

米勒循环对增压直喷汽油机性能影响的仿真分析

胡志远, 徐 扬, 房 亮, 楼狄明, 谭丕强

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 以一台面向混合动力开发的米勒循环发动机为研究对象,建立了基于 130° 包角进气凸轮轴的一维流体动力学模型。采用该模型仿真分析了进气门开启时刻(IVO)、排气门关闭时刻(EVC)独立调节、联合调节下米勒循环对发动机性能的影响。结果表明:随着米勒循环加深,低负荷下,进气管道废气重吸收质量增加,充量系数降低,泵气损失(PMEP)减小,比油耗(BSFC)降低;中负荷下,充量系数增大,泵气损失显著减小,50%累积放热率的曲轴转角(CA50)减小,比油耗降低;高负荷下,比油耗激增。进排气门联合调节可进一步改善发动机的性能,最佳油耗点的热效率提高了0.43%。

关键词: 增压直喷汽油机;米勒循环;流体动力学;一维模型
中图分类号: TK417⁺.1 **文献标志码:** A

Simulation Analysis of Miller Cycle on Performance of Supercharged Direct Injection Gasoline Engine

HU Zhiyuan, XU Yang, FANG Liang, LOU Diming, TAN Piqiang

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In this paper, the Miller cycle process of hybrid engine is mainly studied. A one-dimensional hydrodynamic model of intake camshaft with 130° wrap angle is established. The effect of Miller cycle realized by independent and joint adjustment of inlet valve opening (IVO) and exhaust valve closing (EVC) on engine performance is simulated and analyzed. It is shown that with the deepening of Miller cycle, under low load conditions, the intake exhaust gas reabsorption mass increases, the volumetric coefficient and pump mean effective pressure (PMEP) decreases, and the brake specific fuel consumption (BSFC) decreases; under medium load condition, the volumetric coefficient

increases, the pump mean effective pressure decreases significantly, the crankshaft angle corresponding to 50% heat release rate (CA50) decreases, and the brake specific fuel consumption decreases; under high load conditions, the brake specific fuel consumption increases sharply. The combined regulation of IVO and EVC can further improve the engine performance and increase the thermal efficiency at the best fuel consumption point by 0.43%.

Key words: supercharged direct injection gasoline engine; Miller cycle; hydrodynamics; one-dimensional model

汽车是能耗大户^[1],为促进乘用车油耗的整体下降,我国于2021年7月开始实行GB 19578—2021《乘用车燃料消耗量限值》^[2],确定了乘用车油耗限值5年内从 $5\text{ L}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 降到 $4\text{ L}\cdot(100\text{ km})^{-1}$ 的要求。为实现油耗限值目标,全可变配气控制^[3]、可变压缩比^[4]、米勒循环^[5]等提高汽油机热效率、降低油耗的技术成为研究热点。

通过控制气门开闭时刻,米勒循环将发动机膨胀比与压缩比解耦,在降低发动机有效压缩比的同时维持膨胀比不变,从而提高发动机热效率,改善燃油经济性^[6],是降低汽油机油耗的主流技术之一^[7]。国内外学者通过试验^[8]和仿真^[9]手段开展了米勒循环对汽油机性能影响的研究。郑斌等^[10]对米勒循环改善增压直喷汽油机热效率的机理进行分析,进气门早关(early inlet valve closing, EIVC)和进气门晚关(late intake valve closing, LIVC)策略下米勒循环都可减小发动机部分负荷工况的泵气损失(pump mean effective pressure, PMEP),提升机械效率,降低缸内

收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0105802)

第一作者: 胡志远(1970—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为汽车能源技术、汽车低排放技术和碳排放控制技术。E-mail: huzhiyuan@tongji.edu.cn

通信作者: 房 亮(1988—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为车用发动机性能和排放优化技术。

E-mail: fangliang@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

传热损失,从而促进油耗的改善。陈虎等^[11]在增压直喷发动机上通过一维仿真、计算流体力学和试验研究发现,米勒循环可大幅减小低负荷区域的泵气损失;魏枫展^[12]发现米勒循环可提升发动机机械效率;吴中浪等^[13]通过优化高压缩比米勒循环汽油机气门策略后发现,米勒循环对 2 000 r·min⁻¹低负荷工况热效率提升更为明显;Perceau 等^[14]通过零维模型仿真发现,米勒循环节油率可达 4%;陈砚才等^[15]对不同米勒深度的 2.0 L 增压缸内直喷汽油机进行试验研究,结果表明适度的米勒循环有利于发动机经济性的改善。另一方面,米勒循环可有效降低高负荷工况的爆震,改善发动机的燃油经济性^[16]。目前,有关米勒循环发动机高负荷的研究多结合废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)^[17]、压缩比^[18]等开展。

为提高混合动力汽车的整车能源效率,混合动力汽车多采用米勒循环发动机^[19-20]。渠肖楠等^[21]的研究结果表明,在混合动力发动机上采用米勒循环、废气再循环、高压缩比等均有利于燃油消耗率降低;井俊超等^[22]的研究结果表明,米勒发动机+P2.5 混合动力系统弥补了传统发动机低速时燃烧不稳定、扭矩小以及急加速时扭矩上升慢的缺陷,在提高整车动力响应的同时改善了整车油耗。目前,关于混合动力汽油机常用的中等转速(3 000 r·min⁻¹)、中高负荷工况以及 130°包角进气凸轮轴对米勒循环发动机性能影响的研究相对较少。

以一台面向混合动力系统开发的缸内直喷增压汽油机为研究对象,基于试验数据标定后的一维流体动力学模型,采用 130°包角进气凸轮轴,在进气门开启时刻(inlet valve opening, IVO)340°曲轴转角下,分析转速为 3 000 r·min⁻¹,平均有效压力(brake mean effective pressure, BMEP)分别为 0.5 MPa、1.0 MPa 和 1.5 MPa 时米勒循环对进排气质量流量、充量系数、有效压缩比、燃烧持续期、泵气损失和油耗的影响,并分析同时调节 IVO 与排气门关闭时刻(exhaust valve closing, EVC)对发动机性能的影响。

1 仿真模型建立及验证

1.1 发动机主要技术参数

研究用发动机为一台压缩比 11.5、排量 1.5 L、额定功率 124 kW、面向混合动力开发的直列四缸增压直喷汽油机,主要技术参数如表 1 所示。

1.2 仿真模型的建立

基于研究用发动机,使用 GT-Power 建立了包

表 1 发动机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of experimental engine

名称	参数
气缸布置	直列四缸
缸径/mm	74
行程/mm	86.6
排量/L	1.5
额定功率/kW	124
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 000
最大扭矩/(N·m)	250
喷射压力/MPa	35
压缩比	11.5:1.0
进气凸轮包角/(°)	130
进气凸轮升程/mm	6
排气凸轮包角/(°)	150
排气凸轮升程/mm	9

