

车用电控发动机点火能量控制与测试^{*}

张红光 王道静 刘凯 白小磊 梁虹 李冬

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124)

【摘要】 针对车用电控天然气发动机, 开发出电控点火系统。为了客观评价电控系统的点火能量和优化电控点火系统, 参照 SAE J973—1999 标准, 设计出一套点火能量测试系统。采用稳压管串作为模拟负载, 通过数字示波器采集采样电阻两端的电压信号, 然后进行积分等运算, 从而得到点火能量的准确值。试验结果表明, 电控点火系统的点火能量能够被有效量化评价。对于 JL465Q5 型车用电控天然气发动机, 当转速低于 2 500 r/min 时, 初级点火线圈的闭合时间为 6 ms; 转速在 2 500 r/min 至 5 000 r/min 时, 闭合时间为 3 ms; 转速高于 5 000 r/min 时, 闭合时间为 2 ms。

关键词: 车用发动机 电控点火系统 点火能量测试

中图分类号: TK413.9

文献标识码: A

Spark Energy Control and Measurement for Electronic-controlled Automotive Engine

Zhang Hongguang Wang Daojing Liu Kai Bai Xiaolei Liang Hong Li Dong

(College of Energy and Environmental Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract

The electronic-controlled ignition system was developed for automotive engines fueled with compressed natural gas (CNG). In order to evaluate the spark energy of the electronic-controlled system and optimize the electronic-controlled ignition system, referring to SAE J973—1999 standard, the spark energy measurement system was developed. Taking Zener string as simulation load, the voltage across the sampling resistance was acquired on time by digital oscilloscope, then the exact value of spark energy was obtained by integral calculations. The results show that the spark energy can be evaluated quantitatively and effectively. For the electronic-controlled automotive CNG engine JL465Q5, when the engine speed is lower than 2 500 r/min, the optimized charge time of the primary ignition coil is 6 ms; when the engine speed is between 2 500 r/min and 5 000 r/min, the optimized charge time of the primary ignition coil is 3 ms; when the engine speed is higher than 5 000 r/min, the optimized charge time of the primary ignition coil is 2 ms.

Key words Automotive engine, Electronic-controlled ignition system, Spark energy measurement

引言

点火能量是指发动机点火时消耗在火花塞间隙的能量, 是点火系统次级高压作用在火花塞电极间

随时间变化的电压与电流的乘积对时间的积分。足够的点火能量是对发动机点火系统的一个基本要求, 点火系统必须保证可以点燃不同工况下发动机燃烧室内的可燃混合气。适当的点火能量对发动机

收稿日期: 2008-10-31 修回日期: 2008-11-24

^{*} 北京市属市管高校人才强教计划资助项目(J4310790200801)、北京市留学人员科技活动择优资助项目(38005051200701)和北京市教委 08 年科研计划项目(JC005012200801)

作者简介: 张红光, 教授, 博士, 主要从事车用电控和代用燃料技术研究, E-mail: zhg5912@263.net

也是非常必要的,点火能量过低,发动机的功率、扭矩下降,油耗上升,排放变差;点火能量过高产生不必要的能量浪费,同时降低点火系统的寿命^[1]。因此,通过试验的方法来定量地分析点火系统的性能,对于降低污染物的排放和提高点火系统的寿命有积极意义。

目前,国内外对点火系统的控制主要集中在点火提前角、次级线圈电压上,对点火能量的控制与测试研究较少^[2~3]。本文针对 JL465Q5 型车用发动机,采用模拟负载的方式实现对点火能量的精确测试,进而进行有效控制。

1 点火能量测试方法及模拟负载

点火系统次级负载是火花塞,当发动机运转时,火花塞工作在高温高压燃烧室内,条件十分恶劣,点火能量的直接测量困难很大。火花放电过程十分复杂,且发动机工况较多,即使在同一工况下,试验结果也有一定的差异,所以点火系统试验时点火能量的测试一般都采用模拟负载,国际上常用的点火能量测试负载有:三针放电器负载和稳压管串负载^[4~5]。

