

电容式多次放电点火系统设计与试验

刘 锐, 魏民祥, 贝太学, 季昊成, 常 诚
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对某型二冲程点燃式空气辅助缸内直喷发动机燃用柴油问题,提出了实现单电容连续多次放电点火的方法,研制了直流电容式多次放电点火模块,进行了多次点火功能性验证及点火能量测试.在此基础上,进行了环境温度为 6°C 下的冷起动试验及 3000r/min 小负荷性能试验,结果表明:在该环境条件下,采用5次放电点火策略能够使发动机起动成功,在小负荷工况下,增加点火次数有利于改善缸内燃烧,点火提前角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间时,4次点火对发动机动力性、燃油消耗率及排放性能改善比2次点火更明显,当点火提前角提前至 30° 后,其改善作用逐渐减小.

关 键 词: 火花点火; 二冲程发动机; 重油; 空气辅助直喷; 电容多次放电; 冷起动; 小负荷
中图分类号: V234; TK46 **文献标志码:** A

Design and experiment of multi spark capacitor discharge ignition system

LIU Rui, WEI Min-xiang, BEI Tai-xue, JI Hao-cheng, CHANG Cheng
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A multi spark discharge ignition mode with a single capacitor for a two stroke air-assisted direct injection spark ignition engine fueled with diesel was proposed, and a direct current multi spark capacitor discharge ignition system was developed, in which the multi spark ignition mode was verified and ignition energies were tested. On these basis, the engine tests of cold start and low load at 3000r/min under 6°C ambient temperature were conducted. The test results show that, applying 5 times capacitor discharge ignition is able to make a successful engine cold start, and under the low load condition, increasing the ignition times promotes the combustion in cylinder; 4 times ignition is obviously more beneficial to improve the power performance, fuel economy and emissions performance than 2 times ignition with the ignition advance angle between 10° crank angle before top dead center and 20° rank angle before top dead center; the improvement effects gradually become small with the ignition timing angle advanced to 30° crank angle before top dead center.

Key words: spark ignition; two stroke engine; heavy fuel; air-assisted direct injection; multi spark capacitor discharge; cold start; low load

目前,广泛采用的无人机动力装置包括往复式和旋转式活塞发动机,燃气涡轮发动机以及电池驱动的电动机等,其中活塞发动机由于其结构简单,经济性好,其应用和发展很迅速^[1]. 通常大

收稿日期:2015-06-21

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX_0244);江苏省普通高校研究生科研创新计划(KYLX15_0262)

作者简介:刘锐(1987—),男,博士生,主要从事活塞发动机性能仿真及控制研究. E-mail:timothy@nuaa.edu.cn

引用格式:刘锐,魏民祥,贝太学,等. 电容式多次放电点火系统设计与试验[J]. 航空动力学报,2017,32(2):314-321. LIU Rui, WEI Minxiang, BEI Taixue, et al. Design and experiment of multi spark capacitor discharge ignition system[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 314-321.

多数往复式航空活塞汽油发动机采用磁电机电容放电点火系统,如奥地利的罗塔科斯系列和德国的赫兹系列,并且均采用双火花塞的冗余设计方式。近年来,出于考虑无人机系统使用成本及简化军队后勤保障,美国及欧洲部分国家对无人机动力装置提出了以煤油为主的航空重油发动机研发计划^[2],并且未来发动机使用的燃料范围甚至包括柴油及生物柴油,这不但对现有发动机结构设计带来很大挑战,也对发动机点火系统设计及改造带来更多要求。

赫兹公司与奥比特公司合作研发的点燃式二冲程航空煤油直喷发动机,采用了可编程电容点火系统,同时配有功率高达2 kW发电机,克服了低温冷起动困难问题^[3],但是也增大了体积和质量。不过由此可知,改善及解决航空重油活塞发动机冷起动困难问题主要两个途径:首先是燃油雾化,可以通过高压直喷及气助雾化直喷技术减小其雾化粒径,增加单位时间燃油蒸发量;其次是改造或重新设计原有磁电机点火系统,包括调整点火正时,提高点火能量及点火成功率。传统的磁电机电容点火系统存在低速充电电压不足及高速充电时间短导致失火等缺点,尤其是在冷起动工况下,由于其点火能量小,在无辅助预热措施下不能点燃化油器或气道喷射航空重油发动机^[4-6],甚至对于采用缸内直喷供油方式的航空重油发动机,同样存在着点燃困难问题,因此,对航空活塞发动机点火系统进行重新设计显得尤为重要。

