关于火花塞离子流幅度的影响因素和变化规律的试验

孙跃国[1],袁兆成[1],刘 翀[1,2],李丽颖[3]

(1.吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室,长春 130022;2.潍柴动力股份有限公司 中速机厂,山东 潍坊 261001;3.吉林师范大学 计算机学院,吉林 四平 136000)

摘 要:通过优化火花塞离子流检测电路,抑制了点火高压所产生的高频高压干扰,得到了幅度在0.3~3.2 V量级的稳定离子流信号。分别更换了3种不同的火花塞,在发动机不同转速、不同负荷情况下采集离子流信号,对这些信号的幅度进行分析对比。经对比发现,离子流信号幅度受火花塞参数影响较为明显,并且基本上随转速、负荷的增加而增强。最后,分析了离子流信号幅度受火花塞参数、发动机转速和负荷等因素影响的原因。

关键词:车辆工程;火花塞离子流幅度;火花塞参数;发动机转速;发动机负荷

中图分类号:U41 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-5497(2011)Sup.1-0041-06

Experiment on influence factors and variety rules of spark plug ion-current signals amplitude

SUN Yue-guo[1],YUAN Zhao-cheng[1],LIU Chong[1,2],LI Li-ying[3]

(1.*State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control*,*Jilin University*,*Changchun* 130022,*China*;2.*Weichai Power Co*,*LTD*,*Weifang* 261001,*China*;3.*School of Computer Science*,*Jilin Normal University*,*Siping* 136000,*China*)

Abstract:By optimizing the detecting circuit of spark plug ion-current, the high frequency and high voltage interference generated by the high ignition was successfully controlled and the stable ion-current signals within the range of 0.3~3.2 V were obtained. In the testing process, three kinds of spark plugs were used and their ion-current signals at different engine operating condition (different engine speeds and loads) were gathered. By comparing these three different signals, it is obvious that the ion-current amplitude is influenced by spark plug's parameters, and also generally is intense with the increase of engine speed and load. And finally, the influences of spark plug parameters on ion-current signal amplitude were analyzed.

Key words:vehicle engineering;ion-current signals amplitude;spark-plug's parameters;engine speed;engine load

收稿日期:2010-04-27.

基金项目:"863" 国家高技术研究发展计划项目(2006AA110102-3).

作者简介:孙跃国(1971-),男,博士研究生.研究方向:内燃机现代设计理论与方法.E-mail:slylgy@126.com

通信作者:袁兆成(1954-),教授,博士生导师.研究方向:内燃机现代设计理论与方法.E-mail:yuanzc0528@126.com

0 引 言

气缸内混合气燃烧时,燃烧火焰除了发出光和热外,还显现出强烈的离子化,即使在大气压下,离子浓度也会高达 10^{10}～10^{13} 个/cm^3,燃气中的高离子浓度区域仅局限于火焰带这个狭窄的反应区域内[1]。因此,如果此时在火花塞电极上加一偏置电压,离子就会在电场的作用下,在火花塞电极间隙间流动,从而形成离子流,通过一定的电路就可以观察并测量离子流[2]。1993 年,Miyata 等发表了通过检测流经火花塞电极的离子电流的密度的变化对发动机工作过程进行分析的报告[3];1995 年 Auzins 等发表了利用火花塞离子流检测发动机失火、爆震的研究论文[4]。到目前,关于火花塞离子流的分析检测技术已经被成功用于发动机的爆燃和失火探测中。另外,利用离子流信号对缸内局部空燃比反馈、燃烧缸压峰值位置以及燃烧正时等发动机工作参数精密分析的研究也在不断展开[5]。火花塞离子流信号所携带的有用信息,具有采集准确、实时、直观、成本低廉、无需修改发动机等特点[6],为优化发动机控制提供了非常有利的条件。因此,分析和研究火花塞离子流的影响因素以及变化规律具有重要意义。根据国内外研究者的研究经验和结论,检测电路中的偏置电压、火花塞电极面积、缸内温度与压力、混合气浓度、缸内气流运动、燃油添加剂成分等多种因素,均会对离子流产生影响。本文重点研究了当发动机的火花塞放电形式、电极面积、发动机转速以及油门开度等参数发生改变时,对离子流信号的影响问题,并分析得到了一些规律性结论。

