

文章编号:1000-8055(2012)07-1619-06

航空活塞发动机燃烧煤油冷起动油量控制研究

王春丰, 魏民祥

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 为了解决航空活塞发动机燃烧煤油时冷起动油量控制的问题, 根据油膜理论, 建立冷起动油膜补偿模型, 并推导出适于在微控制器上实现的离散控制算法. 利用 Matlab/Simulink 对基于油膜补偿器的冷起动油量控制模型进行仿真, 结果表明该模型能够保证起动瞬间有足够数量燃油进入气缸. 进行原型机改烧煤油试验, 在不改动发动机供油和点火系统的情况下, 通过冷起动油量控制, 煤油发动机冷起动性能得到改善.

关 键 词: 航空活塞发动机; 煤油; 冷起动; 油膜补偿; 燃油流量

中图分类号: V234

文献标志码: A

Research on cold start fuel flow control of aero-piston engine burning kerosene

WANG Chun-feng, WEI Min-xiang

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: In order to solve the problem of cold start fuel flow control of an aero-piston engine fueled by kerosene, a fuel film compensation model based on fuel film theory was presented, and a discrete control algorithm running on microcontroller was given. What's more, a fuel flow control model for cold start which was based on fuel film compensation was simulated on Matlab/Simulink platform. The simulation result shows this control model can ensure sufficient kerosene flowing into the cylinder. Finally, the prototype burning kerosene experiments were performed, which shows that without changing fuel feeding and ignition system, the cold start capability of kerosene engine has been improved by cold start fuel flow control.

Key words: aero-piston engine; kerosene; cold start; fuel film compensation; fuel flow

传统的航空活塞发动机多以汽油为燃料. 然而汽油的闪点低, 挥发性强, 常温下遇明火易发生爆炸, 这给汽油的储存、运输和使用都造成了很大的安全隐患. 尤其在特定领域, 对燃料的安全性要求较高, 迫切需要寻找安全可靠的燃料来替换汽油燃料. 与汽油相比, 煤油的闪点高, 挥发性弱, 不易着火, 能量密度高且易于获得^[1]. 因此研究以煤油为燃料的点燃式航空活塞发动机具有重要的应

用价值. 然而对于非缸内直喷发动机, 在冷机状态下, 喷射出的煤油颗粒遇到冷的壁面后会凝结成油膜, 且煤油蒸发性能差, 油膜蒸发缓慢, 造成气缸内难以形成着火所需的足够质量分数可燃混合气, 导致煤油活塞发动机冷起动困难^[2]. 煤油发动机冷起动时, 需要对进入气缸的燃油流量进行油膜补偿, 若燃油流量补偿过小, 混合气质量分数低, 发动机起动困难甚至不能起动; 若流量补偿过

收稿日期: 2011-08-03

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1619_025.html

作者简介: 王春丰(1987—), 男, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事发动机电子控制、数学建模等方面的研究.

大,混合气质量分数高,燃油经济性差,排放增加,甚至造成发动机淹缸而无法启动.因此,冷启动燃油流量控制是研究煤油活塞发动机的关键问题之一.

目前,国外已有煤油航空活塞发动机的产品出现.这些产品主要采用缸内直喷技术,保证冷启动过程中火花塞周围的混合气质量分数,从而使发动机能够顺利启动^[3].国内目前对煤油活塞发动机的研究主要是在已有非缸内直喷汽油发动机上进行改烧煤油试验.

本文以某型二冲程曲轴箱喷射汽油发动机为原型机进行改烧煤油的冷启动技术研究,将主要讨论冷启动时燃油流量对煤油发动机冷启动性能的影响,首先推导出油膜补偿器的离散算法;然后建立一种基于油膜补偿器的冷启动油量控制模型,并对模型进行仿真验证.通过对燃油进行油膜补偿,保证冷启动阶段能够有足够数量的燃油进入气缸;最后将通过原型机改烧煤油冷启动试验来验证冷启动燃油流量对发动机冷启动性能的影响效果.

1 冷启动油膜模型与油膜补偿器

发动机采用曲轴箱喷射方式,喷油器喷射出的燃油不需要经过进气道而直接进入曲轴箱.在冷启动工况下改烧煤油时,由于曲轴箱壁面温度很低,喷油器喷射出的煤油颗粒遇到冷的壁面,凝结形成油膜,附于曲轴箱壁面上.为了保证冷启动时进入气缸内混合气的质量分数,需要对燃油流量进行油膜补偿.

