

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.003

# 汽油/CNG 两用燃料发动机控制系统开发

葛晓成<sup>1,2</sup>, 徐中明<sup>1</sup>, 李静波<sup>2</sup>, 邹博文<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;  
2. 中国汽车工程研究院 国家燃气汽车工程技术研究中心, 重庆 400039)

**摘要:**使用 CNG (compressed natural gas) 为主燃料汽油为辅助燃料的 CNG/汽油两用燃料汽车具有良好的经济性和排放性能, 传统的在用车改装采用主从式双 ECU (electronic control unit) 系统, 性能不佳。通过对发动机燃烧和排放理论研究, 开发了面向 OEM (original equipment manufacture) 的单 ECU 多点顺序喷射的汽油/CNG 两用燃料控制方案。设计了  $\lambda$  非对称振荡 PI 控制算法等天然气特有的控制策略, 并进行了发动机台架性能和整车排放试验。结果表明: 两用燃料发动机采用单 ECU 控制时的性能优于采用主从式双 ECU 系统, 且排放低于国 IV 限值。

**关键词:** 汽油/CNG 两用燃料汽车; 控制策略; 发动机性能; 排放特性; 试验研究

中图分类号: U469.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)08-019-06

## Development of control system for a CNG/gasoline bi-fuel engine

GE Xiaocheng<sup>1,2</sup>, XU Zhongming<sup>1</sup>, LI Jingbo<sup>2</sup>, ZOU Bowen<sup>2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. China National NGV Engineering Technology Research Center, China Automotive Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** The CNG/gasoline bi-fuel vehicle using CNG as the primary fuel and gasoline as a secondary has good economy and emission performance, but the traditional bi-fuel engine uses master/slave dual ECU system cannot realize it. For improving the performance, the research with multi-point sequential injection based on single ECU which is designed for OEM is made. The CNG special control strategies are designed such as Lambda PI control logic of Non-symmetric oscillation, and also the experimental investigation for this bi-fuel engine and the emission test of vehicle are carried out. According to the experiment results, the performance of engine with single ECU is better than the engine with master/slave dual ECU, and the value of emission is less than euro IV emission levels when we use CNG fuel.

**Key words:** gasoline/CNG bi-fuel engine; control strategy; engine performance; emission characteristic; experimental investigation

天然气以其低污染性和良好的经济性成为目前最实用的汽车代用燃料, 目前国内天然气汽车大多采用主从式双 ECU 系统, 即在主 ECU 系统(汽油)的基础上增加一个从 ECU (CNG) 控制系统, 从 ECU 读取主 ECU 的喷射脉宽信号, 并通过相应补偿实现 CNG 燃料的喷射控制。由于从 ECU 仅“翻译”主 ECU 的喷射

收稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家 863 高技术资助项目(2012AA111718)

作者简介: 葛晓成(1985-), 男, 重庆大学博士研究生, 中国汽车工程研究院国家燃气汽车工程技术研究中心工程师, 主要从事汽车电子技术研究。

徐中明(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)xuzm@cqu.edu.cn。

信号,未考虑天然气理化特性,当发动机采用汽油控制逻辑燃用天然气时,出现发动机动力损失严重,尾气排放不达标等问题,不能充分发挥天然气清洁燃料的效能。

目前,国外在燃气汽车上已研制开发出单一燃料闭环多点顺序喷射电控技术,美国 Caterpillar3406 型火花点火增压中冷发动机,采用稀氧传感器和爆震传感器,空燃比闭环控制系统,其稳态排放  $\text{NO}_x$  在  $1.5 \text{ g/km}$  以下,热效率在  $36\%$  以上;本田公司 CIVIC GX 天然气汽车,其燃烧供给系统采用高质量集成调压器高精度多点喷射,其污染物排放量达到美国超低排放标准(ULEV)的十分之一,因此,国外对采用稀燃技术的燃气发动机视为今后的发展方向之一。目前,国内汽车 OEM 已全面介入天然气汽车市场,特别是汽油/CNG 两用燃料汽车更是成为当前技术与产品的推广重点。但主从式双 ECU 系统主要应用于在用车改造,面向 OEM 的两用燃料单 ECU 控制系统国内尚属空白。为弥补这一空缺,笔者通过利用国内 OEM 使用最广泛的两款汽油发动机 ECU 系统的软、硬件平台,与汽油发动机共用汽油系统中的传感器和执行器,同时增加 CNG 控制系统的专用传感器、执行器。在确保发动机使用汽油时各项性能指标保持原有状态的前提下,将 CNG 燃料控制策略和控制算法嵌入其中,实现 CNG/汽油两种燃料在发动机上的无缝切换<sup>[1-5]</sup>,形成了新的汽油/CNG 两用燃料单 ECU 控制系统。

