

一种可控火花能量的交流点火系统研究

汪冰吉, 张 岳, 朱彦平, 武青正, 黄霞平

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 基于电容储能式电控点火系统研究了一种火花持续期、次级火花电流可控的交流点火系统。利用 CADENCE PSPICE 软件以及模拟负载试验, 验证了不同斩波电流、驱动脉宽等可变参数对交流点火系统火花能量的影响。试验结果表明: 火花能量的提高依赖于斩波电流值的增大和驱动脉宽的延长, 并近似呈线性关系; 交流点火系统火花持续时间可实现 2.5 ms 内可控调节, 初级斩波电流可实现 30 A 内可控调节。交流点火系统可通过相应参数的调节实现火花能量可控, 最大火花能量可达到 260 mJ, 满足气体燃料发动机的功能需求。

关键词: 交流点火系统; 驱动脉宽; 火花能量; 试验

中图分类号: TK423.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2018)01-0018-05

The Study of AC Ignition System for Controllable Spark Energy

Wang Bingji, Zhang Yue, Zhu Yanping, Wu Qingzheng, Huang Xiaping

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Based on the capacitor-storing spark ignition system, the AC ignition system which can control spark duration and secondary spark current efficiently was researched. How different primary peak currents and driving pulse widths affecting the spark energy of AC ignition system had been verified by CADENCE PSPICE software and simulated load test. The test results show that the increase of spark energy is relied on the increase of primary peak current and extend of driving pulse width, and the relationship is almost linear; the spark duration of AC ignition system is controllable within 2.5 ms, and that primary peak current is controllable within 30 A. The AC ignition system can flexibly control spark energy by regulating related parameters, and the maximum value of spark energy could reach 260 mJ, thus meets the requirements of gas-fuel engines.

Key words: AC ignition system; driving pulse width; spark energy; test

0 引 言

内燃机火花点火系统经历了机械式点火系统、有触点式电子点火系统、无触点式电子点火系统、电控点火系统等几代发展, 而当前主流点火系统为电感储能式与电容储能式电控点火系统^[1]。新型发动机主要采用电容储能式电控点火系统, 这基于其相对电感储能式点火系统的优越性, 包括充放电时间短、可适用于高速发动机、不受点火线圈结构

限制等。

针对电容、电感储能式点火系统各自的特点, 国内研究者提出了若干改进方案: 如哈尔滨工程大学研究的基于电感储能式的双线圈点火系统^[1]; 北京工业大学研究的基于电感储能式的高频点火系统^[2]; 西北农林科技大学等研究的基于电容储能式多电容依次放电点火系统^[3]。这些方案能够改善点火系统性能, 实现火花能量增大, 但无法实现火花能量的精确可调控制。而火花能量可调的意义

在于实现次级火花能量与发动机工况的匹配，延长火花塞使用寿命。

本文在电容储能式电控点火系统的基础上研究了一种新型交流点火系统^[4]，旨在实现点火系统的次级火花电流与火花持续期可控，从而达到火花能量可调的目的。

1 交流点火系统简介

交流点火系统用于船用大功率中速气体燃料发动机，其结构简图如图 1 所示。

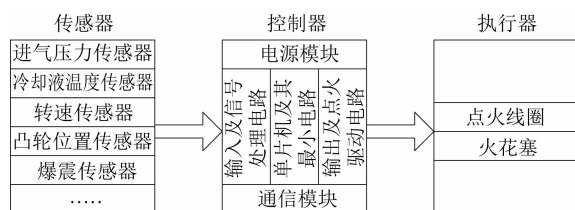


图 1 交流点火系统结构简图

图 1 中传感器采集与发动机工况有关的信号，并将相关信号传递给控制器；控制器根据接收的信号判断发动机工况，计算出最佳点火提前角和火花能量，并将点火控制信号传给执行器；执行器根据控制器发出的指令，实现点火。

为保证可靠点火，交流点火系统设计应满足以下点火要求：在稀薄燃烧条件下，火花塞间隙 0.3 ~ 0.45 mm，火花能量 50 ~ 80 mJ，起动时应高于 100 mJ；次级最大电压应大于击穿电压，并留有 4 kV 裕量^[5-6]。

