

二冲程点燃式直喷煤油发动机 冷起动控制策略

刘 锐, 魏民祥, 杨海青, 王永伟, 贝太学
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对某二冲程点燃式空气辅助缸内直喷煤油发动机, 设计了冷起动控制策略. 利用自主研发的电控单元, 在 4℃ 环境下通过试验验证了该策略正确性, 并在 14℃ 左右环境下研究了关键参数对冷起动性能影响, 结果表明: 点火提前角对起动阶段后期影响较大, 起动成功后点火提前角为上止点前 40° 时暖机效果最好. 采用饱和点火能量策略, 冷起动性能最好, 暖机平均转速最高, 转速波动最小; 起动喷油脉宽修正系数大于 2.5 时有利于改善起动阶段动力性, 转速增加率大, 起动喷油脉宽修正系数在 2.5 至 4.5 间冷起动过程基本一致. 上止点前 40°~60° 的喷气结束角有利于冷起动成功, 适度提前喷气结束角可加快暖机过程. 油气间隔直接影响油气雾化效果, 6 ms 油气间隔冷起动性能最佳, 其作用主要体现在拖动和起动阶段.

关 键 词: 冷起动; 二冲程; 煤油发动机; 空气辅助直喷; 火花点火; 控制策略

中图分类号: V234; TK46

文献标志码: A

Cold start control strategy of a two-stroke direct injection spark-ignited kerosene engine

LIU Rui, WEI Min-xiang, YANG Hai-qing,
WANG Yong-wei, BEI Tai-xue

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The cold start control strategy was designed for a two-stroke spark-ignited kerosene engine with air-assisted direct injection. With the use of self-developed electronic control unit, bench tests were carried out to verify the accuracy of the control strategy under 4℃ ambient temperature, and the effects of the key control parameters on cold start performance were researched under about 14℃ ambient temperature. The experimental results showed that, the ignition advance angle had effects on late stage of starting process; after the successful starting, ignition advance angle with 40° before top dead center was most beneficial to accelerate the warm-up process. When applying the saturated ignition energy strategy, the cold start performance was the best, the average engine speed of warm-up process raised to the maximum level, and the related engine speed fluctuation reached to the minimum value. The fuel enrichment factor bigger than 2.5 improved the dynamic performance of starting process, whose speed raising rate was increased, but the variations of cold start process were almost consistent when continuing to increase the fuel enrichment factor from

收稿日期: 2015-04-22

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

作者简介: 刘锐(1987—), 男, 博士生, 主要从事活塞发动机仿真与控制等方面的研究. E-mail: timothy@nuaa.edu.cn

引用格式: 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 of a two-stroke direct injection spark-ignited kerosene engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 213-220.

2.5 to 4.5. The air injection timing angle from 40° to 60° before top dead center was helpful to successful cold start; moderately advancing air injection timing angle at warm-up condition can accelerate the warm-up process. The fuel to air injection delay had direct influence on the fuel air mixture process, which may affect the motor dragging and starting process, and rapidly realize the best successful cold start when the fuel to air injection delay was about 6 ms.

Key words: cold start; two-stroke; kerosene engine; air-assisted direct injection; spark ignition; control strategy

火花点燃式活塞发动机的冷起动过程主要与混合气空燃比、缸体温度或冷却液温度、点火提前角、点火能量及蓄电池电压等因素有很大的关系。这些因素决定了发动机冷起动性能、排放性能及运转稳定性。以汽油作为燃料的点燃式发动机,采用化油器式、进气道喷射或缸内直喷方式,尤其在缸内直喷方式下燃油喷射压力高,雾化效果好,冷起动过程十分顺利。而以煤油作为燃料的动力机械在航空及农业领域应用十分广泛,其中点燃式煤油活塞发动机在无人机领域应用具有重要意义,而煤油与汽油理化特性差别较大,相同喷射条件下雾化效果明显处于劣势,若不采用预热或引燃的辅助手段,对采用化油器式或进气道喷射方式供给煤油的活塞发动机,即便采用高能点火技术,冷起动也将十分困难^[1-8]。

