

点燃式航空重油活塞发动机冷起动控制策略

耿 钊¹, 赵振峰^{1,2}, 李 鸿¹, 崔华盛¹, 王 蕾¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘 要: 针对点燃式航空重油活塞发动机低温起动困难问题, 采取了空气辅助缸内直喷技术手段, 开展了冷起动控制策略研究及试验验证研究, 解决了 -10°C 发动机低温顺利起动问题。提取了影响冷起动的关键控制参数, 并对其进行了规律研究, 获得了环境温度对各参数的最优匹配结果及试验验证; 定义了点燃式重油发动机的冷起动阶段, 根据匹配和试验结果获得了关键参数与缸体温度的映射关系, 设计了冷起动策略并进行了试验验证。结果表明: 缸体温度在 $-10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间, 最佳喷油提前角在上止点前 $50^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围, 最佳点火提前角为上止点前 45° 可以保证重油发动机平稳起动, 起动时间小于3 s。

关 键 词: 点燃式; 航空重油; 冷起动; 活塞发动机; 控制策略

中图分类号: V234; TK411.2

文献标志码: A

Cold start control strategy of spark igniting type heavy oil piston aero-engine

GENG Zhao¹, ZHAO Zhenfeng^{1,2}, LI Hong¹, CUI Huasheng¹, WANG Lei¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Shenzhen Research Institute,

Beijing Institute of Technology, Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: In view of the problem of low temperature starting of the ignition heavy oil piston engine, the air-assisted in-cylinder direct injection technology was adopted to carry out the cold start control strategy research and experiment verification research, and the strategy solved the problem of low temperature starting of the engine at -10°C . The key control parameters affecting the cold start were extracted and studied. The optimal matching results and experiment verification of the ambient temperature were obtained. The cold start stage of the ignited heavy oil engine was defined. According to the matching and experiment results, the mapping relationship between key parameters and cylinder temperature was obtained, and the cold start strategy was designed and verified by experiments. Results showed that the best fuel injection advance angle was between 50° and 85° before top dead center when the cylinder temperature was between -10°C and 20°C . The optimal ignition advance angle was 45° before top dead center, ensuring the smooth start of heavy oil engine and the starting time was less than 3 s.

收稿日期: 2019-08-12

基金项目: 深圳市科技创新基金(JCYJ20170817114345260)

作者简介: 耿钊(1995—), 男, 硕士生, 主要从事发动机控制研究。

引用格式: 耿钊, 赵振峰, 李鸿, 等. 点燃式航空重油活塞发动机冷起动控制策略[J]. 航空动力学报, 2020, 35(1): 185-195. GENG Zhao, ZHAO Zhenfeng, LI Hong, et al. Cold start control strategy of spark igniting type heavy oil piston aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 185-195.

Key words: spark ignition type; aviation heavy oil; cold start; piston engine; control strategy

活塞式航空发动机指的是为飞行器提供飞行动力的往复式内燃机。航空重油发动机结构紧凑、体积较小,较其他发动机而言更大的升功率和功质比,符合无人机动力系统轻质高功质比的需求,且结构简单,操作维护方便,能够适应无人机复杂的工作环境,使其在航空领域具有不可替代的优势^[1-3]。

随着燃料运输、储备的安全性要求日益严苛,重油(本文即航空煤油)在活塞式航空发动机中的应用成为必然趋势。欧美国家已经明确提出禁止使用含铅燃料的时间限制,在军舰等军事设备上严禁配备汽油。重油能够适应燃料一体化的要求,方便油料管理,并有效缓解航空汽油等轻质燃油紧缺问题。与汽油相比,重油具有分子量大、运动黏度高、闪点高、挥发性差等特点,在意外发生时被引燃的几率相对较低,储运安全性得以保障^[4-6]。

由于重油挥发性差、运动黏度高,采用普通的进气道喷射或化油器式喷射方式,必须采取预热、引燃、高能点火等辅助手段进行冷起动^[7-8],且起动过程转速不稳定,发动机易失火,起动效果较差^[9-11]。对于小缸径、小功率的重油发动机,一般采用风冷方式进行散热,因此在冷起动时可以采用加热缸体的辅助方式,但是对于大缸径、大功率的重油发动机,一般采用水冷方式进行散热,因此加热缸体等预热措施不仅需要较大的能量,而且效果也较差,因此只能利用重油雾化辅助手段来促进发动机冷起动。相比前两种喷油方式,缸内直喷技术有着明显的优势。缸内直喷技术主要包括以高压旋流喷射为代表的高压直喷技术与以空气辅助喷射为代表的低压直喷技术。重油发动机在采用低压空气辅助喷射系统后,燃油喷射压力高,煤油雾化粒径可达到 $10\mu\text{m}$ 左右^[12-13],雾化效果得到明显改善^[14-16]。诸多的优势使该项技术逐渐成为活塞式发动机研究领域内的热点^[17-18]。Singh 和 McChesney 比较了二冲程点燃式发动机使用 JP-5/8 和汽油不同燃料进行冷起动的过程。在低温下起动发动机所需的燃料量有着明显差异:与汽油相比,JP-5/8 在起动开始时需要更多的燃油量补偿,且温度越低,需要补偿的燃油量越多。由于发动机喷油时刻晚且点火时刻很早,因此起动时缸内具有分层燃烧的特性^[19]。Suh 等研究了在气道喷射二冲程点燃式发动机中使用

气动雾化器降低液滴尺寸来燃烧煤油方案的可行性。同时使用加热雾化空气的辅助手段来克服煤油燃料的冷起动困难问题,并试验得出雾化器空气温度低于 115°C 时发动机无法起动。更高的雾化空气温度和更低的压力与流速才能保证发动机的起动^[20]。Cathcart 等将空气辅助燃油喷射技术应用于点燃式发动机,并在低环境温度下对使用 JP-5 燃料的二冲程发动机进行冷起动试验。由于空气辅助燃油喷射技术优异的雾化效果,在 10°C 环境温度时起动时间达到 4s ,且在 20°C 的环境温度下降至 1s ^[21]。Utley 等在环境温度为 $-10\sim 25^{\circ}\text{C}$ 时,在空气辅助燃油喷射系统的基础上,采用二次喷射与高能点火相结合的策略,改善了乙醇燃料发动机的冷起动性能^[22]。Thomas 等对煤油发动机采用缸内直喷技术及预燃室内添加预热塞措施,针对喷油提前角、空燃比等冷起动参数进行了试验探究^[23]。白洪林、胡春明等对空气辅助喷射喷油和汽油的喷雾特性进行对比,并探究了空气辅助喷射煤油机的燃烧特性^[24-25]。Hu 等对空气辅助喷射喷油和汽油的喷雾特性进行对比,重点探究了环境压力对喷雾角的影响,以及微观特征的变化趋势,并针对试验所用空气辅助喷射系统给出了喷气脉宽、喷油脉宽、油气间隔等一系列参数保证重油达到最佳雾化效果^[26]。刘锐等对直喷煤油发动机设计了冷起动策略,并在此基础上对几个重要冷起动参数进行了对比试验^[27]。上述学者们大都将工作重心放在两方面:一方面是如何通过加热缸体、进气加热或者燃油加热等辅助技术来优化发动机的起动边界条件;另一方面是采用控制变量法探究发动机起动时的控制参数对起动过程的影响。很少有关于发动机从开始起动到正常工作整个冷起动动态过程性能优化的研究,并给出可靠的冷起动策略,提高重油发动机可靠性。本文利用低压空气辅助缸内直喷技术,对点燃式航空重油发动机冷起动过程中的重要参数进行控制变量试验,利用试验的数据作为参考,设计航空重油发动机冷起动动态过程的控制策略,有效减少了发动机起动时间,并降低了冷起动过程中的转速波动,促进发动机的工况平稳过渡,并在试验发动机上进行冷起动验证,达到了预期效果。

