文章编号:1673-5005(2013)04-0129-04 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.04.021

电控燃料喷射大功率气体发动机的试验研究

葛文庆[1,2], 刘 梁[2], 孙宾宾[2], 常思勤[2]

(1. 山东理工大学机械工程学院,山东淄博 255049; 2. 南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

摘要:针对大功率气体发动机的进气管回火和扫气过程燃料流失等问题,建立一种气体燃料电控喷射装置,进而实现大功率气体发动机的燃料多点顺序间歇供给。搭建发动机试验平台进行发动机启动、怠速稳定性、各缸均匀性调整以及增减负荷的试验。结果表明,气体燃料电控喷射装置可以有效地实现燃气量的实时独立调节,发动机运行平稳,验证了技术的可行性。通过应用气体燃料电控喷射装置,增大发动机扫气重叠角和提高压缩比,可进一步改善发动机性能。

关键词:气体燃料发动机; 燃料电控喷射装置; 多点顺序间歇燃料喷射; 试验

中图分类号:TK 434.6 **文献标志码**:A

Experimental study on heavy-duty gas engine with electronically controlled fuel injection device

GE Wen-qing[1,2], LIU Liang[2], SUN Bin-bin[2], CHANG Si-qin[2]

(1. *School of Mechanical Engineering*, *Shandong University of Technology*, *Zibo* 255049, *China*;
2. *School of Mechanical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: An electronically controlled gas fuel injection device was presented aiming at the disadvantage of backfire and fuel loss of heavy-duty gas engine. The multiple-point sequential and intermittent fuel injection was achieved. The engine test-bed was developed to test the engine start performance and idle stability. The uniformity control of each cylinder and load changing were also tested. The experimental results show that the gas fuel mass can be independently controlled by electronically controlled injection device. The engine runs smoothly and the feasibility of the technology was verified. Furthermore, with the application of electronically controlled injection device, the performance of the engine can be improved by increasing the scavenging overlap angle and the compression ratio.

Key words: gas engine; electronically controlled injection device; multiple-point sequential and intermittent fuel injection; experiment

使用新型燃料替代石油基燃料,改善内燃机的节能环保性能成为内燃机的重要发展方向之一。天然气和液化石油气等作为高品质气体燃料,近年来在发动机上的应用得到了发展,而煤层气、高炉煤气和沼气等热值较低的气体燃料由于来源丰富和基于能源合理利用的需求,也得到了越来越多的关注[1-4]。但在实际应用中,气体燃料(特别是低热值气体燃料)发动机存在进气管回火和扫气阶段气体燃料流失等问题[1],应对其混合气量和空燃比进行精确控制以实现发动机稳定可靠地运行。笔者应用电控喷射装置进行气体燃料发动机的试验研究,验证技术方案的可行性。

1 试验装置

为实现气体燃料喷射量的精确控制,气体燃料的供给采用多点顺序间歇喷射方式[5-9],喷射装置分别安装在发动机每个气缸的进气歧管上,根据发动机的运行工况实时、独立地调节各工作气缸的燃气

收稿日期:2012-12-12

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J11LD61);江苏省科技支撑计划项目(BE2008133)

作者简介:葛文庆(1969-),男,副教授,博士,主要从事气体燃料发动机研究。E-mail:gewg@moe.edu.cn。

供给量。

气体燃料电控喷射装置如图 1 所示,主要由电磁直线执行器[10]和菌型气门组成。菌型气门[11]具有较大的流通截面积,从而保证发动机的大流量要求[12]。电磁直线执行器作为驱动元件,其输出轴直接与菌型气门相连,通过控制电磁直线执行器的工作电流,实现菌型气门的开启和关闭规律。

