

基于 Converge 的汽油机缸内流动 CFD 仿真研究

罗招, 施军, 郑建军, 陈小东, 卿辉斌
(长安汽车动力研究院, 重庆 401120)

摘要: 本文以长安某直喷汽油机为研究对象, 使用 Converge 软件分析了不同网格设置方法对缸内流动仿真结果的影响, 并将结果与某商业软件进行了对比, 然后采用相同网格设置方法, 对不同形状燃烧室方案进行缸内流动 CFD 仿真评估。结果表明: 进气道流动结果直接影响缸内形成的滚流比及湍动能, 应将进气道纳入网格加密重点考虑区域; 即使采用相同湍流模型, Converge 与某商业软件计算结果仍存在一定差异, 两种商业软件具有各自的特点; 在额定工况下, 使用气体导流设计方案在形成均匀混合气、提高燃烧效率、降低爆震风险等方面具有优势。

关键词: Converge; 网格; 缸内流动

1 引言

随着国六排放法规的逐步落实, 各大主机厂纷纷致力于产品的国六升级开发, 能否及时推出高效率、低排放动力产品将直接影响汽车企业的发展。国六排放法规对汽车排放提出了更加苛刻的要求, 首次将颗粒物排放纳入汽油车排放考核内容, 对发动机节能减排技术提出新的挑战。目前, 汽车减排主要是降低发动机原始排放和提高尾气后处理效率两个措施。一般而言, 单纯提高尾气后处理效率, 成本会大幅提高; 另外, 由于排放法规越来越严格, 单纯的尾气后处理已无法满足要求。所以, 如何降低发动机原始排放成为国六升级开发的重点。由于原始排放是来自于燃料的燃烧, 所以发动机燃烧系统的优劣直接决定了原始排放水平。随着商用仿真软件及计算机性能的快速发展, 发动机缸内流动、喷雾及燃烧 CFD 仿真技术已成为燃烧系统设计的主要手段。

本文基于长安某直喷汽油机, 采用 Converge 软件对不同燃烧室方案在额定工况下的缸内流动情况进行 CFD 仿真, 分析了不同网格设置方法对缸内滚流比及湍动能计算结果的影响, 并将结果与某商业软件进行了对比, 然后基于相同网格设置方法, 分析了两种燃烧室方案缸内流动水平的差异。

2 计算模型及边界条件

2.1 模型建立

本文基于 Converge 软件建立长安某直喷汽油机缸内流动 CFD 仿真模型, 几何模型如图 1 所示。相比某商业软件, Converge 软件前处理没有复杂的体网格生成过程, 体网格是在计算时自动生成, 仅需划分边界、设置边界条件及物理模型等参数即可实现计算, 前处理时间大幅缩短。该发动机主要参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本参数

发动机参数	数值
缸径	72 mm
冲程	81.8 mm
连杆长	137 mm
压缩比	~12
运行工况	5400rpm@WOT

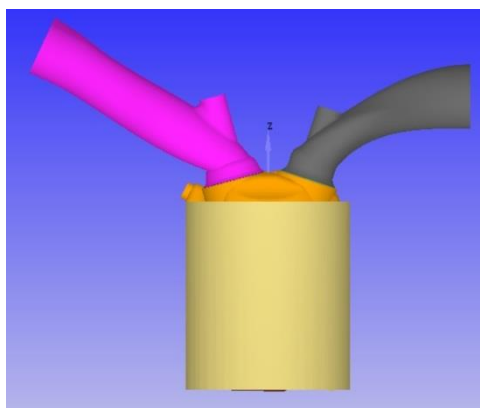


图 1 发动机几何模型

2.2 边界条件

进气道入口指定总压和温度入口边界，而排气道出口指定静压和温度出口边界，其边界条件值均由根据试验结果标定的 GT-Power 模型计算得到。壁面边界给定固定经验值。计算周期从 -380° CA 到 30° CA (0° 为燃烧上止点)。

3 计算结果分析

3.1 不同网格设置对缸内流动的影响

Converge 软件具有强大的网格加密功能，可实现 AMR 自适应加密、边界加密、局部任意加密等。网格对仿真结果具有一定影响，为考察不同程度 AMR 加密设置对 Converge 计算结果的影响，本文对 6 种（如表 2）不同网格设置方案下的缸内流动进行了 CFD 仿真，6 种方案均对缸内区域固定加密 1 次，气阀座圈位置进行边界层加密。

表 2 6 种不同程度 AMR 网格设置方案

方案	基本尺寸 mm	速度梯度 m/s	加密层级	加密位置
1	4	1	3	Cylinder
2	4	0.5	3	Cylinder
3	2	1	3	Cylinder
4	2	0.5	3	Cylinder
5	2	1	3	Cylinder & Inport
6	2	0.5	3	Cylinder & Inport

