

天然气发动机宽域氧传感器控制系统*

冒晓建¹ 宋君花² 王都² 张斌² 王俊席¹ 卓斌¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海海能汽车电子有限公司技术中心, 上海 200240)

摘要: 研究了基于电控调压器的增压单燃料 CNG 发动机电控系统, 在分析宽域氧传感器的结构和工作原理的基础上, 设计了以 MPC561 为主芯片的宽域氧传感器控制系统, 采用 CJ125 芯片设计了宽域氧驱动电路以及加热电路。设计了基于自适应算法的空燃比闭环控制器, 对氧传感器加热温度进行闭环控制和对空燃比进行闭环控制。通过在天然气发动机试验台架上的空燃比闭环试验, 验证了所设计的空燃比自适应闭环控制算法可以实现对空燃比的快速、精确瞬态控制, 为发动机空燃比智能控制、提高发动机的经济性和改善排放提供了条件。

关键词: 天然气发动机 宽域氧传感器 控制系统

中图分类号: TK432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)01-0001-05

Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor Control System for CNG Engine

Mao Xiaojian¹ Song Junhua² Wang Du² Zhang Bin² Wang Junxi¹ Zhuo Bin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Technology Center, Shanghai High Energy Automotive Electronic Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: The control system of boost CNG Engine based on electronic pressure regulator was studied. The structure and working principle of universal exhaust gas oxygen sensor were analyzed. Based on the main chip MPC561 and integrated CJ125, universal exhaust oxygen sensor control circuit and heater circuit were designed. Based on adaptive algorithm, the A/F ratio closed controller was designed and its control strategy of air-fuel closed loop was discussed. The CNG engine experiments of air-fuel ratio closed loop on bench test showed that the dynamic response of UEGO control system was rapid and accurate. Based on UEGO control system, the intelligent control of engine's air-fuel ratio could be achieved, and the performance of economy and emission could be improved.

Key words: Natural gas engine Universal exhaust gas oxygen sensor Control system

引言

天然气发动机研究中的一个重要问题是如何在保证发动机动力性能和经济性能的前提下, 尽量降低发动机的有害排放物, 以满足日益严格的排放法规的要求。发动机的排放性能与其工作时的空燃比有密切的关系。氧传感器是汽车发动机电控系统的核心部件之一, 用于检测发动机排出废气中氧的含量, 对发动机的废气排放进行检测, 然后将废气排放中的氧含量转化为电信号, 反馈给电控单元 (ECU), 使其修正进入发动机混合气的空燃比, 达

到改善排放质量的目的^[1]。

本文开发一套适合增压天然气的宽域氧传感器控制系统, 以实现氧传感器加热温度和空燃比进行闭环控制。

1 CNG 发动机系统

CNG 发动机是针对天然气燃烧特性专门开发的天然气单燃料发动机, 此发动机配有增压中冷, 采用过量空气系数大于 1 的稀薄燃烧方式。天然气供给采用电控调压器, 与单点喷射不同的是, 天然气是连续进入气缸的, 其具有燃料供给响应性能高、各缸

混合气浓度均匀性好,有利于发动机采用稀薄燃烧方式,且更易于实现 LPG、CNG 和 LNG 电控系统通用等优点^[2-3]。CNG 系统的基本结构如图 1 所示。

