

DOI: 10.7652/xjtuxb201501008

# 直喷汽油机反转起动次循环起动参数优化

韩林沛<sup>1</sup>, 洪伟<sup>1</sup>, 解方喜<sup>1</sup>, 苏岩<sup>1</sup>, 李冰<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130025, 长春;

2. 蒂森克虏伯发动机系统(大连)有限公司, 116600, 辽宁大连)

**摘要:** 为了使直喷汽油机在无起动机反转直接起动时达到更好的效果,在一台壁面引导式直喷汽油机上研究了对反转成功起动具有重要影响的次循环在不同起动参数下的着火和速度特性。试验结果表明:当水温 80℃、残余轨压 1.8 MPa、膨胀缸活塞初始位置于上止点后 120°、首循环起动边界一定时,基准过渡点前 3°次循环点火具有最高的缸压峰值和转速峰值,分别为 3.08 MPa 和 545 r/min;一定范围内混合气越浓,次循环着火特性和速度特性越好,缸压峰值在次循环过量空气系数为 0.5 时比 1.0 高出 32.8%,转速峰值高出 19.5%;基于油束和活塞顶凹坑的匹配,喷油正时在上止点前 100°左右时表现最优。改变水温、轨压和膨胀缸活塞初始位置等被动参数,最佳点火时刻仍为基准过渡点前 3°,最佳过量空气系数范围一般为 0.6~0.7,膨胀缸活塞初始位置在上止点后 100°之前时,喷油正时选择在上止点后 100°为最佳,膨胀缸活塞初始位置在上止点后 100°之后时,喷油时刻越早越好。

**关键词:** 反转直接起动;次循环;着火特性;速度特性;参数优化

**中图分类号:** TK411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)01-0046-07

## Optimization of Starting Parameters for the Second Cycle During GDI Engine Reversed Starting Process

HAN Linpei<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>, XIE Fangxi<sup>1</sup>, SU Yan<sup>1</sup>, LI Bing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jinlin University, Changchun 130025, China;

2. ThyssenKrupp Presta Dalian Co. Ltd., Dalian, Liaoning 116600, China)

**Abstract:** To achieve better starting performance for GDI (gasoline direct injection) engine reversed direct-starting without starter, an experiment for ignition and speed characteristics of the second cycle affecting successful reversed direct-starting is conducted by changing starting parameters in a wall-guided GDI engine. The results show that the highest cylinder pressure of 3.08 MPa and the highest speed of 545 r/min for the second cycle are achieved at 3° CA (crank angle) before the basic transition point with water temperature 80℃, residual rail pressure of 1.8 MPa, expansion stroke piston position of 120° CA ATDC (after top dead center) and the same starting boundary of the first cycle. And better ignition and speed characteristics of the second cycle can be obtained with richer mixture in a specific range. For instance, the cylinder pressure peak with excess air coefficient 0.5 gets 32.8% higher than excess air coefficient 1.0, and the speed peak 19.5% higher. The best starting performance appears when injection timing is taken as 100° CA BTDC (before top dead center) based on the effective match between spray and

收稿日期: 2014-04-23。 作者简介: 韩林沛(1988—),男,博士生;解方喜(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206059,51276080);国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA111702)。

网络出版时间: 2014-10-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20141031.1642.004.html>

surface of piston bowl. The best ignition timing remains 3° CA before the basic transition point within the best range of excess air coefficient as 0.6-0.7 under different temperatures, injection pressures and initial piston positions. Specially, the best injection timing for the second cycle is 100° CA BTDC when the expansion stroke piston position is before 100° CA ATDC, and the injection timing should be as early as possible when the initial piston position is after 100° CA ATDC.

**Keywords:** reversed direct-starting; second cycle; ignition characteristics; speed characteristics; parameters optimization

中国汽车保有量逐年攀升,交通拥堵越来越严重,汽车尾气排放增多。怠速停止技术(车辆怠速时熄火以减少车辆的怠速时间)可以有效降低车辆怠速时的燃油消耗及废气排放<sup>[1-2]</sup>,但会造成发动机频繁起动。直接喷油起动可以实现车辆怠速停止、再起动的无起动机起动,随着直喷汽油机技术的发展,喷油和点火的灵活性使无起动机直接起动成为可能。无起动机直接起动的模式包括两种,一种是正转起动,另一种是反转起动。

本课题组前期的研究表明<sup>[3-5]</sup>,热机状态下能够成功实现正转起动的膨胀缸初始活塞位置仅在上止点后 90°~100°之间,而反转起动通过对膨胀缸的压缩作用,使得膨胀缸着火时能够爆发出更大的能量来推动曲轴正转,这样利用反转直接起动的膨胀缸初始活塞位置在 95°~130°之间的 35°范围,利用无起动机直接起动的膨胀缸初始位置范围扩展到了 40°。