三针放电器负载由主电极和辅助电极组成,是过去有触点点火系统常用的次级放电负载。按照规定,被测点火系统的负载是一台包含数个三针放电器火花间隙装置。每一个火花间隙都可以单独调整,测试用的火花间隙比分电器盖上的旁电极少一个^[4]。由于在测量击穿电压时三针磨损比较快,易受环境温度、湿度的影响,故现在一般不再采用。

稳压管串负载测量点火系统的能量是 SAE J973—1999 标准的推荐做法,用耐压 200 V 的 5 个稳压管(Zener)串联在一起,作为次级模拟负载,可以测量初级线圈断开时消耗在与次级线圈串联的稳压管串上的能量,以此作为评价点火系统点火能量的重要参数。

稳压管串负载方法是一种可重复的测量方法,同时可以保证测量数值的一致性,消除火花塞或三针的 RF 干扰。在初级回路断开后,次级线圈对作为火花塞模拟负载的稳压管串放电,次级电压迅速上升。当电压上升至 1 000 V 时,稳压管串开始导通,此后稳压管串上的电压恒定保持在 1 000 V。次级电流在稳压管串导通的瞬间达到最大值,而后不断下降。直到次级输出电压低于 1 000 V,稳压串截止,电流衰减为零,残余能量以回路振荡的形式消耗掉。耐高压二极管用于抑制反向电压,起保护作用。本文采用稳压管串模拟负载方法。

由于试验条件的限制,很难实现对时变电流的

准确实时测量。因此,试验中采用了采样电阻,把随时间变化的电流转化为采样电阻两端的电压。在试验中采样电阻 R1 采用低温漂的无感电阻,阻值为 100 Ω ;稳压管采用 BZV47C200,稳压值为 200 V,稳压管串的稳压值为 1 000 V;二极管 D0 反向击穿电压为 5 000 V,主要用于抑制反向电压,减小能量测量过程中的误差。系统符合 SAE J973—1999 标准的要求。图 1 为模拟负载电路图。

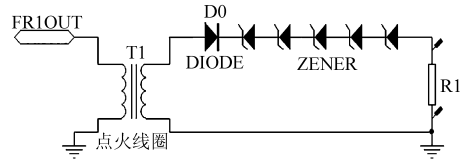


图 1 模拟负载电路图

Fig. 1 Circuit diagram of simulation load

2 电控点火系统

开发的车用天然气发动机电控系统已经在发动机台架试验中成功应用,这使点火能量的测试过程更加方便和快捷,也有必要对电控点火系统进行评价与改进。试验针对的车用发动机型号为 JL465Q5,该发动机原机为汽油机,是四冲程、直列四缸、水冷、顶置凸轮轴、闭环多点燃油喷射发动机。其排量为 1.012 L,压缩比为 9.6,缸径为 65.5 mm,额定功率为 39 kW(5 300 r/min)。经过改造后,加装了一套完整的天然气供给系统和电控系统,改装为车用天然气发动机。

在该电控单元硬件设计中,采用了多片式 ECU 方案,即在一个电控单元中使用多个电控子单元 MCU(micro controller unit);各个 MCU 分别承担不同的工作内容。采用多片式 ECU,不仅可以满足系统对控制精度和运算速度的要求,而且可以有效缩短 ECU 的开发周期,降低开发成本。采用 3 个 ATMEL 公司 AVR 家族的单片机组成多片式 ECU,它们分别针对不同的对象各自分担任务。其中,ATmega128 单片机控制发动机的燃料喷射量;其中一个 ATmega8 单片机作为 ECU 主控单片机,同时进行发动机怠速、ECU 与监控软件的串口通讯控制,还可以提供额外的控制功能,例如对汽油 ECU 的启用和屏蔽、对不同燃料状态时传感器服务对象的切换等;另外一个 ATmega8 单片机用于控制发动机的电子点火。

在此电控系统中,点火 MCU 有 3 个计数器:计数器 0、计数器 1 和计数器 2。计数器 1 用来捕获发动机的转速信号。在主程序中打开计数器 1 的捕获功能,设置为下降沿触发模式。当转速信号出现下降沿时,触发计数器 1 的捕获中断,由主程序跳转到