2 交流点火控制器设计

交流点火系统点火驱动电路结构简图如图 2 所示。为了实现点火系统次级火花电流可控，交流点火系统采用桥式开关管代替储能电容充放电用开关管；在原边增加电流传感器实现驱动控制闭环。如此，与电容储能式点火系统相比，交流点火系统的时序控制与脉宽驱动会复杂些。图 2 所示为单缸单线圈单火花塞点火驱动结构简图；多缸时只须在此基础上增加相应的单缸桥臂、点火线圈及火花塞即可。

交流点火系统在击穿方式上与电容储能式电控点火系统类似，点火线圈接通瞬间，初级线圈电流迅速变化，基于电磁感应原理，次级线圈感应出几十千伏的电压击穿可燃混合气，实现点火。在可燃混合气击穿后，次级线圈回路闭合，点火线圈可等效为变压器。在有效驱动脉宽内，控制 MOS 管 1、4 导通，初级线圈电流正向增大；当电流达到设定

值（斩波电流值）时，关断 MOS 管 1、4，控制 MOS 管 2、3 导通，初级线圈电流先正向减小至 0 后反向增大；当反向电流达到设定值时，关断 MOS 管 2、3，控制 MOS 管 1、4 导通，初级电流先反向减小至 0 后正向增大，回到初态；以此重复，直到驱动脉宽结束。

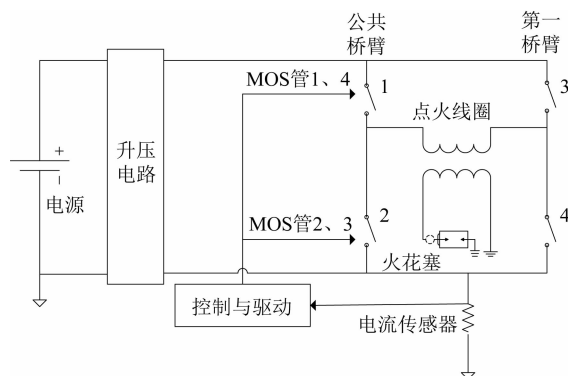


图 2 点火驱动电路结构简图

在驱动脉宽无效段，初级电流为 0；在驱动脉宽有效段，初级线圈电流以三角波形式呈现，而电流传感器波形为其二倍频锯齿波。在火花持续放电阶段，次级电流波形呈现与初级线圈相同频率的三角波，但幅值相差 N_2/N_1 倍（ N_2 、 N_1 由点火线圈参数决定）；次级电压维持在几百到几千伏之间^[7]，其极性由次级电流方向决定；火花持续时间近似等同于驱动脉宽时间，并且驱动脉宽时间可由 ECU 设定。

3 交流点火系统仿真分析

火花能量仿真以 CADENCE 软件为平台。点火线圈参数设置如表 1 所示。

表 1 点火线圈参数

初级电感量 L_1 /mH	1.544
次级电感量 L_2 /H	32.483
初级电阻 R_1 /Ω	0.38
次级电阻 R_2 /kΩ	11.522
次级在初级漏感 L_{ps} /mH	0.152 5
初级在次级漏感 L_{sp} /H	4.205 7
耦合系数 k	0.941 175 769

3.1 火花能量理论分析

在火花塞击穿后，次级火花电流以交变三角波形式表现出来，国际上通用的稳压管串模拟负载不可用于交流点火系统火花能量测试^[8]，故在 SAE J973 1999 标准推荐模拟负载的基础上增加反向稳压管串，即仿真模拟负载为稳压 1 000 V 双向稳压管串。其仿真结构简图如图 3 所示。

