

盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用

高辉, 吴筱敏, 高忠权, 孟祥文, 李根, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对发动机燃烧过程在线监测中,以火花塞作为传感器测量并分析离子电流信号时,测得的离子电流信号易受到火花点火干扰的问题,将基于独立分量分析的盲源分离方法应用于实测火花塞电流信号的分离.采用盲源分离法对实测火花塞离子电流信号进行分析,能够很好地抽取出无火花尾干扰的离子电流信号和点火火花尾信号,其离子电流在上止点附近和压力峰值附近分别出现明显的火焰前锋区和焰后区两个峰值.对同一转速、不同废气再循环(EGR)率的实测离子电流信号进行了盲源分离,结果表明:随着EGR率的增大,离子电流的两个峰值均会减小,且峰值出现的时刻均有所推迟,同时点火火花尾对离子电流信号的干扰也会增强.

关键词: 离子电流;点火干扰;独立分量分析;盲源分离

中图分类号: TK418 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0022-05

Application of Blind Source Separation in Ion Current Signal Analysis of Spark Plug

GAO Hui, WU Xiaomin, GAO Zhongquan, MENG Xiangwen, LI Gen, HUANG Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The blind source separation method based on independent component analysis was adopted to the separation of spark ion current signals measured to reduce the ignition interference by the spark discharge. The spark ion current signals measured were analyzed with this method and the ion current signals without ignition interference and the spark discharge signals were extracted. The blind source separation of the ion current signals measured was performed at the fixed engine speed and different exhaust gas recirculation (EGR) rate. The results show that one peak in front-flame near the top dead centre(TDC) and one peak in post-flame near the peak pressure occurred. Both the two peaks of the ion current signals will decrease and the peak time will be postponed, and the ion current will be interfered much stronger with the increase in EGR rate.

Keywords: ion current; ignition interference; independent component analysis; blind source separation

离子电流法以火花塞作为传感器,可对发动机燃烧过程进行在线监测、分缸实时测量,且结构简单、安装方便,不需要改变发动机结构,在发动机燃烧测量领域有着巨大的潜力.目前,通常采用的方式是在火花点火发动机中,通过在火花塞两极加上偏置电压,测量燃烧和高温生成离子定向移动产生的离子电流,从而获得发动机工作时的空燃比、压力、

温度、NO浓度、爆震和失火等信息^[1].

吴筱敏、Yoshiyama 等人^[2-3]研究发现,当以火花塞作为传感器,采用电感式点火系统测量时,由于电感式点火系统充放电时间长,放电火花尾会对火焰前锋区由燃烧产生的离子电流第一峰产生干扰,甚至会影响到焰后区由燃烧高温产生的离子电流第二峰.为了避免电感式点火系统对离子电流测量产

生的干扰,很多研究者采用电容式点火系统,由于该系统放电时间短,因此在低速工况时第一峰不会受到影响.然而,Yoshiyama、Zhu 等人^[3-4]研究表明,在高速且无废气再循环(Exhaust Gas Recirculation, EGR)时,离子电流第一峰仍然会被火花点火信号干扰.为了能够得到无点火干扰的离子电流信号,Saitzkoff 等人^[5-6]从热力学和化学反应动力学的角度出发,对离子电流与缸内压力进行了模拟计算,可以较好地模拟出焰后区由燃烧高温产生的离子电流,但对于火焰前锋区由燃烧产生的离子电流则无能为力.由于电感式点火系统点火能量高,可靠性好,目前车用发动机绝大部分使用电感式点火系统^[7],而该点火系统会对离子电流信号产生较大干扰,因此如何才能从实测电流信号中有效地抽取出离子电流信号而避免点火干扰,成为阻碍离子电流检测方法实际应用的关键问题.

盲源分离(Blind Source Separation, BSS)方法是在混合信道与源信号本身未知的情况下,仅利用混合信号,从多个信号的混合信号中分离出独立的源信号^[8-11].该方法不论是在线诊断测量还是离线分析,都具有很好的应用价值,尤其在很难建立从源信号到传感器之间信号传输信道模型时,BSS 方法便成为首选的信号处理方法.本文提出应用 BSS 方法对火花塞实测电流信号进行分离,分别得到离子电流信号与点火火花尾信号,并对分离结果进行分析辨识,为离子电流的进一步研究提供参考.

