

基于 CFD 分析增压直喷汽油机冷启动过程

Cold start characteristics simulation by CFD in a turbocharged gasoline direct injection engine

郑建军 徐之勤 陈小东 胡铁刚 詹樟松

长安汽车动力研究院, 重庆市渝北区空港大道 589 号, 401120

摘要: 本文基于三维 CFD 软件 Converge 和 STAR-CD 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机冷启动工况进行仿真分析, 计算结果表明 Converge 和 STAR-CD 在模拟缸内流动方面得到的缸内气体质量、缸内压力、温度及滚流运动水平差异较小。但 Converge 和 STAR-CD 在模拟缸内喷雾方面有一定差异, 有必要进行喷雾模型标定, 然后进行较深入的对比研究。在对冷启动工况进行 CFD 仿真计算时, 燃料组分对缸内喷雾、蒸发及缸内混合气分布有一定影响, 如采用异辛烷为燃料, 则应考虑燃料组分带来的偏差; 通过对冷启动喷射策略进行优化, 可保证在点火前缸内的液滴燃料充分蒸发, 可以在点火时刻在火花塞附近形成较理想的可燃混合气分布, 有利于增加着火可靠性及降低循环变动。

关键词: 增压直喷、汽油机、冷启动、Converge、STAR-CD

Abstract: Cold start characteristics in Changan BlueCore 1.5 TGDI engine, a turbocharged gasoline direct injection engine was numerically calculated by using two CFD codes, Converge and STAR-CD. The results show that when in-cylinder gas flow is simulated, there is little difference between the calculated results of cylinder trapped mass, average pressure, temperature and tumble ratio by using Converge and STAR-CD. However, some differences exist when in-cylinder spray and atomization is calculated by these two CFD codes. The results also show that the contents of fuel recipe has some influence on the spray and atomization simulation, especially at cold start condition, so when isooctane is selected as fuel candidate, this impact should be considered. After an optimization of the cold start injection strategy, the evaporation of almost of the fuel droplets is ensured, so the engine can get ideal mixture distribution around the sparkplug at spark timing, and it can will increase the ignitability and decrease the cycle by cycle variations of this engine.

Key words: turbocharged gasoline direct injection, engine, cold start, Converge, STAR-CD

1 序言

日益严峻的能源短缺及环境污染问题, 导致各国制定比较苛刻的汽车排放法规, 使得开发高效率和低污染汽车发动机成为内燃机工作者的目标和当务之急。柴油机由于采用较高的压缩比及无节流损失, 其燃油经济性远高于 PFI (Port fuel injection) 汽油机, 但柴油机振动噪声较大、发动

机转速范围有限、冷启动困难且 NO_x 及颗粒排放物较高。因此,在过去的几十年,内燃机工程师致力于开发一款能够同时具备汽油机和柴油机优点的发动机,即发动机油耗接近柴油机水平而保持汽油机的操作特性及比功率输出。GDI (Gasoline Direct Injection) 发动机被认为是理想的解决途径之一。因此,从上世纪 90 年代日本三菱公司开发出第一款 GDI 产品发动机以来,GDI 发动机就越来越受到人们的关注[1]。

GDI 发动机由于采用缸内直接喷射、可变喷油定时及控制缸内气流运动等方式可实现高效燃烧,使该发动机无论在燃油经济性还是在废气排放等方面都表现出比传统 PFI 发动机具有更大的发展潜力。同时 GDI 技术可以和增压技术、VVT 技术及 EGR 相结合进一步改善发动机的动力性、经济性和废气排放。近年来,将缸内直喷和涡轮增压技术相结合来改善发动机动力性、经济性及废气排放已经成为一种趋势。目前,国内外大多数汽车公司(如大众、通用、福特公司)都在致力于研究及开发增压直喷发动机产品。

在开发增压直喷发动机过程中,冷启动问题是较为关键的技术挑战之一。由于冷启动阶段缸内温度水平、气流速度及滚流运动水平较低不利于喷雾液滴的蒸发和雾化过程,容易造成燃油湿壁及火花塞附近混合气浓度较低的情况。因此,为了保证冷启动的正常着火,需要在压缩阶段末期以较高的喷射压力向缸内喷射燃料。同时,为了保证点火时刻火花塞附近混合气在当量比附近,必须采取喷油加浓模式。此外,冷启动阶段气缸内壁面温度较低不利于壁面油膜的蒸发,如果缸套及活塞表面湿壁较大,则容易造成严重的 HC 和碳烟排放问题。

为了研究增压直喷发动机冷启动特性及规律,本文基于三维 CFD 软件 Converge 和 STAR-CD 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机冷启动工况进行仿真计算。本文的大体思路是:首先在拖动转速为 115r/min 冷启动工况下,选择异辛烷为燃料(模拟汽油),对比分析采用 Converge 和 STAR-CD 软件进行数值计算结果的差异;然后基于 CFD 对比分析选择异辛烷和混合燃料(模拟汽油)计算结果的差异;最后再分析采用不同冷启动策略对缸内气体流动、喷雾、油气混合及壁面油膜生成情况的影响,为获取增压直喷发动机冷启动特性及规律提供理论及数据支撑。

2 计算模型与边界

2.1 计算模型

本文分别利用 Converge 和 STAR-CD/es-ice 进行 Bluecore 1.5L TGDI 发动机缸内网格划分。Converge 的建模过程较为简单,这是因为 Converge 是在计算过程中自动进行三维计算网格划分,建模过程只需要利用 Converge Studio 进行几何清理及边界划分,最大网格数限制为 60 万,最大尺寸 2.5mm (如图 1)。

