

DOI: 10.7652/xjtuxb201405002

双燃料发动机电控单元的设计与控制策略

杨博, 刘亦夫, 尉星, 曾科

(西安交通大学内燃机研究所, 710049, 西安)

摘要: 为了改善传统的基于标定数据的柴油/天然气双燃料发动机控制系统性能,开发了天然气进气歧管顺序喷射电子控制单元(ECU),提出了基于原柴油机喷油脉宽信号实时采集的燃料等热值替代控制策略,并在一台经过双燃料改装的高压共轨发动机上对该系统的引燃油喷射、天然气喷射、原机喷油脉宽信号实时采集等功能,以及等热值替代的控制策略进行了实验验证。结果表明:与基于标定数据的控制系统相比,所提出的控制单元及其相应控制策略可以有效改善双燃料发动机的动态控制性能;该系统设计正确,工作稳定。在此基础上,研究了天然气喷射正时对双燃料发动机总碳氢(THC)排放的影响,实验表明:天然气喷射正时变化对双燃料发动机 THC 排放有显著影响,通过实时控制天然气喷射正时,可以避免过早喷入天然气,降低双燃料发动机的 THC 排放,特别是在中小负荷下,排放的最大降幅可达 32.6%。

关键词: 双燃料;天然气;电子控制单元;顺序喷射

中图分类号: TK421.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)05-0008-07

The Development of a Dual Fuel Engine Electronic Control Unit and Control Strategy

YANG Bo, LIU Yifu, WEI Xing, ZENG Ke

(Institute of Internal Combustion Engine, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

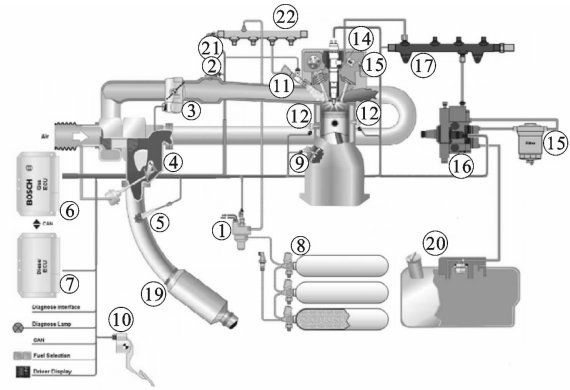
Abstract: A natural gas sequential injection dual fuel electronic control unit (ECU) was developed for the purpose to improve the performance of the dual fuel engine control system according to the calibration data. And a real-time diesel equivalent heating value substitution control strategy following the signal of original diesel injection pulse width was also proposed. A direct injection engine equipped with high pressure common rail system was converted into diesel/natural gas dual fuel engine and experiments were conducted to validate the functions of pilot diesel injection, natural gas injection, original diesel injection pulse width signal acquisition and the real-time equivalent heating value substitution control strategy. It indicates that the developed dual fuel ECU works stably and the dynamic performance of the dual fuel engine can be improved dramatically. The influence of natural gas injection timing on the total hydrogen carbon (THC) emissions is discussed, the significant influence on the THC emissions is found in the corresponding experiments. Adjusting natural gas injection timing in real-time facilitates avoiding early injection of natural gas, the THC can be reduced significantly. Especially, under light and medium loads, and the maximum reduction gets up to 32.6%.

Keywords: dual fuel; natural gas; electronic control unit; sequential injection

随着排放法规的日趋严苛和石化燃料的日渐匮乏,如何降低柴油机的污染物排放水平,特别是针对大量在用柴油机,如何以较低的成本,实现其排放水平的降低,已经成为企业和学者关注的热点问题。为此有众多解决方案被提出,其中在柴油机中燃用气体燃料的双燃料方案获得了广泛认可^[1]。天然气是一种可替代的清洁能源,具有储量大、分布广、价格低的优点,而且由于其较高的自燃温度,比其他气体燃料更适合在大压缩比下使用,因此柴油引燃天然气发动机概念得到了越来越多的关注。在柴油引燃天然气发动机中,主要能量由天然气提供,少量的柴油在压缩冲程末期喷入气缸内,扮演引燃天然气的“气体火花塞”的角色。大量文献表明,柴油/天然气双燃料模式能显著降低 NO_x 和 PM 排放水平,与此同时总碳氢(THC)排放水平有所增加,特别是在中小负荷时比较明显,但是利用进气节流和增加后处理装置可以将其控制在较低水平^[2-5]。除了排放和经济方面的优点之外,柴油引燃天然气技术最大的意义在于:可以以较低的成本,将在用的柴油机改装成柴油/天然气双燃料发动机,同时可以保留原柴油机的全部功能,在缺少天然气供应的情况下,可以在纯柴油模式下正常工作,增加了燃料供应的自由度。这两点对于柴油引燃天然气技术的市场推广具有重要的意义。