## 1 控制系统总体结构

汽油/CNG 两用燃料发动机单 ECU 燃料供给及控制系统结构如图 1 所示。系统通过燃料切换继电器控制发动机不同燃料的来源,当使用天然气时,通过减压器保持燃气喷嘴前后的压差一定,实现通过喷射脉宽精确控制燃气的供给量。在过滤器上集成的气轨压力、温度传感器,用于 ECU 进行燃料喷射控制时的密度补偿计算。由于原汽油发动机 ECU 无法驱动流量较大的低压燃气喷嘴,所以本系统需加装一套峰值保持型燃气喷嘴驱动器。

系统的工作原理为:高压管路将 CNG 气瓶和减压器电磁阀相连,约  $20 \text{ MPa}$  的高压气体经过减压器后减压变为高于进气歧管压力  $200\sim 230 \text{ kPa}$  的低压燃气;低压燃气经过气体滤清器后进入气轨,并被分配到燃气喷嘴;ECU 根据发动机的负荷、转速、气轨压力和温度等参数计算在进气歧管处所需喷入的燃气量<sup>[6]</sup>。

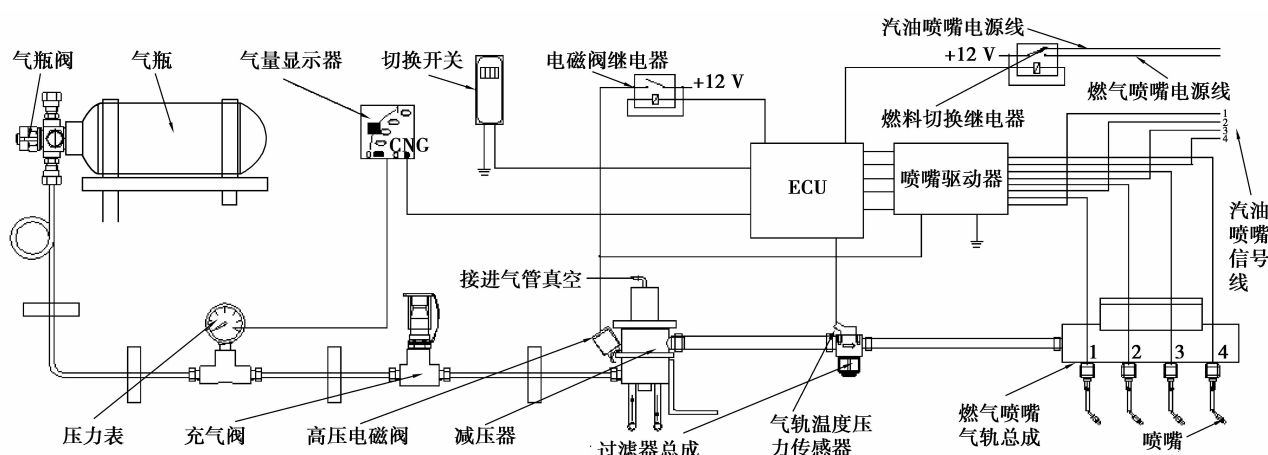


图 1 燃气供给及控制系统示意图

## 2 系统控制策略

在汽油机电控管理系统中,ECU 软件一般包括启动控制,闭环自学习控制策略、过度工况控制以及怠速控制策略等<sup>[5]</sup>。笔者所设计的两用燃料发动机单 ECU 控制系统不仅包括了这些控制策略<sup>[7]</sup>,同时针对 CNG 燃料理化特性采取了特有的控制策略,以提高排放水平,减少动力损失,实现车辆平稳运转。图 2 是两用燃料单 ECU 软件功能控制示意图。

