

文章编号:1000-8055(2011)02-0315-08

小型二冲程航空发动机燃烧循环变动研究

李冰林, 魏民祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用峰值压力、最大压力上升率、燃烧百分率以及它们各自所对应的曲轴转角和相空间重构投影法评价小型二冲程航空发动机的燃烧循环变动。通过比较,认为燃烧百分率所对应的曲轴转角能更好地表征发动机的燃烧循环变动。针对发动机在中速和不同负荷条件下的燃烧循环变动分析,结果表明随负荷的加大,缸内燃烧的循环变动会变小,认为是负荷加大,气体的不均匀度减小占主因,循环变动减小。最后分析了发动机在高速时的燃烧循环变动,得出小型二冲程发动机在该转速的不同工况下的燃烧变动率均小于 10%,发动机工作在正常范围内。为以后改燃航空煤油后的燃烧性能分析提供一种可参考对比的方法。

关 键 词: 二冲程航空发动机; 循环变动; 气缸压力; 燃烧百分率; 相空间

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Study on cyclic variations of combustion in mini two-stroke aviation engine

LI Bing-lin, WEI Min-xiang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The maximum pressure, maximum rate of pressure rise, mass fraction burn and its corresponding crank angle and reconstruction phase space were used to evaluate the cyclic variations of cylinder pressure under different working conditions of two-stroke aviation gasoline engine. On a comparative basis, the method of mass fraction burn and its corresponding crank angle can indicate the cyclic variations of engine more effectively. For the problem of cyclic variations of engine working in medium speed and different loads, the results show that cyclic variations will decrease with load increase, because the decrease of asymmetry of mixture gas is a main factor. After analyzing the cyclic variations at high speed working, the mini two-stroke aviation gasoline engine can work in normal condition because its coefficient of variation at different working conditions is less than 10%. The paper provided a contrastive method for performance analysis of combustion after the fuel was changed from gasoline to aviation kerosene.

Key words: two-stroke aviation engine; cyclic variations; cylinder pressure; mass fraction burn; phase space

活塞式发动机,特别是二冲程汽油发动机,能满足小型无人直升机高空性和续航时间较长等要求,具有低成本、低耗油率、高可靠性和较高的功

质比,被广泛应用于中、小型无人机^[1]。

航空活塞发动机是一种工质开式循环并以间歇方式工作的动力机械,它的燃烧循环变动过程

收稿日期:2009-12-29; 修订日期:2010-06-21

基金项目:预研项目

作者简介:李冰林(1979—),男,江西安福人,博士生,主要研究方向为发动机测试和控制技术。

是一个普遍存在的问题. 尽管在某些相同的运行环境下, 但由于燃烧过程的随机性, 会表现在压力曲线、火焰传播情况以及发动机输出功率均不相同. 而发动机的最佳点火提前角、空燃比是根据“平均”循环的要求确定的. 因此燃烧的循环变动会导致平均指示压力以及输出扭矩的变动, 使动力装置的操纵性能恶化, 只有减少燃烧的循环变动, 才有可能获得最佳的性能^[2]. 研究表明, 在同样的燃油消耗率下, 如果能够去除燃烧循环变动, 发动机的输出功率可以提高 10%^[3].

国内许多学者研究了针对不同燃料或替代燃料的循环变动分析. 李兴虎等人对火花点火发动机压力循环变动的评价方法进行了分析, 认为进气过程对循环变动也会产生影响^[4]; 有学者利用韦伯燃烧模型来对气缸压力信号建模, 通过试验数据辨识出模型的相关参数的变化来分析缸内压力循环变动过程^[5-7]. 文献[8]探讨了天然气发动机在稀薄燃烧条件下循环变动系数和曲轴对应转角的相关性. 文献[9]利用小波分析的方法分析了不同工况下缸内峰值压力的时间序列过程. 文献[10]利用最大缸内压力和其所对应的角度, 分析了四冲程发动机不同点火提前角下对燃烧变动的的影响.

本文主要针对小型二冲程航空发动机, 利用所获得的缸内压力数据, 对其在不同的工况下的燃烧循环变动进行了峰值压力、最大压力上升率、燃烧百分率以及所分别对应的曲轴转角和相空间重构投影等不同种方法进行有效的分析和比较. 为小型二冲程航空发动机改烧航空煤油后的性能分析提供了可参考对比的思路.

1 燃烧循环变动的试验

通常表征燃烧循环变动的参数主要有: 与气缸压力有关的参数, 与燃烧率有关的参数, 与火焰前锋位置相应的参数. 由于压力参数比较容易测

量, 因此常用它来表征燃烧的循环变动^[2].