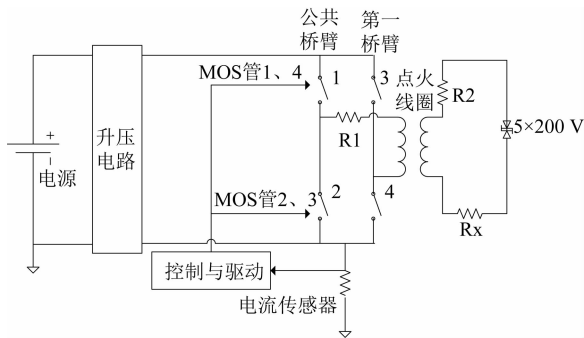


图3 火花能量仿真结构简图

在图3中,以升压电路电压输出为恒定值,初级电流(上升段)可由式(1)表示:

$$i_1 = \frac{U}{R}(1 - e^{-Rt/L}) \quad (1)$$

式中: R 、 L 为回路等效电抗。

由于电流波形呈中心对称且周期性变化,其周期可由式(2)表示:

$$T_\Delta = \frac{4L}{R} \ln \frac{U}{U - I_0 R} \quad (2)$$

式中: I_0 为斩波电流设定值。

点火系统火花能量可由式(3)表示:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} u_z i_2 dt \quad (3)$$

式中: u_z 为双向稳压管两端电压; i_2 为次级电流,可由式(4)得出:

$$i_2 = \frac{U_x}{R_x} = \frac{i_1 N_1}{N_2} \quad (4)$$

式中: N_1 、 N_2 为点火线圈初、次级匝数; R_x 为次级回路采样电阻,取 100Ω ; u_x 为采样电阻两端电压; i_1 为初级线圈电流。由于点火线圈可等效为变压器,因此次级电流亦可由初级电流近似计算。

3.2 火花能量仿真结果分析

仿真中保持升压电路电压 100 V 不变,其他可调参数设定如表2所示。

表2 火花能量参数设定值

方案	斩波电流/A	驱动脉宽/ms
1	10	1
2	20	1
3	10	2

图4、图5示出了方案1中有效脉宽段两个三角波周期的次级电流与初级电流、次级电压的关系。图4中初、次级电流波形近似成线性关系,初次级电流缩放倍数与点火线圈变比近似相等。图5中次级电压近似稳压在 $\pm 1000 \text{ V}$; 在气体击穿后,

点火线圈次级构成回路,次级电压的极性由次级电流方向决定。

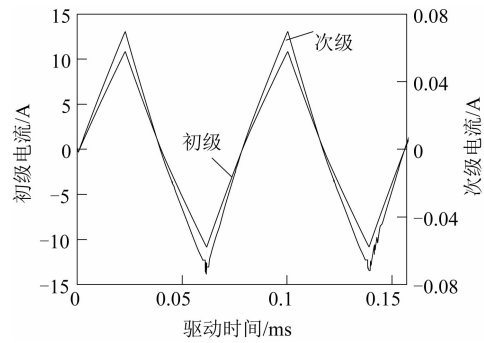


图4 方案1 次级电流与初级电流关系图

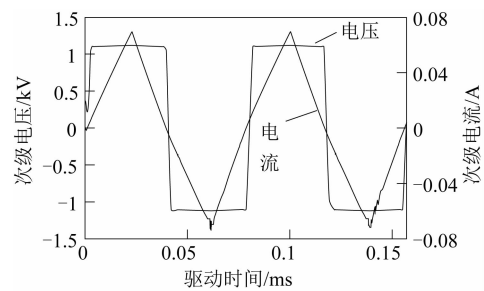


图5 方案1 次级电流与次级电压关系图

根据3种不同方案的次级电压、电流的仿真波形,结合火花能量计算公式(3),得到各方案火花能量值如图6所示。从图6可知:斩波电流值加倍与驱动脉宽加倍的效果近似相同,均近似为方案1火花能量的2倍。

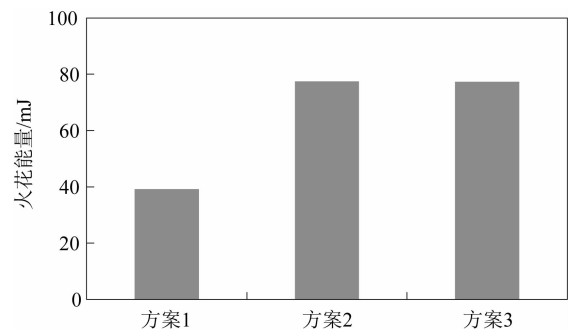


图6 各方案火花能量比较图

由仿真结果分析,次级电流的变化跟随初级电流的变化近似呈线性关系,且电流幅值比与点火线圈变比近似相等。同时,增大斩波电流或者延长火花持续时间均可明显增大火花能量,并且可实现斩波电流与驱动脉宽的独立控制。

