

文章编号: 0258-2724(2010)02-0218-04 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2010.02.010

基于快速控制原型技术的 压缩天然气直喷发动机控制

彭忆强¹, 黎薇^{1,2}, 李静波²

(1. 西华大学交通与汽车工程学院, 四川 成都 610039; 2. 中国汽车工程研究院国家燃气汽车工程研究中心, 重庆 400039)

摘要: 为提高压缩天然气发动机的性能, 采用快速控制原型技术实现了压缩天然气发动机的缸内直接喷射. 根据实际应用要求, 测试了直喷喷嘴的流量特性, 设计了压缩天然气直喷发动机燃气供给系统, 制定了缸内直接喷射天然气的控制策略. 结果表明: 采用缸内直接喷射天然气的方式, 压缩天然气发动机的输出扭矩可以达到同类汽油发动机的输出水平, 当转速为 2 500 r/min 时, 功率损失为 0.006%, 基本与汽油发动机相同.

关键词: 压缩天然气发动机; 缸内直接喷射; 发动机电子控制; 快速控制原型

中图分类号: U464.174 文献标识码: A

CNG Direct Injection Engine Control Based on Rapid Control Prototype Technique

PENG Yiqiang¹, LI Wei^{1,2}, LI Jingbo²

(1. School of Transportation and Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. National NGV Engineering Research Center, China Automotive Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: To improve the performance of compressed natural gas (CNG) engines, CNG in-cylinder direct injection was implemented with a rapid control prototype (RCP) technique. According to application requirements, the flow characteristics of the direct injector was tested, a gas supply system for the CNG direct injection engine was designed, and the control strategy for the CNG in-cylinder direct injection was made. The experiment results show that the output torque of the CNG in-cylinder direct injection engine could reach the output level of a gasoline engine of the same kind. At the rotational speed of 2 500 r/min, the power loss of the CNG in-cylinder direct injection engine compared with the gasoline engine was only 0.006%.

Key words: CNG engine; in-cylinder direct injection; engine electronics control; rapid control prototype

天然气汽车作为新能源汽车之一, 在我国的推广应用越来越受到重视. 以压缩天然气 (compressed natural gas, CNG) 为燃料的发动机与汽油发动机相比, 其一氧化碳、碳氢的排放会大幅度下降; 与柴油发动机相比, 基本没有颗粒物排放^[1]. 但是, 目前使用的天然气发动机多为汽油机

改装的两用燃料发动机或柴油机改装的单燃料发动机, 在进气道处进行天然气喷射, 存在一些缺陷, 如: 发动机的充气效率下降、平均有效压力降低、动力性下降 (15% 左右)、排放性能维持在原车的水平^[2]. 为克服天然气发动机的上述缺陷, 充分发挥天然气作为清洁能源的优势, 一些新的发动机控制

收稿日期: 2009-04-01

基金项目: 四川省教育厅重大培育资助项目 (07ZZ032); 国家 863 计划资助项目 (2006AA11A1B4)

作者简介: 彭忆强 (1963 -), 男, 教授, 博士, 研究方向为汽车电子控制, 电话: 028-87721135, E-mail: yqpeng@mail.xhu.edu.cn

通讯作者: 黎薇 (1982 -), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为发动机控制, 电话: 023-68653896, E-mail: liwei02@foxmail.com

技术(如电控多点顺序喷射技术、稀燃技术、缸内直接喷射技术)用于提高 CNG 发动机的性能。

文献[3]中研究了基于快速压缩燃烧装置的天然气直喷燃烧和排放特性;文献[4]中建立了 CNG 直喷发动机高压共轨系统的仿真模型.本文以在实际运行的天然气发动机上实现 CNG 缸内直接喷射燃烧为目的,进行 CNG 直喷发动机电控系统的关键技术研究.作者采用快速控制原型(rapid control prototype, RCP)技术,在一款车用汽油发动机上实现了天然气的缸内直接喷射燃烧, CNG 直喷发动机的输出功率达到汽油发动机的输出功率水平.

1 CNG 直喷发动机系统

CNG 缸内直喷发动机控制系统需要解决的主要技术问题包括:(1) 高压燃气供给系统;(2) 用于缸内直喷的专用喷嘴;(3) 专用的电控单元(electronic control unit, ECU)及相关的控制算法.

本文中,描述燃气供给系统的设计方案及专用燃气气体喷嘴的标定特性. ECU 使用 MACS565 汽车电控系统开发平台^[5],试验验证燃气供给系统设计方案的可行性、喷嘴的可靠性及 CNG 直喷发动机控制算法的有效性.