1.1 油膜模型

Aquino 等学者研究冷启动及其他瞬态工况时提出了油膜模型的概念.结合本文发动机特点,模型示意图如图 1 所示.

假设在喷油器喷射出的燃油中,有占总量比 x 的部分沉积在曲轴箱壁面上,成为油膜,剩余 $(1-x)$ 部分的燃油仍然在空气中传播.沉积下来的油膜将会逐渐蒸发,这样油膜就以 m/τ 的速率减少(其中 m 为油膜的质量, τ 为时间常数).模型可以表述为如下^[4-7]:

$$\dot{m}_{fw} = -\frac{m_{fw}}{\tau_{fw}} + x\dot{m}_{fi} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{fv} = (1-x)\dot{m}_{fi} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{fv} + \frac{m_{fw}}{\tau_{fw}} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}_{fi}$ 为喷油器喷出的燃油质量流量, m_{fw} 为油

膜质量, $\dot{m}_{fw}$ 为油膜质量变化量, $\dot{m}_{fv}$ 为燃油直接蒸汽流量, $\dot{m}_{fc}$ 为进入气缸的燃油流量, x 为喷射的燃油中沉积于壁面的比例, τ_{fw} 为油膜蒸发时间常数.

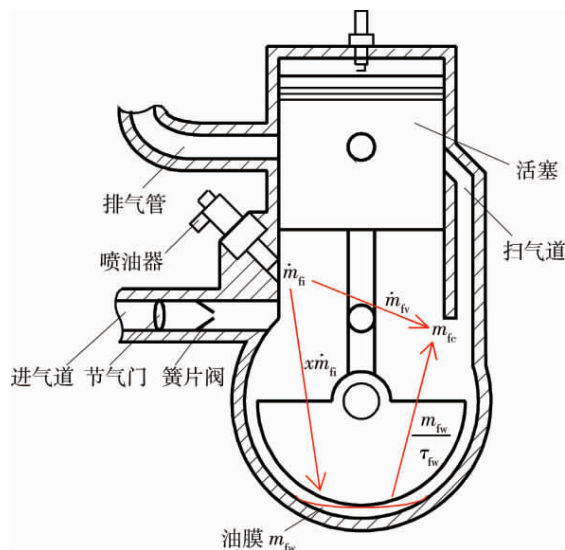


图 1 二冲程发动机油膜模型示意图

Fig. 1 Sketch of the fuel film model of two-stroke engine

1.2 油膜补偿器

为了保证冷启动时混合气的空燃比在可燃范围内,需在发动机电子控制单元中增加油膜补偿器,对油膜的动态特性进行补偿.油膜补偿器是一个前馈控制器,它可以预测燃油成为油膜的那一部分燃油的质量,并进行补偿^[8].其输入为当前循环需要的理论燃油流量 $\dot{m}_{fdes}$,输出为喷油器喷射出的燃油流量 $\dot{m}_{fi}$.在冷启动过程中,油膜补偿器控制喷油器喷出更多的燃油,从而保证实际进入气缸的燃油流量 $\dot{m}_{fc}$ 与当前循环需要的燃油流量 $\dot{m}_{fdes}$ 相等.

由式(2)和式(3)可得实际进入气缸的燃油流量为

$$\dot{m}_{fc} = (1-x)\dot{m}_{fi} + \frac{m_{fw}}{\tau_{fw}}$$

将 $\dot{m}_{fdes} = \dot{m}_{fc}$ 代入上式可得油膜补偿器的模型为^[9-10]

$$\dot{m}_{fi} = \frac{1}{1-\hat{x}} \left(\dot{m}_{fdes} - \frac{m_{fw}}{\hat{\tau}_{fw}} \right) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{fw} = -\frac{m_{fw}}{\hat{\tau}_{fw}} + \hat{x}\dot{m}_{fi} \quad (5)$$

式中 $\dot{m}_{fi}$, $\dot{m}_{fdes}$, $\dot{m}_{fw}$ 的意义与前面相同; $\hat{x}$ 为喷射的燃油中沉积于壁面的比例的估计值; $\hat{\tau}_{fw}$ 为油膜

蒸发时间常数的估计值. 如果 $\hat{x}$ 和 $\hat{\tau}_{fw}$ 的估计是准确的, 则能够保证 $\dot{m}_{fc}$ 与 $\dot{m}_{fdes}$ 相等.