1 离子流的检测原理与试验台架

1.1 离子流检测的基本原理

理论和实践证明,汽油机气缸内混合气燃烧过程中的基本化学反应方程式[4]为

$$C_mH_n+(m+n/4)O_2\longrightarrow mCO_2+(n/2)H_2O$$

典型的化学反应为

$$CH+O\longrightarrow CHO^++e^-$$

$$CHO+H_2O\longrightarrow H_3O^++CO+e^-$$

$$CH+C_2H_2\longrightarrow C_3H_3^++e^-$$

同时,燃烧过程还将产生大量诸如 CH_3^+、CH_3O^+、$C_3H_3^+$、H_3O^+、NO^+ 等导电粒子。

本试验的离子流检测电路原理图如图 1 所示。高压硅堆 D_2、R、350 V 电源和火花塞构成离子流检测回路,350 V 偏置电压经过 D_2、R 加于火花塞两个电极上,可使火花塞两极间隙形成电场,引起导电粒子发生定向移动形成离子电流,此电流流经采样电阻 R,就可以检测到离子流电压信号。高压二极管 D_1 用于防止 350 V 电压进入高压点火线圈,D_2 用于防止高压点火脉冲进入离子流检测回路。试验中,利用图 1 所示的电路,在采样电阻上得到了幅度为 0.3～3.2 V 的稳定离子流信号。

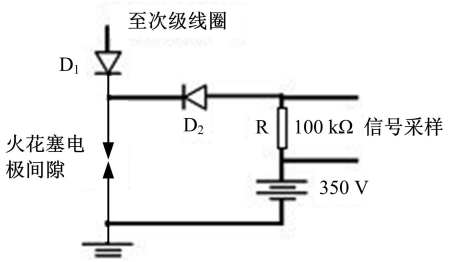


图 1 离子流检测电路

Fig.1 Ion current detection circuit

1.2 试验台架及离子流信号检测仪器

试验采用电喷、两气门、欧Ⅲ排放标准、1.6 L 排量的汽油发动机,高压点火系统采用两缸共用一个点火线圈串联点火的方式。使用航天数据技术有限公司生产的动态信号采集分析系统采集数据。数据全部在发动机热机之后,在第四缸上采集。测功系统采用南丰 160 kW 电涡流测功机。

2 离子流的波形

2.1 高压点火系统次级线圈点火波形

利用高压点火脉冲示波器所看到的次级点火波形如图 2 所示。

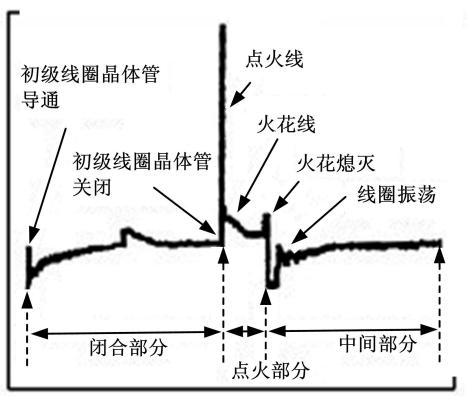


图 2 次级线圈点火波形

Fig.2 Subprime coil ignition waveform

波形分成 3 个部分：一是闭合部分，这段时间初级线圈晶体管导通，次级线圈开始出现感应电流并储存能量。二是点火部分，包括点火线和火花线，点火线是指在晶体管关闭时刻在次级线圈内感应出的宽度很窄的高压脉冲，它是火花塞实现打火放电、穿透火花塞空气间隙瞬间火花塞两电极间的电压，这一电压的幅度一般在十几到几十千伏，持续时间极为短暂，击穿后，火花塞间隙的阻抗迅速下降，导致两极间的电压也迅速下降；火花线则是在火花塞间隙被点火线击穿后，继续维持火花塞电极打火放电的两极间电压，幅度大约 1000 V 左右，其持续的时间与气缸内混合气浓度有密切关系，一般情况下为 0.75～2 ms（少于 0.75 ms 表明混合气过稀；超过 2 ms 表明混合气过浓），在持续时间内波形较为平坦。三是中间部分，这一部分表示火花塞两电极打火放电结束后，次级线圈中剩余的能量耗散过程，这些能量通过从次级线圈到初级线圈之间的来回振荡来耗散。

