

电喷发动机用甲醇裂解气制备与控制技术*

徐元利 姚春德 李旭聪

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

【摘要】 以一台电喷发动机为研究对象,设计甲醇裂解装置和控制单元,制定控制策略,并在发动机上进行了标定试验和性能试验。结果表明:设计的裂解器及电控单元,实现了汽油启动后燃料的平稳切换及完全裂解气模式下自动运行;裂解气中除含有 H₂ 和 CO 外,还含有一定量的 CH₃OH 蒸汽,其中 H₂ 占 23.3% ~ 46%, CO 占 11.6% ~ 23%, CH₃OH 蒸汽占 31% ~ 65%;另外,裂解气发动机的燃料经济性也较汽油机有所改善。

关键词: 电喷发动机 甲醇 裂解装置 控制策略

中图分类号: TK46⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0001-05

SI Electronic-controlled Engine Fueled with Methanol Dissociated

Xu Yuanli Yao Chunde Li Xucong

(State Key Laboratory of Engine, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

Based on an SI electronic-controlled engine, hydrogen generator and electronic controlled unit were developed, the control strategy for fuel switching and hydrogen mixture mode were set up to realize a smooth transition in the period of fuel switching and an automatic operation under hydrogen mixture mode. Moreover, components measurement of hydrogen mixture online and its effects of mixture concentration on performance of SI engine were performed. The results indicate that besides hydrogen and monoxide carbon, certain amount of methanol steam was found in hydrogen mixture and they account for 23.3% ~ 46%, 11.6% ~ 23% and 31% ~ 65% respectively. In addition, the fuel economy is also improved power with gasoline.

Key words Electronic-controlled engine, Methanol, Dissociated methanol device, Control strategy

引言

随着石油资源的日益减少和排放法规的日趋严格,寻找切实可行的石油代用燃料具有重要意义,其中醇类燃料是最可行的石油替代燃料之一^[1~3]。

甲醇直接用于点火式发动机,燃料效率较低。为此,美国学者^[4]提出了利用发动机废气余热将甲醇裂解为甲醇裂解气作为发动机燃料的思想。尽管国内外学者对甲醇裂解气发动机进行了大量研究,但都是基于化油器发动机,都是采用汽油和裂解气进行掺混燃烧,而且系统较复杂。

随着发动机技术的进步,化油器式发动机已经

被电喷发动机所取代。为了将甲醇裂解应用于电喷发动机,前期对裂解气的排放特性及性能进行了研究^[5~6]。本文以一台电喷汽油机为原型机,研制甲醇裂解装置和控制单元,制定控制策略,并对裂解气的成分进行研究。

1 裂解系统设计

1.1 设计目标

设计满足乘用车需求的甲醇裂解气发动机的样机,燃料消耗率以热值计低于汽油机,热效率高于汽油机,在环境温度 5℃ 的条件下,不需要辅助措施可以实现正常冷启动。可靠性达到原燃油车的水平,

收稿日期: 2010-12-10 修回日期: 2011-01-05

* 国家自然科学基金资助项目(50876075)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800560040)

作者简介: 徐元利,高级工程师,主要从事内燃机燃烧及其废气净化研究,E-mail: xuyuanli2006@126.com

通讯作者: 姚春德,教授,博士生导师,主要从事内燃机燃烧及其废气净化研究,E-mail: arcadyao@tju.edu.cn

整车动力性能、驾驶性能等同于原车。

1.2 试验方案的总体设计

本研究所使用的原型发动机为东风日产发动机制造有限公司生产的 NISSAN HR16DE 型 1.6 L 四缸电喷汽油发动机,燃油供给系统采用气道口多点分组喷射形式,发动机参数:缸径 78 mm;行程 83.6 mm;最大扭矩 153 N·m(4 400 r/min);压缩比 9.8;标定功率 80 kW(6 000 r/min)。

