

机械泵供油的双燃料发动机控制策略开发

王 龙¹, 陈占明¹, 杨 博¹, 曾 科¹, 金则兵²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049; 2. 北京绿能高科天然气应用技术研究院有限公司, 北京 100101)

Development of Control Strategy for Dual Fuel Engine Equipped with Mechanical Pump

WANG Long¹, CHEN Zhanming¹, YANG Bo¹, ZENG Ke¹, JIN Zebing²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Beijing Green Energy Hi-Tech Natural Gas Application Technology Research Institute, Beijing 100101, China)

Abstract: A modulating method based on the cyclic fuel quantity of a diesel engine was introduced for its retrofitted natural gas/diesel engine. According to the method, a strategy of controlling the quantities of pilot diesel and natural gas was determined. First, a pedal position was described as a total fuel demand. Then the cyclic quantities of desired pilot diesel and desired natural gas were calculated from a total fuel demand by means of equivalent heat value and a desired substitution ratio. Finally, a desired accelerator position and a natural gas injection pulse were obtained according to calibration data. A reliable and fully functional control software was developed with the Matlab/Simulink, which contained such functions as signal input/output, calculation of control parameters, identification and switching of working mode, generation of executable files and download of them into the MotoTron hardware. The calibration of regulation MAPs was carried out on a dual fuel engine retrofitted from a WEICHAH mechanical pump diesel engine. The verification test shows that the dual fuel engine which employs cyclic fuel quantity regulation can work stably and reliably, and can achieve an accurate and fast control while retaining the power of the original engine. Though its brake efficiency is lower, a diesel/gas dual fuel engine is still attractive due to the lower price of natural gas.

摘要: 介绍了一种基于原机循环油量的柴油机-天然气发动机调节原则, 根据此燃料调节原则可以确定引燃柴油和天然气的控制策略: 首先将加速踏板位置按照原机油泵油量解释为总油量需求; 然后按替代率确定出与总油量需求等热值的两种燃料的量; 最后根据标定的数据得到目标油门位置和天然气喷射脉宽。在 Matlab/Simulink 环境下配置硬件资源, 编写带有信号输入/输出、控制参数计算、工作模式确定与切换等完整可靠功能的控制程序, 生成可执行文件并下载到 MotoTron 硬件内, 然后在一台潍柴机械泵柴油机改装的双燃料发动机上对控制程序中的 MAP 进行了标定。最终的验证试验结果表明: 按上述循环油量调节方法开发出的双燃料发动机工作稳定, 能够实现准确快速的控制; 其动力性与原机水平一致, 虽然有效效率普遍低于原机, 但得益于天然气的低价, 其具有诱人的成本优势。

关键词: 双燃料发动机; 发动机控制策略; 快速原型平台

Key words: dual fuel engine; engine control strategy; rapid prototyping platform

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.05.015

中图分类号: TK421.4

文献标识码: A

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划项目(2011CB707200)

Fund Project: 973 National Key Basic Research Development Program(2011CB707200)

作者简介: 王 龙(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为发动机电子控制技术, E-mail: wanllow@stu.xjtu.edu.cn;

曾 科(联系人), E-mail: kezeng@mail.edu.cn。

0 概述

天然气是一种清洁高效的化石能源,用作汽车燃料可有效降低碳烟和碳的排放量。中国天然气潜在储量十分丰富,天然气基础设施比较完善,大规模推广天然气作为车用燃料是改善能源与环境现状的一条有效途径。中国一次能源消费结构中天然气占比只有 4%,远低于世界平均的 24%和美国的 27%^[1]。随着页岩气技术继续进步,天然气价格还会进一步下降,天然气消费在我国仍然有着巨大的增长空间。

天然气辛烷值很高,是点燃式发动机的理想燃料。常规汽油机略加改装就可以燃用天然气,常见的柴油机燃用天然气是将其改装为火花点燃式天然气单燃料发动机。但柴油机本身为压燃式发动机,与火花点燃式发动机结构、工作原理、材料等方面差异都较大,将柴油机改造为点燃式天然气发动机改装费用贵、耗时长,且难以发挥柴油机高压压缩比的优势,改装后的车辆在车用天然气供给基础设施薄弱地区的续航能力会受到影响。若将柴油机改装为柴油-天然气双燃料发动机,则可明显规避以上缺点:柴油机改装为双燃料发动机仅增加一套天然气供给系统和油门执行机构,并不改变活塞、缸盖、配气机构等,大大提高了改装的效率和良品率,降低了改装费用,同时车辆在加气困难的地区可以作为柴油机使用,柴油机本身的高压缩比也有利于提高发动机的循环热效率^[2]。中国现阶段市场上共轨柴油机普及程度还不够高,传统的机械泵式柴油机仍占绝大多数,所以开发机械泵供油式的双燃料发动机有着更广阔的市场需求,然而国内外在机械泵式双燃料发动机开发研究方面尚未有规模化商用的成熟机型。