1 试验平台搭建

1.1 试验台架

本文试验发动机为自行研制的低压空气辅助缸内直喷活塞式发动机,试验发动机样机如图 1 所示,其基本参数见表 1。

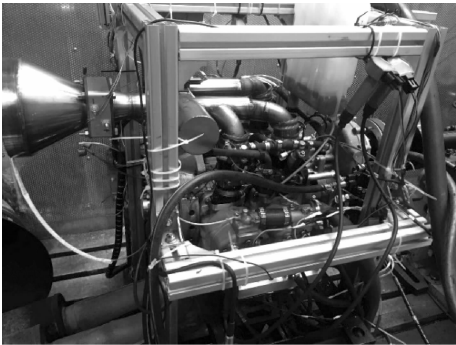


图 1 航空重油发动机试验台架
Fig. 1 Experiment bed system for heavy oil aeroengine

表 1 发动机技术参数
Table 1 Engine technical parameters

参数	数值及详情
型式	水平对置、水冷
缸数	4
排量/L	1.2
缸径×冲程/mm×mm	78×64
压缩比	8.0
额定功率/kW	80
最大扭矩/(N·m)	127

1.2 台架系统

图 2 为本次试验台架的系统示意图。发动机试验台架由 AVL(AVL List GmbH)公司测控系统控制;基于 LabView 的上位机控制系统通过 controller area network(CAN)总线将控制参数发送给 electronic control unit(ECU),氧传感器、缸体温度传感器等信号经过 CAN 总线发送到 ECU;Kixtler 燃烧分析仪采集发动机缸内压力和曲轴箱压力并将采集数据上传至上位机。试验仪器设备及型号如表 2 所示。

1.3 空气辅助燃油喷射系统

如图 3 所示,空气辅助燃油喷射系统包括一个喷油嘴,一个喷气嘴以及油气混合腔。在空气

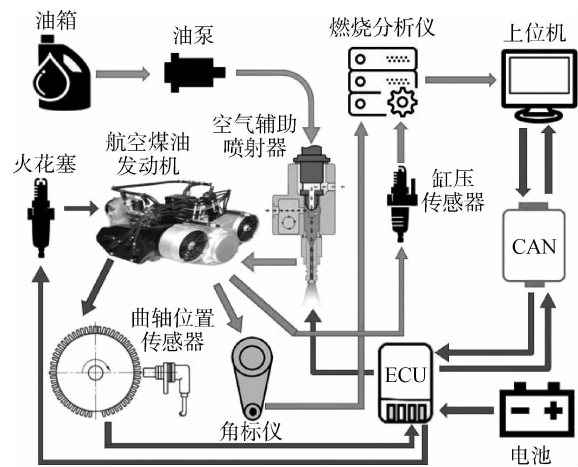


图 2 试验系统示意图
Fig. 2 Experiment system schematic

表 2 发动机测试仪器及型号
Table 2 Engine test instrument and model

设备名称	型号
发动机测试系统	AVL Puma Open
ECU 控制系统	NI LabView
测功机	Schneider S12 电力测功机
数据采集系统	Vector CANoe
燃烧分析仪	Kistler KiBox2893
曲轴箱压力传感器	Kistler 4618A
缸内压力传感器	Kistler 6113A 火花塞
油耗仪	AVL 735 型
氧传感器	Bosch LSU4. 9
温度传感器	K 型热电偶

辅助燃油喷射系统工作过程中,燃油先被喷到混合腔内,在混合腔内达到一定的压力后,由气嘴将油气混合物喷出。空气辅助燃油喷射系统的喷射压力高,使重油雾化粒径可达到 10 μm 左右,有助于在低温环境下重油以小液滴的形式快速蒸发从而形成良好混合气,利于发动机的成功起动。

1.4 冷起动策略研究

根据发动机冷起动时的转速大小 n 与缸体温度 t_{cyl} ,将整个工况分为电动机拖动阶段、起动阶段与暖机阶段 3 个阶段。如图 4 所示,阶段 I 表示起动电动机开始倒拖发动机转动直到发动机转速 n 大于平均怠速转速 $n_i=1\,800\text{ r/min}$,电动机拖动阶段结束。阶段 II 表示发动机转速趋于平

稳,在 5 s 内没有出现发动机转速小于起动电动机的峰值转速 $n_m=1450\text{ r/min}$,起动阶段结束。阶段Ⅲ表示发动机转速稳定直到缸体温度 t_{cyl} 达到允许正常工作温度 t_0 ,暖机阶段结束,进入正常工况。

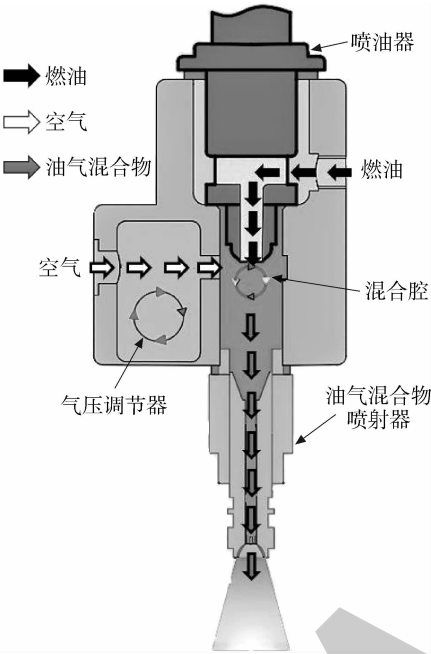


图 3 空气辅助燃油喷射系统

Fig. 3 Air-assisted fuel injection system

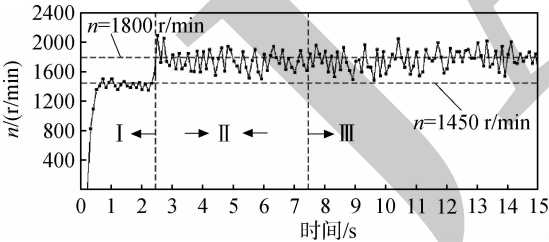


图 4 冷起动阶段划分

Fig. 4 Cold start phase division

点燃式航空重油活塞发动机的冷起动过程的重点在于起动过程的稳定性与快速性。其中起动稳定性是指发动机在起动过程中转速的波动较小,保证发动机可靠性;快速性是指发动机能够由电动机倒拖阶段快速过渡到起动阶段,并且在暖机阶段缸体温度快速上升,确保发动机及时由暖机工况过渡到正常工况。快速起动能够减少喷油过浓造成的火花塞积碳问题。因此,起动成功时间、转速波动以及缸体温升速度是冷起动过程的重要评价指标,且在冷起动策略中每个工况的侧重点不同,如图 5 所示。