而 STAR-CD/es-ice 的建模过程相对较复杂,其具体建模过程为:在 ProE 中提取发动机几何模型,利用 Hypermesh 进行几何清理及表面网格划分。然后利用 STAR CCM+软件的 Remesh 功能进行面网格修复、重构及特征线生成。然后利用 STAR-CD/es-ice 模块进行三维动网格创建,最后利用 Prostar 进行模型参数设置,计算网格尺度为 0.8mm,总计算网格数约为 62 万(下止点位置,如图 1)。基于拉格朗日多项流动模拟喷雾过程,液滴碰壁选用 Bai Gosman 模型,激活液滴油膜模型。计算方

程采用 $k-\epsilon$ / RNG 湍流模型，标准壁面函数法求解近壁区域内的流动，采用有限体积法进行控制方程的离散。连续方程、动量方程、能量方程及湍流控制方程均采用高阶离散格式。

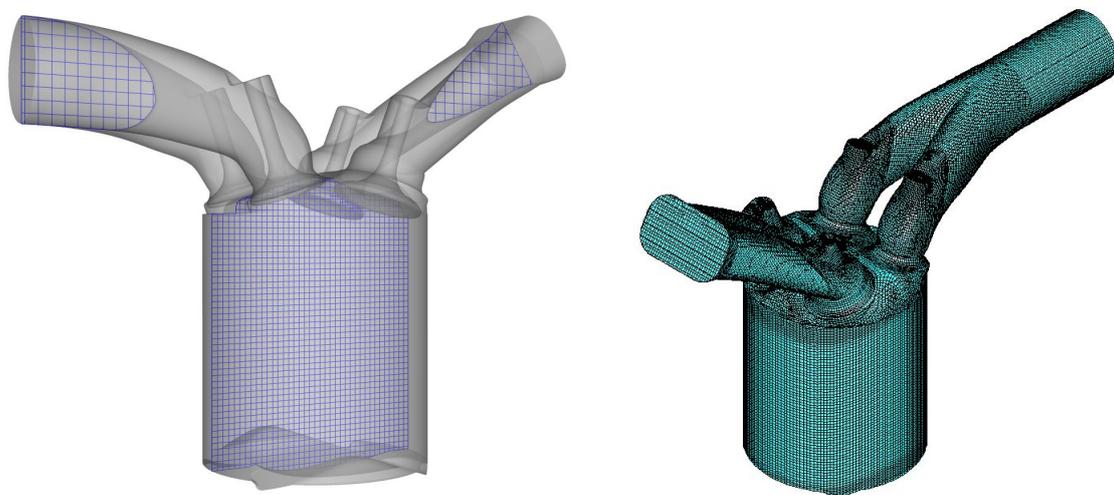


图 1 Converge 和 STAR-CD 计算模型

2.2 边界条件

对于动网格模型，设置活塞及进排气门边界为运动壁面边界，其余壁面边界为静止壁面边界。进排气相位如图 2 所示，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（如图 3 所示）。

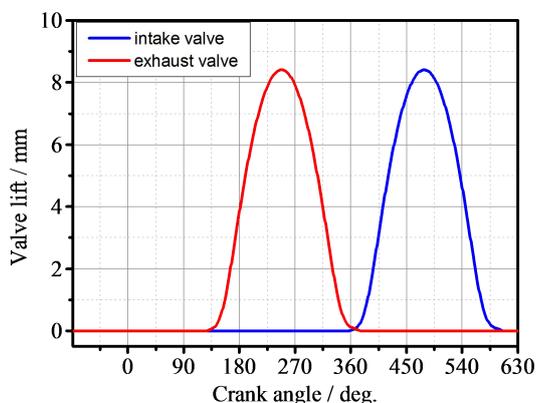


图 2 进排气相位

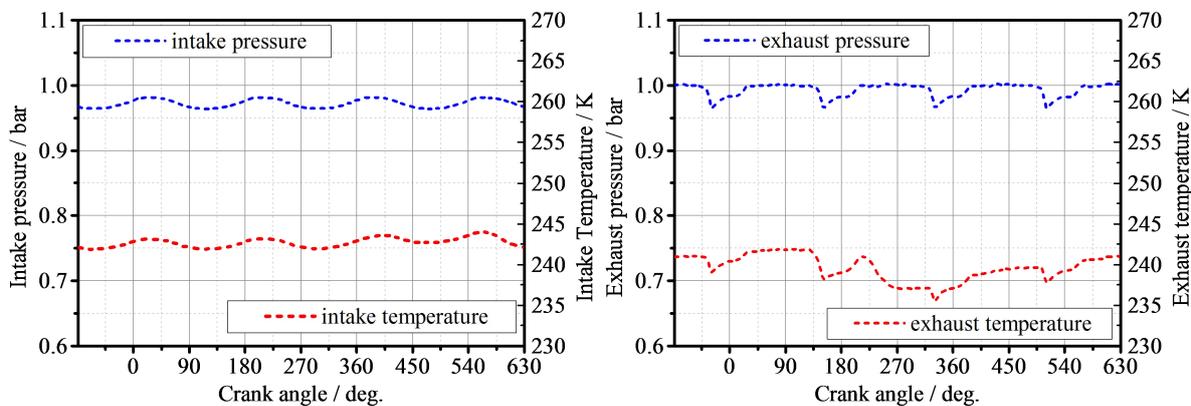


图 3 边界条件

2.3 喷雾模型设置

高压喷油器的喷雾特性参数，如喷孔直径、喷嘴流量、贯穿距、粒径分布、喷雾锥角等通过光学测试试验获得。模拟喷雾初始破碎：通过 Rosin-Rammer 概率分布函数指定喷孔出口处的粒径分布，调整期望值与方差，使目标平面的索特平均直径（SMD）和试验值相一致。STAR-CD 喷雾的二次破碎模型通过 Reitz-Diwakar 模型进行模拟，计算得到喷雾形态如图 4 所示。喷嘴在发动机上的安装位置如图 5 所示。Converge 喷雾选择 IDAJ 公司推荐的 KH-RT 破碎模型。

