

# 米勒循环在小型增压汽油机典型工况的应用研究

祖炳锋<sup>1,2</sup>, 周仁杰<sup>1</sup>, 徐玉梁<sup>1,2</sup>, 王 振<sup>2</sup>, 瞿 伟<sup>1</sup>, 刘丽娜<sup>2</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津内燃机研究所, 天津 300072)

## The Application of Miller Cycle in a Compact Turbocharged Gasoline Engine under Typical Operating Conditions

ZU Bingfeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Renjie<sup>1</sup>, XU Yuliang<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>, QU Wei<sup>1</sup>, LIU Li'na<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** According to the one-and three-dimensional engine cycle simulation, the effect of Miller cycle on the fuel consumption, detonation and combustion characteristics of a compact 3-cylinder turbocharged gasoline engine was studied when the inlet valve was closed early and late (EIVC and LIVC) respectively. Results show that both Miller cycle are effective in reducing fuel consumption, with an average reduction of about 8%. At low load, the EIVC strategy has a greater throttle opening and inlet air pressure than the LIVC, resulting in a relatively small pumping loss with better fuel economy. At high load the EIVC strategy can significantly reduce the tumble flow in the cylinder and the turbulent kinetic energy at the end of compression, resulting in slower combustion. This makes the crank angle of 50% mass fraction burned (MBF50) retard 2.5° crank angle, therefore, its fuel economy and anti-detonating are worse than the LIVC.

**摘要:** 针对某 3 缸增压小型化汽油机, 基于一维和三维发动机循环仿真, 分别研究了进气门早关(EIVC)和进气门晚关(LIVC)两种米勒循环形式对发动机油耗、爆震及燃烧特性的影响。结果表明: 两种米勒循环形式均能有效降低全工况范围的燃油消耗率, 平均降幅约为 8%。与 LIVC 相比, 低负荷时 EIVC 具有更大的节气门开度和进气压力, 故泵气损失相对较小, 具有更好的燃油经济性; 而在高负荷区域, EIVC 会显著降低缸内滚流和压缩终了时的湍动能, 导致燃烧变慢, CA50 相比 LIVC 滞后 2.5° 曲轴转角, 燃油经济性和爆震抑制作用较差。

**关键词:** 汽油机; 涡轮增压; 米勒循环; 油耗; 爆震; 滚流; 湍动能

**Key words:** gasoline engine; turbocharging; Miller cycle; fuel consumption; detonation; tumble; turbulent kinetic energy

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2017.06.020

中图分类号: TK411+.1

文献标识码: A

## 0 概述

随着排放及燃油法规的日趋严格, 节能减排成

为目前内燃机领域研究的热点。近年来, 汽油机小型化增压技术在降低 CO<sub>2</sub> 排放并提高经济性方面受到了广泛关注, 新欧洲行驶循环(NEDC)的数据也

收稿日期: 2016-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50976076)

Fund Project: National Nature Science Foundation of China(50976076)

作者简介: 祖炳锋(1974—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为发动机整机平台设计、工作过程优化, E-mail: zbf@tju.edu.cn;

周仁杰(联系人), 男, 硕士, E-mail: nutlet@126.com。

证实了其降低油耗的有效性<sup>[1]</sup>。但传统 Otto 循环汽油机在城市工况(一般为转速 2 000 r/min,低负荷工况)泵气损失较大,油耗较高<sup>[2-3]</sup>;此外,汽油机采用小型化后,排量降低,为了保证发动机在高负荷有足够的转矩,需要采用高增压技术,这又增加了高负荷运行时的爆震倾向。对于此问题,通常采用的缓解方法是推迟点火提前角或降低发动机的几何压缩比,但这些策略导致发动机难以达到最佳热效率,反过来又牺牲了发动机的经济性<sup>[4]</sup>。