一般来说,发动机燃用柴油是通过压燃的方式使混合气着火燃烧,当采用点燃方式时,由于燃料特性的不同,柴油的燃烧过程与汽油或航空煤油的差异主要体现在火焰传播速度及燃烧性能方面,包括点火延迟期与持续期,火焰发展期及快速燃烧期^[7-8]。对于采用节气门调节进气量的二冲程点燃式直喷发动机,在起动工况和低转速小负荷工况时对应的节气门开度较小,进气量较少,容易实现分层燃烧,相同燃油喷射策略下燃用柴油时的燃烧过程相比汽油或煤油较慢,主要在于发动机燃烧性能与火花点火控制紧密相关,这不单体现在点火提前角上,同时点火能量也存在一定的影响,因此对燃用柴油的二冲程点燃式直喷发动机的点火策略进行设计,这对于研究冷起动控制策略及小负荷性能具有重要意义。

近年来,国内外学者对基于数字式直流电容多次点火系统的发动机性能研究较多,主要包括多电容连续点火或多火花塞点火,提高了单循环

的放电点火能量,改善了发动机性能。有国内学者基于能量叠加式多电容点火系统进行点火系统匹配发动机性能的试验研究^[9-10],在汽油机上研究多脉冲点火对均质充量压燃(HCCI)燃烧过程的影响^[11],或者将微机控制电容储能高能点火系统应用于电控液化石油气(LPG)发动机,研究怠速稳定性及排放特性^[12-13]。国外相关学者采用带有5级电容驱动的高能点火系统改善了发动机排放性能,或者采用多电容放电点火系统,对比单电容点火,增大稀燃极限及提高动力性能^[14-15]。此外,有学者采用电感式多脉冲触发点火系统研究稀燃天然气车用发动机怠速稳定性及燃烧过程,或运用点火提前角及点火次数自适应控制方法来提高发动机低速下动力性能及降低燃油消耗率^[16-17]。

为初步研究二冲程点燃式直喷发动机燃用柴油问题,本文在低压空气辅助直喷正时策略及电容放电点火研究基础上^[18-19],结合电容放电点火原理分析重新设计直流数字式电容储能多次放电点火模块,进行点火功能性及冷起动试验验证,并且研究了多次点火对发动机小负荷性能影响。

1 电容放电分析及多次放电

1.1 电容放电分析

电容式脉冲放电电路可视为零输入响应的RLC(resistor inductor capacitor)电路^[20],根基尔霍夫定律,则其放电过程可表示为

$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \quad (1)$$

式(1)为二阶常系数齐次微分方程。设电容C上的压降为 $U_c(t)$,利用初始条件, $I(0)=0$, $U_c(0)=U_0$,设 $\alpha=R\sqrt{C/L}/2$,若点火线圈绕制一定时,其初级绕组电阻值R和电感量值L确定,那么 α 值取决于电容C,根据不同 α 取值范围可求得3种解。

1) 当 $\alpha>1$ 时,该电路放电电流呈过阻尼状态变化

$$I(t) = -\frac{U_0}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \cdot \quad (2)$$

$$\sqrt{\frac{C}{L}} \exp\left(-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{\alpha^2 - 1}{LC}} t\right)$$

2) 当 $\alpha=1$ 时,该电路放电电流呈临界阻尼状态变化

$$I(t) = -\frac{U_0 t}{L} \exp\left(-\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (3)$$

3) 当 $\alpha<1$ 时,该电路放电电流呈欠阻尼状

态变化

$$U_c(t) = U_0 \exp\left(-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}\right) \cdot \left[\cos\left(\sqrt{\frac{1-\alpha^2}{LC}}t\right) + \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sin\left(\sqrt{\frac{1-\alpha^2}{LC}}t\right) \right] \tag{4}$$

$$I(t) = -\frac{U_0}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{1-\alpha^2}{LC}}t\right) \tag{5}$$

实际电容放电电路中储能电容值都很小,一般为 1.0 μF 左右,点火线圈初级电阻一般为 0.5 Ω 左右,初级电感一般为 2~5 mH,因此 α<1,即为欠阻尼状态,图 1 为不同 α 值下放电电流变化,图 2 为初始充电电压为 350 V,初级电阻为 0.57 Ω 及电感为 3.2 mH 时,不同储能电容初级电流放电变化,显然,增大储能电容将增大放电电流峰值,提高放电能量,但会使得第 1 电流峰值到达时间推迟,对应地也会增加电容放电完后被充电至目标电压值的时间。

