

离子电流检测系统的抗干扰设计

曹银波, 张志永, 沈康, 李理光

(同济大学汽车学院, 上海 200092)

摘要: 发动机复杂的工作环境必然对利用离子电流检测技术实现发动机的燃烧状况进行实时监测造成干扰。为此对整个离子电流检测系统进行了抗干扰优化设计。在一台 SI-HCCI (spark ignition-homogeneous charge compression ignition) 发动机上进行试验研究, 试验结果表明, 高压隔离模块很好地保护了采集系统; 电容点火隔离方法可以减少信号中的背景干扰; 电容检测法无法准确反映发动机的爆震现象; 采用软件消除零点漂移的方法取得了很好的效果; 采用了优化后的离子电流检测系统, HCCI 离子电流的信噪比显著提高。

关键词: 发动机离子电流; 点火隔离; 零点漂移; HCCI

中图分类号: TM502

文献标识码: A

Anti-interference Design of Ionization Current Detection System

CAO Yinbo, ZHANG Zhiyong, SHEN Kang, LI Liguang

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: The complex engine operation environment will result in interference while utilizing ion current detection technique to achieve real-time monitoring of the combustion consequentially. Anti-interference design of the detection system was optimized. An experiment was done on a spark ignition-homogeneous charge compression ignition (SI-HCCI) engine. Results show that high-voltage isolation module can protect collection system well; using capacitance to isolate ignition can reduce the interference from background; capacitance detection method cannot reflect accurately when knock phenomenon happens. Eliminating zero drift with a software achieves good effect. With the optimized ion current detection system, the ratio of signal to noise of ion current increases significantly in HCCI combustion.

Key words: ionization current; ignition isolation; zero drift; homogeneous charge compression ignition HCCI

在火花塞点火式发动机中, 当燃烧发生时, 产生大量的离子。如果在火花塞两极之间加上适当的直流偏置电压就会形成离子电流^[1]。通过该电流可以对发动机燃烧状态进行在线检测, 从而实现对发动机的实时监测, 是一种基于发动机工作循环, 获得精确的着火和燃烧信息的缸内燃烧检测技术。该项技术可以被应用于所有采用火花塞(或装有类似的电极)的内燃机, 不需要任何额外的植入式传感器, 且无须对发动机进行大规模的改动即可实现。此外该技术也不受发动机结构布局和燃料类型限制, 能够应用于几乎所有燃料的内燃机^[2]。

发动机的工作环境决定了它随时都可能受到内外界的电磁干扰, 这种干扰可能以冲击脉冲的形式进入控制系统内部, 干扰破坏某些电子器件的工作, 也可能以噪声的形式串入传感器信号中, 影响控制系统对发动机运行状况的判断^[3]。当发动机的工作模式由 SI (spark ignition) 燃烧模式向 HCCI (homogeneous charge compression ignition) 燃烧模式过渡时, 必然会有火花点火。由于采用火花塞作为离子电流传感器, 点火放电干扰必然会显著影响离子电流信号波形。为了确保系统可靠地工作和获得理想的离子电流信号, 必须充分考虑整个离子电流检测系统的抗干扰性。

1 发动机干扰源分析及抗干扰评价方法

1.1 点火系统瞬时高压干扰

发动机点火系统主要由蓄电池、点火控制模块、点火开关、点火线圈、高压阻尼线以及火花塞组成, 其结构简化电路如图 1 所示^[4]。其中: I_1 表示电流;

收稿日期: 2011-07-04

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展规划(2007CB210005); 上海市重点学科建设项目(B303); 高等学校创新引智“一一一”计划(B08019)

第一作者: 曹银波(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为汽油机燃烧与离子电流反馈控制。E-mail: caoyinbo18@163.com

通讯作者: 李理光(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为发动机燃烧与喷雾。E-mail: liguang@tongji.edu.cn

