

基于多缸多循环 CFD 方法的直喷增压汽油机爆震研究

Study on Knock of Turbo Charge Directed Injection Gasoline Engine

Based on Multi-Cylinder & Multi-Cycle CFD Simulation

张小矛, 林长林, 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:随着汽油机工作负荷的增加, 燃烧室末端混合气自燃概率升高, 爆震倾向增大。因此, 降低燃烧室末端混合气的温度成为抑制爆震的手段之一。优化冷却水套、提高燃烧室冷却能力成为抑制爆震的重要手段之一。本文采用 CONVERGE 软件, 首次对一台四缸增压汽油机进行多缸、多循环模拟, 建立包含进气系统、排气系统和燃烧室的多缸机仿真模型, 评估了内部 EGR 率和壁面温度对汽油机爆震的影响。研究结果表明, 内部 EGR 对各缸爆震影响不大, 壁面温度对各缸爆震影响较明显。

关键词: 汽油机; 多缸多循环; 爆震; 内部 EGR; 壁面温度

Abstract: Knock phenomenon appears with the increase of engine load. To reduce the knock intensity, reducing end-gas temperature has been proposed. Optimizing water jacket and enhancing cooling ability become a choice. In this paper, a four-cylinder turbocharge gasoline engine is modeled by CONVERGE, including intake system, exhaust system and combustion system. The effect of interior exhaust gas circulation (iEGR) and wall temperature on the knock are investigated.

Key words: Gasoline Engine; Multi-Cylinder & Multi-Cycle; Knock; Internal EGR; Wall Temperature

1. 引言

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。爆震导致发动机内部零件损坏, 动力输出也会大大降低, 限制了发动机效率的进一步提升^[1,2]。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。通过该项计算分析内部 EGR 和壁面温度对各缸爆震的影响, 为优化冷却水套的设计提供参考。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。直列四缸汽油机布置紧凑, 各缸之间的空间有限, 因此流经各气缸之间的冷却水套分布不均, 第一缸和第四缸与第二、三缸相比, 除了缸间水套冷却, 冷却水还会流经发动机前后端面, 因此冷却效果好于第二、三缸。各缸壁面温度的差异将影响各缸缸内的油气混合和燃烧效果, 最终表现出不同的爆震倾向。本文将重点研究各缸冷却不均对各缸爆震的影响。

2. 研究对象

研究对象为 4 冲程 4 缸缸内直喷涡轮增压汽油机, 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, 喷油器采用中置缸内喷射。

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	86
压缩比/-	11.5

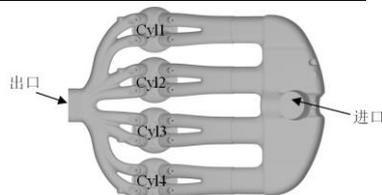


图 1 研究对象的燃烧系统几何模型

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。

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，出口边界为排气歧管总管出口。根据一维 GT-Power 软件计算得到瞬态压力值和温度值。

温度边界采用固定壁温，按边界分区赋予工程经验值，包括活塞、进气道、进气阀、排气道和排气阀等。燃烧室采用基于缸内燃烧分析得到的缸盖和缸套的金属温度场^[3]，如图 2 所示。可以看出，第一缸靠近第二缸的缸套温度较高，远离第二缸的缸套温度较低；第四缸靠近第三缸的缸套温度较高，远离第三缸的缸套温度较低。第二缸和第三缸的缸套温度分布相对对称。

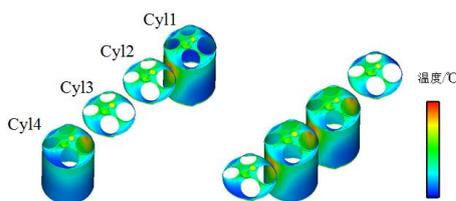


图 2 燃烧室温度场分布

整个燃烧系统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，Lambda 为 1。计算工况为 1835rpm，BMEP 为 8.4bar。

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^[4]，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