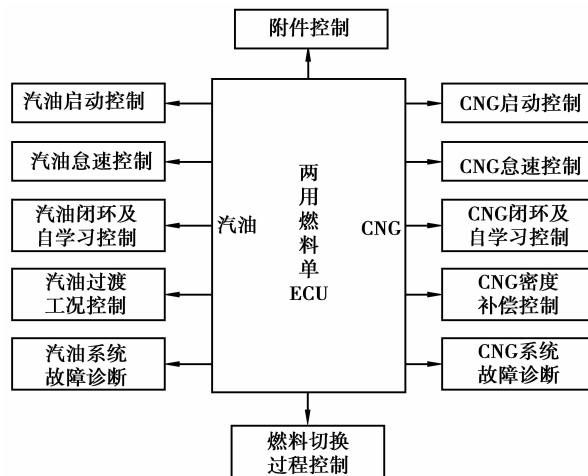


图 2 两用燃料单 ECU 软件功能控制示意图

### 2.1 λ 非对称振荡 PI 控制算法

由于天然气的主要成分为  $\text{CH}_4$ , 发动机原始排放中未燃烧的  $\text{CH}_4$  含量约占 HC 排放的 90%<sup>[8]</sup>, 在常规汽油催化器中氧化困难, 也很难与  $\text{NO}_x$  进行还原反应。因此, 若空燃比控制不精确, 将严重影响整车的排放性能。研究表明<sup>[9]</sup>, 当空燃比为 0.98~0.99 (即混合气稍偏浓) 时, 催化器的综合转化效果最好, 系统在 CNG 状态下, “闭环及自学习” 控制策略中采用了“λ 非对称振荡 PI 控制算法”。

在空燃比闭环控制过程中, 以开关型氧传感器信号作为反馈信号, 采用 PI 控制策略<sup>[10]</sup>, 其离散形式的控制方程表示为

$$u(n) = K_p \left( e(n) + \frac{t}{t_i} \sum_{i=0}^n e(i) \right) + u_0, \quad (1)$$

式中:  $u$  为被控对象的控制量;  $e$  为偏差;  $K_p$  为比例系数;  $t_i$  为积分时间常数,  $t$  为系统采样时间。

闭环控制过程如图 3 所示, 在  $\lambda < 1$  时, 氧传感器信号输出高电压, 指示混合气为浓, ECU 接收到此信号后, 首先使燃料喷射量闭环修正骤降一个  $P_R$  值 (即混合气浓时的比例控制), 然后以速率  $I_R$  (即混合气稀时的比例控制) 逐渐降低, 直到  $\lambda > 1$ , 即指示混合气为稀。在 ECU 接收到氧传感器信号为稀的信号后, 又会使修正先跃升一个  $P_L$  值, 然后以速率  $I_L$  逐渐上升, 增加燃料喷射量, 直到  $\lambda < 1$ ; 如此反复, 实现空燃比的精确控制。

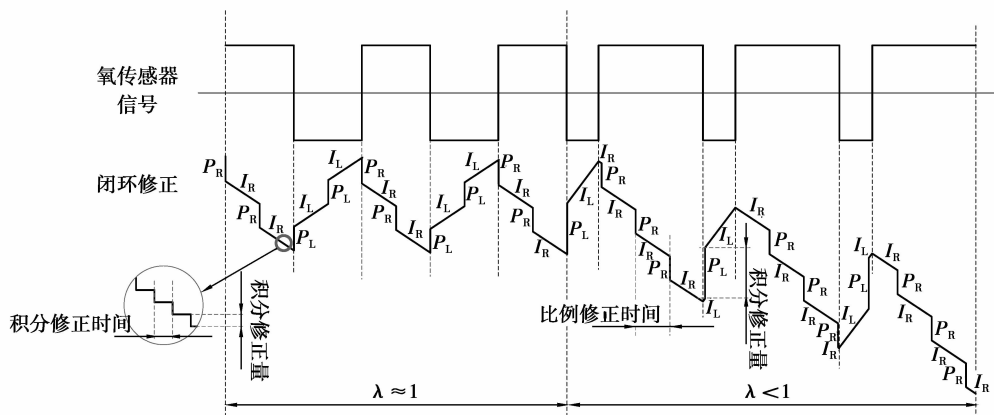


图 3 闭环空燃比控制过程

在汽油燃料的 PI 闭环控制策略中, 为达到  $\lambda \approx 1$  的控制目标, 采用相同的比例和积分控制量, 即  $P_R = P_L, I_R = I_L$ 。也就是在混合气为浓或者稀时, 采用对称 PI 控制策略, 如图 2 左边  $\lambda \approx 1$  部分所示。该算法可实现将空燃比的精确控制在 0.98~0.99 内, 使发动机的排放满足严格的排放法规要求。为实现天然气  $\lambda =$

