

基于 CONVERGE 的柴油机燃烧室响应面的优化设计

Optimization of Combustion System Parameters on Diesel Engine of CONVERGE software

翟海朋^{1,2}, 臧儒振^{1,2}, 杨敏敏^{1,2}, 彭飞^{1,2}

(1. 长城汽车股份有限公司技术中心, 河北保定市 071000

2 河北省汽车工程技术研究中心, 河北保定市 071000

摘要: 为应对国六排放, 本文基于某款柴油发动机, 将活塞燃烧室的结构进行参数化, 运用 CONVERGE 软件对优化方案进行燃烧计算仿真分析, 采用响应曲面方法 (RSM), 根据仿真计算结果拟合性能、排放和结构参数的多项式, 将多目标转化为单目标。结果表明小缩口、斜坡、小面容比的燃烧室能够在既定技术路线的前提下在降低碳烟排放的同时, 提高发动机的动力性。

关键词: 国六排放 柴油机 燃烧室 相应曲面优化设计

Abstract: In order to meet the 6th China emission regulations. In this paper we mainly study the optimization methods of response surface method (RSM) for a 2.0L diesel engine by using the software of CONVERGE. We fit the relationship between performance emission and combustion chamber structure parameters and transform the multiple target to single target. The simulation results indicate that smaller diameter, slope and surface to volume ratio can reach the performance and emission target under the technology route.

Key words: China 6 Diesel engine Combustion chamber RSM Optimization design

1. 介绍

2020 年 7 月 1 日, 国家规定所有销售和注册登记的轻型汽车应符合国 6a 限值要求, 2023 年 7 月 1 日, 国家规定所有销售和注册登记的轻型汽车应符合国 6b 限值要求^[6]。排放方面, 相对国五标准, 国六目标是将 NO_x 和 PM 降低 60% 以上; 在工况点测量方面, 除了测试国五标准之前的工况点还加入了随机选取 15 个工况点的非标准测量循环; 相比国五阶段汽柴油车采用不同的限值^[7], 国六标准采用燃料中立原则, 对汽柴油采用了相同的限值标准, 因此国六被誉为全球最严的排放法规之一。

柴油机喷油器是在上止点之前开始喷油, 柴油和空气的混合时间较短, 属于典型的扩散燃烧, 整个燃烧过程处于边混合, 边扩散, 边燃烧的过程, 喷油速率和油气混合的速度决定燃烧速度。柴油机扩散燃烧的特点决定了油气混合区域中必定存在不均匀的区域, 在高温缺氧的环境, 燃油发生不完全燃烧, 生成颗粒物。同时柴油机又属于典型的富氧稀燃, 进气和压缩的是纯空气, 当量比较

小，燃烧室内整体又呈现出一个高温富氧的环境，形成 NO_x 生成的有利环境，因此导致了柴油机自诞生以来面临的颗粒物和 NO_x 排放较高的两个重要排放问题。国六排放法规的进一步加严，对发动机的节能减排技术提出了更高的要求，由于两种排放物生成机理的差异，使得颗粒物和 NO_x 两种排放物具有相互制衡的关系。针对柴油机排放问题，主要有机内净化和机外净化技术，降低 NO_x 的方法机内净化技术为采用外部 EGR，机外净化技术为后处理装置，比如 SCR、LNT 等；降低碳烟排放的机内净化技术包括燃烧系统的优化，主要有优化进气道、燃烧室、喷油器等零部件的结构和布置，促进缸内流场的保持，提高混合气的均匀程度，减少局部过浓区域，机外净化技术主要包括 DPF 后处理等等^[1]。由于 NO_x 机外后处理装置较为昂贵，因此在现有确定的技术路线下，应对国六排放对于 NO_x 主要采用外部 EGR，但是采用外部 EGR 会促进颗粒物的生成量。本文优化目标为动力性、经济性和碳烟排放，提高 EGR 余度。

随着现代仿真技术的引用，CAE 仿真计算大大缩短了研发周期并节约了研发成本。CONVERGE 作为新一代的发动机仿真工具，因其全新的网格切割划分技术和先进的物理化学模型^[3]，为本文的某柴油机优化计算提供了新的思路方法。本文运用 CONVERGE2.4 版对某柴油发动机的活塞燃烧室的动力性和碳烟排放进行了优化计算。

