

基于多缸多循环 CFD 方法的 EGR 均匀性研究

Study on EGR Uniformity Based on Multi-Cylinder & Multi-Cycle CFD Simulation

林长林, 张小矛, 徐政, 陈明, 杨洋, 陈曦, 丁宁

1. 上海汽车集团股份有限公司乘用车公司技术中心 2. 上海市汽车动力总成重点实验室

摘要: 小型强化技术能够提高汽油机输出功率和燃油经济性, 降低泵气损失。但是随着压缩比和负荷的增加, 爆震倾向增大。为了抑制爆震和降低 NO_x 排放, 采用外部冷却 EGR 技术成为其中重要的手段之一。本文采用 CONVERGE 软件, 首次对一台四缸、自然吸气且带外部 EGR 系统的汽油机进行多缸、多循环模拟, 建立包含进气系统、排气系统、燃烧室和 EGR 回路的多缸机仿真模型, 评估了不同 EGR 分配腔对于缸内油气混合均匀性和燃烧的影响。研究结果表明, 各缸 EGR 率均匀性较好有利于各缸燃烧一致性较好。利用此模型后续还可以详细评估进气歧管、排气歧管、凸轮型线等部件对各缸三维瞬态气流的波动性, 进而引起的各缸燃烧波动性的影响。

关键词: 汽油机; 多缸多循环; CONVERGE; 外部 EGR

Abstract: Engine downsizing can reduce pumping lose and increase power output and fuel efficiency. However knock phenomenon appears with the increase of compression ratio and engine load. To reduce the knock intensity and NO_x emissions, external exhaust gas circulation (eEGR) has been proposed. In this paper, a four-cylinder normally aspirated gasoline engine with eEGR system is modeled, including intake system, exhaust system, combustion system and eEGR flow system. The effect of different EGR mixers on in-cylinder mixture and combustion are investigated. By the multi-cylinder and multi-cycle simulation, the effect of intake manifold, exhaust manifold and cam profile on the fluctuation of three-dimensional transient flow and combustion can be further investigated

Key words: Gasoline Engine; Multi-Cylinder & Multi-Cycle; CONVERGE; External EGR

1. 引言

喷水和 EGR 技术均能够有效降低缸内温度, 进而达到抑制爆震和降低 NO_x 排放的效果^[1,2,3]。相对于喷水技术, EGR 技术成本较低, 因此作为降低排放以及提高热效率的有效方法引起汽车行业的关注。外部 EGR 气体通过 EGR 分配腔后, 在进气道内与新鲜空气混合再进入缸内。EGR 分配腔的设计关系到外部 EGR 气体进入各缸的总量以及各缸缸内的混合气均匀程度, 进而影响各缸的燃烧时的循环变动。一款好的 EGR 分配腔应当使得进入各缸的外部 EGR 气体总量尽可能相近, 并且外部 EGR 气体能够与新鲜空气混合均匀, 进而提高缸内混合气的均匀性, 降低各缸燃烧循环变动。

目前的汽油机缸内 CFD 仿真分析多为单缸多循环模拟。本文首次建立多缸、多循环仿真模型, 相对于传统一维计算, 该模型能反映复杂的三维空间管路分布的影响; 相对于传统三维的单缸模型, 该多缸模型能评估各缸流动和燃烧的差异。通过分析进气道 EGR 分布和缸内混合气均匀性, 为优化