3.4 缸内爆震评价指标

为了评价发动机缸内爆震燃烧特性，在每个气缸内均设置了 8 个监测点。利用监测点能够获取缸内局部区域的缸压信号，通过傅里叶变换和滤波处理（如图 3 所示），得到缸压最大值和最小值之差 KP_PK 。通过对缸内所有监测点的 KP_PK 取平均值，得到发动机爆震指数 KI (Knocking Index)，其中， N 表示监测点的编号^[5,6]。

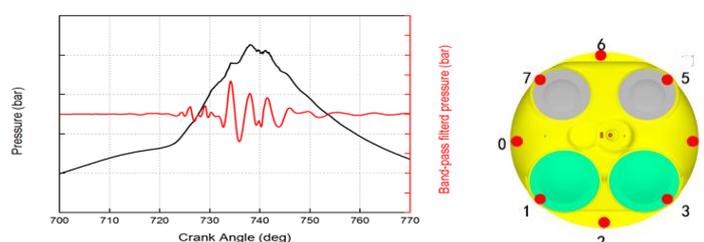


图 3 缸压滤波示意图和缸内爆震监测点的布置

4. 模拟分析结果

4.1 四缸的燃烧特性对比

图 4 为缸内燃烧结果，可以看出，在计算 7 个循环后，各缸的缸压基本达到稳定状态。

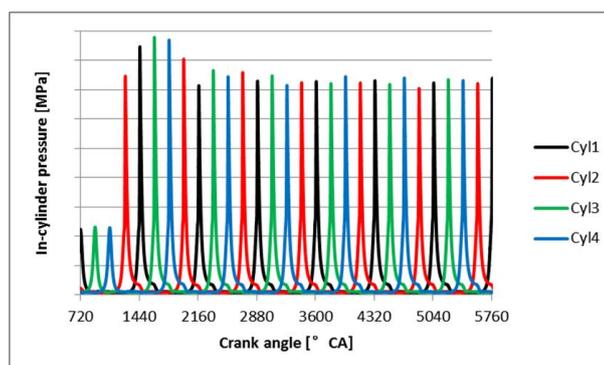


图 4 缸内燃烧结果

图 5、图 6、图 7 和图 8 为各缸量化指标，统计了燃烧稳定后的后三组平均值。可以看出，四缸各缸的缸内进气量相近。在内部 EGR 表现上，第一缸略微高于其他缸。在各缸缸内监控点的平均温度表现上，第二缸和第三缸略微高于第一缸和第四缸，这是由于四缸布置上差异导致的（第二缸和第三缸布置在中心，第一缸和第四缸布置在外围）。在爆震强度表现上，第二缸和第三缸高于第一缸和第四缸，与缸内温度分布差异一致，与内部 EGR 无明显关联。各缸爆震强度与试验趋势一致。