2. 模型建立

为使得计算结果具有参考性，计算工况点包括部分负荷（1200rpm-6.5bar,2000rpm-10bar）和全负荷(1000-wot,3600-wot)四个工况点。计算模型采用部分 Sector 模型，该发动机的参数如下：

表 1 某柴油发动机的参数表

缸径 (mm)	83.1
行程 (mm)	92
连杆长度 (mm)	145
压缩比	16.2
进气门关闭时刻 (°CA_ATDC)	-141
排气门开启时刻 (°CA_ATDC)	139
喷油器孔数	8 (均布)

注：0° 为压缩上止点

图 1 为进行计算时建立的八分之一部分模型，其中边界条件来自 GT-power 中一维单压力分析模型如图 2。

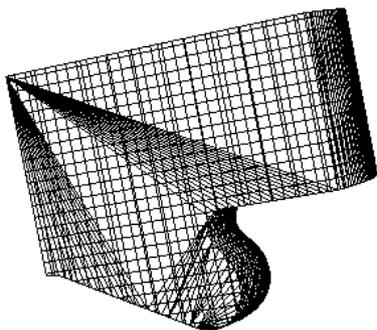


图1 某柴油机仿真计算的部分模型

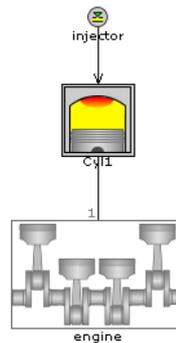


图2 某柴油机仿真计算的GT单压力分析模型

3. 工况点的模型校核

CONVEGE 各个模型选择如表 2，模型校核结果如图 3~图 6。模型校核结果显示，CONVERGE 中的仿真结果与实验值吻合较好，能够用于下一步的仿真计算。

表 2 某柴油发动机仿真计算选取的模型

湍流模型		RNG $k \sim \epsilon$
传热模型		O'Rourke and Amsden
喷雾模型		KH-RT
燃烧模型		SAGE
排放模型	NO _x 模型	Thermal NO _x Model
	碳烟模型	Hiroyasu Soot Model