图 1 是裂解气电喷发动机试验总体方案。该发动机装有两套燃料供给系:汽油燃料供给系和甲醇燃料供给系。汽油燃料供给系由汽油箱、汽油泵和进气道喷射汽油喷嘴组成,该燃料系只在起动时使用,在不使用裂解气燃料时与传统燃料系相同。

附加的甲醇燃料系由甲醇箱、甲醇泵和甲醇喷嘴、甲醇裂解器、裂解器燃料输送管等组成。裂解器串联在发动机的排气总管上。甲醇液体以液雾的形式通过甲醇喷嘴喷入裂解器中的预热管后,在排气管余热的作用下转变为甲醇蒸汽,然后在催化剂的作用下转变为 H_2 和 CO ,通过裂解气输送管于节气门前进入进气管与空气混合,而后进入发动机气缸燃烧。

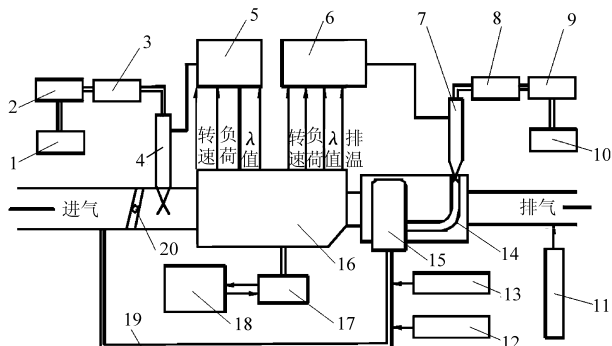


图 1 裂解气电喷发动机试验总体方案示意图

Fig. 1 Schematic of rich hydrogen fuel system on

SI electronic-controlled engine

1. 汽油箱 2. 油耗仪 3. 汽油泵 4. 汽油喷嘴 5. 原机电控单元
6. 裂解气电控单元 7. 甲醇喷嘴 8. 甲醇泵 9. 油耗仪
10. 甲醇箱 11. 排放分析仪 12. 定量泵 13. 气相色谱仪
14. 预热管 15. 催化剂 16. 发动机 17. 测功机 18. 控制柜
19. 裂解气输送管 20. 节气门

保留原机电控单元,新增加一套裂解气电控单元,这两套电控单元协同工作,对发动机工况进行控制。新开发的裂解气电控单元采集发动机转速、节气门开度(负荷)、 λ 值(氧传感器的浓度)及排气温度等作为输入信号,甲醇的喷射量和喷射时刻作为输出信号。

1.3 控制策略

为了实现自动运行,制定了裂解气电喷发动机的控制策略,以实现燃料的自动切换和裂解气状态

下的平稳运行。裂解气系统控制策略见图 2。发动机用原机的汽油起动,起动后,裂解气 ECU 判别发动机的排气温度。当排气温度超过 320°C 时,裂解气 ECU 自动从汽油模式向裂解气模式过渡,然后进入完全裂解气的工作模式。

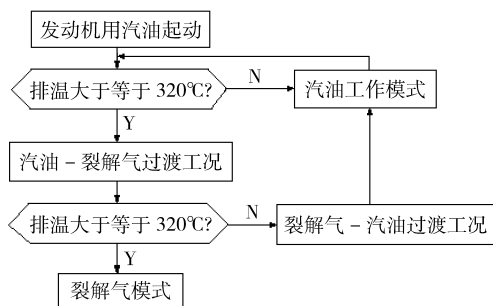


图 2 裂解气系统控制策略

Fig. 2 Control policy of rich hydrogen fuel system

1.4 裂解气电控单元硬件

新增加的裂解气电控单元采用 Freescale 16 位单片机 mc9s12dp256 芯片,主要增加了专为控制使用的加热型氧传感器、铠装式排气温度热电偶及用于切断原发动机汽油喷嘴的电磁阀。

1.5 催化剂

考虑到内燃机安装空间、排气温度和使用成本均有一定的限制,选用了价格便宜且在低温条件下具有较高活性的铜、锌及铝等氧化物组成的铜系催化剂,为直径 $\Phi 5$ mm、长度 4~6 mm 的短圆柱,各成分的质量分数分别为 38%~42%、38%~43% 和 5%~6%。