公式(4)和式(5)给出的油膜补偿器是基于时间域的连续模型, 并不能直接应用于发动机的冷起动油量控制. 因此需要对油膜补偿器连续模型进行离散化处理, 推导出能够在微控制器上编程实现的迭代公式来计算补偿喷油量, 使其编程代码短, 计算过程简单^[8].

发动机的喷油量是按每个循环来计算和给出的, 是一个发动机转角域的概念^[11]. 为了计算每循环的喷油量, 有必要将油膜补偿模型转换为发动机转角域的表现形式, 然后再进行离散化处理.

由于时间域与转角域的转换关系为

$$dt = d\theta/6n \quad (6)$$

式中 θ 为发动机曲轴转角, n 为发动机转速. 将公式(6)带入公式(4)中, 得到其在角度域的表现形式为

$$\frac{dm_{fi}}{d\theta} = \frac{1}{1-\hat{x}} \left(\frac{dm_{fdes}}{d\theta} - \frac{m_{fw}}{6n\tau\hat{\tau}_{fw}} \right) \quad (7)$$

二冲程发动机, 每循环各缸顺序喷油一次, 一个工作循环曲轴转一圈. 对公式(7)在第 k 个工作循环进行积分, 得到:

$$m_{fi}(k) = \frac{1}{1-\hat{x}} \left[m_{fdes}(k) - \int_0^{360} \frac{m_{fw}}{6n\tau\hat{\tau}_{fw}} d\theta \right] \quad (8)$$

式中油膜质量 m_{fw} 在当前循环内是变化的, 为了计算方便, 可用前一循环油膜质量 $m_{fw}(k-1)$ 代替. 令 $y = 60/n\hat{\tau}$, 并考虑到第 k 循环喷油质量与喷油脉宽之间的关系为 $m(k) = qT(k)$, 则上式可写为

$$qt_{fi}(k) = \frac{1}{1-\hat{x}} [qT_{fdes}(k) - ym_{fw}(k-1)] \quad (9)$$

同理将公式(5)离散化为

$$m_{fw}(k) = (1-y)m_{fw}(k-1) + \hat{x}qt_{fi}(k) \quad (10)$$

式中 q 为喷油器流量系数, $T_{fdes}(k)$ 第 k 循环需要的理论喷油脉宽, $t_{fi}(k)$ 为第 k 循环喷油器开启的时间.

2 冷起动油量控制及仿真

2.1 冷起动油量控制

原型发动机为曲轴箱喷射二冲程发动机, 燃油存在短路损失, 无法利用氧传感器准确测量发动机的实际空燃比, 因此很难实现空燃比闭环控制. 本文采用节气门开度/转速法对燃油喷射进行控制. 通过节气门开度和转速的值, 查基本喷油 (MAP), 得到基本喷油脉宽 T_0 ; 然后再根据蓄电池电压、进气压力等信号对基本喷油脉宽进行修正, 得到每循环理论喷油脉宽 T_{fdes} . 在冷起动或其他瞬态工况, 电控单元中的油膜补偿模块对 T_{fdes} 进行补偿, 得到电控单元的最终输出量喷油器开启时间 t_{fi} . 此外, 由于曲轴箱喷射发动机对喷油时刻要求不高, 为了排除喷油时刻对冷起动性能的影响, 本文采用固定喷油时刻的顺序喷油策略, 每个缸的喷油提前角固定为上止点前 40° 曲轴转角, 具体控制模型原理框图如图 2 所示.