近年来,有国外学者将空气辅助燃油直喷技术应用于航空二冲程或四冲程煤油发动机上,解决了低温冷起动困难的问题,并给出了冷起动试验结果数据,但没有提及或描述相关的冷起动控制策略^[9-10]。同时有的学者采用二次喷射策略,结合多功能点火系统,改善了用乙醇燃料的四冲程空气辅助直喷发动机冷起动性能,这对于研究四冲程点燃式直喷煤油发动机的冷起动控制策略具有重要的借鉴意义^[11]。此外,国内学者于秀敏等进行了直喷增压汽油发动机冷起动控制研究,结果表明供油脉宽对起动过程的影响较大,其效果要大于点火提前角对起动过程以及怠速转速的影响^[12]。齐万强等根据直喷汽油机冷起动特性和基本要求,设计了相应的冷起动控制策略,进行了发动机冷起动控制策略试验验证^[13]。张红光等针对经过改装的天然气发动机进行了起动试验研究,结果表明较低起动转速时应采用较浓的混合气,较高的冷却水温度有利于天然气发动机的冷起动过程,多次点火控制和提高点火能量有利于天然气发动机的顺利起动^[14-15]。

显然,对于二冲程点燃式直喷煤油发动机,其冷起动性能好坏与燃油雾化质量、点火及喷油控

制有着密不可分的关系,要解决传统非直喷的点燃式煤油发动机冷起动困难问题,首先要改善的就是燃油喷射及雾化形式,采用低压空气辅助喷射系统,其燃油被油嘴喷入带有压缩气体预混合腔中,经过一段时间延迟,即油气间隔,通过空气辅助喷嘴将油气混合物直接喷入燃烧室,燃油的索太尔平均直径能够达到 $10\mu\text{m}$ 左右^[16-17];其次,要改善及优化直喷煤油发动机冷起动性能,降低冷起动工况排放,有必要在对空气辅助喷射正时控制策略前期研究基础上^[18],探索具体的直喷煤油发动机冷起动工况的点火及喷油控制策略。为此,本文将传统二冲程进气道喷射发动机改造为空气辅助缸内直喷煤油发动机,利用自主研发的发动机电控系统,设计直喷煤油发动机冷起动控制总体策略,并进行针对性的试验研究。

1 冷起动控制策略

1.1 冷起动点火控制

在冷起动阶段,点火提前角的控制不同于暖机后的稳态工况,一般采用固定点火角度,待发动机起动成功后再根据冷却水或者缸体温度进行修正。冷起动过程点火提前角大小需要兼顾缸内燃油喷射正时,过早可能与燃油喷射相位重叠,过晚容易引起缸内压力峰值滞后减小做功能力导致冷起动不顺利。冷起动过程中,点火能量应当在保证系统稳定条件下尽可能地提高,以保证点火成功率,使发动机成功起动。通常来说,电感式点火比电容式点火更易实现高能化,一般单次放电点火能量至少 50mJ ,并且,多火花塞点火技术同样有利于冷起动成功,多个火花塞同时点火可以有效缩短火焰的传播距离,提高点火能量和点火系统的可靠性。

综合考虑,采用双火花塞电感式高能点火系统进行试验研究,其中点火能量大小由初级线圈充磁脉宽来控制,采用策略为:发动机在冷起动时,其点火提前角主要根据环境温度和发动机转

速来确定,冷起动过程发动机转速的变化表征了其起动状态,点火提前角根据状态作出相应变化,此外,初始缸体温度对燃油动力黏度及挥发性具有重要影响,因此需要对基础点火提前角进行定量修正,如式(1)所示。较大的点火能量有利于发动机起动顺利,由于在起动过程当中,蓄电池会由于直流起动电动机扭矩转速特性,其端电压会降至 9 V 左右,为确保点火能量维持在目标水平,其充磁时间必须由蓄电池电压进行修正,式(2)~式(6)给出了点火能量修正计算依据,显然,当蓄电池电压下降后,为使点火线圈达到目标电流值,应适当地增大充磁脉宽。

$$\theta_{\text{ig}} = \theta_{\text{ig}}(n) + \Delta\theta_{\text{ig}}(T_{\text{cl}}) \quad (1)$$

式中 θ_{ig} 为点火提前角($^{\circ}$), $\theta_{\text{ig}}(n)$ 为冷起动过程基于发动机转速 n 的基础点火角($^{\circ}$), $\Delta\theta_{\text{ig}}(T_{\text{cl}})$ 为基于冷机状态缸体温度 T_{cl} 的初始点火修正量($^{\circ}$), 对于固定的缸体温度, $\Delta\theta_{\text{ig}}(T_{\text{cl}})$ 为固定值。

$$E_{\text{ig}} = N_{\text{p}} E_{\text{s}} \quad (2)$$

$$E_{\text{s}} = \int U_{\text{s}}(t) I_{\text{s}}(t) dt = \eta E_{\text{p}} \quad (3)$$