1.6 裂解器设计

裂解器是裂解系统设计的关键,其性能直接关系到发动机的性能。由于本研究的目标是达到车辆正常行驶的要求,即在满足性能的同时,还要满足装车要求,因此,裂解器设计力求简单实用。裂解器如图 3 所示,由甲醇喷嘴、甲醇气化室和催化室等组成。甲醇喷嘴布置在裂解器上,往预热管内喷射甲醇。为了提高甲醇喷嘴高温环境下的可靠性,采用回醇冷却技术。甲醇气化管上设置若干加热片,以强化换热效果。催化室内设置有铜锌铝合金成分的催化剂,以提高甲醇的裂解率。为了防止甲醇的腐蚀,裂解器由不锈钢材料焊接而成^[7~11]。

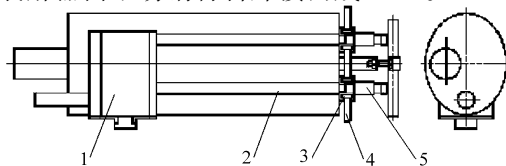


图 3 裂解器示意图

Fig. 3 Diagram of hydrogen generator

1. 催化室 2. 预热管 3. 冷却腔 4. 回醇管 5. 甲醇喷嘴

2 试验

2.1 试验装置和方法

试验装置总体设计见图 1。发动机的工况控制是通过电控单元监测发动机的转速和节气门开度,控制裂解器内甲醇的喷射量来实现的。同时,电控单元通过氧传感器监测排气中氧的浓度,并对裂解器甲醇的喷射量进行调整。

试验所用主要测试设备有:WE32H 型水力测功机及 EIM0301D 型发动机测控系统,控制发动机转矩和转速;利用出水温度、排气温度和机油温度传感器来检测发动机的状态参数;2 台 FCM05 型瞬态燃油消耗率测量仪分别对柴油和甲醇消耗量进行测量。

裂解气的成分用 SP-3420A 型气相色谱仪热导和定量泵两种方法进行在线检测。色谱仪装有 TCD 检测器、六通进样阀和 Porapak Q 柱,取样管用直径 3mm 的不锈钢管。为保持未裂解的甲醇仍为蒸汽状态,钢管及六通进样阀用加热带加热到 100℃。测量前,将色谱仪的柱温设置为 110℃,进样器为 130℃,检测器为 170℃,灯丝温度为 200℃,载气用氩气。

2.2 试验内容

(1) 发动机标定

发动机的工作模式确定为:用汽油起动,待发动机排气温度上升至 320℃ 以上,然后转化到纯甲醇裂解气模式运行。

在汽油模式下,标定加热型氧传感器的输出与发动机空燃比的关系 MAP;标定发动机的负荷特性参数,包括转速、负荷、燃油消耗率、排气温度和常规气体排放量。

在切换模式下,标定甲醇的喷射脉宽,并保证切换过程发动机过渡平稳,转速、扭矩波动范围在许可范围以内。

在甲醇裂解气的模式下,标定发动机的负荷特性参数,获得甲醇在满足标定目标和约束条件下的喷射 MAP。

(2) 裂解气成分的检测

在完全裂解气状态下,保持发动机转速不变(2 000 r/min),改变发动机的负荷(从 35 N·m 到 75 N·m,间隔为 5 N·m;从 80 N·m 到 100 N·m,间隔为 10 N·m)共计 10 个工况,用色谱仪和定量泵分别检测每个工况下的裂解气成分。

(3) 发动机性能

在 2 000 r/min 和 3 500 r/min 两个转速下对负荷特性的燃料经济性进行试验。对裂解气发动机转

速 1 500 ~ 4 400 r/min 转速间隔为 500 r/min 的外特性进行试验,以考察该种燃料发动机的动力性。

3 试验结果及分析

3.1 发动机的标定试验

如图 1 所示,ECU 采集各个传感器信号,经过运算向甲醇喷嘴发出起喷信号和喷射脉宽,从而控制甲醇喷嘴定时定量地向裂解器内喷射甲醇。裂解器产生的富氢混合气经由裂解气输送管进入节气门前,随发动机进气进入发动机。

