

DOI: 10.7652/xjtuxb201511008

采用离子电流法的甲醇发动机失火诊断

高忠权¹, 李春艳¹, 蔺子雨², 冯克夕¹, 刘圣华¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验, 710049, 西安; 2. 河北工业职业技术学院, 050091, 石家庄)

摘要: 在一台由四缸柴油机改装而成的甲醇发动机上, 采用以火花塞作为传感器的离子电流测量法在线获得了发动机正常燃烧和 3 种典型失火工况时的离子电流信号, 分析了它们之间的异同, 给出了 3 种典型失火工况的离子电流信号特征值, 并利用离子电流的焰后区峰值幅值及峰值位置量化了试验用甲醇发动机发生失火的判定依据。结果表明: 当发动机正常燃烧时, 离子电流曲线只含有前锋区和焰后区; 当火焰不能连续传播而引起失火时, 离子电流信号在上止点附近出现若干尖峰; 当断油引起失火时, 离子电流只出现点火信号; 当缓慢燃烧引起失火时, 离子电流波形分别在前锋区和焰后区出现峰值。该结果可为离子电流法在点燃式甲醇发动机中的应用提供理论依据。

关键词: 离子电流; 甲醇发动机; 失火; 在线测量

中图分类号: TK431 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0044-05

Misfire Diagnosis of Methanol Engine with Ion Current Method

GAO Zhongquan¹, LI Chunyan¹, LIN Ziyu², FENG Kexi¹, LIU Shenghua¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Hebei College of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: The ion current signals of normal combustion and three kinds of typical misfire conditions were obtained with ion current method from a methanol engine refitted by a four-cylinder diesel engine, where the spark plug was served as a sensor. A comparative analysis of shapes was carried out between the ion current signals obtained under normal and abnormal combustion conditions. Analyzing their similarities and differences, the characteristic values of the ion current signals under three kinds of typical misfire conditions were given. The misfire criterion of methanol engine was established according to the peak value and the timing of the peak value of ion current. The ion current curve contains only front flame and post flame under normal condition. When misfire occurs under different operating conditions, the shape of the ion current becomes quite different. The ion current curve possesses a number of peaks as interrupted flame occurs; the ion current just has one peak as fuel is not supplied; for part-combustion, the ion current curve possesses two peaks at the front and post zones. Thus a misfire evaluation criterion is established according to the peak value of post-flame current and appearance of the peaks.

Keywords: ion current; methanol engine; misfire; on-line detection

失火是发动机非正常燃烧的典型现象, 失火严重 时会导致排放中有害气体浓度急速升高、尾气处理装

置中的催化剂“中毒”、发动机输出功率大幅度下降等,失火率达到一定程度时会造成发动机熄火^[1-3]。因此,快速、准确地对发动机失火进行实时在线监测是实现发动机精确抑制失火发生的关键环节。

目前,国内外有关失火检测方法有以下几种:通过比较压力传感器采集到的压力信号与给定的压力阈值来判断失火^[4];通过振动信号的时域、频域或幅值分析来判断失火^[5];根据排气成分的变化判断失火;采用宽带氧传感器进行失火测量^[6-7]。上述方法在应用上均有缺点,即压力传感器成本较高,振动传感器的诊断精度较低,排气组分分析响应滞后。离子电流法是近年提出的一种发动机在线测量方法,其可成功提取发动机工作过程中燃烧室内的压力^[8-9]、混合气空燃比^[10]及非正常燃烧^[11-12]等信息,实现内燃机在线实时测量和燃烧室分缸测量。

以甲醇作为燃料的发动机的常规排放一般要低于汽油机^[13],甲醇通常以掺混的方式应用于汽油机^[14]。虽然关于甲醇发动机燃烧方面的研究较多,但是关于离子电流法在甲醇发动机在线测量的应用研究尚不多见。本文在一台四缸柴油发动机上通过加装点火火花塞、采用直喷纯甲醇形式进行了发动机工作过程的在线测量,同时分析、比较了正常燃烧与 3 种典型失火工况下离子电流信号之间的异同,给出了 3 种典型失火工况下离子电流信号的特征,并利用数学方法给出了发动机发生失火的判断依据,以期离子电流法在甲醇发动机上的应用提供理论依据。