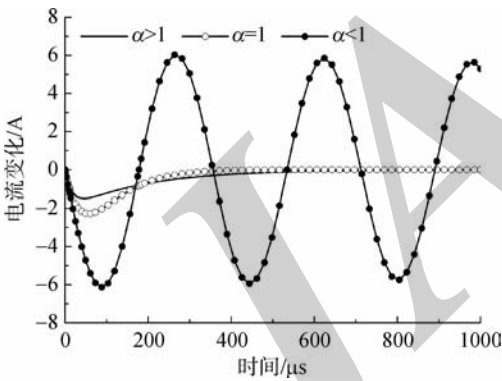


图 1 不同 α 大小放电电流变化
Fig. 1 Discharge current variation with different α

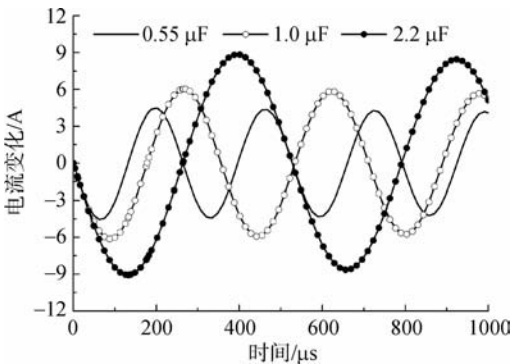


图 2 不同储能电容值放电电流变化
Fig. 2 Discharge current variation with different energy-storage capacitor

1.2 电容多次放电点火

磁电机或直流单电容放电点火方式的点火能量在稳定转速下基本不变,而且触发点火一次,其促进混合气燃烧的能力有限,为进一步促进及维持缸内混合气在点火开始之后迅速燃烧,可以在单次点火基础上增加放电点火次数,由于电容充放电速度快,因此可以利用该特性连续地进行多次放电点火,大多数研究学者采用的方法就是增加电容个数进行依次放电,在原有基础上增加了硬件设计尺寸,占用触发资源较多.对于单个储能电容,其多次放电模式可以通过采用软件编程或硬件的方式进行多次触发实现,即当前一次放电点火完成后进行后一次充电,然后进行后一次放电点火,其多次放电点火时序可依据图 3 进行设计,以压缩上止点信号为参考,发动机控制器输出点火信号,控制点火触发次数,实现单个发动机工作循环下多次点火。

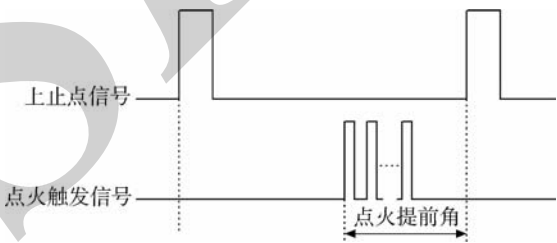


图 3 电容多次放电点火控制原理
Fig. 3 Control principal of multi spark capacitor discharge ignition

2 电容多次点火模块

考虑到自开发的二冲程发动机微控制器外设资源限制所带来的软件编程复杂性,本文对电容多次放电点火的设计通过硬件上来实现,如图 4,

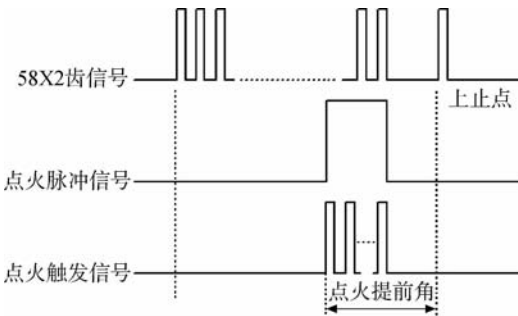


图 4 电容多次放电点火硬件触发原理
Fig. 4 Hardware trigger principal of multi spark capacitor discharge ignition

以 58X2 齿信号来计算转速并判断曲轴位置,控制器根据当前工况计算点火时刻及点火脉宽,输出点火脉冲信号,将其作为多次点火硬件模块输

入,并且由其脉冲宽度来控制点火模块的输出触发次数,图 5 给出了电容多次点火模块硬件原理图,文中第 2.1 节及第 2.2 节将对其作简要阐述.