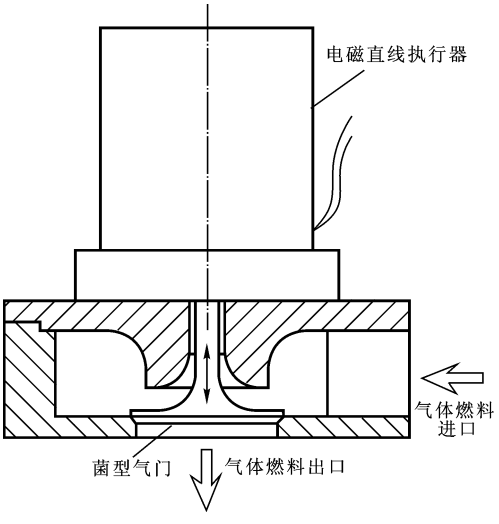


图 1 气体燃料电控喷射装置

Fig. 1 Electronically controlled gas fuel injection device

试验台是在一台 12 缸天然气发电机组的基础上改进完成的,发动机的主要参数如下:缸径 $D=190$ mm,行程 $S=210$ mm,功率 $P=600$ kW,额定转速 $n=1\,000$ r/min。试验装置主要由气体燃料管路、电控喷射装置及其控制器、点火系统及其控制器、发动机控制/监控平台、气体燃料发动机、发电机及其监控平台和负载电阻等组成,如图 2 所示。发动机的燃料通过管道天然气供给,通过减压阀将燃气压力降至 0.18 MPa,并经过稳压箱进行稳压后供应给发动机。

发动机控制/监控平台主要实现系统燃气总开关控制、发动机的起动电机控制、润滑和冷却系统控制以及发动机运行状态监控和报警等功能。在发动机的实际运行过程中,通过缸体温度传感器、排气温度传感器和磁电式转速传感器对发动机的运行状态进行实时监控,并对发动机的每个工作气缸的缸体温度和排气温度进行检测,以观察各缸的工作均匀性。

电控喷射装置控制器根据发动机目标转速以及采集的发动机转速信号和凸轮轴相位信号计算得到需要的喷射脉宽,对电控喷射装置的气门运动进行精确控制,从而实现发动机的转速闭环控制。电控喷射装置控制器通过通信端口和 PC 之间建立通信关系,向 PC 发送电控喷射装置的实际运行状态(包括瞬态气门升程和控制电流),并接收来自于 PC 的控制指令。控制器计算得到的喷射脉宽为各缸统一的喷射脉宽,在发动机的实际运行过程中,受到管路压力波动等因素的影响,各缸工作具有一定的不均匀性,观测发动机控制/监控平台的缸温和排气温度信号,通过 PC 监控平台发送喷射脉宽修正信号,对各缸均匀性进行补偿修正。为了全面地分析电控喷射装置对气体燃料发动机燃烧过程的影响,电控喷射装置控制器还采集了第 12 缸的缸内压力信号。

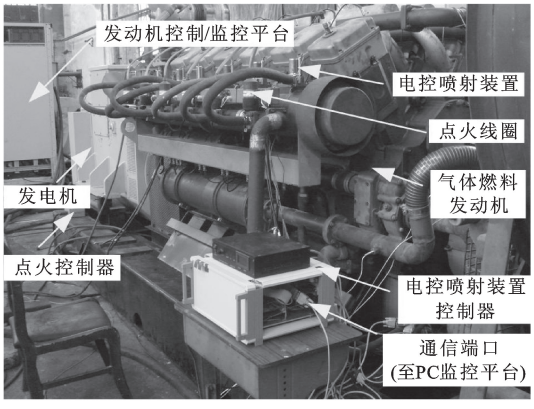


图 2 发动机试验装置

Fig. 2 Engine test-bed

2 试验结果及其讨论

2.1 发动机起动及怠速试验

气体燃料发动机的起动过程控制发动机从停机状态切换到怠速状态,是发动机工作必经的一个瞬态过程。起动过程以怠速转速为发动机控制的目标,起动电机可带动发动机转速至约 200 r/min,实际控制程序中设定当发动机转速大于 100 r/min 时电控喷射装置开始工作,随着各个气缸按照发火顺序开始工作,发动机转速开始上升。图 3 给出了发动机起动过程的转速变化曲线。怠速目标转速为

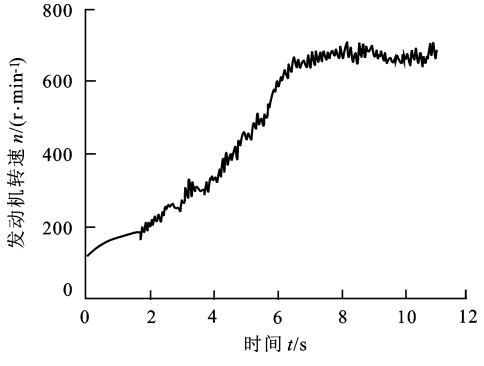


图 3 发动机起动过程转速变化曲线

Fig. 3 Speed change of engine start process

700 r/min,从图中可以看出,发动机起动过程平稳,起动时间为 7 s。怠速运转时发动机的转速波动约为±30 r/min,可见气体燃料发动机在应用电控喷射装置时具有良好的平稳性。