1 试验装置及方法

本试验发动机由西安交通大学汽车系的一台 4102QB 型柴油机改装而成,具体参数见文献^[14]。图 1 给出了离子电流测量系统电路图。测量系统的线路从布置在缸盖顶部的火花塞正极上引出,连接了具有高截止电压的高压硅堆、直流-直流型偏置直流电源(输入电压为 12 V、输出电压为 400 V)、分压电阻 R_2 ($R_2=100\text{ k}\Omega$) 及分压电阻 R_1 后接地。数字采集仪的探头布置在电阻 R_2 上,以采集离子电流信号。为了抑制环境中的噪声对离子电流信号的干扰,本试验选择了容值为 $22\text{ }\mu\text{F}$ 的滤波电容且并联在 R_2 两端,火花塞负极与发动机机体连接并共接地。试验采用了日本横河(Yokogawa)数据采集设备,型号为 DL750,其具有多个采集通道,可同时记录离子电流、压力与曲轴转角信号。试验发动机的燃料为纯甲醇。

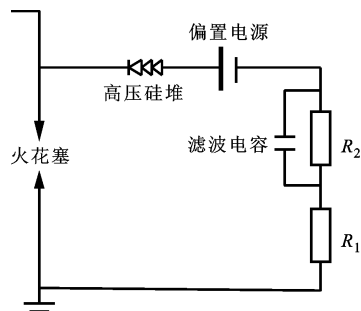


图 1 离子电流测量系统电路

2 试验结果分析

2.1 甲醇发动机正常燃烧时的离子电流

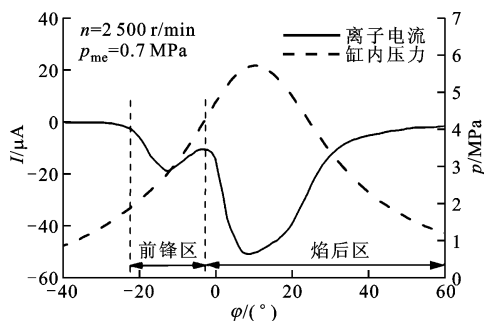
图 2 给出了平均有效压力 $p_{me}=0.7\text{ MPa}$ 、转速为 $2\ 500\text{ r/min}$ 、点火时刻(上止点前)为 22° 及正常工作时的压力和离子电流曲线及其对应的放热率和温度曲线,该曲线值为 100 个循环的平均值。由图 2 可知,离子电流曲线只包括了前锋区和焰后区两个阶段,没有出现点火信号。这是由于本试验采用了基于柴油机改装的点火系统,其高压硅堆为截止电压为 50 kV/A 的大型高压硅堆,可有效阻止点火线圈点火时释放的高电压以及在火花塞两极间产生的高压、高频振荡电压对测量电路的干扰。

从图 2 还可以看出,前锋区始于点火发生后,离子电流从上止点前 22° 开始并逐渐小幅上升,随后缓慢回落至上止点前 3° 。此阶段,电流主要由火核及燃烧前期火焰前锋面内化学离子化过程产生的 CH_3^+ 、 CHO^+ 、 C_3H_3^+ 和 H_3O^+ 以及自由电子等带电粒子形成,其中 H_3O^+ 居首位^[15],该电流反映了火核形成与火焰发展过程中的燃烧信息。