仿真结果验证了交流点火设计的可行性。为检验上述仿真结果的准确性,本文采用试验的方式进行验证。

4 交流点火系统试验

交流点火系统试验包括驱动试验和火花能量试验，其结构简图如图 7 所示。

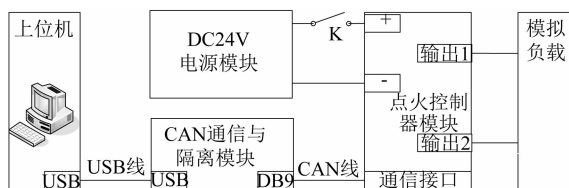


图 7 点火控制器试验结构简图

单缸点火周期（点火频率）按照式（5）设置，同时为避免两缸点火驱动脉宽重叠，驱动脉宽应小于点火周期。

$$T_i = \frac{120}{nN} \quad (5)$$

式中： n 为发动机转速， $(r \cdot \min^{-1})$ ； N 为发动机缸数。

对应发动机额定转速，火花能量试验时单缸点火周期为 15 ms。

4.1 驱动试验

驱动电路测试时，负载为 0.266 mH 的电感线圈。图 8 示出了驱动脉宽 1 ms、升压电路电压 100 V、斩波电流 5 A 的升压电路电压、线圈电流波形。

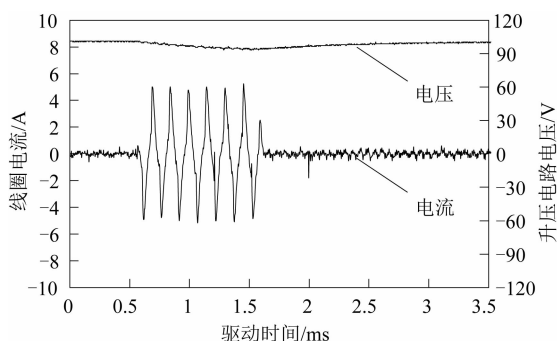


图 8 驱动脉宽 1 ms 电压电流波形图

改变点火周期与驱动脉宽进行重复试验，基于点火周期可以实现脱排转速 $(300 (r \cdot \min^{-1}))$ 之下至额定转速 $(2000 (r \cdot \min^{-1}))$ 之上的全覆盖；驱动脉宽最大可实现 7 ms 内的可控调节。

图 9 示出了升压电路电压下降幅度与点火驱动脉宽的关系。体现了升压电路带负载能力。随着点火驱动脉宽不断增加，即火花持续时间不断延长，升压电路电压下降幅度越大，承受负载能力越弱。结合交流点火驱动的设计以及对发动机点火的实际考量，点火脉宽应控制在 2.5 ms 以内可调。

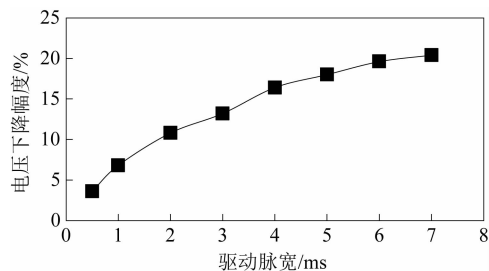


图 9 电压下降幅度与驱动脉宽关系图

4.2 火花能量试验

火花能量试验的负载为点火线圈与稳压 1 000 V 的双向稳压管串。

图 10 示出了斩波电流 10 A，驱动脉宽 1 ms 时，火花能量与升压电路电压的关系。在小负荷下，随着升压电路电压的增大，次级火花能量呈缓慢上升趋势；升压电路电压对火花能量并无明显影响。但升压电路电压设置过小，不利于击穿可燃混合气；同时在大负荷下，会导致次级电流无法控制。