式中 E_{ig} 为单缸总的点火能量(J); E_{s} 为单个火花塞单次点火能量(J); N_{p} 为单缸火花塞安装个数; $U_{\text{s}}(t)$ 及 $I_{\text{s}}(t)$ 分别为点火线圈次级电压(V)及电流(A); η 为点火线圈能量转换效率。

$$E_{\text{p}} = L_{\text{p}} I_{\text{p}}^2 / 2 \quad (4)$$

$$I_{\text{p}} = \begin{cases} 0 & t \leq t_0 \\ U_{\text{p}} [1 - \exp(-t/\tau)] / R_{\text{p}} & t_0 \leq t \leq t_{\text{f}} \\ I_{\text{f}} & t_{\text{f}} < t \end{cases} \quad (5)$$

$$T_{\text{ch}} = t - t_0 = T_{\text{ch}}(U_{\text{p}}) \quad (6)$$

式中 L_{p} 及 R_{p} 分别为点火线圈初级电感量(H)及电阻值(Ω); E_{p} 为点火线圈初级存储能量值(J); U_{p} 为蓄电池电压(V), I_{p} 为点火线圈初级电流(A), I_{f} 为初级电流饱和值(A); t_0 为初级线圈闭合时刻, t_{f} 为初级电流饱和时刻, τ 为电路时间常数, T_{ch} 为初级线圈充磁时间(s), $T_{\text{ch}}(U_{\text{p}})$ 为基于蓄电池电压通电时间(s)。

1.2 冷起动燃油喷射控制

相比于冷起动时的点火控制,采用空气辅助直喷方式的燃油混合物喷射控制对发动机冷起动性能影响更大,合理的燃油混合物喷射量和喷射正时更容易实现在火花塞周围形成可点燃的偏浓混合气。混合物喷射量决定了缸内混合气浓度大小,火花塞周围混合气过稀则难以被点燃,对点火

能量要求更高;混合气过浓,那么即便点火成功,但随着起动过程转速上升容易使发动机出现失火现象,起动不顺利。燃油混合物喷射正时决定了点火时刻火花塞周围混合气浓度分布,对于固定的点火提前角,过早喷射可能由于扫气损失或者燃油凝结于壁面及活塞顶部导致混合气变稀,而过晚喷射可能会造成油气混合时间太短容易冷凝于火花塞电极上使得点火不成功,两种情况都会导致缸内燃烧不充分,易造成发动机熄火。为探索喷射参数对起动过程影响,结合空气辅助直喷控制原理,设计相应的冷起动工况下喷油脉宽及喷射正时修正策略,式(7)和式(8)给出了计算方法。

$$T_{\text{in}} = T_{\text{in}}(\alpha, n) f(T_{\text{cl}}) + \Delta T_{\text{in}}(U_{\text{p}}) \quad (7)$$

$$\theta_{\text{in}} = \theta_{\text{in}}(\alpha, n) + \Delta\theta_{\text{in}}(T_{\text{cl}}) \quad (8)$$

式中 T_{in} 为喷油脉宽(s), α 为节气门开度, $T_{\text{in}}(\alpha, n)$ 为基础喷油脉宽, $\Delta T_{\text{in}}(U_{\text{p}})$ 为基于蓄电池电压喷油修正量(s), $f(T_{\text{cl}})$ 为喷油修正系数,其取值将在 1.3 节中讨论, θ_{in} 为喷气结束角($^{\circ}$), $\theta_{\text{in}}(\alpha, n)$ 为基础喷气结束角($^{\circ}$), $\Delta\theta_{\text{in}}(T_{\text{cl}})$ 为基于冷机状态缸体温度的喷气结束角修正量($^{\circ}$)。