0.98~0.99 的控制目标,需要在混合气为浓或者稀时,采用不同的比例和积分控制量,即:非对称控制。此时应调整浓/稀的控制参数,使其满足: $P_R < P_L, I_R < I_L$ 的关系,如图 2 右边  $\lambda < 1$  部分所示。通过读取排放仪的 Lambda 值来标定  $P_R, P_L, I_R, I_L$  等参数,实现控制目标。

## 2.2 密度补偿策略

燃料喷射时,天然气密度随压力和温度变化很大,为此引入了密度补偿控制策略,以精确控制喷射的燃气质量。补偿策略为基于理想气体方程对燃气喷射脉宽进行乘积修正<sup>[11]</sup>,其修正系数按式(2)计算得

$$k = \frac{P_0}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_0}, \quad (2)$$

式中: $P_0, T_0$ 分别为补偿基准点所对应的燃气喷射压力和温度,其值可通过试验确定。当发动机暖机后,在正常工作状态下,测试减压器的工作压力范围, $P_0$ 取中间值, $T_0$ 取当前气轨温度。而  $P_1, T_1$ 为气轨压力温度传感器的测量值。

## 2.3 切换控制策略

作为 CNG/汽油两用燃料发动机,在控制算法中必须保证燃料切换过程的平顺性并减少尾气污染物排放。为此,在进行控制算法设计时,根据两种燃料理化特性差异,需要考虑以下两个因素:

### 1) 发动机平稳运转。

CNG 是气体燃料,当发动机由汽油切换到 CNG 时,由于 CNG 会占据一定的汽缸容积<sup>[4,12]</sup>,需增加节气门旁通阀的开度以提高发动机的输出扭矩,避免发动机转速下降,维持发动机现有转速。当发动机由 CNG 切换到汽油时,应减少进气量,减少发动机扭矩输出,避免转速升得过高。

同时,由于汽油与天然气燃料的抗爆性相差很大,为保证切换平顺性,控制系统通过修正点火提前角进行补偿,实现平稳切换。当发动机由汽油燃料切换到 CNG 燃料时,为提高发动机转速适当增加点火提前角,增加发动机的扭矩输出;当由 CNG 燃料切换到汽油燃料时,为了避免爆震,适当减小点火提前角。

### 2) 切换排放控制。

汽油是液体燃料,在喷射时存在“湿壁”效应<sup>[13]</sup>。当从汽油燃料转换到天然气燃料或从天然气燃料转换到汽油燃料时,引入补偿算法,使空燃比在切换过程中,始终维持在理论空燃比附近。

当发动机由汽油燃料切换到 CNG 燃料时,由于“湿壁”效应,进气管壁上有一层油膜,它会随空气蒸发而进入汽缸内燃烧,应适当减少 CNG 的喷射量,避免发动机转速上升太高;相反当发动机由 CNG 燃料切换到汽油燃料时,会先在进气管壁上建立一层油膜,而随空气一起进入燃烧室内的燃油相对变少了,应该加大燃油喷射量。

## 3 发动机台架试验

### 3.1 发动机功率扭矩试验

采用上述单一 ECU 两用燃料发动机电控系统和相应的控制策略,以某款排量为 1.6 L 发动机为对象,搭建试验台架,其布置方案如图 4 所示,进行台架基础标定及性能试验。

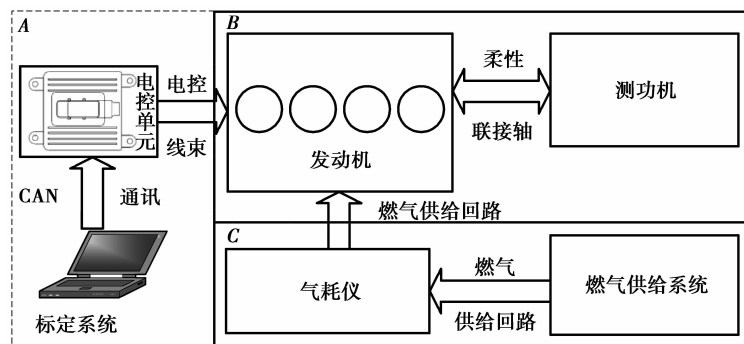


图 4 发动机试验台架布置

在实验室台架上进行总功率试验时,将发动机冷却液温度控制在  $80\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,机油温度控制在  $87\sim 97\text{ }^{\circ}\text{C}$  内,在油门全开状态下,依次改变转速进行数据测量。测试方法为转速、扭矩及排气温度值稳定  $1\text{ min}$  后进行,在保证扭矩及燃料消耗量相差都小于  $2\%$  的前提下,取两次连续测量的平均值为试验结果。