含燃烧室、进气、排气以及涡轮增压器等模块的一维流体动力学模型。模型中使用 SITurb 子模型分析米勒循环的影响。与 SIWiebe 模型相比, SITurb 模型可更准确地计算几何压缩比、空燃比、可变气门正时(variable valve timing, VVT)、点火正时等参数对缸内燃烧放热率的影响。建立的一维流体动力学模型如图 1 所示。

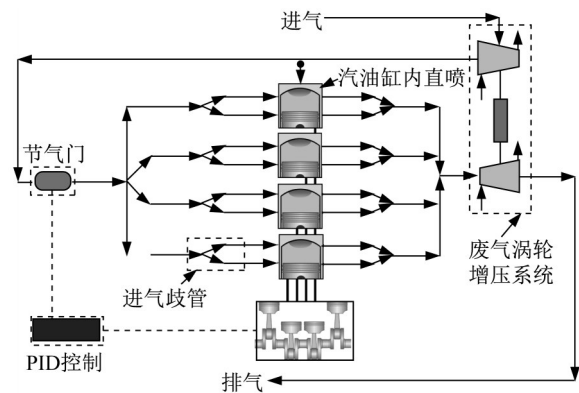


图 1 一维流体动力学模型

Fig.1 One-dimensional hydrodynamic model

1.3 米勒循环的实现

米勒循环发动机的压缩行程开始于进气门关闭时刻(inlet valve closing, IVC),有效压缩比 $r_{c,M}$ 计算式如下所示^[23]:

$$r_{c,M} = \frac{V_{IVC,M}}{V_{TDC}} \quad (1)$$

式中: $V_{IVC,M}$ 为进气门关闭时刻对应的气缸总容积; V_{TDC} 为燃烧室容积。

米勒循环发动机有效膨胀比 $r_{e,M}$ 计算式如下所示^[23]:

$$r_{e,M} = \frac{V_{EVO,M}}{V_{TDC}} \quad (2)$$

式中: $V_{EVO,M}$ 为排气门开启时刻(exhaust valve opening, EVO)对应的气缸总容积。

使用膨胀压缩比 $r_{ec,M}$ 描述米勒循环强度。 $r_{ec,M}$ 的计算式如下所示^[23]:

$$r_{ec,M} = \frac{r_{e,M}}{r_{c,M}} \quad (3)$$

仿真工况的转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 平均有效压力分别为 0.5 MPa 、 1.0 MPa 和 1.5 MPa , 其中 0.5

MPa 为非增压工况, 1.0 MPa 和 1.5 MPa 为增压工况。为了便于对仿真结果进行描述和解释, 采用低负荷、中负荷、高负荷分别描述平均有效压力为 0.5 MPa 、 1.0 MPa 和 1.5 MPa 的3个工况, 并采用IVO的变化代替IVC的变化进行描述, 便于直观解释气门位置变化带来的影响。

仿真过程中, 考虑到发动机采用固定 130° 包角进气凸轮轴和 150° 包角排气凸轮轴, 3个工况的IVO、EVC调节方案如表2所示。IVO和EVC的调节步长为 5°CA 。

表2 不同工况点的IVO和EVC调节方案

Tab.2 Variation of IVO and EVC at different operating points

工况点	IVO/ $(^\circ\text{CA})$	EVC/ $(^\circ\text{CA})$
$3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}, 0.5\text{ MPa}$	340~365	345~370
$3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}, 1.0\text{ MPa}$	340~365	345~370
$3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}, 1.5\text{ MPa}$	340~365	345~370

1.4 模型标定及验证

基于发动机台架试验的缸压曲线和油耗数据, 标定建立的一维模型。图2为缸内压力仿真结果和

试验结果的对比。由图2可见, 3个工况下缸内压力仿真结果与试验结果间的误差小于5%, 建立的一维流体动力学模型误差满足要求。

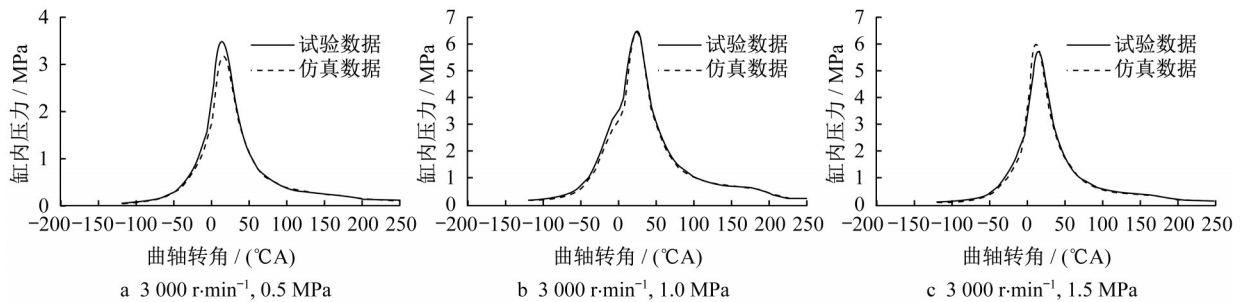


图2 缸内压力仿真结果与试验结果对比

Fig.2 Comparison of cylinder pressure between test data and simulation results

一般认为, 发动机的最低油耗出现在轻微爆震边缘或者 CA_{50} 为 8°CA 左右^[24]。仿真计算时, 点火提前角优化原则是在确定的VVT下逐渐增大点火提前角, 使发动机具有最低的油耗。低负荷工况下, 选取使 CA_{50} 达到约 8°CA 时的点火提前角。中高负荷工况下, 选取爆震边缘的点火提前角, 爆震边缘通过爆震模块中的爆震指数 k_{KITT} 判断(当 $k_{\text{KITT}} > 1$ 时即认为发生爆震)。参考李友峰等^[24]的方法, 节气门和废气旁通阀(electrical waste gate, EWG)的调节原则是: 低负荷工况下, 废气旁通阀全开, 仅通过调节节气门开度达到目标平均有效压力; 高负荷工况下, 先调节节气门开度, 当节气门达到全开状态后, 再通过减小废气旁通阀开度提高增压压力, 达到目标平均有效压力。

2 仿真结果与分析

2.1 米勒循环对进排气质量流量及充量系数的影响

进排气质量流量是影响充量系数的关键因素之一^[25], 调节IVO和EVC会影响进排气质量流量, 进一步影响充气效率。非增压低负荷工况和增压中负荷工况下, 单独调节IVO和EVC时单气道质量流量变化如图3所示。由图3a看出, 随着IVO的提前, 进气道质量流量峰值增大, 峰值波动减弱。同时, 与梁源飞等^[26]得到的结果类似, IVO提前使部分废气被推入进气道, 产生废气重吸收效应, 影响实际进气质量和充量系数。值得注意的是, 随着IVO的提前, 单个循环内被推入进气道的废气量逐渐增加, 但增长趋势逐渐平缓。这是因为, 废气重吸收效应导致充量系数降低, 为了达到目标平均有效压力, 节气门开