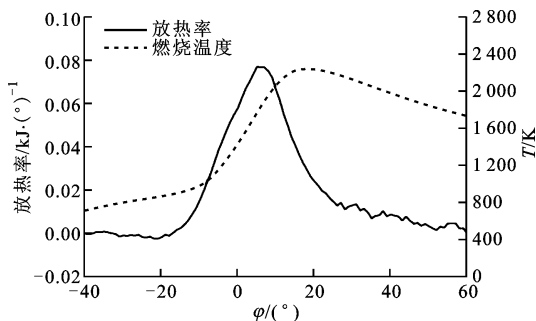
离子电流在上止点前 3° 开始急剧上升,达到峰值后逐渐下降为 0,这一阶段为焰后区。由温度曲线和放热率曲线可知,在上止点前 3° 处温度达到了 $1\ 700\text{ K}$ 左右,放热率开始急剧升高。该阶段离子电流主要由已燃区高温热电离 NO 组分产生的 NO^+ 离子为主导。根据 Zeldovich 理论^[16], NO 组分热电离能最低,一般在 $1\ 650\text{ K}$ 以上 NO 可被热电离成 NO^+ 离子,因此后焰区离子电流主要与缸内温度有关。当缸内压力达到最大时,温度几乎同时达到最高,焰后区离子电流出现最大值。

2.2 甲醇发动机失火时的离子电流

失火的发生方式一般为以下 3 种典型工况:①火焰不能顺利传播引起的失火;②断电引起的失火;③缓慢燃烧引起的失火。本节针对上述 3 种失火进行了测量和诊断。



(a) 离子电流、缸内压力随曲轴转角的变化



(b) 放热率、缸内平均燃烧温度随曲轴转角的变化

图2 离子电流、压力、放热率及缸内平均燃烧温度曲线

2.2.1 火焰不能连续传播引起的失火 图3为火焰不能连续传播引起失火时的离子电流(100个循环平均值)。此失火工况为:发动机转速 $n=1500$ r/min, $p_{me}=0.27$ MPa, 点火时刻 $\theta_{ig}=13^\circ$ (上止点前)。这是由于在优化点火提前角试验过程中点火正时太晚、偏离最佳点火提前角(上止点前 21°)过大,以及点火时火花塞附近的混合气太稀导致部分循环中火焰无法顺利传播所致。但是,发动机并不是在所有循环都会失火,仍有部分循环中的燃烧还在进行,因此发动机仍连续运转。从图3可以看出,失火时离子电流曲线包含了几个很小并且不连续的尖峰,直到上止点附近尖峰消失。根据离子电流检测原理可知,第1个峰值从出现时刻可推断其为点火高压释放后在火花塞两极间产生的振荡感应电势所致;此后出现的2个峰值均为与燃烧相关的离子电流峰值。当火焰无法连续传播,且燃烧无法进行时,缸内温度较低,检测到的信号主要是以火焰前锋区化学离子化产生的带电离子主导的离子电流。图中与燃烧相关的2个峰值信号仅有 $2\mu\text{A}$ 左右,而图2正常燃烧时的在焰后区的离子电流峰值为 $50\mu\text{A}$ 左右,这与混合气有效参与燃烧的质量有关。火核形成但不能发展而导致失火时,参与燃烧的混合气极少,火焰中的离子数大大减少,此时采集到的离子电流峰值远小于发动机正常燃烧时的离子电流峰值。