参考文献[6]试验研究了正转和反转起动的首循环着火特性,而本文对这种复杂多变起动环境的反转起动次循环进行了详细的参数优化研究。

## 1 试验平台和试验方案

### 1.1 试验平台

试验在一台壁面引导式缸内直喷汽油机上进行,发动机参数如表 1 所示。试验台架采用自主开发的控制和采集系统,控制和采集精度均达到 ms 级;缸压用奇石乐 6117B 火花塞集成式缸压传感器采集;曲轴带轮端安装了精度为 0.5°的编码器,用于输出发动机转速信号,提供精准的曲轴相位信号;发动机的进出水口连接有恒温控制水箱,用于模拟发动机停机、再起动机时的机体温度。

### 1.2 试验方案

经过对起动环境多变性分析知<sup>[2-3]</sup>,虽然影响次循环着火特性的参数很多,但大体可以分为两类:主动参数和被动参数。主动参数是指次循环着火时可

表 1 发动机参数

|       |       |                            |       |
|-------|-------|----------------------------|-------|
| 排量/L  | 1.468 | 行程/mm                      | 82    |
| 进气形式  | 自然吸气  | 最大扭矩/N·m <sup>-1</sup>     | 143   |
| 喷雾形式  | 壁面引导  | 最大扭矩转速/r·min <sup>-1</sup> | 3 500 |
| 气门数   | 4     | 最大功率/kW                    | 77    |
| 压缩比   | 11    | 最大功率转速/r·min <sup>-1</sup> | 6 000 |
| 缸径/mm | 75.5  |                            |       |

以控制的参数,包括点火时刻、喷油时刻及喷油量;被动参数是指次循环着火时不能控制的,但会影响次循环着火特性的完全受发动机运行和停机状态影响的参数,包扩机体温度、轨压和活塞初始位置。

试验中选择了次循环在不同点火正时、不同喷油时刻以及不同喷油量等的 3 组控制变量,研究了主动参数对次循环着火特性和速度特性的影响;通过冷却液恒温控制水箱进行机体温度(60、70、80、90℃)调节,以模拟不同机体温度的被动参数;试验前通过起动无喷油起动机拖动建立起高轨压,且在监控轨压分别下降到 1.8、1.3、0.8 MPa 时进行试验,以模拟不同喷射压力的被动参数;由手动盘车膨胀缸活塞位置(上止点后 100°、110°和 120°)来模拟不同活塞位置的被动参数;利用不同被动参数下的主动参数对次循环速度特性的影响进行纵向对比,得出优化结果。

试验中喷油量按照膨胀行程活塞(次循环)在不同初始位置时的缸内残余空气量计算获得,次循环过量空气系数计算式如下

$$\lambda = \frac{m_{\text{air}}}{g_b l_o} \tag{1}$$

式中: $m_{\text{air}}$ 为不同活塞初始位置时膨胀行程内的实际空气量; $g_b$ 为通过次循环喷油脉宽控制喷入的燃油量; $l_o$ 为化学计量空燃比<sup>[7]</sup>。

为方便说明不同参数下次循环的速度特性,文中定义了反转起动速度曲线上的若干特征点,如图 1 所示(膨胀缸上止点为 0°),其中起始点为反转运

动的起始位置点,过渡点为曲轴由反转运动变为正转运动时的临界点,次循环转速峰值点为次循环转速的最高点,首循环为反转起动时的反转循环,次循环为过渡点后的第1个正转循环,第3循环为正转后的第2个做功循环。由于缸内新鲜空气在反转时已燃,所以第3循环并没有着火做功。

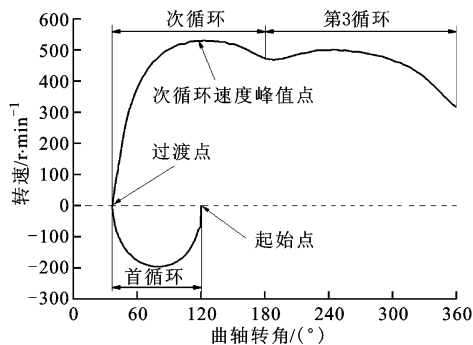


图1 反转起动速度曲线

## 2 试验结果和分析

### 2.1 主动参数影响分析

主动参数影响分析时的工况均为:水温 80℃、轨压 1.8 MPa、膨胀缸活塞位于上止点后 120°,首循环过量空气系数 0.7,喷油和点火时间间隔 84 ms,次循环过量空气系数 0.7,次循环点火时刻于基准过渡点前 3°。