1.3 冷起动总体控制策略

以拖动峰值转速,起动目标转速和起动后喷油脉宽修正系数 f_{ast} 为判断依据,将起动过程分为 4 阶段:电动机拖动阶段、起动阶段、起动后过渡阶段以及暖机阶段。其中,拖动峰值转速为起动电动机能够拖动的最大转速,起动目标转速为用于判断发动机是否进入起动后过渡阶段。如图 1,冷起动总体控制策略:发动机电控系统上电后,当起动电动机开始工作时,在电动机拖动阶段,喷油量由基于缸体温度查表插值所得的起动喷油脉宽修正系数 f_{st} 决定,点火提前角 θ_{ig} 采用拖动阶段点火提前角 θ_1 ;当发动机转速大于电动机峰值转速后,可判断发动机已经着火,喷油策略不变,点火提前角 θ_{ig} 采用起动阶段点火提前角 θ_2 ;当发动机转速大于设定的起动目标转速后,认为发动机起动成功,此时点火策略不变,喷油量由基于当前缸体温度的系数 f_{ast} 和暖机工况喷油脉宽修正系数 f_{cyl} 共同决定,并且设置 f_{ast} 开始自动递减;当系数 f_{ast} 递减至 1 时,判断发动机进入暖机工况,喷油量开始由 f_{cyl} 进行修正,而点火提前角则进行查表计算确定,图 1 中 θ_{map} 为查表插值所得点火提前角。

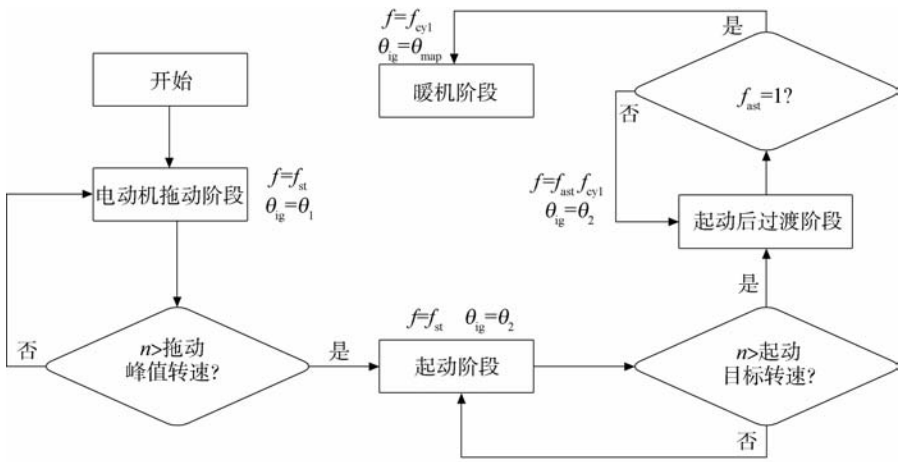


图 1 点燃式直喷煤油发动机冷起动控制策略

Fig. 1 Cold start control strategy of direct injection spark-ignited kerosene engine

2 控制策略试验验证

2.1 台架试验系统

点燃式直喷煤油发动机冷起动试验台架系统包括 12 V 蓄电池、直喷煤油发动机、温度采集卡、自开发电控单元及上位机等,如图 2 所示.其中,上位机温度监控软件用于实时记录来源于温度采集卡的缸头、排气及缸体的温度数据,发动机参数标定软件用于对不同控制参数进行预先设定之后下载至发动机电控单元,记录并保存发动机运行时的转速、负荷、喷油脉宽、喷气脉宽、喷射正时、充磁脉宽和点火提前角等参数.

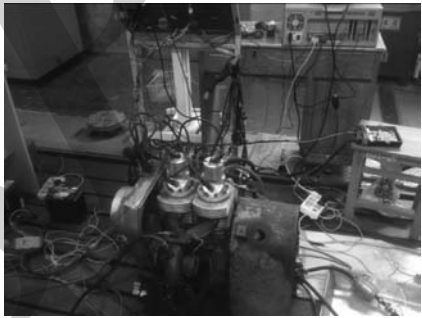


图 2 点燃式直喷煤油发动机冷起动试验台架

Fig. 2 Cold start test bed for direct injection spark-ignited kerosene engine

2.2 控制策略验证

为验证第 1.3 节中冷起动控制策略正确性,通过自行设计下位机控制程序,在环境温度为 4℃左右的状态下,电动机峰值转速在 1200r/min 左右,进行了直喷煤油发动机冷起动试验,图 3 给出了发动机相关参数随时间变化过程.为便于分

析,图 3 中将点火提前角、喷气结束角、蓄电池电压及温度等数值放大了 100 倍,喷油脉宽和充磁脉宽单位为微秒.显然,该冷起动控制策略使发动机能够顺利起动成功,并且点火提前角、充磁脉宽及喷油脉宽等参数的变化过程与控制策略所要求的一致,在电动机开始拖动时,蓄电池电压降至 9.4 V 左右,充磁脉宽和喷油脉宽开始得到修正,