捕获中断子程序；在中断子程序中，除了获取发动机转速信号以外，还可以提供开始点火的基准信号。计数器 0 在计数器 1 捕获中断子程序中开启，负责记录从基准信号到初级回路开始闭合（通电）这段时间。当计数器 0 计到 255 时，触发溢出中断，进入中断子程序；关闭计数器 0，开启负责记录点火线圈闭合时间的计数器 2，初级回路开始闭合。当计数器 2 计至 255 时，触发溢出中断，进入中断子程序；关闭计数器 2，输出点火信号。

点火 MCU 输出的点火信号驱动功率晶体管控制点火线圈初级回路的通断，从而使次级感应出高压，经分电器的分火作用，分别使 4 个气缸依次点火。由于电控点火系统取消了机械触点而使用无触点的晶体管开关，分电器只起分火作用，因而避免了触点高速时抖动及低速时放电所损失的能量，提高了次级电压。点火 MCU 根据转速和进气歧管压力情况输出点火信号，使得发动机在各工况具有最佳的点火提前角。点火能量通过初级回路的闭合时间来控制，图 2 为 MCU 点火驱动电路图。

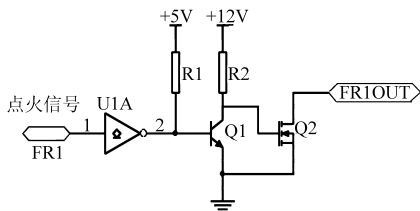


图 2 驱动电路图

Fig.2 Diagram of drive circuit

有学者对缸内多火花点火对发动机性能的影响进行了研究，指出多火花可以有效改善发动机的

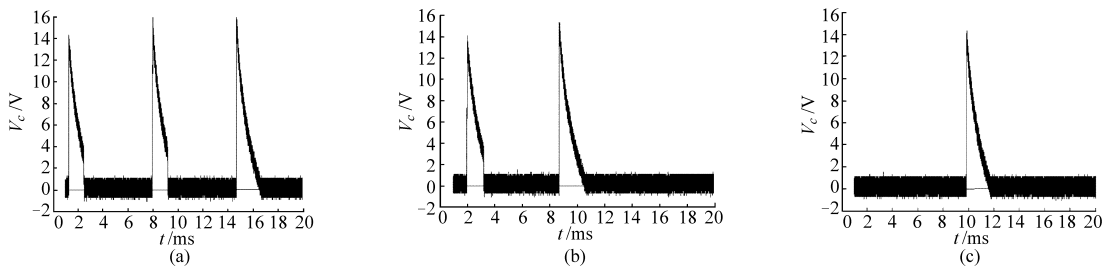


图 3 采样电阻两端的电压波形

Fig.3 Voltage waveform across the sampling resistance
(a) $n = 150 \text{ r/min}$ (b) $n = 600 \text{ r/min}$ (c) $n = 900 \text{ r/min}$

燃烧过程，提高动力性能，降低 NO_x 、HC 等污染物排放^[6-9]。发动机在冷起动过程中需要较高的点火能量，采用多次点火策略。根据当前的转速，确定点火次数，实现发动机冷起动时低转速下的多次点火，有效缓解了天然气发动机冷起动困难的问题^[10]。

3 点火能量测试结果

车用发动机火花塞电极间放电持续的时间很短，一般只有几毫秒。因此，采用数字示波器记录采样电阻两端的电压信号，采样频率为 50.0 MHz，存储量为 1×10^6 点。结果表明，设定的采样频率和存储量满足试验要求。

车用天然气发动机在冷起动过程中需要较高的点火能量，因此在低转速时采用多次点火策略。当转速 n 低于 200 r/min 时，采用在压缩行程末期 3 次点火；当转速 n 在 200 r/min 到 600 r/min 之间采用在压缩行程末期 2 次点火，转速 n 高于 600 r/min 时采用在压缩行程末期 1 次点火。试验采用的负载为稳压管串，因此不需要通过发动机台架试验来测量点火能量。本试验中，采用信号发生器输出的方波模拟发动机的转速信号，点火 MCU 根据模拟的转速值和预先设置的进气歧管压力值计算点火提前角以及点火线圈闭合时间，驱动点火电路实现点火。