2.1.1 点火正时 次循环不同点火时刻缸内压力随曲轴转角的变化如图2所示,此时次循环喷油时刻为反转转动了 20°。点火角以首循环单独着火时的过渡点所对应的曲轴转角于上止点前 36.5°记为基准过渡点 0°。从图中可以看出,基准过渡点前 3°点火时,次循环具有最好的燃烧特性,缸压峰值达到 3.08 MPa,提前和推迟点火缸压峰值都会下降。点火角提前到过渡点前 20°时,缸压峰值降为 2.22 MPa,降幅为 27.9%;点火角推迟到过渡点后 5°时,缸压峰值为 1.8 MPa,降幅为 40.6%。从图中还可以看出,点火正时提前,对应的过渡点也会随之改变,点火角为基准过渡点前 10°时所对应的过渡点于上止点前 41°,点火角为基准过渡点前 20°时所对应的过渡点于上止点前 47°,而基准过渡点后的点火角所对应的过渡点没有发生改变,仍为上止点前 36.5°。

与缸压曲线相对应的不同点火角的速度特性(各曲轴转角对应着发动机转速)如图3所示。从图中可以看出,着火越好,缸压峰值越高的点表现出的速度特性也就越好。点火角为基准过渡点前 3°的次循环转速峰值为 545 r/min,比点火角为基准过渡

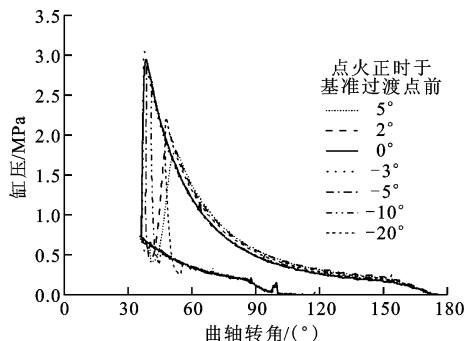


图2 不同点火正时的次循环缸压曲线

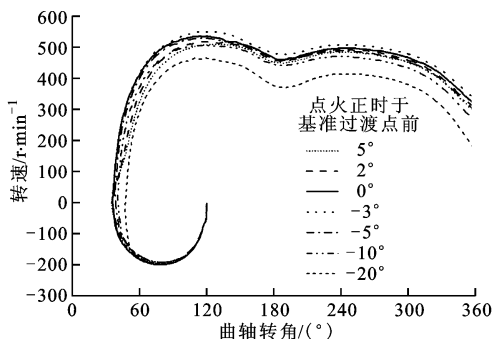


图3 不同点火正时的速度曲线

点前 20°的次循环转速峰值 464 r/min 高出 14.9%。

点火正时对次循环着火特性和速度特性的影响主要归因于燃烧相位的改变,即:相对于基准过渡点,点火越早,燃烧越提前,燃油燃烧在正转前释放的能量越多,压缩负功也就越大,同时也导致了发动机反转起动过程中反转提前(过渡点提前),表现出较差的燃烧和速度特性;点火越晚,虽然过渡点不会发生改变,但活塞下行以后燃烧室内的燃油空气密度降低,火核形成和火焰传播都会受到影响,压力升高率降低,燃烧热效率下降。当然,在基准过渡点时点火也并不能获得最优的次循环性能,基准过渡点前 3°点火比基准过渡点 0°的次循环缸压和转速峰值更高。这是因为虽然起动转速较慢,但仍存在滞燃期对着火延迟的影响,适度提前点火角,可以使燃烧相位和曲轴转动达到更合理的匹配。

2.1.2 喷油量 不同过量空气系数下次循环缸压和速度随曲轴转角的变化如图4和图5所示。从图中可以看出,随着过量空气系数的增加,缸压峰值和转速峰值均出现降低的趋势。过量空气系数为 0.5 时燃烧特性和速度特性最好,次循环最高缸压为 3.48 MPa,次循环转速峰值为 558 r/min。过量空气系数增大,混合气变稀,次循环缸压和转速峰值减小,但在过量空气系数为 0.7 之前,缸压曲线和转速曲线差别不大,相比过量空气系数为 0.5 时的缸压