度增加,进气歧管压力增大,气门重叠阶段的进、排气压差减小^[27]。受增压工况下进气压力较大的影响,增压工况基本上不出现废气重吸收现象。

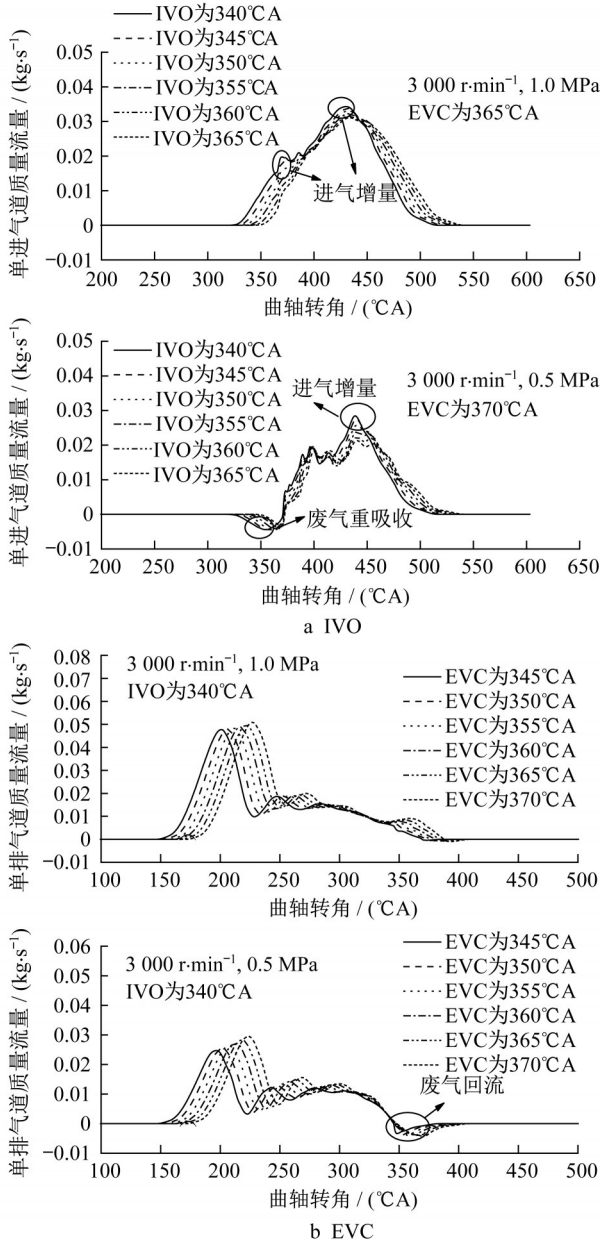


图3 米勒循环对单气道质量流量的影响
Fig.3 Effect of Miller cycle on single airway mass flow

由图3b可以看出:随着EVC的推迟,气门重叠角变大,排气道质量流量峰值增加;由于低负荷工况下缸内压力较低,并且活塞下行过程中缸内压力下降迅速,导致低负荷工况出现废气回流现象,而且回流量随着EVC推迟而增大;中负荷工况下,受进气增压的影响,大气门重叠角可利用进、排气压差排出更多废气,导致排气行程末端的排气质量流量小幅增加。

转速为 $3\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$,平均有效压力分别为0.5

MPa、1.0 MPa、1.5 MPa时,IVO、EVC独立调节对充量系数的影响如图4所示。由图4a看出,随着平均有效压力由0.5 MPa增加到1.5 MPa,进气方式从自然吸气切换为增压,充量系数增大。低负荷工况下,IVO的提前导致充量系数降低。原因如下:第一,IVO提前使气门重叠角增大,废气重吸收质量增加;第二,排气门附近的高温废气对新鲜工质的加热和废气重吸收效应导致进气密度下降;第三,IVO提前使IVC提前,进气时无法利用进气行程后期的气流惯性。以上3个因素导致充量系数降低^[28]。对于中负荷工况,充量系数随着IVO的提前先减小后增加。这是因为,负荷增加后,缸内热负荷增大,排气门附近高温废气对进气的加热导致充量系数下降;随着IVO的进一步提前,大气门重叠角使压差排气作用增强,充量系数增大。对于高负荷工况,增压使大气门重叠角的压差排气作用成为主要因素,充量系数随IVO的提前逐渐增大。

从图4b看出,随着EVC的推迟,气门重叠角增加,排气门附近的高温影响进气密度。低负荷工况下,为了达到目标转矩需增大节气门开度,进气阻力减小^[29],充量系数随EVC的增大而增加。中、高负荷工况下,进气压力较高,气门重叠角增大有利于压差排气,充量系数增大。在EVC推迟到上止点(top dead center, TDC)之后效果更明显。

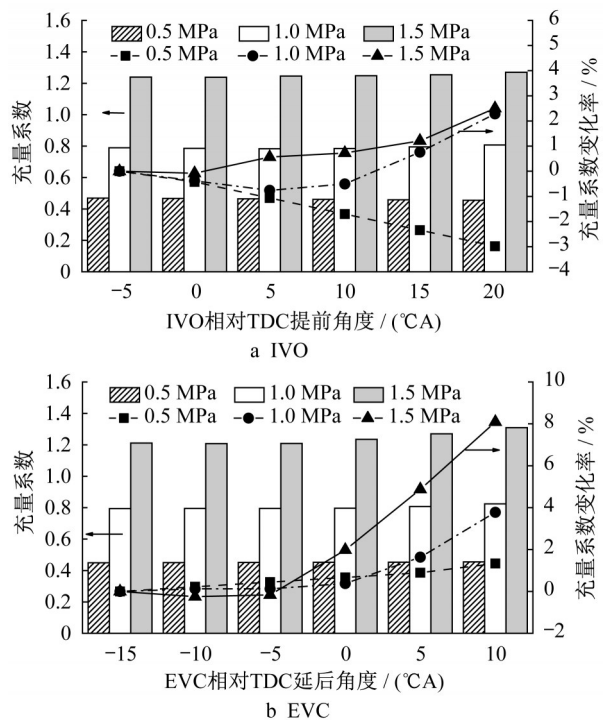


图4 米勒循环对充量系数的影响
Fig.4 Effect of Miller cycle on volumetric coefficient

2.2 米勒循环对燃烧的影响

2.2.1 有效压缩比和点火正时

图5为IVO、EVC独立调节下米勒循环在转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,平均有效压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa和1.5 MPa时有效压缩比和点火正时随IVO和EVC的变化规律。