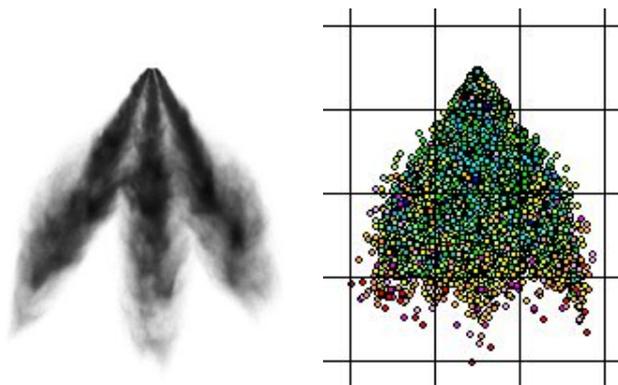


图 4 试验与仿真喷雾形态对比

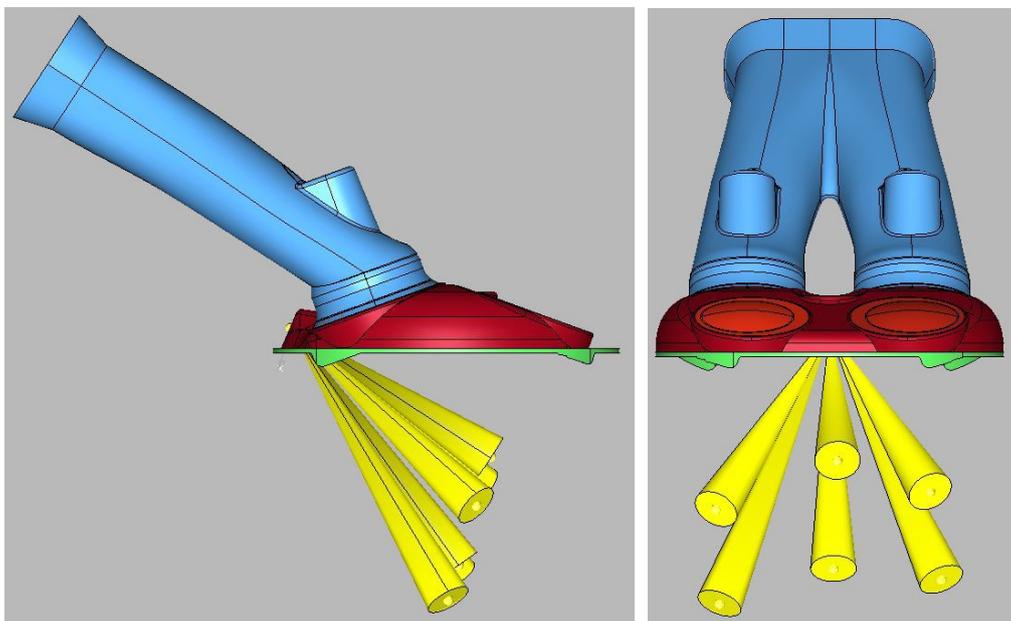


图 5 喷嘴在发动机上的安装位置

3 计算结果及分析

3.1 Converge 和 STAR-CD 计算对比

在拖动转速为 115r/min 冷启动工况下，选择异辛烷为燃料（模拟汽油），分别采用 Converge 和 STAR-CD 软件进行缸内流动、喷雾及混合气形成过程 CFD 计算。图 6 给出了采用 Converge 和 STAR-CD 软件计算得到的缸内气体质量、缸内平均气体压力、缸内平均气体温度及滚流比的仿真结果。可以

看出, 在燃料喷射开始之前 (SOI1~14.8° BTDC), Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内气体质量、缸内压力和温度几乎一致。但是在燃料喷射开始以后 Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内气体质量、缸内压力和温度表现出较大差别, 这是因为 Converge 和 STAR-CD 选用的喷雾子模型初次及二次破碎模型有所差异, 导致燃料破碎及蒸发过程有所差异引起的。Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内滚流比曲线稍有差异, 这可能是由于 Converge 和 STAR-CD 计算设置的初始时刻 (STAR-CD 计算起始角度设置为 320 度, 而 Converge 计算起始角度设置为 360 度) 不同引起的。

