到 8 次路试的百公里经济性如图 8。

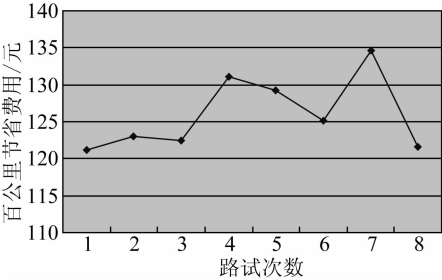


图 8 潍柴双燃料发动机百公里经济性

可以看出，8 次路试的百公里经济性都在 120 元以上，平均百公里节省费用为 128 元。

(上接第 18 页)

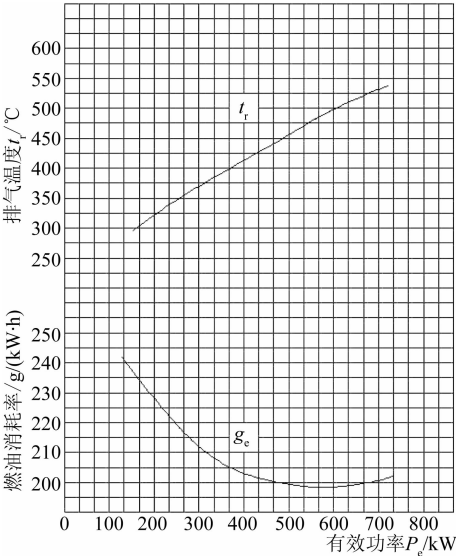


图 8 负荷特性曲线图

5 结 论

(1) 无论何种形式的电控柴油机，其引燃油量和喷气量的标定值直接决定着双燃料发动机的动力性、百公里耗油量以及百公里经济性，标定要采取现场标定与台架标定相结合的方法。

(2) 泵喷嘴和单体泵电控柴油机不存在预喷和后喷，而高压共轨电控柴油机则存在，这就要求控制策略，尤其是断油控制策略根据实际喷油形式而定，这样可以达到更好的燃油替代率。

(3) 引燃油量的确定可以采用 MAP 查表法也可以采用比例计算法，目前国内大部分还是以查表法为主，路试证明，采用比例计算法弥补了自主开发 ECU 补偿策略不足的缺点，会得到更好的动力性与燃料替代率。

参考文献

[1] 吴基安. 新能源汽车知识读本[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.

[2] 刘立, 吴光耀. 柴油/天然气双燃料发动机的研究[J]. 中国科技论文在线, 2010(7): 50-54.

[3] 边耀璋. 汽车新能源技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[4] 林在梨, 杨学杰. 世界能源状况及车用天然气发动机技术发展[J]. 柴油机, 2005, 27(4): 5-10.

[5] 梁昱, 周立迎. 双燃料发动机技术研究综述[J]. 贵阳学院报(自然科学版), 2008(8): 30-32.

[6] 宋福昌. 新编汽车电控柴油机故障检修[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2008.

5 结束语

NT12V138Z_LDM 型发电用柴油机是在保持企业现有加工装备基本不变的条件下进行生产而设计的，仍然采用原有的每缸两气门的气缸盖，1 h 功率工况的平均有效压力已达 1.964 MPa，与原有机型相比，应当说是提升了一大步，而且用户使用表明：运行可靠。遗憾的是，由于外部配套件市场供应的限制，如喷油器的喷嘴偶件没有选择的余地，不能通过较充分的优化配套试验后，再进行配套件选型；加之企业本身的测试条件限制，无法进行全面的性能测试，并进行优化开发。可以预见，如果能对柴油机燃油喷射系统与燃烧室的结构形状及增压器匹配作进一步的性能开发，柴油机的性能还会有所提高。