U 表示蓄电池电压; L 表示点火线圈; R_1 表示初级绕组电阻; R_f 表示附加电阻; K 表示点火开关; C_1 表示火花塞电极两端。

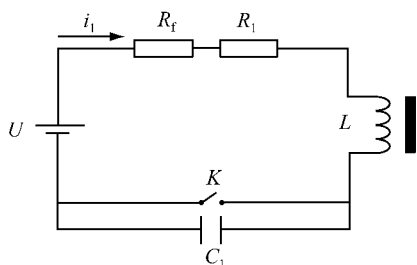


图 1 点火系统初级电路简图

Fig.1 Diagram of ignition system primary circuit

点火系统工作时,点火控制模块送出一个高电平,点火开关导通,初级线圈有电流流过,并逐渐增大。电流在铁芯建立磁场的过程中,初、次级线圈出现感应电动势,此时次级线圈的感应电动势不足以将火花塞气隙击穿,气隙处于断开状态。当点火信号由高电平变为低电平时,点火开关断开,初级线圈瞬间开路,电流迅速减小,铁芯中急剧变化的磁通在次级线圈感应出高达 30~40 kV 的电动势,火花塞气隙瞬间被击穿,产生的电火花将发动机气缸中的混合气点燃。同时,初级线圈也会感应出约 600 V 的瞬变电压^[5]。由于离子电流信号一般较小,因此,必须采取必要的高压隔离电路以防止点火线圈放电瞬间所产生的高压损害检测电路,以提高检测信号的信噪比^[6]。

1.2 点火系统高频干扰

图 2 是火花点火高频振荡信号。由图可见,发动机点火时将产生高频振荡信号,其最大振幅接近 50 V,频率在 50~60 MHz^[7]。由以上的分析可知,要测量燃烧产生的离子电流信号,必须对点火造成的瞬时高压和高压干扰进行抑制。

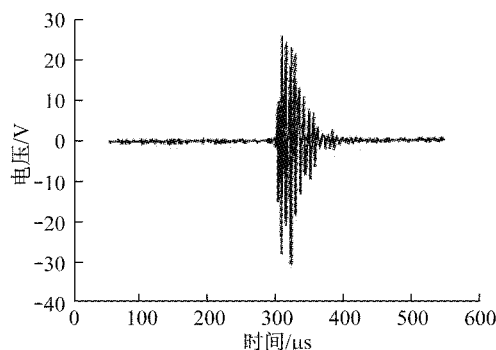


图 2 火花点火信号

Fig.2 Spark ignition signal

1.3 抗干扰的评价方法

在信号解调问题中,可利用信噪比或信噪比改善方便地进行信号检测中的抗干扰性能比较。理想检测能力因子反映的是检测时信号能量与噪声能量的比值,即被检测信号的信噪比。利用信噪比或信噪比改善能较好地解决抗干扰性能比较问题^[8]。

2 抗干扰设计

2.1 隔离技术

2.1.1 高压隔离

高压隔离电路由高压硅堆和的大阻值电阻组成,硅堆型号 2CL2FK,反向击穿电压为 40 kV,将其与 10 MΩ 电阻并联。如图 3 所示,高压隔离硅堆与电源放大模块输出电压正极连接,另一端与火花塞中心电极连接,以此来隔离火花塞点火产生高压冲击,保护检测电路。

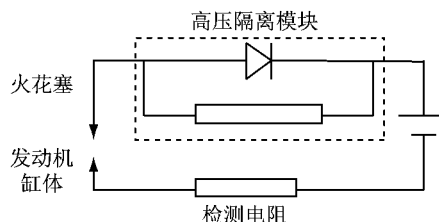


图 3 高压隔离模块

Fig.3 High-voltage isolation module

2.1.2 点火隔离

在采用火花塞作为离子电流传感器时,点火放电干扰会显著影响离子电流信号波形。点火放电干扰在本质上是由于线圈感应电动势造成的,因此在理论上,采用容性阻抗可以降低这种干扰造成的影响。在本研究中,通过在火花塞高压线与高压硅堆之间串连陶瓷电容的方法,分析容性阻抗对点火干扰的抑制效果。

图 4 为发动机转速 1 000 r·min⁻¹ 的稳定怠速工况下,离子电流检测电路偏置电压 400 V,被测电阻 270 KΩ 条件下,在压缩冲程火花塞点火后采用一个 5 pF 陶瓷电容前后的离子电流波形对比。从图 4a 和 b 对比发现,两者的离子电流波形差别较大,而且在膨胀行程后期,点火引起的震荡得到了很好的抑制。