为了验证油量控制模型在冷起动工况下的控制效果, 本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件建立了冷起动油量控制仿真模型, 如图 3 所示. 图 4 和图 5 分别为油膜动态子模块和油膜补偿器内部

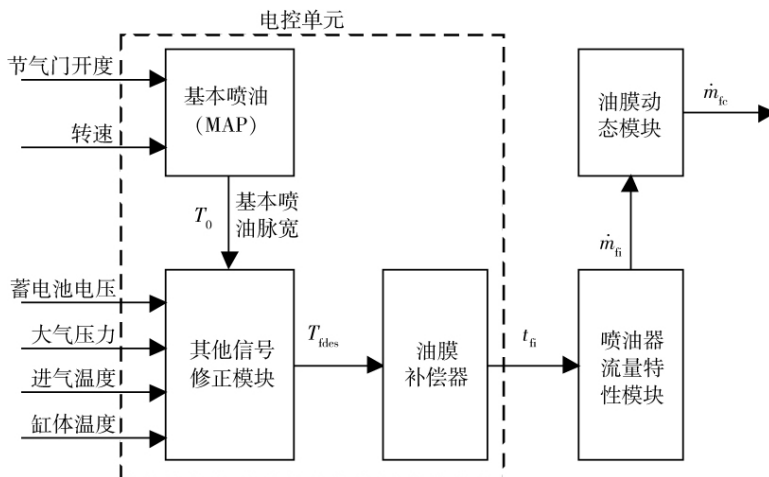


图 2 冷起动油量控制模型原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of fuel flow control model for cold start