为了对发动机燃烧的循环变动进行更有效的分析, 需采集不同工况下的多个循环周期的缸内压力信号. 本实验当中, 分别采集发动机在几种稳定工况下, 转速为 3 500 r/min 下负荷分别为 20%, 25% 和 30% 的缸内压力数据、5 000 r/min 负荷为 35% 和 6 000 r/min 负荷为 43% 的几组试验数据, 在分析时选取 50 个周期的压力信号进行循环变动研究. 选择不同转速不同负荷主要是避免发动机工作在小负荷高转速情况下, 这样会出现后燃严重, 润滑效果不好, 容易出现拉缸现象; 同时也要避免发动机工作大负荷高转速情况, 这样会使主燃区提前, 可能出现在上止点位置, 导致缸盖出现过热. 在进行试验时, 保持最佳空燃比和最佳点火提前角等参数固定不变, 选择改变其他参数进行试验研究, 得出在不同工况下的燃烧循环变动大小和规律.

1.1 试验平台搭建

所搭建的发动机试验台架主要由 EST-2002 型内燃机测控系统、CWF110G 电涡流测功机、试验发动机构成, 如图 1 所示, 其机载电子控制单元 (ECU) 可以监测发动机转速、节气门开度、缸体温度、进气温度、大气压力等参数. PC (personal computer) 机通过串口与发动机机载 ECU 进行通信, 实时采集发动机运行参数.

1.2 气缸压力测试

气缸压力测试系统采用瑞士 Kister 的 6113A 火花塞式的压力传感器, 具有极高的灵敏度、精度, 固有频率高, 无需对发动机气缸另外打孔. 电荷放大器使电荷信号转换为电压信号, 使用专用的采集卡对缸内压力进行采集. 采集过程中信号尽量使用接地和抗干扰措施. 曲轴转角发生器采用分辨率为 0.2°. 表 1 为试验发动机相关参数.

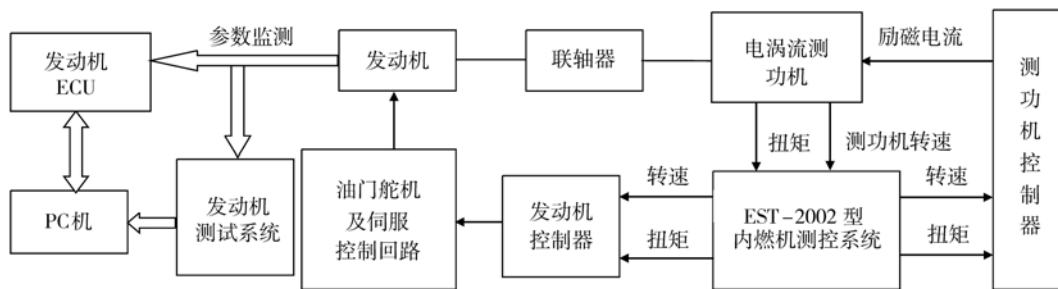


图 1 发动机动态试验台架结构示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

表1 试验发动机的相关参数

Table 1 Parameters of experimental engine

参数	数值或说明
排量/cm ³	625
气缸数	2
气缸直径/cm	76
行程/cm	69
点火方式	双火花塞电容放电点火(CDI)
进气方式	簧片阀式
燃烧室形式	盆式
压缩比	9.5:1
标定功率/kW	47.8
转速/(r/min)	6300

2 试验数据的分析

为了去除气缸压力信号由于干扰所带来的噪声,采用了四阶的零相移的 Butterworth 低通滤波器,截止频率设定为 1000 Hz. 针对信号可能存在低频趋势项的问题,采用了多项式最小二乘法来拟合信号,通过与源信号相减来去除这种趋势项的存在. 为此,从压力参数出发,根据度量燃烧循环变动的一个重要参数:平均指示压力变动系数 σ 来计算出发动机在不同工况下该值的大小.

$$\sigma = 100 \times \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{\bar{p}}} \quad (1)$$

式中 $\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$, n 为分析的周期数; p_i 为每周期的给定曲轴转角下的压力.

经计算在 3500 r/min 稳定工况下,负荷为 20% 时平均指示压力变动系数 σ 为 4.5704%; 负荷为 25% 时平均指示压力变动系数 σ 为 3.7348%; 负荷为 30% 时平均指示压力变动系数 σ 为 2.7982%.

2.1 不同工况下峰值压力和最大压力上升率

循环的峰值压力 ($p_{\max}$) 是评价发动机工作粗暴性的重要参数. 因为峰值压力的变化对燃烧的循环变动比较敏感,且数值为直接测得,所以峰值压力的变化是很好地反映出燃烧循环压力的变化的一种手段^[11]. 图 2 反映了不同工况下的峰值压力变化.