双燃料发动机由柴油机改造而来,不适宜采用量调节的方式,而采用质调节的方式后其功率由两种燃料燃烧提供,发动机的稳定性、经济性、可靠性都依赖于其燃料的调节策略。文献[3]介绍了一台高压共轨柴油机上进行的双燃料改装方案,该方案采用基于转矩的控制策略,然而转矩的影响因素较多,需要大量的标定数据;文献[4]介绍了一台斯太尔增压中冷发动机上开发的一套 32 位发动机电子控制单元;文献[5]介绍了在重卡柴油机上按照质量替代率原则确定目标引燃油量与天然气量的方法,在空转附近和全负荷外引燃油量保持为一个略大于空转油量的定值,然而这种方法在全程调速式的柴油机上会引起大范围的转速波动。在技术手段成本可控的前提下,为保证发动机工作稳定,确保可靠运行,并对控制参数进一步优化,还有很多工作

可做。

WoodWard 公司推出的 MotoTron 发动机开发快速原型平台(Rapid Prototyping Platform)^[6]拥有成熟的硬件和底层软件,这使得上层软件开发人员可以专注于控制系统算法的开发而不用过多地考虑硬件和底层软件,同时使用 Matlab/Simulink 为开发工具不但便于程序的编写和维护,而且可以在软件环境下模拟逻辑过程从而及早查出设计漏洞。在配套的开发软件 MotoHawk 中编写的模型经生成可执行文件后,使用指定的软件 MotoTune 下载至 MotoTron 硬件内,采用快速原型平台可以最大程度缩短发动机 ECU 控制策略开发的时间成本。本文中介绍的控制策略就是在 MotoTron 平台上完成的。

1 机械泵双燃料发动机改装方案

用于改装的发动机为潍柴 WD12.375 涡轮增压型柴油机,其高压供油泵为无锡威孚生产的全程调速式直列柱塞泵,该发动机基本参数如表 1 所示。

表 1 WD12.375 柴油机基本参数

项目	参数
型号	WD12.375
进气方式	增压中冷
燃料种类	柴油
缸数	6
缸径/mm×行程/mm	126×155
排量/L	11.596
标定功率/kW	276(2 000 r/min)
最大扭矩/(N·m)	1 500(1 300~1 600 r/min)
压缩比	17
发火顺序	1-5-3-6-2-4
排放指标	国 II

综合发动机性能、技术成本等因素,最终采用步进电机控制油泵调节杆、天然气进气歧管顺序喷射方式的改装方案,如图 1 所示。

2 基于循环油量的调节方式

传统机械泵式柴油机由司机通过加速踏板(简称踏板)直接操作油泵调速杆(简称油门)来调节发动机的输出。改装为柴油-天然气双燃料后由于采用电控,取消了踏板和油门间的机械连接,改用电子踏板来获取司机的操控意图,由步进电机式油门执行器和电磁阀式天然气喷嘴来执行司机的操控意图,如图 2 所示。