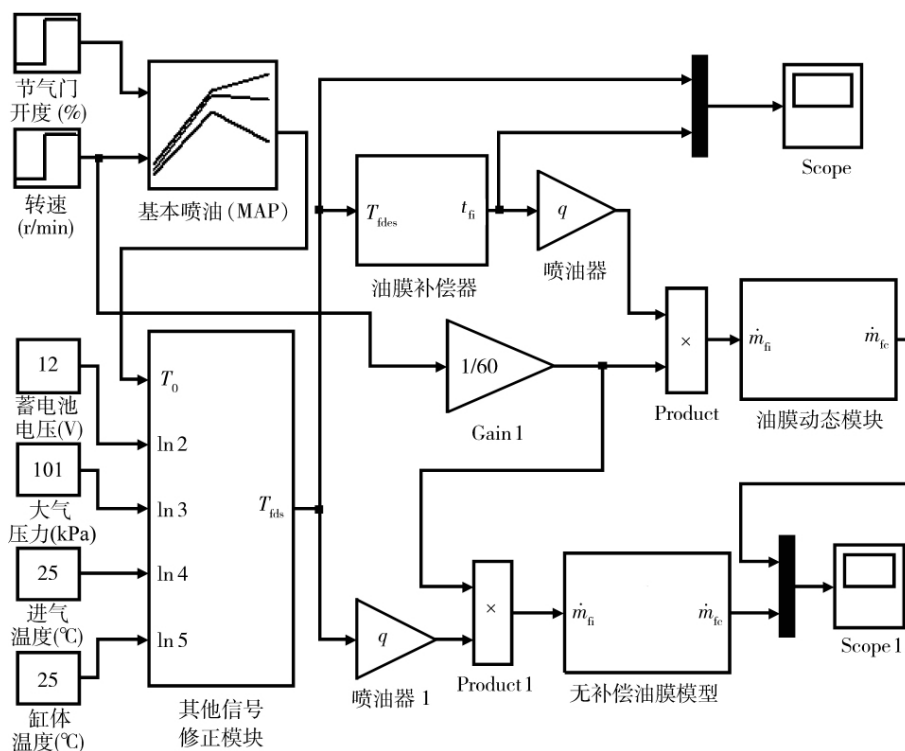


图 3 冷起动油量控制模型 Simulink 仿真框图

Fig. 3 Fuel flow control simulink simulation model for cold start

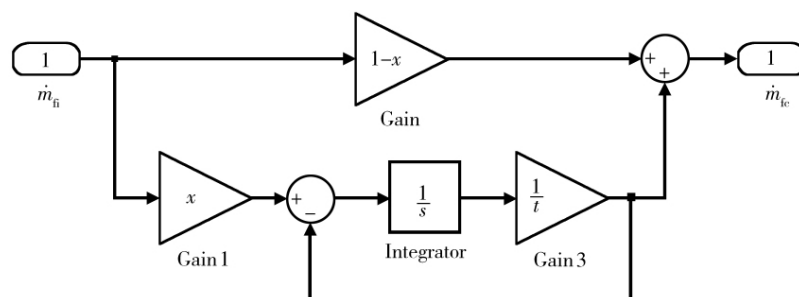


图 4 油膜动态子模块 Simulink 仿真框图

Fig. 4 Fuel film simulink simulation model

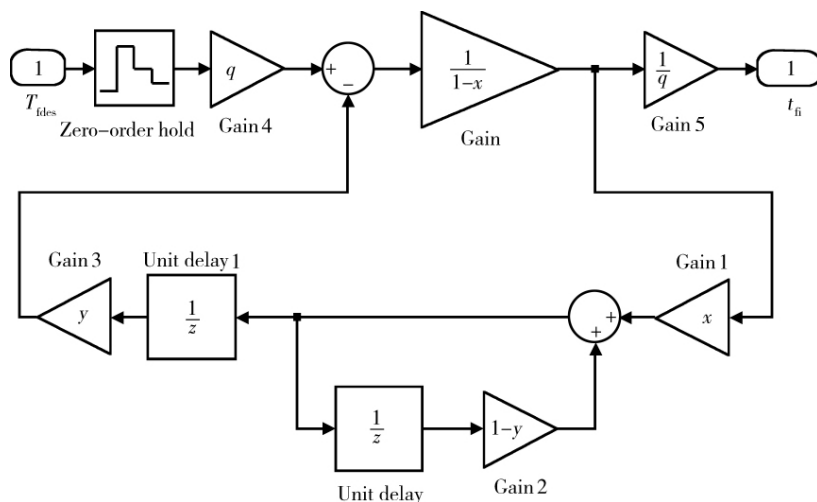


图 5 油膜补偿器 Simulink 仿真框图

Fig. 5 Fuel film compensation simulink simulation model

结构框图。

2.2 冷起动油量控制仿真示例

设置冷起动工况的仿真条件为蓄电池电压 12 V, 大气压力 101 300 Pa, 进气和缸体温度均为 25 °C。

在第 0.5 s, 发动机起动点火, 节气门开度从 0 突变为 5%, 转速从 0 突变到 900 r/min。冷起动工况下燃油沉积比例 $\hat{x}$ 和油膜蒸发时间常数 τ_{fw} 的实际值需要通过试验标定, 这里取 $\hat{x} = 0.6$, $\tau_{fw} = 1.2^{[11-12]}$ 。而油膜补偿器中 $\hat{x}$ 和 $\hat{\tau}_{fw}$ 为油膜参数的估计值, 通过改变它们的值来调节油膜补偿的强度。分别仿真以下工况:

- 1) $\hat{x} = 0$, $\hat{\tau}_{fw} = 0$ (无油膜补偿);
- 2) $\hat{x} = 0.4$, $\hat{\tau}_{fw} = 1.2$;
- 3) $\hat{x} = 0.6$, $\hat{\tau}_{fw} = 0.8$;
- 4) $\hat{x} = 0.6$, $\hat{\tau}_{fw} = 1.2$;
- 5) $\hat{x} = 0.6$, $\hat{\tau}_{fw} = 1.6$;
- 6) $\hat{x} = 0.8$, $\hat{\tau}_{fw} = 1.2$ 。