然而电容本身就有滤波能力,其容量的大小也会使得离子电流信号受到影响,因此有必要对电容的大小因为抑制点火隔离而对离子电流信号产生的影响进行研究。针对容量分别为 1,5 和 10 pF 的 3

种电容进行燃烧和非燃烧两种条件下的点火抑制试验。

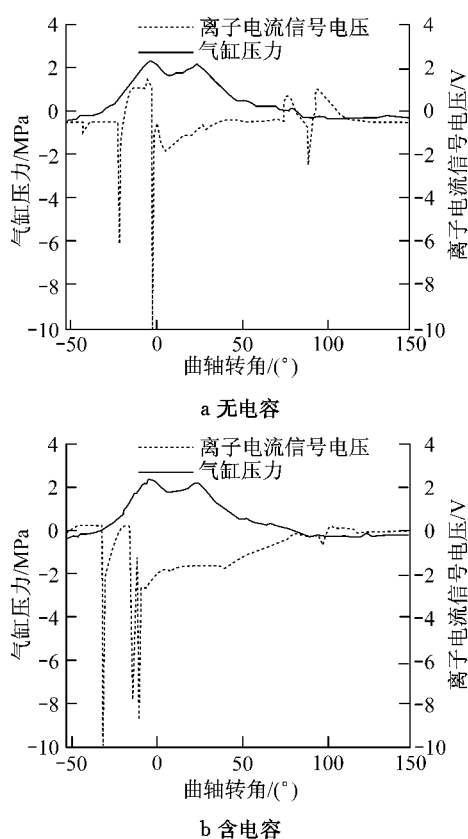


图4 电容对点火放电抑制效果

Fig.4 Inhibitory effect of capacitance on ignition discharge

图5a为仅有点火放电无燃烧时,采用了上述3种不同电容后的离子电流波形对比。从图中可看出,当采用容抗为1 pF的电容时,点火后的离子电流波形与图4中未使用陶瓷电容时差别较小,说明点火干扰的影响仍然存在。而在电容增大到5 pF时,信号波形的持续期明显缩短,点火放电后电压快速下降到接近0的位置,这表明点火的影响得到了明显抑制。当采用10 pF电容时,可以看到信号波形与采用5 pF电容时差异较小,说明电容的进一步增大对信号的影响已不显著。在燃烧边界条件相同的情况下,图5c给出了采用上述3种电容后的信号波形对比。从中可以看出,当容抗为1 pF时,离子电流被点火干扰信号淹没。当采用5 pF电容时信号波形的持续期已经明显缩短。而当电容容量增大到10 pF时,离子电流信号持续期会随之继续减小,说明电容的引入不但抑制了点火放电干扰,也影响到燃烧引起的离子电流波形,这就使得离子电流信号难以准确反映缸内燃烧过程自由离子生成的实际情况,降低了通过该信号检测燃烧状态的能力。