1 实验研究

1.1 实验系统

本实验在转速 n 为 2 000 r/min、过量空气系数 λ 为 0.9 的条件下,对不同 EGR 率(0、5%、10%、15%、20%)时的火花塞离子电流信号进行测量.表 1 为本次实验用发动机参数,图 1 为发动机实验台架.

表 1 HH368Q 发动机主要结构参数

缸体结构	直列 3 缸
排量/mL	796
缸径,行程/mm	68.5,72
压缩比	9.4
点火顺序	1 缸、3 缸、2 缸
标定转速/ $r \cdot \min^{-1}$	5 500
最大功率/kW	26.5
最大扭矩/ $N \cdot m$	60.5

图 2 所示为离子电流检测系统原理示意图.火花塞间隙中的带电离子在直流电源产生的恒定电场

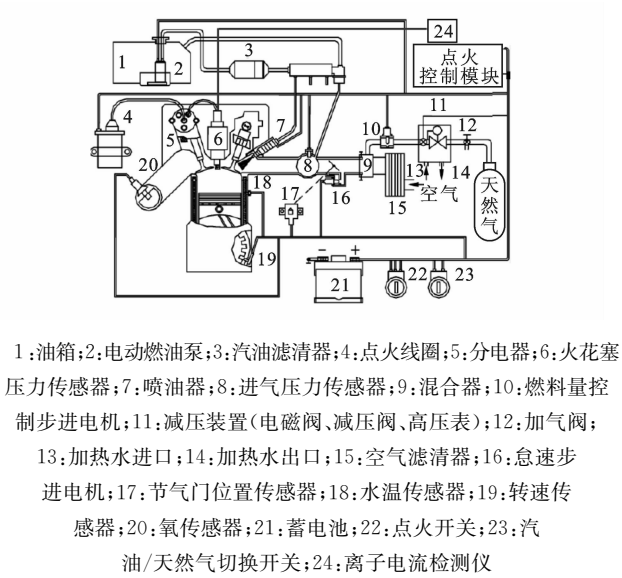


图 1 发动机实验台架

中定向移动,经高压硅堆,采样电阻($100\text{ k}\Omega$)接地,其离子电流由采样电阻读出.直流电源由蓄电池(12 V)和 DC 电源模块组成.发动机点火时的高压被高压硅堆阻断,减小了点火高压对电路以及数据采集仪的冲击.燃烧时缸内压力通过火花塞压力传感器(Kistler 4075A10)、电荷放大器以及动态测试仪组成的燃烧压力测量系统测量得到.

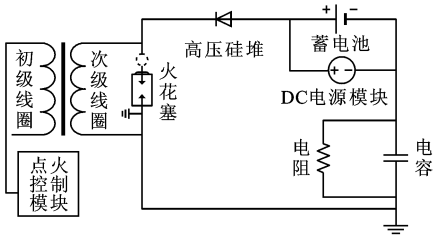


图 2 离子电流检测系统原理

1.2 典型离子电流信号

图 3 所示为实测典型的离子电流信号曲线与压力曲线.由图 3 可以看出,电流曲线明显地有 3 个极大值,第 1 个极值对应的是点火阶段火花塞放电的干扰,第 2 个极值为火焰前锋区由燃烧产生的离子电流最大值,第 3 个极值为焰后区由高温产生的离子电流最大值,其出现时刻与压力峰值出现时刻基本一致,与 Zhu 等人^[4]的研究结果相符.

2 BSS 方法在离子电流中的应用

火花点火信号是由于点火线圈放电产生的,而离子电流信号是燃料燃烧产生的,两者产生的机理不同决定了两者相互独立的特性.根据 BSS 方法的基本理论,只有对由两个相互独立的源信号混合而

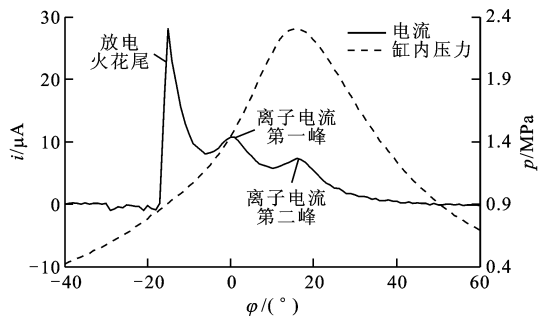


图3 典型离子电流曲线与压力曲线随曲轴转角的变化

成的两组测量信号进行分离,才能还原两个源信号.