和转速峰值分别降低了 11.5%和 2.3%。当混合气进一步变稀,缸压曲线和转速曲线出现较为明显的差别,过量空气系数为 1.0 时次循环缸压峰值仅为 1.14 MPa,是最大峰值的 32.8%,次循环转速峰值也降低了 19.5%。过量空气系数对次循环着火特性的影响,主要是对缸内可燃混合气形成量的影响,虽然是在热机状态下起动,但相比于发动机正常运转时 600 K 左右的活塞顶和缸壁温度<sup>[8]</sup>,350 K 的起动温度还会导致出现一定量的燃油湿壁现象,加上起动时起动转速较低,次循环缸内的空气运动速度较慢,表面油膜的蒸发速度也慢,因此按照式(1)计算的平均过量空气系数并不能真实地反映次循环点火时火花塞周围过量空气系数的变化,还需要通过加浓混合气才能保证缸内有足够的可燃混合气。综合燃油消耗量和浓混合气所取得的有益效果,一般过量空气系数应选择转速损失不大且经济性较好的值。

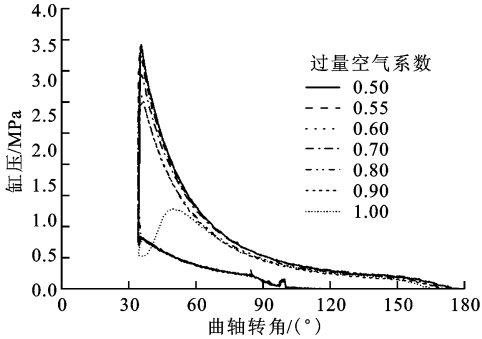


图 4 不同过量空气系数下次循环缸压曲线

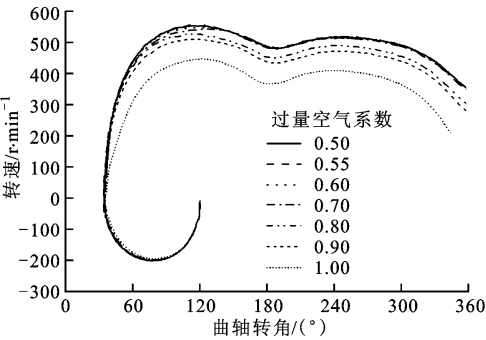


图 5 不同过量空气系数下速度曲线

2.1.3 喷油正时 不同喷油正时对次循环缸压和速度特性的影响如图 6 和图 7 所示。从图中可以看出,随着喷油时刻由次循环上止点前 118°减小到上止点前 50°,缸压峰值存在先升高后降低的趋势,在次循环上止点前 100°喷油时缸压峰值最大,为 3.08 MPa。相比于上止点前 100°喷油,提前 10°和推迟 10°喷油缸压曲线并没有出现显著差别,但提前或推

迟较大的喷油角时,缸压曲线却出现明显回落,次循环上止点前 120°喷油的缸压峰值相比上止点前 100°喷油时下降了 16.9%;次循环上止点前 50°喷油的缸压峰值相比上止点前 100°喷油下降了 39.9%。可见,存在一个最佳喷油区域可使得次循环具有最好的着火特性。图 7 所示的不同喷油正时转速随曲轴转角的变化关系曲线中,次循环上止点前 100°喷油具有最好的速度特性,转速峰值为 545 r/min。