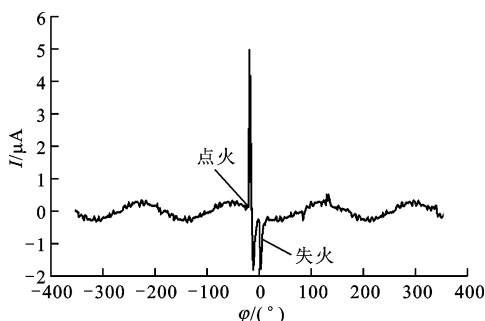


图3 火焰不能连续传播引起失火时的离子电流

2.2.2 断油引起的失火 图4为强制缸内断油(关闭油路)发生失火时测得的离子电流(100个循环平均值)。该工况为电机带动倒拖使发动机连续运转,缸内未发生燃烧。此时,离子电流曲线只包含了1个尖脉冲电流。这既与图2正常燃烧时的点火信号被高压硅堆隔离的离子电流有所不同,也与图3中失火时的离子电流明显不同。其原因为发动机缸内没有甲醇燃料喷入,燃烧室内未发生任何燃烧,所以不存在因燃烧产生的带电粒子。离子电流测量系统检测到的尖峰信号是由点火线圈在点火时释放高压而引起的强感应电势所致。根据文献[5]可知,火花点火发动机点燃时化学当量比下的燃料与空气的混合气所需能量约为 0.2 mJ ,对于偏浓或者偏稀可燃混合气的所需能量要大于 3 mJ ,而常用的点火系统释放的能量约为 $30\sim 50\text{ mJ}$,所以点火时击穿两极间空气的电压会引起两极间产生振荡感应电动势,该电动势幅值较高。

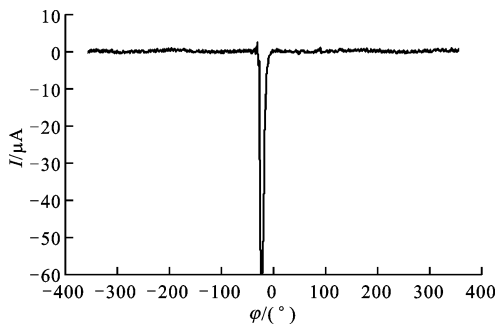
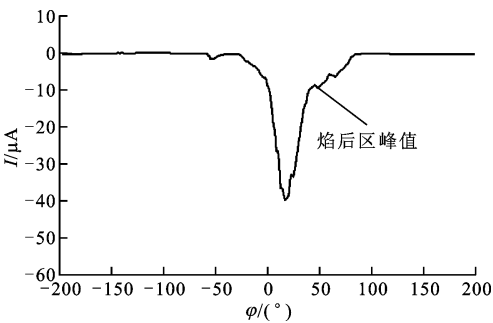


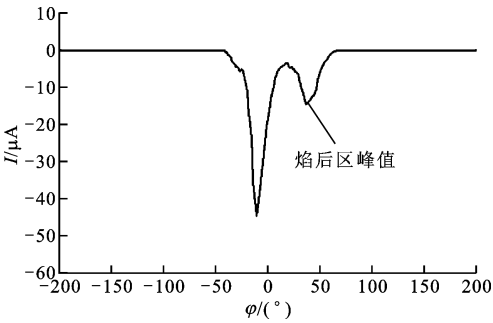
图4 缸内断油引起失火时的离子电流

2.2.3 缓慢燃烧引起的失火 图5为 $n=1500$ r/min、 p_{me} 逐步提高时采集到的几组失火工况的离子电流(100个循环平均值)。

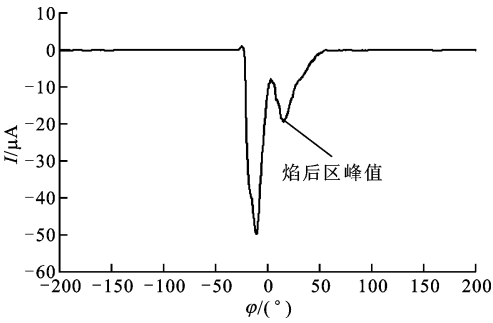
由图5a可以看出, $p_{me}=0.09$ MPa时焰后区离子电流几乎与火焰前锋区合并成一个峰。由于缸内火焰燃烧非常缓慢,缸内压力较小,燃烧室内因平均温度较低而未能使已燃区NO组分发生热电离,因此焰后区离子电流非常小,且焰后区离子电流峰值的出现时刻在上止点后 61° 。由图5b可以看出, p_{me}