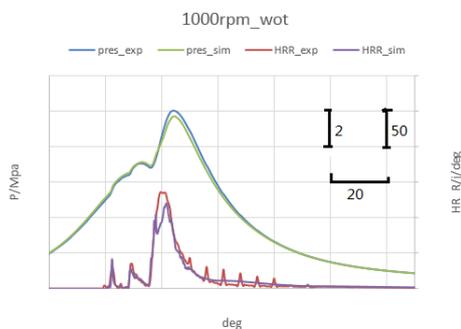


图3 1000rpm-wot校核结果

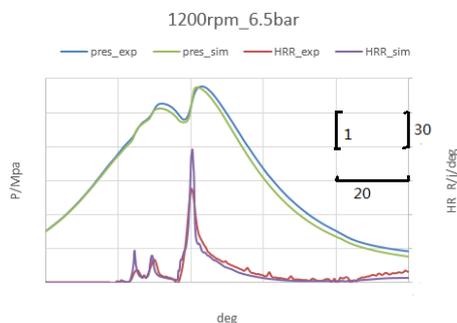


图4 1200rpm-6.5bar校核结果

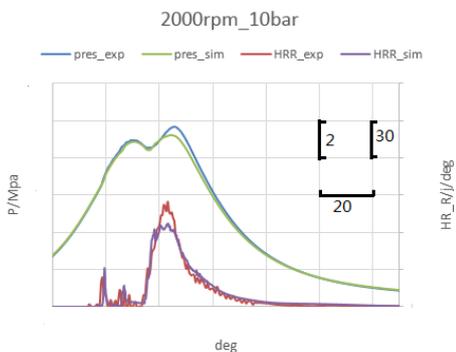


图5 2000rpm-10bar校核结果

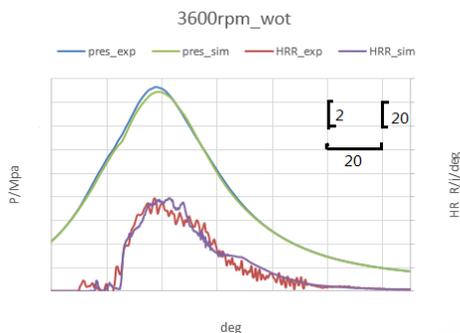


图6 3600rpm-wot校核结果

4. 燃烧室的结构的优化

4.1 优化流程

针对该柴油机活塞燃烧室结构进行优化，运用Design Expert进行优化方案的设计和数据分析。具体优化流程如图7：

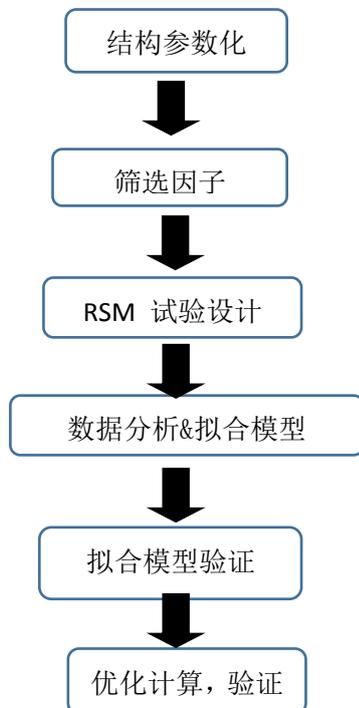


图7 某柴油机仿真计算优化流程图

4.2 活塞结构参数化和因子筛选试验

根据活塞热负荷、结构强度分析结果，以及对于缸内流场保持，促进缸内混合气均匀性的要求，确定该燃烧室的参数化的结构因子为喉口半径 J 、喉口中心距离顶面高度 H 、喉口中心距离活塞中心距离 G 、活塞导圆半径 L 以及垫片厚度5个结构参数化因子如图8。

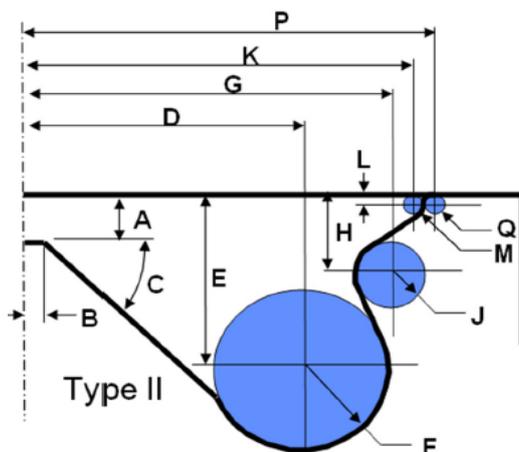


图8 某柴油机活塞燃烧室型线结构示意图

根据筛选出来的可用于优化的结构参数，并针对3600rpm-wot进行参数的敏感性分析，每个参数设定高低两个水平，采用 2^{5-1} 部分析因设计试验设计，试验设计分辨率V级精度^[4]，具体设计的方

案如表3

表3活塞优化结构参数敏感性分析表

计算方案	垫片厚度	J	H	G	L
1	-1	1	1	-1	1
2	-1	-1	1	1	1
3	-1	1	1	1	-1
4	-1	1	-1	1	1
5	-1	-1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	-1	-1
7	-1	-1	1	-1	-1
8	-1	-1	-1	1	-1
9	1	1	1	-1	-1
10	1	-1	1	1	-1
11	1	-1	-1	-1	-1
12	1	-1	1	-1	1
13	1	1	-1	1	-1
14	1	-1	-1	1	1
15	1	1	-1	-1	1
16	1	1	1	1	1

注: -1 为每个因素所取低水平, +1 为每个因素所取高水平

4.3 优化结构参数敏感性分析

4.3.1 动力性优化参数 (GIMEP) 敏感性分析

根据 25-1 部分分析因设计试验设计方案, 将 CONVERGE 的仿真计算结果进行分析。对于计算的数据进行各因素的敏感性和交互作用分析, 其中活塞导圆半径 L 与其它四个设计因素的交互作用较弱, 如图 9~图 12。其它各项因素之间的交互作用较强, 由于篇幅原因不一一列举。