根据天然气引入气缸方式的不同,目前有 3 种类型的双燃料发动机方案:进气道预混、进气歧管顺序喷射和天然气高压缸内直喷(HPDI)。进气道预混双燃料发动机方案因为技术难度小,改装成本低,是目前最为常见的双燃料改装方案,但是进气道预混会导致发动机加速特性恶化和 THC 排放增加。进气歧管顺序喷射方案可以很好地解决进气道预混方案的不足之处,因为天然气是独立喷射到各个歧管内的,其质量和喷射正时可以快速调整,极大地改善了发动机的动态响应特性。另外,通过避免在发动机排气门关闭之前喷入天然气,可以减少扫气时的天然气损失,相比预混方式能有效降低 THC 排放。进气歧管顺序喷射方案的缺点在于系统整体比进气道预混方式复杂,难点在于其双燃料控制系统和控制策略的开发,因为双燃料机 ECU 不但要能控制天然气的喷射过程,而且还要与原柴油机 ECU 协同工作,共同实现对双燃料发动机的控制。这类双燃料方案中典型的代表是博世公司开发的 eGD Flex 柴油天然气系统,该方案的原理图如图 1 所示。

第三种方案就是所谓的天然气高压缸内直喷



1:天然气减压阀;2:增压器温度压力传感器;3:节气门;4:增压器;
5:氧传感器;6:天然气 ECU;7:柴油 ECU;8:天然气瓶;9:转速传
感器;10:加速踏板;11:天然气喷嘴;12:爆震传感器;13:冷却水
温度传感器;14:柴油喷嘴;15:凸轮轴相位传感器;16:高压油
泵;17:高压油轨;18:柴油滤清器;19:氧化型催化包;20:油
箱;21:天然气温度压力传感器;22:天然气喷射

图 1 BOSCH eGD Flex 双燃料系统原理图

(HPDI)系统,这种系统通常会装备专门设计的双燃料高压喷嘴,例如西港公司的 HPDI 喷嘴,如图 2 所示。在 HPDI 系统中,引燃油和天然气按照特定的顺序,由同一个喷嘴器直接喷入缸内。HPDI 双燃料发动机具有比以上 2 种方案更低的 THC 排放和更高的柴油替代率,但是这种类型的双燃料发动机不具备完整的纯柴油工作能力,在没有天然气的情况下,只能工作在类似“跛行回家”的模式。另外,该方案要求全新的供油和供气系统,包括专用 ECU、高压泵(油泵和气泵)和专用高压双燃料喷嘴,导致其应用成本远远高于其他 2 种方案。

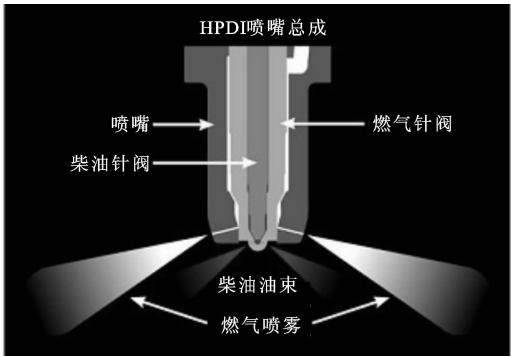


图 2 西港 HPDI 喷嘴总成原理图^[6]

在本文的研究中,出于对双燃料发动机工作性能、排放、应用成本和市场等方面的考虑,选择了进气歧管顺序喷射方案^[4]。具体的天然气供给系统和系统整体布局原理如图 3 所示。