图 3 为使用 Matlab 软件根据数字示波器采集的采样电阻两端的电压信号 V_c 绘制的波形。

表 1 为试验过程中采集的部分工况下的点火能量。

表 1 部分工况下的点火能量

Tab.1 Spark energy value in some operation conditions

mJ

闭合时间 t_b/ms	转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$				闭合时间 t_b/ms	转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$			
	150	300	600	900		150	300	600	900
2	88.879	62.257	64.802	31.339	6	315.566	211.906	203.665	105.162
3	194.495	118.803	119.216	56.638	7	344.109	224.334	218.111	115.568
4	256.864	166.133	166.774	79.261	8	337.681	236.586	229.824	124.793
5	297.000	199.395	190.540	90.070					

由表1可知,点火线圈的闭合时间 t_b 对点火能量具有重要影响。闭合时间 t_b 越长,初级线圈的储能越多,相应的次级线圈在初级线圈断开的瞬间就可以感应出更多的能量,并输出到火花塞进行点火。本次试验采集的是点火线圈次级的输出能量,考虑到经过分电器的机械损失,实际分配到火花塞的点火能量会有所降低。

4 结论

(1)针对 JL465Q5 型车用电控天然气发动机,进行了大量的点火能量测试试验。结果表明:当发

动机转速低于 2 500 r/min 时,初级线圈的闭合时间 t_b 为 6 ms;当转速在 2 500 r/min 至 5 000 r/min 时,初级线圈闭合时间 t_b 为 3 ms;转速高于 5 000 r/min 时,初级线圈闭合时间 t_b 为 2 ms;可以取得最佳的控制效果。

(2)根据发动机转速对初级线圈闭合时间进行调整,既满足了各种工况下的点火能量,又不会明显缩短点火系统的寿命。本文的点火能量测试方法对电控天然气发动机点火系统的开发起到积极作用,有利于选择合理的初级线圈闭合时间,从而优化发动机的冷起动性能、动力性能和排放性能。

参 考 文 献

- 1 吴元杰,徐博侯,季春宇. 高能点火系统点火能量的模拟计算研究[J]. 汽车科技,1997(5):1~5.
Wu Yuanjie, Xu Bohou, Ji Chunyu. Study on simulation of ignition energy provided by high-energy ignition system[J]. Automotive Technology, 1997(5):1~5. (in Chinese)
- 2 吴静波. 汽油发动机点火能量控制模块的研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2006.
Wu Jingbo. Development of spark energy control module for gasoline automobile engine[D]. Luoyang: Henan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 3 Myung Jun lee, Matt Hall, Ofodike A Ezekoye, et al. Voltage, and energy deposition characteristic of spark ignition system [C]. SAE Paper 2005 - 01 - 0231, 2005.
- 4 QC/T416—1999 点火系统的测试方法[S].
QC/T416—1999 Ignition system measurement procedure[S].
- 5 SAE J973—1999 Ignition system measurements procedure[S].
- 6 邵千钧,何文华,卫忠星,等. 多次点火提高 LPG 发动机点火可靠性的研究[J]. 内燃机工程,2005,26(4):59~62.
Shao Qianjun, He Wenhua, Wei Zhongxing, et al. Study on multi-time ignition improving ignition reliability of LPG-fueled engine[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2005,26(4):59~62. (in Chinese)
- 7 张晓,汪洋,史家涛,等. 多脉冲点火对火花助燃均质充量压缩着火燃烧的影响[J]. 天津大学学报,2004,37(12): 1 146~1 150.
Zhang Xiao, Wang Yang, Shi Jiatao, et al. Effect of multi-pulse ignition on spark-assisted homogenous charge compression ignition combustion[J]. Journal of Tianjin University, 2004,37(12):1 146~1 150. (in Chinese)
- 8 Dale J D, Checkel M D, Smy P R. Application of high energy ignition systems to engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997, 23(5~6): 379~398.
- 9 Jean-Luc Beduneau, Bonggyu Kim, Laurent Zimmer, et al. Measurement of minimum ignition energy in premixed laminar methane/air flow by using laser induced spark[J]. Combustion and Flame, 2003,132(4): 653~655.
- 10 郑国勇. 天然气发动机电控系统的开发研究[D].北京:北京工业大学,2008.
Zheng Guoyong. Study on development of the electronic control system for natural gas[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2008. (in Chinese)