

GDI 汽油机喷雾油束优化仿真

Spray Pattern Optimization and Simulation for GDI Engine

杨洋 张小矛 陈明 徐政 陈曦 林长林 丁宁

(上海汽车集团股份有限公司技术中心, 上海市汽车动力总成重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 喷油器的油束靶点是影响 GDI 增压汽油机缸内燃油湿壁和油气混合均匀性的关键因素。本文基于 CONVERGE 软件对某 2.0L 增压侧置式直喷汽油机的缸内流动、喷雾和油气混合过程进行了仿真研究, 通过对缸内流场、喷雾、燃油湿壁和混合气分布的详细分析, 从三种油束靶点方案中筛选出了最优的方案: Inj-D。

关键词: 喷雾靶点; 油气混合; 数值仿真; CONVERGE

Abstract: Spray pattern for GDI engine has obvious influence on fuel wall wetting and mixture formation. This paper did the numerical research of in-cylinder flow, spray, wall film and mixture formation process, with a focus on effects of spray pattern on wall wetting and mixture distribution for a 2.0L turbo charger GDI engine based on CONVERGE. The best spray pattern named Inj-D was chosen by CFD simulation within three spray pattern proposals.

Key words: Spray target; Mixture formation; Numerical simulation; CONVERGE

1 概述

对于 GDI 汽油机, 由于其燃油直接喷入缸内, 在气流较弱或喷油量较大的工况下, 极易产生燃油湿壁或油气混合不均匀等问题, 因此需要喷雾油束靶点和燃烧室及气流运动进行合理的匹配。近年来, 运用 CFD 仿真分析的方法, 通过缸内流场、喷雾和油气混合过程仿真计算进行喷油器油束靶点方案的设计和优化已成为 GDI 汽油机燃烧系统开发的关键手段^[1-4]。

本文运用三维 CFD 软件 CONVERGE 对某 2.0L 直喷增压汽油机进行了仿真分析, 对比了不同类型的喷雾油束靶点方案的缸内流动、喷雾和油气混合情况, 从而优选出适用于该燃烧系统的喷油器油束靶点方案。

2 研究对象及模型设置

2.1 研究对象

本文研究的对象是某款 2.0L 直列四缸涡轮增压发动机, 发动机的主要技术参数如表 1 所示。其中进气道为高滚流比进气道; 燃烧室型式为屋脊型, 进气侧带有 Masking 特征, 用以提高低升程下的缸内滚流比, 因为缸径较大, 排气侧和另外两侧都采用了挤流面设计; 喷射方式为侧置、多孔式喷射; 燃烧系统 CAD 模型如图 1 所示。

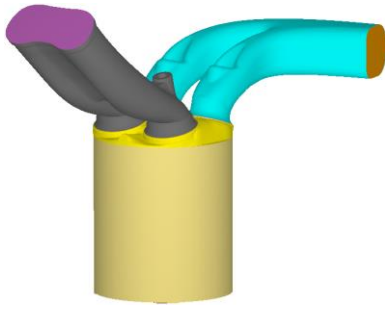


图 1 发动机 CAD 模型

表 1 发动机主要技术参数

参数名称/单位	参数值
缸径/mm	82.5
冲程/mm	93
总排量/L	2.0
压缩比	11.5
喷孔数	5/6
最大喷油压力/bar	350

设计了三种不同类型的油束靶点方案进行分析，如表 2 所示，其中按照不同的布置型式分为三种：人字型（R 型）、树型（T 型）钻石型（D 型）。分析工况包括 1200rpm/1bar（催化剂起燃工况）、2000rpm/WOT 和 5500rpm/WOT（额定功率点）。