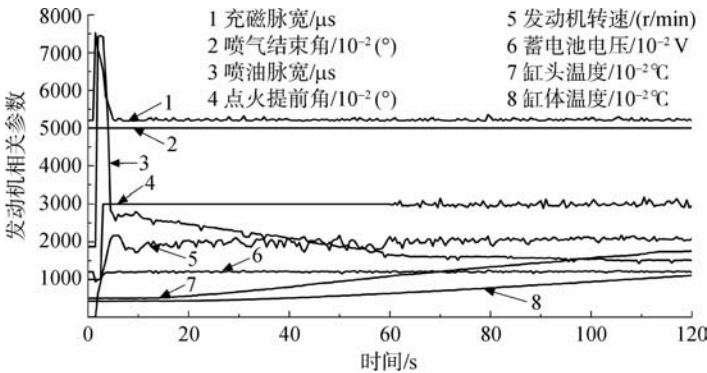


图 3 冷起动工况下发动机相关参数变化

Fig. 3 Variation of parameters related to engine at cold start condition

点火提前角为上止点前 10° ,当转速超过 $1\,200\text{ r/min}$,发动机进入了起动阶段,点火提前角为上止点前 30° ,缸头温度及缸体温度变化不明显;当发动机由起动阶段进入起动后过渡阶段,即转速一旦超过 $2\,000\text{ r/min}$,喷油量开始呈一定斜率进行递减,缸头温度和缸体温度明显上升;当喷油量递减过程结束后,发动机随即开始进行暖机.由此可见,在此环境下,空气辅助直喷煤油发动机的成功冷起动验证了所设计的控制策略的正确性.

3 关键参数对冷起动过程影响

为便于研究关键电控参数对点燃式直喷煤油发动机冷起动性能规律,在冷起动控制策略基础上,采用调整单个电控参数同时固定其他参数的控制方法进行发动机冷起动试验,分别研究了点火提前角、点火能量、起动喷油脉宽修正系数、喷气结束角及油气间隔对冷起动过程的影响.

3.1 点火提前角对冷起动过程的影响

试验时环境温度为 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境压力为 101 kPa ,蓄电池电压为 12.4 V ,空气辅助喷射控制策略相同,起动过程点火线圈基础充磁脉宽固定为 3 ms .当发动机转速低于 $1\,200\text{ r/min}$ 时,点火提前角被设置为上止点前 10° ,转速高于 $1\,200\text{ r/min}$ 后,分别采用不同的固定点火提前角,为上止点前 40° , 30° 与 20° ,以此来研究点火提前角对煤油发动机冷起动性能的影响.图 4 所示为不同点火提前角策略下发动机的冷起动转速变化曲线.由图可知,采用 3 种不同的点火提前角试验策略,发动机冷起动过程存在明显区别,相比而言,在 $1\,500\text{ r/min}$ 前,3 种控制策略下发动机转速变化规律基本一致,没有明显差异,但超过此转速后,上止点前 40° 时转速上升最为迅速,最高转速达到 $2\,500\text{ r/min}$ 左右,上止点前 30° 时发动机转速超过 $2\,000\text{ r/min}$ 的时刻略晚,而上止点前 20° 时转速上升状态明显地有所滞后,此外,较大的点火提前角使得发动机进入暖机阶段后整体转速较高,因此,对于二冲程空气辅助直喷式煤油发动机,适当提高其起动阶段点火提前角利于发动机起动成功.

3.2 点火能量对冷起动过程的影响

试验时环境温度为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境压力为 101 kPa ,蓄电池电压为 12.4 V ,空气辅助喷射控制及点火提前角控制策略不变.点火线圈基础充磁脉宽依次被设置为 1 ms 到 5 ms , 4 ms 后时点火线圈储能基本饱和.图 5 给出了不同充磁脉宽下发动

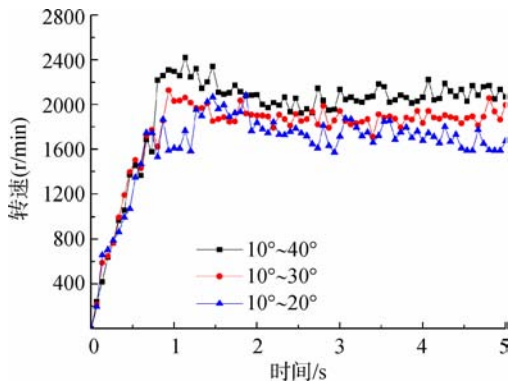


图 4 不同点火提前角策略下发动机冷起动转速变化
Fig. 4 Engine speed variation under different ignition advance angle control strategy at cold start condition