从实际分析效果图 2 来看,在相同转速不同

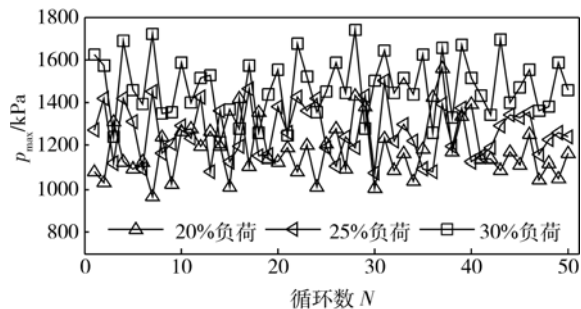


图2 3500 r/min 工况下的峰值压力变化

Fig. 2 Maximum pressure variations in the speed of 3500 r/min

负荷工况下,燃烧的循环变动都存在,而且局部范围内波动范围大小相当. 峰值压力波动比较剧烈,可以认为其对循环变动比较敏感. 单纯从此角度分析,很难细致得到不同工况下的循环变动大小.

最大压力上升率 ($dp/d\theta$)_{max} 是表征发动机燃烧等容度和粗暴程度的指标. 其值越大,则燃烧等容度越高,有利于发动机的动力和经济性. 该表征方法就是求取气体压力曲线微分,因此压力曲线微小的波动都可能造成最大压力上升率曲线大的波动. 因此,最大压力上升率及其出现位置的计算结果必然会存在一定误差,影响评价准确度. 图 3 是从最大压力上升率来分析燃烧的循环变动的.

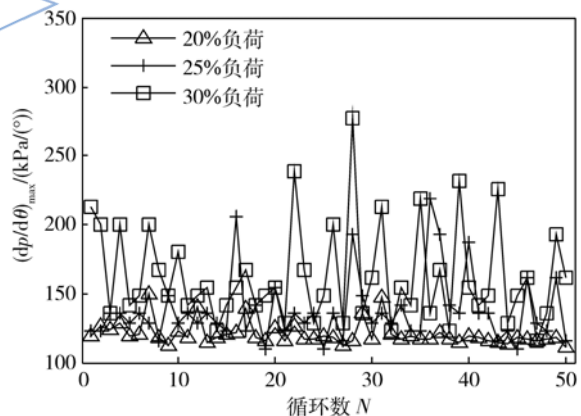


图3 3500 r/min 工况下最大压力上升率变化

Fig. 3 Maximum rate of pressure rise variations in the speed of 3500 r/min

从图 3 分析,在转速为 3500 r/min 相同条件下,负荷为 20% 时最大压力上升率比较平稳,而随着负荷的加大,最大压力的上升率变动明显. 与之前所计算的 σ 值大小有差异.

峰值压力和最大压力上升率来分析循环变动与之前所计算的 σ 结果值都有一定误差,在进行不同工况比较时,这些误差可能会淹没由于工况

不同引起的循环变动差异。

2.2 最大峰值压力和最大压力上升率在曲轴不同转角下的比较

单纯地只用最大峰值压力和最大压力上升率来描述燃烧的循环变动有时会掩盖这些信息所发生的位置信息,因为有时最大的燃烧压力产生时所对应的曲轴转角可能会有较大的偏差,这样可以突出反映出燃烧火焰上升速度等。为了更进一步地分析每个工况的燃烧过程,对每种工况下的峰值压力和最大压力上升率发生的曲轴转角位置进行了比较分析,更能容易地反映出整个燃烧循环内的变动情况。

正常燃烧循环峰值压力和该压力所对应的曲轴转角有良好的对应的关系。3500 r/min 转速条件下,负荷为 20% 的峰值压力散点分布如图 4(a) 所示;而 25% 工况下的峰值压力所对应的曲轴转角的分布稍好,如图 4(b);在 30% 工况下的峰值压力所对应曲轴转角分布较集中,如图 4(c)。由此可以推断出,在 3500 r/min 的工况下,负荷加大,燃烧的循环变动减小,符合之前所计算的 σ 数值大小。