经过改装后,踏板成为系统重要的输入量,而油门成为系统的输出量,电控系统的任务是根据踏板

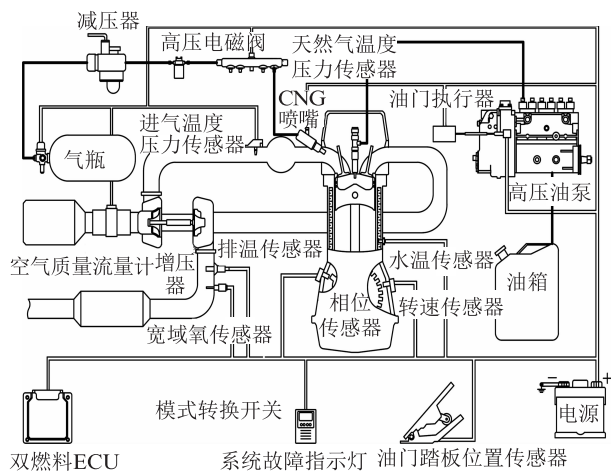


图 1 改装方案示意图

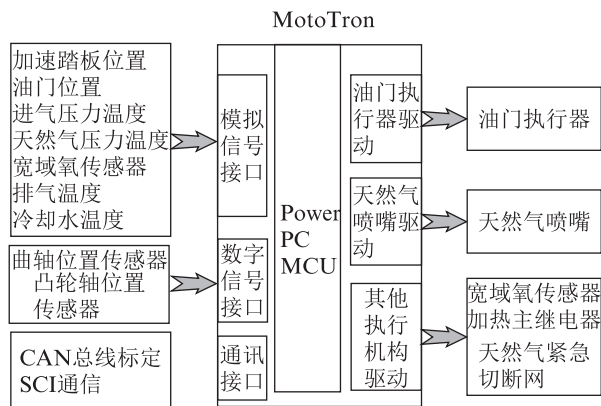


图 2 电控系统示意图

等输入量计算得到油门执行器和天然气喷嘴等执行器的输出量。改装前的柴油机依靠油泵的全程调速特性保证发动机转速的稳定。如果依照原机油泵的循环油量来调节柴油和天然气的量,使得双燃料下进入缸内的燃料总热值与改装前柴油的热值相等就可以使发动机在两种模式间切换时工作特性接近,保证了相近的驾驶操控感,更重要的是按照原机的循环油量规律能确保发动机具有与原机十分接近的调速特性,故而保证了其工作的稳定。

双燃料发动机的一个重要特点是在低负荷下天然气燃烧不良,原因是低负荷时引燃油量极少,油束覆盖范围较小使被直接引燃的天然气变少,同时低负荷下的均质天然气和空气混合气过稀导致火焰传播困难。在接近发动机空转的极低负荷下,天然气失火非常严重,此时喷入缸内的天然气对于发动机的调速特性没有任何贡献,发动机的稳定性几乎全部依赖引燃油量,所以低负荷阶段内目标替代率要随负荷逐渐变大,这样引燃油量沿着转速方向才是负相关的规律,发动机才能稳定工作。

考虑到以上因素,首先将踏板位置解释为驾驶员的油量需求 m_{ped} ,其值与改装前原柴油机相同,然后按照替代率可得到引燃柴油的量,最后天然气就可以按照柴油减少而缺失的热值算出。具体过程如下所述。

(1) 按照目标天然气替代率 η_s 确定引燃柴油的量 m_{pilot} ,本文所述目标替代率为能量替代率,同时是被替代的柴油所占的比率,可用式(1)表示。

$$\begin{aligned}\eta_s &= \frac{H_{ugas} m_{gas}}{H_{udiesel} m_{ped}} \times 100\% \\ &= \frac{H_{udiesel} m_{ped} - H_{udiesel} m_{pilot}}{H_{udiesel} m_{ped}} \times 100\% \\ &= \frac{m_{ped} - m_{pilot}}{m_{ped}} \times 100\% \quad (1)\end{aligned}$$

式中, H_{ugas} 为天然气的低热值,对于 LNG 一般为 50 MJ/kg; $H_{udiesel}$ 为柴油的低热值,一般为 42.5 MJ/kg; m_{gas} 和 m_{pilot} 分别为天然气和引燃柴油的循环值。替代率影响发动机的工作稳定性、动力性和排放特性,需要通过标定试验来确定不同转速与负荷下的替代率。

(2) 发动机的负荷按照需求的油量而定。将当前转速下最大油量 m_{max} 对应为 100% 负荷,将当前转速下维持空转的油量 m_0 对应为零负荷,则当前的负荷率 L 可用式(2)表示。