1.1 燃气供给系统

由于相同能量天然气的体积喷射量是汽油体积流量的 770 倍左右^[6],喷射时间极短,燃气供给系统需要一定的压力才能保证在短时间内喷入足够的 CNG. 因此,燃气供给系统必须保证 CNG 气体的体积供给. 对直喷喷嘴要求具有较高的喷射压力、较大的流量及较短的响应时间,喷嘴的整体性能要求比常用的进气道喷射喷嘴更高.

借鉴汽油机直喷技术,根据 CNG 气体燃料的特性,作者设计了一套压力稳定、性能安全可靠的燃料供给系统,如图 1 所示.

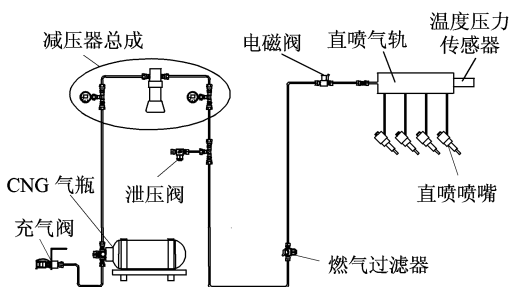


图1 燃气供给系统示意图
Fig.1 Schematic of the CNG supply system

燃料供给系统的气路全部采用 $\phi 8$ 天然气钢管,所有连接处采用双卡套连接.设计指标为高压端耐压 25 MPa,低压端耐压 3 MPa,以保证系统的耐压强度.高压 CNG 气体从 CNG 气瓶连接到减压器,减压器将高压气体减压到 1.9 MPa 的稳压气体,直接输送到直喷气轨.发动机工作时,电磁阀接收电控系统的开启信号控制燃料供给系统工作.

1.2 直喷喷嘴的流量特性

直喷喷嘴应满足喷射压力及流量特性的需要,使 CNG 发动机正常工作.发动机高负荷工作时,需要的燃料喷射量大;低负荷或怠速运行时,为了降低发动机的燃料消耗,喷射量应较小,但要求精确.为满足上述需求,喷嘴流量特性工作的动态范围要大,小流量段线性度要好.根据试验选用的发动机物理参数,计算出喷嘴流量所需范围为 $33.7 \sim 1\ 220.0\ \text{mg/s}$ ^[7].为了验证所用喷嘴的性能,专门设计了气体喷嘴流量标定试验系统,对所用直喷喷嘴进行流量特性标定试验.气体喷嘴流量标定试验系统如图 2 所示.

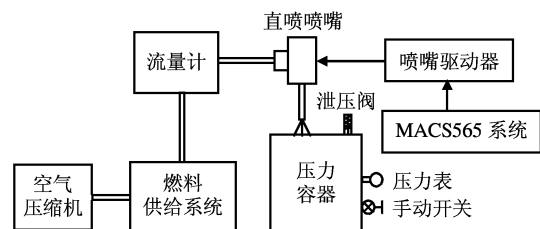


图2 气体喷射器流量特性测试装置
Fig.2 Test Equipment for the flow characteristics direct injector

直喷喷嘴流量特性统计测试结果如图 3 所示.在标定过程中,使用压缩空气作为试验气体.由于燃气在压缩冲程前期进行喷射,喷嘴在有背压的情况下工作,因此,采用压力容器模拟缸内背压.测试

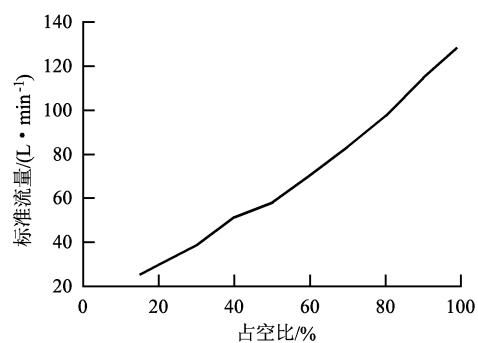


图3 喷射器流量特性
Fig.3 Flow characteristics of injector

过程中,背压的变化范围为:0.4~0.8 MPa.应用MACS565系统,模拟ECU向直喷喷嘴输出不同占空比的喷射脉宽,通过喷嘴驱动器控制气体喷射器的开闭,使用流量计读数与单次脉冲周期的乘积计算气体喷射量^[8],结果显示,背压变化对喷射器流量特性的影响很小.由图3可见,在喷嘴流量的需求范围内,所用喷嘴具有流量线性度好的特点,能够满足CNG发动机缸内直喷电控系统的要求.