为了达到较好的燃油经济性和性能,增压小型化汽油机通常结合可变气门正时技术。米勒循环通过进气门早关(EIVC)和进气门晚关(LIVC)实现了发动机压缩比与膨胀比的分离。通过降低发动机的有效压缩比而维持膨胀比不变,在保证高几何压缩比的同时能够有效缓解高负荷的爆震问题,同时也为部分负荷下保持较高热效率提供了可能<sup>[5-8]</sup>。但由于进气门的早关或晚关,在进气与压缩冲程之间分别存在一个进气预膨胀(早关)和进气回流(晚关)的过程,使米勒循环发动机在动力性与经济性方面产生不可避免的矛盾。目前对于米勒循环的研究大多集中在将非增压 Otto 循环发动机直接改为进气门晚关的 LIVC 循环发动机,同时再通过增大几何压缩比来弥补有效压缩比的降低,进而保证发动机转矩下降不明显<sup>[9-10]</sup>。全面系统地分析比较 EIVC 和 LIVC 对小型增压汽油机性能影响机理的文献并不多,但这对于全面认识米勒循环对发动机性能的影响及对未来发动机的优化设计很有意义。

本文基于一维和三维发动机循环仿真,以某 1.0 L 小型增压汽油机为对标机,分别对 EIVC 和 LIVC 控制策略进行发动机建模,分析比较在发动机典型工况点下 EIVC 和 LIVC 控制策略对发动机性能的影响并对其机理进行深入分析。在此基础上,结合三维发动机仿真,从气流运动和燃烧组织方面对 EIVC 和 LIVC 控制策略进行进一步的分析研究。

## 1 一维模型的搭建与对标

### 1.1 搭建一维 Boost 模型

以某 1.0 L 小型增压汽油机为原型机搭建一维 Boost 仿真模型,如图 1 所示。表 1 为发动机的基本参数。仿真采用的燃烧模型为 Fractal 准维燃烧模型,相较于 Vibe 燃烧模型,该模型能够预测敲缸并可以在 1D 模型阶段进行火花塞位置、燃烧室形状及活塞形状的优化。传热模型采用经典的 Woschni 模型。

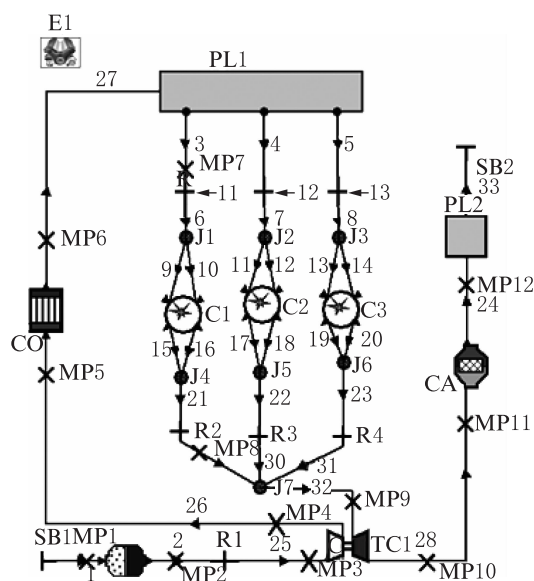


图 1 一维 Boost 仿真模型

表 1 发动机基本参数

| 项目          | 参数                |
|-------------|-------------------|
| 发动机型式       | 直列 3 缸, 增压        |
| 缸径/mm×行程/mm | 75×75             |
| 压缩比         | 9.8               |
| 总排量/L       | 0.997             |
| 进排气系统       | 双顶置凸轮轴, 单缸 4 气门   |
| 标定功率/kW     | ≥75 (5 500 r/min) |
| 最大转矩/(N·m)  | ≥150              |

将原机的台架试验数据与一维仿真模型的模拟结果进行对标,如图 2 所示,以保证后续仿真研究结果的准确性。从对标结果中可以看到,原机在全负荷工况下的比油耗、转矩模拟数值与试验值吻合较好,最大偏差均不超过 3%,故可利用该模型对发动机进行性能预测。