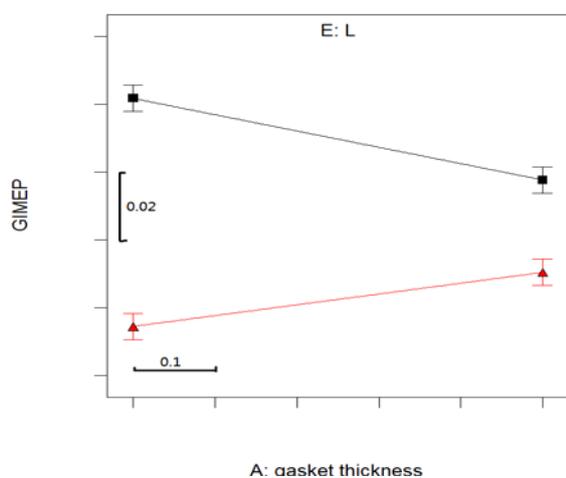


图9 活塞导圆半径L与垫片厚度的交互作用

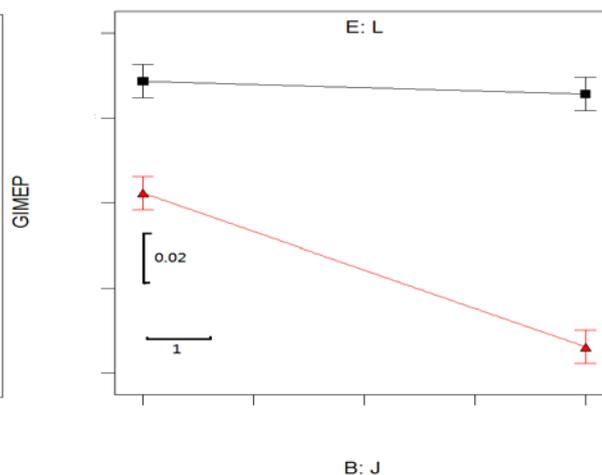


图10 喉口半径J与活塞导圆半径L的交互作用

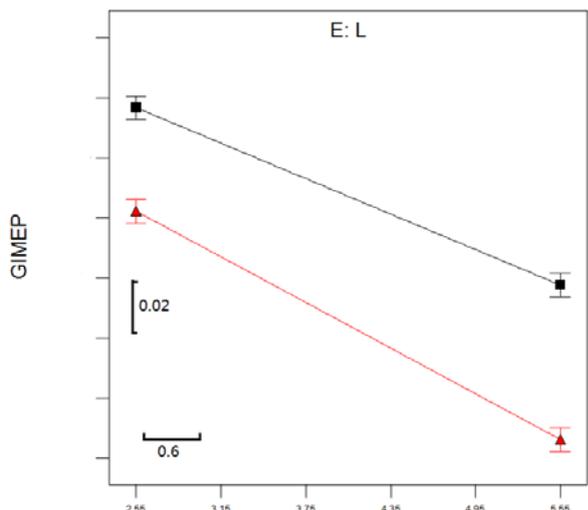


图11喉口中心距离顶面高度H与活塞导圆半径L的交互作用

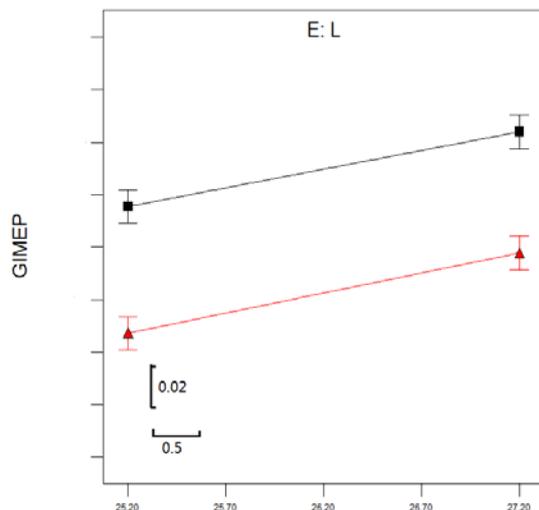


图12喉口中心距离活塞中心距离G与活塞导圆半径L的交互作用

注：A：垫片厚度 B：喉口半径J C：喉口中心距离顶面高度H D：喉口中心距离活塞中心距离G E：活塞倒圆半径L

4.3.2 颗粒物排放 (soot) 敏感性分析

根据2k部分析因设计试验设计方案，将CONVERGE的仿真计算结果进行分析。对于计算的数据进行各因素的敏感性和交互作用分析，各个因素的效应图如图13~图16。