表 2 喷油器靶点方案（基础方案）

	Inj-D	Inj-R	Inj-T
喷孔数	6	5	6
喷雾靶点			
靶点型式	D 型（Diamond 型）	R 型（人字型）	T 型（Tree 型）

2.2 模型设置

本文采用的网格控制策略是基础网格为 1mm；为保证计算网格的一致性，并未采用自适应网格加密 AMR，而是对进气道、燃烧室顶部、缸套、活塞等壁面，以及喷嘴处区域和各个油束进行了不同程度的 Fixed embedding 网格加密，总网格数不超过 200 万。

CFD 仿真分析包含了进气、缸内流动、喷雾和油气混合的过程，湍流模型采用标准 k- ϵ 模型；喷雾破碎模型采用 KH-RT 模型；蒸发模型采用的 Frossling 模型；为详细考察活塞和缸套的湿壁现象以及燃烧过程，碰壁模型选用 Wall Film 模型。计算范围包含从进气门打开到点火上止点。

进出口边界分别赋予瞬态压力和温度值，数据来自与试验对标过的一维 GT-Power 模型计算结果。计算模型的温度边界条件采用固定壁温，按边界分区赋予工程经验值，将其作为缸内工作过程计算的换热边界条件。进气道内初始组分为空气，包含氧气和氮气；气缸内和排气道内初始组分为燃烧废气，包含二氧化碳、水蒸气、氮气，其比例按照当量空燃比计算得出。

2.3 定容弹喷雾标定

一般情况下，软件默认的喷雾破碎模型参数不能精确的表征实际的喷雾状态，不能直接用于 GDI 发动机喷雾油束靶点方案的设计与优化工作中，因此，喷雾破碎模型的标定就显得很有必要。图 2 和图 3 是 CFD 和实测的喷雾型态和贯穿距对比图，不论是喷雾型态还是喷雾贯穿距，CFD 喷雾标定

的结果与实验结果都十分吻合，且喷嘴下 50mm 平面处的 SMD 值也十分吻合。基于高度吻合的 CFD 喷雾标定结果，将用于后续的缸内油气混合计算中^[5]。

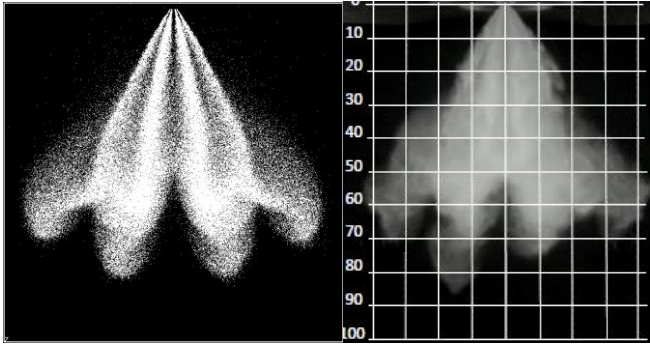


图 2 1.5ms 时刻 CFD 和实测喷雾型态图

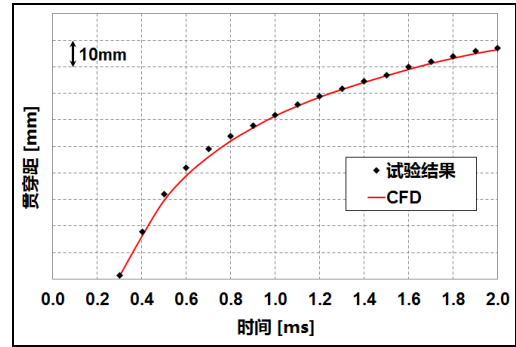


图 3 CFD 和实测贯穿距对比图

3 计算结果及分析

利用 CFD 计算方法对油束方案进行筛选，需根据实际情况，对不同工况下不同的评价指标给予不同的权重。例如对于一些常用工况：催化剂起燃工况（1200rpm-1bar）和低速全负荷工况（2000rpm-WOT），考虑到 PN、THC 排放和机油稀释，以及点火、火焰传播速率，需要同时重点关注活塞和缸套的燃油粘壁量，以及点火时刻缸内的油气混合均匀性，因此权重较高。而功率点工况相对应用时间较少，且该工况下进气量大，气流较强，一般情况下都能形成较为均匀的混合气，因此评价的权重较低；但因为该工况 λ 加浓，喷油量大，喷油持续期较长，较低速工况提前喷油，极易造成活塞的燃油粘壁，因此需重点关注该工况下的活塞湿壁。