2.2　各缸均匀性的调整

发动机各缸制造误差的差异和进气系统的压力波动都会引起各缸工作不均匀,从而使发动机转速呈现不均匀的波动。发动机工作过程中的缸体温度可以反映各缸的均匀性。试验过程中,对各缸缸温进行实时监控,通过 PC 监控平台向电控喷射装置控制器发送控制指令,增加实测缸温偏低的气缸的供气量,同时对实测缸温偏高的气缸减小供气量。图 4 给出了调整前后的缸温。试验表明,供气量的调节可以有效地调整各缸均匀性,使各缸的缸温保持在平均值±20 K 的范围内。

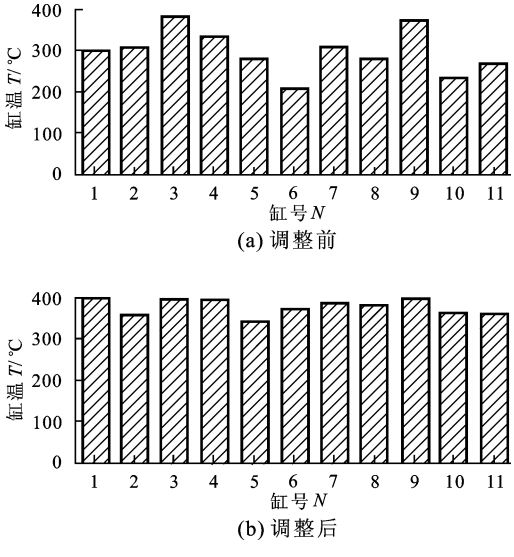


图 4　发动机各缸均匀性调节

Fig. 4　Tuning of cylinder by cylinder uniformity

2.3　增减负荷时的转速控制

发动机的额定转速为 1 000 r/min,从怠速工况开始控制发动机转速逐步上升,设定目标转速分别为 800、900 和 1 000 r/min。实测的发动机转速变化曲线如图 5 所示。试验表明,当发动机目标转速变化时,电控喷射装置可以快速响应,实现发动机转速的跟随。

当发动机转速稳定在 1 000r/min 时,对发电机组合闸加载,通过改变负载电阻来调节负荷。负载电阻为成组形式加载,每次变化 25 kW,无法实现连续可调,加载过程中负荷为突然变化,且加载时应保持发动机转速不变。当发动机负荷增加时,随着燃气喷射量的增加,减压阀并不能保证燃气压力的恒定,而呈现压力下降的趋势;但从图 5 可以看出,在加载和卸载过程中,发动机转速均未出现明显的波动,表明气体燃料电控喷射装置反应迅速,有较强的供气量调节能力。

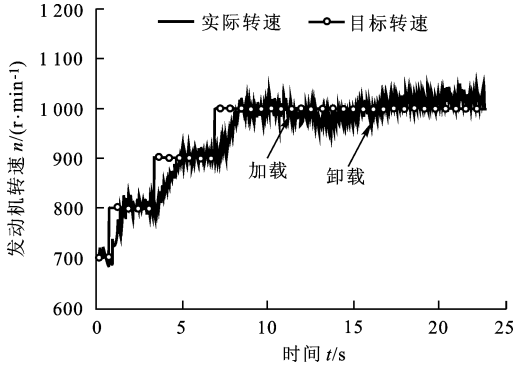


图 5　增减负荷时的发动机转速变化曲线

Fig. 5　Engine speed curve while load changing

2.4　示功图的测试结果

发动机空载时第 12 缸在不同转速下的示功图见图 6。试验结果表明,在相同负荷和点火提前角的条件下,随着发动机转速增加,相同曲轴转角对应的持续时间缩短,导致点火时刻提前,缸内气体峰值压力逐渐增大,峰值压力的出现位置也越靠近上止点。

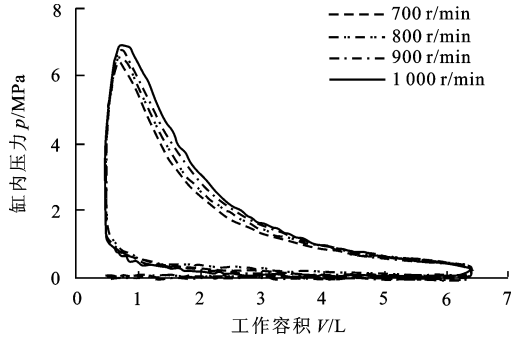


图 6　不同转速下的发动机示功图

Fig. 6　Indicator diagram at different engine speed

图 7 为额定转速下不同负荷时的发动机第 12 缸示功图。由试验结果可知,在额定转速下,缸内气体峰值压力随发动机负荷的增加而增大,峰值压力出现的时刻也随负荷的增加而提前。这是由于负荷增大使缸内残余废气量减小,同时影响点火时刻的缸内气体状态,缩短着火延迟期,相当于点火提前,引起较高的缸内气体峰值压力。