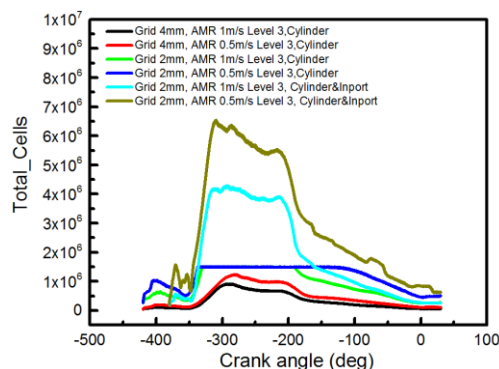


图2 网格总数

图2是各方案网格总数随曲轴转角的变化关系,速度自适应加密使得进气阶段网格总数达到最大值,方案3和方案4因为设置了最大网格数上限,网格数在相当长时间内保持同一水平,设置上限可以避免因AMR参数设置不合理而导致的计算时间大幅增加,但同时也削弱了AMR发挥的作用。

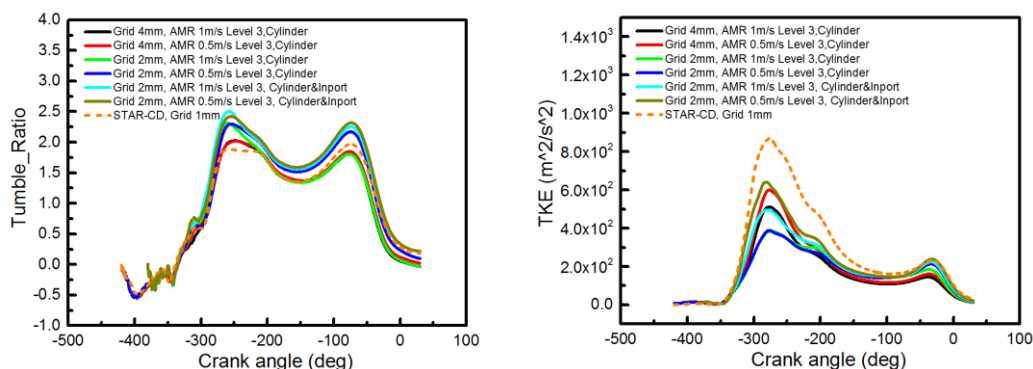


图3 不同网格设置下缸内平均滚流比及湍动能

由图3可知,网格对缸内平均滚流比及湍动能计算结果影响较大,综合对比方案5和方案3可以发现进气道网格尺寸对最终滚流比及湍动能的计算结果影响较大,因此为保证湍动能的计算精度,应对进气道网格进行加密;AMR速度梯度对湍动能的计算影响较明显,对比方案6和方案5,方案2和方案1可知,缸内AMR速度梯度减小后计算的湍动能更高,且当AMR速度梯度为0.5m/s时,更有利于压缩冲程缸内湍动能的捕捉;综合6个计算方案,在保证湍流模型参数相当的前提下,虽然Converge使用4mm基准网格计算的滚流比基本上与某商业软件计算值相当,但湍动能的值都低于某商业软件的计算值。综合计算时间成本,最终推荐方案5的网格设置方法进行不同燃烧室方案缸内流动计算。

3.2 不同燃烧室方案流动对比

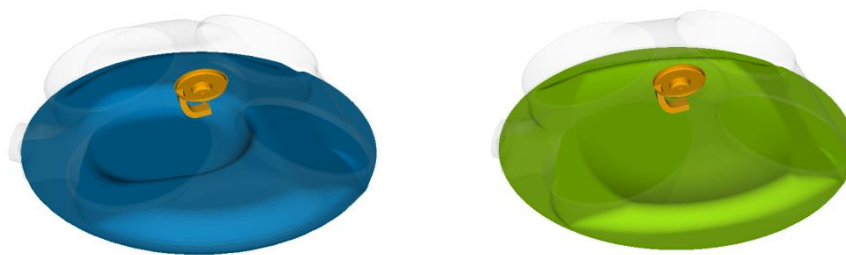


图 4 两种活塞方案（左侧 case-A，右侧 case-B）

如图 4 所示，方案 case-A、case-B 分别采用壁面导流与气体导流设计理念，两种方案的区别主要在于催化器起燃工况的实现方式。壁面导流主要依靠壁面与喷雾的相互作用，由凹坑壁面将喷雾导流至火花塞附近，从而在该区域形成较浓混合气，有利于实现快速起燃，但活塞湿壁量较多，会造成大量 PM/PN 排放，较难满足国六标准对颗粒物排放的要求；气体导流则依靠喷雾与气流的相互作用来实现快速起燃，这种方式能够通过优化喷油策略减少活塞湿壁量，从而降低颗粒物排放。