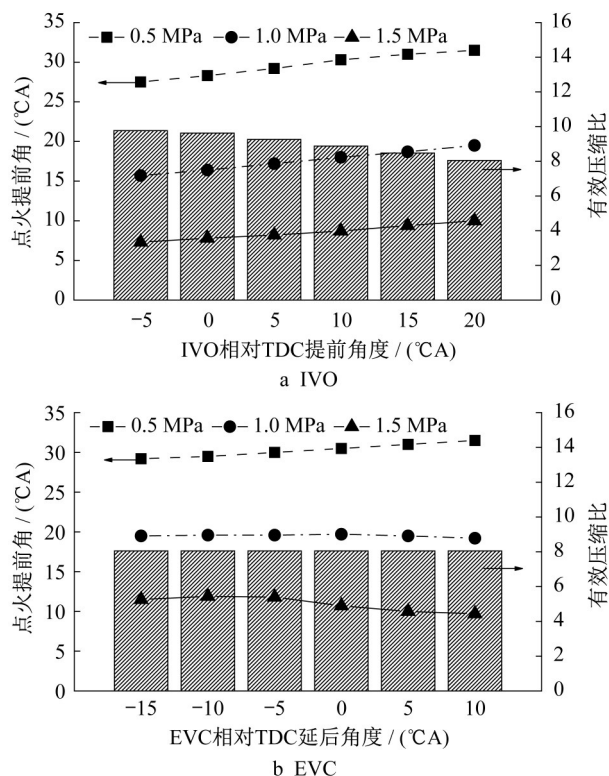


图5 米勒循环对有效压缩比及点火正时的影响

Fig.5 Effect of Miller cycle on effective compression ratio and ignition timing

从图5可以看出:EVC不变,有效压缩比随IVO的提前逐渐减小,米勒循环增强;IVO不变,EVC推迟不改变有效压缩比。由图5a可见,最佳点火正时受IVO和负荷的影响显著。随着IVO提前,有效压缩比减小,可有效抑制爆震倾向^[22],最佳点火正时提前;随着负荷的增大,缸内温度升高,火焰传播速度加快,最佳点火正时推迟。从图5b可以看出,IVO不变,推迟EVC的过程中,有效压缩比保持不变,由于仿真过程采用 150° 包角排气凸轮轴,在可调节范围内膨胀比不变,米勒循环强度不变;与IVO比较,EVC对最佳点火正时的影响相对较小。随着EVC的推迟,低负荷时的最佳点火正时提前,中、高负荷时的最佳点火正时推迟。这是因为,随着EVC的推迟,低负荷工况下缸内温度降低,废气回流效应导致缸内混合气浓度降低,火焰传播速度较慢,最佳点火

正时提前^[30]。中、高负荷工况下,缸内温度较高,缸内残余废气量随着EVC的推迟而减小,火焰传播速度加快,点火正时推迟。

2.2.2 CA50

图6为IVO、EVC独立调节下米勒循环在转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,平均有效压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa和1.5 MPa时CA50随IVO和EVC的变化规律。由图6a看出,低负荷工况下受点火正时优化原则的影响CA50被控制在 8°CA 左右,中、高负荷工况下CA50随着米勒循环的增强而减小。这是因为,中、高负荷下,随着IVO的提前,充量系数增加,残余废气量减少,混合气浓度增大,火焰传播速度加快,但有效压缩比的减小会削弱压缩上止时的湍流^[31],减缓火焰的传播速度,两者共同作用下导致CA50减小。由图6b看出,EVC推迟对CA50的影响不大。

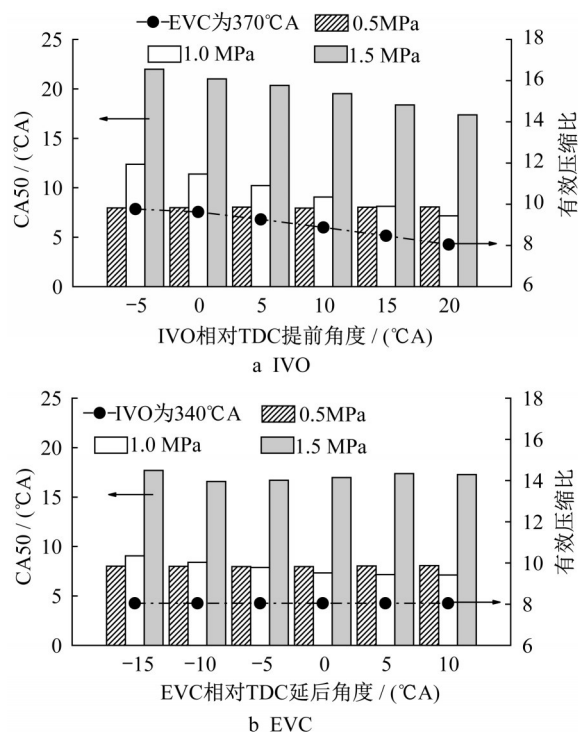


图6 米勒循环对CA50的影响

Fig.6 Effect of Miller cycle on CA50

2.3 米勒循环对缸内压力的影响

图7为IVO、EVC独立调节下米勒循环在转速为 $3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,平均有效压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa和1.5 MPa时缸内压力随IVO和EVC的变化规律。由图7a看出,低负荷工况下,随着IVO的提前,缸内最大爆发压力略有降低,最大爆发压力对应的曲轴转角变化不大。中负荷工况下,随着

IVO的提前,缸内最大爆发压力从5.31 MPa增大到6.14 MPa,缸内最大爆发压力对应的曲轴转角从18.2°CA提前至13.5°CA。这是因为,低负荷工况下,有效压缩比随着IVO的提前而减小,缸内湍流减弱,废气重吸收效应增强,火焰传播速率减慢,缸内最大爆发压力降低^[16]。中负荷工况下,受涡轮增压效应的影响,随着IVO的提前,进气滚流增强,残余废气系数降低,滞燃期及燃烧持续期缩短^[32]。由图7b看出,随着EVC的不断推迟,低、中负荷工况下缸内最大爆发压力增大,中负荷的缸内最大爆发压力对应的曲轴转角提前。

2.4 米勒循环对泵气损失的影响

图8为IVO、EVC独立调节下米勒循环在转速为3 000 r·min⁻¹,平均有效压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa和1.5 MPa时泵气损失随IVO和EVC的变化规律。

从图8a看出,低负荷工况下,随着IVO的提前,充量系数减小,为达到目标平均有效压力,节气门开度增大,进气过程的泵气损失减小。随着负荷的增大,相同IVO的泵气损失呈现先减小后增加的变化趋势。这是因为,随着负荷的增大,中负荷下,节气门由低负荷的部分开启过渡到全开,泵气损失整体减小;高负荷时,增压压力升高,流动阻力造成的进气损失增大,泵气损失增加。由图8b看出:随着EVC的推迟,泵气损失显著增加;相同EVC时,泵气损失的增加幅度随着负荷的增加而变大。这是因为,EVC的推迟导致EVO减小,使排气过程处于强制排气状态的持续期增大,气门处的流动阻力增加,泵气损失增大。因此,过度减小排气凸轮包角、增大膨胀压缩比以加深米勒循环的方案将增大发动机的泵气损失。