EGR 分配腔的设计提供参考。利用此模型还可详细评估进气歧管、排气歧管、凸轮型线等部件对各缸三维瞬态气流的波动性，进而引起的各缸燃烧波动性的影响。

2. 研究对象

研究对象为 4 冲程 4 缸缸内直喷自然吸气汽油机，发动机的基本参数见表 1 所示。燃烧系统模型如图 1 所示，其中，喷油器采用侧置缸内喷射。

表 1 研究对象的发动机主要参数

名称	主要技术参数
缸径/mm	74
行程/mm	88

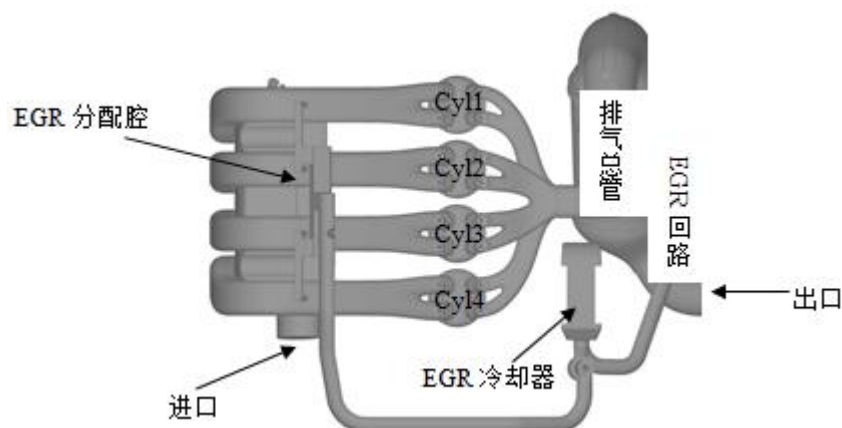


图 1 研究对象的燃烧系统几何模型

3. 仿真模型验证

3.1 网格建立

采用 CONVERGE 软件自适应网格技术，对网格时间和空间上进行分区加密，在保证计算精度前提下节省计算时间。计算时，对 EGR 分配腔、进气道和气缸采用对速度和温度梯度的自适应加密，对关键区域（气门阀座）进行分区加密。计算过程中，进、排气门和活塞均根据升程和相位动态变化^[4]，EGR 阀门固定在开度最大位置。

3.2 初始和边界条件

研究对象的进口边界为进气歧管总管入口，出口边界为催化包后的排气管出口。根据一维 GT-Power 软件计算得到瞬态压力值和温度值。研究对象的温度边界采用固定壁温，按边界分区赋予工程经验值，包括缸盖、缸套、活塞、进气道、进气阀、排气道和排气阀等。

整个燃烧系统回路内初始组分为混合气，包含氧气和氮气。4 个缸的燃烧室经历喷雾、点火和燃烧，产生热量；排气总管中的催化包和 EGR 冷却器分别施加放热和吸热的源项，模拟废气经过催化包后的温升现象和经过冷却器后的降温现象；同时排气总管中的催化包和 EGR 冷却器均根据试验标定阻力系数，模拟压降现象。通过多循环计算，使得最终进气歧管充满空气，EGR 分配腔充满废气，进气道和燃烧室为 EGR 气体和空气混合气，排气道为燃烧废气， λ 为 1。计算工况为 2000rpm，BMEP 为 8bar。

3.3 物理模型

模拟分析包含喷雾、流动和燃烧过程，具体物理模型如表 2 所示^[5]，其中燃烧模型采用 SAGE 模型，为详细化学反应动力学模型，相对于传统经验燃烧模型，无需指定经验的火焰速度关系，且能够更加准确的对化学反应过程进行模拟。为节省计算时间，使用简化的化学反应机理，包含 48 种组分，152 个反应步，燃油组分采用异辛烷和正庚烷的质量分数配比 92:8。同时，应用多区 (Multi-zone) 建模的加速算法，能够在保证精度的前提下使详细化学反应计算的速度显著提升。

表 2 物理模型设置

湍流模型	RNG k- ϵ
喷雾破碎模型	KH-RT breakup length model
燃烧模型	SAGE Detailed Chemistry
壁面传热模型	O'Rourke and Ameden
NO _x 排放模型	Extended Zeldovich NO _x
Soot 排放模型	Hiroyasu Soot

4. 模拟分析结果

4.1 进气道流场和 CO₂ 浓度场分析

计算时对比了两款不同的 EGR 分配腔设计，整个 EGR 回路系统的模型只有 EGR 分配腔不同。图 2 和图 3 分别为不同 EGR 分配腔的进气道速度场和 CO₂ 浓度场的对比。方案 1 的第一缸和第三缸对应的 EGR 气体流动方向偏向左侧，而第二缸和第四缸对应的 EGR 气体流动方向偏向右侧。方案 1 的 CO₂ 浓度场的分布与速度场的分布一致。相对于方案 1，方案 2 的速度场和 CO₂ 浓度场分布均较为均匀。