本文研究的主要目的是为了给出一整套针对高压共轨发动机的进气歧管顺序喷射的双燃料机

(3)根据喷油器和天然气喷嘴喷射特性,将引燃油量和天然气质量转换成相应的喷射脉宽。

2.1 利用实时获取的喷油和轨压信号实现对原机循环喷油量和引燃油喷射正时的实时计算

在发动机运行过程中,原机 ECU 采集加速踏板位置、冷却水温度、进气压力温度等传感器数据,通过相应的控制算法计算得出目标轨压、喷射正时和喷油脉宽,最后驱动喷油器电磁阀实现喷油动作。在双燃料机 ECU 中,设计了专门的采样电路对原机 ECU 喷油控制信号进行采样,实时获取原机 ECU 的喷油控制波形,然后利用获取的波形数据,计算原柴油机喷油正时和喷油脉宽,得到其喷射正时和脉宽后,再结合喷油器喷射特性,即可计算出原柴油机在当前工况下的理论循环喷油量和引燃油的喷油正时。原柴油机喷油质量与喷油脉宽在不同轨压下的对应关系由实验测得,数据如图 6 所示。由图中可以看出,在不同的轨压下,喷油量与喷油脉宽之间存在线性关系,随着轨压的变化,直线的斜率保持不变,而截距发生了变化。据此可以建立计算喷油量 M 的方程

$$M = kt + f(p) \quad (1)$$

式中: t 为原柴油机当前工况下 2 段喷射脉宽时间之和; $f(p)$ 是轨压 p 的线性函数; k 为斜率。所有未知参数均可由图 6 中的数据求得。另外,引燃油喷射正时也需要根据工况变化做实时调整,其算法为

$$T_{\text{pilot}} = (T_{\text{pre}} - T_{\text{main}})\alpha \quad (2)$$

式中: T_{pre} 和 T_{main} 分别为预喷射正时和主喷射正时; α 为速度和负载影响系数,取值在 0 到 1 之间。

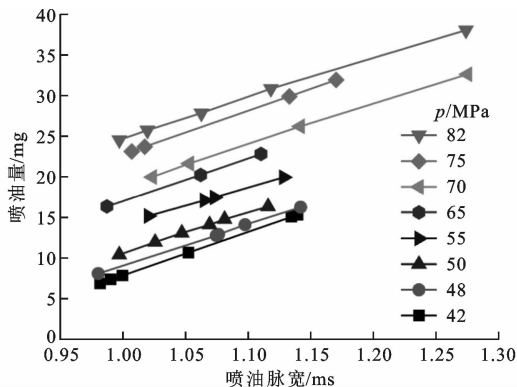


图 6 不同轨压下喷油量与喷油脉宽的关系

2.2 按照等热值替代的原则计算引燃油量和天然气质量

在双燃料模式运行时,柴油替代率是关注的重点,在保证燃烧效率和排放的前提下,应该尽可能地提高替代率,从而使柴油/天然气双燃料发动机的经

济性最大化。利用前面得到的原机理论循环喷油量和引燃油喷射正时,按照等热值替代的原则,即可实现柴油替代率的实时控制。柴油替代率 R 定义为

$$R = \frac{M - M_{\text{pilot}}}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: M 为原柴油机理论循环喷油量; M_{pilot} 为双燃料模式下的引燃柴油量。对于给定的工况,设原机理论循环喷油量为 M ,柴油的低热值为 C_d ,天然气的低热值为 C_{gas} ,目标柴油替代率为 R ,天然气燃烧效率为 η ,则当前工况下天然气循环喷射量 M_{gas} 可表示为

$$M_{\text{gas}} = \frac{RMC_d}{C_{\text{gas}}\eta} \quad (4)$$

引燃柴油量可表示为

$$M_{\text{pilot}} = \frac{C_d M - C_{\text{gas}} M_{\text{gas}}}{C_d} \quad (5)$$

式(4)和(5)中,当前工况原柴油机循环喷油量可以由原机 ECU 喷油控制号采样求得,柴油目标替代率一般根据经济性、动力性和排放特性综合考虑,最终确定各工况下的最佳值。得到 M_{gas} 和 M_{pilot} 以后,结合相应的喷嘴特性(喷油和喷气),将质量转换成相应的喷射脉宽,在合理的正时喷射即可。这种策略的优点在于降低了开发工作的难度和风险,缩短了开发周期,最大程度地利用了原机 ECU 的控制策略,实现了双燃料控制系统与原柴油机控制系统的完全兼容,并保证了发动机控制的稳定性,增加了发动机燃料供应的灵活性。