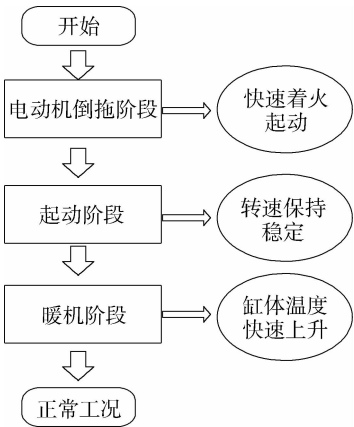


图 5 冷起动策略框架

Fig. 5 Cold start strategy framework

2 关键参数的提取与影响规律

重油与汽油的理化特性对比如表 3 所示。可以看出,重油的运动黏度和表面张力均要高于汽油,特别是运动黏度高于汽油的两倍,这将对燃油的雾化过程产生较大影响,尤其在低温环境中使发动机起动过程更加困难^[28]。因此,试验探究重油发动机起动过程的关键参数对冷起动的影响是十分有必要的^[29],以便选取合适的参数,保证发动机在低温环境下也可以顺利起动。

表 3 重油与汽油理化特性对比

Table 3 Comparison of physical and chemical properties of heavy oil and gasoline

名称	重油	汽油
组成	$C_7 \sim C_{16}$	$C_5 \sim C_{11}$
密度/(kg/L)	0.80~0.84	0.70~0.75
闪点/℃	45~51	-45~-25
沸点/℃	150~315	30~220
自燃点/℃	380~425	510~530
凝点/℃	-60	-80
运动黏度(20℃)/(mm ² /s)	1.814	0.80
表面张力(20℃)/(10 ⁻³ N/m)	23.6	21.6

冷起动过程与燃油雾化效果、点火提前角、点火能量等有着紧密联系,其中燃油雾化效果又由喷油提前角、喷油量、缸体温度等参数共同决定^[25-26]。显然,在保证蓄电池电压不会下降过快的前提下,适当地增大点火线圈的充磁脉宽,提高点火能量能够保证发动机每循环的稳定着火。适当的喷油提前角以及喷油脉宽能够促进缸内形成

利于点燃的混合气,而合适的点火正时能够保证发动机稳定着火,因此本文将采用控制变量法针对冷起动过程中的喷油提前角 θ_{inj} 、点火提前角 θ_{ig} 、喷油脉宽 D_{fuel} 三个重要控制参数进行研究,其中前两项的单位均为曲轴转角在上止点前的角度。

2.1 喷油提前角对冷起动影响

试验时环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境压力为 98 kPa ,试验均确保发动机缸体温度冷却到 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 再进行冷起动试验。空气辅助喷射系统参数采用经试验得到的喷气脉宽、油气间隔等最佳参数,确保空气辅助系统能够提供良好的雾化效果。点火提前角、点火能量充磁脉宽与喷油脉宽采用相应的汽油试验样机的最佳参数,即点火提前角为 40° ,点火能量充磁脉宽为 0.5 ms ,喷油脉宽为 3.5 ms 。在此基础上,喷油提前角分别设置为上止点前 50° 、 60° 、 70° 、 80° 、 90° ,并对这 5 组试验的发动机起动响应时间、缸体温度、转速波动进行对比,以此探究喷油提前角对重油活塞发动机冷起动的性能影响。

图 6 为不同喷油提前角策略下航空重油发动机冷起动的转速曲线。由图中 5 条转速曲线可以看出,在相同的环境温度及初始缸体温度下, θ_{inj} 越小,即喷油时刻越靠近上止点,发动机能够快速由倒拖阶段过渡到起动阶段。喷油提前角过大,如图中上止点前 90° 时,就会出现发动机无法起动的现象。倒拖阶段缸内温度低, θ_{inj} 越小,距离点火时刻越近,促进点火时刻火花塞周围形成良好的混合气状态,有利于发动机起动。因此从起

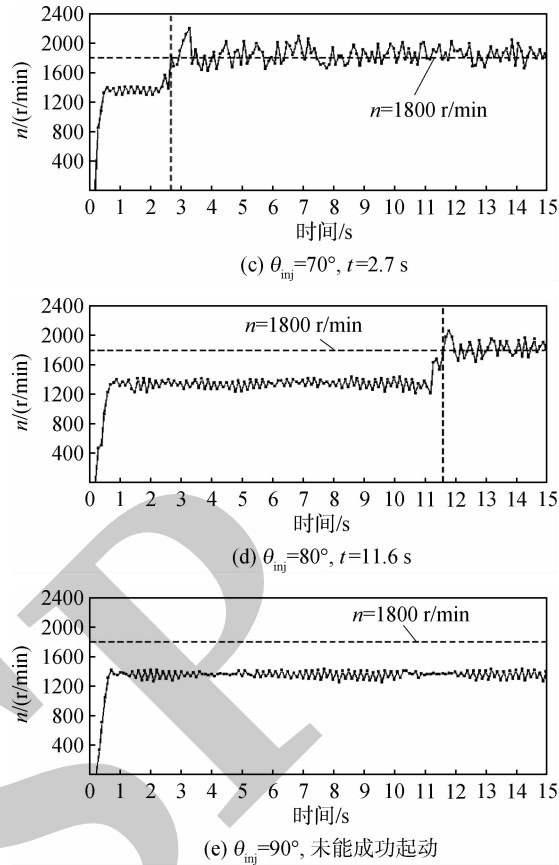


图 6 不同喷油提前角策略发动机冷起动转速变化
Fig. 6 Engine speed variation under different injection advance angles strategy at cold start condition

动快速性角度考虑,在起动阶段时刻应尽量选择较小的 θ_{inj} 。

图 7 为 4 种 θ_{inj} 下的发动机进入起动阶段后的 5 s 内由式(1)计算出的转速标准差 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\sum_{x=1}^m (n_x - \bar{n})^2 / m} \quad (1)$$