3.1 催化剂起燃工况

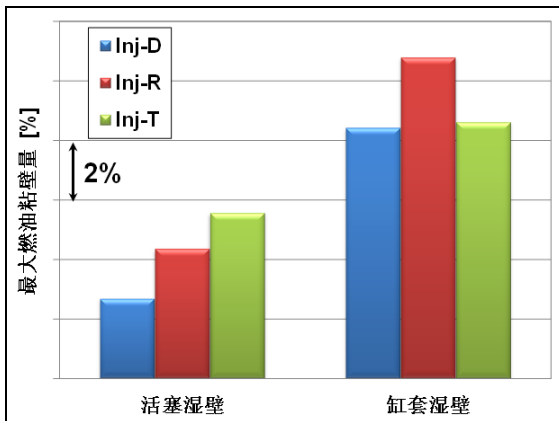


图 4 活塞和缸壁燃油湿壁（1200rpm/1bar）

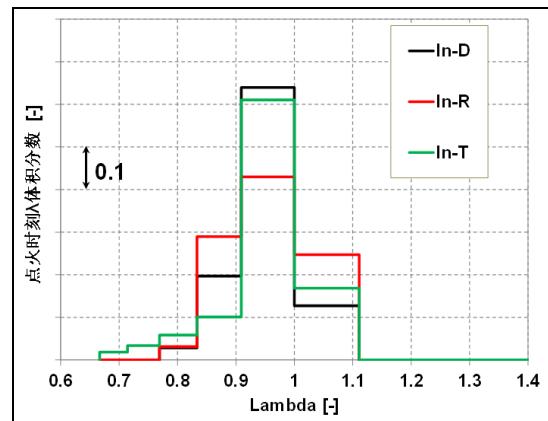
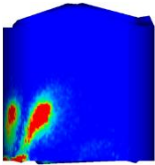
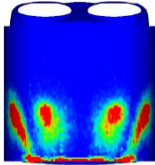
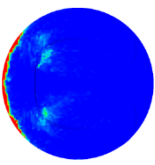
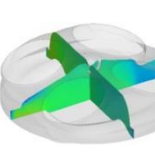
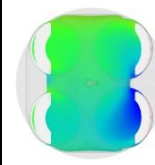
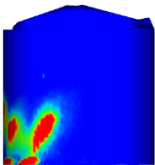
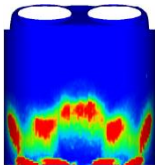
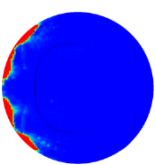
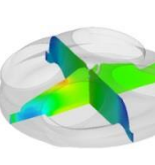
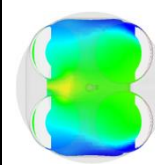
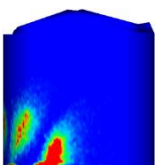
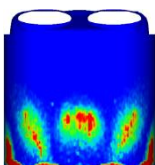
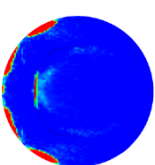
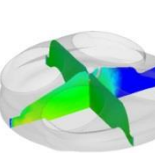
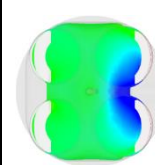