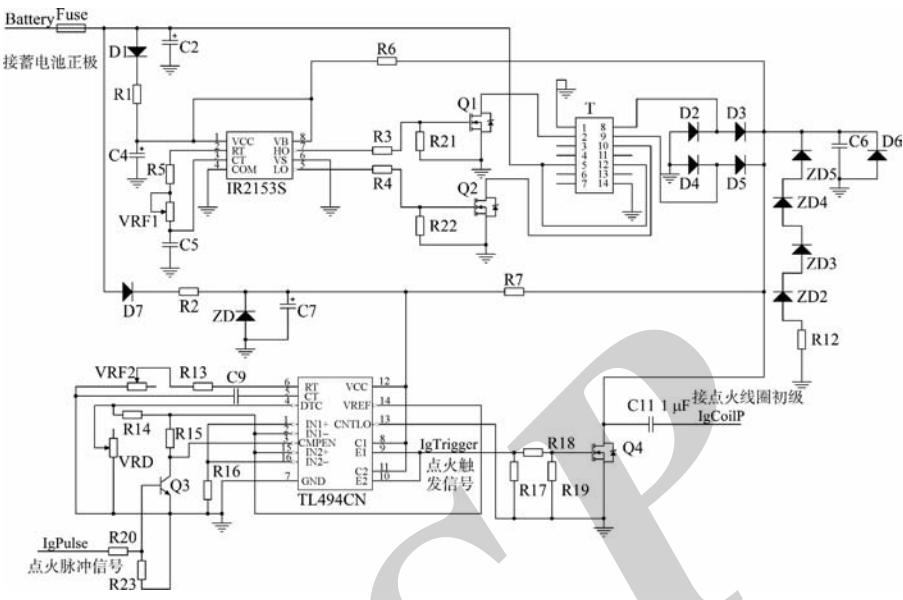


图 5 直流电容多次放电点火模块电路

Fig. 5 Circuit of direct current multi spark capacitor discharge ignition module

2.1 直流升压

本文采用自激振荡功率驱动器 IR2153 进行直流升压,两个高低可参考的输出通道交替驱动推挽式高频升压变压器,将蓄电池为 12 V 电压变换至 330 V 左右高压,所设计的推挽式高频升压变压器 T 的开关频率为 20 kHz,开关频率由滑动电阻 VRF 和电容 C5 进行调节设置,Q1 和 Q2 为场效应管 IRF3205,变压器次级输出电压经由全桥整流,由串联的稳压二极管和电容 C6 进行稳压.驱动器 IR2153 内部带有 15.6 V 稳压二极管,电阻 R6 串联后接至 IR2153 电源端,在变压器输出电压稳定后向该驱动器供电.

2.2 多次点火触发

点火触发电路的设计基于 PWM (pulse width modulation) 脉宽调制驱动器 TL494,根据本文设计要求目的,将两个误差放大器 IN1 和 IN2 屏蔽,误差放大器输入正接地,输入负接高电位,高电位来源于 TL494 内部 5V 电压源,由 14 脚 VREF 输出. RT 及 CT 脚分别接电阻和电容,为该器件产生振荡时钟,滑动电阻 VRF2 用来调整时钟频率,从而决定驱动器输出的点火触发频率. CNTLO 脚接地时控制 E1 及 E2 脚同步输出,死区时间由 DTC 脚输入电压来控制,该电压通

过滑动电阻 VRD 调节,实际上对应调整了 E1 脚和 E2 脚的输出点火触发脉冲的占空比.当 CMPEN 脚为高电位时 E1 和 E2 脚为低电位,反之,低电位时共同驱动 Q4. 因此,在该点火触发电路中,将 CMPEN 脚外接 NPN 三极管,由 ECU 输出的点火脉冲信号来控制 CMPEN 脚的电位,从而由器件 TL494 输出驱动点火 IGBT 的导通与关断,使得点火储能电容 C11 放电,实现连续多次点火.

3 点火模块测试及试验验证

3.1 点火模块功能验证

为验证所设计电容式多次放电点火模块硬件功能性,搭建了点火模块功能验证与点火能量测试系统,主要由 12 V 蓄电池、点火模块、数字示波器、信号发生器及点火能量测试台等组成.点火脉冲信号由数字信号发生器模拟输出,控制点火模块产生点火触发信号.点火初级波形、次级波形及点火能量测试由点火能量测试台及数字示波器完成.

图 6 为信号发生器给定的 10 Hz 的点火脉冲和点火模块输出的多次点火触发脉冲,可见,在点火脉冲对应的脉宽下,产生了连续多个点火触发脉冲,触发频率为 1 kHz 左右.图 7 给出了连续 4 个循环下的点火触发脉冲与电容充放电波形,图

8 为将图 7 中的 1 个循环内的波形放大后所采集的结果,观察图 8 可知,当点火触发脉冲有效时,储能电容放电,当点火触发脉冲关断后,电容便开始充电。

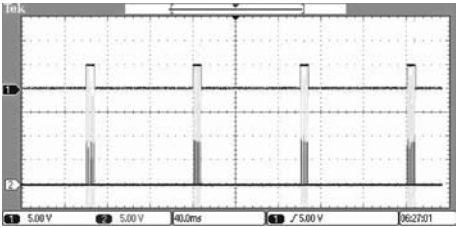


图 6 信号发生器脉冲输出(通道 1)及多次点火触发脉冲(通道 2)
Fig. 6 Signal generator pulse output (Channel 1) and multi spark ignition trigger pulse (Channel 2)