$$L = \frac{m_{ped} - m_0}{m_{max} - m_0} \times 100\% \quad (2)$$

(3) 双燃料模式下的燃料总热值应与总油量需求的热值相等,根据这一原则确定天然气的喷射量。

3 控制策略

3.1 程序主要框架

整个控制程序分为前台和后台:前台是传感器信号采集和执行器信号输出,采用时间触发和事件触发双重触发方式;后台为控制算法主体,每 20 ms 执行一次。

曲轴位置传感器与凸轮轴位置传感器信号输入进来后,用 MotoHawk 自带的 Encoder 工具进行处理,可以获得平均转速、当前曲轴角度等一系列物理量。传感器模拟信号输出量直接采用 Motohawk 自带的 A/D 采集模块可以得到指定通道的模拟信号电压,根据传感器的重要级分别按照三种采集频率进行分组(1 ms、10 ms、20 ms),传感器采得的电压经过限值、滤波、诊断后查表就得到了对应的物理量。主要执行器有油门执行器、天然气喷射阀、主继电器等,可以根据对应的驱动波形和功率要求选择对应的驱动通道,MotoHawk 中也有对应的模块可以配置其通道功能并接受程序实时计算的结果。

3.2 计算目标油门位置

在纯柴油模式时踏板反映的油量需求完全由柴油来实现,应该采用油门与踏板同步,同时还需对全程调速式柴油机的踏板进行适当滤波以改善其加速冒烟现象,在冷起动时油门位置适当加大(约为5%),在起动结束后再返回怠速位置。

当发动机工作于双燃料模式时,要首先确定总油量需求,通过当前的踏板位置和发动机转速查表可得到原机油泵的循环供油量,根据实际情况进行滤波和修正。

目标替代率是按当前工况查表得出,按照式(1)用目标替代率算出目标柴油量,再用油泵的循环油量表反查出目标油门位置,最后将目标油门位置输出。

3.3 计算天然气的喷射参数

每循环天然气喷射量取决于引燃油量相对总油量的缺失量。考虑到程序中对变工况的过程中,实际油门位置不一定立即达到目标油门位置,应当用当前的转速和实际油门位置查得实际油量,用总油量需求减去实际引燃柴油量,经热值转换即为每循环天然气的质量,然后根据每缸对应的喷嘴数换算为每喷嘴每循环的天然气喷射量。

天然气喷射脉宽要根据天然气喷嘴的标定数据查表得到。当天然气的喷射压力高于喷射背压(进气道压力)的2倍后,喷嘴处气体流速为当地声速,提高喷射压力对于提高喷嘴处天然气流动的马赫数没有明显影响,但会通过影响天然气的密度从而影响天然气质量流量,所以应该用喷射量和喷射压力查二维表得到喷射脉宽。除此以外,天然气温度、电瓶电压变化也会对喷射脉宽有一定影响,应该适当地加以修正。天然气喷嘴电磁阀的驱动采用峰值-保持型电流驱动,电瓶电压对峰值时间影响明显,也要根据标定试验数据加以修正。

天然气的喷射相位对于涡轮增压式柴油机改装的双燃料发动机的效率和排放影响比较明显,原因在于涡轮增压式的柴油机气门重叠角大,导致进气过程中扫气作用明显,容易将大量喷在进气道内的天然气通过扫气直接扫进排气管,造成燃料损失和HC排放,天然气在排气管大量聚集还容易被高温排气引燃而发出巨大声响,影响排气涡轮的寿命。文献[7]的研究表明天然气的喷射时刻对增压式发动机影响明显,天然气喷射的最佳时机是从排气门关闭到进气门关闭这段时间,将喷射脉宽加上喷射迟滞时间根据转速换算成起喷提前角,在进气门关闭角基础上提前,就得到天然气的起喷角。

3.4 工作模式的确定与切换

双燃料发动机在正常工作时处于双燃料工作模式,但在起动、怠速、暖机、供气压力低和发动机电控系统故障时工作于单燃料模式。

发动机的指示转矩一部分用于克服发动机运转时的自身阻力,另一部分作为有效转矩对外输出。对柴油机而言,油量反映了发动机的指示转矩。为了发动机工作稳定,当踏板反映的油量需求低于维持当前转速的最小油量时(即踏板位置小于当前转速对应的空转油门位置时),应该使发动机工作于纯柴油模式;当踏板反映的油量需求明显超过了当前转速的空转油量,开始对外输出有效转矩的时候,才允许进入双燃料模式工作。模式判断的程序如图3所示。