2.3 天然气多点顺序喷射降低 THC

柴油/天然气双燃料模式可以大大降低 NO_x 和 PM 排放,但是 THC 排放增加,且其主要成分是甲烷。甲烷化学性质稳定,不易被氧化,给后续处理带来了极大的困难。THC 排放高一方面是因为天然气燃烧温度低,火焰传播速度慢,缸内燃烧不充分,特别是中小负荷下更为显著。另一方面,气门叠开期扫气会排出部分喷入的天然气,这也是传统的进气道预混双燃料模式 THC 排放高的原因之一。本控制系统中采用了多点顺序喷射,根据发动机转速和柴油替代率来综合确定喷气正时和喷气质量,使整个喷射过程处在气门叠开期之后,避免了扫气时天然气被扫出,从而可以有效降低 THC 的排放水平。

3 实验装置及说明

3.1 实验发动机

本文实验所用的双燃料发动机是由 GW2.8TC

高压共轨柴油机改装而成,表 1 为具体参数。

表 1 GW2.8TC 发动机参数

项目	技术参数
型式	直列、水冷、电控高压喷射、增压
缸数	4
缸径	93 mm
冲程	102 mm
压缩比	17.2 : 1
排量	2.771 L
标定功率	(70±3) kW
最大扭矩	(225±5) N·m
喷油器类型	BOSCH CRIP2
最大燃油喷射压力	145 MPa
进气门打开角	-24°
进气门关闭角	235°
排气门打开角	-234°
排气门关闭角	26°

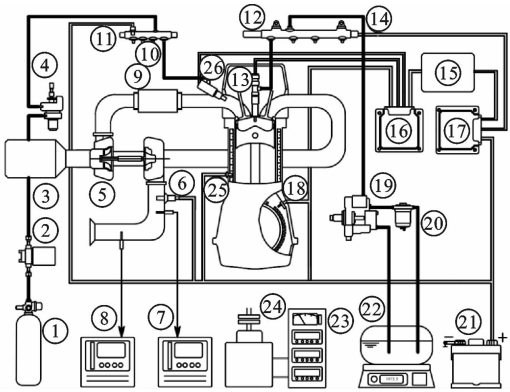
注:标定功率条件为转速 3 600 r/min;最大扭矩条件为转速 1 600~2 600 r/min。

3.2 双燃料改装方案

双燃料系统改装原理与天然气供气系统如图 7 所示,原机未做重大改动,只增加了天然气供气系统和双燃料机 ECU。天然气供给系统由高压气瓶、安全切断电磁阀、减压阀和天然气喷轨组成。天然气从高压气瓶出来,经过减压阀减压,压力从 1.5~25 MPa降低到 0.5 MPa 左右,然后由喷气电磁阀直接喷入进气歧管。减压阀通入发动机循环水加热,天然气温度由减压阀上的冷却水温度传感器测量。另外,在双燃料工作模式下,引燃柴油和天然气的喷射均由双燃料机 ECU 控制,原机 ECU 的喷油控制信号被送到模拟负载上,控制系统的其他功能仍由原机 ECU 控制。

3.3 测试设备

实验发动机与电涡流测功机相连,由 FC2000 发动机测试控制系统控制,可实时监控发动机的转速、扭矩、功率、润滑油压力和温度等参数。天然气和柴油消耗量均由精度为 0.1 g 的电子天平测量。尾气直接从排气管采样,THC 由精度为 12×10^{-6} 的 Horiba MEXA-5541JA 尾气分析仪测量。喷油器驱动电流、喷射脉宽和喷射正时均由示波器配合电流钳测量。



1:高压气瓶;2:安全切断电磁阀;3:空滤;4:减压阀;5:增压器;
6:排气温度传感器;7:Horiba MEXA-5541JA;8:MEXA-720;
9:进气中冷;10:天然气喷轨;11:天然气温度压力传感器;
12:高压油轨;13:喷油器;14:共轨压力传感器;15:模拟负载;
16:双燃料机 ECU;17:原机 ECU;18:曲轴位置传感器;19:高
压油泵;20:柴油滤清器;21:电池;22:电子式油量计量仪;
23:发动机测试控制柜;24:测功机;25:冷却水温度传感
器;26:天然气喷嘴