2.1 盲源分离

设 t 时刻的点火火花尾和离子电流信号分别用 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 表示,写成向量形式为

$$\mathbf{S}(t) = (s_1(t), s_2(t))^T \quad (1)$$

而经过传感器测量得到的两个混叠信号为

$$\mathbf{X}(t) = (x_1(t), x_2(t))^T \quad (2)$$

式中: $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为 t 时刻观测到的两个混叠信号. 由于观测信号是由源信号经线性混合产生,可表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为混合矩阵^[8-11].

为了确定分离矩阵 $\mathbf{W}$, 使变换后的输出

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{W}\mathbf{X}(t) \quad (4)$$

为源信号向量 $\mathbf{S}(t)$ 的拷贝, 本文采用独立分量 (Independent Component Analysis, ICA)^[8-9] 分析. 在进行 ICA 算法之前, 可对数据进行中心化和白化预处理, 使问题变得简单, 提高算法效率. BSS 常用的算法主要有基于高阶统计量的算法、基于最大似然原理的算法和基于最大化负熵的算法等^[8-10]. 本文采用 Hyvarinen^[11] 提出的快速不动点算法进行离子电流信号的分离, 它具有简洁、收敛速度快和可靠性好的优点.

2.2 离子电流信号抽取

由于在实际的实验中连续两个循环的工况相同或近似相同, 因此本文使用两个循环的测量信号作为观测信号进行 BSS. 为了体现该方法的普遍适用性, 本文选取了离子电流变化不大 (见图 4) 和变化较大 (见图 5) 的两组信号进行分析.

图 4 为转速 $n=2\,000\text{ r/min}$ 、点火提前角 $\beta=24.25^\circ$ 、EGR 率 $R_{\text{EGR}}=5\%$ 、节气门全开 (WOT) 时, 实测的连续两个循环的离子电流曲线和压力曲线, 可以看出前一循环中离子电流曲线第一峰已与电感放电火花尾混叠, 第二峰则没有被干扰, 而前一循环

中第一峰、第二峰均完全被放电火花尾淹没. 由图 5 可以看出, 两个循环中离子电流第一峰均被点火放电干扰, 而第二峰却没有被干扰.

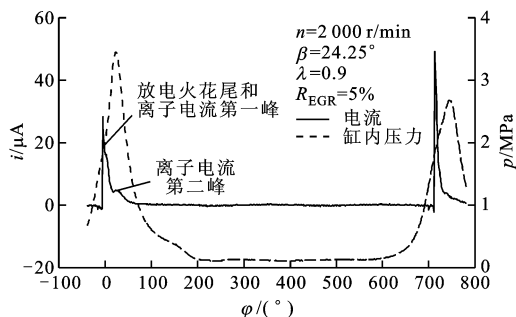


图4 离子电流峰值形态差异较小时的实测离子电流曲线

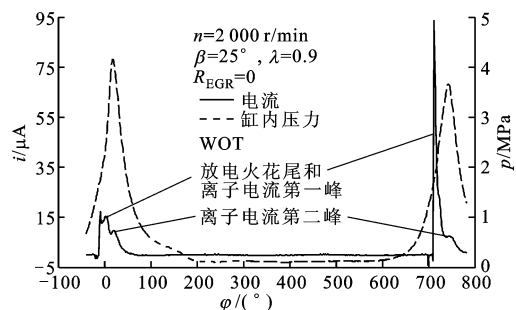


图5 离子电流峰值形态差异较大时的实测离子电流曲线

2.3 离子电流信号辨识

图 6 和图 7 为采用 BSS 方法对图 4 和图 5 分别进行处理后得到的点火火花尾信号和离子电流信号各自平均值的代表值, 以及实测的两个循环的平均压力曲线. 文献^[1-5]表明, 离子电流第一峰与火核的形成与发展有关, 而第二峰峰值出现时刻与压力峰值出现时刻基本一致. 另外, 根据刘兵^[12]在同一台发动机上的数值模拟表明, 火核形成时刻大约在上止点附近. 从图 6、图 7 可以看出, 离子电流曲线明显有两个峰值, 第一峰均出现在上止点后 5° 左右, 而第二峰均出现在压力峰值后 3.5° , 与文献相符.

为了辨别点火火花尾信号, 在该发动机上进行倒拖实验. 图 8 所示为倒拖时的实测电流曲线与压力曲线, 由于倒拖时没有供油, 所以没有燃烧. 从图 8 可以看出, 电流曲线只有点火信号, 并且点火火花尾的峰值出现在上止点前 5° 左右, 对照图 6 和图 7 可以看出, 分离后的点火火花尾峰值时刻与倒拖时一致.