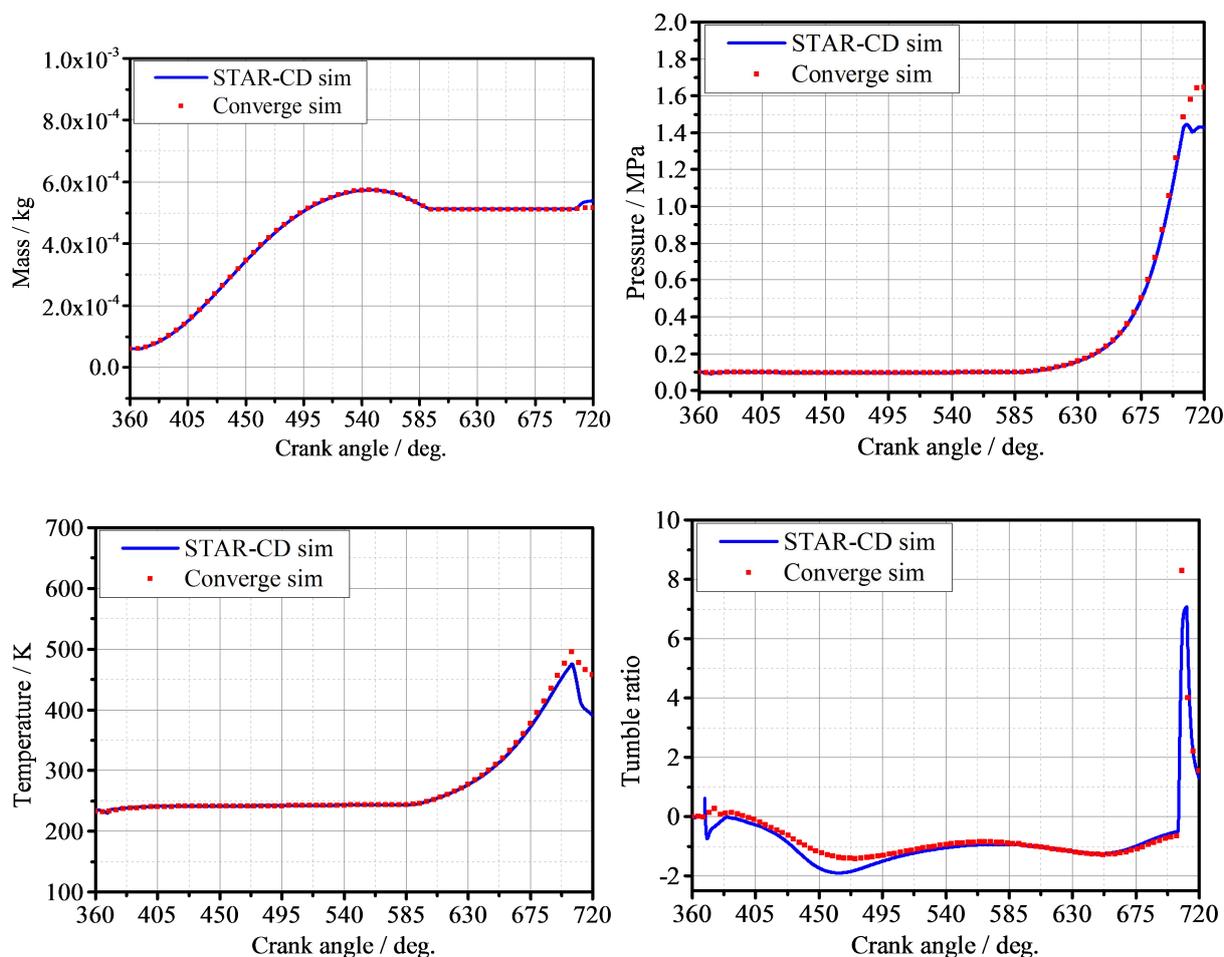


图6 采用 Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内气体质量、缸内压力、缸内温度及滚流比对比

图7给出了采用 Converge 和 STAR-CD 软件计算得到的在下止点 (CA=540 度) 缸内速度云图对比情况。虽然从缸内速度云图三维空间分布可以看出 Converge 和 STAR-CD 计算结果有所差异, 但基本上都可以反映出缸内滚流运动情况, 在进气门右下侧存在回流区, 进气门左侧流通区域局部流速较高, 在靠近汽缸壁及活塞表面附近局部速度较高, 而在滚流运动中心处局部速度较低; 值得一提的是 Converge 预测的滚流运动中心比 STAR-CD 稍靠低 (靠近活塞表面)。

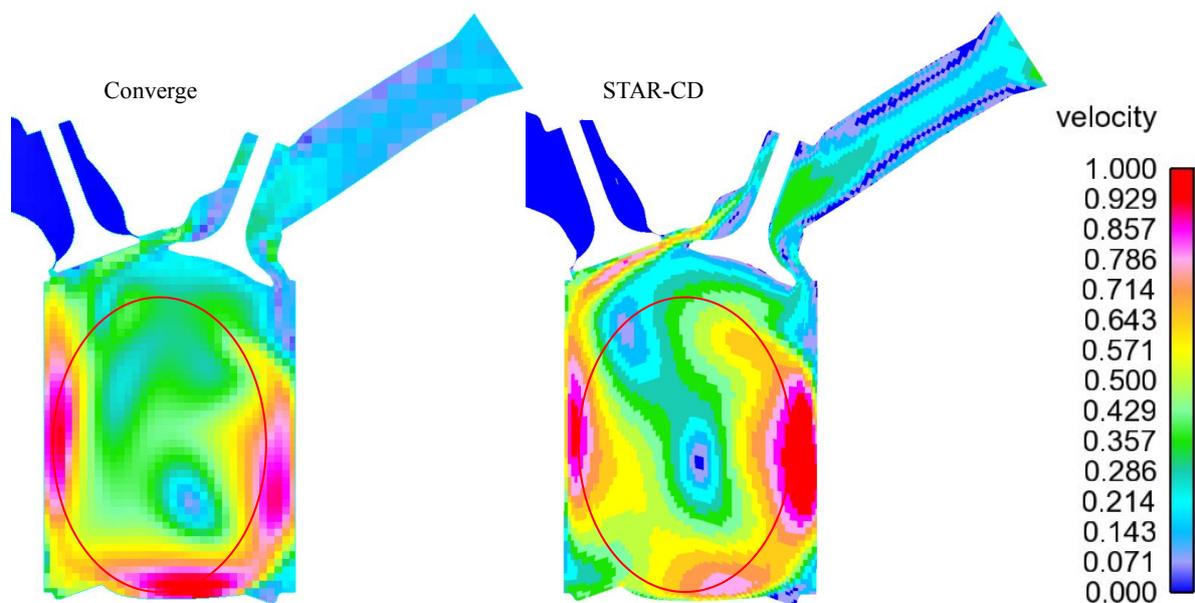


图 7 采用 Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内流场对比 (CA=540 度)