图 7 发动机台架示意图

4 实验结果

4.1 原柴油机 ECU 喷油器驱动电流与双燃料机 ECU 喷油器驱动电流对比

图 8 给出了原柴油机 ECU 和双燃料机 ECU 对同一喷油器的驱动电流波形。如图所示,两者驱动电流波形一致,均为典型的峰值保持型;峰值段平均电流和维持段平均电流相等,均为 19 A 和 14.5 A;电磁阀打开电流上升时间均为 100 μ s,关闭电流下降时间均为 80 μ s。因此,由双燃料机 ECU 替换原柴油机 ECU 驱动喷油器,对原机喷油特性无显著影响。

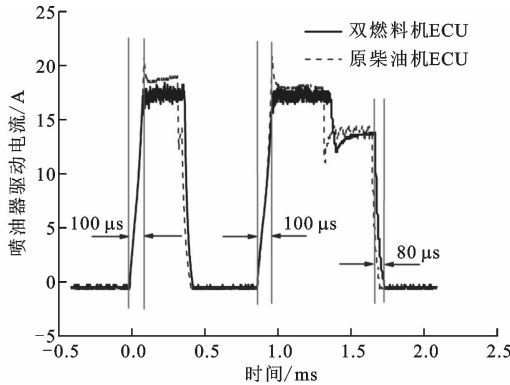


图 8 双燃料机 ECU 与原柴油机 ECU 喷油器驱动电流比较

4.2 原柴油机喷油控制信号采样处理模块性能验证

图 9 给出了 1 800 r/min、47 N·m 工况下,原机 ECU 喷油控制信号、喷油器驱动电流和双燃料

机 ECU 信号的采样结果,其中上图为原机 ECU 喷油器驱动电流,中图为原机喷油控制信号,下图为双燃料机 ECU 采样结果。从图中可以看出,双燃料机 ECU 采样到的原机喷油控制信号逻辑完全正确,2 段信号的脉宽也基本相等,只是因为滤波的原因,在每段波形结束时,采样得到的波形相比原机的喷油控制信号有一定的滞后,如图中 Td1 和 Td2 所示,均为 20 μ s。以柴油机最高转速一般不会超过 4 000 r/min 为例,20 μ s 对应的曲轴转角不超过 0.48°,不会对发动机运转产生显著影响。另外,在双燃料控制策略中,可以将滞后时间从总脉宽中减去,从而避免了滞后时间对发动机控制算法的影响。图 10 的结果表明,本文设计的波形控制信号采样处理模块正确可行,能够稳定地实时获取原机 ECU 喷油控制信号,达到了设计预期结果。

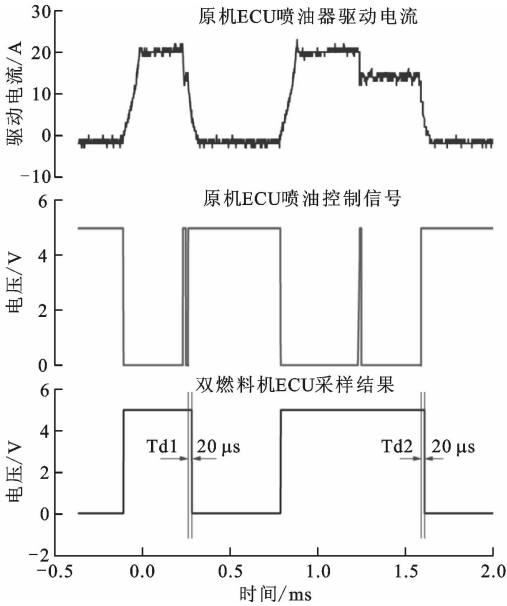


图 9 1 800 r/min、47 N·m 原机驱动电流波形与跟踪信号

4.3 利用原机 ECU 喷油和轨压信号计算原机循环喷油量的算法验证

为了验证双燃料机 ECU 利用原机喷油和轨压信号计算原机循环喷油量算法的性能,选择了不同转速(1 800~2 200 r/min)、不同负载(10%~100%)的若干工况点,对其喷油量进行了测量(用称量法测量相同工况下 3 min 内的平均油耗,每个点测量 3 次,取平均值)。图 10 给出了不同转速和不同扭矩下喷油质量的实验值与计算值。由图可知,计算值与实验值在各工况点下基本相同,计算值与实验值的误差范围在±4%以内,完全能够满足控制精度的要求,实验结果表明:利用原机 ECU 喷油和轨压信号计算原机循环喷油量的算法完全满足控制要求,达到