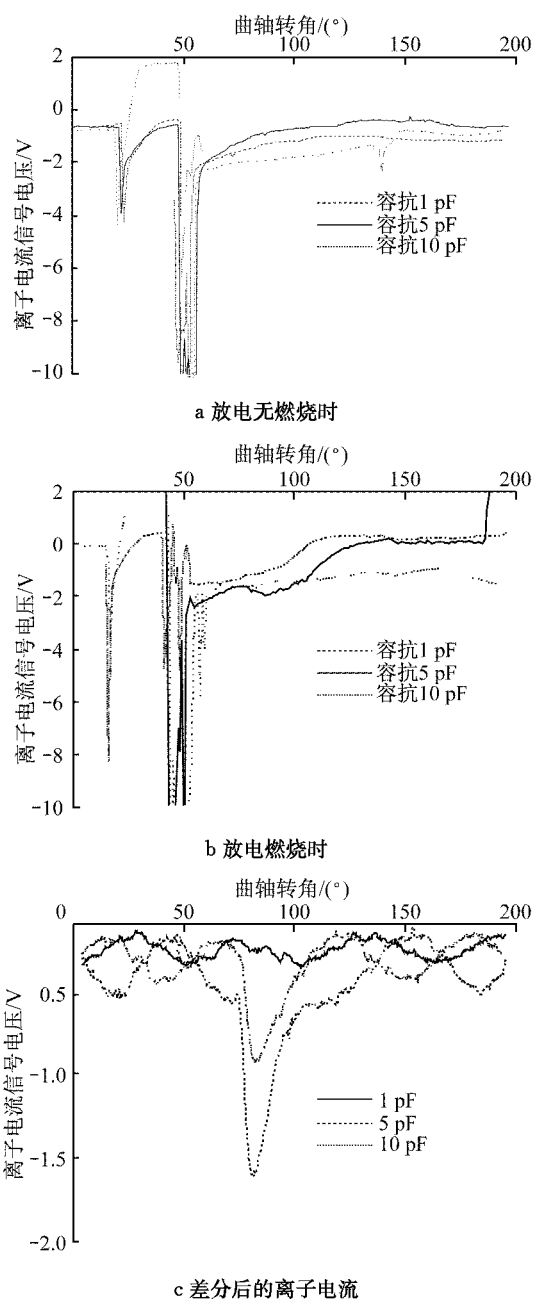


图5 电容容量对点火放电隔离效果

Fig.5 Isolation effect of capacitance on ignition discharge

综合上述分析,在本研究所采用的离子电流检测电路中,均采用了5 pF的陶瓷电容来对点火放电干扰加以抑制。

2.2 RC低通滤波

由于试验采用的发动机台架系统及试验环境具有一定的背景干扰,为了更好地过滤出离子电流信号,因此在信号输出电路中添加RC(resistance-capacitance)滤波电路,将高频的背景干扰给过滤掉。RC低通滤波器接在电路中,按其结构可分为L形、Π形和T形,如图6所示。具有滤去高频,阻止低

频信号易通过的性能^[9]. 其传递函数为 $A(S)=1/(1+SRC)$. 其中: S 表示复变量, R 为电阻阻值, C 为电容容量. 滤波频率与电路中的电阻和电容大小有关, 关系为 $f=1/RC$. 本试验进行无 RC 滤波与滤波频率分别为 1, 2 和 5 kHz 的图 6 中 L 形 RC 低通滤波器对比试验研究, 结果如图 7 所示. 从图中可以看出, 在没有采取 RC 滤波的情况下, 离子电流出现明显的振荡, 在采用 RC 滤波后, 振荡消失, 但是随着滤波器的滤波频率增加, 滤波效果降低, 当滤波频率为 1 kHz 时, 滤波效果最佳. 可见, RC 滤波电路的滤波频率需要在背景干扰频率附近, 滤波效果才能达到最佳.

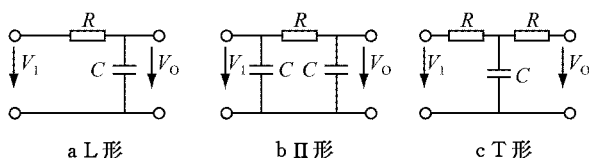


图 6 RC 低通滤波器
Fig.6 RC low-pass filter

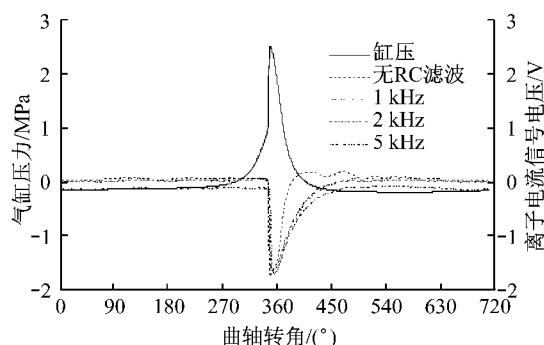


图 7 RC 滤波器对离子电流的作用
Fig.7 RC filter's influence on ion current

2.3 电阻法与电容法检测

2.3.1 电阻法

由于缸内燃烧产生的离子在外界电场的作用下做定向移动形成的离子电流只有 μA 级别, 因此在电流回路上串联较大的电阻进行信号放大处理, 并测量其两端的电压来表示缸内的燃烧信息, 其检测原理简图如图 8 所示.