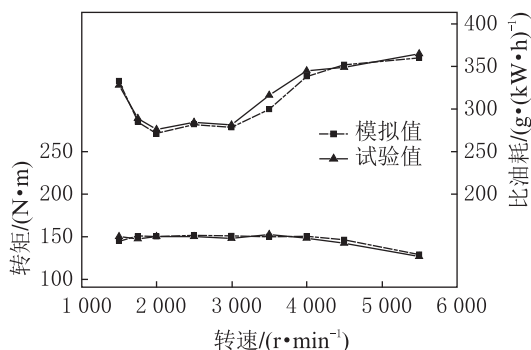


图 2 全负荷比油耗、转矩模拟与试验值对比

### 1.2 确定气门升程曲线和几何压缩比

为了实现米勒循环,在原机进气门关闭时刻和进气持续期的基础上,分别选取进气关闭时刻范围向前和向后推进  $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$  曲轴转角,每隔  $5^{\circ}$  曲轴转

角进行1次模拟,从中选取性能较好的气门升程曲线,对于LIVC保持最大气门升程不变,对于EIVC则是通过降低气门最大升程来实现。仿真过程中保持排气门的升程曲线不变,图3为研究所使用的气门升程曲线。

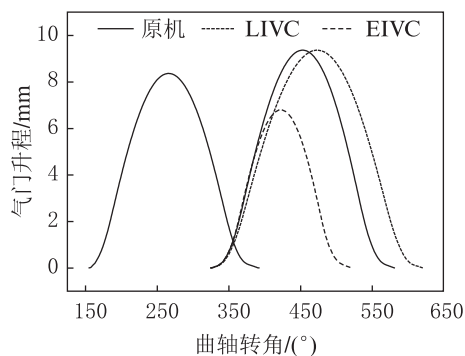


图3 原机、EIVC和LIVC凸轮轴气门升程曲线

为了尽量避免其他因素对研究的影响而仅研究米勒循环两种实现形式对发动机的影响,研究采用和原机相同的几何压缩比。

## 2 EIVC、LIVC一维仿真结果与分析

### 2.1 优化点火角和配气相位

选取转速为2000 r/min,平均有效压力范围为0.2~1.6 MPa为研究工况,其中既包含了发动机城市典型工况又包含了发动机爆震易发工况。比较发动机在转速为2000 r/min不同负荷下采用EIVC和LIVC控制策略的比油耗差异并分析其机理。研究过程中,对发动机的点火提前角及进、排气相位进行了优化,优化的目标是使发动机在目标负荷下的比油耗最低。在优化点火提前角的过程中,保证最大缸内压力不高于同负荷下原机的最大缸内压力,并使用了Boost软件中自带的爆震预测模块来确保发动机运行范围不超过爆震极限。方程表达式为:

$$N_{ON} = 100 \times \left\{ \frac{1}{A} \int_{t_{SOC}}^{t_{85\%MBF}} \left[ \left( \frac{p}{p_{Ref}} \right)^n \times \exp \left( -\frac{B}{T_{UBZ}} \right) dt \right] \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

式中, $N_{ON}$ 为发动机运行过程中不发生爆震所需的最小辛烷值; $t_{85\%MBF}$ 为燃烧完成85%时对应的时间; $t_{SOC}$ 为燃烧开始的时间; $p_{Ref}$ 为参考压力; $T_{UBZ}$ 为未燃区的温度; $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $B$ 为模型常量,分别取17.68、3.402、1.7和3800。

该模型通过计算发动机运行过程中不发生爆震所需的最小辛烷值来对爆震进行预测,研究中保证采用EIVC和LIVC控制策略模型的 $N_{ON}$ 值不高于原机。同时对进、排气相位的优化采取扫点扫描的方式,

选取目标负荷下最低比油耗的进、排气相位控制策略。

图4表明发动机采用EIVC和LIVC策略后在0.2~1.6 MPa负荷范围内,比油耗较原机都有较大幅度的改善,平均降低约8%。在0.6~1.6 MPa负荷范围内LIVC的油耗表现好于EIVC,指示比油耗(ISFC)最高降低9.7%;而当负荷低于0.6 MPa时EIVC的油耗表现好于LIVC,油耗最高降低12.9%。