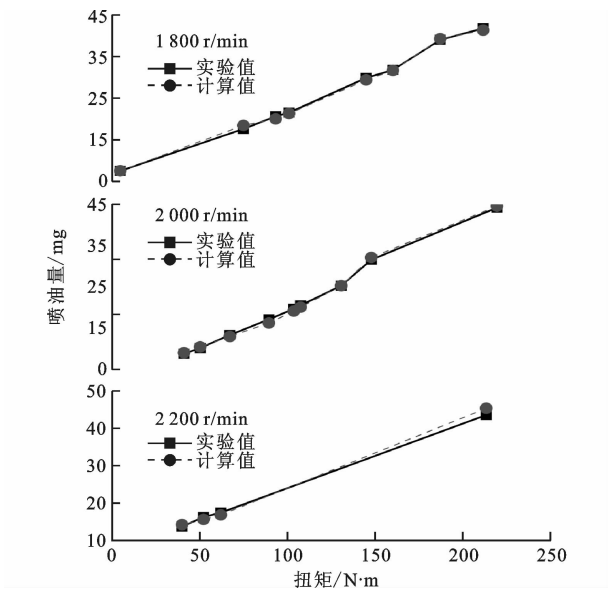


图 10 不同转速,不同扭矩下实测油量与计算油量对比

了设计要求。
4.4 基于燃料等热值替代原则的柴油替代率实时控制算法验证

按照等热值替代的原则,把柴油替代率实时控制在当前工况下的最优值是双燃料发动机 ECU 的一项重要任务,同时也直接影响双燃料发动机的工作性能和经济性。在转速为 1 800 r/min、扭矩从 14.4 N·m 增加到 96.0 N·m、目标替代率设为 86% 的工况下,进行了多组验证实验,实验结果如表 2 所示,实测柴油替代率与目标替代率基本相符,但是随着负荷增加,可见实测柴油替代率有所增大。这种趋势是因为随着负荷增加,缸内混合气变浓,燃烧温度逐渐升高,天然气燃烧效率会有所提高,本次实验中天然气燃烧效率被认为是一个定值,并未考虑到它的变化对柴油替代率的影响,因此导致天然气理论计算量变大,相应引燃油量减少,所以实测替代率随负荷增加有所增加,整体相对误差不超过

表 2 目标柴油替代率为 86% 时的实验结果

扭矩/ N·m	柴油油耗/ kg·h ⁻¹	引燃油油耗/ kg·h ⁻¹	实测柴油替 代率/%
14.4	1.718	0.262	84.7
28.6	2.246	0.336	85.0
55.9	3.262	0.462	85.8
64.0	3.566	0.460	87.1
69.5	3.770	0.448	88.1
76.6	4.032	0.438	89.1
83.6	4.294	0.432	89.9
96.0	4.754	0.454	90.5

5.2%，满足设计要求。实验结果表明，基于燃料等热值替代的柴油替代率实时控制算法是正确可行的，但是天然气燃烧效率变化对柴油替代率的影响必须加以考虑。

4.5 天然气多点顺序喷射降低 THC 效果验证

为了验证利用天然气多点顺序喷射降低 THC 排放的效果，在转速为 1 600 r/min 和负载为 60% 的工况下，保持引燃油喷射正时、引燃油质量和天然气质量不变，只改变天然气喷射正时 θ 为 -100° （排气上止点前，下同）、 -80° 、 -40° 、 30° （排气上止点后，下同）、 100° ，以此来验证天然气多点顺序喷射对 THC 排放的影响效果。实验结果如图 11 所示，图中 2 条竖线分别为进气门打开提前角和排气门迟闭角，两者之间的部分为气门叠开期。由图中可以看出，天然气喷射正时的改变对 THC 排放有显著影响。天然气在气门叠开期之后喷入进气歧管，THC 排放整体明显比天然气在气门叠开期之前喷入时低，最大降低幅度为 32.6%。产生这种现象的原因为：天然气在气门叠开期之前喷入会有扫气损失，而在气门叠开期之后喷入则没有；天然气喷射正时提前，则天然气有足够的时间与空气混合均匀，加上天然气燃烧温度低，火焰传播速度慢，在引燃油喷射参数不变的情况下，局部燃烧不完全的机率增加^[7]。实验结果表明，利用天然气多点顺序喷射的方法，选择合理的喷射正时，可以显著降低 THC 排放。