2.5 米勒循环对油耗和热效率的影响

发动机油耗的影响因素包括燃烧效率、燃烧放热等容度、冷却损失、泵气损失、摩擦损失等^[33],米勒循环通过影响充量系数、燃烧过程、泵气损失等改善发动机的油耗。图9为IVO、EVC独立调节下米勒循环在转速为3 000 r·min⁻¹,平均有效压力分别为0.5 MPa、1.0 MPa和1.5 MPa时比油耗(brake specific fuel consumption, BSFC)和热效率随IVO和EVC的变化规律。

由图9a看出,随着IVO的提前,低负荷工况下,缸内燃烧情况变化不明显,泵气损失减小成为发动机热效率提高的主要因素,比油耗降低;中负荷工况下,受泵气损失和CA50的综合影响,比油耗呈先小幅度降

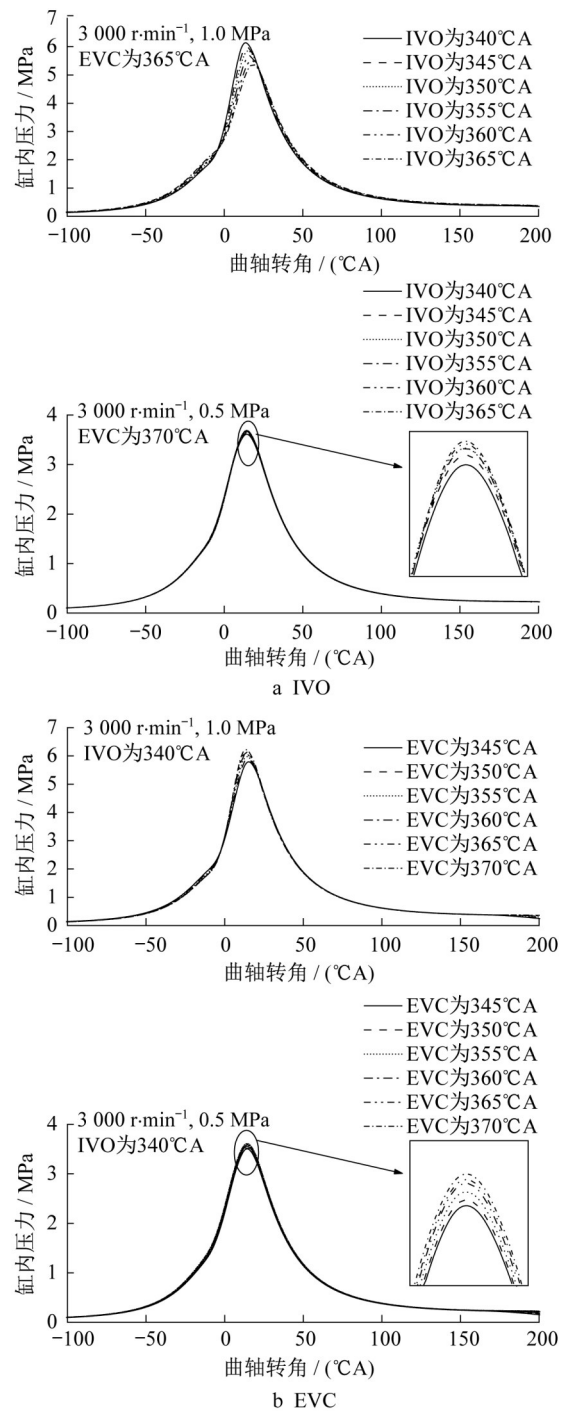


图7 米勒循环对缸内压力的影响

Fig.7 Effect of Miller cycle on cylinder pressure

低再显著增大的变化趋势,热效率在IVO为355°CA时达到最高(37.53%);高负荷工况下,CA50减小使得燃烧等容度降低^[34],缸内最大爆发压力提高导致摩擦损失、传热损失增大,泵气损失增大^[35],BSFC增大,热效率降低。从图9b看出,随着EVC的推迟,泵气损失增大导致比油耗增加,热效率降低。

2.6 IVO和EVC联合调节对发动机性能的影响

IVO变化对有效压缩比的影响显著^[36],提前

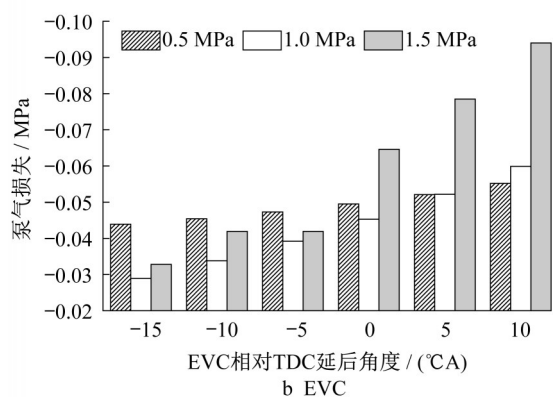
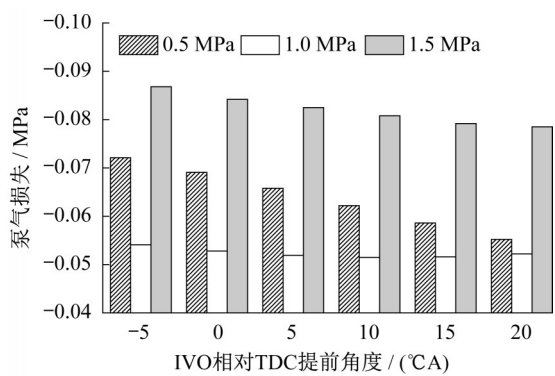


图8 米勒循环对泵气损失的影响

Fig.8 Effect of Miller cycle on PME

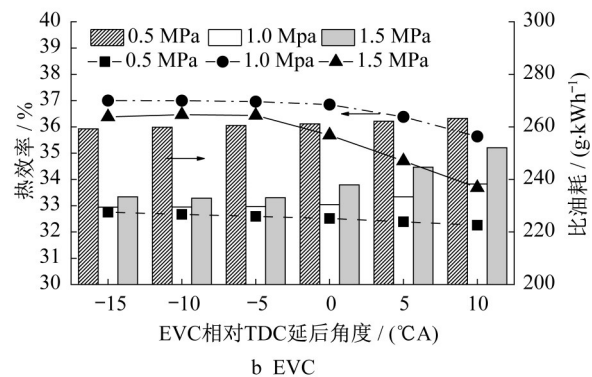
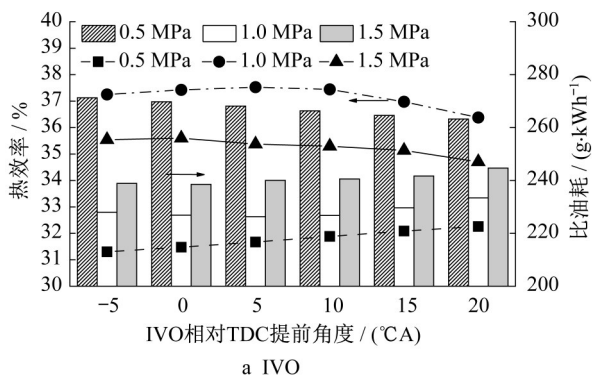