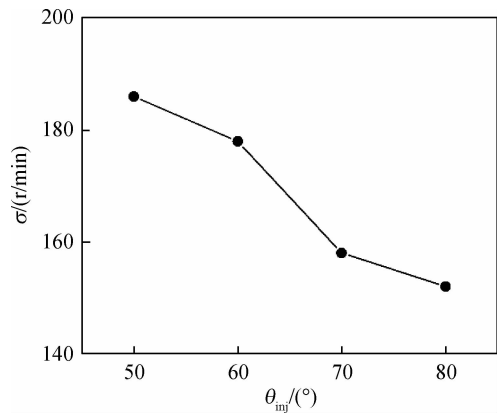
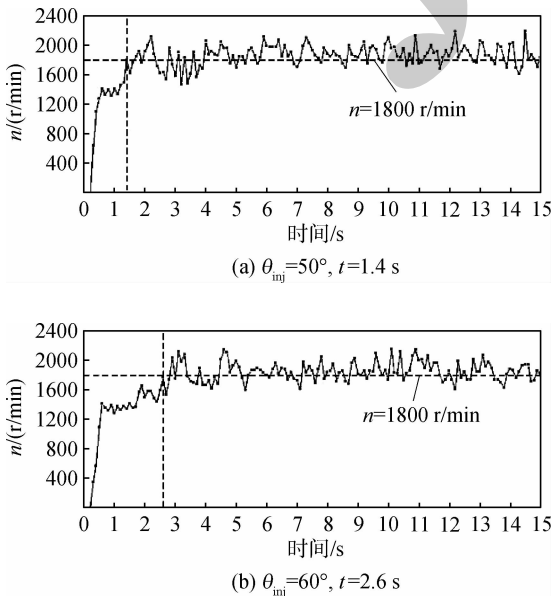


图 7 不同喷油提前角策略发动机冷起动转速标准差
Fig. 7 Standard deviation of engine speed under different injection advance angles strategy at cold start condition



式中 m 为 5 s 内转速记录次数。

可以看出,随着 θ_{inj} 的增大, σ 逐渐减小,代表发动机在起动阶段转速越稳定。起动阶段时,缸内温度不断上升,较大的 θ_{inj} 能够给燃油提供更长的时间吸收热量而蒸发,形成良好混合气。因此,在起动阶段,应尽量选择较大的 θ_{inj} 来保证发动机转速稳定性。

图 8 为不同 θ_{inj} 下发动机冷起动 100 s 内缸体温度 t_{cyl} 上升曲线。由于试验在 $\theta_{inj}=90^\circ$ 时未能成功起动,只绘制了 θ_{inj} 为 50° 、 60° 、 70° 及 80° 时的缸温曲线。由曲线可以看出,4 种 θ_{inj} 下的 t_{cyl} 上升趋势基本一致,但是由于在电动机倒拖阶段 θ_{inj} 越小,发动机起动响应越快,导致前期的缸体温度越高。随着时间的推移,发动机过渡到暖机阶段,此时 θ_{inj} 越大, t_{cyl} 上升速度越快,在后期反而超过了 θ_{inj} 较小的 t_{cyl} 。因此,在发动机暖机阶段应适当增大 θ_{inj} ,促进 t_{cyl} 的快速上升,及时改善燃油混合气在缸体内的状态,加快发动机冷起动暖机阶段的完成。

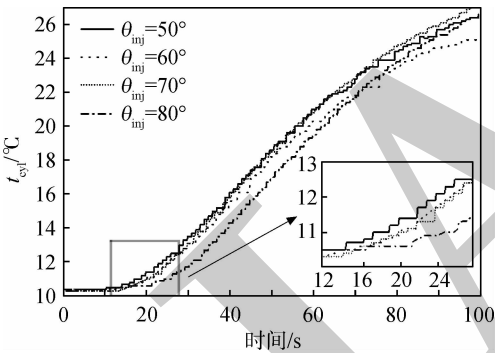


图 8 不同喷油提前角策略发动机冷起动缸体温度变化
Fig.8 Cylinder temperature variation under different injection advance angles strategy at cold start condition

为了得到不同 t_{cyl} 时发动机能够成功由倒拖阶段过渡到起动阶段的喷油提前角边界,在不同 t_{cyl} 时分别进行了最佳喷油提前角试验,作为后文冷起动策略参数的参考。根据试验数据得到了 θ_{inj} 关于 t_{cyl} 的函数关系,如图 9 所示。选择的 θ_{inj} ,确保倒拖阶段在 3 s 内过渡到起动阶段,同时使得起动阶段转速稳定,暖机阶段 t_{cyl} 快速上升。

2.2 点火提前角对冷起动影响

文中第 2.1 节得到了发动机不同缸体温度下最佳 θ_{inj} ,在 $t_{cyl}=10^\circ\text{C}$ 时,最佳 $\theta_{inj}=70^\circ$ 。在此基础上,将 θ_{ig} 分别设为 30° 、 35° 、 40° 、 45° ,并对这 4 组试验的发动机起动响应时间、转速波动、缸体温度进行对比,以此研究 θ_{ig} 对重油活塞发动机冷起

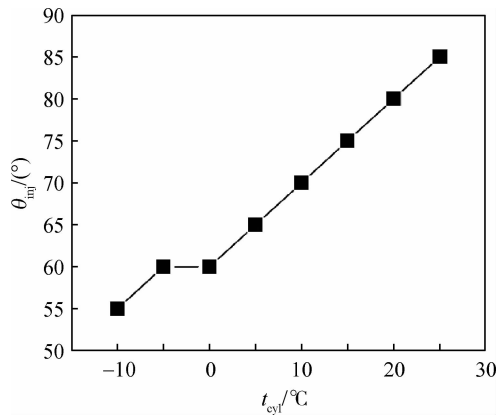
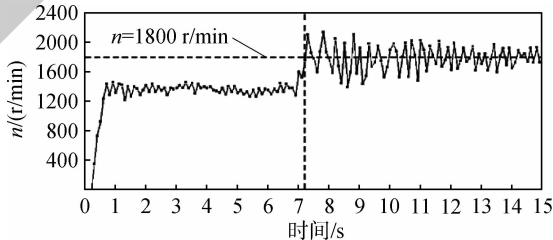


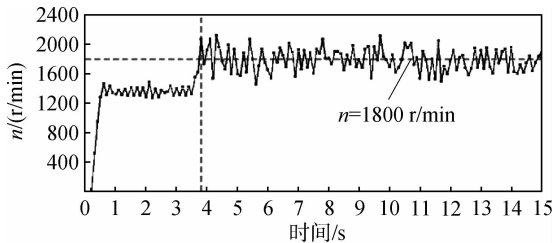
图 9 冷起动工况不同缸体温度下最佳喷油提前角
Fig.9 Best injection advance angle under different cylinder temperatures at cold start condition

动的性能影响。

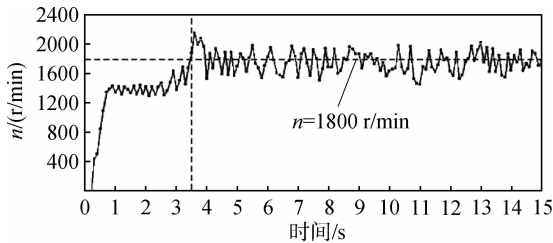
图 10 为不同 θ_{ig} 策略下航空重油发动机冷起动的转速曲线。由图中 4 条转速曲线可以看出,在相同环境温度及初始缸体温度下, θ_{ig} 较小时,发动机过渡到起动阶段较慢,随着 θ_{ig} 变大,所需时间缩短。随后在更低缸体温度下再次进行控制 θ_{ig} 试验时,发动机转速仍呈现出图 10 中的变化规律,可以得知 θ_{ig} 对 t_{cyl} 的相关性不强,从起动快速性方面考虑,无须在发动机起动后 t_{cyl} 上升过程中对 θ_{ig} 进行修正。