图 5 点火时刻 λ 体积分布（1200rpm/1bar）

图 4 和图 5 分别是 1200rpm/1bar 工况下的活塞和缸壁燃油湿壁对比图和点火时刻 λ 的体积分布图，由于该工况下进气量较少，气流运动较弱，加之壁温较低，因此活塞和缸套上都聚集了较多的油膜，但总体来说，活塞上的油膜量低于缸套。各油束方案之间，Inj-D 方案的活塞和缸套上的油膜量均最少，且 λ 的体积分布也最均匀，说明该方案油束布置更加合理。表 3 显示了 1200rpm/1bar 工况下的油膜分布和 λ 分布情况，其中 Inj-R 方案的缸套油膜量最多，原因是该方案喷孔数量为五孔，在相同流量下每孔分配的流量增多，且孔径更大，SMD 和喷雾贯穿距增大，故导致其缸套上燃油湿

壁量高于其他两个六孔方案。而 Inj-T 方案的活塞油膜量最多，原因是第二束油与活塞的距离最小，喷出的油束直接打到了活塞上。Inj-D 为菱形布置，靠上的四束燃油在缸壁上形成了油膜，且位置较高，其缸套湿壁量与 Inj-T 方案接近，靠下的两束燃油在缸壁与活塞相交的区域形成了油膜。从 λ 分布云图看，混合情况与 λ 体积分布一致，Inj-D 方案混合均匀性最优，这将有利于火焰的均匀传播，且火花塞附近混合气较浓，也更加有利于冷启动点火。该工况下 Inj-D 方案综合表现最好。

表 3 油膜分布及 λ 云图 (1200rpm/1bar)

	缸套油膜分布		活塞油膜分布	点火时刻 λ 分布	
Inj-D					
Inj-R					
Inj-T					

3.2 低速全负荷工况

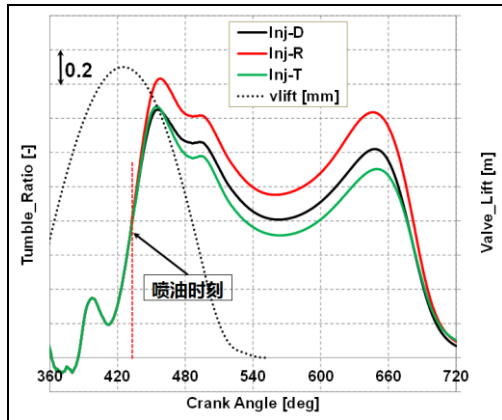


图 6 缸内滚流比 (2000rpm/WOT)

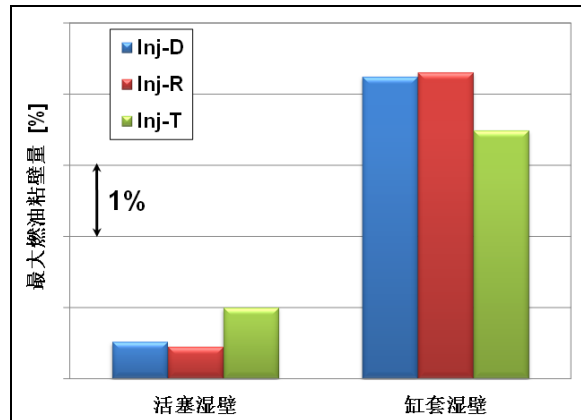


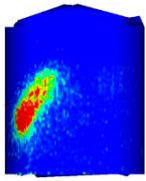
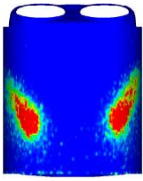
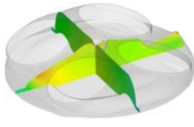
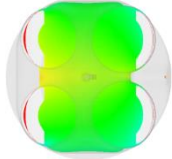
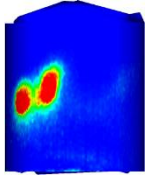
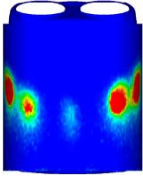
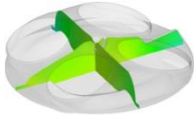
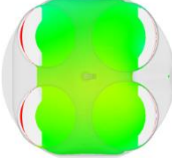
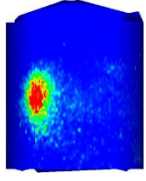
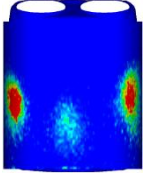
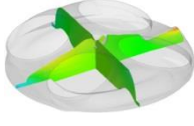
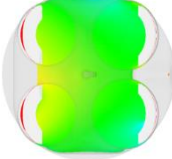
图 7 活塞和缸壁燃油湿壁 (2000rpm/WOT)