(1) 燃料切换过程的标定

发动机燃料的切换包括两种情况:一是起动后当排气达到一定温度时,从汽油模式向裂解气模式的过渡。二是在裂解气运行模式下,当排气温度低于一定温度时,从裂解气模式向汽油模式的过渡。在燃料的切换过程中,电控单元还要通过氧传感器监测排气中氧的体积分数,并对裂解器甲醇的喷射量进行调整,以保证燃料切换的平稳过渡。

通过反复标定试验,获得了影响裂解气电控发动机燃料平稳切换的两个关键控制变量,即废气中氧的体积分数和排气温度。

标定时,采用恒定两个变量中的一个,而对另一个变量进行调整的方法,得到了在燃料切换过程中这两个变量对发动机性能影响的数据。根据这些数据,确定切换过程最佳氧的体积分数和排气温度。

图 4 是汽油模式向裂解气模式切换过程中,发动机转速、扭矩、功率、排温和汽油消耗量随时间的变化曲线。由图可知,在切换过程中,汽油消耗量逐渐减少到零;排温降低 50 ~ 80℃;功率略有下降。整个燃油切换过程,发动机运行平稳,过渡时间短。在实车试验过程中,大约汽车行驶 500m 左右即可完成切换。

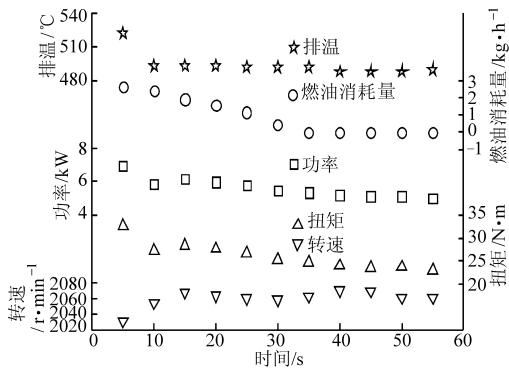


图 4 汽油模式向裂解气模式的切换曲线
Fig. 4 Transition from gasoline to rich hydrogen fuel

(2) 裂解气稳态工况下 MAP 的标定

除以上燃料切换过程标定,要保证裂解气发动机自动运行,还需要对使用单一裂解气发动机的甲

醇喷射脉宽进行标定,标定过程中,氧的体积分数和排气温度不再是关键的控制变量,而是作为开关量使用,即在自动运行中,当氧的体积分数降低到一定值以后,将在稳态运行输出的脉谱数据值的基础上减少一个单位,反之则增加一个单位的甲醇喷射脉宽;排气温度则用来监控发动机的运行工况,当排气温度降低到一定值,产生的裂解气不足以维持发动机平稳运行时,将会启动燃料切换程序,将单一的裂解气切换回纯汽油燃料工作,以保证发动机正常运行。

裂解气发动机的稳态运行 MAP 标定试验的目的仍然是得到不同负荷和转速组合下的甲醇喷射量。

(3) 应用神经网络优化脉谱

由于标定工作得到的数据非常有限,为了达到较好的控制性能,采用试验得到的数据作为神经网络的样本,经过训练和学习,得到了相应的模型,然后根据神经元模型扩大输入输出的数据点,并同原始试验数据一起作为存储在电控系统内部的控制脉谱。计算模型、公式及结果参见文献[12]中详细的分析和介绍。