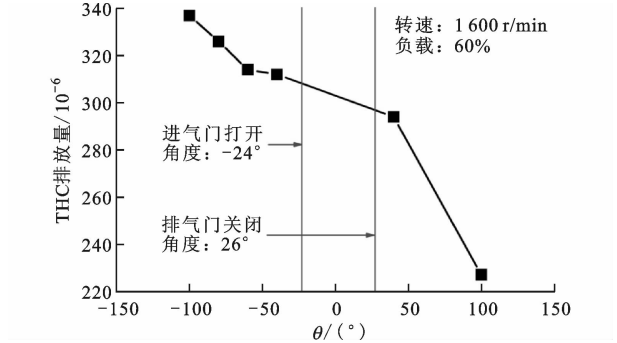


图 11 天然气喷射正时对 THC 排放的影响

4.6 发动机双燃料与纯柴油模式下的外特性对比

图 12 给出了发动机在双燃料模式与纯柴油模式下的外特性曲线对比。双燃料模式下发动机扭矩和功率基本与纯柴油模式时相同，最大扭矩为 195 N·m，最大功率为 53 kW，略高于原机。

5 结 论

本文介绍了基于 PowerPC 架构的 32 位高性能微处理器的柴油/天然气双燃料发动机 ECU 的开

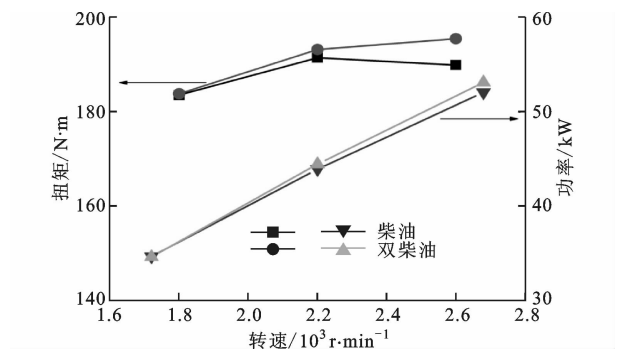


图 12 双燃料模式与纯柴油模式下的外特性对比

发过程，着重介绍了其硬件组成与控制策略。本文开发的双燃料机 ECU 已经在一台改装成双燃料的高压共轨实验发动机上成功应用，结论总结如下。

(1) 本文开发的双燃料机 ECU 工作稳定，性能达到了设计要求。相应的验证实验表明，该双燃料机 ECU 硬件系统设计合理可行。

(2) 本文提出的基于燃料等热值替代原则的柴油替代率实时控制策略合理可行，与传统的基于标定数据的控制策略相比，显著降低了开发难度和成本，缩短了开发周期。

(3) 天然气喷射正时变化对双燃料发动机 THC 排放有明显的影 响，不在排气门关闭前喷入天然气可以明显降低 THC 排放，排放量的最大降幅可达 32.6%。

参考文献:

[1] KORAKIANITIS T, NAMASIVAYAM A M, CROOKES R J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression ignition (CI) engine performance and emissions [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2011, 37(1): 89-112.

[2] WAGEMAKERS, A. M. L. M, LEERMAKERS C. A. J. Review on the effects of dual-fuel operation, using diesel and gaseous fuels, on emissions and performance, SAE 2012-01-0869 [R]. Warrendale, PA, USA; SAE, 2012.

[3] PAPAGIANNAKIS R G, RAKOPOULOS C D, HOUNTALAS D T, et al. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions [J]. Fuel, 2010, 89(7): 1397-1406.

[4] 苏万华, 林志强, 汪洋, 等. 气口顺序喷射、稀燃、全电控柴油/天然气双燃料发动机的研究 [J]. 内燃机学报, 2001, 19(2): 102-108.

(下转第 26 页)