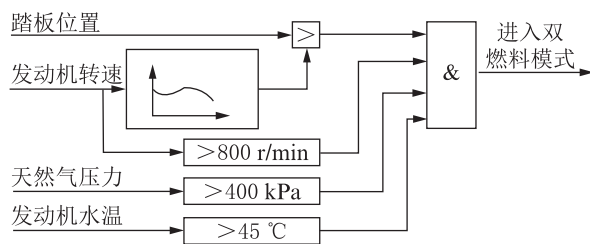


图3 工作模式确定算法

双燃料发动机在油气切换过程中若采用减油加气的方式,会出现转速不平稳的过程^[8]。发动机在模式切换时是否平顺关系到驾驶安全和发动机的耐久性。模式切换发生在发动机低负荷下,天然气对发动机动力的贡献很小,发动机工作的稳定性基本全部依靠柴油的调速特性,这就要求控制算法在数据和算法上双重保障,使得发动机目标油门位置在模式切换点前后保持连续。

如前文所述,在切换点的一边为纯柴油模式,目标油门位置采用踏板值;而在切换点的另一边为双燃料模式,目标油门则是按照目标引燃柴油量来确定。在模式切换过程中,在切换点附近一小段范围内将目标替代率设为0,以确保切换前后两种方法计算出来的目标油门位置基本相同,这样在模式切换时发动机就不会有明显的转速波动。

除了数据上的保证外,还要在双燃料工作模式进入和退出边界条件间设置回差,以防止随机干扰造成工作模式的反复切换,同时将回差区间作为模式切换的缓冲区,在切换的缓冲范围内时,求加权平均得到的目标油门作为折中,这样把将单燃料模式下的目标油门和双燃料模式的目标油门平顺地连接起来,如图4所示。

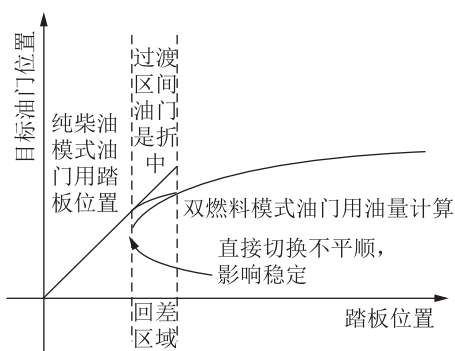


图 4 工作模式的平顺过渡示意图

3.5 油门位置的自适应校正

改装前的柴油油门与踏板机械相连，司机踏板的位置即油门的位置，这种位置的关联十分可靠。而改装后的油门由电子机构控制的执行器来拖动，在安装维修的差异和长期工作后油门机构轻微的变化都会造成实际执行油量不准，影响发动机的转矩输出和排放，甚至导致发动机不能稳定工作。

机械泵的电子控制采用油门执行器通过拉杆拖动油泵调速杆来实现，油门执行器由内置的步进电机和滚珠丝杠组成。将怠速油门位置对应的步数定义为零位置，将最大油门位置对应的步数定义为 100% 位置，然后按照步进电机绝对步数均匀划分油门位置。检测到当前步数与传感器检测位置偏差过大时，就要进行步进电机失步校正，在发动机停止工作后重新确定最大最小位置，将步进电机向关闭方向不断转动直至到达机械最小止点时重新命名绝对零步，再向最大方向转动到达最大止点，就完成了油门执行机构的自校正。

用步进电机步数取得的油门位置为名义油门位置，而真正对发动机产生影响的是油泵调节杆的角度即实际油门位置，工程实践中名义油门位置与实际油门位置的对应关系经常会发生变化，所以需要油门位置进行自适应校正。

油门位置自学习基于发动机倒拖转矩没有变化的假设，一般只要发动机不发生拉缸等破坏事件，以上假设都近似成立，因此可在发动机不带负载时用空转时的油门位置来获取油门与油量新的映射关系。

进入空转油门位置自学习后，根据学习的需要设置目标空转转速，根据目标转速与实际转速之差设计 PI(比例-积分)控制器闭环地调节油门位置，使得实际转速达到并稳定在目标空转转速附近，此时的油门位置即为该空转转速对应的油门位置。柴油机油门的计算中使用的是标定试验中机器油门与油量关系，所得到的原始油门需要使用自学习后的数

据加以修正后才能输出。

3.6 排气温度保护与水温保护

由于天然气燃烧速率较慢且低热值很高，所以天然气发动机通常存在着热负荷较高的缺点。双燃料发动机在运行中多次发生活塞烧顶与冷却水开锅，所以需要对其排气温度和水温进行监控。