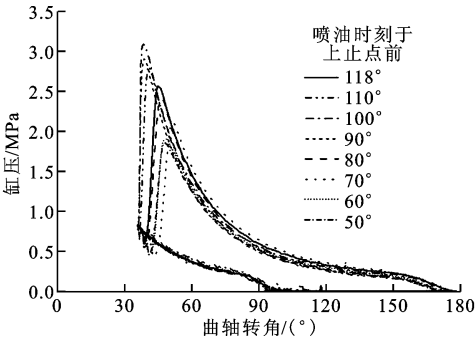


图 6 不同喷油时刻次循环缸压曲线

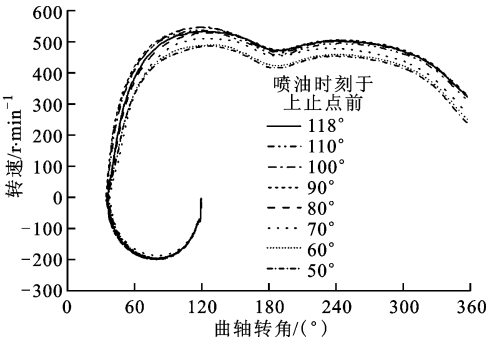


图 7 不同喷油时刻速度曲线

综上,影响喷油时刻主要是可燃混合气的形成,而这一参数的影响因素是多方面的:首先,由于起动状态燃烧室的温度较低,所以喷油越早,蒸发雾化时间越长,形成的可燃混合气也就越多,但喷油时刻较早却不能对反转带来的膨胀缸内的气流运动和高空气密度充分利用,使得油束的贯穿度较大,容易形成湿壁油膜<sup>[9]</sup>;此外,壁面引导式的直喷汽油机主要是通过活塞顶凹坑的引流作用将油束反射致火花塞附近进行雾化来形成可燃混合气的,只有将喷油时刻与凹坑弧线进行合理的匹配,才能得到更好的雾化效果。为了进一步分析喷油正时对次循环着火及速度特性的影响,本文通过三维仿真软件 AVL-FIRE 获得了发动机在转速为 150 r/min、上止点前 120°喷油、喷油后 7°和 13°时缸内燃油浓度(质量分数)场的切片图,如图 8 所示。从图中可以看出,喷油过早,油束并不能有效利用活塞顶凹坑的反射作用,却

被活塞顶突起分割,使得一部分油束堆积在燃烧室的末端,另一部分油束在活塞顶凹坑内被反向引流,而活塞顶凹坑的壁面引导作用完全消失,混合气只能通过表面蒸发雾化形成。因此,喷油较早不一定能获得优质的可燃混合气。

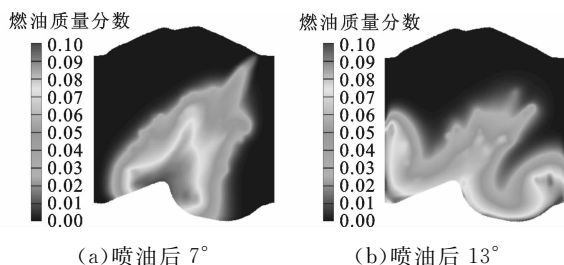


图8 缸内燃油浓度场的切片图

## 2.2 主动参数与被动参数的匹配优化

水温、轨压、初始活塞位置等被动参数并不能控制,其完全由发动机的运行和停机状态决定,是一组适应性参数。在不同的被动参数下,参照前文试验得到的主动参数对次循环着火及速度特性的影响规律进行调节,来达到次循环着火及速度特性的最优化,这对整个反转起动的顺利实现具有重要意义。速度特性具有很好的保持性,次循环转速峰值越大的工况(拟增加),发动机的次循环和第3循环始终保持比其他工况更高的起动转速,因此在后文的被动参数研究中,选择次循环转速峰值作为优化结果的评价指标。

**2.2.1 水温** 水温分别为60、70、80、90℃时过渡点随点火时刻以及次循环转速峰值随点火时刻、过量空气系数、喷油时刻的变化如图9所示。从图9a可以看出,除了点火提前角越大,过渡点所对应的曲轴转角越大以外,相同条件下低水温过渡点所对应的曲轴转角相比高水温更接近上止点,水温60℃的过渡点比90℃时所对应的曲轴转角减小了3.5°,说明正转停止时低水温次循环活塞更接近上止点,这与首循环着火特性有关。虽然温度低不利于混合气的形成,但低水温时缸内空气质量大于高水温,相同过量空气系数下燃烧释放的能量比高水温多,反转时转过的角度也更大。从图9b可以看出,虽然同一点火角下高、低水温并没有表现出统一的规律性,但受不同混合气质量的影响,低水温的次循环转速峰值整体上还是大于高水温,而且无论高、低水温在上止点前3°点火仍然有最好的速度特性。从图9c可以看出,不同水温下的次循环转速峰值随过量空气系数的变化较为显著,对于过量空气系数小于0.7的浓混合气,温度越高,次循环转速峰值越低,而对

于过量空气系数大于0.7的混合气,温度越高,次循环转速峰值越高。过量空气系数为0.5时,60℃水温下的次循环转速峰值为582 r/min,比90℃时的533 r/min高9.2%;过量空气系数为1.0时,60、90℃水温下的次循环转速峰值分别为383 r/min和488 r/min,低水温下速度降低了21.5%。这是因为:在较浓混合气时,无论高、低水温,缸内都有足够的可燃混合气,低水温时新鲜空气相对比较,且对转速峰值起主导作用;随着过量空气系数增大,喷油量减少,在湿壁量基本不变的情况下低水温时喷油能够导致可燃混合气的燃油量减少,而高水温对燃油雾化的作用更为明显,即使喷入的燃油相对较少,也能保证足够的可燃混合气<sup>[10]</sup>。从图9d可以看出,低水温时的次循环转速峰值整体上高于高水温,最佳速度特性区域对应的喷油时刻的范围均在次循环上止点前100°左右,与2.1.3节的结果一致。