图 8 为额定转速下发动机输出功率为 140 kW 时第 12 缸连续 10 个工作循环的缸内压力曲线。通过对缸内压力数据进行统计分析得到峰值压力循环波动率约为 3%,表明发动机燃烧过程循环变动小,燃烧过程平稳。

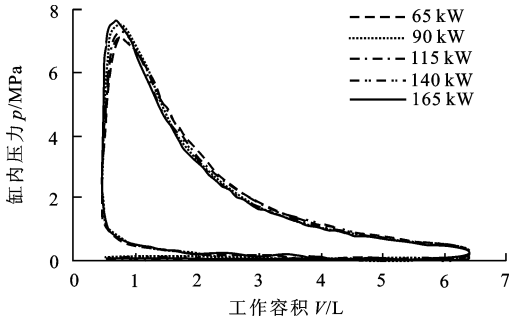


图 7 不同负荷下的发动机示功图

Fig. 7 Indicator diagram at different engine load

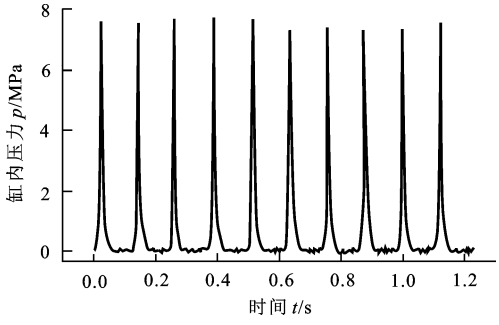


图 8 试验缸内压力曲线

Fig. 8 Pressure curve of experimental cylinder

3 电控喷射装置应用

气体燃料电控喷射装置的应用为改善大功率发动机的性能提供了可能性,与应用单点或多点连续供气方式的发动机相比较,应用多点顺序间歇供气方式可以通过加大发动机扫气重叠角和提高压缩比进一步改善发动机性能。

在连续供气方式的发动机中,用于扫气的是混合气,受到燃料流失以及进气管回火可能性的限制,只能取较小的扫气重叠角。应用电控喷射装置可以实现应用纯空气扫气,使较大的发动机扫气重叠角的应用成为可能,可以更好地清除缸内的残余废气,降低燃烧室内部以及壁面温度,为下一工作循环的混合气形成和燃烧提供良好的条件。加大发动机扫气重叠角,通过电控喷射装置精确地调节发动机混合气浓度可以降低爆震燃烧的可能性,从而为提高发动机的压缩比提供可能,进一步改善发动机的经济性能。

4 结 论

(1)用气体燃料电控喷射装置实现了大功率气体发动机的燃料多点顺序间歇供给。

(2)应用电控喷射装置可以实现发动机的良好起动性能和运行稳定性,通过供气量的调节可以有效地调整各缸均匀性,发动机燃烧过程循环变动小,燃烧过程平稳,电控喷射装置反应迅速,有较强的供气量调节能力。

(3)在进一步的应用中,可通过增大发动机扫气重叠角和提高压缩比开展发动机的性能改善研究。

参考文献:

[1] 单冲. 低热值气体燃料发动机的试验研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2011.
SHAN Chong. The research on the performances of the low heating value gas fuel engine[D]. Beijing: School of Mechanical, Electronic and Control Engineering in Beijing Jiaotong University, 2011.

[2] 丁翔. 低热值煤气分级着火燃烧技术及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学能源与动力工程学院,2009.
DING Xiang. Research on stepped ignition combustion technology and its application for low heat value gas[D]. Wuhan: School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, 2009.

[3] ZUO Cheng-ji, QIAN Ye-jian, TAN Jian, et al. An experimental study of combustion and emissions in a spark-ignition engine fueled with coal-bed gas[J]. Energy, 2008,33(3):455-461.

[4] PARK Cheolwoong, PARK Seunghyun, LEE Yonggyu, et al. Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen [J]. Hydrogen Energy, 2011,36(16):10080-10088.

[5] 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, 2003,24(3):16-19.
LIU Xing-hua, CHEN Yong-yi, LI Tie-shuan. Development of an electronically controlled multi-point sequential injection CNG engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003,24(3):16-19.

[6] CZERWINSKI Jan, COMTE Pierre, ZIMMERLI Yan. Investigations of the gas injection system on a HD-CNG-Engine[C]//SAE International. SAE Technical Paper Series. Warrendale PA: SAE International, 2003: 2003-01-0625.