图 6 是 2000rpm/WOT 工况下缸内滚流比对比图，由图可知，不同的油束方案对缸内滚流的发展影响较大，其中 Inj-R 方案的滚流比最高，Inj-D 方案次之，Inj-T 方案最弱。根据以往的油束设计经验，对于侧喷 GDI 发动机，油束抬得越高，其对气流的抑制作用越小，缸内滚流比和湍动能就越高；油束压得越低，其对气流的抑制作用越大，缸内滚流比和湍动能就越低，此经验在本文的几个方案中也得到了很好的呼应。Inj-R 方案的油束抬得最高，Inj-D 方案次之，Inj-T 方案压得最低。

图 7 和表 4 分别是 2000rpm/WOT 工况下活塞和缸壁燃油湿壁对比图和油膜分布、点火时刻的 λ

分布图，由图和表可知，该工况下的油膜主要集中在缸套上，活塞上的油膜量偏少（因此图中不再显示活塞油膜），主要原因是由于该工况下进气量较大，且气流运动较强，缸内及壁面温度较高，燃油雾化较好，油束达到壁面之前活塞已经下行较远，加之气流对油粒的卷吸作用使得油粒并没有直接打在活塞上，活塞上少量的油膜主要是油束打在缸套上再往下反弹所致。各油束方案之间，Inj-T 方案的活塞油膜量最多，而缸套油膜量最少；Inj-R 方案的活塞油膜量最少，而缸套油膜量最多；Inj-D 方案则处于中间位置，总体来说该工况下三个方案的油膜量处于同一水平。从点火时刻的 λ 分布看，三个方案的油气混合均匀性都较好，也基本处于同一水平。

 表 4 油膜分布及 λ 云图（2000rpm/WOT）

	缸套油膜分布		点火时刻 λ 分布	
Inj-D				
Inj-R				
Inj-T				

3.3 功率点工况

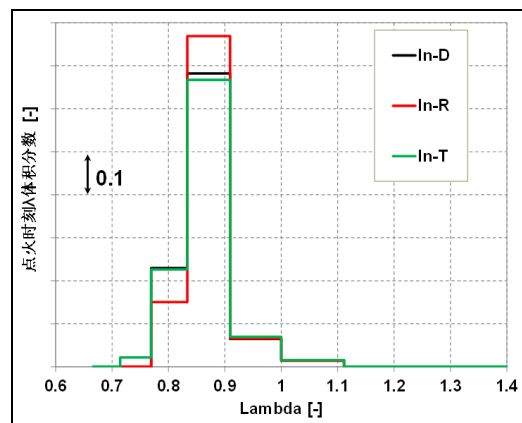
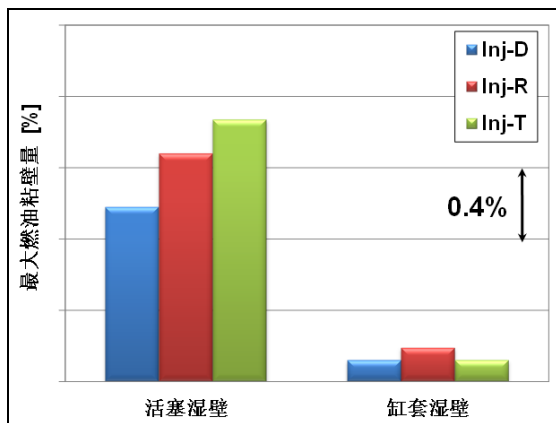
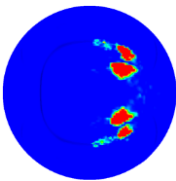
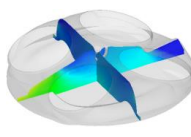
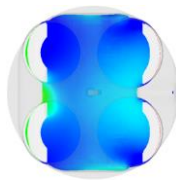
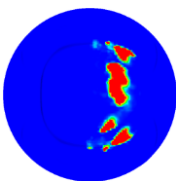
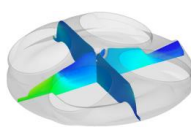
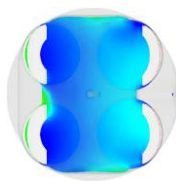
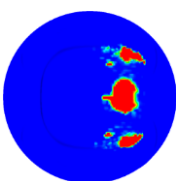
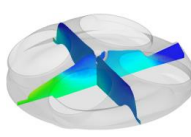
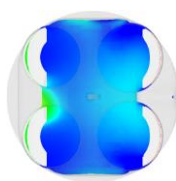