2.2　采集到的次级线圈点火波形及离子流波形

采样电阻 R 上采集的压缩与排气两冲程中，次级线圈点火波形和离子流波形如图 3 所示，由图可见，以“火花熄灭时刻”为界，信号波形分为次级线圈点火阶段和离子流阶段。

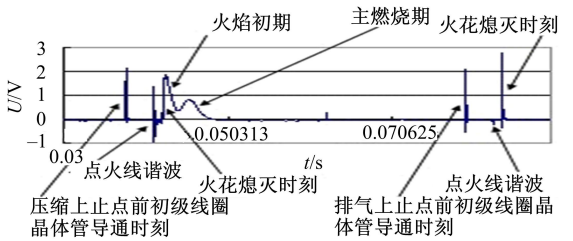


图 3　典型的次级线圈点火波形及离子流波形

Fig.3　Typical subprime coil ignition waveform and ion current waveform

2.2.1　R 上采集的次级线圈高压点火波形分析

压缩冲程时，在电阻 R 上得到的次级线圈点火阶段是指从“压缩上止点前初级线圈晶体管导通时刻”开始，到“火花熄灭时刻”为止，排气冲程与此相似。结合图 1 与图 2，由于 D_2 的单向导通作用，当图 2 所示的高压点火波形加于图 1 所示电路时，图 2 中的所有正向电压脉冲基本上都将被 D_2 隔离掉，而图 2 中晶体管导通时刻与火花熄灭时刻出现的负向脉冲，将会穿过 D_2 在采样电阻 R 上产生电压信号，如图 3 中所标注的“压缩上止点前初级线圈晶体管导通时刻”和“火花熄灭时刻”的脉冲所示。

在压缩冲程上止点前，由于缸内气体压力大，所以火花塞电极间隙很难被击穿放电，这一点火击穿电压（即点火线）的幅度大约十几到几十千伏。由于点火线电压很高而且很窄，所以会有大量的高频谐波产生，而硅堆的隔离频率是有上限的，超过硅堆的隔离频率，则硅堆的单向导通作用就会降低甚至消失，因此点火线的一些高频谐波就可以穿过硅堆，图 3 中点火线谐波既有正的又有负的电压，就是高频谐波正负半周都可以穿过硅堆的结果。

在排气冲程的上止点前，由于试验用发动机的高压点火系统采用两缸共用一个点火线圈串联点火的方式，所以在排气冲程的上止点前，火花塞依然会打火放电。此时，由于气缸内压力小，火花塞电极间隙很容易被击穿，这一电压的幅度大约在 1000 V 左右，由于这一电压低，高频谐波成分少、幅度低，所以基本上被高压硅堆隔离掉，图 3 中只能看到幅度很小的点火线谐波。

图 2 中标注的“中间部分”，由于线圈振荡的信号幅度较小，通过图 3 中排气上止点前的次级线圈点火波形来看，在测试仪器上没有明显的显示。

2.2.2　R 上采集的离子流波形分析

图 3 显示，离子流波形阶段分为火焰初期和主燃烧期两部分[7]。

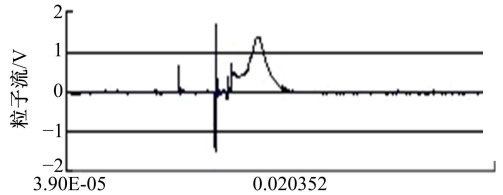
火焰初期是指在电极附近形成火焰这一段时间。此阶段离子的产生是由于火花塞电极之间的高压电解反应而产生，主要以化学反应过程为主，产生诸如 CHO^+、$C_3H_3^+$、CH_3^+、H_3O^+、NO^+ 等离子团[8]，其中以 CHO^+ 和 $C_3H_3^+$ 为主要成分。这时测得的离子流称为化学离子流。