[7] KAIADI Mehrzad, TUNESTÅL Per, JOHANSSON Bengt. Closed-loop combustion control for a 6-cylinder port-injected natural-gas engine [C]//SAE International. SAE Technical Paper Series. Warrendale PA: SAE International, 2008:2008-01-1722.

(下转第 139 页)

[3] GAI G H. The processing of rotor startup signals based on empirical mode decomposition [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006,20(1):222-235.

[4] 林近山. 基于本征时间尺度分解算法的齿轮箱故障诊断[J]. 机械传动, 2011,35(9):51-53.
LIN Jin-shan. Fault diagnosis of gear box based on intrinsic time-scale decomposition algorithm [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2011,35(9):51-53.

[5] 郭艳平, 颜文俊. 基于 EMD 和优化 K-均值聚类算法诊断滚动轴承故障[J]. 计算机应用研究, 2012,29(7):2555-2557.
GUO Yan-ping, YAN Wen-jun. Fault diagnosis of bearing based on empirical mode decomposition and K-means clustering [J]. Application Research of Computers, 2012,29(7):2555-2557.

[6] 安金坤, 田斌, 易克初, 等. 基于 ITD 的跳频信号跳速估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2011,33(1):166-169.
AN Jin-kun, TIAN Bin, YI Ke-chu, et al. Intrinsic time-scale decomposition based algorithm for the hop rate estimation of frequency hopping signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011,33(1):166-169.

[7] MARK G F, OSORIO I. Intrinsic time-scale decomposition: time-frequency-energy analysis and real-time filtering of non-stationary signals[J]. Proc R Soc A, 2007, 463:321-342.

[8] 安学利, 蒋东翔, 陈杰, 等. 基于 ITD 和 LS-SVM 的风力发电机组轴承故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2011,31(9):10-13.
AN Xue-li, JIANG Dong-xiang, CHEN Jie, et al. Bearing fault diagnosis based on ITD and LS-SVM for wind turbine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(9):10-13.

[9] AN Xue-li, JIANG Dong-xiang, CHEN Jie, et al. Application of the intrinsic time-scale decomposition method to fault diagnosis of wind turbine bearing[J]. Journal of Vibration and Control, 2012,18(2):240-245.

[10] 安金坤, 田斌, 孙永军, 等. 一种基于 ITD 算法的直扩信号检测算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5):1178-1182.
AN Jin-kun, TIAN Bin, SUN Yong-jun, et al. An algorithm for direct sequence spread spectrum signal detection based on intrinsic time-scale decomposition [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5):1178-1182.

[11] 印兴耀, 叶端南, 张广智. 基于核空间的模糊聚类方法在储层预测中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,36(1):53-59.
YIN Xing-yao, YE Duan-nan, ZHANG Guang-zhi. Application of kernel fuzzy C-means method to reservoir prediction[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,36(1):53-59.

[12] 王朝晖, 姚德群, 段礼祥. 基于模糊聚类的油田往复压缩机气阀故障诊断研究[J]. 机械强度,2007,29(3):521-524.
WANG Zhao-hui, YAO De-qun, DUAN Li-xiang. Study on the method of oil field reciprocating compressor valve fault diagnosis based on fuzzy clustering[J]. Journal of Mechanical Strength, 2007,29(3):521-524.

(编辑　沈玉英)

(上接第 132 页)

[8] 卜海永. 电控液压可变燃气门的设计开发[D]. 济南:山东大学能源与动力工程学院, 2010.
BU Hai-yong. Design and development of the electronically controlled hydraulically actuated variable valve system[D]. Jinan: School of Energy and Power Engineering, Shandong University, 2010.

[9] 杜喜云. 电控多点喷射天然气发动机的开发[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2007.
DU Xi-yun. Development of electronic controlled multipoint injection CNG engine[D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2007.

[10] 常思勤,刘梁. 高功率密度的动圈式永磁直线电机:中国,CN101127474B[P]. 2010-07-14.

[11] 常思勤,葛文庆. 一种气体燃料电控喷射装置:中国,201110332554.8[P]. 2011-10-28.

[12] 葛文庆,常思勤,孙宾宾,等. 一种大功率发动机气体燃料电控喷射装置的流量特性研究[J]. 南京理工大学学报,2012,36(4): 699-673.
GE Wen-qing, CHANG Si-qin, SUN Bin-bin, et al. Flow characteristics of electronically controlled gas fuel injection device for heavy-duty engine[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(4): 699-673.

(编辑　沈玉英)