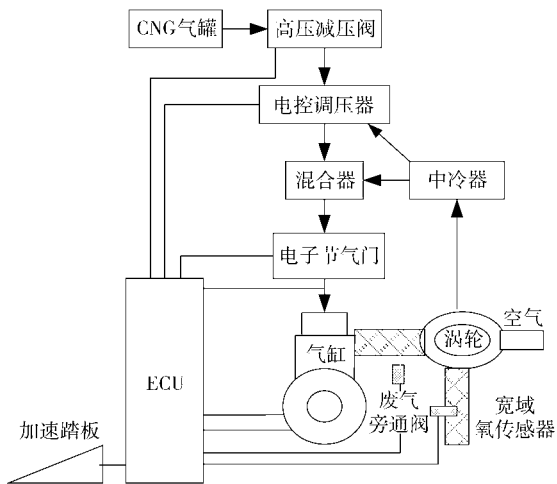


图 1 CNG 发动机电控系统结构图

Fig. 1 Structure of CNG engine

其中,宽域氧传感器用于空燃比的闭环控制,一般安装在排气管内,用于监测发动机控制系统的燃气供给精确度。它监测排气中的氧气成分,其监测方式比一般的氧传感器更准确。根据氧传感器的反馈信号,通过闭环反馈来进一步修正进气量,以实现燃气经济性和动力性目标以及排放法规要求。图 2 为过量空气系数对发动机排放的影响。由图可以看出,采用稀薄燃烧的发动机 NO_x 的排放得到了极大改善。但 HC、CO 排放量有所上升,本系统采用了氧化型催化技术,可以使 HC、CO 排放量达到比较低的水平。

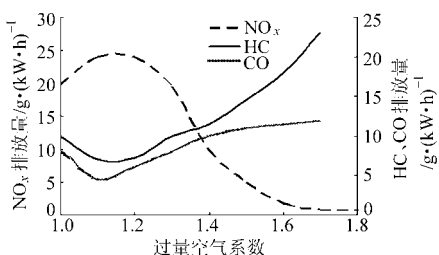


图 2 尾气排放量与过量空气系数的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between emission and AFR

2 宽域氧传感器的结构和工作原理

氧传感器按工作原理分类^[4],用于空燃比控制的氧传感器是其中一类。按其应用可分为理论空燃比传感器和稀薄空燃比传感器。理论空燃比传感器属于 ON-OFF 开关型传感器,用于三元催化系统。对于稀薄燃烧系统,稀薄空燃比传感器可将尾气的空燃比控制在较广的稀薄范围内(10~23)。电化学泵型氧传感器的输出信号是线性渐变的,能够连续地检测出尾气中的氧含量,故可应用于稀薄燃烧

发动机。这种能连续地检测出尾气中氧含量的传感器称为宽域型氧传感器(UEGO)。

目前常用的宽域型氧传感器^[5]是在氧化锆型氧传感器的基础加以改进而产生的。宽域型氧传感器主要包括含氧感应室、含氧加压室和一个加热组件,如图 3 所示。发动机的尾气经扩散孔,到达感应室与加压室之间。与废气接触的感应室比较尾气与参考室之间的含氧量后,产生电压信号传送给 ECU。参考室的含氧量是根据 ECU 的电压信号产生的,只要改变电压的大小,即可改变参考室含氧量。

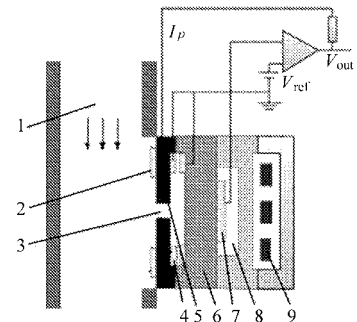


图 3 宽域氧传感器内部结构示意图

Fig. 3 Structure of UEGO

1. 排气管 2. 阳极 3. 氧传感器扩散孔 4. 阴极 5. 泵氧膜片
6. 氧传感膜片 7. 阳极 8. 参考室 9. 加热器 10. 检测室

传感器在 λ (过量空气系数或空燃比) 等于 1 时电压差约为 0.45 V。在 ECU 的强制作用下,使感应室的电压信号一直保持在 0.45 V 附近。ECU 会传送一个信号到加压室作为尾气中含氧量的参考值,凭借改变电流大小及方向来改变感应室的输出,并且由这个泵电流 I_p 可得到与 λ 的相对图。CNG 发动机电控系统中选用 BOSCH 公司的 LSU4.2 宽域氧传感器,其测量量程如图 4 所示为 0.65~2.5,完全可以满足 CNG 发动机稀燃的要求,而且在稳定性、频率响应特性、精度等方面都比较好。