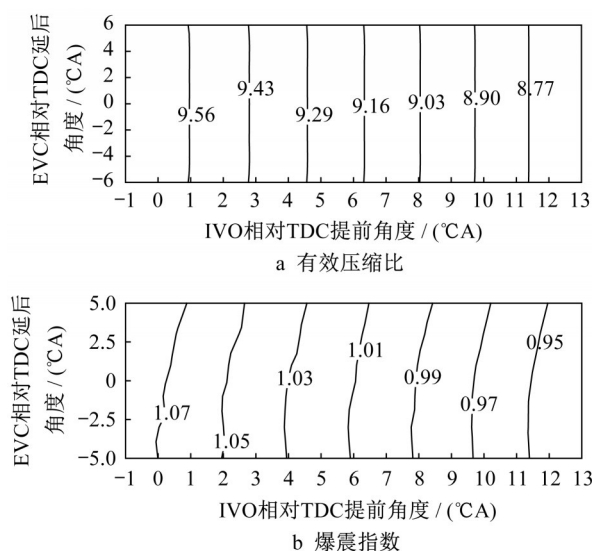
图9 米勒循环对比油耗和热效率的影响

Fig.9 Effect of Miller cycle on BSFC and thermal efficiency

IVO的同时延后EVC可有效降低有效压缩比并抑制爆震。选取前文通过IVO、EVC独立调节得到的

最佳油耗点(转速为 $3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,平均有效压力为 1.0 MPa ,IVO为 355°CA ,EVC为 365°CA),将点火正时固定在TDC前 17.2°CA ,分析IVO和EVC联合调节对发动机的有效压缩比、爆震指数、充量系数、泵气损失、CA50和缸内最大爆发压力 P_{max} 的影响。

从图10看出,IVO变化对有效压缩比的影响较为显著,提前IVO的同时延后EVC可有效降低米勒循环的压缩比并抑制爆震。

图10 IVO、EVC联合调节对有效压缩比和爆震指数的影响
Fig.10 Effect of combined regulation of IVO and EVC on effective compression ratio and knock index

从图11a可以看出,IVO和EVC联合调节时,随着米勒循环的加强,气门重叠角增大,再加上增压的影响,充量系数增大。从图11b看出,与IVO相比,EVC对泵气损失的影响较大,同时提前IVO和EVC可有效减小泵气损失。从图11c、d看出,当点火正时固定时,IVO或EVC对燃烧过程均有较大影响,EVC对 P_{max} 的影响较大。提前IVO的同时延后EVC,使缸内混合气浓度增加,残余废气系数降低, P_{max} 增大。

IVO、EVC联合调节时,发动机的比油耗变化规律如图12所示。适当提前IVO结合小EVC可显著降低比油耗,形成图12底部中间区的低比油耗区。从图12可以发现:IVO和EVC联合调节后,发动机的热效率升高到 37.96% ,比IVO单独调节得到的最佳热效率增加 0.43% ;推迟IVO并大幅推迟EVC导致泵气损失显著增大,图12中左上角的泵气损失比下部高出 22.7% ;提前IVO并推迟EVC导致 P_{max}

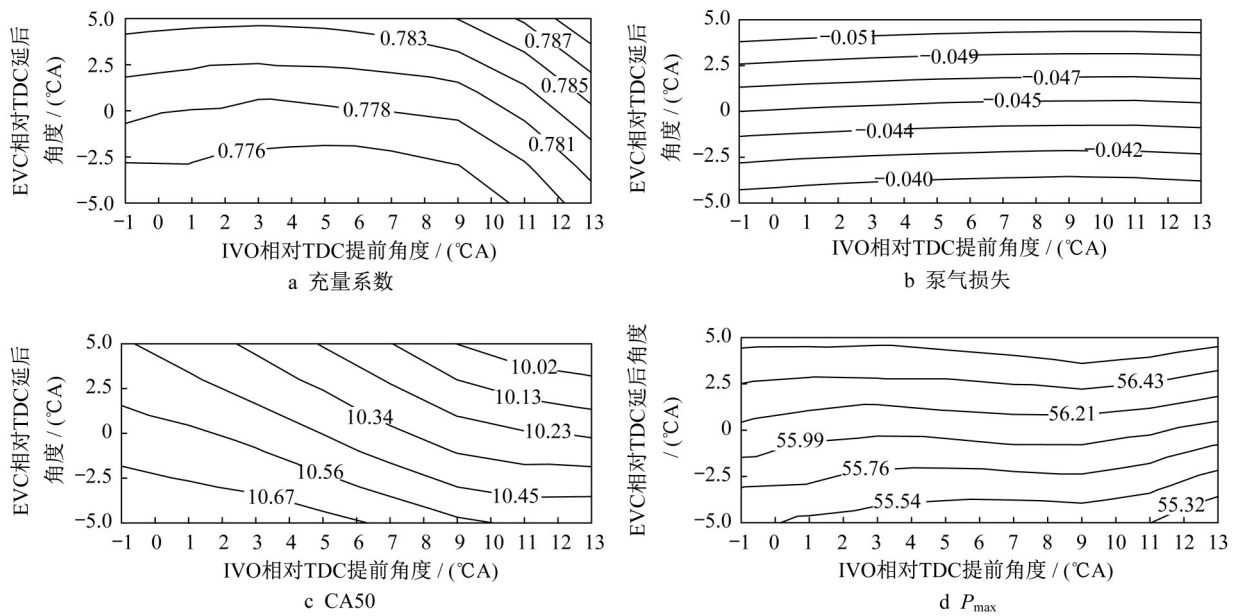


图 11 IVO、EVC 联合调节对充量系数、泵气损失、CA50 和 P_{max} 的影响

Fig.11 Effect of combined regulation of IVO and EVC on volumetric coefficient, P_{mep}, CA50 and P_{max}

显著增大,形成图 12 右上角的高 P_{max} 区域;推迟 IVO 导致中高度爆震倾向。适度提前 IVO 并推迟 EVC 下在图 12 中部轻微爆震区的下方产生最佳油耗区域。