机的冷起动转速变化曲线.由此可知,在拖动阶段和起动阶段,发动机的转速变化率随充磁脉宽的增大而增大,说明发动机获得了较大的加速度,而特别是当充磁脉宽为 1 ms 时,发动机起动过程转速波动大,由于点火能量不足存在失火现象,在到达目标转速 $2\,000\text{ r/min}$ 以后难以维持运行状态而自动熄火,在当前试验状态下,充磁脉宽过小不利于发动机稳定工作.另外,在发动机进入暖机阶段后,发动机平均转速随着充磁脉宽的增大而增大,并且趋于波动较小.因此,饱和的点火能量能够明显改善发动机起动过程燃烧性能,减小发动机冷起动过程所需要的时间,增大暖机阶段的平均转速,同时减小循环间的转速波动.

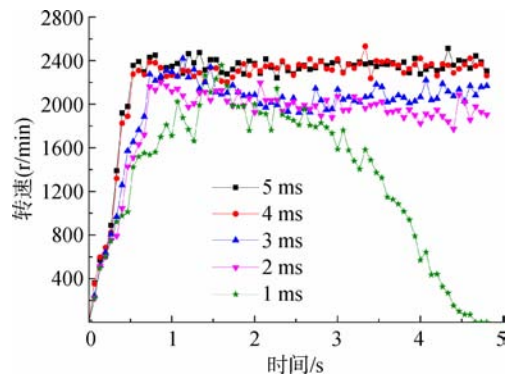


图 5 不同充磁脉宽下发动机冷起动转速变化
Fig. 5 Engine speed variation under different charge pulse widths at cold start condition

3.3 喷油量对冷起动过程的影响

试验时环境温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境压力为 101 kPa ,蓄电池电压为 12.4 V ,冷起动试验过程中点火提前角控制策略不变,基础充磁脉宽固定为

3 ms, 喷油修正开始转速与喷油修正结束转速等空气辅助喷油参数均不变, 研究拖动及起动阶段中不同喷油脉宽修正系数对冷起动性能的影响. 试验中设定的喷油脉宽修正系数依次为 1, 1.5, 2.5, 3.5 和 4.5, 图 6 为不同喷油修正策略下对应的发动机起动过程转速变化曲线. 从图可知, 不同喷油脉宽修正系数下拖动阶段的发动机转速变化基本一致, 在此阶段后, 较大的喷油脉宽修正系数有利于改善起动阶段动力性能, 发动机转速增加率较大, 同时喷油脉宽修正系数在 2.5 至 4.5 时区别不大, 考虑到喷油脉宽修正系数过大将大幅增加起动阶段喷油脉宽, 不仅造成燃油冗余喷射, 而且不利于改善起动过程排放性能, 说明在当前的环境状态下喷油脉宽修正系数可以取折衷值, 当喷油脉宽修正系数减小或不进行起动喷油修正时, 发动机起动性能存在着下降, 但不至于熄火, 并且不同喷油修正状态下发动机进入暖机阶段后转速变化均趋于一致.

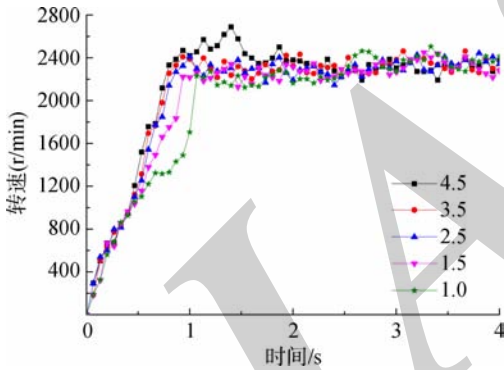


图 6 不同喷油修正策略下发动机冷起动转速变化
Fig. 6 Engine speed variation under different fuel injection control strategy at cold start condition

3.4 喷气结束角对冷起动过程的影响

试验时环境温度为 13 ℃, 环境压力为 101 kPa, 蓄电池电压为 12.4 V, 点火控制策略保持不变, 起动喷油脉宽修正系数为 3.5, 油气间隔为 2 ms, 喷气与喷油脉宽比为固定值. 为研究不同喷气结束角对直喷煤油发动机冷起动性能的影响, 试验中喷气结束角依次被固定地设为上止点前 40°, 50°, 60° 及 80°. 图 7 为不同喷气结束角对应的发动机冷起动转速变化曲线, 通过观察可知不同喷气结束角下发动机冷起动过程差别较大, 说明喷气时刻对发动机的冷起动性能影响较大. 首先在拖动阶段, 转速变化趋势便开始出现区别, 在喷