由于火花塞间隙击穿后, 火花塞可等效为电阻和电容的并联^[13], 从而次级线圈与点火电极共同构

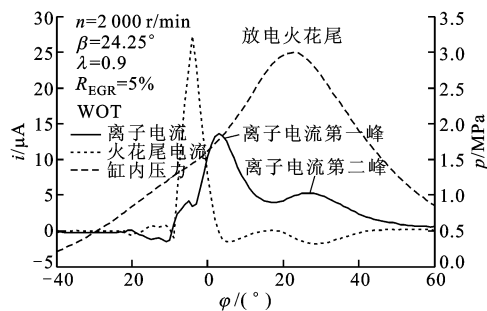


图 6 对应图 4 的 BSS 结果

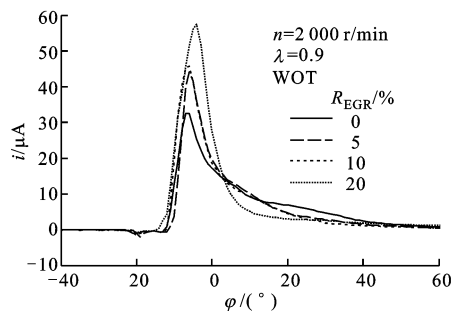


图 9 变 EGR 率时的实测离子电流曲线

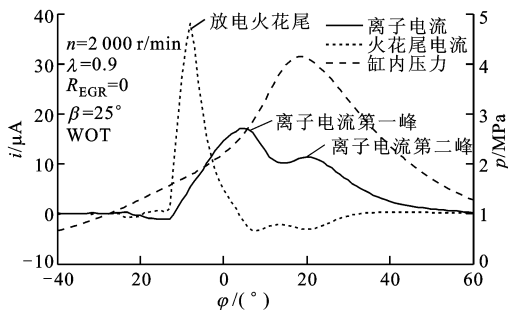


图 7 对应图 5 的 BSS 结果

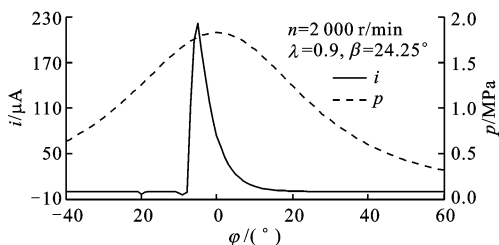


图 8 倒拖时电流与压力曲线

从图 10 可以看出,随着 EGR 率的增大,第一峰和第二峰峰值均减小. 第一峰峰值减小是因为燃油变稀导致火焰前锋区的化学离子浓度随着 EGR 的增大而减小. 根据 Axel^[1] 和 Saitzkoff 等人^[5-6] 的研究表明,离子电流第二峰峰值大小与最高燃烧温度有关,而 EGR 率的变化会导致最高燃烧温度降低,从而导致焰后区热 NO 离子浓度降低,进一步引起电流峰值减小,从而降低离子电流第二峰的峰值.

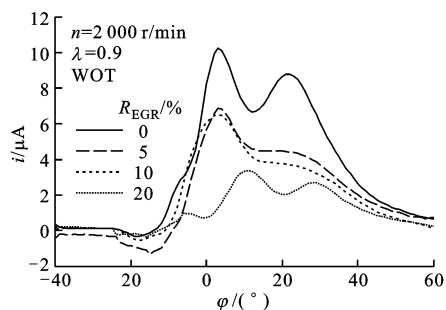


图 10 采用 BSS 方法得到的变 EGR 率时的离子电流曲线

成电感-电容(LC)振荡回路. 倒拖时,由于没有供油,而火花塞间隙内的介电常数会区别于正常燃烧工况(空气的介电常数最小,约为 1),又由于电容 $C = \epsilon \frac{S}{d}$ 、容抗 $X_c = \frac{1}{\omega C}$ (ϵ 为介电常数; S 为极板相对面积; d 为极板间距; ω 为角频率),则容抗与介电常数成反比,因此倒拖时点火火花尾的振荡电流大于非倒拖工况.

综上所述,可以证明采用 BSS 方法分离后得到的两个信号为真实的点火火花尾和离子电流信号.

2.4 BSS 方法在变 EGR 率时的离子电流上的应用

从图 9 可以看出,随着 EGR 率的增加,电流峰值出现的时刻推迟,峰值明显增大,第一峰被点火火花尾所淹没,且第二峰峰值大小以及出现时刻均无法分辨.