天然气发动机的活塞通常经过特殊热强化，而柴油机的活塞耐热性较差，在不改变原柴油机活塞时，直接燃用天然气容易造成高温破坏。瞬时的缸内高温对机械部件的热负荷影响不大，持续的高温才会影响到材料的强度。为了保证发动机的运行安全，需要对各缸的排气温度进行监测。对于排气温度超过安全限值(一般采用 650℃)的气缸，就要针对性地减少该缸的天然气喷射量；若排气总管的温度超过安全限值，就要适当地降低替代率，保护发动机安全的同时不明显损失动力。

水温与发动机的替代率关系不大，在水温过高时只能适当降低发动机的负荷来保证运行安全；在冷机时(水温低于 50℃ 时)应该使发动机工作于纯柴油模式以防止双燃料模式下天然气燃烧不完全造成甲烷排放。

4 台架标定与功能验证

4.1 发动机台架与仪器

程序设计是在 Matlab/Simulink 环境下使用 MotoHawk 支持的模块完成，完整的控制模型先自动转为标准 C 代码然后再生成可执行文件，通过 MotoTune 软件将其下载到 128 pin 的 ECU 中，利用 CAN 总线对软件中的标定量完成在线标定，标定的逻辑结构如图 5 所示。

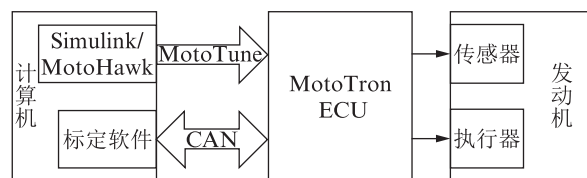


图 5 标定逻辑结构示意图

台架试验使用湘仪 FC2000 发动机测控系统测量发动机的转速、转矩和功率，使用湘仪 FC2210 智能油耗仪测量发动机的柴油油耗，使用湘仪 FC2212L 气体质量流量计来测量天然气的消耗量。

4.2 标定发动机工作 MAP

4.2.1 油泵循环油量 MAP

机械泵的每缸每循环油量是油量决策的基础，

又是目标油门位置 MAP 反算的依据,标定中采用转速每 200 r/min 为分度,分别固定若干个油门位置,根据测得的油耗结合转速与缸数计算得出每缸每循环的油量,油量 MAP 如图 6 所示。

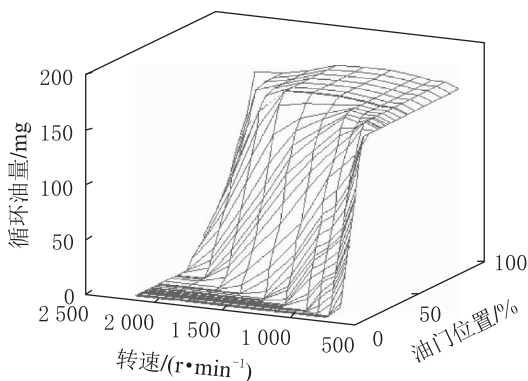


图 6 循环油量 MAP

引燃油门位置 MAP 根据油量表进行多次线性反算,反算出来的数据要进行试验验证。最终确定的引燃油门 MAP 如图 7 所示。

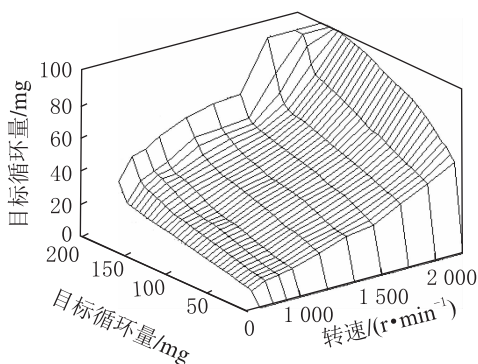


图 7 目标引燃油门位置 MAP

4.2.2 目标替代率

根据发动机运行的经济性特点,出于保障发动机耐久性和工作稳定性的考虑,目标替代率应当满足:(1)在模式切换附近时替代率为 0 以保证模式切换平顺,在低负荷采用较小替代率以减少天然气失火,中高负荷采用大的替代率以增强经济性;(2)接近外特性时降低负荷以增加柴油量,从而降低喷油嘴的温度;(3)在转速很高时应该采用小的替代率以降低排气温度。根据以上几点最终标定的目标替代率如图 8 所示。