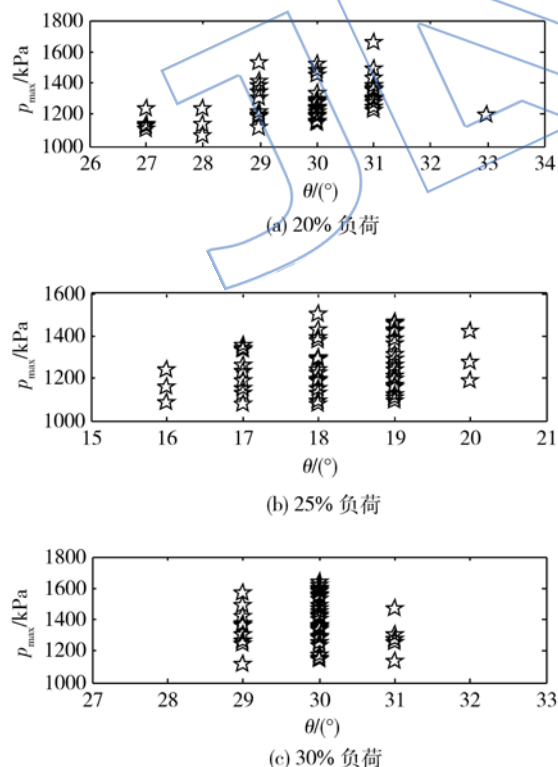


图4 3500 r/min 工况下峰值压力与曲轴位置转角关系

Fig. 4 Relationship between the maximum cylinder pressure and its crank angle in the speed of 3500 r/min

根据最大压力升高率可用来推断出燃烧过程放热速率,最大压力上升率与其所对应的曲轴转角如图 5 中各图所示。

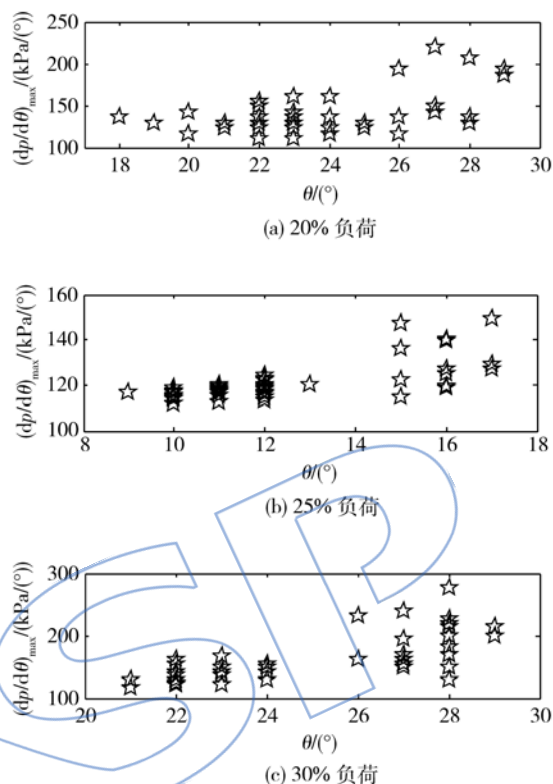


图5 3500 r/min 工况下最大压力上升率与曲轴位置转角关系

Fig. 5 Relationship between maximum rate of pressure rise and its crank angle in the speed of 3500 r/min

在相同的 3500 r/min 工况下,图 5(a) 中负荷为 20% 时的最大压力上升率,散点分布较大;而负荷为 25% 和 30% 工况下的最大压力上升率所对应的曲轴转角的分布范围要好于负荷为 20% 的分布,如图 5(b) 和 (c)。由此也可以推断出,随着负荷的增加,燃烧的循环变动有所减小,但变化不明显,利用最大压力上升率在曲轴不同转角下方法很难判断循环变动的情况,很难看出符合之前所计算的 σ 数值大小。

2.3 指示平均有效压力 (IMEP) 与燃烧百分率相应曲轴转角变动间的关系

指示平均有效压力表征了整个循环压力变动的综合情况,并且和发动机的输出功率密切相关,故在以发动机输出功率变动和动力装置驱动稳定性为侧重点研究中作为常用的一种方法。

IMEP 不仅取决于峰值压力的大小,而且与

峰值压力出现的曲轴转角位置有关。从图6中可以认为,在3500 r/min下的不同负荷条件下,IMEP幅值变化范围相近,很难比较其循环变动性能。

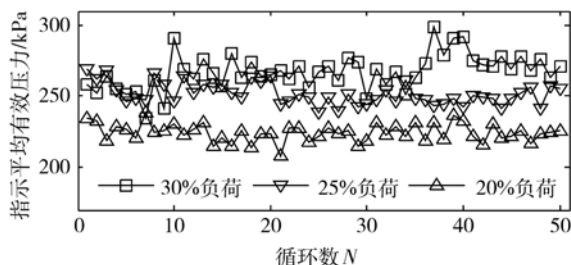


图6 3500 r/min 工况下指示平均有效压力变动
Fig. 6 Indicated mean effective pressure variations in the speed of 3500 r/min