2 CNG直喷发动机电控系统

文中所使用的CNG直喷发动机电控系统原型,以MACS565为目标系统,在Matlab/Simulink的环境下研发了CNG直喷发动机相应的控制功能模块,完成了从控制功能设计、代码自动生成、软/硬件在环仿真、系统测试及标定的整个V型开发流程^[9].

图4为RCP系统构成的CNG直喷发动机控制系统的结构.MACS565系统通过发动机曲轴位置信号和凸轮轴位置信号获得发动机转速和时序;利用转速和进气压力值查询脉谱图获得基本喷射脉宽和点火提前角;利用进气温度、冷却液温度和氧传感器信号计算脉宽修正量.节气门位置传感器信号用于确定加速、减速、怠速等瞬态工况,进行喷射脉宽的修正,控制燃料喷射量.为实现缸内燃料喷射的精确控制,加装了天然气轨温度压力传感器,用于计算燃料喷射量的实时密度补偿.

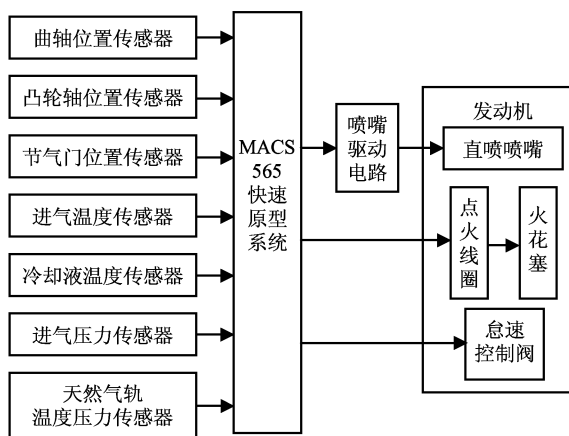


图4 CNG直喷发动机电控系统结构
Fig.4 Architecture of control system for CNG direct injection engine

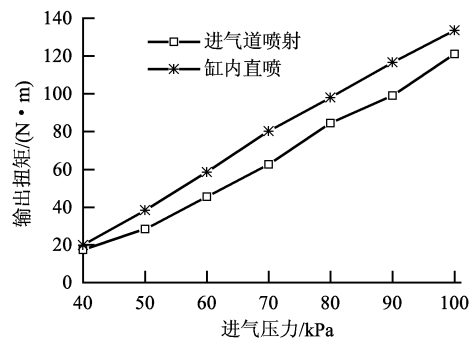
采用上述RCP系统,作者在短时间内建立了CNG直喷发动机控制系统,采用基于脉谱图的控制方式^[10],研制了发动机工况识别算法、怠速工况的PID闭环控制算法,完成了CNG直喷发动机一

些基本工况的控制,如:启动工况、怠速工况的控制和基础标定试验工作.

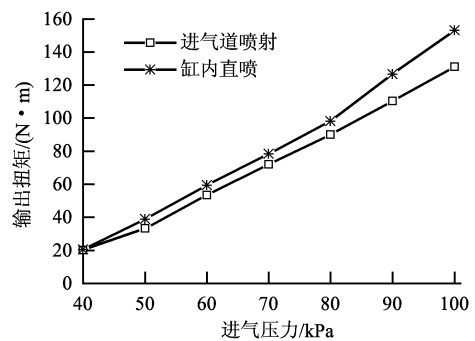
3 CNG直喷发动机试验

3.1 不同燃料喷射方式的发动机性能对比

为证实不同喷射方式对发动机性能的影响,在不同转速、负荷下进行天然气进气道喷射和缸内直接喷射性能试验,试验发动机转速分别为1500,2500 r/min,不同喷射方式对发动机性能的影响如图5所示.从图中可以看出,采用CNG缸内直接喷射方式,发动机的输出扭矩增大,提升了发动机性能.在低转速、低负荷的情况下,由于发动机输出扭矩较小,性能提升不明显.随着发动机负荷增大,缸内直接喷射方式通过调整喷射时刻,降低发动机的容积损失,输出较大扭矩.



(a) 1500 r/min



(b) 2500 r/min

图5 不同喷射方式对发动机性能的影响
Fig.5 Influence of different injection type on engine performance

采用缸内直接喷射方式,发动机输出动力性能上升的主要原因:

(1) 燃料不经进气道,直接喷入气缸,提升了发动机的充气效率;

(2) 燃料在进气冲程后期、压缩冲程早期喷射进入气缸,此时气缸内充满新鲜空气,不存在进气道喷射时缸内容积完全被可燃混合气充斥的情况.