(a) $\theta_{ig}=30^\circ, t=7.2\text{ s}$



(b) $\theta_{ig}=35^\circ, t=3.8\text{ s}$



(c) $\theta_{ig}=40^\circ, t=3.5\text{ s}$

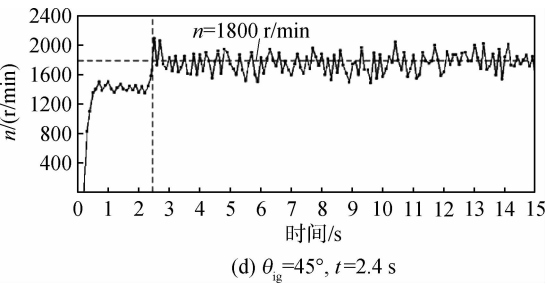


图 10 不同点火提前角策略发动机冷起动转速变化
Fig. 10 Engine speed variation under different ignition advance angles strategy at cold start condition

图 11 为 4 种 θ_{ig} 下的发动机起动阶段 5 s 内转速的标准差 σ 。随着 θ_{ig} 的增大, σ 变小, 发动机转速越来越稳定。因此, 从起动稳定性考虑, 发动机起动阶段应选取较大 θ_{ig} , 保证发动机起动时的稳定运转。

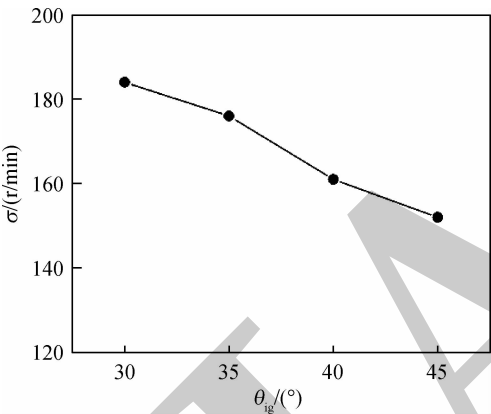


图 11 不同点火提前角策略发动机冷起动转速标准差
Fig. 11 Standard deviation of engine speed under different ignition advance angles strategy at cold start condition

图 12 为不同 θ_{ig} 下发动机冷起动 100 s 内 t_{cyl} 上升曲线, 由曲线可以看出, θ_{ig} 为 40° 与 45° 时, 发动机倒拖阶段过渡到起动阶段较快, 导致前期的 t_{cyl} 较高, 但在后期与较小的 θ_{ig} 相比, t_{cyl} 相似, 且 t_{cyl} 上升曲线近乎平行。因此在暖机阶段 t_{cyl} 上升速度方面考虑, 无须对 θ_{ig} 随 t_{cyl} 进行修正。

θ_{ig} 在起动阶段无须修正, 在 45° 左右便可实现快速起动、快速暖机、平稳运行。过大的 θ_{ig} 会使活塞上行受阻, 燃烧过程输出更多负功, 从而导致发动机功率下降, 因此可以给出发动机最佳 $\theta_{ig} = 45^\circ$ 。

2.3 喷油脉宽对冷起动影响

前文中第 2.1 节、第 2.2 节给出了 t_{cyl} 为 10°C 时的最佳 θ_{inj} 与 θ_{ig} 。在此基础上, 将喷油脉宽 D_{fuel} 分别设置为 2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 ms, 并对这 5

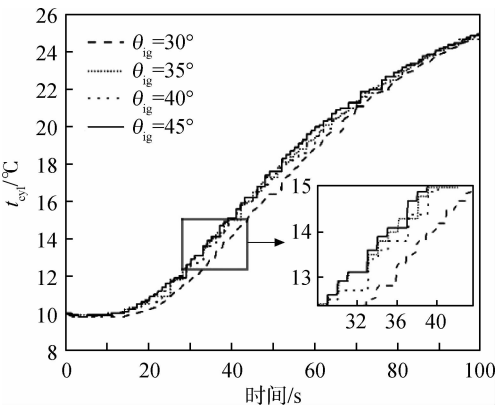
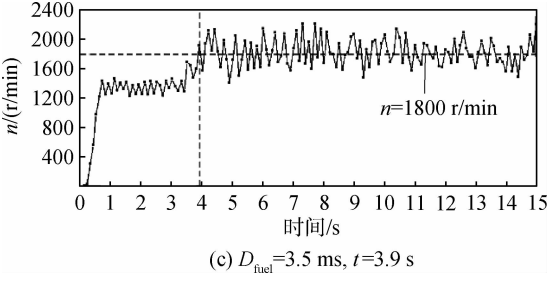
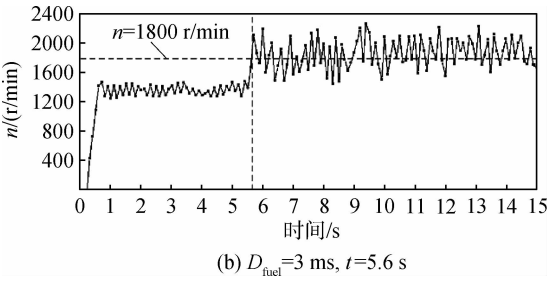
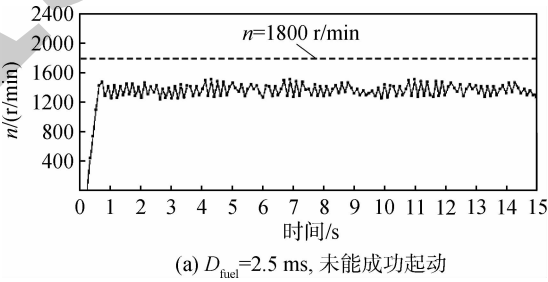


图 12 不同点火提前角策略发动机冷起动缸体温度变化
Fig. 12 Cylinder temperature variation under different ignition advance angles strategy at cold start condition

组试验的发动机起动响应时间、缸体温度、转速波动进行对比, 探究 D_{fuel} 对重油活塞发动机冷起动的性能影响。

图 13 为不同 D_{fuel} 策略下航空重油活塞发动机冷起动的转速曲线。由图中 5 条转速曲线可以看出, 在相同的初始缸体温度下, D_{fuel} 较小时, 发动机由倒拖阶段过渡到起动阶段所需时间较长, 在 D_{fuel} 为 2.5 ms 时, 由于喷油过少出现了发动机