为了细致地分析每个循环燃烧变动的情况,采用 Rassweiler-Withrow 法计算各循环的燃烧百分率 x ,采用燃烧时间参数分析发动机的循环变动可进一步了解循环变动情况^[2]。为此计算 $\theta_{x=0\sim0.1}$, $\theta_{x=0\sim0.5}$ 和 $\theta_{x=0\sim0.9}$ 的变动状况。 $\theta_{x=0\sim0.1}$, $\theta_{x=0\sim0.5}$ 和 $\theta_{x=0\sim0.9}$ 分别为从点火到燃烧百分率为 0.1, 0.5 和 0.9 这段时间内曲轴所转过的角度。平均指示压力 p_i 与燃烧百分率相应于曲轴转角的变动是相关的,这主要是因为 p_i 值取决于各个曲轴转角下的压力值。

从图7中分析可得,在3500 r/min,负荷为20%的工况下,在燃烧百分率的 $\theta_{x=0\sim0.1}$ 时间段就出现了循环变动的情况。在燃烧的中后期, $\theta_{x=0\sim0.9}$ 时的曲轴转角的分布变小。这说明火焰进入燃烧后期,燃烧循环变动有变小的趋势。

图8为3500 r/min,负荷为25%的工况下的分析效果图,从燃烧百分率的 $\theta_{x=0\sim0.1}$, $\theta_{x=0\sim0.5}$, $\theta_{x=0\sim0.9}$ 的三种情况分析,曲轴转角的分布大小一样,这说明火焰从发展期进入到主燃烧期后,火焰的发展期变动没有被放大。

从图9中分析可得,在3500 r/min 负荷为30%的工况下,在燃烧百分率的 $\theta_{x=0\sim0.1}$ 时间段循环变动较小。在燃烧的中后期,通过分析 $\theta_{x=0\sim0.9}$ 时的状况,循环变动同样存在而且稍微增加。这说明火焰从发展期进入到主燃烧期后,稍微存在后燃的现象。

综合图7、图8和图9分析,在3500 r/min 工况下随着负荷的增大,燃烧百分率的散点稍微变小。由此也可以推断出,在3500 r/min 的不同负荷工况下,负荷为30%时燃烧的循环变动最小,

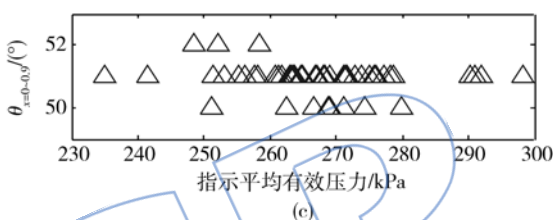
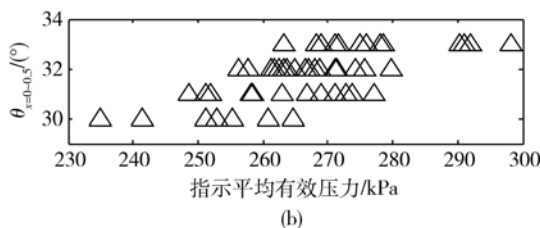
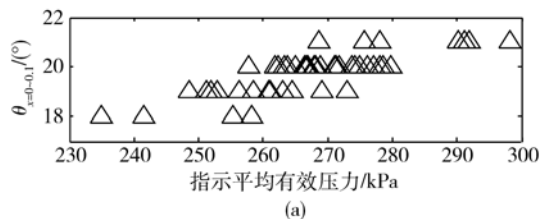


图7 3500 r/min, 负荷为20%工况下不同转角
燃烧率变动
Fig. 7 Cyclic variations of different crank angles in the speed of 3500 r/min and 20% load

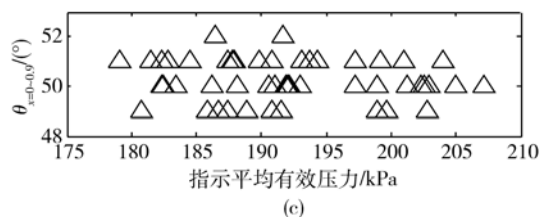
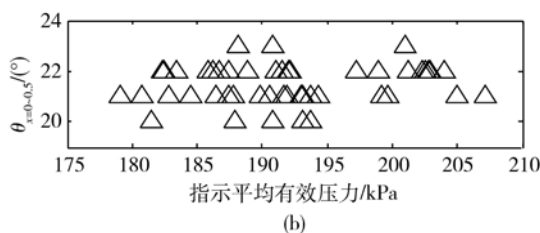
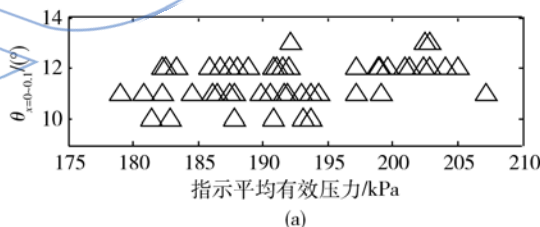