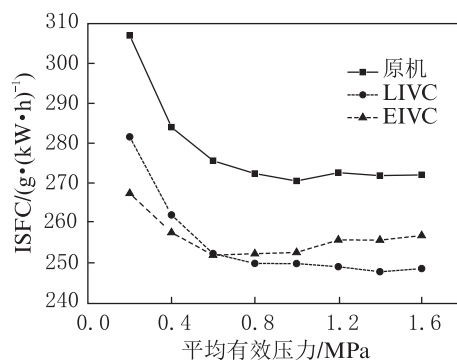


图4 米勒循环对发动机比油耗的影响

### 2.2 典型城市工况点结果分析

为了进一步研究EIVC和LIVC控制策略的节油机理和表现差异,选取发动机典型城市工况点(转速2000 r/min、平均有效压力BMEP 0.4 MPa)为研究对象。由图4可知,在此工况下采用EIVC的油耗比采用LIVC多降低1.6%。在发动机低负荷工况下,油耗的改善主要与泵气损失的降低有关。此外,在此工况下,增压器不介入发动机循环,泵气功为负值,故泵气功越小,油耗越低。运用米勒循环后泵气损失的降低主要得益于更大的节气门开度、更高的进气压力和摩擦损失的降低<sup>[1]</sup>。

由图5可以看到在该负荷下,EIVC因为进气门早关,LIVC因为缸内部分气体倒流回进气管,相同条件下发动机采用EIVC和LIVC控制策略后进气量均小于原机,为保持进气量必须加大节气门开度,因此两者在该负荷下的节气门开度均比原机大。图6为该工况下的节气门开度对比,原机的节气门开度为17%,LIVC为23%,EIVC为32%。加大节气门开度,泵气损失减小,因而LIVC和EIVC的油耗表现均好于原机。

图7为EIVC和LIVC控制策略下发动机进排气过程中的压力对比图。从图7可以看出,EIVC和LIVC的排气压力基本相同,但EIVC的进气压力高于LIVC,因此EIVC的泵气负功比LIVC小。经分析,原因之一是EIVC的最大气门升程低于LIVC,所以在低负荷时需要用更大的节气门开度来限制负荷大小,如图6所示在该负荷下EIVC的节气门开

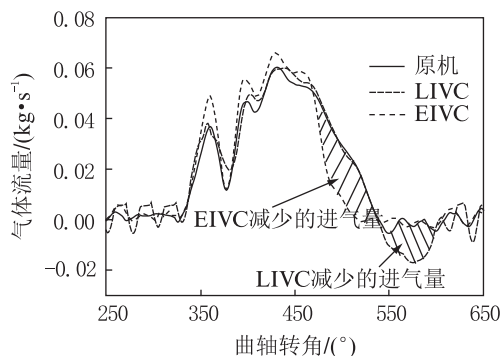


图 5 EIVC 和 LIVC 对进气流量的影响 (2 000 r/min、平均有效压力 0.4 MPa)

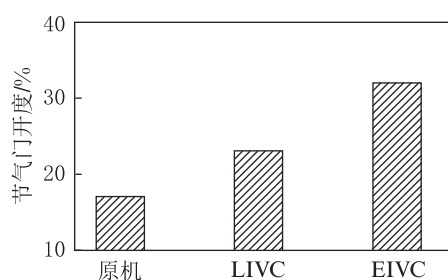


图 6 原机、EIVC 和 LIVC 节气门开度 (2 000 r/min、平均有效压力 0.4 MPa)

度比 LIVC 的节气门开度大 9%，因而泵气损失相对较小。从另一角度分析，采用 EIVC 控制策略时进气门在上止点前关闭，在余下的进气冲程中气缸无进气行为，泵气损失相应减小，故此工况下 EIVC 的油耗表现好于 LIVC。

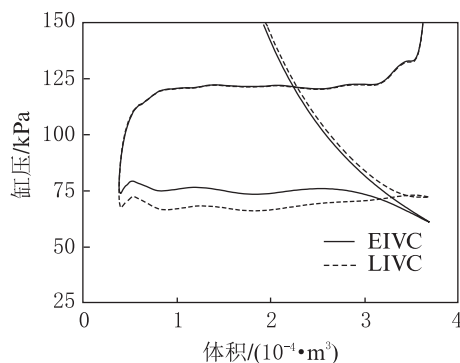


图 7 EIVC 和 LIVC 在进排气过程中的压力对比 (2 000 r/min、平均有效压力 0.4 MPa)