 图 8 活塞和缸壁燃油湿壁（5500rpm/WOT） 图 9 点火时刻 λ 体积分布（5500rpm/WOT）

图 8 和图 9 分别是 5500rpm/WOT 工况下的活塞和缸壁燃油湿壁对比图和点火时刻 λ 的体积分布图，由于该工况下的进气量最大，且气流强度最强，对油束的干扰作用也越强，加之此时缸内气体和壁温都最高，有利于油粒的雾化和蒸发，因此该工况下的油膜量百分比最小。但与 2000rpm/WOT

工况不同的是,该工况下油膜主要出现在活塞上,且油膜量总体比缸套上多,主要原因是喷油量大,喷油持续期很长(接近或略超过一个活塞行程),较低速工况提前喷油,活塞还未远离上止点,油束就已打到其表面;而缸套上的油膜量较少。各油束方案之间,Inj-T 方案的油膜量最高,Inj-R 方案次之,Inj-D 方案最低,这再次说明了 Inj-D 方案布置的合理性。活塞上的油膜量由 Inj-D、Inj-R 到 Inj-T 逐渐增加,这与低速全负荷工况下缸套油膜量逐渐减少的趋势相反,这也说明缸套湿壁和活塞湿壁存在某种跷跷板关系,对于油束靶点设计来说,其目标就是找到某种平衡,使得不同工况下缸套湿壁和活塞湿壁都处于相对最低水平。表 5 的油膜分布及 λ 云图是以上图表数据的直观体现。

表 5 油膜分布及 λ 云图 (5500rpm/WOT)

	活塞油膜分布	点火时刻 λ 分布	
Inj-D			
Inj-R			
Inj-T			

4 结论

运用 CONVERGE 软件,通过缸内 CFD 计算,完成了油束方案的筛选和优化,结论为:对于三重不同类型的喷油器靶点方案,通过三个典型工况的计算,对其缸套油膜量、活塞油膜量、点火时刻缸内油气混合均匀性进行不同权重的评价,筛选出最优的油束方案: Inj-D。

5 参考文献

- [1] Jun Xin, Ming Chen, Xi Xin, et al. Development of MGE 1.8T Combustion System Assisted by Numerical Simulation. Int. J. of Powertrains. Special Issue on: Advanced Engine Combustion, 2016.
- [2] Zheng Xu, Jianwen Yi and Steven Wooldridge, et al. Modeling the Cold Start of the Ford 3.5L V6 EcoBoost Engine. SAE Paper 2009-01-1493, 2009.
- [3] 信曦. 喷雾靶点对侧置式直喷汽油机油气混合和燃烧的影响. IDAJ-China 中国用户论文集, 2016.
- [4] 王建昕. 《汽车发动机原理》. 清华大学出版社, 2011.
- [5] 杨洋. GDI 发动机喷雾破碎模型参数敏感性分析研究. IDAJ-China 中国用户论文集, 2018.