图8 3500 r/min, 负荷为25%工况下不同转角
燃烧率变动
Fig. 8 Cyclic variations of different crank angles in the speed of 3500 r/min and 25% load

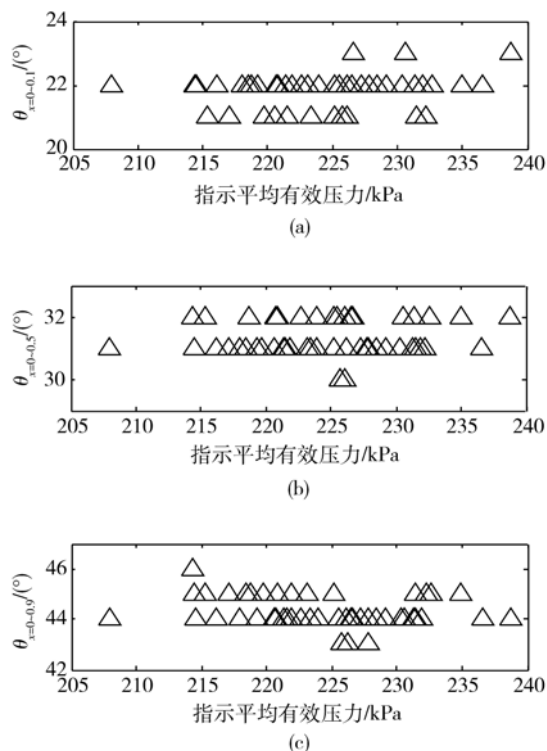


图9 3500 r/min, 负荷为30%工况下不同转角
燃烧率变动

Fig. 9 Cyclic variations of different crank angles in the speed of 3500 r/min and 30% load

符合之前所计算的 σ 数值大小。

该分析方法能比较细致地分析燃烧循环变动情况, 为此分析发动机在5000 r/min 稳定工况下, σ 大小为6.7951%, 以及6000 r/min 稳定工况下, σ 值大小为2.9016%燃烧循环变动情况。

从图10中分析可得, 在5000 r/min 的工况下, 在燃烧百分率的10%时, 也就是说在燃烧开始就出现了循环变动的情况, 致使整个燃烧过程循环变动过程比较明显。燃烧变动主要发生在燃烧初期, 随着燃烧持续时间加长, 燃烧变动持续。这主要是由于在高速下, 火花点火后火焰向整个燃烧室发展的进程, 火焰前锋面积的变化以及燃烧速率等均受到气流变化的影响。

从图11中分析可得, 在6000 r/min 的工况下, 在燃烧的 $\theta_{x=0-0.9}$ 阶段, 也就是只在燃烧的后期, 稍微出现了一点循环变动的情况。由于发动机在更高的转速下运行, 空气、燃料和残余废气随着气流的快速流动获得比开始较好的混合, 使得火焰从层流燃烧阶段到形成了较稳定火核。

综合图10和图11分析, 在6000 r/min 工况下的燃烧百分率比5000 r/min 工况下的散点小, 由此也可以推断出, 在6000 r/min 的工况下, 燃

烧的循环变动最小, 符合之前所计算的 σ 数值

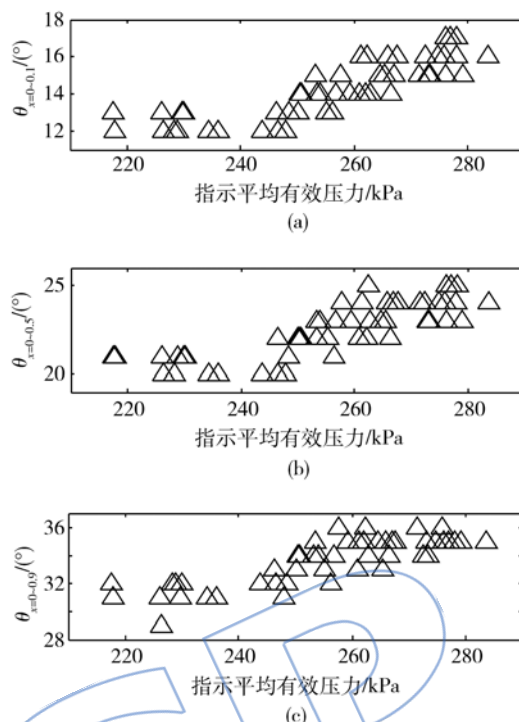


图10 5000 r/min 工况下不同转角燃烧率变动

Fig. 10 Cyclic variations of different working conditions in the speed of 5000 r/min