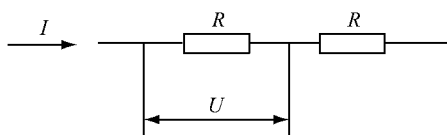


图 8 电阻法检测原理简图
Fig.8 Principle diagram of Resistance detection

根据这一原理, 电阻的大小很大程度上直接反映缸内产生的离子电流强度, 图 9 根据不同电阻阻

值对离子电流大小的影响进行试验的结果, 本试验采用的是 4 个 270 k Ω 串联电阻. 随着电阻阻值的增大, 离子电流信号电压逐渐增加.

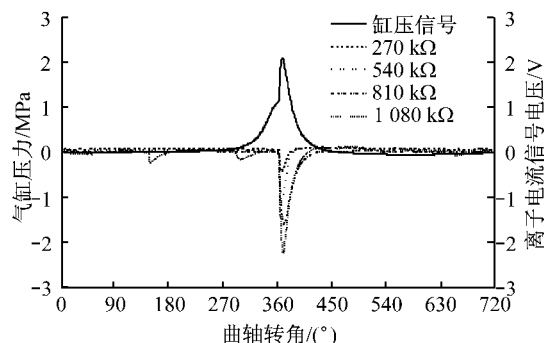


图 9 电阻阻值对离子电流大小的影响
Fig.9 Resistance influences on ion current

2.3.2 电容法

由于电容本身具有滤波作用, 为了简化检测电路的结构, 采用电容替代待测电阻作为检测离子电流信号的对象, 串联在整个检测电路中, 其检测原理简图如图 10 所示. 图中, C 为电容, E 为电势差, U 为端电压.

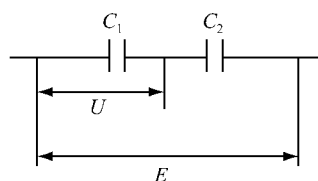


图 10 电容法检测原理简图
Fig.10 Principle diagram of capacitance detection

把 4 个均为 1 000 pF 的电容进行串联, 分别测量 1, 2, 3, 4 个电容的端电压, 分析电容容量的大小对离子电流的影响, 并对所测得的端电压最大值进行线性拟合发现, 电容的数量与离子电流的关系呈现出很好的线性关系. 试验结果分别如图 11 和 12 所示.

2.3.3 电阻法与电容法对比

电容与电阻相比, 具有一定的滤波和储能特性. 采用的电阻为 270 k Ω , 电容为 220 pF, 在发动机处于正常燃烧状况下进行对比试验, 结果如图 12 所示. 在相同的缸内燃烧状态下, 电阻法所测得的离子电流信号电压强度比采用电容时所检测到的要强. 由于离子电流并非交流电, 电容的容抗会对其产生一定的阻碍作用, 因此测得的信号幅值比起电阻分压得到的信号幅值要小. 但是从背景的干扰影响来看, 采用电阻分压时, 未燃烧时信号的震荡干扰明显比采用电容时的信号要大, 这是由于电容本身具有

的滤波特性所致.所以,采用电容分压可以减小背景干扰,但是同时也减小了离子电流信号电压的强度.

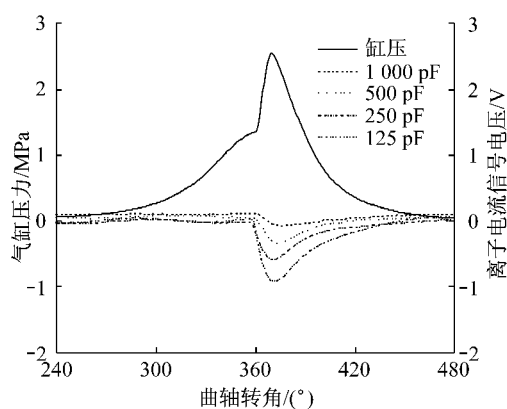


图 11 电容容量对离子电流大小的影响

Fig. 11 Capacitance influence on ion current

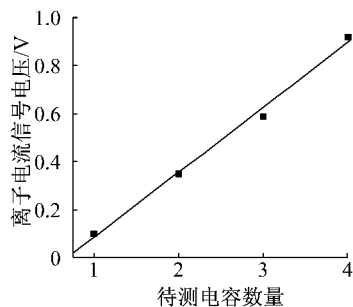


图 12 电容数量与离子电流幅值关系

Fig. 12 Relationship between capacitance and ion current amplitude

在发动机工作过程中,避免不了爆震现象的发生.为此进行发动机处于爆震燃烧状况下的电阻法与电容法对离子电流信号的检测效果,试验结果分别如图 13 和图 14 所示.