图 8 给出了采用 Converge 和 STAR-CD 软件计算得到的在下止点 (CA=540 度) 缸内湍动能云图对比情况。虽然从缸内湍动能云图三维空间分布可以看出 Converge 和 STAR-CD 计算结果有所差异,但基本上都可以反映出缸内湍动能分布情况,在滚流运动中心区域附近局部湍动能较高,而在靠近汽缸壁及活塞表面附近局部湍动能较低。缸内速度及湍动能云图的差异可能是因为 Converge 和 STAR-CD 计算设置的初始时刻有差异引起的。

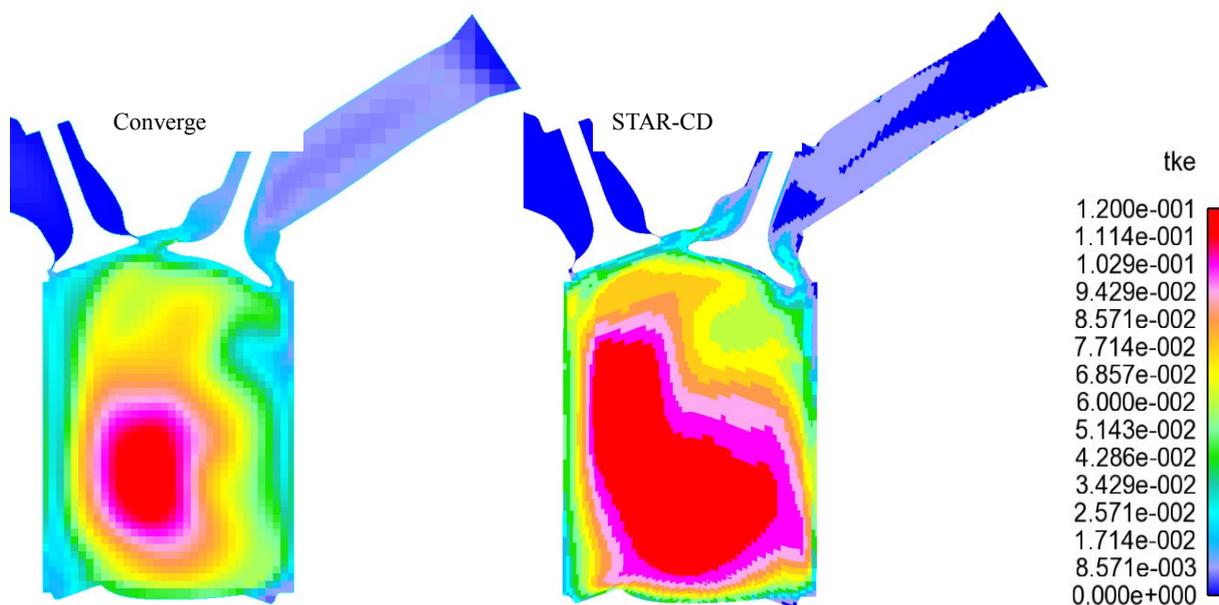


图 8 采用 Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内湍动能对比 (CA=540 度)

图 9 和图 10 分别给出了采用 Converge 和 STAR-CD 软件计算得到的在点火时刻 (CA~720 度) 缸内燃料浓度分布及活塞和缸套上油膜厚度的对比情况。由于 Converge 和 STAR-CD 选用的喷雾子模型

初次及二次破碎模型有所差异，导致燃料破碎及蒸发过程有所差异，导致壁面油膜量及缸内可燃混合气浓度分布有所不同。

总体来说 Converge 和 STAR-CD 这两款 CFD 软件在模拟缸内流动方面差异不是太大，但是在模拟缸内喷雾（选用默认喷雾模型）方面有一定差异，有必要进行基于 Converge 和 STAR-CD 进行喷雾模型标定，然后进行较深入的对比研究。

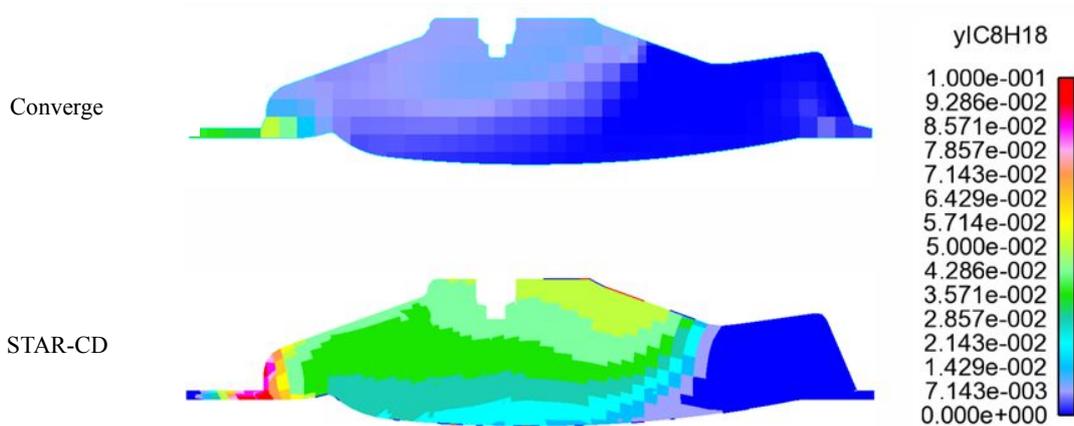


图 9 采用 Converge 和 STAR-CD 计算得到的缸内燃料浓度对比 (CA=540 度)