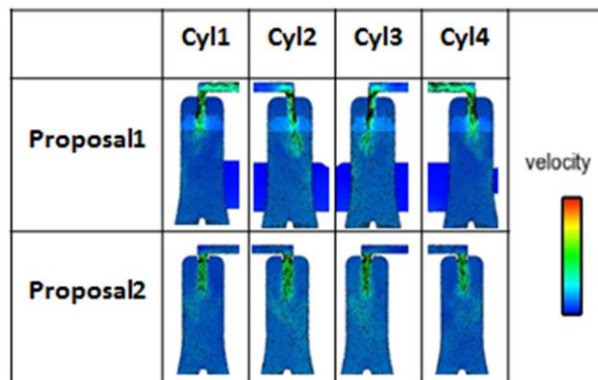
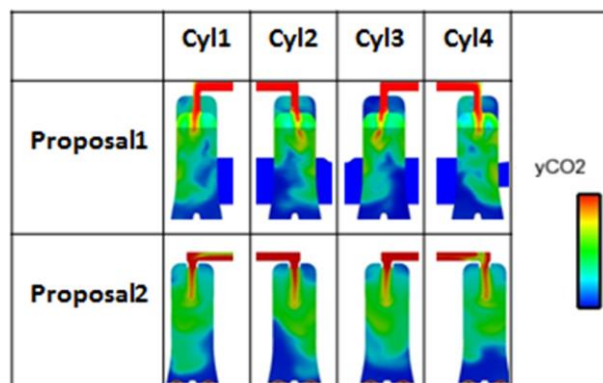


图 2 不同 EGR 分配腔的进气道速度场对比

图 3 不同 EGR 分配腔的进气道 CO₂ 浓度场对比

4.2 燃烧结果分析

图 4 和图 5 分别为不同 EGR 分配腔的缸压对比。两种方案均计算 10 个循环，在最后四个循环达到稳定。方案 1 第二缸和第三缸缸压峰值相对第一缸和第四缸的高，四个缸的燃烧一致性较差。方案 2 四个缸的缸压峰值较为一致，燃烧一致性较好。试验发现方案 1 的燃烧循环变动 COV 较大，仿真的结果与试验一致。

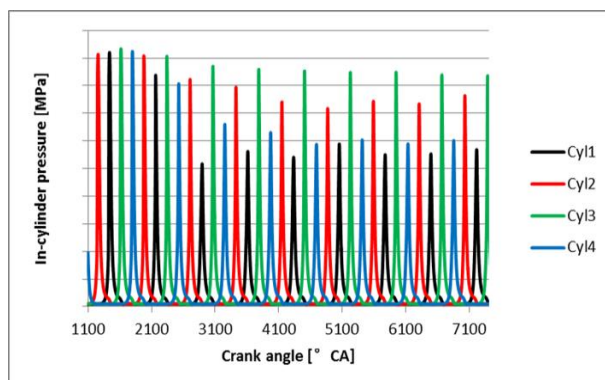


图 4 方案 1 的缸内燃烧结果

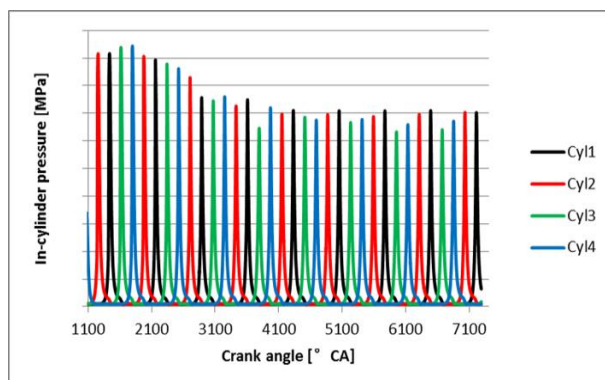


图 5 方案 2 的缸内燃烧结果

图 6 为不同 EGR 分配腔的各缸进气量。图 7 不同 EGR 分配腔的各缸外部 EGR 率。可以看出，相对于方案 1，方案 2 在总进气量和外部 EGR 率的均匀性均较好。