### 2.3 爆震易发工况点结果分析

再取发动机爆震易发工况 (2 000 r/min、平均有效压力 1.6 MPa) 为研究对象，在此工况下采用 LIVC 的油耗比采用 EIVC 多降低 1.7% (图 4)。在低速大负荷工况由于发动机的负荷和增压压力较大，所以爆震倾向也相应增大。

图 8 为原机和 EIVC、LIVC 在此工况点 CA50

(燃烧 50% 累积放热量对应的曲轴转角) 的对比情况。可以看到，由于 EIVC 和 LIVC 均降低了发动机的有效压缩比，使压缩终了时缸内混合气具有更低的温度<sup>[11]</sup>，故可以采用更早的点火提前角，因此 CA50 均比原机提前。其中，采用 EIVC 控制策略时 CA50 比原机提前 5.8° 曲轴转角，采用 LIVC 控制策略时 CA50 比原机提前 8.3° 曲轴转角。发动机的 CA50 越靠前，说明对爆震抑制的潜力越大。如图 8 所示，LIVC 的 CA50 比 EIVC 提前 2.5° 曲轴转角，即采用 LIVC 控制策略抑制爆震的效果更好。初步分析是因为采用 EIVC 控制策略后气门升程降低，缸内的湍流强度在压缩终了时会变慢，造成平流火焰传播速度降低<sup>[12-13]</sup>。采用 EIVC 和 LIVC 控制策略对缸内气体流动的影响将在下文进一步分析。

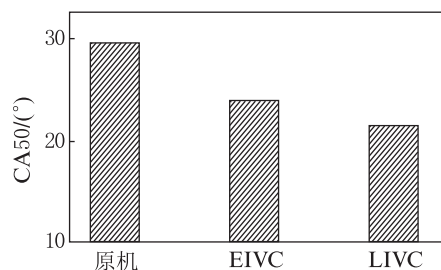


图 8 EIVC 和 LIVC 对 CA50 的影响 (2 000 r/min、平均有效压力 1.6 MPa)

从抑制爆震的另一方面来说，如图 9 所示，压缩终了时 EIVC 混合气的温度与原机基本相同，LIVC 的混合气温度相对较低，故 LIVC 对爆震的抑制效果更好。LIVC 降低了发动机的有效压缩比，故在压缩终了时温度低于原机；EIVC 虽然也降低了发动机的有效压缩比，但温度较原机并没有明显的降低，经分析这主要是因为采用 EIVC 控制策略时进气门在下止点前关闭，在活塞到达下止点前缸内混合气存在一个膨胀过程，加强了缸壁向混合气的传热，抵消了因为有效压缩比降低对混合气温度的影响。

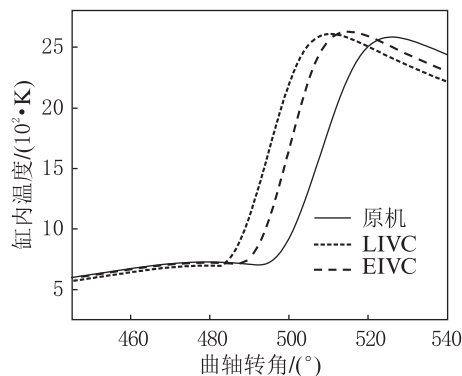


图 9 EIVC 和 LIVC 对压缩终了时温度的影响 (2 000 r/min、平均有效压力 1.6 MPa)

### 3 EIVC、LIVC 三维仿真结果与分析

#### 3.1 三维模型设置与标定

为了进一步研究高负荷时两种控制策略对缸内气体流动的影响,分析两者在爆震抑制方面的差异,搭建了三维仿真模型如图 10 所示,由进气道、燃烧室、排气道、活塞等组成。利用 FIRE 软件进行缸内气体流动及燃烧分析,湍流模型采用  $k-\zeta-f$ <sup>[14]</sup>,近壁面处理采用 Hybrid Wall Treatment<sup>[14]</sup>,燃烧模型采用 ECFM<sup>[15]</sup>,气道喷雾采用初始化当量燃空比替代。初始及边界条件取自标定完的 Boost 模型。通过对比 Boost 仿真缸压与 FIRE 模拟缸压调整燃烧模型参数。图 11 为一维标定结果与三维仿真计算缸压对比,可知仿真结果具有较高的精度,可用于对比分析两种控制策略。