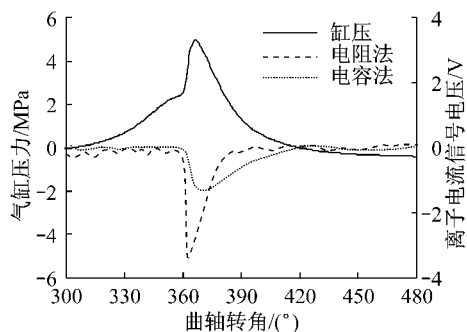


图 13 正常燃烧时离子电流检测方法对比

Fig. 13 Comparison of ion current detection methods during normal combustion

从图 14 中可以发现,由于电容其自身的滤波特性,当发生爆震燃烧时离子电流出现震荡现象,电容对该信号进行了滤波,不能直观地反映该现象,而电

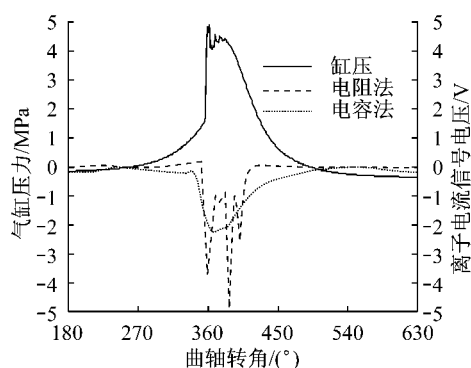


图 14 爆震燃烧时离子电流检测方法对比

Fig. 14 Comparison of ion current detection methods during knock combustion

阻不存在滤波能力,所以使采用电容法对爆震信号的检测和分析明显变得困难.

2.4 软件消除零点漂移

零点漂移是指当放大电路输出信号为零时,由于受温度变化,电源电压不稳定等因素的影响,使静态工作点发生变化,并被逐级放大和传输,导致电路输出端电压偏离原固定值而上下漂动的现象^[10].

在有些情况下用硬件的方法是可能完全满足系统的要求的,必须结合软件的方法才能更好地达到系统的要求.去除采集信号中零点漂移的软件方法有基线去零点漂移和斜率去零点漂移方法,其设计流程如图 15 所示^[11].

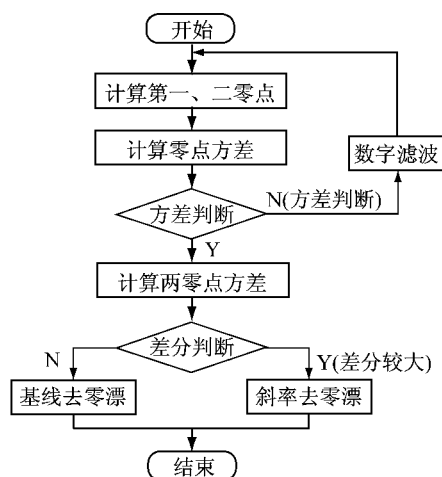


图 15 去除零点漂移的软件设计流程图

Fig. 15 Design flow for the program of zero drift elimination

设采样的时间周期为 T , 采集时长为 t , 触发采集时刻为 t_1 , 结束采集时刻为 t_2 , 总采集样本数目为 N . 设第一零点的均值 μ_{x1} 与第二零点的均值 μ_{x2} 之间的平均值为 μ_{x12} , 当两零点之间的差分 δ_{12} 的值小于均值 μ_x 的 2% 时, 意味着第一零点与第二零点基本

上处于同一水平,此时采集系统中存在基线零点漂移.然则,系统存在斜率零点漂移.则去除基于基线的零点漂移后采样信号 $y(i)$ 为

$$\delta_{12} = \frac{1}{2}(\mu_{x_1} - \mu_{x_2}) \quad (1)$$

$$\mu_{x_{12}} = \frac{1}{2}(\mu_{x_1} + \mu_{x_2}) \quad (2)$$

$$y(i) = x(i) - \mu_{x_{12}}, i = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

如果信号采集系统中存在斜率漂移,则零点漂移随采集的时间以一定的斜率变化.根据第一零点与第二零点,求得斜率 k

$$k = \frac{1}{NT}(\mu_{x_2} - \mu_{x_1}) \quad (4)$$

则去掉基于斜率的零点漂移后采集信号 $y(i)$ 为

$$y(i) = x(i) - (kT + \mu_{x_1}), i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

图 16 为当发生漂移以后,根据去除零漂软件设计程序所获得的对比试验.从图中可以看出,采样离子电流发生了约 2.5 V 的基线漂移.采用零点漂移处理后获得了较好的离子电流信号.