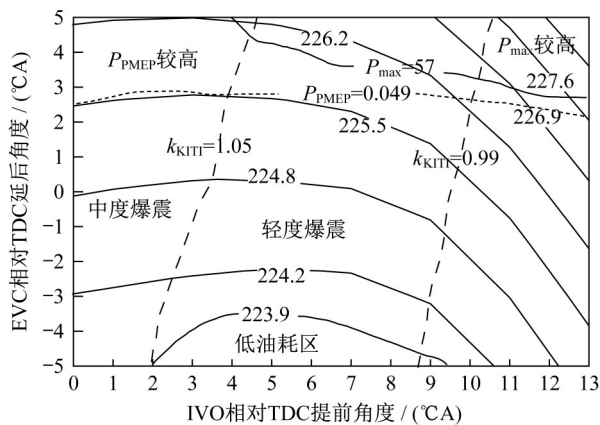


图 12 IVO、EVC 联合调节对比油耗的影响

Fig.12 Effect of combined regulation of IVO and EVC on BSFC

3 结论

(1) IVO、EVC 独立调节和联合调节能够实现米勒循环并改变米勒循环强度,与 EVC 相比 IVO 对米勒循环的影响较大。

(2) 低负荷工况下,IVO 的提前导致有效压缩比减小,进气道质量流量峰值增大,充量系数增加,泵气损失减小,最佳点火正时提前,缸内最大爆发压

力略有降低,比油耗降低,热效率升高;EVC 的推迟会强化废气回流现象,充量系数减小,泵气损失增大,最佳点火正时、CA50 变化不明显,缸内最大爆发压力增大,比油耗增加,热效率降低。

(3) 中、高负荷工况下,IVO 的提前可使有效压缩比减小、废气重吸收效应减弱或消失,进气质量流量增加,充量系数增大,最佳点火正时推迟,CA50 减小,缸内最大爆发压力增大,对应的曲轴转角提前,中负荷工况下泵气损失减少、比油耗先降低后增大,高负荷工况下泵气损失增大,比油耗增大;EVC 的推迟对最佳点火正时和 CA50 的影响相对较小,泵气损失增加,比油耗升高。

(4) IVO、EVC 联合调节可进一步改善发动机的性能,适当提前 IVO 并提前 EVC 可显著降低发动机油耗,使发动机的热效率进一步增加 0.43%。

作者贡献声明:

- 胡志远: 研究计划制定, 论文撰写。
- 徐 扬: 研究实施, 初稿撰写。
- 房 亮: 论文优化。
- 楼狄明: 论文优化。
- 谭丕强: 论文优化。

参考文献:

[1] 李鹏. 汽车驾驶节能技术的应用及其措施分析[J]. 内燃机与配件, 2020(16): 166.
LI Peng. Application of energy saving technology in automobile

- driving and analysis of its measures [J]. *Internal Combustion Engines and Accessories*, 2020(16): 166.
- [2] 乘用车燃料消耗量限值: GB 19578—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
Fuel consumption limits for passenger cars: GB 19578—2021 [S]. Beijing: China Standards Press, 2021.
- [3] 解方喜, 钟兵, 杨国志, 等. 凸轮驱动式液压可变气门机构设计及运动特性[J]. *汽车工程*, 2020, 42(3):32.
XIE Fangxi, ZHONG Bing, YANG Guozhi, *et al.* Design and motion characteristics of cam driven hydraulic variable valve mechanism [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(3): 32.
- [4] 林承伯, 刘敬平, 唐琦军, 等. 一种可变压缩比机构对汽油机性能的影响[J]. *内燃机工程*, 2015, 36(6):84.
LIN Chengbo, LIU Jingping, TANG Qijun, *et al.* Effect of a variable compression ratio mechanism on gasoline engine performance [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2015, 36(6): 84.
- [5] 祖炳锋, 周仁杰, 徐玉梁, 等. 米勒循环在小型增压汽油机典型工况的应用研究[J]. *内燃机工程*, 2017, 38(6):125.
ZU Bingfeng, ZHOU Renjie, XU Yuliang, *et al.* Application of Miller cycle in typical working conditions of small turbocharged gasoline engine [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2017, 38(6): 125.
- [6] 周仁杰. 米勒循环在传统汽油机上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
ZHOU Renjie. Application research of Miller cycle on traditional gasoline engine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [7] 刘子鸣. 米勒循环发动机开发及关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LIU Ziming. Development and key technology research of Miller cycle engine [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [8] 范巍, 吴健, 李云龙, 等. 米勒循环汽油机部分负荷燃油经济性研究[J]. *车用发动机*, 2014(2):46.
FAN Wei, WU Jian, LI Yunlong, *et al.* Study on partial load fuel economy of Miller cycle gasoline engine [J]. *Automotive Engine*, 2014(2): 46.
- [9] 郝嘉田, 孙柏刚. 利用废气再循环与米勒循环提高氢内燃机压缩比的研究[J]. *内燃机工程*, 2021, 42(5):52.
HAO Jiatian, SUN Baigang. Study on improving the compression ratio of hydrogen internal combustion engine by using exhaust gas recirculation and Miller cycle [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2021, 42(5): 52.
- [10] 郑斌, 李铁, 尹涛. 米勒循环改善增压直喷汽油机热效率的机理分析: 部分负荷工况分析[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(6):122.
ZHENG Bin, LI Tie, YIN Tao. Mechanism analysis of Miller cycle improving thermal efficiency of turbocharged direct injection gasoline engine: analysis of partial load condition [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(6): 122.
- [11] 陈虎, 贾宁, 刘小平, 等. 深度米勒循环在增压直喷汽油机上的仿真和试验[J]. *汽车安全与节能学报*, 2019, 10(3):366.
CHEN Hu, JIA Ning, LIU Xiaoping, *et al.* Simulation and test of deep Miller cycle on turbocharged direct injection gasoline engine [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy Saving*, 2019, 10(3): 366.
- [12] 魏枫展. 基于全可变液气门的汽油机泵气损失及米勒循环性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
WEI Fengzhan. Study on pump loss and Miller cycle performance of gasoline engine based on fully variable hydraulic valve [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [13] 吴中浪, 陈韬, 谢辉, 等. 高压压缩比米勒循环汽油机气门策略优化[J]. *燃烧科学与技术*, 2019, 25(4):331.
WU Zhonglang, CHEN Tao, XIE Hui, *et al.* High compression ratio Miller cycle gasoline engine valve strategy optimization [J]. *Combustion Science and Technology*, 2019, 25(4): 331.
- [14] PERCEAU M, GUIBERT P, GUILAIN S, *et al.* Why can Miller cycle improve the overall efficiency of gasoline engines? [C]//THIESEL 2020 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Direct Injection Engines. Valencia: [s. n.], 2020:1-19.
- [15] 陈砚才, 吴威龙, 陈泓, 等. 米勒循环深度对缸内直喷汽油发动机性能影响的研究[J]. *汽车实用技术*, 2018(24):51.
CHEN Yancai, WU Weilong, CHEN Hong, *et al.* Study on the effects of different Miller cycles on the performance for a GDI engine [J]. *Automobile Applied Technology*, 2018(24):51.
- [16] 郑斌, 李铁, 尹涛. 高负荷下应用米勒循环提升高压比汽油机热效率机理研究[J]. *车用发动机*, 2015(5):20.
ZHENG Bin, LI Tie, YIN Tao. Research on the mechanism of applying Miller cycle to improve the thermal efficiency of high-pressure gasoline engine under high load [J]. *Automotive Engine*, 2015(5): 20.
- [17] 张振东, 屈卓燊, 王博, 等. 米勒循环和废气再循环对涡轮增压汽油机燃烧性能的影响和优化[J]. *内燃机工程*, 2020, 41(5):48.
ZHANG Zhendong, QU Zhuoshen, WANG Bo, *et al.* The influence and optimization of Miller cycle and exhaust gas recirculation on the combustion performance of turbocharged gasoline [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2020, 41(5): 48.
- [18] 黄昭明, 沈凯, 安宗权, 等. 不同压缩比米勒循环和低压废气再循环对增压直喷汽油机性能影响[J]. *内燃机工程*, 2019, 40(4): 14.
HUANG Zhaoming, SHEN Kai, AN Zongquan, *et al.* The influence of Miller cycle with different compression ratios and low-pressure exhaust gas recirculation on the performance of turbocharged direct injection gasoline engines [J]. *Internal Combustion Engine Engineering*, 2019, 40(4): 14.
- [19] 王元丰. 串联式混合动力APU用米勒循环发动机性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
WANG Yuanfeng. Research on Miller cycle engine performance for series hybrid APU [D]. Tianjin: Tianjin