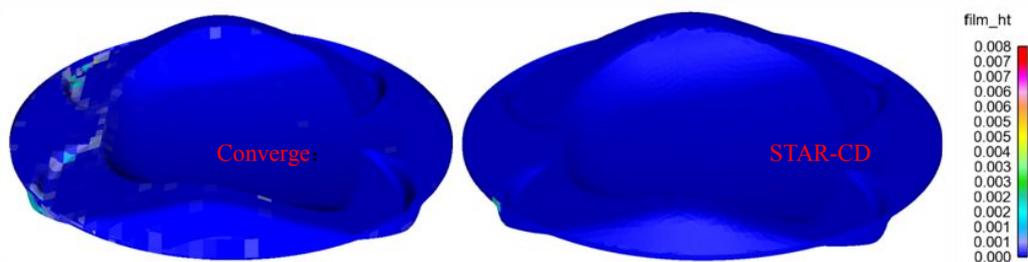


图 10 采用 Converge 和 STAR-CD 计算得到的壁面油膜厚度对比 (CA=540 度)

3.2 基于 CFD 的异辛烷和混合燃料对比

一般来说暖机工况下的模拟可选用异辛烷为燃料，因为异辛烷的蒸馏曲线主要分布在汽油(混合物)蒸馏曲线的中间区域。但是在冷启动工况下，选择异辛烷（模拟汽油）进行仿真，则缸内喷雾、蒸发及可燃混合气形成过程会有一定误差[3]。因此，本文基于 CFD 对比分析选用异辛烷和一种混合燃料（成分见表 1, 蒸馏曲线和汽油基本一致）对缸内流动、喷雾及混合气形成影响的差异。

表 1 混合燃料组分表[3]

燃料组分	比例/质量分数
正戊烷	0.22
异辛烷	0.58
正癸烷	0.20

图 11 给出了基于两种燃料组分计算得到的缸内气体质量、缸内平均气体压力、缸内平均气体温度及滚流比的仿真结果。由于燃料喷射之前缸内流动情况基本相同，因此燃料组分带来的差别主要在于喷雾阶段。可以看出，在燃料喷射开始以后采用混合燃料计算得到的缸内气体量和峰值滚流比较大，这是因为混合燃料中包含沸点较低的正戊烷组分，在较低的缸内温度下正戊烷优先蒸发，导致缸内气体量及滚流比的增加。但基于两种燃料组分计算得到的缸内平均气体压力和缸内平均气体温度差别较小，正戊烷的优先蒸发对缸内平均气体压力和温度的改变作用不明显。

图 12 给出了基于两种燃料组分计算得到的在点火时刻(CA~720 度)缸内燃料浓度分布情况对比。可以看出基于混合燃料计算得到的缸内混合气浓度较高，局部当量比较大。基于异辛烷(单一燃料)计算得到的火花塞附近的局部当量比约为 0.7 左右，而基于混合燃料计算得到的火花塞附近的局部当量比则大于 0.8。因此，燃料组分对缸内混合气浓度分布有一定影响，在冷启动工况采用异辛烷(模拟汽油)为燃料计算缸内喷雾、蒸发及混合气浓度分布时应考虑燃料组分带来的偏差。