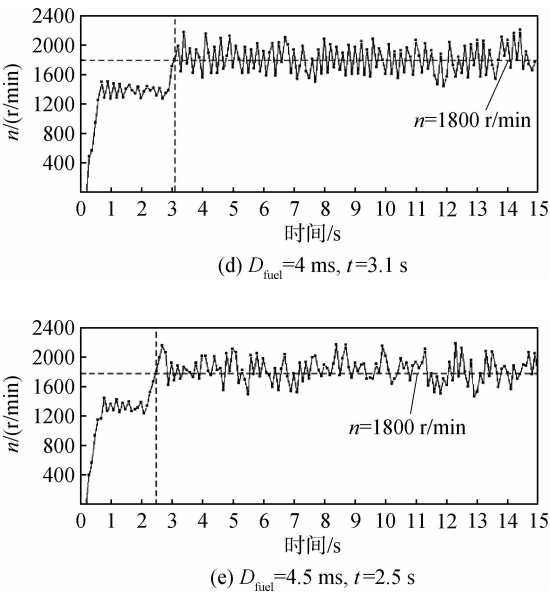


图 13 不同喷油脉宽策略发动机冷起动转速变化
Fig. 13 Engine speed variation under different fuel injection durations strategy at cold start condition

无法起动的情况。随着 D_{fuel} 变大,所需时间缩短。在倒拖阶段,缸内温度较低,燃油蒸发较差,较大的 D_{fuel} 能够确保在点火时刻火花塞周围的燃油混合气状态能够满足着火的要求,避免循环间失火的情况。

图 14 为 4 种 D_{fuel} 下的发动机起动阶段 5 s 内转速的标准差 σ 。随着 D_{fuel} 的增大, σ 变小,发动机转速越来越稳定。因此,从起动稳定性考虑,发动机起动阶段应选取较大的 D_{fuel} , 保证发动机起动时的稳定运转。

图 15 为不同 D_{fuel} 下发动机冷起动 100 s 内缸体温度上升曲线。在暖机阶段,随着 D_{fuel} 增大,

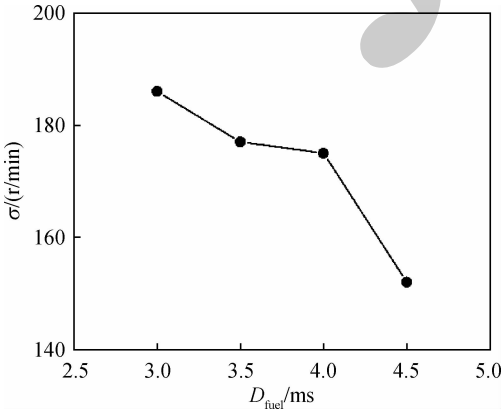


图 14 不同喷油脉宽策略发动机冷起动转速标准差
Fig. 14 Standard deviation of engine speed under different fuel injection durations strategy at cold start condition

t_{cyl} 上升速率下降,说明缸内燃烧情况恶化。从缸内燃烧的情况及 t_{cyl} 上升速度的角度考虑,暖机阶段尽量选用较小的 D_{fuel} 保证 t_{cyl} 快速上升。

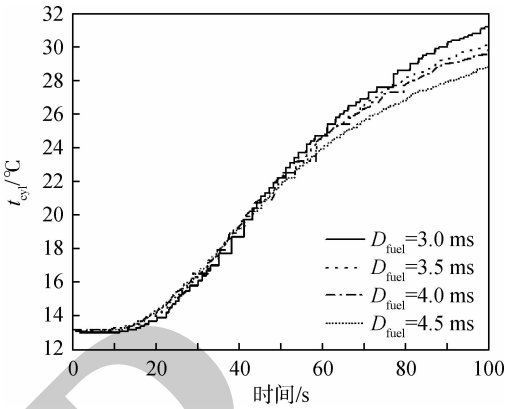


图 15 不同喷油脉宽策略发动机冷起动缸体温度变化
Fig. 15 Cylinder temperature variation under different fuel injection durations strategy at cold start condition

控制 D_{fuel} 的单一变量试验对后文中冷起动控制策略有了一定的参考意义。要保证发动机倒拖阶段向起动阶段快速过渡,同时考虑起动阶段转速稳定及暖机阶段 t_{cyl} 快速上升。在不同 t_{cyl} 时试验,最终得到倒拖阶段与起动阶段的最佳 D_{fuel} 如图 16 所示。

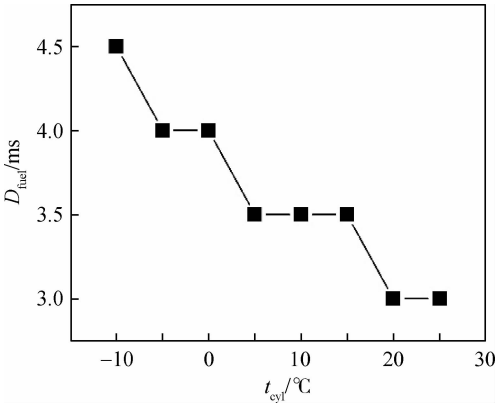


图 16 冷起动时不同缸体温度下最佳喷油脉宽
Fig. 16 Best fuel injection duration under different cylinder temperatures at cold start condition

试验对发动机暖机阶段的喷油量进行研究,发现应使发动机运转时缸内过量空气系数基本保持在 1 附近,且 t_{cyl} 越低则过量空气系数越小。因此在暖机阶段需要对正常工况的 D_{fuel} 修正。试验得到的修正系数 $f(t_{cyl})$ 随 t_{cyl} 如图 17 所示,正常工况下的喷油脉宽如图 18 所示。

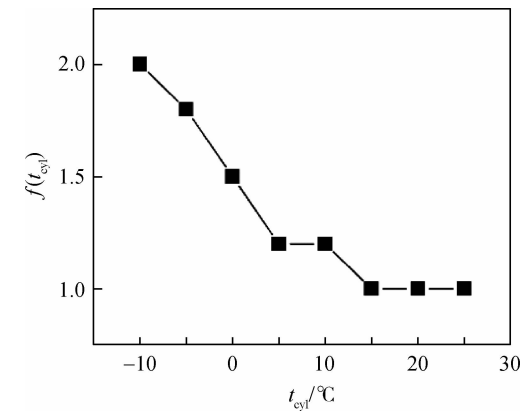


图 17 冷起动工况下喷油脉宽修正系数 $f(t_{\text{cyl}})$
Fig. 17 Fuel injection duration correction coefficient $f(t_{\text{cyl}})$ at cold start condition