主燃烧期是指火焰从火焰中心向外传播，大量混合气参与燃烧，缸内压力急剧升高的阶段。此阶段离子的产生，主要以高温高压而导致的缸内混合气热电离为主，其中又以 NO^+ 为主要成分。这一阶段持续的时间更长，发动机工作时的信息大多携带在这一时期。气缸内压力越大、温度越高，则单位空间体积内 NO^+ 的数量也就越多，这时测得的离子流称为热力学离子流。

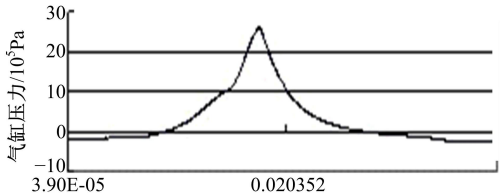
本文主要讨论与主燃烧期对应的热力学离子流。

因为汽油机接近等容燃烧，缸内最高温度几乎与最大压力同时出现，因此气缸内的压力峰值

与离子流的峰值在时间上同时出现。试验中所测得的波形如图4所示,图(a)为离子流,图(b)为气缸压力,软件分析显示主燃烧期的离子流峰值与气缸压力峰值(即横坐标值)同时出现,均出现在0.0179 s。



(a)离子流



(b)气缸压力

图4 气缸压力与离子流在时间上的对应关系

Fig.4 Corresponding relationship between cylinder pressure and ion current in time

3 试验中所采用的火花塞

3.1 用于比较的三种火花塞

三种放电形式的火花塞包括:a火花塞是中心电极侧面间隙放电(三个负极);b火花塞是中心电极侧面间隙放电(缸压传感器);c火花塞是中心电极顶面间隙放电,如图5所示。



图5 三种不同的火花塞

Fig.5 Three different spark plugs

3.2 三种火花塞的放电形式以及电极面积

本文重点要研究的内容(同时也是三种火花塞的主要区别)是火花塞放电形式以及电极尺寸对离子流信号的影响。三种火花塞的电极面积见表1。经测量,图5所示3种火花塞中心电极直径均与侧电极宽度相同,所提电极面积对a、b火花塞是指放电间隙处侧电极正对中心电极部分的侧电极的面积,对c火花塞是指放电间隙处圆柱形中心电极的横截面积。从理论上来说,电极面积大,则在两电极间电场强度相同、单位空间体积离子数量也相同的情况下,可以截获更多定向移动的离子,因而离子流信号会更强。

表1 火花塞电极尺寸参数

Table 1 Parameters of spark plugs electrode

火花塞	a	b	c
电极面积/mm²	12.67	2.65	5.72
电极间隙/mm	0.82	0.56	0.28

4 各火花塞离子流随负荷和转速的变化关系

试验中为了分析火花塞放电形式和电极面积对离子流的影响,分别在发动机第四缸上更换三种不同的火花塞,每一种火花塞分别在发动机转速1500、2500、3500 r/min三种情况下,每一转速又分别选取30%、50%和70%油门开度,分别测得离子流波形。然后,在DDP3数据波形分析软件上从零时刻开始,连续选取相邻8个周期的离子流波形,分别测量这8个周期的主燃烧期波峰的电压,然后求出其平均值。

试验中采用的是电控发动机,空燃比近似为1。发动机1500 r/min时,对应不同节气门开度,采用三种不同的火花塞发动机输出扭矩对比见表2。发动机2500、3500 r/min时,相同油门开度情况下,采用不同的火花塞,发动机输出扭矩差别也不大。

表2 1500 r/min采用不同火花塞及不同油门开度时发动机输出扭矩

Table 2 Engine output torque(N·m)using different spark plugs and throttle angles at speed of 1500 r/min

N·m

火花塞	油门开度/%		
	30	50	70
a	95.5	100.2	107.7
b	90.5	98.0	103.2
c	93.8	104.9	106.1

所选的8个周期,b火花塞所测气缸内的压力峰值的平均值如表3所示。

表3 不同转速及油门开度时缸压峰值平均值

Table 3 Average cylinder peak pressure at different speed and throttle angles **10^5 Pa**