3.2 裂解气成分的检测

图5给出了发动机转速为2000 r/min 负荷特性下的裂解气成分随排气温度的变化曲线。由图可以看出:在裂解气中, H_2 和CO的体积分数随排气温度增加(由负荷增加引起)呈现先减后增的趋势, H_2 和CO变化范围分别为23.3%~46%和11.6%~23%;而 CH_3OH 的体积分数变化趋势正好与上述两种相反,其变化范围为31%~65%;甲醇的裂解率(即裂解为氢气和一氧化碳的甲醇量占总甲醇量的百分比)随排气温度的升高先降低,当排气温度达到523℃时,裂解率出现最低值,然后随着排气温度的升高再逐渐升高,裂解率变化范围为17%~42.8%。

导致上述变化规律的主要原因是排气温度低于470℃左右时,催化剂表现出良好的活性,而当排气温度高于470℃左右时,催化剂的活性开始降低,

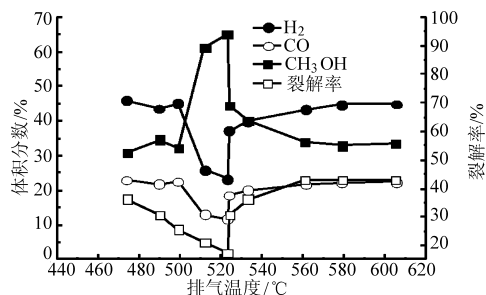


图5 2000 r/min 负荷特性下的裂解气成分的变化

Fig.5 Mixture compositions vs loads at 2000 r/min

从而使裂解率随着排气温度的升高而降低;但当排气温度大于523℃时,尽管催化剂的活性较低,但较高的温度又促使甲醇裂解率升高。

3.3 发动机的燃料经济性

文献[5]给出了不同转速负荷特性下甲醇的当量燃料消耗率和容积替换比。结果表明,发动机燃用完全裂解气时,甲醇的当量燃料消耗率较汽油明显降低,最大降低30.7%,最小降低14.3%。由此可以看出,利用废气余热将甲醇转换为裂解气燃烧,发动机的热效率更高。

3.4 裂解气发动机动力性

文献[6]给出了裂解气发动机与汽油机动力性的对比。结果表明,利用废气余热将甲醇裂解为裂解气使用,通过采用较稀混合气燃烧,发动机的动力性可以达到原汽油机的水平。

4 结论

(1)在SI电喷发动机上实现了甲醇裂解气作为燃料的应用,而且发动机运行平稳。

(2)设计的裂解器及电控系统,实现了起动后从纯汽油模式向完全裂解气模式的平稳切换及完全裂解气模式下的自动运行。

(3)裂解气中除含有 H_2 和CO外,还含有一定量的 CH_3OH 蒸汽,三者体积分数分别为:23.3%~46%、11.6%~23%和31%~65%。

(4)裂解气发动机燃料经济性好于汽油机,动力性与汽油机相当。

参 考 文 献

- George Aolah, Alain Goeppert, Surya Prakash G K. Beyond oil and gas: the methanol economy[M]. Berlin: WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, 2006.
- 汪硕峰,纪常伟,张擘,等. 稀燃纯氢发动机怠速燃烧与循环变动试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 12~15, 94. Wang Shuofeng, Ji Changwei, Zhang Bo, et al. Combustion and cycle-by-cycle variation of pure hydrogen-fueled spark ignition engine at idle and lean conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 12~15, 94. (in Chinese)
- Yao Chun-de, Cheung C S, Cheng Chuan-hui, et al. Reduction of smoke and NO_x from diesel engines using a diesel/methanol compound combustion[J]. Energy Fuels, 2007, 21(2): 686~691.