气结束角为上止点前 40° 时拖动阶段最短, 增大喷气结束角使得起动电动机拖动过程变长, 因此过早喷射不利于改善拖动阶段内发动机燃烧, 发动机起动成功率对电动机拖动的依赖性增加. 可见, 喷气结束角较小时, 有利于混合气尽可能地排气口关闭后完成喷射过程, 减少新鲜混合气扫气及过后排气损失, 火花塞周围容易形成易点燃的偏浓混合气, 不足在于在一定程度小减小了燃油蒸发时间, 使得进入暖机工况初期阶段转速偏低. 而喷气结束角较大时, 油气混合物在缸内驻留时间变长, 由于起动过程发动机机体温度不可能快速升高, 使得部分燃油容易遇冷附着在缸壁上, 并且部分可燃混合气容易在排气门关闭前溢出排气口, 不利于在缸内形成易点燃的混合气. 因此, 采用压缩行程后期靠近点火时刻完成燃油喷射的控制策略, 有利于形成可燃混合气, 易于发动机冷起动成功, 但进入暖机阶段后, 应当适度提前喷油结束角, 增加燃油蒸发量及油气混合时间, 加快暖机过程.

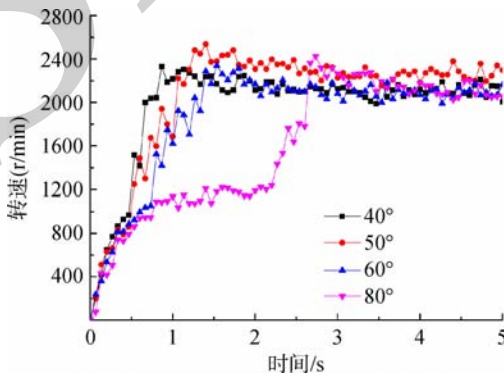


图 7 不同喷气结束角下发动机冷起动转速变化
Fig. 7 Engine speed variation under different air injection timing angles at cold start condition

3.5 油气间隔对冷起动过程影响

试验时环境温度为 15 ℃, 蓄电池电压为 12.4 V, 点火控制策略保持不变, 起动喷油脉宽修正系数为 3.5, 喷气结束角被固定地设为上止点前 50°, 喷气与喷油脉宽比为固定值. 试验时油气间隔依次设为 2, 4, 6, 8, 10 ms. 图 8 给出了不同油气间隔对应的发动机冷起动转速变化曲线, 由图可知, 不同油气间隔下发动机的冷起动特性存在着较大差别, 主要体现拖动阶段及起动阶段, 而进入暖机阶段后的发动机转速变化趋于一致, 其中, 油气间隔为 2 ms 和 10 ms 时冷起动时间较长, 在 6 ms 时所用时间最短, 主要原因在于在当前环境温

度及压力条件下,油气间隔直接影响了预混合腔里燃油雾化质量,从而影响缸内喷射时的二次雾化效果;过小的油气间隔使得燃油与低压空气混合时间短,而过大的油气间隔可能会由于停留时间过长和燃油较大的运动黏度重新形成油膜,不利于在预混合腔里存有足够多的燃油蒸发量,因此,总体来说,油气间隔取折衷值将有利于改善发动机冷起动性能,其作用效果体现在拖动阶段和起动阶段。

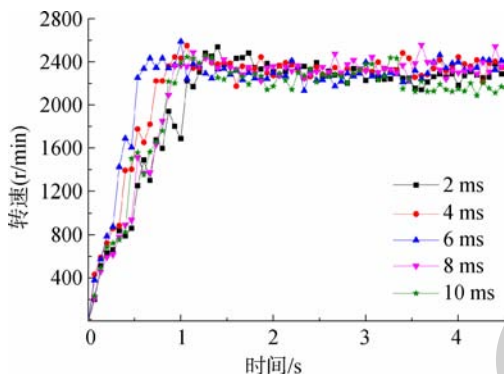


图8 不同油气间隔下发动机冷起动转速变化

Fig. 8 Engine speed variation under different fuel to air delay at cold start condition