转速/(r·min⁻¹)	油门开度/%		
	30	50	70
1500	24.1	28.7	34.1
2500	25.8	30.2	35.2
3500	27.3	32.3	38.1

4.1　各火花塞离子流的试验结果

4.1.1　a 型火花塞的离子流

不同转速、三种油门开度时,a 型火花塞的离子流测量结果如图 6 所示。不同转速及油门开度时发动机扭矩输出数值见表 4。

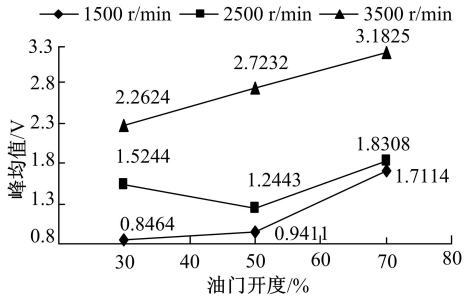


图 6　a 型火花塞离子流随转速、负荷的变化

Fig.6　Ion current changes with engine speed and load using type a spark plugs

表 4　采用 a 型火花塞发动机不同转速输出扭矩

Table 4　Output torque at different engine speed using type a spark plugs　　N·m

转速/(r·min^{-1})	油门开度/%		
	30	50	70
1500	95.5	100.2	107.7
2500	81.6	116.5	118.3
3500	66.9	124	126.6

从图 6 中明显看出,同一转速下,a 型火花塞的离子流强度随着负荷的增加呈现总体变大的趋势。而在不同发动机转速时,随着转速的增加,离子流幅度显著增强。

4.1.2　b 型火花塞的离子流

不同转速时发动机扭矩输出数值与表 4 相差不大。b 型火花塞的离子流测量结果如图 7 所示。

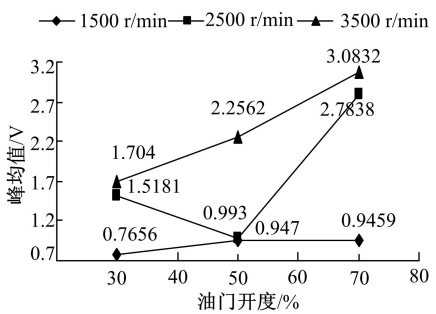


图 7　b 型火花塞离子流随转速、负荷的变化

Fig.7　Ion current changes with engine speed and load using type b spark plugs

b 型火花塞离子流的变化总体来说与 a 型相似,仅仅是 2500 r/min、50% 油门开度时所测离子流强度有突变。

4.1.3　c 型火花塞的离子流

不同转速下,三种油门开度时,发动机扭矩输出数值也与表 4 相差不大。c 型火花塞离子流测量结果如图 8 所示。

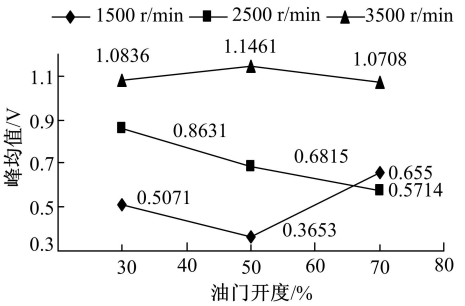


图 8　c 型火花塞离子流随转速、负荷的变化

Fig.8　Ion current changes with engine speed and load using type c spark plugs

一般会认为,相同转速时,随着发动机负荷的增加,缸内压力和温度升高,热电离产生的导电微粒数量变多,离子流的幅度应该变大,但在图 8 中看不到这样的趋势,这一点与 a 型火花塞明显不同。另外,从图 8 可以明显看出,随着发动机转速的增加,离子流强度是增加的,这一点与 a 型火花塞的规律相同。由此看来,离子流强度与发动机转速的对应关系比较明显。