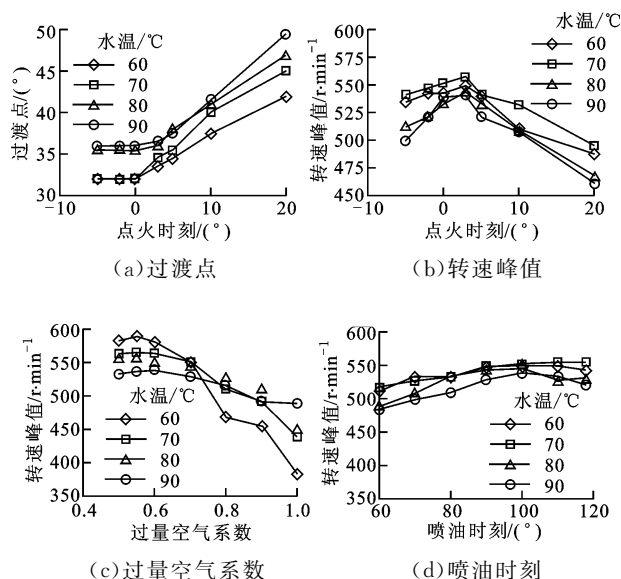


图9 不同水温下的主动参数优化

**2.2.2 轨压** 轨压分别为1.8、1.3、0.8 MPa时过渡点随点火时刻以及次循环转速峰值随点火时刻、过量空气系数、喷油时刻等的变化如图10所示。从图10a可以看出,不同轨压下的过渡点曲线并没有规律性的差别,相近度也比较高,说明高、低轨压并没有对首循环的着火特性产生明显影响。这是因为首循环的喷油和点火时间间隔较长,使得高压喷射的优势没有体现出来,火花点火时高、低轨压喷射在缸内都能形成足够的可燃混合气。从图10b可以看出,即使轨压不同,基准过渡点前3°点火仍然具有最好的次循环速度特性,而且高轨压在不同点火角下的次循环转速峰值要明显高于低轨压,基准过

渡点前  $3^\circ$  点火时轨压为  $1.8\text{ MPa}$  对应的次循环转速峰值为  $545\text{ r/min}$ , 比  $0.8\text{ MPa}$  高  $5.4\%$ 。高轨压对次循环着火特性的促进作用主要来自高喷射压力, 此时燃油动量比较大, 有更多的燃油经活塞顶凹坑反射后被引导至火花塞附近, 从而形成混合气, 有利于火花塞点火; 低轨压时油束动量较小, 活塞顶残余油膜的厚度增加, 燃油反射量相对减少。因此, 高轨压时次循环有更好的着火和速度特性<sup>[11]</sup>。从图 10c 可以看出, 随着过量空气系数由  $0.5$  变为  $1.0$ , 不同轨压时的次循环转速峰值均呈现出先缓后急的下降趋势, 而且各点的高轨压次循环转速峰值高于低轨压。从图 10d 可以看出: 对于过量空气系数为  $0.5$  和  $0.6$  时的较浓混合气, 不同轨压下次循环速度特性差别不大; 随着混合气逐渐变稀, 高、低轨压下次循环速度特性的差别逐渐增大, 过量空气系数为  $1.0$  时,  $1.8$ 、 $0.8\text{ MPa}$  下的次循环转速峰值分别为  $512$ 、 $437\text{ r/min}$ , 高轨压下的次循环转速峰值比低轨压高  $17.2\%$ 。从图 10d 可以看出, 高轨压下次循环转速峰值随喷油时刻的变化优于低轨压, 随着喷油时刻由大变小, 次循环转速峰值特性呈现出先高后低的趋势, 上止点前  $100^\circ$  左右喷油时次循环转速峰值最优。

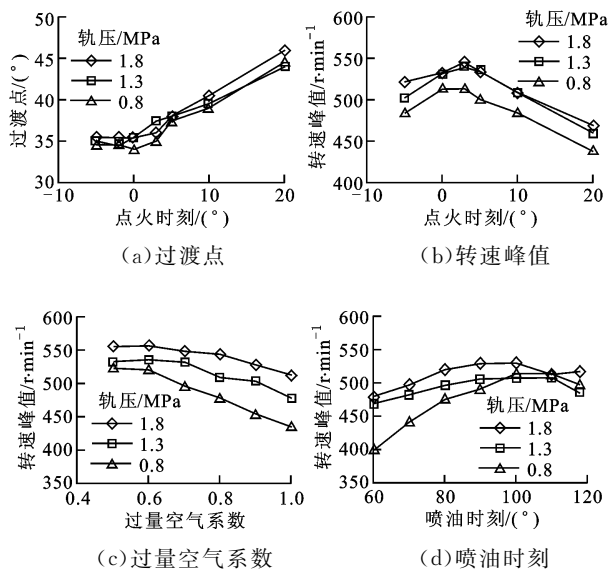


图 10 不同轨压下的主动参数优化

2.2.3 活塞初始位置 膨胀缸活塞初始位置于上止点后  $120^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $100^\circ$  时过渡点随点火时刻以及次循环转速峰值随点火时刻、过量空气系数、喷油时刻等的变化如图 11 所示。从图 11a 可以看出, 不同的活塞初始位置, 首循环缸内空气量不同, 过渡点的差别比较大, 膨胀缸活塞初始位置于上止点后  $120^\circ$ 、