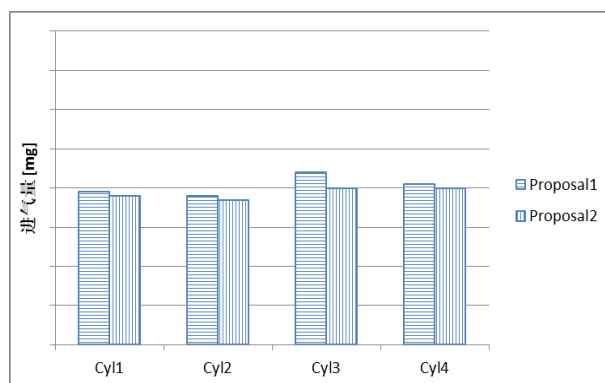


图 6 不同 EGR 分配腔的各缸进气量

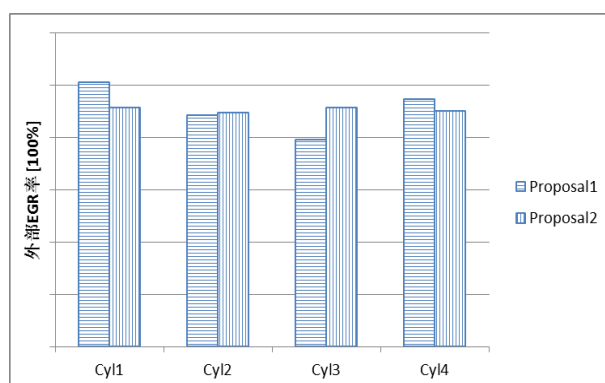


图 7 不同 EGR 分配腔的各缸外部 EGR 率

4.3 催化包内燃烧废气分布的均匀性分析

排气总管中分布有两个催化包，如图 8 所示。催化包 TWC1 在上游，催化包 TWC2 在下游。图 9 为催化包内燃烧废气分布的均匀性，均匀性数值越小，表明废气分布越均匀，催化效率越高。可以看出，催化包 TWC1 的燃烧产物均匀性较差，而催化包 TWC2 的燃烧产物均匀性较好。因此，为了提高催化效率，可以适当增加催化包 TWC1 的厚度，减少催化包 TWC2 的厚度，实现降本增效。

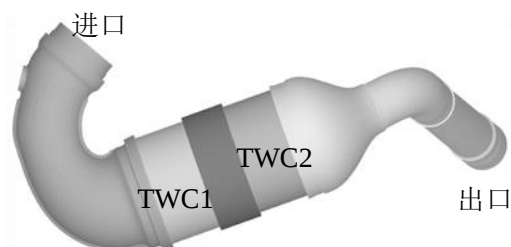


图 8 催化包几何示意图

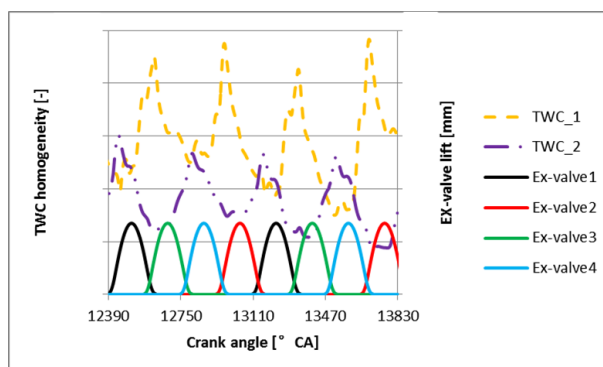


图 9 催化包内燃烧废气分布的均匀性

5. 结论

本文首次建立包含进气系统、排气系统、燃烧室和 EGR 回路的多缸机多循环仿真模型。该模型可用于评估不同 EGR 分配腔对于缸内油气混合均匀性和燃烧的影响，可用于评估催化包内燃烧废气分布的均匀性分析。研究表明，各缸 EGR 率均匀性较好有利于各缸燃烧一致性较好。利用此模型后续还可以详细评估进气歧管、排气歧管、凸轮型线等部件对各缸三维瞬态气流的波动性，进而引起的各缸燃烧波动性的影响。

6. 参考文献

- [1] 王建昕, 帅石金, 等. 汽车发动机原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011:332-343.
- [2] 张小矛, 林长林, 等. 进气温度和压缩比影响汽油机 HCCI 燃烧模拟, 2017 年 idaj 中国区用户年会, 2017
- [3] 林长林, 张小矛, 汽油机进气道喷水抑制爆震影响的三维数值模拟, 2018 年 idaj 中国区用户年会, 2018
- [4] 祝俊, 谢辉, 多缸汽油机 SCHC 燃烧各缸燃烧不一致性的 CFD 仿真探索性研究, 2014 年 idaj 中国区用户年会, 2014
- [5] Senecal P, Richard K, Pomraning E. CONVERGE manual (Version 2.2.0) [M]. Convergent Science, Inc., Madison, 2014.