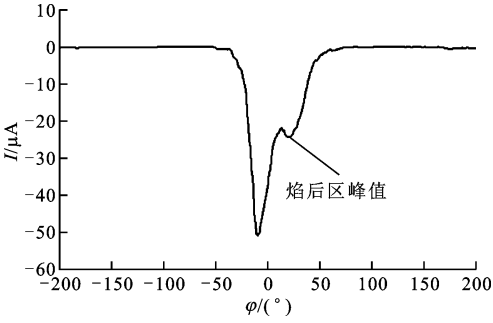
(a) $p_{me}=0.09$ MPa 时的离子电流



(b) $p_{me}=0.45$ MPa 时的离子电流



(c) $p_{me}=0.71$ MPa 时的离子电流



(d) $p_{me}=0.80$ MPa 时的离子电流

图 5 失火工况下的离子电流

MPa 时离子电流呈现明显的前锋区与焰后区峰值,但 2 个峰的距离缩短,2 个峰的幅值均有所增加,这是由压力小幅提高后缸内燃烧温度进一步升高、缸内燃烧速度加快、焰后区出现时刻提前所致。由图 5d 可以看出, $p_{me}=0.80$ MPa 时离子电流仍然呈现前锋区与焰后区 2 个峰,但 2 个峰发生重叠,这是由于压力进一步提高后燃烧温度升高、缸内燃烧速度加快、焰后区与前锋区位置较近所致。

2.3 失火的评价

根据离子电流信号可以判断甲醇发动机是否失火,但失火存在多种情况,因此本节给出了根据离子电流诊断发动机失火的量化方案。

(1)失火率。发动机失火率

$$\eta = \frac{\text{发动机失火的循环数}}{\text{发动机实际工作循环数}} \times 100\% \quad (1)$$

(2)离子电流特征参数。失火时离子电流在焰后区峰值幅值及峰值位置相比于正常燃烧有明显区别,因此可以结合焰后区峰值大小及其出现时刻来诊断发动机失火。定义离子电流特征参数

$$I_M = \max |I_{\text{raw}}| \quad (2)$$

$$t_1 = t(I_M) \quad (3)$$

式中: I_M 为焰后区离子电流最大值; I_{raw} 为焰后区离子电流原始数据; t_1 为焰后区离子电流最大时对应的时刻。经试验分析可确定失火发生的阈值,当 $I_M < 26 \mu\text{A}$ 、 $t_1 > 20^\circ$ (上止点后) 时,发动机将发生失火;当 $I_M = 26 \sim 60 \mu\text{A}$ 、 $t_1 = 0^\circ \sim 20^\circ$ (上止点后) 时,发动机正常燃烧。

对图 4 和图 5 采集到的失火离子电流进行分析,并分别统计其失火率,可以对失火诊断的可靠性进行评价,评价结果见表 1。

表 1 失火评价结果

p_{me}/MPa	$I_M/\mu\text{A}$	$t_1/^\circ$	$\eta/\%$
0.09	9.5	61	81
0.45	14.4	34	27
0.71	19.3	25	12
0.80	24.0	23	2
断油	0.0	∞	100
正常燃烧	50.5	9.8	0

由表 1 可知,离子电流特征参数的评价结果与试验数据有对应关系,这说明离子电流峰值法可以有效诊断甲醇缸内直喷发动机的失火。

3 结 论

(1)采用离子电流测量法对甲醇发动机进行了

$=0.45$ MPa 时离子电流除了有火焰传播初期产生的前锋区峰值外,还明显出现了燃烧焰后区峰值,2 个峰存在时间间隔,这是由缸内燃烧压力大幅度提高、燃烧温度上升、火焰传播速度较慢、焰后区与前锋区位置较远所致。由图 5c 可以看出, $p_{me}=0.71$

在线测量,正常燃烧测量得到的离子电流曲线只包含前锋区和焰后区。

(2)失火时测量得到的离子电流曲线形态随失火情况的不同而有所不同。当火焰不能顺利传播引起失火时,离子电流存在若干不连续的尖峰;当断油引起失火时,离子电流只有1个尖峰;当缓慢燃烧引起失火时,离子电流呈现2个峰。

(3)根据离子电流波形的焰后区峰值幅值及峰值位置,提出了量化评价失火的方法:当 $I_M < 26 \mu\text{A}$ 、 $t_1 > 20^\circ$ (上止点后)时,发动机发生失火;当 $I_M = 26 \sim 60 \mu\text{A}$ 、 $t_1 = 0^\circ \sim 20^\circ$ (上止点后)时,发动机正常燃烧。