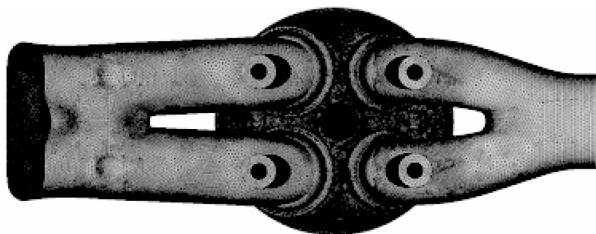


图 10 FIRE 三维仿真模型

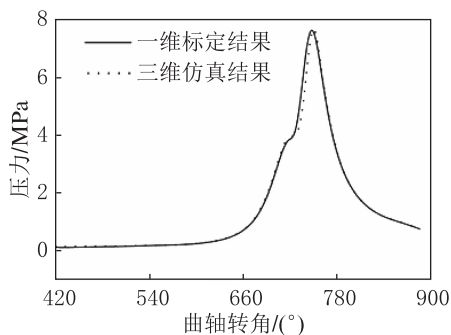


图 11 一、三维缸压标定结果

#### 3.2 缸内流动特性分析

图 12 为发动机爆震易发工况 (2 000 r/min、平均有效压力 1.6 MPa) 下滚流比和湍动能随曲轴转角的变化趋势。可以看到,EIVC 和 LIVC 控制策略的滚流比随曲轴转角的变化趋势基本一致。缸内滚流比在进气过程前期快速上升,在气门最大升程附近达到最大值;进气过程后期滚流比开始减小;在压缩行程中期气缸容积迅速缩小致使涡的回转半径快速减小,根据动量矩守恒,滚流速度愈益增加,滚流比再一次增大,达到第二个峰值;随后直到压缩上止点附近,大涡破碎成小涡,滚流比迅速减小<sup>[16]</sup>。湍动能曲线随曲轴转角的变化趋势与滚流比趋势相

似,在进气初期达到第一个峰值,在压缩后期达到第二个峰值。

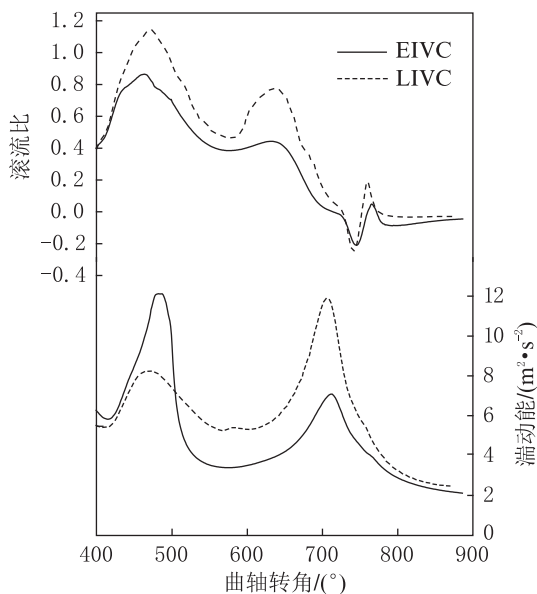


图 12 EIVC 和 LIVC 滚流比和湍动能随曲轴转角的变化 (2 000 r/min、平均有效压力 0.4 MPa)

比较两条曲线可以发现,采用 EIVC 控制策略时缸内滚流强度整体较低,主要是由于其进气门在上止点前关闭,在余下的进气行程中进气能量得不到补充,造成滚流比快速衰减。滚流比在进气初期的最大值比 LIVC 低约 0.28;压缩中期的第二峰值减小幅度更大,EIVC 控制策略的滚流比峰值为 0.44,只有 LIVC 控制策略的 57%。