$110^\circ$ 、 $100^\circ$  时基准过渡点分别于上止点前  $36^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $11.5^\circ$ 。从图 11b 可以看出, 虽然膨胀缸活塞初始位置于上止点后  $100^\circ$ 、 $110^\circ$ 、 $120^\circ$  对应的过渡点变化范围分别为  $11.5^\circ\sim 17.5^\circ$ 、 $22.5^\circ\sim 30^\circ$ 、 $34.5^\circ\sim 44.5^\circ$ , 差别较大, 但点火时刻的最优值仍然为基准过渡点前  $3^\circ$ 。由于压缩缸活塞初始位置于上止点前  $80^\circ$ 、过量空气系数为  $1.0$  时不能实现反转, 因此试验只给出过量空气系数为  $0.5\sim 0.9$  的变化范围。从图 11c 可以看出: 同一活塞初始位置时次循环转速峰值的变化规律与 2.2.1 和 2.2.2 节结果一致, 即随过量空气系数增大, 次循环转速峰值逐渐降低; 同一过量空气系数下, 膨胀缸活塞位置距上止点越远(在能够成功反转起动的初始位置范围内), 次循环的转速峰值越高, 这与次循环缸内的新鲜空气量有最直接的关系; 初始位置不同, 油束在缸内的雾化时间不同, 这也会影响次循环的转速峰值。从图 11d 可以看出, 当喷油时刻大于上止点后  $100^\circ$  时, 次循环的转速峰值逐渐降低, 因此对于次循环, 活塞初始起动位置在上止点后  $100^\circ$  之后, 喷油时刻越早越好, 而对于活塞初始起动位置在上止点后  $100^\circ$  之前, 次循环喷油时刻应选择在  $100^\circ$  附近。

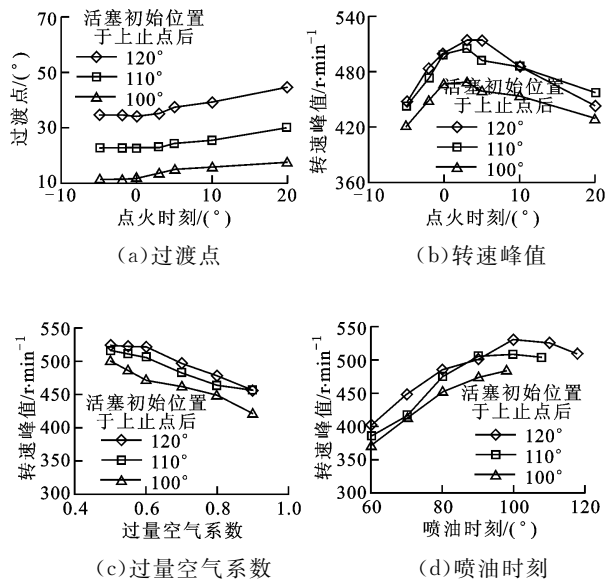


图 11 不同起动位置的主动参数优化

### 3 结 论

(1) 单独改变主动参数中的点火时刻、过量空气系数和喷油量, 基准过渡点前  $3^\circ$  点火时次循环具有最好的着火和速度特性; 随着混合气逐渐变稀, 次循环的着火和速度特性呈现出先缓后急的下降趋势; 合适的喷油时刻可以充分利用活塞顶凹坑的引导作

用,以形成高质量的混合气,从而获得最佳的着火和速度特性。

(2)在不同的水温、轨压及次循环活塞初始位置下,基准过渡点前 $3^{\circ}$ 点火均有最好的起动性能,而基准过渡点随被动参数的变化有所不同,一定范围内,水温越低,膨胀缸活塞初始位置对应的曲轴转角越小,基准过渡点就越接近上止点。虽然不同被动参数下过量空气系数对次循环影响的差别较大,但在一定浓度范围内较浓的混合气能够表现出更好的起动特性。综合考虑燃油经济性和速度特性,次循环的过量空气系数范围一般为 $0.6\sim 0.7$ 。喷油时刻应与活塞初始位置进行合理匹配,膨胀缸活塞初始位置于上止点后 $100^{\circ}$ 之前,次循环喷油时刻应该选择上止点后 $100^{\circ}$ 左右;膨胀缸活塞初始位置于上止点后 $100^{\circ}$ 之后,喷油时刻越早越好。