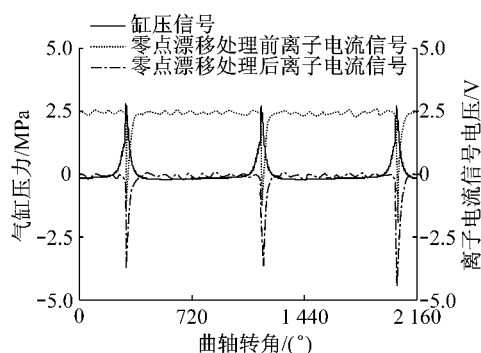


图 16 离子电流信号零漂处理前后对比

Fig. 16 Ion current before and after zero drift elimination

3 最终设计方案

离子电流检测电路主要包括外接偏置电源、高压隔离装置、分压电路以及信号预处理电路等组成部分.其中,高压隔离电路由高压硅堆和的高压电阻组成,硅堆型号为 2CL2FK,反向击穿电压为 40 kV,将其与 10 MΩ 高压电阻并联,其作用是防止点火系统点火线圈放电瞬间所产生的高压损害检测系统.为了抑制点火放电干扰,在次级线圈与火花塞间串联了一个 5 pF 的陶瓷电容消除点火次级线圈震荡而引起的负面影响.偏置电源的作用为产生 0~800 V 的可调的直流电压,使得缸内的自由离子产生定

向移动.分压电路由分压电阻与被测电阻组成, R_1 为分压电阻, R_2 表示被测电阻,通过调节二者的大小以获得适当电压范围内的离子电流信号.此外,在进行信号采集过程中采用了软件消除零点漂移处理技术.检测系统结构图如图 17 所示.

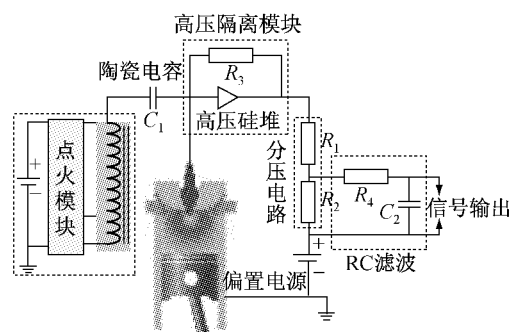


图 17 离子电流检测系统示意图

Fig. 17 Configuration of ion current detection system

4 台架结果分析

本研究通过改造一台双缸柴油机,其中一缸通过进气加热方式实现了汽油 HCCI 燃烧.发动机参数如下:冲程,4;单缸排量,0.808 L;缸径,95 mm;行程,114 mm;压缩比,13.8 : 1;每缸气门数,2;燃油喷射方式,进气道喷射;喷射压力,0.3 MPa;燃油,97# 无铅汽油.利用优化后的电阻法离子电流检测系统,针对 HCCI 燃烧临界工况进行了离子电流检测试验研究.图 18 为试验台架系统示意.发动机空载转速为 1200 r · min⁻¹,冷却水温 60 °C,离子电流偏置电压 500 V,试验结果如图 19 所示.