对于湍动能,从图 12 可以看出,EIVC 对气门初期缸内湍动能的提高具有显著作用。在进气初期,湍动能强度达到第一峰值,此时 EIVC 的湍动能约为 LIVC 的 1.6 倍,达到  $10.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ;随后迅速衰减,到压缩行程后期第二波峰时,湍动能大小只有 LIVC 的一半。究其原因,如图 13 所示,对于 EIVC,由于气门升程低,进气过程中在气门附近产生高速进气射流流速显著大于 LIVC,在进气射流的高速剪切作用下缸内湍流迅速增强,而由于进气门早关,滚流比大幅度衰减,导致压缩后期大涡破碎产生的能量较低,从而转变为湍流的湍动能降低。

从以上分析可知:与 LIVC 控制策略相比,EIVC 控制策略较大幅度地降低了压缩终了时缸内滚流比及湍动能的大小。图 14 为压缩终了时缸内湍动能分布与大小。由图 14 可以看到,在压缩终了时,采用 LIVC 控制策略的湍动能比 EIVC 大且分布更为合理。因此,采用 EIVC 控制策略不利于燃油的混合及雾化,导致火焰传播速度降低及 CA50 延迟,故其抑制爆震的效果不如 LIVC。

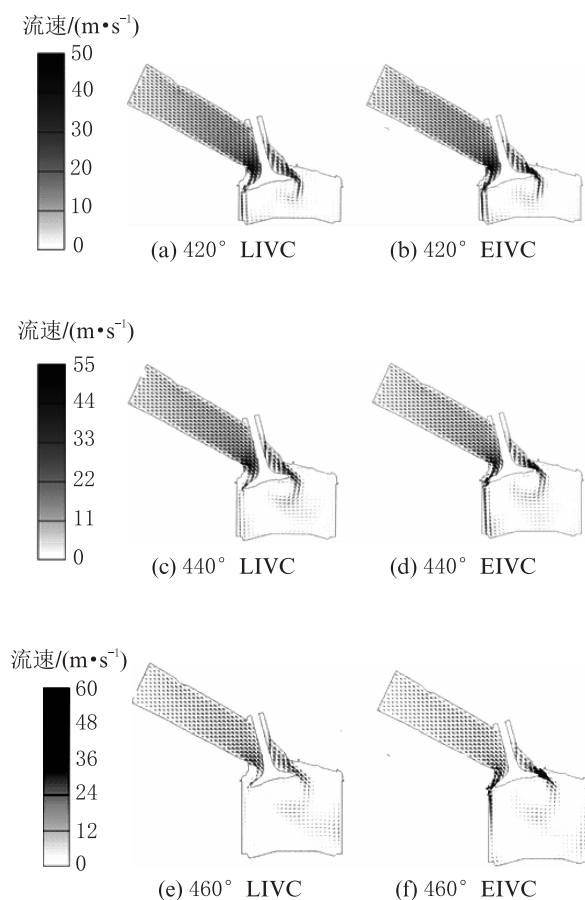


图 13 进气过程缸内进气流速对比

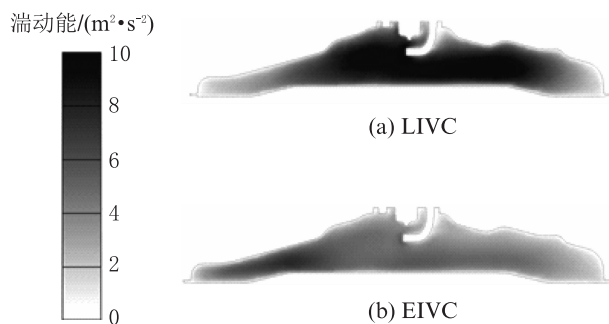


图 14 压缩终了时缸内湍动能分布与大小对比

#### 4 结论

(1) 增压小型化汽油机采用米勒循环(EIVC 或 LIVC)后,在转速为 2 000 r/min 全工况范围内可以有效降低燃油消耗率,提高经济性。

(2) 在发动机低负荷工况下,EIVC 具有更高的进气压力及更大的节气门开度,故泵气损失相对 LIVC 较小,具有更好的燃油经济性。

(3) 采用米勒循环后发动机的实际压缩比降低,有效降低了发动机的爆震倾向。在实际应用中可以适当提高发动机的几何压缩比,进一步提高发动机效率。

(4) 在发动机高负荷工况下,相较于 LIVC, EIVC 压缩终了时混合气温度更低,对滚流的影响小,燃烧的 CA50 更提前,对爆震的抑制效果更好,燃油经济性也更好。