### 参考文献:

- [1] BISHOP J, NEDUNGADI A, OSTROWSKI G, et al. An engine start/stop system for improved fuel economy, SAE 2007-01-1777 [R]. New York, USA: SAE, 2007.
- [2] MATSUURA M, KOREMATSU K, TANAKA J. Fuel consumption improvement of vehicles by idling stop, SAE 2004-01-1896 [R]. New York, USA: SAE, 2004.
- [3] 韩立伟. 缸内直喷汽油机应用起动-停止技术的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [4] 段伟. 缸内直喷汽油机热机起动首循环着火特性的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [5] 苏岩, 洪伟. GDI 发动机怠速停止技术无起动机起动的试验研究 [J]. 内燃机学报, 2010(6): 527-533.  
SU Yan, HONG Wei. Experimental study of idling stop-start without motor on a gasoline direct injection engine [J]. Transactions of CSICE, 2010(6): 527-533.
- [6] 苏岩, 洪伟. 直喷汽油机热机起动首循环着火特性 [J]. 内燃机学报, 2011(4): 295-299.  
SU Yan, HONG Wei. First cycle ignition characteristics during warm start of a gasoline direct injection engine [J]. Transactions of CSICE, 2011(4): 295-299.
- [7] 韩林沛, 员杰, 杨俊伟, 等. GDI 发动机膨胀缸辅助热机起动方式 [J]. 内燃机学报, 2012(6): 525-530.  
HAN Linpei, YUN Jie, YANG Junwei. GDI engine warm start mode assisted with expansion cylinder [J].

Transactions of CSICE, 2012(6): 525-530.

- [8] 王艳华, 李波, 李云清, 等. 直喷汽油机喷雾撞壁特性试验与模拟 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2011(4): 410-415.  
WANG Yanhua, LI Bo, LI Yunqing. Experiment and simulation of spray impingement for gasoline direct injector [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2011(4): 410-415.
- [9] MALAGUTI S, CANTORE G, FONTANESI S. CFD investigation of wall wetting in a GDI engine under low temperature cranking operations, SAE 2009-01-0704 [R]. New York, USA: SAE, 2009.
- [10] OBOKATA T, ISHIMA T. Effects of ambient temperature and pressure on direct injection fuel spray for S. I. engine, SAE 2005-24-091 [R]. New York, USA: SAE, 2005.
- [11] 李波. GDI 发动机喷雾特性的数值模拟和试验 [J]. 内燃机学报, 2012(1): 9-15.  
LI Bo. Numerical simulation and experiment on spray characteristics of GDI engine [J]. Transactions of CSICE, 2012(1): 9-15.

### [本刊相关文献链接]

- 尚会超, 张力, 陈春望, 等. 汽油机双火花塞轻度均质稀燃特性的测试分析. 2014, 48(5): 43-49. [doi: 10.7652/xjtuxb201405008]
- 汪文瑞, 王坤, 王小荣, 等. 甲醇对甲醇汽油混合燃料发动机碳氢排放贡献率的定量研究. 2014, 48(3): 39-43+114. [doi: 10.7652/xjtuxb201403008]
- 孔彤, 韩志玉, 刘云. 进气运动对汽油机瞬态冷起动混合气形成影响的研究. 2013, 47(11): 35-42. [doi: 10.7652/xjtuxb201311007]
- 孔彤, 韩志玉, 陈征, 等. 喷油参数对汽油机冷起动可燃混合气形成的影响. 2013, 47(5): 31-37. [doi: 10.7652/xjtuxb201305006]
- 刘德新, 刘斌. 二次喷油优化直喷汽油机冷启动排放特性的研究. 2012, 46(1): 13-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201201003]
- 李毅, 高广新, 刘圣华, 等. 环境温度对甲醇/汽油发动机冷起动排放影响的研究. 2011, 45(11): 6-10. [doi: 10.7652/xjtuxb201111002]
- 魏衍举, 刘圣华, 刘方杰, 等. 甲醇汽油发动机醇醛排放特性及其影响因素研究. 2011, 45(1): 1-4. [doi: 10.7652/xjtuxb201101001]
- 牟江峰, 刘德新, 舒歌群. 缸内直喷汽油机复合燃烧技术. 2010, 44(7): 14-18. [doi: 10.7652/xjtuxb201007004]

(编辑 苗凌)