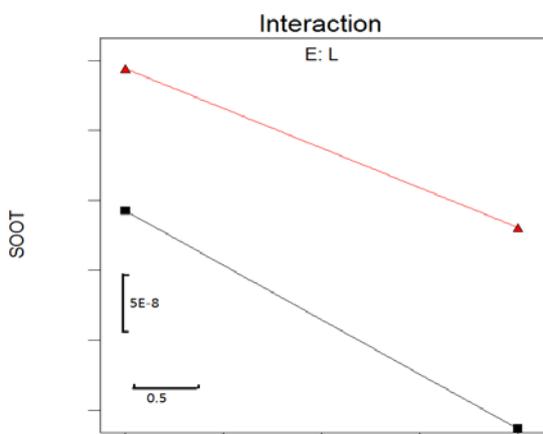


图13 活塞导圆半径L与喉口中心距离活塞中心距离G的交互作用

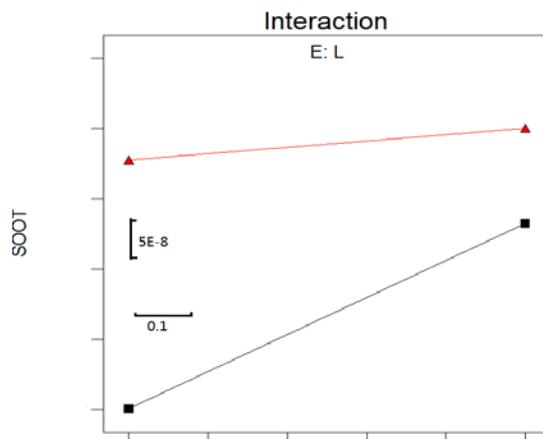


图14 活塞导圆半径L与垫片厚度的交互作用

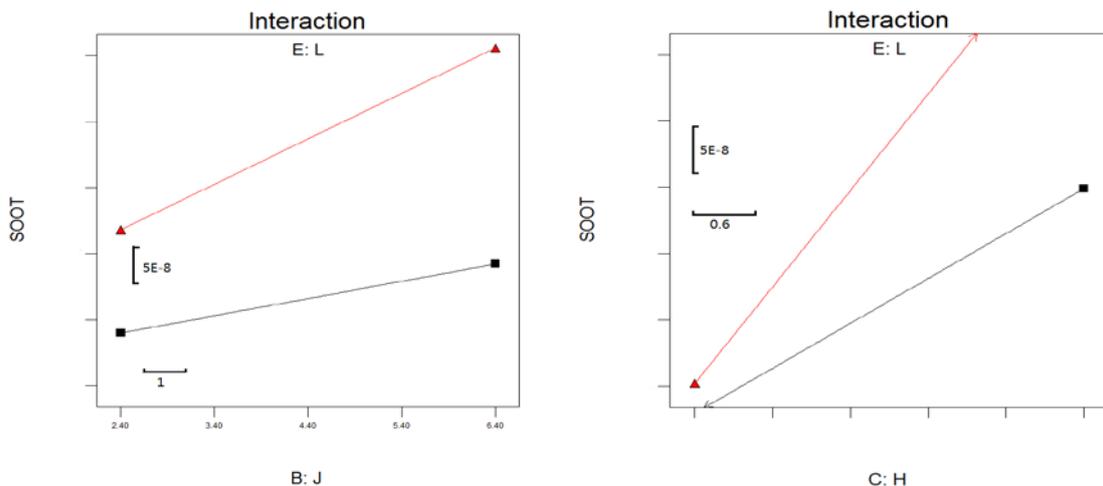


图15 活塞导圆半径L与喉口半径L的交互作用 图16活塞导圆半径L与喉口中心距离顶面的高度H的交互作用

注：A：垫片厚度 B：喉口半径J C：喉口中心距离顶面高度H D：喉口中心距离活塞中心距离G E：活塞倒圆半径L

经过敏感性分析，五个优化因素中活塞导圆半径L与喉口半径J、喉口中心距离顶面高度H、喉口中心距离活塞中心距离G、垫片厚度的相关性较弱，其余四个因素之间有较强的交互作用，因此本次试验采用同时对喉口半径J、喉口中心距离顶面高度H、喉口中心距离活塞中心距离G、垫片厚度进行设计，最后单独对活塞导圆半径L进行设计。