- 4 Pefley R K, Saad M A, Sweeney M A. Performance and emissions characteristics using blends of methanol and dissociated methanol as an automotive fuel[C]. SAE Paper 719008, 1971.
- 5 徐元利, 姚春德, 李旭聪. 废气余热制富氢气体对发动机性能的影响[J]. 汽车安全与节能学报, 2011, 2(2): 175 ~ 180.
Xu Yuanli, Yao Chunde, Li Xucong. Effects of hydrogen mixture generated from methanol dissociated by exhaust heat to engine performance[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2011, 2(2): 175 ~ 180. (in Chinese)
- 6 姚春德, 徐元利, 杨建军, 等. 甲醇裂解气对点燃式发动机性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 353 ~ 356.
Yao Chunde, Xu Yuanli, Yang Jianjun, et al. Effects of dissociated methanol on performance of SI engine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(2): 353 ~ 356. (in Chinese)
- 7 Adams T G. Fuel economy improvements through the use of dissociated methanol[C] // Methanol: An Alternate Fuel. Columbus, OH, USA, 1986: 75 ~ 79.
- 8 Takishita Tashio. Development research on dissociated methanol fueled spark engine[C] // Motor Vehicle Technology: Mobility for Prosperity, Third International Pacific Conference on Automotive Engineering. Jakarta, Indones, 1985: 193 ~ 205.
- 9 Finegold J G. Dissociated methanol vehicle test results[C] // Nonpetroleum Vehicular Fuels IV. Arlington, VA, USA, 1984: 213 ~ 228.
- 10 Adams T G. Comparison of engine performance using methanol or dissociated methanol as the fuel[C] // Proceedings—Society of Automotive Engineers. Vienna, Austria, 1984: 151 ~ 157.
- 11 Norman D B, Russell F S. A comparison of methanol and dissociated methanol illustrating effects of fuel properties on engine efficiency experiments and thermodynamic analyses[C]. SAE Paper 850217, 1985.
- 12 黄钰. 柴油-甲醇组合燃烧发动机的控制策略及试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.

(上接第 9 页)

发展为超空穴流动。总体来说在相同的边界条件下, 由于沿程压力损失, 数值模拟所得喷嘴内的空化程度均比试验稍显严重。

5 结束语

分析了喷嘴喷孔内流体的流动形态, 对空穴参数进行了阐述; 在搭建的比例放大多孔喷嘴内空穴

流动和喷雾的可视化试验台上, 开展了不同喷射压力下喷嘴内空穴流动的可视化试验。通过改变进口压力, 再现了喷孔内由单相湍流、部分空穴流到超空穴流时不同流动形态, 并得出了该放大模型喷嘴内空穴临界压力值。该试验研究为研究喷嘴内空穴两相流动提供了直接的手段。试验结果也很好地验证了所建喷嘴内空穴流动数值计算模型的准确性。

参 考 文 献

- 1 Roth H, Giannadakis E, Gavaises M, et al. Effect of multi-injection strategy on cavitation development in diesel injector nozzle holes [C]. SAE Paper 2005-01-1237, 2005.
- 2 文华, 姜水生, 魏明锐. 基于喷孔两相流场的柴油一次雾化模型[J]. 工程热物理学报, 2008(6): 1 069 ~ 1 073.
Wen Hua, Jiang Shuisheng, Wei Mingrui. A primary breakup model for diesel spray based on two-phase flow in injector nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008(6): 1 069 ~ 1 073. (in Chinese)
- 3 Stanley Cameron, Rosengarten Gary, Milton Brian, et al. Investigation of cavitation in a large-scale transparent nozzle [EB/OL]. F2008-SC-001, <http://www.fisita.com/students/congress/sco8papers/f2008sc001.pdf>
- 4 Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee. Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29(4): 1 001 ~ 1 009.
- 5 Masaaki Kubo, Takashi Araki, Shuji Kimura. Internal flow analysis of nozzles for DI diesel engines using a cavitation model [J]. JSAE Review, 2003, 24(3): 255 ~ 261.
- 6 Wang Xiang, Su Wanhua. A numerical study of cavitating flows in high-pressure diesel injection nozzle holes using a two-fluid model[J]. Chinese Science Bulletin, 2009(10): 1 655 ~ 1 662.
- 7 Palau-Salvador G, González-Altozano P, Ariza-Valve-rde J. Numerical modeling of cavitating flows for simple geometries using FLUENT V6.1[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2007, 5(4): 460 ~ 469.
- 8 何志霞. 高压载轨可喷射系统内部流动的数值模拟[D]. 镇江: 江苏大学, 2004.