- University, 2016.
- [20] 石垒,李连豹,韦虹,等. 增程式混合动力汽车专用高热效率发动机试验研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2018, 47(5):72.
SHI Lei, LI Lianbao, WEI Hong, *et al.* Experimental study on high thermal efficiency engines for extended-range hybrid electric vehicles [J]. Small Internal Combustion Engines and Motorcycles, 2018, 47(5):72.
- [21] 渠肖楠,魏胜利,宋志磊. 基于AVL-BOOST的米勒循环发动机性能分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(6):1607.
QU Xiaonan, WEI Shengli, SONG Zhilei. Performance analysis of Miller cycle engine based on AVL-BOOST [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(6): 1607.
- [22] 井俊超,张勇,王永建,等. 米勒循环发动机在P2.5构型混合动力系统上的应用及研究[J]. 内燃机, 2020(6):21.
JING Junchao, ZHANG Yong, WANG Yongjian, *et al.* Application and research of Miller cycle engine in P2.5 hybrid system[J]. Internal Combustion Engines, 2020(6):21.
- [23] NEHER D, SCHOOL F, DEINERT M, *et al.* Miller/Atkinson valve timing as full load concept for a naturally aspirated cogeneration engine[R]. [S.l.]:SAE, 2015.
- [24] 李友峰,仲怀清,郑永强,等. 米勒循环结合可变涡轮增压优化柴油机性能的仿真与试验[J]. 船舶工程, 2020, 42(10):1.
LI Youfeng, ZHONG Huaiqing, ZHENG Yongqiang, *et al.* Simulation and test of Miller cycle combined with variable turbocharging to optimize diesel engine performance [J]. Ship Engineering, 2020, 42(10): 1.
- [25] LI Q, LIU J, FU J, *et al.* Comparative study on the pumping losses between continuous variable valve lift (CVVL) engine and variable valve timing (VVT) engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 710.
- [26] 梁源飞,周正群,杨如枝. 米勒循环增压发动机进气道开发[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2020, 49(1):14.
LIANG Yuanfei, ZHOU Zhengqun, YANG Ruzhi. Development of Miller cycle supercharged engine intake port [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2020, 49(1): 14.
- [27] PAN X, ZHAO Y, LOU D, *et al.* Study of the Miller cycle on a turbocharged DI gasoline engine regarding fuel economy improvement at part load[J]. Energies, 2020, 13(6):1500.
- [28] 树明亮,张振东,沈凯,等. 通过LIVC实现的高膨胀比循环对发动机性能的影响[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(6):79.
SHU Mingliang, ZHANG Zhendong, SHEN Kai, *et al.* The effect of the cycle of high inflation pressure ratio realized by LIVC on engine performance [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2021, 59(6): 79.
- [29] BRAUN T, BURKHARDT T, DINGL J, *et al.* On-board adaptation of engine-specific valve train variability in Miller and Atkinson applications[J]. MTZ Worldwide, 2020, 81(6): 40.
- [30] 吴威龙,林思聪,陈砚才,等. 米勒增压直喷汽油机应用LPEGR的试验研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50(2):1.
WU Weilong, LIN Sicong, CHEN Yancai, *et al.* Experimental research on Miller turbocharged direct injection gasoline engine using LPEGR [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2021, 50(2): 1.
- [31] 李云虹,杜家坤,秦博,等. 压缩比及EGR对直喷米勒循环汽油机性能影响的试验研究[J]. 车用发动机, 2020(6):19.
LI Yunhong, DU Jiakun, QIN Bo, *et al.* Experimental study on the influence of compression ratio and EGR on the performance of direct injection Miller cycle gasoline engine [J]. Automotive Engine, 2020(6): 19.
- [32] 梁源飞,周正群,杨如枝. 增压汽油机米勒循环应用研究[J]. 汽车实用技术, 2020(13):31.
LIANG Yuanfei, ZHOU Zhengqun, YANG Ruzhi. Application study on Miller cycle turbocharged gasoline engine [J]. Automobile Applied Technology, 2020(13): 31.
- [33] 开进彬,张来涛,石磊,等. 增压直喷汽油机燃烧放热规律研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44(3):6.
KAI Jinbin, ZHANG Laitao, SHI Lei, *et al.* Research on the combustion heat release law of turbocharged direct injection gasoline engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technology, 2015, 44(3): 6.
- [34] 王磊,张双,杜家坤,等. 进一步提升增压直喷发动机米勒效应的试验研究[J]. 现代车用动力, 2020(4):30.
WANG Lei, ZHANG Shuang, DU Jiakun, *et al.* Experimental study on further improving the Miller effect of turbocharged direct injection engines [J]. Modern Vehicle Power, 2020(4): 30.
- [35] LI T, GAO Y, WANG J, *et al.* The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs. LIVC[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79: 59.
- [36] 高永兴,张玉银,许敏,等. 基于LIVC和双VVT技术的增压直喷汽油机抑制爆震试验研究[J]. 车用发动机, 2012(1):63.
GAO Yongxing, ZHANG Yuyin, XU Min, *et al.* Experimental study on suppressing knocking of a turbocharged direct injection gasoline engine based on LIVC and dual VVT technology [J]. Automotive Engine, 2012(1):63.