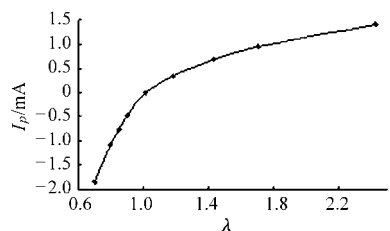


图 4 宽域氧传感器输出特性

Fig. 4 Output characteristic of UEGO

3 宽域氧传感器驱动电路设计

宽域型氧传感器控制模块除了氧传感器外,还有一套控制电路,主要包括加热控制电路、泵电流控制电路、泵电流检测电路。加热控制电路的作用是给氧传感器加热,使其尽快进入 750℃ 的工作温度,这样可改善启动时氧传感器的工作状况。加热

控制电路中含有测温部分,可检测氧传感器的温度,以方便温度的闭环控制。泵电流控制电路的作用是调节泵电流的大小,它根据感应室电压差与 0.45 V 的偏移量来进行闭环控制。泵电流检测电路是将泵电流(放大后)输入电控发动机 ECU,是用于控制空燃比的重要参数。

本文宽域氧传感器驱动电路如图 5 所示,采用智能芯片 CJ125,此芯片是 BOSCH 公司开发的专门用于宽域氧传感器的控制。采用集成芯片方案,可以简化电路设计,提高 ECU 硬件的可靠性。控制系统选用 Freescale 公司的 32 位微处理器 MPC561,它内部集成有多个智能模块:3 个符合 CAN2.0B TouCAN 模块,32 路队列式 AD 转换器 QADC,32 路定时器处理单元 TPU。选用此微处理器,可节省大量外围电路的设计工作。

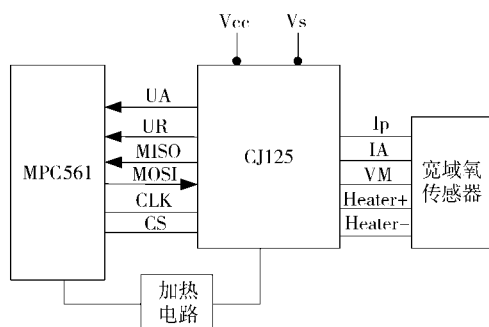


图 5 宽域氧传感器驱动电路原理图

Fig. 5 Circuit of UEGO driver

4 空燃比闭环软件设计

为了实现稀薄燃烧 CNG 发动机空燃比的精确控制,通过采集氧传感器的电压信号,转译为实际空燃比,可对燃气供给量作进一步修正,通过电控调压器实现空燃比的闭环控制^[6-7]。图 6 所示为空燃比闭环控制过程图。其中, V 为宽域氧传感器驱动芯片输出电压。

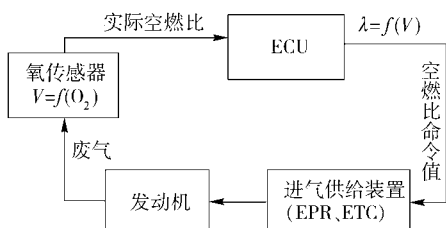


图 6 空燃比闭环控制过程图

Fig. 6 Process of A/F ratio closed loop

4.1 氧传感器加热闭环控制

在宽域氧传感器工作过程中,传感器温度的变化将导致排气在进出检测室过程中扩散速度的变化,进而影响泵氧膜的泵电流,因此对氧传感器温度的实时控制和监测是非常必要的。由于氧传感器

膜片内阻阻值随着温度的变化而变化,可以通过测量氧传感膜片的内阻阻值来监测传感器的温度变化。氧传感器膜片在低温下有很高的阻抗,在正常工作温度下的阻值为 80 ~ 100 Ω。