4.2.3 天然气喷嘴喷射量特性

由于 LNG 在使用过程中燃气喷射压力随着天然气瞬时气耗的变化而变化,只要喷射压力大于进气压力的 2 倍,每循环天然气喷射量就主要受喷射脉宽和喷射压力的影响,要计算天然气的喷射脉宽

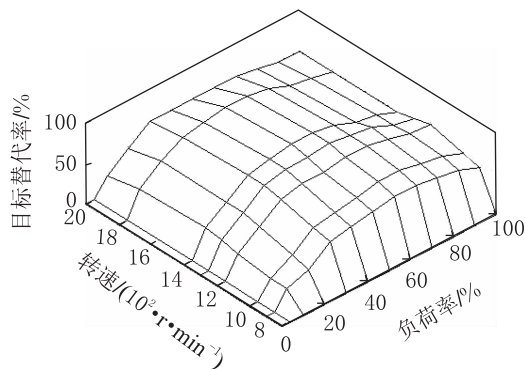


图 8 目标替代率 MAP

必须要标定天然气喷嘴的质量喷射特性。稳定转速后调节喷射压力和喷射脉宽,用艾默生公司生产的气体质量流量计测量天然气瞬时气耗,经换算可得标定的天然气喷嘴质量流量特性,如图 9 所示。

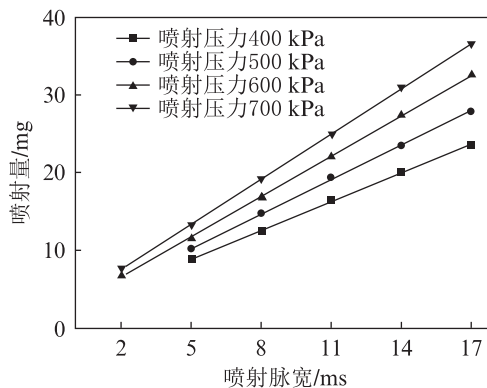


图 9 天然气喷嘴喷射特性

4.3 功能验证

由于双燃料的功率调节按照原机的循环油量进行,所以工作稳定可靠无异响,发动机加载卸载都跟得比较及时。

柴油机受冒烟极限限制,故而油泵循环油量的设定都较低;而双燃料不会出现冒烟现象,可以突破这一极限,使得混合气的过量空气系数降低到 1.2,所以双燃料模式下输出动力完全可以远远超过原柴油机,但出于保护发动机的要求,外特性时仍然按照原机循环油量计算引燃油量与天然气的量,从而使动力性与原机几乎一致,如图 10 所示。

双燃料下的有效效率低于纯柴油,但由于天然气较廉价,运行费用明显低于柴油机。在低负荷时经济性改善不明显,随着负荷增加,经济性改善越来越显著。图 11 为发动机在平均有效压力 0.325 1 MPa、0.650 2 MPa、0.975 3 MPa 时的有效效率和比功燃料费用(参照试验时的 0 号柴油和液化天然气价格)。

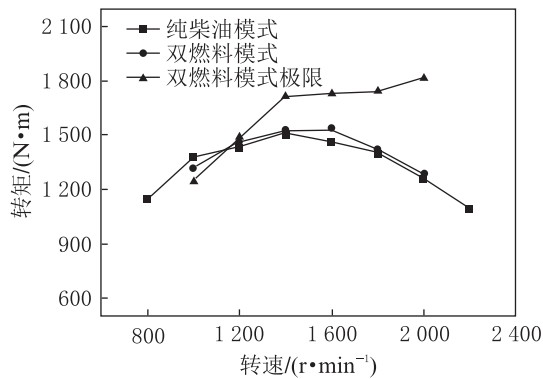
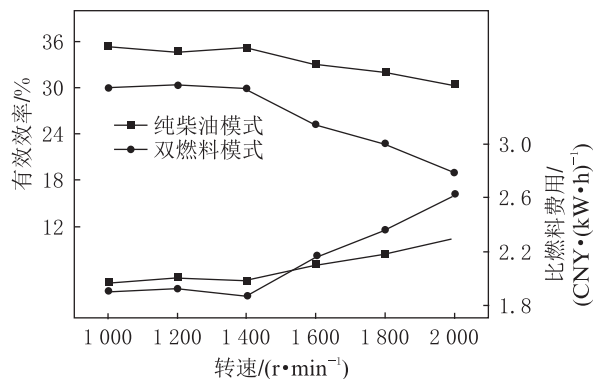
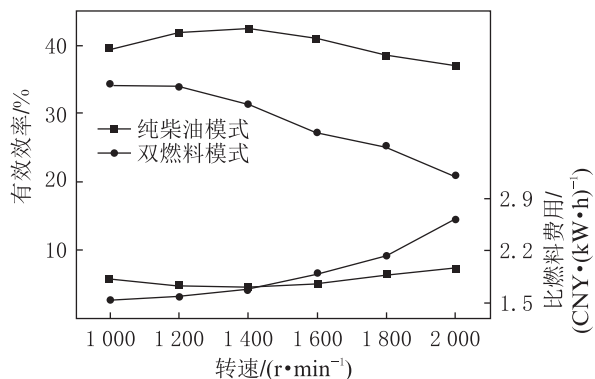