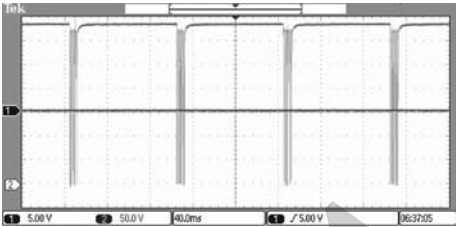


图 7 多次点火触发脉冲(通道 1)及电容充放电波形(通道 2)(4 个循环)
Fig. 7 Multi spark ignition trigger pulse (Channel 1) and capacitor charge-discharge waveform (Channel 2) (4 cycles)

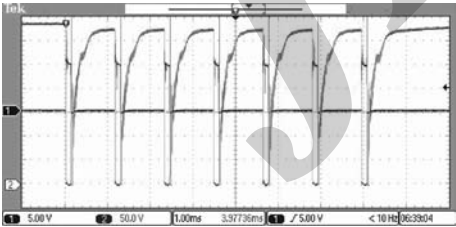


图 8 多次点火触发脉冲(通道 1)及电容充放电波形(通道 2)(1 个循环)
Fig. 8 Multi spark ignition trigger pulse (Channel 1) and capacitor charge-discharge waveform (Channel 2) (1 cycle)

图 9 给出了连续 2 个循环内的点火触发脉冲和初级线圈电压波形,图 10 为将图 9 中的 1 个循环内的波形放大后所采集的结果,可以观测得出,点火线圈初级电压波形与点火触发脉冲一致,开关管导通期间电压波形交替变化,峰峰值达到 600 V 左右。

此外,图 11 和图 12 为点火线圈次级电压及次级电流波形,通过采用数字示波器的双波形计算功能,次级电压及次级电流乘积为曲线 M,对时间进行积分计算得出点火能量值。图 11 为连续 7 次放电积分结果,可以观察到次级放电总能量约为 160.9 mJ,而图 12 中单次放电能量积分结果约为 21.04 mJ,由于每次放电的点火能量不可能完全一致,因此总的积分能量值并非为单次积分能量值的整 7 倍,但基本是一致的。

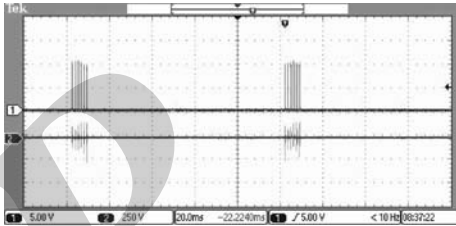


图 9 多次点火触发脉冲(通道 1)及初级线圈电压波形(通道 2)(2 个循环)
Fig. 9 Multi spark ignition trigger pulse (Channel 1) and primary coil voltage waveform (Channel 2) (2 cycles)

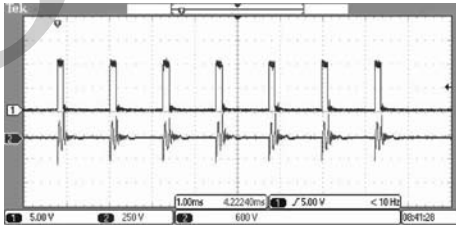


图 10 多次点火触发脉冲(通道 1)及初级线圈电压波形(通道 2)(1 个循环)
Fig. 10 Multi spark ignition trigger pulse (Channel 1) and primary coil voltage waveform (Channel 2) (1 cycle)

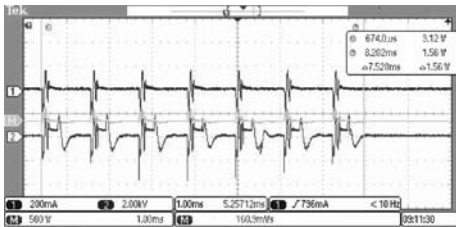


图 11 次级线圈放电波形及多次点火能量积分(通道 1:次级电流;通道 2:次级电压;M:积分值)
Fig. 11 Secondary coil discharge waveform and multi spark ignition energy integration (Channel 1: secondary coil current; Channel 2: secondary coil voltage; M: integration value)

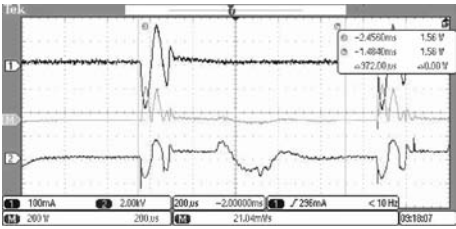


图 12 次级线圈放电波形及单次点火能量积分
(通道 1:次级电流;通道 2:次级电压;M:积分值)