氧传感器加热器使能后,为防止加热速度过快而导致 UEGO 陶瓷热应力过大,氧传感器初始加热电流受其加热功率限制而不能过大(此阶段称为冷态预热),当温度达到目标值后,采用 PID 闭环控制温度。氧传感器加热闭环控制原理图如图 7 所示。加热控制器的选择由 UEGO 的实际温度决定。

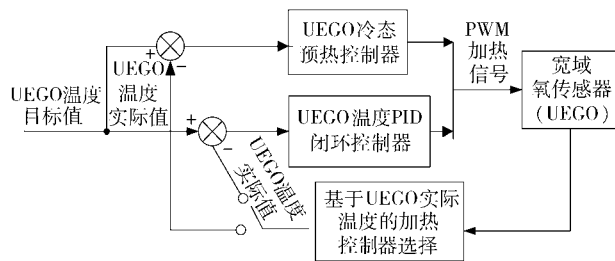


图 7 氧传感器加热闭环控制原理图

Fig. 7 Schematic of heating closed control of UEGO

4.2 空燃比闭环控制

CNG 发动机的动力性、经济性和排放性与其空燃比的控制密切相关,本系统是基于宽域氧传感器对空燃比进行闭环控制的;空燃比闭环控制可以使得氧化型催化器效率更高,降低排放以满足日益严格的排放法规。闭环控制在稳态工况下可以达到较高的精度。但是,瞬态工况时其闭环控制响应过慢,控制精度不高^[8-9]。

本文在空燃比闭环控制的基础上建立了空燃比闭环的自适应算法模型,以改善空燃比闭环控制的不确定性和滞后性^[10]。图 8 为空燃比自适应的控制过程。

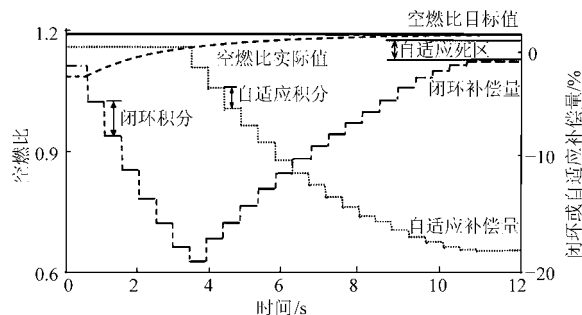


图 8 空燃比自适应控制过程示意图

Fig. 8 Schematic diagram of A/F ratio adaptive control

图 9 为空燃比自适应闭环控制模型,包括空燃比闭环控制模块和空燃比自适应模块两部分。

空燃比闭环控制模块是以空燃比目标值为控制目标通过闭环积分器来计算燃气喷射量的闭环补偿系数,使得空燃比趋向于空燃比目标值。

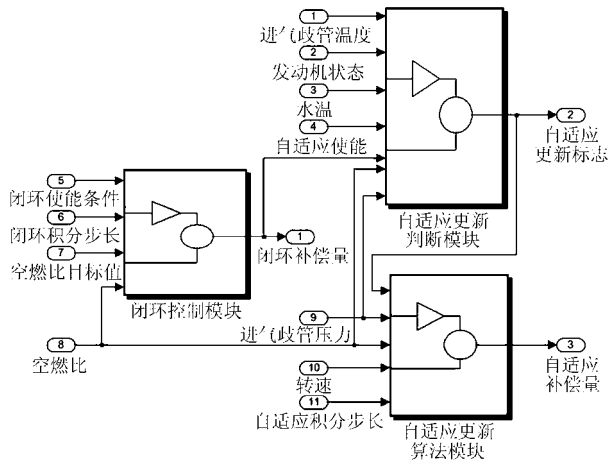


图9 空燃比自适应闭环控制模型

Fig.9 Closed loop model of A/F ratio adaptive

空燃比自适应模块是以自适应死区值为控制目标来计算燃气喷射量的自适应补偿系数,使得闭环补偿系数趋向于自适应死区。

空燃比自适应模块的自适应积分量通过在稳态工况时的闭环控制的闭环积分量来获取,自适应脉冲的更新需满足更新使能条件。

5 天然气发动机台架试验

为了验证所设计的基于模型的PID控制宽域氧传感器的实际控制效果,将设计的CNG ECU控制系统在CNG发动机台架上进行实际性能测试,以验证空燃比闭环控制策略。图10、11所示为台架试验中空燃比闭环采集数据。