从图 10 还可以看出,随着 EGR 率的增大,离子电流两个峰值出现时刻均有不同程度的推迟. 其原因是当 EGR 率增大时,燃油变稀,形成稳定的火核比较困难,因此火核形成时刻会推迟,导致第一峰峰值出现时刻推迟. 同时, EGR 率的增大,会推迟最高燃烧温度到达时刻,从而导致第二峰峰值时刻推迟.

图 11 所示为采用 BSS 得到的不同 EGR 率时的点火火花尾信号. 可以看出,随着 EGR 率的增大,干扰信号的峰值明显增大,其原因可能是 EGR 增大了火花塞等效电容的介电常数,因此在图 9 中实测电流信号随 EGR 率的增大而明显增大. 从图 11 还可以看出,点火火花尾的振荡持续到上止点后 $40^\circ \sim 50^\circ$, 因此对照图 10 和图 11 可以看出,离子电流第二峰也会受到点火信号的干扰.

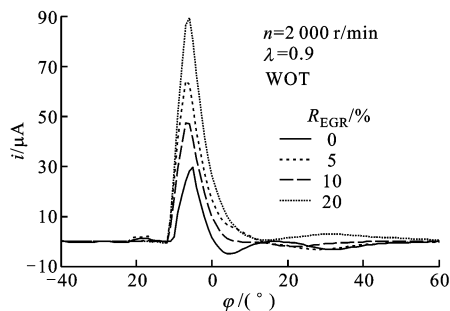


图11 变EGR率时的点火火花尾信号

3 结 论

(1)使用火花塞测量离子电流时,离子电流第一峰和第二峰均会受到电感放电点火信号的干扰。

(2)采用BSS方法对实测火花塞离子电流信号进行分析,能够很好地抽取出无点火火花尾的离子电流信号和点火火花尾信号。

(3)随EGR率的增加,离子电流第一峰和第二峰峰值均减小,峰值出现的时刻推迟。

(4)随EGR率的增加,点火对火花塞离子电流的干扰增强。

参考文献:

- [1] FRANKE A, REINMANN R, LARSSON A. The role of the electrodes for the ionization sensor signal. SAE paper, 2003-01-0714 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2003; 1000-1008.
- [2] 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): 55-61.
- WU Xiaomin, LI Fuming, YU Peng. Experimental study on influence of interference and bias voltage on detective signal of spark plug [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2001, 22(4): 55-61.
- [3] YOSHIYAMA S, TOMITA E, HAMAMOTO Y. Fundamental study on combustion diagnostics using a spark plug as ion probe. SAE paper, 2000-01-2828 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 2000; 1990-2002.

- [4] ZHU G G, HASKARA I, WINKELMAN J. Closed-loop ignition timing control for SI engines using ionization current feedback [J]. IEEE, Transactions on Control System Technology, 2007, 15(3): 416-426.
- [5] SAITZKOFF A, REINMANN R, BERGLIND T, et al. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. SAE paper, 960337 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 1996; 452-462.
- [6] SAITZKOFF A, REINMANN R, MAUSS F, et al. In-cylinder pressure measurements using the spark plug as an ionization sensor. SAE paper, 970857 [R]. Washington, DC, USA; SAE, 1997; 1235-1245.
- [7] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, USA: McGraw-Hill, Inc, 1988; 437-449.
- [8] HYVÄRINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent component analysis [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2001; 203-229.
- [9] STONE J V. Blind source separation using temporal Predictability [J]. Neural Computation, 2001, 13(7): 1559-1574.
- [10] 张贤达, 保铮. 盲信号分离[J]. 电子学报, 2001, 29(12A): 1766-1771.
- ZHANG Xianda, BAO Zheng. Blind source separation [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12A): 1766-1771.
- [11] HYVÄRINEN A, OJA E. A family of fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. Neural Component, 1997, 9(7): 1483-1492.
- [12] 刘兵. 天然气掺氢发动机试验研究与燃烧过程数值模拟[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2009.
- [13] 汪泉弟, 刘春艳, 俞集辉, 等. 汽车火花点火系统电磁干扰的抑制方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(7): 46-49.
- WANG Quandi, LIU Chunyan, YU Jinhui, et al. On suppressing electromagnetic interference caused by automobile spark-ignition system [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(7): 46-49.

(编辑 王焕雪)