Fig. 12 Secondary coil discharge waveform and single spark ignition energy integration (Channel 1: secondary coil current; Channel 2: secondary coil voltage; M: integration value)

通过对所设计多次点火模块功能特性验证及点火能量测试,表明该电容点火模块不仅实现连续多次点火设计要求,而且放电总点火能量也达到了 160 mJ 以上。

3.2 冷起动试验

为验证电容多次放电点火模块较传统点火系统优越性,本文利用该电容多次放电点火模块在 1 台二冲程点燃式空气辅助缸内直喷发动机上进行了冷起动试验,试验燃料为 0 号柴油,发动机输出轴与测功机轴为弹性联接,环境温度为 6℃,环境压力为 101 kPa,燃油喷射策略相同,起动电机峰值转速为 800 r/min 左右,采用的冷起动多次点火策略为:电机拖动及起动阶段连续点火 5 次,若起动成功及进入暖机工况后点火次数逐渐减为 2 次。图 13 为多次点火与原机自带磁电机点火起动过程转速变化,显然,采用原型机磁电机点火系统时发动机难以起动成功,而多次点火使得发动机顺利起动至 2000 r/min 左右,这说明在当前环境条件下,对燃用柴油的点燃式直喷发动机,多次点火能够实现其成功冷起动。

3.3 小负荷性能试验

在文中第 3.2 节冷起动试验基础上,进行二冲程点燃式直喷发动机燃用柴油的小负荷试验研究,试验工况为 10% 节气门开度,转速为 3 000 r/min,研究点火提前角和点火次数对发动机动力性、经济性及排放性能的影响。

图 14 和图 15 为发动机随点火角及点火次数变化,功率变化及燃油消耗率变化,整体上来说,多次点火有利于改善小负荷工况下动力性及燃油经济性。点火提前角为 10°~20°之间时,功率及燃油消耗率明显获得了明显改善,这说明点火提前角较小时,缸内燃烧整体推迟,与 2 次点火相比,4

次点火促进了缸内的燃烧,增强了发动机的动力性,而随着点火提前角提前至 30°时,缸内燃烧整体提前,多次点火的改善效果逐渐减小,因此功率及燃油消耗率改善程度减小。

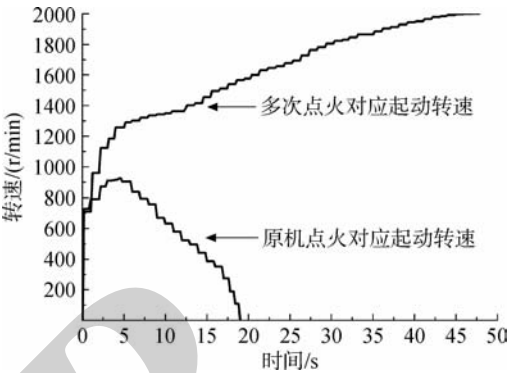


图 13 冷起动过程转速变化
Fig. 13 Speed variation of cold start process

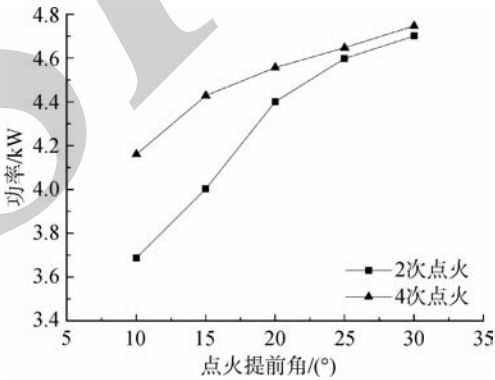


图 14 点火参数对动力性能影响
Fig. 14 Effects of ignition parameters on power performance

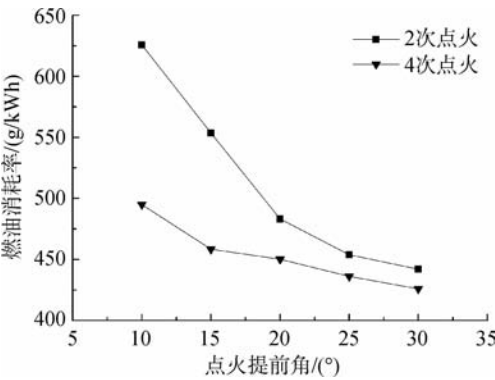


图 15 点火参数对燃油消耗率影响
Fig. 15 Effects of ignition parameters on fuel consumption rate