在相同发动机排量的基础上,提高了空气的进气量,使发动机输出动力性能上升。

3.2 CNG 缸内直喷与发动机燃用汽油的性能对比

本文试验研究所采用的原型机为汽油发动机,为体现 CNG 缸内直喷发动机的优势,进行了发动机燃用 CNG 和汽油的性能对比试验。表 1 给出 2 种典型测试工况下,不同燃料及喷射方式的发动机输出扭矩对比。

由表 1 可见,在低转速的情况下,进气道喷射天然气较原汽油机有较大的功率损失;缸内直接喷射天然气的方式,发动机功率已经接近原汽油机水平。当转速为 1 500 r/min 时,功率损失 8%;当转速为 2 500 r/min 时,功率损失仅 0.006%,基本上与原汽油机相同。

表 1 不同燃料及喷射方式的发动机输出扭矩对比
Tab.1 Comparison of output torques of engines with different fuels and injection types

转速 (r·min ⁻¹)	扭矩/(N·m)		
	进气道 喷射汽油	进气道 喷射天然气	缸内 直喷天然气
1 500	145.1	121.0	133.5
2 500	154.4	131.0	153.3

4 结束语

采用 RCP 系统,实现了 CNG 直喷发动机的电子控制功能和缸内直接喷射燃烧。通过发动机试验,得到了 CNG 直喷发动机的基本控制参数。结果表明:采用缸内直接喷射方式,CNG 发动机的动力性较进气道喷射 CNG 发动机有明显提高,当转速为 2 500 r/min 时,功率损失仅 0.006%,基本上与原汽油机相同。

下一步工作将进行 CNG 直喷发动机的排放特性试验研究,参照文献[11-12]中的方法建立 CNG 直喷发动机的排放特性模型。

参考文献:

[1] 孙济美. 天然气和液化石油气汽车[M]. 北京:北京理工大学出版社,1999: 1-15.
[2] 宋钧,张武高,黄震. 天然气发动机混合气形成与燃烧特点及性能评述[J]. 柴油机,2002(3): 16-20.
SONG Jun, ZHANG Wugao, HUANG Zhen. Review of performance and characteristics of mixture formation and combustion in natural gas engine[J]. Diesel Engine,

2002(3): 16-20.

- [3] HUANG Zuohua, ZENG Ke, YANG Zhongle. Characteristics of natural gas direct injection combustion under various fuel injection timing[J]. 燃烧科学与技术,2003,9(1): 40-48.
[4] 许正伟,彭忆强,黎薇,等. 天然气发动机高压共轨系统的建模与仿真研究[J]. 车用发动机,2008(3): 40-44.
XU Zhengwei, PENG Yiqiang, LI Wei, et al. Study on modeling and simulation of high-pressure common rail for natural gas engine[J]. Vehicle Engine, 2008(3): 40-44.
[5] AUTOMOTIVE T. MACS565-getting start [M]. Delft Netherlands: Tno Automotive, 2006: 4-37.
[6] HILTNER J, SAMIMY M. The impact of injection timing on ignition in a distribution in a natural gas powered engine, SAE Paper No. 971708[R]. <http://www.sae.org/technical/papers/971708>.
[7] 黎薇. 缸内直喷 CNG 发动机及其电控系统的研究[D]. 成都:西华大学,2008.
[8] 张振东,方毅博,陈振天,等. 单燃料天然气发动机控制系统设计与试验研究[J]. 上海理工大学学报,2005,27(4): 283-286.
ZHANG Zhendong, FANG Yibo, CHEN Zhentian, et al. Control system design and test research for a mono fuel CNG engine[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2005, 27(4): 283-286.
[9] 彭忆强. 基于模型的汽车电控单元仿真测试技术研究[J]. 中国测试技术,2006,32(6): 15-19.
PENG Yiqiang. Research on vehicle model-based testing of automotive electronic control units[J]. China Measurement Technology, 2006, 32(6): 15-19.
[10] 李国勇. 智能控制与 Matlab 在电控发动机中的应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007: 15-55.
[11] 周斌. 一种预测内燃机稳态排放特性的方法[J]. 西南交通大学学报,2004,39(2): 135-138.
ZHOU Bin. Method for predicting internal combustion engine emission under steady operational condition [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(2): 135-138.
[12] 周斌,李玉梅,志贺圣一. 神经网络内燃机排放模型学习样本的选定[J]. 西南交通大学学报,2002,37(6): 659-663.
ZHOU Bin, LI Yumei, SHIGA Seiichi. Selection of the learning samples of neural networks for internal-combustion engine emission[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(6): 659-663.
(中文编辑:秦瑜 英文编辑:兰俊思)