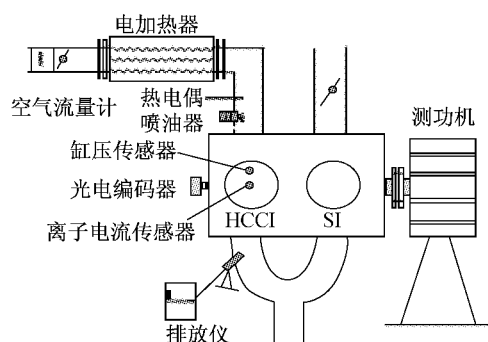


图 18 试验台架系统示意图

Fig. 18 Engine test bench setup

从图 19 中可以发现,在连续的 3 个正常燃烧循环中,离子电流的最大值和气缸压力峰值呈现很好的对应关系,由于实施了以上所述抗干扰方法,点火放电干扰得到了很好的抑制,高压隔离模块对整个

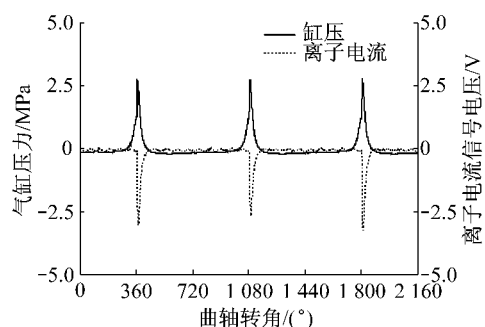


图19 离子电流检测信号

Fig.19 Ion current detection signal

数据采集系统实行了很好的保护,当初始检测信号发生漂移时,由于采用了软件消除零点漂移方法,消除了离子电流出现零点漂移现象。

5 结论

经过对整个离子电流检测系统进行抗干扰设计,在基于 HCCI 发动机台架离子电流检测试验,获得了信噪比很高的信号;电容对点火放电过滤效果显著,高压隔离模块对整个检测系统和采集系统进行了很好的保护;在发生爆燃时利用电容法检测的离子电流不能反映缸内爆震燃烧状态;采用软件消除零点漂移可以很好地防止零漂。

参考文献:

[1] Ashish Gupta. Measurement and analysis of ionization current signal in a single cylinder diesel engine[D]. Detroit: Wayne State University, 2008.

[2] Ville Vartiomaara. DIY ion sensing ignition subsystem[J]. DIY Ion Sensing Ignition Subsystem, 2002(2): 3.

[3] 杜义辉. 汽车电磁兼容技术不容忽视[J]. 中国电子商情, 2008(6): 40.

DU Yihui. Automotive EMC technology can not be ignored [J].

China Electronic Trade, 2008(6): 40.

- [4] 陈渝光. 汽车电器与电子设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- CHEN Yuguang. Automotive electrical and electronic equipment [M]. Beijing: China Machine Press, 1991.
- [5] 汪泉弟, 刘庆生, 贾晋, 等. 抑制汽车点火系统电磁干扰的光电隔离方法[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 14.
- WANG Quandi, LIU Qingsheng, JIA Jin, et al. The optical isolation method of suppressing electromagnetic of automotive ignition system [J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 14.
- [6] 董光宇. 基于缸内燃烧循环的离子电流燃烧检测与反馈控制研究[D]. 上海: 同济大学汽车学院, 2010.
- DONG Guangyu. Cycle based ion sensing and feedback control for gasoline engines [D]. Shanghai: College of Automotive Studies of Tongji University, 2010.
- [7] 吴筱敏, 李福明, 余鹏. 干扰及偏置电压对火花塞检测信号影响的试验研究[J]. 内燃机工程, 2001, 22(4): 55.
- WU Xiaomin, LI Fuming, YU Peng. Experimental study on influence of interference and bias voltage on detective signal of spark plug [J]. Internal Combustion Engineering, 2001, 22(4): 55.
- [8] 李树洲, 桑怀胜. 卫星导航接收机抗干扰性能评估方法研究[J]. 无线电工程, 2006, 6(9): 37.
- LI Shuzhou, SANG Huaisheng. Study of the anti-jamming performance evaluation methods for satellite navigation receiver [J]. Radio Engineering, 2006, 6(9): 37.
- [9] 王幸之. 单片机应用系统电磁干扰与抗干扰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- WANG Xingzhi. Electromagnetic interference and jamming technology of microcomputer application system [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.
- [10] 姚娅川, 罗毅. 模拟电子技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- YAO Yachuan, LUO Yi. Analog electronics technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [11] 张春飞, 罗家融. 软件去除零点漂移的讨论[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(7): 684.
- ZHANG Chunfei, LUO Jiarong. Discussion on the method of eliminating zero-offset based on software [J]. Computer Measurement and Control, 2004, 12(7): 684.