图16~图18为发动机在小负荷工况下,CO、HC及CO₂排放随点火参数的变化趋势。相同点火时刻下,随着点火次数增加至4次,CO及HC均出现了明显下降,CO₂呈上升趋势,这说明多次点火减少了缸内不完全燃烧,特别在点火提前角较小时的改善更为明显,此外,在4次点火条件下,CO、CO₂及HC排放变化较2次点火变化平缓,这说明在2次点火之后,后期连续2次点火

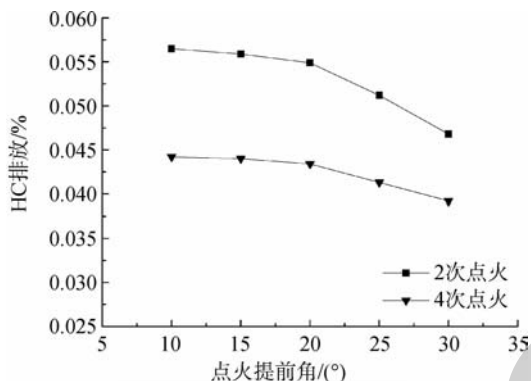


图16 点火参数对HC排放影响

Fig. 16 Effects of ignition parameters on HC emission

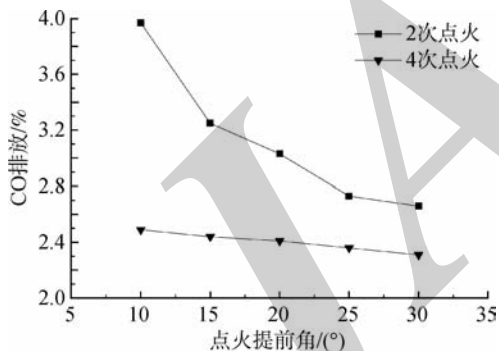


图17 点火参数对CO排放影响

Fig. 17 Effects of ignition parameters on CO emission

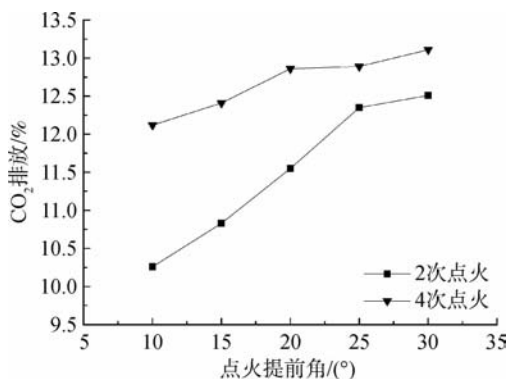


图18 点火参数对CO₂排放影响

Fig. 18 Effects of ignition parameters on CO₂ emission

确实进一步促进了缸内燃烧,这对于降低小负荷工况下有害排放是十分有利的。

4 结论

本文针对某型二冲程点燃式空气辅助缸内直喷发动机燃用柴油问题,提出了实现单电容连续多次放电点火的方法,研制了电容多次放电点火模块,验证了其多次点火功能性和测试了点火能量,并进行了环境温度为6℃下的发动机冷启动试验及3000 r/min的小负荷性能试验研究,结论如下:

1) 所设计电容式多次放电点火模块点火能量能达到160 mJ以上,采用5次点火策略时冷启动成功。

2) 3000 r/min的小负荷工况下,增加点火次数能够促进缸内燃烧,4次点火较2次点火对发动机功率及燃油消耗率改善更大,随着点火提前角至30°时,改善程度逐渐减小。

3) 3000 r/min的小负荷工况下,4次点火较2次点火对发动机排放性能改善更大,HC及CO有害排放均减少,4次点火下不同点火时刻排放变化较2次点火时平缓。

参考文献:

- [1] 尹泽勇,李上福,李概奇. 无人机动力装置的现状与发展[J]. 航空发动机,2007,33(1):10-15.
YIN Zeyong, LI Shangfu, LI Gaiqi. Current state and development of the unmanned aerial vehicle power plants[J]. Aeroengine, 2007, 33(1): 10-15. (in Chinese)
- [2] 张奇,徐国强,杜发荣. 小型航空活塞发动机点火系统优化设计[J]. 航空动力学报,2012,27(2):343-349.
ZHANG Qi, XU Guoqiang, DU Farong. Aero piston engine capacitor discharge ignition system optimization research and design[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 343-349. (in Chinese)
- [3] Cathcart G, Dickson G, Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. SAE Technical Paper 2005-32-0065, 2005.
- [4] 张立鹏,李志锐,吴广顺,等. 电容放电式点火系统的优化设计[J]. 小型内燃机与摩托车,2008,37(6):39-41,76.
ZHANG Lipeng, LI Zhirui, WU Guangshun, et al. Optimizing design of capacity discharge electronic ignition system[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2008, 37(6): 39-41, 76. (in Chinese)
- [5] Patrick J. Lawrence W, Julie E, et al. The feasibility of a kerosene fueled spark ignited two-stroke engine[R]. SAE Technical Paper 911846, 1991.
- [6] 王春丰,魏民祥. 航空活塞发动机燃烧煤油冷起控制研究