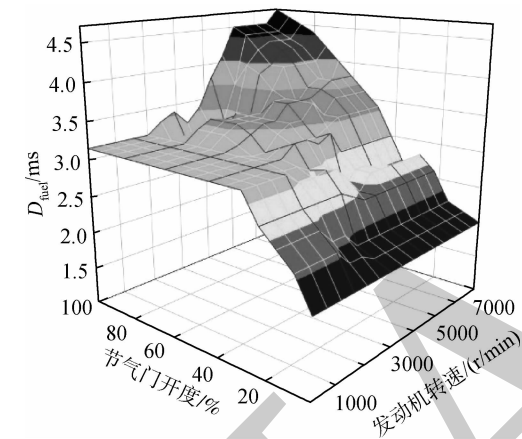


图 18 喷油脉宽脉谱图
Fig. 18 Duration of fuel injection spectrogram

3 冷起动控制策略

在文中第 2 节对重油发动机冷起动的关键参数进行了试验研究后,本章设计发动机冷起动控制策略,保证冷起动的快速性及稳定性。

3.1 冷起动点火控制

点火控制策略重点在于点火能量与点火提前角,其中点火能量又直接取决于点火线圈充磁脉宽。对于线圈充磁脉宽而言,要在确保点火能量饱和的情况下,尽量减小充磁脉宽,避免过多能量的浪费,提高蓄电池的续航时间。在此前的初级线圈充磁脉宽试验中已经测试出最佳充磁脉宽及蓄电池电压修正,因此点火能量直接使用修正后的值。

点火提前角对缸体温度的依赖性低,所以在冷起动的电动机拖动阶段及起动阶段中选用固定点火提前角 $\theta_{\text{ig}} = 45^\circ$ 。而在暖机阶段下查询正常

工作工况下的点火提前角脉谱图,式(2)为正常工况下点火提前角 θ_{ig} 的查询方式。

$$\theta_{\text{ig}} = \theta_{\text{map}}(V_{\text{al}}, n) \tag{2}$$

式中 V_{al} 表示节气门百分比开度(%)。

3.2 冷起动燃油喷射控制

由文中第 2.1 节分析可知,相同缸体温度下发动机的喷油提前角对起动时间、转速稳定性及缸体升温速度有很大影响,应根据不同的缸体温度来选择最佳喷油提前角 θ_{inj} 。在冷起动工况中采用式(3)的函数关系查询最佳喷油提前角 θ_{inj} 。

$$\theta_{\text{inj}} = \theta(t_{\text{cyl}}) \tag{3}$$

在电动机拖动阶段与起动阶段时,采用式(4)的函数关系来选择最佳喷油脉宽 D_{fuel} ,而进入暖机阶段后,喷油脉宽 D_{fuel} 采用式(5)的缸体温度修正正常工况脉谱图方式。

$$D_{\text{fuel}} = D(t_{\text{cyl}}) \tag{4}$$

$$D_{\text{fuel}} = f(t_{\text{cyl}}) D_{\text{map}}(V_{\text{al}}, n) \tag{5}$$

3.3 冷起动总体控制策略

冷起动总体控制策略如图 19 所示。起动电动机开始倒拖发动机,这时发动机保持 10% 节气门位置,点火提前角 θ_{ig} 采用固定值 $\theta_{\text{ig}0}$,喷油提前角 θ_{inj} 与喷油脉宽 D_{fuel} 分别插值查询各自对应缸体温度的函数关系。当发动机转速高于起动电动机峰值转速后,判断电动机拖动阶段结束,起动电动机停止励磁,进入起动阶段。在起动阶段,发动机节气门保持 10% 位置不变, θ_{ig} 、 θ_{inj} 与 D_{fuel} 仍然采用拖动阶段的查询方式,ECU 累计记录 m 次转速判断是否出现小于电动机拖动峰值转速的情

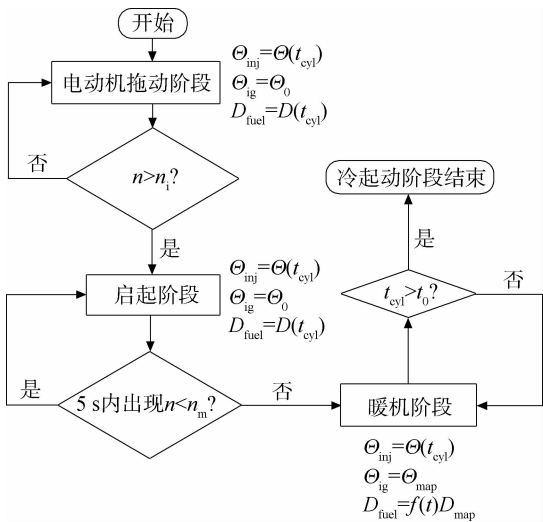


图 19 点燃式航空重油发动机冷起动控制策略
Fig. 19 Cold start control strategy for igniting heavy oil aeroengine

况。如果没有低于倒拖转速,说明发动机稳定维持在某转速上,判断进入暖机阶段。在暖机阶段, θ_{ig} 、 θ_{inj} 保持原查询方式,喷油脉宽 D_{fuel} 改用在原有正常工况基础上由缸体温度进行修正,将缸内过量空气系数维持在 1 附近,防止暖机阶段喷油过多导致火花塞积碳无法正常工作。当缸体温度 t 满足了发动机能够过渡到正常工况时的温度 t_0 时,发动机暖机结束,增大节气门进入正常工作状态。

3.4 冷起动策略试验验证

为了验证前文设计的冷起动策略,在环境温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、大气压力为 98 kPa 的条件下进行发动机冷起动试验。

图 20 为整个起动过程中发动机转速、缸体温度、喷油提前角、喷油脉宽以及点火提前角的变化曲线。由图可知,发动机能够较快起动,且转速平稳,并在暖机完成后顺利过渡到正常工况,验证了冷起动策略的可行性。

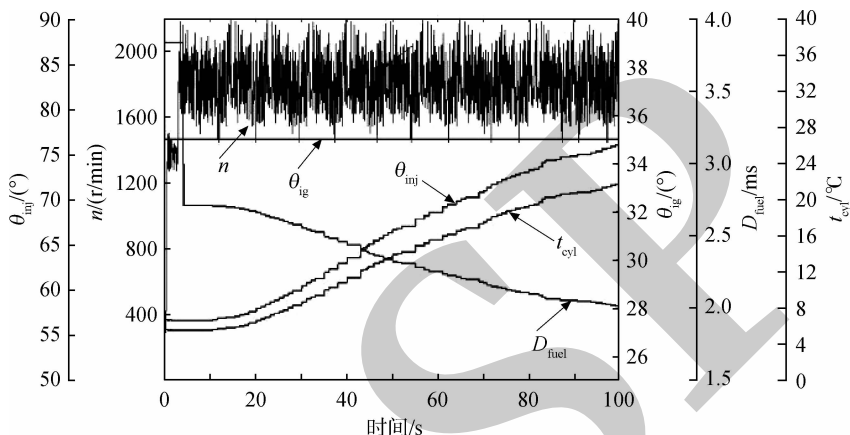


图 20 冷起动策略验证试验各参数变化

Fig. 20 Variation of parameters in cold start strategy verification experiment

4 结 论

本文以某型点燃式航空重油活塞发动机为研究对象,对重油发动机冷起动工况时的关键参数进行试验研究,并将结果作为重油发动机冷起动各阶段的策略依据。在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下进行了策略试验验证,证明了冷起动策略的可行性。在试验过程中得到如下结论:

1) 喷油提前角对发动机起动有很大影响,且喷油提前角对缸体温度敏感度较高。较小的喷油提前角有利于发动机快速起动,但较大的喷油提前角有利于缸内燃烧,稳定发动机转速,加快缸温上升速度。缸体温度在 $-10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时,采用上止点前 $50^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 范围内的喷油提前角能够保证发动机快速起动,且缸体温度越高,喷油提前角越大。

2) 点火提前角在冷起动工况前期对发动机起动速度有很大影响,但是与缸体温度的相关性不大,在前期保持点火提前角为上止点前 45° 能够保证发动机良好起动。

3) 较大喷油脉宽能够保证发动机快速起动,且转速较为平稳,但却不利于缸体快速升温,也容易造成火花塞积碳无法正常放电。因此在电动机

拖动阶段与起动阶段根据实际缸体温度选择 $3\sim 4.5\text{ ms}$ 范围内的喷油脉宽,且温度越低,脉宽越大。而在暖机阶段则采用工作工况脉谱图修正的方式,修正系数控制在 $1.0\sim 2.0$ 范围内,缸体温度越高,系数越低。

参考文献:

- [1] WANG S, CHANGWEI J L. Cyclic variation in a hydrogen-enriched spark-ignition gasoline engine under various operating conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(1): 1112-1119.
- [2] JI C, WANG S. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(18): 7823-7834.
- [3] 马帅, 刘娜, 胡春明. 二冲程重油发动机技术现状及发展方向[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(2): 87-91.
MA Shuai, LIU Na, HU Chunming. Current status and development direction of two-stroke heavy oil engine technology[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2015, 44(2): 87-91. (in Chinese)
- [4] CHEN L, DING S, LIU H, et al. Comparative study of combustion and emissions of kerosene (RP-3), kerosene-pentanol blends and diesel in a compression ignition engine [J]. Applied Energy, 2017, 203(12): 91-100.

- [5] HOOPER P. Initial development of a multi-fuel stepped piston engine for unmanned aircraft application[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2001, 73(5): 459-465.
- [6] DUDDY B J, LEE J, WALLUK M, et al. Conversion of a spark-ignited aircraft engine to JP-8 heavy fuel for use in unmanned aerial vehicles[J]. International Journal of Engines, 2011, 4(1): 82-93.
- [7] HOOPER P, PETER R. Low volatility fuel cold start experience with a stepped piston UAV engine to address single fuel objectives[J]. International Journal of Engines, 2017, 10(4): 1422-1429.
- [8] HOOPER P. Experimental experience of cold starting a spark ignition UAV engine using low volatility fuel[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2017, 89(1): 106-111.
- [9] JULIAN B, HASSA C. Breakup and atomization of a kerosene jet in crossflow at elevated pressure[J]. Atomization and Sprays, 2002, 12(2): 1-3.
- [10] PERKOWSKI W, IRZYCKI A, SNOPIKIEWICZ K, et al. Study on kerosene atomization process under a high speed air stream[J]. Journal of KONES Powertrain and Transport, 2011, 18(4): 341-347.
- [11] JU D, SUN X, JIA X, et al. Experimental investigation of the atomization behavior of ethanol and kerosene in acoustic fields[J]. Fuel, 2017, 202: 613-619.
- [12] JIN S H, BREAR M J, WATSON H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(10): 1883-1894.
- [13] PADALA S, BANSAL A, RAMESH A. Studies on an air assisted gasoline direct injection system for a two-stroke engine[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 2008-28-0048, 2008.
- [14] GEOFFREY C, ZAVIER C. Fundamental characteristics of an air-assisted direct injection combustion system as applied to 4-stroke automotive gasoline engines[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 2000-01-0256, 2000.
- [15] GEOFFREY C, TUBB J. Application of air assisted direct fuel injection to pressure charged gasoline engines[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper 2002-01-0705, 2002.
- [16] WU H, WANG L, WU Y, et al. Spray performance of air-assisted kerosene injection in a constant volume chamber under various in-cylinder GDI engine conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150(9): 762-769.
- [17] SPEGAR T D, CHANG S, DAS S, et al. An analytical and experimental study of a high pressure single piston pump for gasoline direct injection (GDI) engine applications[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper, 2009-01-1054, 2009.
- [18] ALEIFERIS P G, SERRAS-PEREIRA J, ROMUNDE Z V, et al. Mechanisms of spray formation and combustion from a multi-hole injector with E85 and gasoline[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(4): 735-756.
- [19] SINGH R, MCCHESENEY R. Development of multi-fuel spark ignition engine[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 2004-32-0038, 2004.
- [20] SUHY P, EVERS L, MORGAN E, et al. The feasibility of a kerosene fueled spark ignited two-stroke engine[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 911846, 1991.
- [21] 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]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 2005-32-0065, 2005.
- [22] UTLEY T, BREWSTER S C, TILMOUTH A, et al. Low temperature starting on a pure ethanol fuelled direct injection engine[R]. Society of Automotive Engineers, SAE Paper 2008-36-0270, 2008.
- [23] THOMAS S. Experimental study of a kerosene fuelled internal combustion engine[R]. Lausanne, Swiss: Industrial Energy Systems Laboratory of the Federal Institute of Technology in Lausanne, 2008.
- [24] 白洪林, 胡春明, 侯圣智, 等. 空气辅助喷射煤油和汽油的喷雾特性对比[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(5): 428-434.
- BAI Honglin, HU Chunming, HOU Zhisheng, et al. Comparison of spray characteristics of air-assisted kerosene and gasoline[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(5): 428-434.
- [25] 胡春明, 王书典, 毕延飞, 等. 活塞式航空煤油直喷发动机的燃烧特性[J]. 航空动力学报, 2017, 32(5): 1035-1042.
- HU Chunming, WANG Shudian, YAN Bifei, et al. Combustion characteristics of direct injection piston aviation kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(5): 1035-1042. (in Chinese)
- [26] HU Jingchao, LIU Bolan, ZHANG Chao, et al. Experimental study on the spray characteristics of an air-assisted fuel injection system using kerosene and gasoline[J]. Fuel, 2019, 235: 782-794.
- [27] 刘锐, 魏民祥, 杨海青, 等. 二冲程点燃式直喷煤油发动机冷起动控制策略[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 213-220.
- LIU Rui, WEI Minxiang, YANG Haiqing, et al. Cold start control strategy for two-stroke ignited direct injection kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 213-220. (in Chinese)
- [28] 彭乐高, 宫长明, 宫宝利, 等. 富氧下甲醇发动机冷起动燃烧及非法规排放[J]. 内燃机学报, 2017, 35(5): 423-428.
- PENG Legao, GONG Changming, GONG Baoli, et al. Cold start combustion and non-regulation of methanol engine under oxygen enrichment[J]. Transactions of CSICE, 2017, 35(5): 423-428. (in Chinese)
- [29] 胡春明, 王赫, 王旻, 等. 点燃式煤油航空直喷发动机冷起动试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(1): 78-83.
- HU Chunming, WANG He, WANG Yang, et al. Experimental study on cold start of ignition kerosene aviation direct injection engine[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2019, 52(1): 78-83. (in Chinese)