各工况下电控单元输出喷油脉宽及进入缸内燃油流量的仿真结果分别如图 6 和图 7 所示。

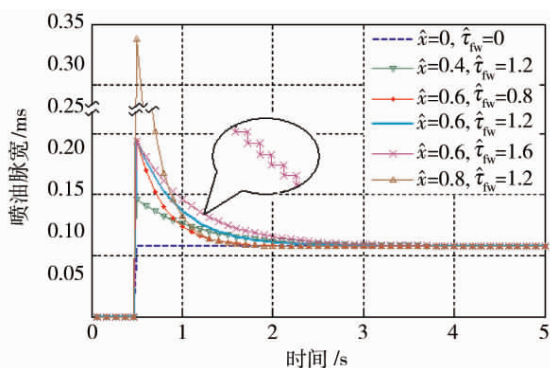


图 6 不同工况电控单元输出喷油脉宽曲线

Fig. 6 Injection pulse width of ECU output in different conditions

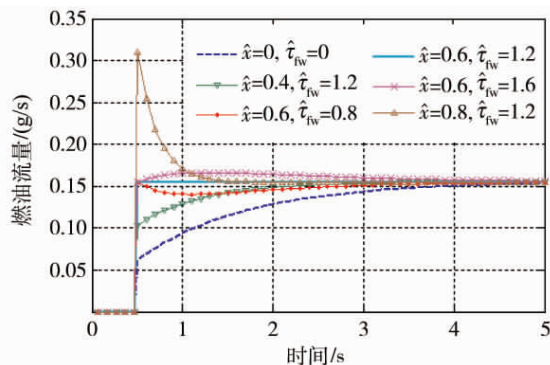


图 7 不同工况进入缸内燃油流量曲线

Fig. 7 Fuel flow flowing into cylinder in different conditions

图 6 中在无油膜补偿器时, 喷油脉宽在点火后为 2.3 ms 固定不变。而当有油膜补偿时, 在发动机点火后, 电控单元实际输出的喷油脉宽大于所需的理论喷油脉宽, 并且逐循环递减至理论喷油脉宽, 从而对形成油膜部分燃油进行补偿。这里需要指出, 控制器在一个发动机工作循环内输出的喷油脉宽固定不变, 如图 6 中局部放大部分所示。 $\hat{x}$ 主要影响点火瞬间的油膜补偿量, $\hat{\tau}_{fw}$ 主要影响油膜补偿器的作用时间。 $\hat{x}$ 及 $\hat{\tau}_{fw}$ 的值越大, 油膜补偿效果越显著。

图 7 中在没有油膜补偿器时, 点火后 4 s 内, 进入气缸的燃油流量小于理论流量; 当 $\hat{x} < x$, $\hat{\tau}_{fw} = \tau_{fw}$ 以及 $\hat{x} = x$, $\hat{\tau}_{fw} < \tau_{fw}$ 时, 燃油流量小于理论流量; 当 $\hat{x} > x$, $\hat{\tau}_{fw} = \tau_{fw}$ 以及 $\hat{x} = x$, $\hat{\tau}_{fw} > \tau_{fw}$ 时, 燃油流量大于理论流量; 当 $\hat{x} = x$, $\hat{\tau}_{fw} = \tau_{fw}$ 时, 点火瞬间进入气缸的燃油流量就与理论流量基本相等, 从而保证冷起动过程中的混合气的整体空燃比。需要指出当 $\hat{x} = x$ 时, 无论 $\hat{\tau}_{fw}$ 大于还是小于实际值, 点火瞬间进入气缸的燃油流量都等于理论流量, 点火后燃油流量虽然逐渐偏离理论流量, 但偏移量不大, 因此 $\hat{\tau}_{fw}$ 对燃油流量的影响不如 $\hat{x}$ 显著。

3 发动机冷起动试验

室温条件下进行原型发动机改烧煤油冷起动试验, 在试验过程中点火能量、点火提前角及燃油喷射雾化质量等保持不变。通过对油膜进行补偿, 可以保证有足够数量的煤油进入气缸。然而在进气过程中, 混合气中的煤油颗粒不断碰撞, 雾化质量变差; 甚至一部分液态煤油被曲柄电入气缸内。因此, 进入气缸的混合气混合不均匀, 局部质量分数很低, 难以保证火焰稳定传播。采用加热措施可以促使煤油的雾化和蒸发, 防止煤油颗粒发生凝结, 使其与空气混合均匀, 形成足够质量分数均匀可燃混合气。本文辅助以燃烧室预热措施, 每次起动时保持缸盖预热温度为 50 °C 不变。

因为 $\hat{\tau}_{fw}$ 值的大小对进入气缸的燃油流量影响不大, 为了简化试验过程, 不妨令 $\hat{\tau}_{fw} = 1.2$, 通过改变油膜形成比例 $\hat{x}$ 的值来调节油膜补偿强度, 根据试验效果找到最佳油膜补偿参数。试验时若起动电动机 10 s 以上, 发动机仍未起动, 认为起动失败。记录下每一个试验点发动机是否起动成功, 以及从起动电动机至发动机起动成功所需的起动时间, 部分试验数据如表 1 所示。