### 3.2 发动机性能指标对比

总功率试验时,环境温度为  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,大气压力为  $97.15\text{ kPa}$ ,使用的燃料为市售车用天然气。按国家标准计算出校正系数  $\alpha$  为  $1.006^{[14-15]}$ 。校正后发动机在不同转速下的功率、扭矩如图 5 所示。

在试验用发动机上,分别采用单 ECU 和主从式双 ECU 控制,分别以汽油和 CNG 为燃料,进行了功率和扭矩试验,结果如表 1 所示。采用单 ECU 控制发动机使用 CNG 燃料额定功率比使用汽油下降  $12.9\%$ ,最大扭矩下降  $12.8\%$ ,而采用主从式双 ECU 控制的发动机使用 CNG 燃料额定功率比使用汽油则下降  $23.8\%$ ,最大扭矩下降  $29.8\%$ 。采用单 ECU 控制的两用燃料发动机燃用天然气时的动力性优于采用主从式双 ECU 控制的两用燃料发动机燃用天然气时的性能。

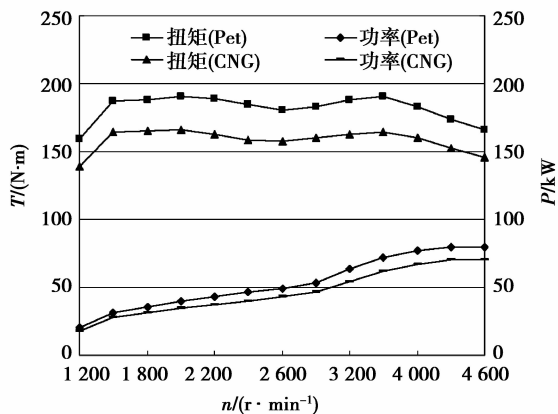


图 5 发动机特性曲线

表 1 采用两种方案的发动机性能对比

控制系统	燃料	最大扭矩/(N·m)	额定功率/kW	下降/%
单 ECU	汽油	190.60	79.99	12.8
	CNG	166.23	69.62	12.9
双 ECU	汽油	134.80	72.40	29.8
	CNG	94.60	55.20	23.8

## 4 整车排放试验

在安装单 ECU 电控系统的两用燃料汽车基础上,采用新鲜的天然气专用催化器,按照《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》第 IV 阶段要求,使用 CNG 燃料进行了 ECE+EUDC 的国 IV 排放 I 型试验。

在稳态工况点上,通过对前述的“ $\lambda$  非对称振荡 PI 控制算法”中的积分和比例项的反复调整以及 HC 和  $\text{NO}_x$  平衡优化标定,最终使车辆排放污染物中的 HC、 $\text{NO}_x$  和 CO 指标达到国 IV 限值的  $40\%$ ,其中, HC: $0.052\text{ g/km}$ ,为限值( $0.16$ )的  $32.63\%$ ;  $\text{NO}_x$ : $0.043\text{ g/km}$ ,为限值( $0.11$ )的  $39.35\%$ ; CO: $0.575\text{ g/km}$ ,为限值( $2.27$ )的  $25.33\%$ 。图 6 为试验数据曲线。

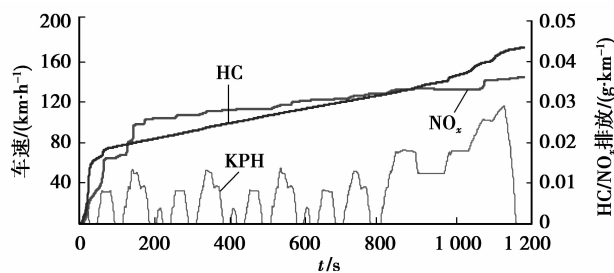


图 6 排放试验数据

## 5 结 论

笔者开发的单 ECU 两用燃料发动机控制系统采用多点顺序喷射的控制策略,根据汽油和 CNG 两种燃料不同理化特性,加入补偿算法,与主从式双 ECU 发动机控制系统相比,具有如下优点:

1) 系统在对发动机燃料喷射上实现了完全的无缝式控制,无需汽油喷射仿真器;对汽油和 CNG 具有单独的点火正时控制策略,可提高发动机效率和燃料经济性,降低热负荷,无需主从式系统中的硬件点火提

前器。

2) 系统在软件层面上共享传感器信号, 无需增加额外的传感器, 减少系统间的耦合和电磁干扰, 降低了成本。

3) 燃气喷射脉宽是根据 CNG 燃料特性和发动机运行工况直接计算, 瞬态控制精度更高, 系统具有更加优良的排放性和燃料经济性。

4) 由于其集成特性, ECU 可以确定最佳的切换时刻。ECU 还能通过对怠速空气量和点火提前角的控制实现汽油和 CNG 两种燃料的平顺切换。完全集成式的诊断系统, 无需两个不同的诊断仪, 使用常规的汽油诊断仪就可读出故障码。

#### 参考文献:

- [1] Huang Z. Current status and prospects of low emission vehicles in China[J]. JSAE, 2000; 27-30.
- [2] 葛晓成. 基于双向工程的汽油/CNG 两用燃料汽车燃气系统匹配研究[D]. 成都: 西华大学硕士学位论文, 2009.
- [3] Economides M J, Wood D A. The state of natural gas [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2009, 1(1/2): 1-13.
- [4] 王绍铤, 夏群生, 李建秋, 等. 汽车电子学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 9-113.
- [5] Shamekhi A H, Khatibzadeh N, Shamekhi A. A comprehensive comparative investigation of compressed natural gas as an alternative fuel in a Bi-fuel spark ignition engine [J]. Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering: International English Edition, 2008, 27(1): 73-83.
- [6] 李静波, Post J W, 陈本林, 等. 蒙迪欧汽油/CNG 两用燃料出租车开发[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2007, 26(1): 18-21.
- LI Jingbo, Post J W, CHEN Benlin, et al. The development of the system for gas/CNG dual fuel used in mendeo taxi [J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2007, 26(1): 18-21.
- [7] 李建, 秦大同, 韩维建. 燃油品质特性对车辆排放性能的影响[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(7): 5-8.
- LI Jian, QIN Datong, HAN Weijian. Investigation on effects of fuel properties on vehicle emissions [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(7): 5-8.
- [8] Corbo P, Gambino M, Iannaccone S. Methane dedicated catalysts for heavy-duty nature gas engine [C]. SAE Papers, 1996, 961087: 1112-1118.
- [9] 马凡华, 许忠厚. 天然气发动机专用催化转化器的研究与发展[J]. 车用发动机, 2000, 1: 1-3.
- MA Fanhua, XU Zhonghou. Research and development of dedicated catalytic converters for natural gas engine [J]. Vehicle Engine, 2000, 1: 1-3.
- [10] 陈建明. 自动控制理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 176-198.
- [11] 邹博文, 李静波, 陈本林, 等. 基于状态观测器的天然气发动机控制策略研究[J]. 汽车技术, 2008, 8: 5-8.
- ZOU Bowen, LI Jingbo, CHEN Benlin, et al. Research of natural gas engine control strategy based on state observer [J]. Automotive Technology, 2008, 8: 5-8.
- [12] 彭忆强, 黎薇, 李静波. 基于快速控制原型技术的压缩天然气直喷发动机控制[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(2): 218-221.
- PENG Yiqiang, LI Wei, LI Jingbo. CNG direct injection engine control based on rapid control prototype technique [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(2): 218-2
- [13] 邹博文, 吴锋, 杨志家. 电喷汽油机进气管燃油动态模型及补偿的仿真[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 423-429.
- ZOU Bowen, WU Feng, YANG Zhijia. A simulation on fuel dynamic model and its compensation for the intake manifold of an EFI gasoline engine [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 423-429.
- [14] 东风汽车工程研究院. GB/T18297—2001 汽车发动机性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [15] 东风汽车工程研究院, 中国汽车技术研究中心. GB/T17692—1999 汽车用发动机净功率测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.