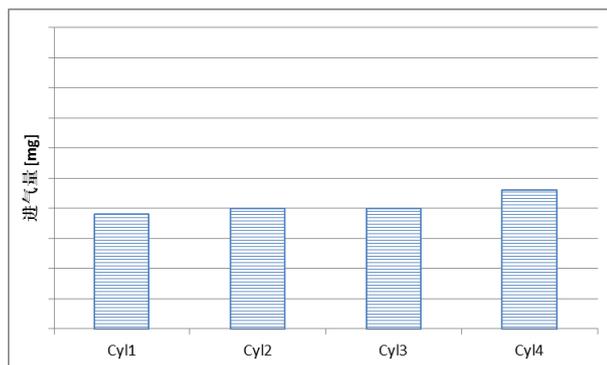


图 5 各缸进气量

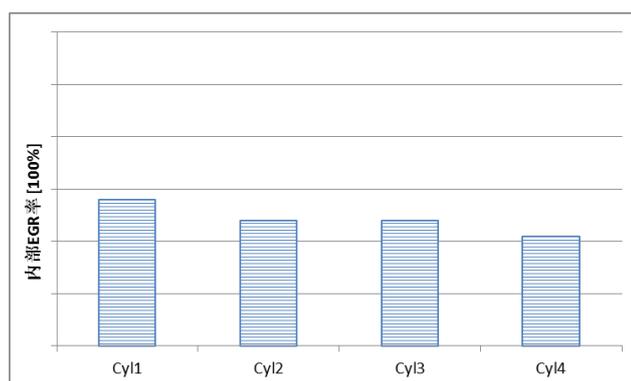


图 6 各缸内部 EGR 率

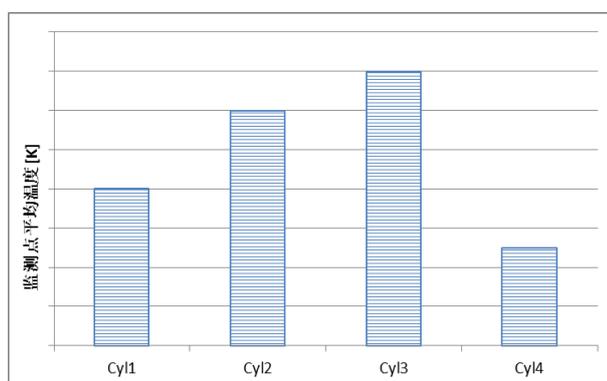


图 7 各缸监测点平均温度

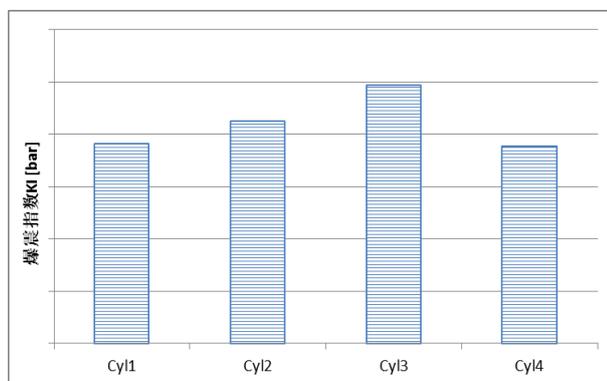


图 8 各缸爆震指数

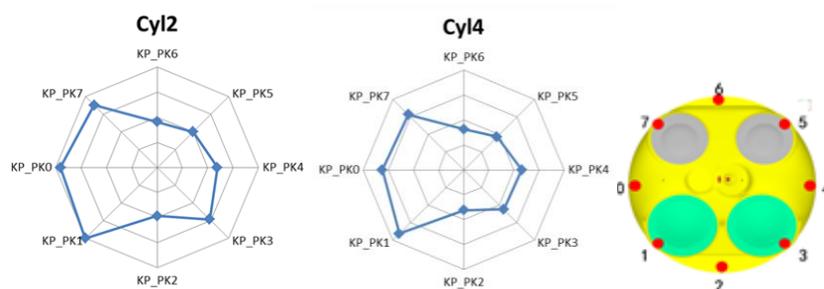


图 9 第二缸和第四缸的缸内爆震强度分布

5. 结论

本文首次建立包含进气系统、排气系统和燃烧室的多缸机多循环仿真模型，燃烧室采用基于缸内燃烧分析得到的缸盖和缸套的金属温度场，评估了内部 EGR 率和壁面温度对汽油机爆震的影响。内部 EGR 对各缸爆震影响不大，壁面温度对各缸爆震影响较明显。

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] 丁宁, 徐政, 陈明, 基于缸内燃烧分析的发动机金属温度场计算方法[J], 内燃机工程, 2017(5).
- [4] Senecal P, Richard K, Pomraning E. CONVERGE manual (Version 2.2.0) [M]. Convergent Science, Inc., Madison, 2014.
- [5] LONG L, ROLF D, et al, Modeling knock in spark-ignition engines using a G-equation combustion model incorporating detailed chemical kinetics[C], SAE Technical Paper, 2007, 10(2007-01-0165).
- [6] 林长林, 张小矛, 等. 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