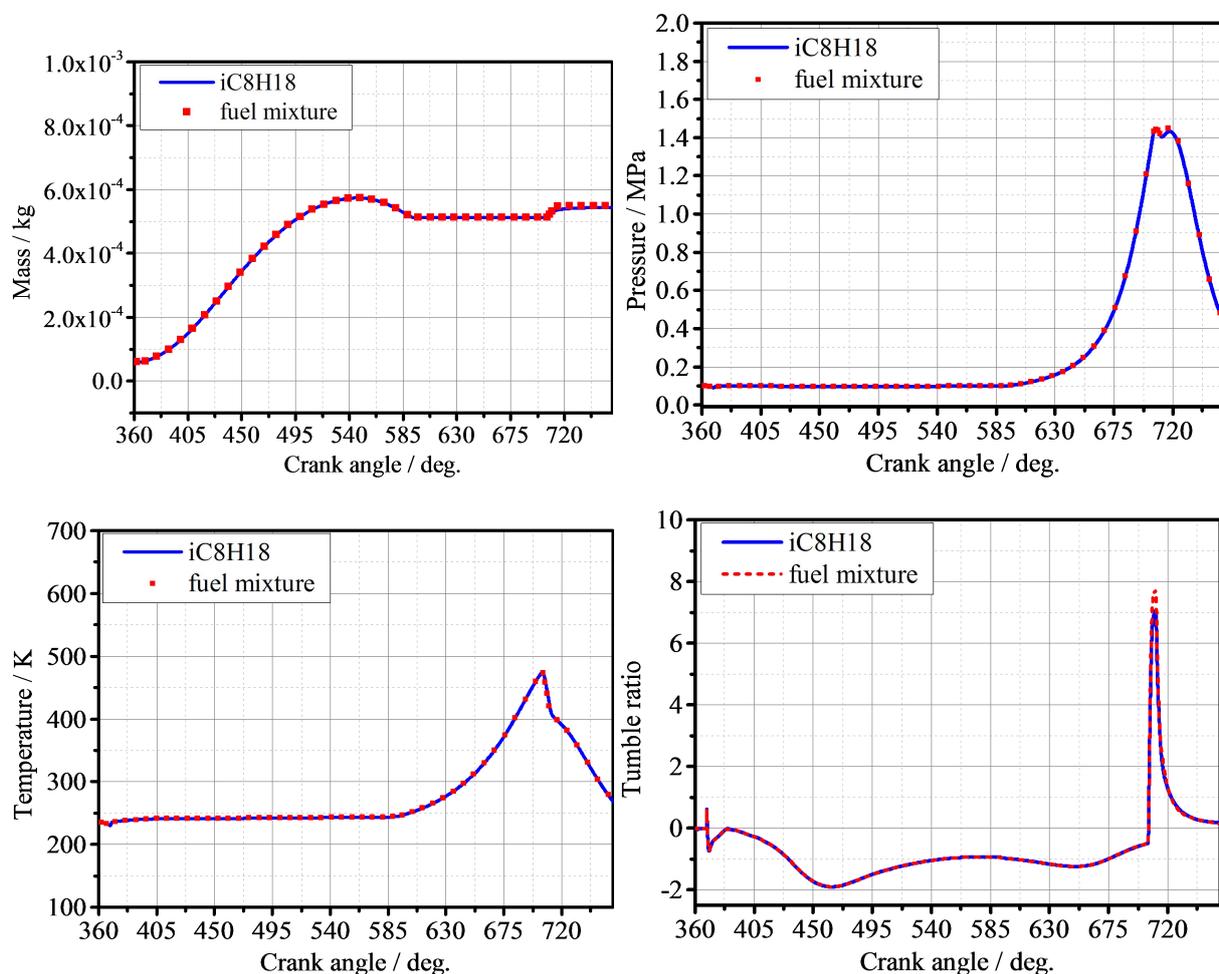


图 11 不同燃料组分对缸内气体质量、缸内压力、缸内温度及滚流比对比

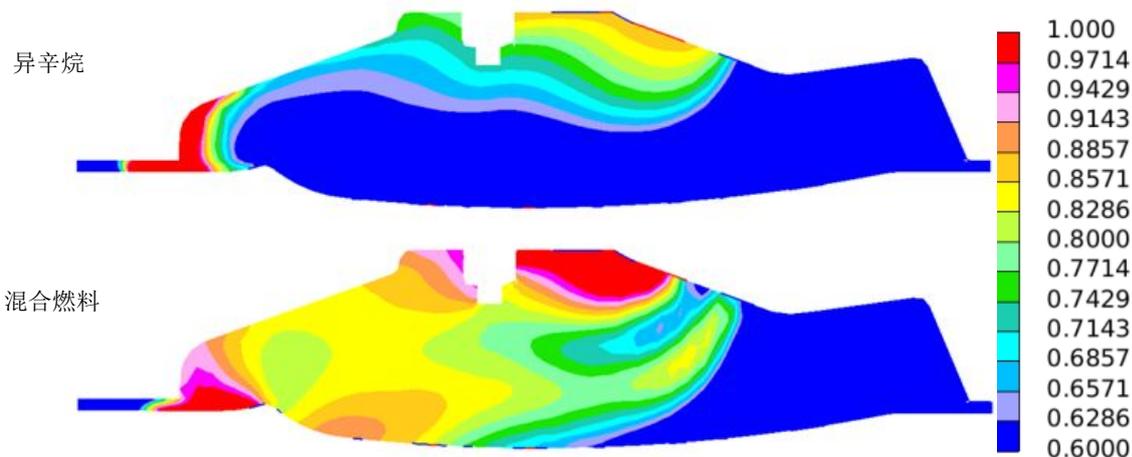


图 12 不同燃料组分下的缸内混合气当量比的对比

3.3 基于 CFD 的冷启动策略优化

在拖动转速为 115r/min 冷启动工况下，基于混合燃料计算得到的火花塞附近的局部当量比小于 1.0（局部混合气偏稀），不利于冷启动初始着火及随后的启动过程，需要对冷启动策略进行优化。。因此，本文提出一种优化的冷启动策略，即适当提前喷油相位 (SOI~25.6° BTDC)，给喷射到缸内的燃料充足的蒸发时间以实现在点火时刻在缸内形成较理想的可燃混合气分布。图 13 给出了采用两种冷启动策略计算得到的缸内混合气浓度分布对比情况。可以看出采用优化的冷启动喷射策略后，在点火时刻在火花塞附近的局部当量比在 1.0~1.1 之间，有利于初始着火及随后的启动过程。