由图10可见瞬态加速工况空燃比闭环控制自适应算法不使能时,空燃比的实际值与其目标值跟随性较差,最大差值有0.2,波动变化大,收敛时间需要13 s。

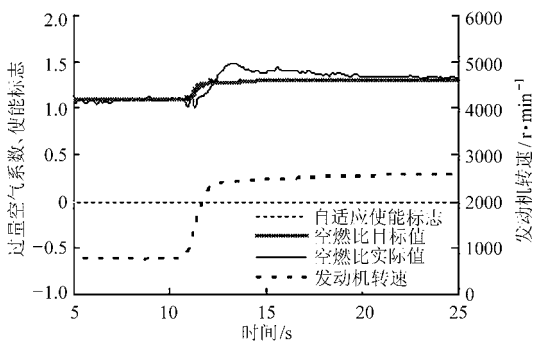


图10 自适应不使能时的瞬态加速空燃比

Fig.10 A/F ratio control of transient acceleration without adaptive algorithm

由图11可见,当空燃比闭环控制自适应算法使能时,瞬态加速到2500 r/min,空燃比的实际值与其目标值跟随性好,波动小,最大差值为0.06,可以在3.6 s内达到收敛。由此,空燃比自适应算法在CNG

发动机瞬态控制中具有比较明显的效果。空燃比闭环控制台架试验的效果如图12所示,空燃比实际值与目标值的跟随性良好,空燃比控制精度高,稳定性好。台架试验验证了基于模型的空燃比闭环控制策略是有效的。