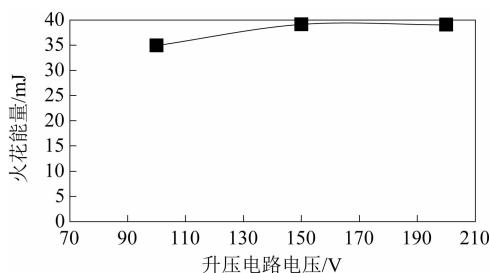


图 10 火花能量与升压电路电压关系图

图 11 示出了驱动脉宽为 1 ms 时火花能量与斩波电流的关系。显示斩波电流可实现 30 A 内任意调节。随着斩波电流的增大，次级火花电流也相应增大，火花能量相应提高，并且火花能量与驱动脉宽近似呈线性关系。在斩波电流 30 A 时，火花能量可达 120 mJ。

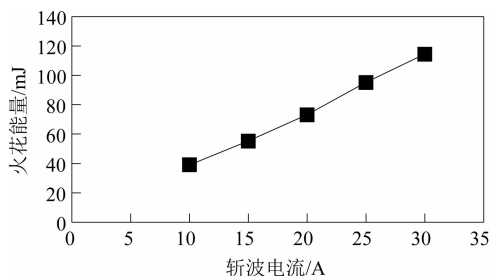


图 11 火花能量与斩波电流关系图

图 12 示出了斩波电流为 30 A 时火花能量与驱动脉宽的关系。显示：随着驱动脉宽的增大，次级火花持续期也相应延长，火花能量近似成线性增

长。当驱动脉宽达到 2.5 ms 时, 最大火花能量可达 260 mJ。

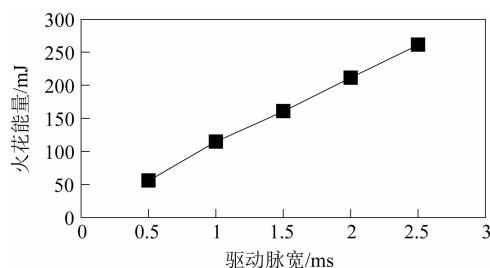


图 12 火花能量与驱动脉宽关系图

点火控制器试验验证了火花能量与斩波电流、驱动脉宽的线性关系; 火花能量符合点火系统的设计要求。

5 结 论

(1) 交流点火系统可实现火花点火各相关参数的可调控制。点火频率设置值可实现从额定转速 ($2\,000\ (\text{r} \cdot \text{min})^{-1}$) 之上到脱排转速 ($300\ (\text{r} \cdot \text{min})^{-1}$) 之下的全覆盖; 初级斩波电流可实现 30 A 之内可控调节; 驱动脉宽可实现 2.5 ms 内可控调节。

(2) 次级最大电压可通过升压电路电压调节; 小负荷时, 升压电路电压对火花能量影响较小; 提高升压电路电压可避免大负荷时斩波电流与驱动脉

宽不可控。

(3) 火花能量的提高取决于火花持续时间的延长和斩波电流的增大, 并且火花能量近似与斩波电流和驱动脉宽呈正比, 最大火花能量可达 260 mJ, 符合点火系统的设计要求。

参考文献

- [1] 王晓斌. 天然气发动机点火系统设计及实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [2] 王道静. 车用天然气发动机电控点火系统的研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [3] 贾二虎. 稀燃快燃点火电路特性的初步研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [4] 伍德沃德公司. 用于具有电流模式控制和故障容差检测的 AC 点火系统的多路复用驱动电路: 美国, CN102852692A [P]. 2013-01-02.
- [5] 宋君花, 冒晓建, 王都, 等. 压缩天然气发动机点火驱动的设计与研究 [J]. 内燃机工程, 2010, 31 (3): 34-38.
- [6] 林峰, 杨强, 王琼, 等. 天然气发动机点火系统研发的理论与实践 (下) [J]. 现代车用动力, 2014 (3): 5-8.
- [7] 方明煌, 汤少岩. 汽油机次级线圈标准点火波形分析 [J]. 汽车实用技术, 2011 (8): 5-7.
- [8] SAE. Ignition System Measurements Procedure. SAE J973 [S]. Warrendale, 1999.