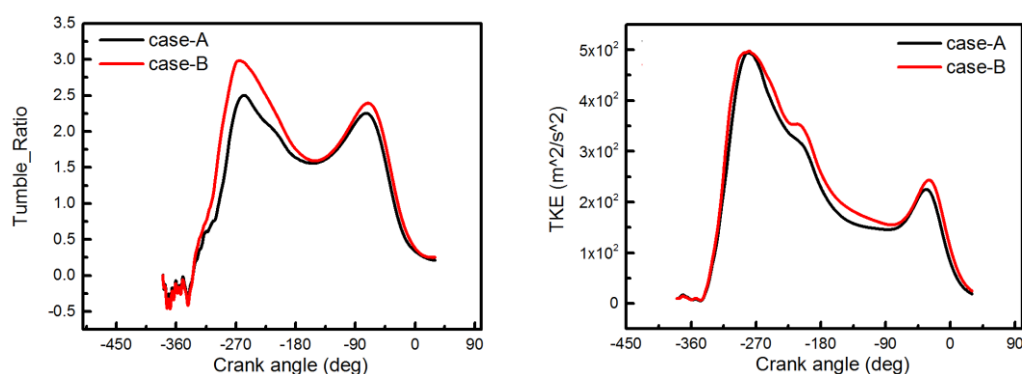


图 5 缸内平均滚流比及湍动能

两种方案采用相同网格加密方法及边界条件，缸内平均滚流比及湍动能如图 5 所示，结果表明：相比 case-A 方案，case-B 方案滚流比及点火时刻湍动能均有所提高，有利于形成均匀混合气及提高燃烧效率。

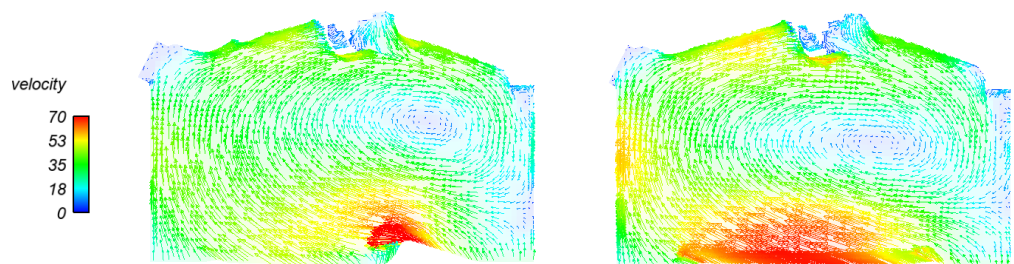


图 6 缸内流动（-70° CA，左侧 case-A 方案，右侧 case-B 方案）

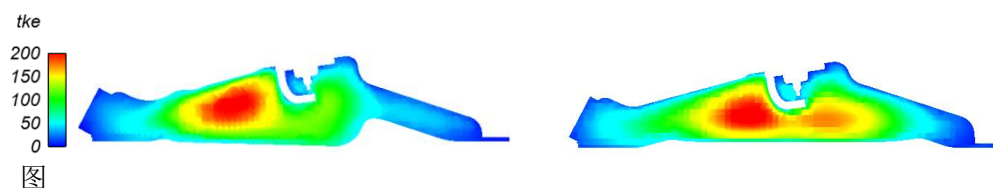


图 7 点火时刻湍动能分布（左侧 case-A 方案，右侧 case-B 方案）

图 6 是滚流比第二峰值时刻的流速矢量切片图,从图中可以看出,case-A 方案活塞凹坑对流动具有一定阻碍作用,case-B 方案活塞接近平顶,对流动基本无阻碍,更有利于滚流的形成。图 7 为点火时刻湍动能分布切片图,case-B 方案湍动能基本呈对称分布,而 case-A 方案湍动能分布不对称,且排气侧湍动能相比进气侧偏低,火焰传播速度进气侧高于排气侧,爆震风险高于 case-B 方案。综上所述,该工况下 case-B 燃烧室方案缸内流动水平优于 case-A 方案。

4 结论

本文利用 Converge 软件对长安某直喷汽油机进行了缸内流动 CFD 仿真分析。基于原机模型,研究了不同网格设置方法对计算结果的影响,并推荐了最佳的网格设置方法;然后采用相同网格设置方法,对比分析了具有不同设计理念的两种燃烧室方案缸内流动水平。本文主要结论如下:

- 1、进气道流动结果直接影响缸内形成的滚流比及湍动能,应将进气道纳入网格加密重点考虑区域;
- 2、即使采用相同湍流模型,Converge 与某商业软件计算结果仍存在一定差异,两种商业软件具有各自的特点。
- 3、基于 Converge 软件的计算结果,在额定工况下,使用气体导流设计方案在形成均匀混合气、提高燃烧效率、降低爆震风险等方面具有优势。

参考文献

- [1] 蒋德明.《内燃机燃烧与排放学》.西安交通大学出版社.2001.01
- [2] Rathinam, B., Ravet, F., Servant, C., Delahaye, L. et al., "Experimental and Numerical Investigations of Tumble Motion on an Optical Single Cylinder Engine," SAE Technical Paper 2015-01-1698, 2015, doi:10.4271/2015-01-1698.