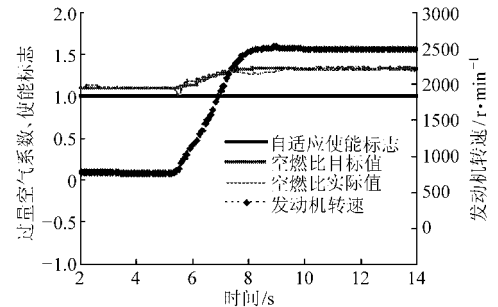


图11 自适应使能时的瞬态加速空燃比

Fig.11 A/F ratio control of transient acceleration with adaptive algorithm

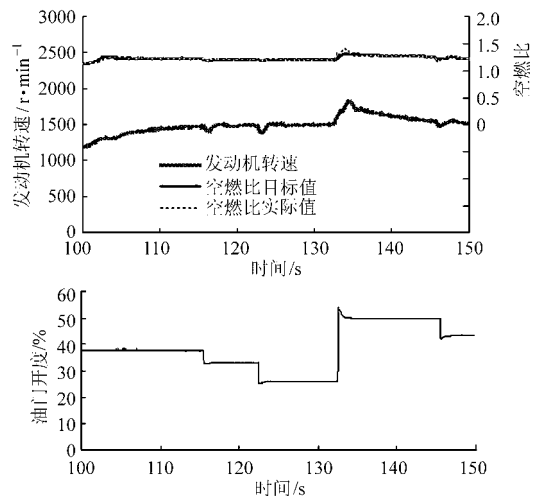


图12 CNG台架试验中空燃比闭环控制效果

Fig.12 A/F control performance of CNG bench test

6 结论

(1)分析了基于电控调压器的CNG发动机电控系统结构以及宽域氧传感器的结构和工作原理。

(2)基于MPC561和CJ125芯片设计宽域氧传感器的驱动电路以及加热电路,采用集成芯片方案可以大大提高系统的可靠性。

(3)分析了空燃比闭环控制的原理。基于模型建立了空燃比闭环自适应控制模型。

(4)设计的宽域氧传感器控制系统成功应用于CNG单燃料发动机。在CNG发动机台架上进行了空燃比闭环试验,试验结果表明应用空燃比自适应算法的宽域氧传感器控制瞬态超调量小,收敛时间短,空燃比动态响应性好,可以实现CNG发动机的空燃比瞬态精确控制,为CNG增压稀燃发动机的燃料闭环控制、修正以及排放控制提供了基础。

参 考 文 献

- 1 刘兴华,陈永义,李铁栓. 天然气发动机多点顺序喷射技术的开发研究[J]. 内燃机工程,2004,24(3):16~19.
Liu Xinghua, Chen Yongyi, Li Tieshuan. Development of an electronically controlled multi-point sequential injection CNG engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004,24(3):16~19. (in Chinese)
- 2 王都,宋君花,冒晓建,等. 基于电控调压器的压缩天然气发动机电控系统[J]. 农业机械学报,2009,40(3):46~50.
Wang Du, Song Junhua, Mao Xiaojian, et al. Design and experiment on the electric control system based on EPR for CNG engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):46~50. (in Chinese)
- 3 Wang J X, Song J H, Mao X J, et al. Development of an electr-onic control unit for a compressed natural gas engine based on circuit simulation and model [J]. Proc. I MechE, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2009,223(10): 1 341~1 350.
- 4 何锐,刘光葵,孙尧卿. 氧传感器及其在汽车中的应用[J]. 传感器技术,1999,18(3):1~4.
He Rui, Liu Guangkui, Sun Yaoqing. Oxygen sensors and its application in automobile [J]. Journal of Transducer Technology, 1999,18(3):1~4. (in Chinese)
- 5 关顺贤. 详解汽车宽带型氧传感器[J]. 辽宁科技学院学报,2005,7(3):7~8.
Guan Shunxian. A detailed description of wide-range oxygen sensor[J]. Journal of Liaoning Institute of Science and Technology, 2005,7(3):7~8. (in Chinese)
- 6 Gregory E Mott, Christopher M Atkinson, Nigel N Clark, et al. Closed-loop engine control for turbocharged lean-burn natural gas engine operation[C]//The 17th Annual Fall Technical Conference of the ASME International Combustion Engine Division, 1995, 2: 85~92.
- 7 Wang Du, Mao Xiaojian, Wang Junxi, et al. Experimental study on the operating range restrictions of lean-burn turbocharged SI natural gas engine[J]. Energy Fuels, 2009, 23(6): 3 054~3 062.
- 8 李国岫,张欣,夏渊,等. 电控喷射天然气发动机空燃比控制策略的研究[J]. 内燃机学报,2004,22(5):456~461.
Li Guoxiu, Zhang Xin, Xia Yuan, et al. Research on air fuel ratio control strategy of an electronically controlled injection CNG engine[J]. Transactions of CSICE, 2004,22(5):456~461. (in Chinese)
- 9 陈林林,孙仁云,吴本成,等. 天然气发动机空燃比控制策略的研究与仿真[J]. 电子科技大学学报,2007,36(2):294~298.
Chen Linlin, Sun Renyun, Wu Bencheng, et al. Control strategy simulation for CNG engine air-fuel ratio[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2007,36(2):294~298. (in Chinese)
- 10 于秀敏,钱耀义,李国良,等. 多点喷射汽油机自适应控制系统[J]. 吉林工业大学自然科学学报,1999,29(4):17~22.
Yu Xiumin, Qian Yaoyi, Li Guoliang, et al. Adaptive control system for multi-point fuel injection engine[J]. Journal of Jilin University of Technology: Natural Sciences, 1999,29(4): 17~22. (in Chinese)