4 结 论

本文以某二冲程点燃式空气辅助缸内直喷煤油发动机为对象,设计了冷起动控制策略,在 4°C 环境条件下通过试验验证了策略正确性,并在 14°C 环境条件下研究了关键电控参数对发动机冷起动性能的影响,结论如下:

1) 点火提前角对冷起动阶段后期影响较大,并且在冷起动成功后,点火提前角为上止点前 40° 时暖机效果最好。

2) 采用饱和的点火能量条件下,发动机冷起动性能最好,暖机阶段的平均转速最高,转速波动最小。

3) 喷油脉宽修正系数大于2.5时明显改善起动阶段动力性能,起动过程转速增加率大,喷油脉宽修正系数为2.5~4.5时起动过程基本一致,过大的喷油量易造成燃油冗余喷射,不利于改善起动过程排放性能。

4) 采用上止点前 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 间的喷气结束角,即压缩行程后期靠近点火时刻完成油气混合物喷射,有利于形成可燃混合气,易于发动机冷起动成功,进入暖机阶段后,适度提前喷油结束角,增加

燃油蒸发量及油气混合时间,可加快暖机过程。

5) 油气间隔直接影响着预混合腔里燃油雾化效果,油气间隔取6 ms的折衷值时冷起动性能最佳,其作用效果主要体现在拖动阶段和起动阶段。

参考文献:

- [1] 杨致明,李隆强.汽油机改烧煤油或柴油的研究[C]//中国内燃机学会特种发动机分会四届一次学术交流会论文集.北京:中国内燃机学会,2006:42-50.
- [2] 杨致明,李隆强.舰载无人机的活塞式发动机燃油问题与对策[C]//尖兵之翼:2006中国无人机大会论文集.北京:中国航空学会,2006:535-538.
- [3] Patrick J, Lawrence W, Julie E, et al. The feasibility of a kerosene fueled spark ignited two-stroke engine[R]. SAE Paper 911846, 1991.
- [4] Sanchez T F. Experimental study of a kerosene fuelled internal combustion engine[D]. Lausanne, Switzerland: Federal Institute of Technology in Lausanne, 2008.
- [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] 陈林林.二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
CHEN Linlin. Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [7] 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 Minxiang. 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)
- [8] 杨光,魏民祥,李军.活塞式煤油发动机冷起动点火能量试验研究[J].公路与汽运,2013(3):13-16.
- [9] 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 Paper 2005-32-0065, 2005.
- [10] Houston R, Bell G, Ahern S. High specific power output direct injection 2-stroke engine applications[R]. SAE Paper 2005-32-0066, 2005.
- [11] Utley T D, Brewster S C, Tilmouth A, et al. Low temperature starting on a pure ethanol fuelled direct injection engine[R]. SAE Paper 2008-10-07, 2008.
- [12] 于秀敏,谭兴闻,马君,等.缸内直喷汽油机冷起动控制[J].吉林大学学报:工学版,2011,41(6):1554-1558.
YU Xiumin, TAN Xingwen, MA Jun, et al. Gasoline direct injection engine start control[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1554-1558. (in Chinese)

[13] 齐万强,于秀敏,张允,等.缸内直喷式汽油机冷起动控制策略[J].农业机械学报,2012,43(7):7-12.
QI Wanqiang, YU Xiumin, ZHANG Yun, et al. Cold start control strategy of gasoline direct injection engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 7-12. (in Chinese)

[14] 张红光,郑轶,刘凯,等.车用天然气发动机起动过程的试验研究[J].内燃机工程,2010,31(3):29-33.
ZHANG Hongguang, ZHENG Yi, LIU Kai, et al. Experimental study on starting process of automotive natural gas engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2010, 31(3): 29-33. (in Chinese)

[15] 王道静,张红光,王欣,等.天然气发动机起动点火能量控制策略[J].车用发动机,2010(6):83-85.
WANG Daojing, ZHANG Hongguang, WANG Xin, et al. Spark energy control strategy of natural gas engine in starting process[J]. Vehicle Engine, 2010(6): 83-85. (in Chinese)

[16] Jin S H, Brear M, Watson H, et al. An experimental study of the spray from an air-assisted direct fuel injector[J]. Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(10): 1883-1894.

[17] Padala S, Bansal A, Ramesh A. Studies on an air assisted gasoline direct injection system for a two-stroke engine [R]. SAE Paper 2008-28-0048, 2008.

[18] 王永伟,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 Minxiang, YANG Haiqing, et al. Timing control strategies of air-assisted direct injection engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2942-2947. (in Chinese)

(编辑:陈 越)