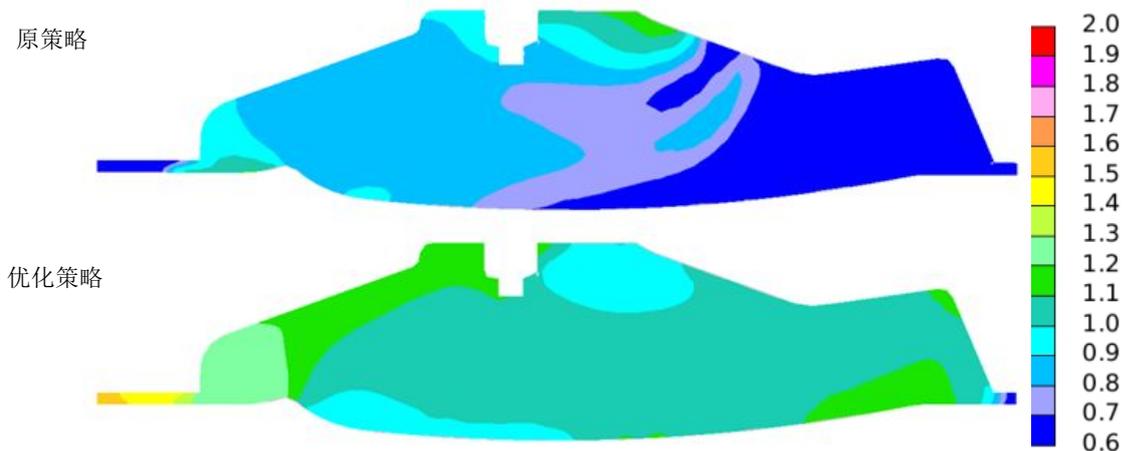


图 13 不同冷启动策略下的缸内混合气当量比的对比

图 14 给出了采用两种冷启动策略计算得到的缸内燃料蒸发情况对比。可以看出采用优化的冷启动喷射策略后，在点火时刻缸内的液滴燃料基本上已经蒸发，而采用原策略则在点火时刻缸内的液滴燃料并没有完全蒸发。这是因为采用优化的冷启动策略，喷射到缸内的燃料有充足的蒸发时间以实现在点火时刻在缸内形成较理想的可燃混合气分布。图 15 给出了缸内混合气的均匀性指数随曲轴

转角变化的关系曲线, 采用优化的冷启动喷射策略后, 缸内混合气分布较为均匀, 火花塞附近的浓度梯度小, 有利于增加着火可靠性及降低循环变动。

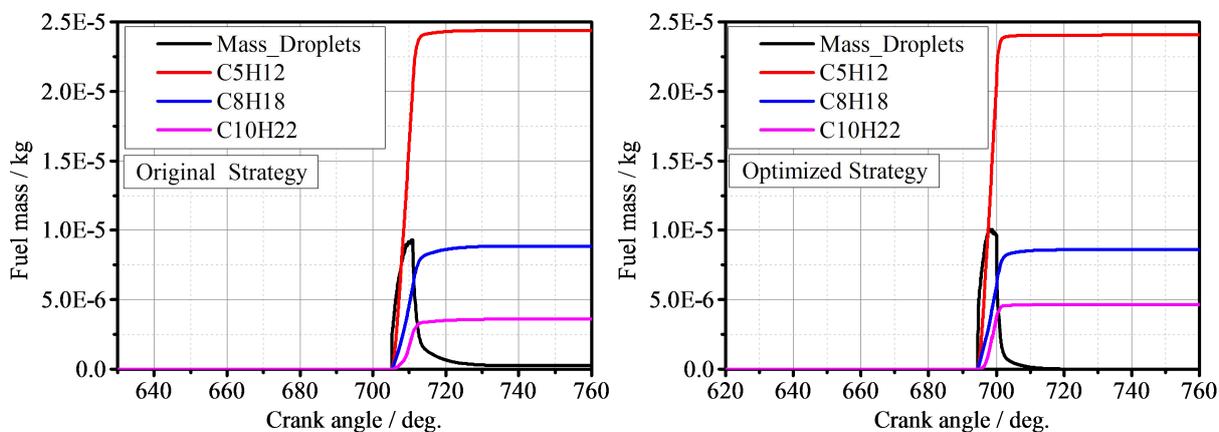


图 14 不同冷启动策略下的缸内混合气当量比的对比

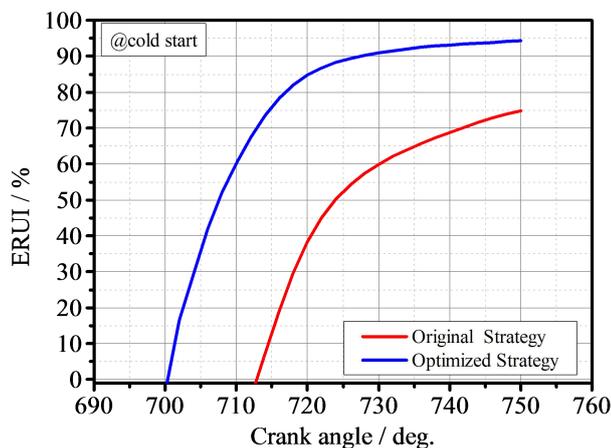


图 15 不同冷启动策略下的缸内混合气的均匀性指数的对比

4 结论

为了研究增压直喷发动机冷启动特性及规律, 本文基于三维 CFD 软件 Converge 和 STAR-CD 对长安蓝芯 1.5TGDI 发动机冷启动工况进行仿真分析, 本文的主要结论如下:

1) . Converge 和 STAR-CD 在模拟缸内流动方面得到的缸内气体质量、缸内压力、温度及滚流运动水平差异较小;

2) . Converge 和 STAR-CD 在模拟缸内喷雾 (都选用默认喷雾模型) 方面有一定差异, 有必要进行喷雾模型标定, 然后进行较深入的对比研究;

3) . 燃料组分对缸内混合气浓度分布有一定影响, 在冷启动工况采用异辛烷 (模拟汽油) 为燃料计算缸内喷雾、蒸发及混合气浓度分布时应考虑燃料组分带来的偏差;

4) . 采用优化的冷启动喷射策略, 可保证在点火前缸内的液滴燃料充分蒸发, 可以在点火时刻在火花塞附近形成较理想的可燃混合气分布, 有利于增加着火可靠性及降低循环变动。

5 致谢

本论文的研究工作得到长安英国中心陈向东博士、IDAJ 公司钟修林经理及叶良春工程师的指导和大力支持，在此表示感谢。

6 参考文献

- [1] Zhao F., Lai M. C., Harrington D. L., Automotive Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines, Progress in Energy and Combustion Science, 1999, 25: 437-562
- [2] CONVERGE 2.1.0 Theory Manual, Convergent Science, Inc. 2013.
- [3] Xu Z., Yi J., Curtis E., Wooldridge S. Applications of CFD Modeling in GDI Engine Piston Optimization, 2009, SAE2009-01-1936