4.4 优化试验设计和试验拟合结果

优化试验设计采用BBD(Box-Behnken)设计法，该方法有设计点都在一个球面上，可旋转且能规避角点，是一种适应性较强且较为普遍的优化试验方法。根据设计的边界限制，使用BBD试验设计方法，设计了26组试验，设计出13组活塞型线。如图17所示

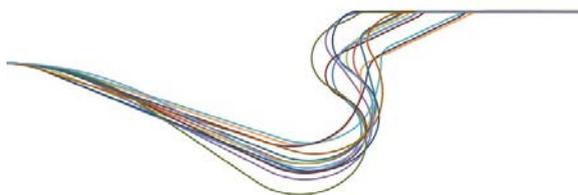


图 17 13 组优化设计活塞型线示意图

计算完成后对四个工况下的 GIMEP 和碳烟排放进行回归分析，见表 4。

表4 各工况回归分析拟合优度表

响应		拟合优度 (R ²)	调整的拟合优度 (R ²)
3600-wot	GIMEP	0.9367	0.8784
	Soot	0.8746	0.8258
1000-wot	GIMEP	0.8992	0.8517
	Soot	0.9168	0.8613
2000-10	GIMEP	0.9108	0.8514
	Soot	0.861	0.7829
1200-6.5	GIMEP	0.9065	0.8769
	Soot	0.9556	0.9348