(5) 相比于 LIVC, EIVC 较大幅度地降低了压缩终了时缸内滚流比及湍动能的大小,燃油的混合及雾化恶化,导致火焰传播速度减慢,不利于对爆震的抑制。

#### 参考文献:

- [1] 华从波,贺子龙,韩震,等. 浅谈乘用车油耗法规及应对策略[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(10): 73-76.  
HUA C B, HE Z L, HAN Z, et al. Discussion on passenger car's fuel consumption standard and countermeasures [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2015, 53(10): 73-76.
- [2] LIU J P, FU J Q, FENG R H, et al. The effects of working parameters on gasoline engine energy balance [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(7): 1938-1946.
- [3] ANDERSON M, ASSANIS D, FILIPI Z. First and second law analyses of a naturally aspirated, Miller cycle, SI engine with late intake valve closure [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 1998, 980889.
- [4] ZACCARDI J, PAGOT A. Optimal design for a highly downsized gasoline engine [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2009, 2009-01-1794.
- [5] 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): 116-121.  
ZHENG B, LI T, YIN T. Mechanism of improvements on thermal efficiency of turbocharged direct injection gasoline engines by Miller cycle: partial load analysis [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(6): 116-121.
- [6] LI T, GAO Y, WANG J S, 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: 59-65.
- [7] BIRCKETT A, ARLAUSKAS P, SHIRLEY M, et al. Mechanically supercharged 2.4 L GDI engine for improved fuel economy and low speed torque improvement [C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2014, 2014-01-1186.
- [8] 姜峰,李明海,王娟. 两种米勒循环对机车柴油机性能的计算分析与研究[J/OL]. [2016-05-19]. 内燃机工程, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1255.TK.20160519.1706.002.html>.  
JIANG F, LI M H, WANG J. Computation and study of effects of two kinds of Miller cycle on performance of locomotive diesel engine [J/OL]. [2016-05-19]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1255.TK.20160519.1706.002.html>.

(下转第 138 页)

- [9] 秦静,李云龙,张少哲,等. 进气门晚关与高压缩比技术在汽油机上的应用[J]. 天津大学学报(自然科学版),2014,47(11):1008-1016.
- QIN J, LI Y L, ZHANG S Z, et al. Application of late intake valve closure(LIVC) strategy combined with high compression ratio in a gasoline engine[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014,47(11):1008-1016.
- [10] 朱国辉,夏孝朗,刘敬平,等. 传统汽油机改进成混合动力 Atkinson 循环专用发动机的节油效果[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(4):1302-1311.
- ZHU G H, XIA X L, LIU J P, et al. Fuel saving effect of Atkinson cycle engine applied to hybrid vehicle converted from conventional gasoline engine[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014,45(4):1302-1311.
- [11] 王建昕,帅金石. 汽车发动机原理[M]. 北京:清华大学出版社,2011:76-77.
- [12] HARA S, NAKAJIMA Y, NAGUMO S. Effects of intake valve closing timing on spark-ignition engine combustion[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 1985,850074.
- [13] VENT G, ENDERLE C, MERDES N, et al. The new 2.0 L turbo engine from the Mercedes-Benz 4-cylinder engine family [R]. Beijing: 2nd Aachen Colloquium China 2012,2012.
- [14] SCOTT H, KEVIN L, ZENG Y B, et al. Development of the combustion system for the general motors fifth generation “small block” engine family[C]//SAE Paper. Detroit, MI, USA, 2013,2013-01-1732.
- [15] POINSOT T, VEYNANTE D, CANDEL S, et al. Quenching proceses and premixed turbulent combustion diagrams [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991,228:561-606.
- [16] 张振东,尹丛勃,郭辉,等. 滚流对直喷汽油机油气混合及燃烧特性影响的数值模拟研究[J]. 内燃机工程,2008,34(6):58-63.
- ZHANG Z D, YIN C B, GUO H, et al. Numerical research into effect of tumblr on fuel-air mixing and combustion characteristics in DI gasoline engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2008,34(6):58-63.