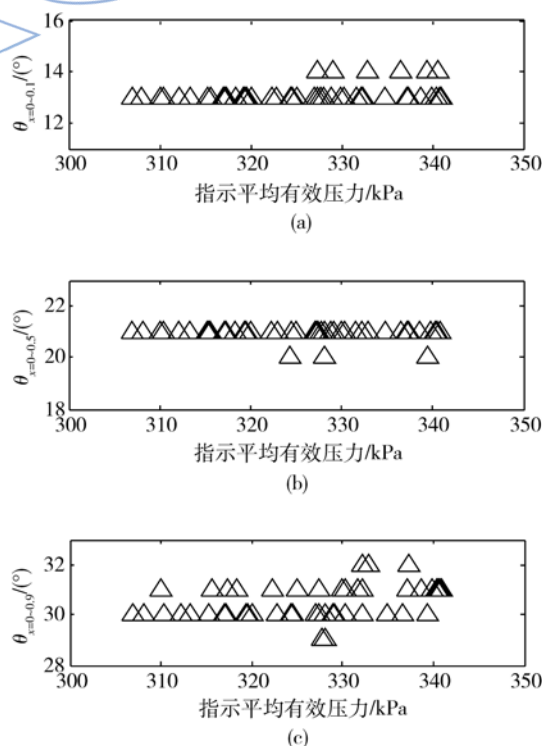


图11 6000 r/min 工况下不同转角燃烧率变动

Fig. 11 Cyclic variations of different working conditions in the speed of 6000 r/min

大小.这说明:从燃烧百分率来分析,初期的燃烧变动是占主要的.随着混合气变稀,指示平均有效压力变动率增大,表明混合气变稀后,火核形成阶段或燃烧总时间的增长,是燃烧变动增加的一个重要原因.

2.4 重构相空间分析不同转速和负荷条件下的循环压力变动^[12]

根据文献[12]的方法重构了相空间分析发动机的燃烧循环变动问题.主要思路是选择利用微分坐标系对一维的气缸内压力时间序列进行相空间重构,建立的三维微分坐标系

$$X = p(\theta) \quad Y = \frac{dp(\theta)}{d\theta} \quad Z = \frac{d^2p(\theta)}{d\theta^2} \quad (2)$$

式中 $p(\theta)$ 为曲轴转角角度为 θ 时的压力,重构后的相空间为

$$\Omega_{X,Y,Z} = \{(X,Y,Z) \in R^3\} \quad (3)$$

利用该三维相空间在二维空间平面 X-Y 内进行投影,可对发动机的燃烧循环变动进行分析.

对于利用相空间分析的相平面投影图结果由图 12 中可知,如果轨迹线比较重叠,则说明对应的循环变动系数较小,如出现轨迹线比较分散、重合度差的曲线,且变化范围较大,认为循环变动系数

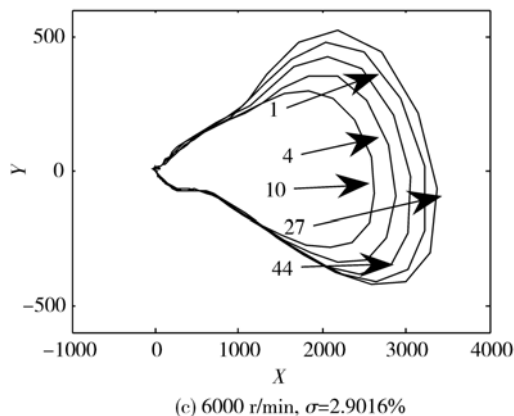


图 12 压力时间序列相空间的平面投影

Fig. 12 Plane projection of cylinder pressure time series phase space

数大.比较图 12(a)~(c),轨迹线重合度最差的为图 12(b),图 12(a)次之,图 12(c)好于其他两个,基本上与计算的 σ 大小相符.高转速工况,轨迹线发散较早(从零点坐标开始,发散位置相对于整个封闭曲线中出现位置的早晚)和收敛也较早,说明在高转速时,主燃区提前了.因此,利用相空间投影的方法能对燃烧的主体趋势进行较好的辨别.