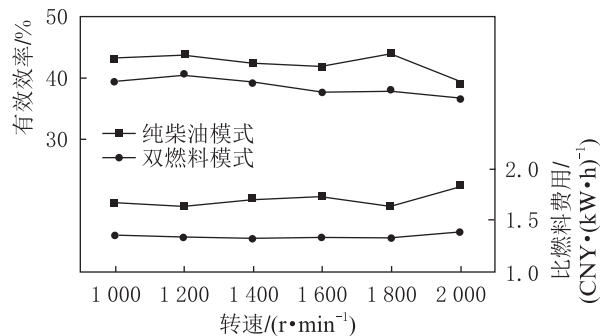
图 10 外特性对比



(a) 平均有效压力0.3251 MPa



(b) 平均有效压力0.6502 MPa



(c) 平均有效压力0.9753 MPa

图 11 不同平均有效压力下的有效效率与比功燃料费用

5 结论

(1) 柴油机循环油量与转速相关,应当按照原机的循环油量来决策引燃油量和天然气喷射量。

(2) 采用等热值替代保证了进入缸内的燃料总热值与原机相同,从而具有与原机接近的输出转矩与运行稳定性,且这种方法开发过程中标定数据少,数据复用率高。

(3) 采用油量需求、油量分解、等热值替代方法设计的控制系统,在全工况下发动机工作稳定可靠,动力性和经济性均有优势。

参考文献:

- [1] 邱中建,邓松涛. 中国非常规天然气的战略地位[J]. 天然气工业, 2012, 32(1): 1-5.
QIU Z J, DENG S T. Strategic position of unconventional natural gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(1): 1-5.
- [2] 周龙保,刘巽俊,高宗英. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [3] 刘磊,杨福源,欧阳明高,等. 4G200 柴油/天然气双燃料系统控制与优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 414-419.
LIU L, YANG F Y, OUYANG M G, et al. Control and optimization of diesel/LNG system of a 4G200 diesel engine [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2): 414-419.
- [4] 谢辉,张震,王国祥,等. 全电控双燃料发动机 32 位电控单元的开发[J]. 内燃机工程, 2001, 22(3): 11-15.
XIE H, ZHANG Z, WANG G X, et al. Development of 32 bit electronic control unit for fully electronically controlled dual fuel engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(3): 11-15.
- [5] THIPSE S S, KAVATHEKAR K P, RAIKAR S D, et al. Development of environment friendly diesel-CNG dual fuel engine for heavy duty vehicle application in India[C]//SAE Paper. Detroit, Michigan, USA, 2013, 2013-26-0015.
- [6] 张虎,王存磊,张建龙,等. 基于 MotoTron 平台的汽油发动机控制器开发[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 845-849.
ZHANG H, WANG C L, ZHANG J L, et al. Development of a gasoline engine controller based on MotoTron[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(6): 845-849.
- [7] YANG B, WEI X, XI C, et al. Experimental study of the effects of natural gas injection timing on the combustion performance and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 297-304.
- [8] 童毅,张武高,欧阳明高. 电控柴油/天然气双燃料发动机油气切换过程的研究[J]. 汽车工程, 2000, 22(5): 346-349.
TONG Y, ZHANG W G, OUYANG M G. Study on the fuel switchin process of electronically controlled diesel/CNG dual fuel engine[J]. Automotive Engineering, 2000, 22(5): 346-349.