从冷起动试验结果可以看出, 在没有油膜补

偿或 $\hat{x}$ 值较小补偿程度较弱时,由于进入气缸的燃油流量小于理论流量,混合气过稀,发动机不能启动.当 $\hat{x} = 0.7$ 时,发动机冷启动成功,但启动时间为 8.7 s.分析其主要原因为点火后一段时间内进入气缸的燃油流量仍小于理论流量,但随着时间的增加流量逐渐接近理论流量,且随着活塞与气缸壁面不断摩擦,缸壁温度升高,被曲柄电入扫气道和气缸的液态燃油缓慢蒸发,经过一段时间后混合气质量分数满足着火要求,发动机启动成功.随着油膜形成比例 $\hat{x}$ 值逐渐增大,所需启动时间不断缩短.当 $\hat{x}$ 的值为 0.85 及 0.9 时,启动时间基本相等,发动机基本在点火瞬间启动.然而在 $\hat{x} = 0.9$ 时,观察到部分液态燃油从排气管排出,且有后燃现象,判断原因为点火瞬间进入气缸的燃油流量大于理论流量,即 $\hat{x}$ 大于油膜形成比例 x 的实际值.当 $\hat{x} = 0.95$ 时,因进入气缸的燃油流量过大,导致淹缸,发动机不能启动.因此得出当 $\hat{\tau}_{fw} = 1.2$ 时,油膜补偿 $\hat{x}$ 的最佳值为 0.85.

表 1 部分冷启动试验数据
Table 1 Part of the cold start experiment data

$\hat{x}$ 值	是否启动	启动时间/s
0(无油膜补偿)	否	>10.0
0.50	否	>10.0
0.60	否	>10.0
0.70	是	8.7
0.75	是	4.1
0.80	是	1.1
0.85	是	0.6
0.90	是	0.5
0.95	否	>10.0

4 结 论

汽油机改烧煤油时冷启动油量控制是需要解决的关键问题之一,在尽量减少对原机改动的前提下,通过本文的研究,得到了以下结论:

- 1) 在没有从根本上改善煤油的喷射雾化水平以及提高点火能量的情况下,通过冷启动油量控制保证进入气缸的混合气质量分数,并辅助以燃烧室预热措施,煤油发动机的冷启动性能得到改善.
- 2) 应用油膜补偿模型可以保证冷启动以及

其他瞬态工况的瞬时燃油流量.

参考文献:

[1] 刘济瀛. 中国喷气燃料[M]. 北京:中国石化出版社,1991.

[2] Suhy P J, Evers L W, Morgan E J, et al. The feasibility of a kerosene fueled spark ignited two-stroke engine[R]. SAE Paper, 911846, 1991.

[3] Cathcart G, Dickson G, Tubb J, et al. Development of lightweight 2-stroke & 4-stroke heavy fuel UAV engines [R]. Australia :Orbital Corporation, 2006.

[4] Aquino C F. Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine[R]. SAE Paper 810494, 1981.

[5] Hendricks E, Sorenson S C. Mean value modeling of spark ignition engines[R]. SAE Paper, 900616, 1990.

[6] Luan Y F, Henein N A. A simulation model for gasoline engine cold start fuel calibration[R]. SAE Paper, 2002-01-2802, 2002.

[7] 陈林林, 魏民祥, 杨海青. 航空二冲程汽油发动机均值模型的试验与仿真[J]. 航空动力学学报, 2008, 23(12): 2249-2255.

CHEN Linlin, WEI Minxiang, YANG Haiqing. Experiment and simulation of the mean value model on two-stroke gasoline aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2249-2255. (in Chinese)

[8] 钟祥麟. 基于油膜模型的多点喷射汽油机瞬态工况控制研究[D]. 长春:吉林大学, 2007.

ZHONG Xianglin. Study on control of MPI gasoline engine in transient condition [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)

[9] Hendricks E, Vesterholm T. The analysis of mean value SI engine models[R]. SAE Paper, 920682, 1992.

[10] 邹博文, 吴锋, 桂旭阳. 基于模型的燃油动态补偿器的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2003, 24(3): 41-45.

ZOU Bowen, WU Feng, GUI Xuyang. Simulating research of fuel dynamic compensator [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2003, 24(3): 41-45. (in Chinese)

[11] 朱航, 王绍就. 电控汽油机进气管道油膜特性参数的标定[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 127-130.

ZHU Hang, WANG Shaoguang. Calibration for characteristic parameters of fuel film in intake duct of EFI gasoline engine[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 127-130. (in Chinese)

[12] 李顶根, 舒咏强. 汽油机进气管道油膜模型参数辨识算法的研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(4): 363-369.

LI Dinggen, SHU Yongqiang. Research of parameter identification algorithm of intake port fuel film model for gasoline engine[J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(4): 363-369. (in Chinese)