参考文献:

- [1] JUNG D, ERIKSSON L, FRISK E, et al. Development of misfire detection algorithm using quantitative FDI performance analysis [J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 34: 49-60.
- [2] 王银辉, 黄开胜, 林志华, 等. 发动机多缸随机失火诊断算法研究 [J]. *内燃机工程*, 2012, 32(1): 18-26.
WANG Yinhui, HUANG Kaisheng, LIN Zhihua, et al. Study of engine multi-cylinder random misfire detection [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, 32(1): 18-26.
- [3] LIU B, ZHAO C, ZHANG F, et al. Misfire detection of a turbocharged diesel engine by using artificial neural networks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 55(1/2): 26-32.
- [4] TUNESTAL P, HEDRICK J K, JOHANSSON R. Model-based estimation of cylinder pressure sensor offset using least-squares methods [C]// *Proceedings of the 2001 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 3740-3745.
- [5] HARMA A, SUGUMARAN V, BABU-DEVASENAPATI S. Misfire detection in an IC engine using vibration signal and decision tree algorithms [J]. *Measurement*, 2014, 50: 370-380.
- [6] 刘乐, 于拓舟, 李国良, 等. 宽带氧传感器用于发动机失火检测的研究 [J]. *汽车技术*, 2008(8): 39-43.
LIU Le, YU Tuo Zhou, LI Guoliang, et al. Study on a wide range oxygen sensor for the engine misfire detection [J]. *Journal of Automotive Technology*, 2008(8): 39-43.
- [7] 毕海波, 张欣, 陈祝清. 基于宽域氧传感器检测发动机失火的研究 [J]. *小型内燃机与摩托车*, 2011(1): 1-5.
- BI Haibo, ZHANG Xin, CHEN Zhuqing. Research on engine misfire detection based on wide-range oxygen sensor [J]. *Small Internal Combustion Engine and Motor Cycle*, 2011(1): 1-5.
- [8] BADAWY T, HENEIN N. Combustion ionization for resonance detection and mitigation using pilot injection in a diesel engine, SAE 2014-01-1360 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 2014.
- [9] DONG G, LI L, WU Z, et al. Study of the phase-varying mechanisms of ion current signals for combustion phasing in a gasoline HCCI engine [J]. *Fuel*, 2013, 113: 209-215.
- [10] RIVARA N, DICKINSON P B, SHENTON A T. A transient virtual-AFR sensor using the in-cylinder ion current signal [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23(5): 1672-1682.
- [11] CAVINA N, POGGIO L, SARTONI G. Misfire and partial burn detection based on ion current measurement [J]. *SAE International Journal of Engines*, 2011, 4(2): 2451-2460.
- [12] ZHONG Z, SAIKI N, TODA H, et al. Detection of knocking by wavelet transform using ion current [C]// *2009 4th International Conference on Innovative Computing, Information and Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1566-1569.
- [13] LIU S H, LIN K Y, LI B Z, et al. Experimental study on the stratified and homogeneous charge of a direct-injection spark ignition methanol engine [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part D Journal of Automobile Engineering*, 2011, 225 (D2): 236-245.
- [14] 凌鑫晨, 吴锋, 姚栋伟, 等. 汽油机燃用甲醇汽油的芳香族碳氢排放试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2014(4): 55-59.
LING Xincheng, WU Feng, YAO Dongwei, et al. Experimental study on aromatic hydrocarbon emissions from gasoline engine fueled with methanol-gasoline blends [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2014(4): 55-59.
- [15] ERIKSSON L, NIELSEN L. Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines [J]. *Control Engineering Practice*, 1997, 5(8): 1107-1113.
- [16] SALTZKOFF A, REINMANN R, BERGLIND T, et al. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor, SAE 960337 [R]. Washington, DC, USA: SAE, 1996.

(编辑 苗凌)