- [J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1619-1624.
WANG Chunfeng, WEI Mingxiang. Research on cold start fuel flow control of aero-piston engine burning kerosene [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1619-1624. (in Chinese)
- [7] 石允. 小型点燃式二冲程活塞重油发动机混合气形成的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
SHI Yun. Study on heavy-fuel mixture formation of light-weight spark-ignition two-stroke engine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [8] 莫胜钧. 小型航空点燃式重油活塞发动机点火及火焰传播特性的模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
MO Shengjun. Study on the ignition and flame propagation property of light-weight spark ignition heavy oil aero-engine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [9] 乔安平, 高峰, 李云清. 一种新的能量叠加点火系电路理论研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(2): 21-24, 28.
QIAO Anping, GAO Feng, LI Yunqing. Research on circuit theory of a new superposed energy type of ignition system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 21-24, 28. (in Chinese)
- [10] 乔安平, 高峰, 李云清. 一种新的能量叠加点火系性能匹配研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 41-44.
QIAO Anping, GAO Feng, LI Yunqing. New superposed energy type ignition system and its matching performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 41-44. (in Chinese)
- [11] 张晓, 汪洋, 史家涛, 等. 多脉冲点火对火花助燃均质充量压缩着火燃烧的影响[J]. 天津大学学报, 2007, 40(10): 1146-1150.
ZHANG Xiao, WANG Yang, SHI Jiatao, et al. Effect of multi-Pulse ignition on spark-assisted homogenous charge compression ignition combustion [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(10): 1146-1150. (in Chinese)
- [12] 卫忠星, 何文华, 邵千钧, 等. 多次点火对 LPG 发动机怠速性能影响的研究[J]. 内燃机工程, 2004, 25(6): 27-29.
WEI Zhongxing, HE Wenhua, SHAO Qianjun, et al. Study on the effects of multi-time ignition upon idle performance of LPG-fueled engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(6): 27-29. (in Chinese)
- [13] 邵千钧, 何文华, 卫忠星, 等. 多次点火提高 LPG 发动机点火可靠性的研究[J]. 内燃机工程, 2005, 26(4): 59-62.
SHAO Qianjun, HE Wenhua, WEI Zhongxing, et al. Study of multi-time ignition improving ignition reliability of LPG-fueled engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(4): 59-62. (in Chinese)
- [14] Gerald J R. An efficient, power-enhanced ignition system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2): 306-310.
- [15] Sung B H, Kyu H C, Sung O R, et al. Ignitability and combustion characteristics of the multi spark capacitor discharge ignitor for a lean burn engine [R]. SAE Technical Paper 952396, 1995.
- [16] 张德福, 张惠明, 孙文广, 等. 多脉冲点火天然气发动机的初步研究[J]. 汽车技术, 2008, 8: 13-16.
ZHANG Defu, ZHANG Huiming, SUN Wenguang, et al. Preliminary investigation on CNG engine with multi-pulse ignition [J]. Automobile Technology, 2008, 8: 13-16. (in Chinese)
- [17] 姜立标, 杨建国, 杨书华. 数字式点火模块自适应控制的研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(5): 549-552.
JIANG Libiao, YANG Jianguo, YANG Shuhua. A study on adaptive control for digital ignition module [J]. Automobile Engineering, 2004, 26(5): 549-552. (in Chinese)
- [18] 王宏伟, 魏民祥, 杨海青, 等. 空气辅助缸内直喷发动机正时控制策略[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2942-2947.
WANG Yongwei, WEI Mingxiang, YANG Haiqing, et al. Timing control strategies of air-assisted direct injection engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 2942-2947. (in Chinese)
- [19] LI Binglin, WEI Minxiang. Study on adaptive ignition energy system of two-stroke spark ignition engine [C] // Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Guilin, China: IEEE, 2009: 337-340.
- [20] 邹开凤, 李勋章, 殷合香. 电容放电点火装置参数的选择研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(5): 401-403.
ZOU Kaifeng, LI Xunzhang, YIN Hexiang. A study on the selection of parameters for capacitor discharge ignition device [J]. Automobile Engineering, 2007, 29(5): 401-403. (in Chinese)

(编辑: 叶 青)