3 结论

通过试验分析可知,针对小型二冲程发动机燃烧的循环变动分析得出以下主要结论:

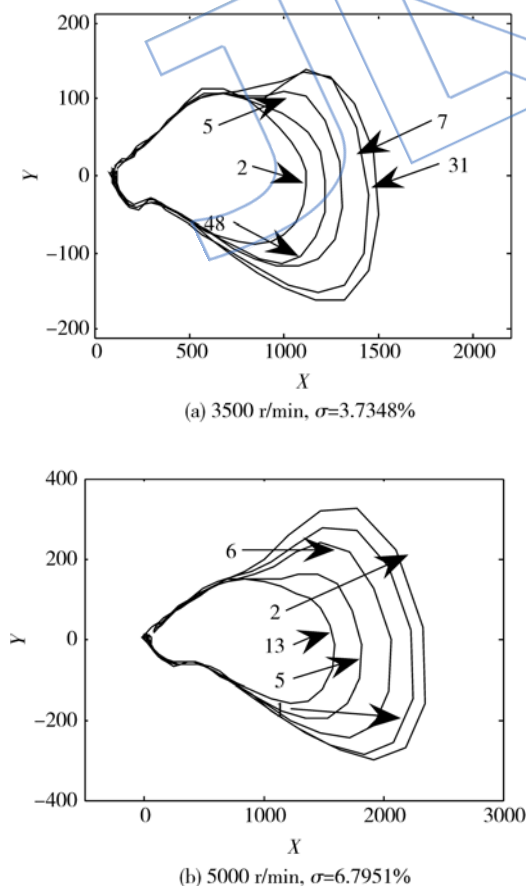
1) 发动机在中速时且同一转速条件下,随着负荷的加大,缸内燃烧的循环变动会变小,认为是负荷加大,气体的不均匀度减小占主因,循环变动减小.

2) 在分析方法上,通过分析峰值压力、最大压力上升率、燃烧百分率以及它们各自所对应的曲轴转角和相空间重构投影等不同方法的分析,认为根据平均指示压力以及燃烧百分率和其所对应的曲轴转角更细致地分析燃烧过程的变动情况.

3) 小型二冲程航空发动机在不同工况下的燃烧变动率均小于 10%,认为发动机工作在正常范围.为以后改燃烧航空煤油后的燃烧性能分析提供一种可参考对比的方法和思路.

参考文献:

- [1] 林海英,龙向阳.某型增压航空活塞发动机仿真研究[J].航空动力学报,2009,24(6):1332-1338.



- LIN Haiying, LONG Xiangyang. Simulation study of an aero-piston engine with single stage turbocharger[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(6): 1332-1338. (in Chinese)
- [2] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 294-317.
- JIANG Deming. The combustion and emission of internal combustion engine[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2001: 294-317. (in Chinese)
- [3] Ozdor N, Dulger M, Sher E. Cyclic variability in spark ignition engines; a literature survey[R]. SAE Paper 940987, 1994.
- [4] 李兴虎, 蒋德明, 沈惠贤. 火花点火发动机压力循环变动的评价方法研究[J]. 内燃机学报, 2000, 18(2): 171-174.
- LI Xinghu, JIANG Deming, SHEN Huixian. Study on evaluated methods of pressure cyclic variation in spark ignition engines[J]. Transactions of CSICE, 2000, 18(2): 171-174. (in Chinese)
- [5] Peyton J C, Landsborough K J, Roberts J B. Identification of stochastic models for cyclic variations from measured pressure data[R]. SAE Paper 970060, 1997.
- [6] Roberts J B, Peyton J C, Landsborough K J. Stochastic modelling and estimation for cyclic pressure variations in spark ignition engines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(2): 419-438.
- [7] Sen A K, Longwic R, Litak G, et al. Analysis of cycle-to-cycle pressure oscillations in a diesel engine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(2): 362-373.
- [8] Zervas E. Correlations between cycle-to-cycle variations and combustion parameters of a spark ignition engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(14-15): 2073-2081.
- [9] Sen A K, Litak G, Taccani R, et al. Wavelet analysis of cycle-to-cycle pressure variations in an internal combustion engine[J]. Chaos, Solutions and Fractals, 2008, 38(3): 886-893.
- [10] Litak G, Kaminski T, Czarnigowski J, et al. Combustion process in a spark ignition engine; analysis of cyclic maximum pressure and peak pressure angle oscillations[J]. Meccanica, 2009, 44(1): 1-11.
- [11] Belmont M R. Statistical aspects of cyclic variability [R]. SAE Paper 860324, 1986.
- [12] 姚宝峰, 李国岫. 天然气发动机燃烧循环变动特征参数分析研究[J]. 内燃机工程, 2007, 28(4): 1-5.
- YAO Baofeng, LI Guoxiu. Study on characteristic parameters of cycle-to-cycle combustion variations in natural gas engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(4): 1-5. (in Chinese)