4.2　三种火花塞离子流测试结果的分析

4.2.1　离子流测试结果与发动机转速的关系

从前面的实验数据可以看出,不管是哪一种火花塞,其离子流强度随发动机转速升高而变强,趋势十分明显。经分析认为,产生这样结果的原因是:①当发动机转速升高时,气缸内混合气紊流加强,火焰传播速度提高,使得最高燃烧温度提高;②当发动机转速升高时,燃烧室向冷却水传递热量的时间减少,热力过程的时间损失减少,也促使缸内压力和温度得到提高。前面说过,热力学离子流主要与气缸内的压力和温度有关,因此离子流的强度与转速有着比较明显的对应关系。

4.2.2　离子流测试结果与发动机负荷的关系

当转速保持不变,随着发动机负荷(油门开度)的增加,充量系数快速增加,残余废气系数减少,滞燃期变短,火焰传播速度增加,最高爆发压力、最高燃烧温度都会增加,冷却水的传热损失也会减少,离子流的强度应该得到加强。这个推理在 a 型火花塞的试验结果中得到了很好的验证;在 b 型火花塞的试验结果中基本得到了验证,只

有一个试验点出现例外;在c型火花塞的试验结果中没有什么体现。

对比3个火花塞的结构,a型和b型火花塞都是中心电极侧面间隙放电,间隙的方向与气流的运动方向垂直,电极间的离子团不容易受到气流的干扰,而且a型火花塞的放电面积最大,因此有比较稳定的离子流测试结果,而b型火花塞的放电面积较小,稳定性稍差。c型火花塞是中心电极顶面放电,间隙的方向平行于气流方向,容易受到气流运动的干扰,所以导致离子流的测试结果不如其他两种火花塞稳定。

5 结 论

(1)离子流幅度随着发动机转速的升高呈现出变大的趋势。在同一转速下,多数情况下离子流随着油门开度增大而变大,少数情况相反。

(2)相同油门开度和转速时,中心电极顶面间隙放电形式的火花塞所产生的离子流幅度,小于中心电极侧面间隙放电形式的火花塞,并且当油门开度和转速发生变化时,离子流的变化幅度也小。

(3)相同油门开度与转速时,同样是半沿面间隙放电形式的火花塞,电极面积越大则离子流就越稳定,并且当油门开度和转速发生变化时,其离子流幅度的变化会更平稳,会更有利于后续的处理。

参考文献:

[1]潘慕绚,黄金泉,郭伟.基于离子电流的高温压力传感器机理研究[J].传感器与微系统,2008,27(7):44-47.
Pan Mu-xuan, Huang Jin-quan, Guo Wei. Study on mechanism of high temperature pressure sensor based on ion current[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(7): 44-47.

[2]李建文,刘书亮,王天友,等.点燃式发动机火花塞离子电流的数学模型[J].天津大学学报,2006,39(增刊):66-70.
Li Jian-wen, Liu Shu-liang, Wang Tian-you, et al. Mathematical models of spark plug ion current in SI engine[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(Suppl.): 66-70.

[3]Miyata Shigeru, Ito Yasuo, Shimasaki Uyichi. Flame ion density measurement using spark plug voltage analysis[C]// SAE Paper 930462.

[4]Auzins John, Johansson Hasse, Nytomt Jan. Ion-gap sense in misfire detection, knock and engine control [C]// SAE Paper 950004.

[5]董光宇,于水,张旭升,等.基于燃烧离子传感技术的发动机指示转矩实时估计[J].汽车工程,2008,30(7):592-596.
Dong Guang-yu, Yu Shui, Zhang Xu-sheng, et al. Realtime estimation of engine indicated torque based on ionization sensing technology[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(7): 592-596.

[6]Mamoru Hasegawa, Yunchi Shimasaki, Satoshi Yamaguchi, et al. Study on ignition timing control for diesel engines using in-cylinder pressure sensor [C]// SAE Paper 2006-01-0180.

[7]Jürgen Førster, Achim Günther, Markus Ketterer, et al. Ion current sensing for spark ignition engines[C]// SAE Paper, 1999-01-0204.

[8]Huang Yi-qun, Mehta Darius. Investigation of an in-cylinder ion sensing assisted HCCI control strategy [C]// SAE Paper, 2005-01-0068.