为了检验拟合的模型普适性，在设计空间随机选取四个设计因子值对模型进行检验，如图 18~图 25。

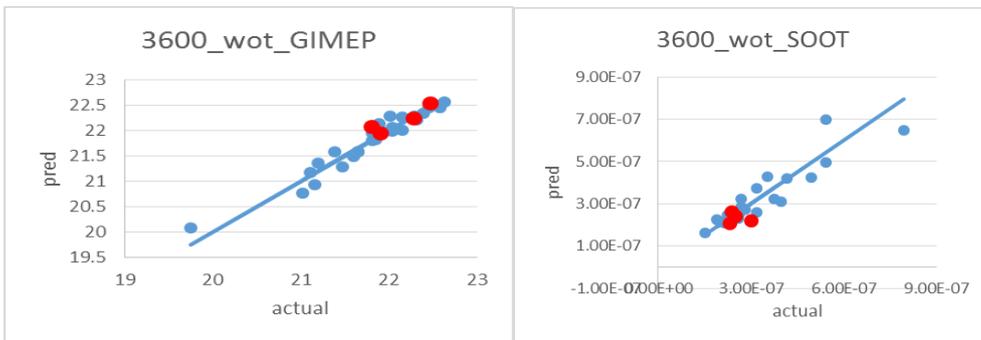


图 18 3600rpm-wot GIMEP 拟合模型检验

图 19 3600rpm-wot soot 拟合模型检验

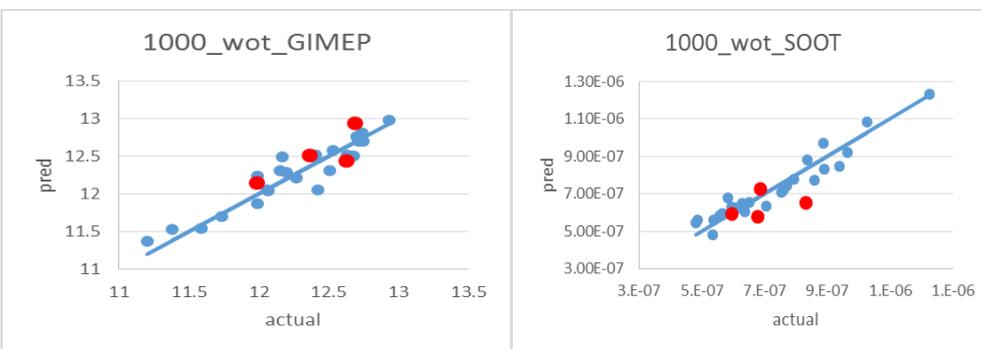


图 20 1000rpm-wot GIMEP 拟合模型检验

图 21 1000rpm-wot soot 拟合模型检验

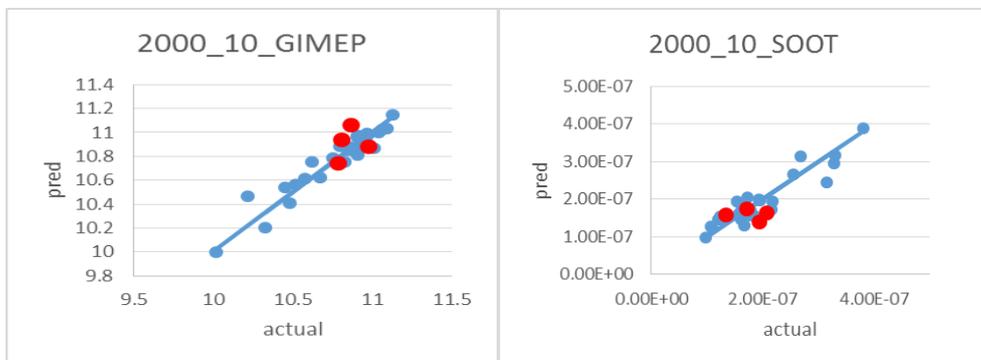


图 22 2000rpm-10bar GIMEP 拟合模型检验

图 23 2000rpm-10bar soot 拟合模型检验

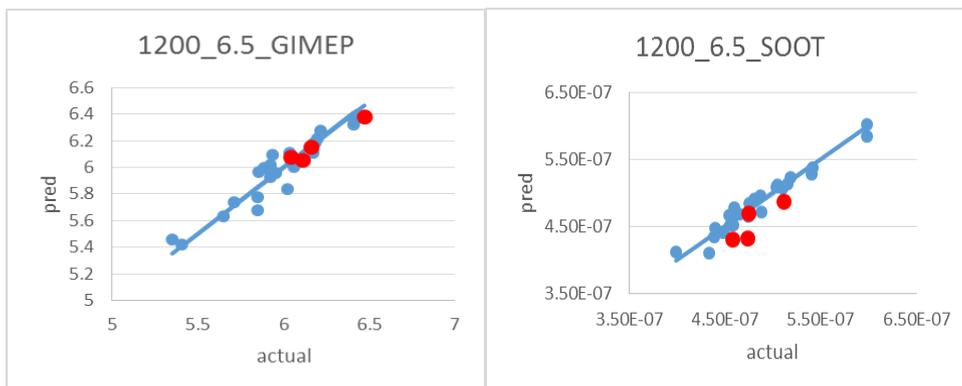


图 24 1200rpm-6.5bar GIMEP 拟合模型检验 图 25 1200rpm-6.5bar soot 拟合模型检验

无论是拟合优度还是调整后的拟合优度均在 0.8 以上，对四个工况点多项式的拟合模型的随机检验点基本均布在 45 度线两侧，因此拟合的多项式模型可靠，可以用于该活塞燃烧室型线的优化和计算。

3.6 优化计算结果

将多目标转化转化为单目标，考虑到碳烟预测精度较差，且油耗和动力性是最重要的指标，故权重设置原则为 GIMEP 为主，Soot 次之，功率点和部分负荷的 Soot 排放更次之，具体权重参照表 5。

表 5 各个工况权重分配表

	权重	
	GIMEP	S00T
3600-wot	****	**
1000-wot	****	***
2000-10	****	**
1200-6.5	****	***

通过单目标拟合计算，最终小缩口、斜坡、小面容比的燃烧室能够保证在既定技术路线的前提下在降低碳烟排放的同时，提高发动机的动力性。相比原始方案碳烟最大降幅 12.6%，动力性最大提高 8.1%。参见图 26。

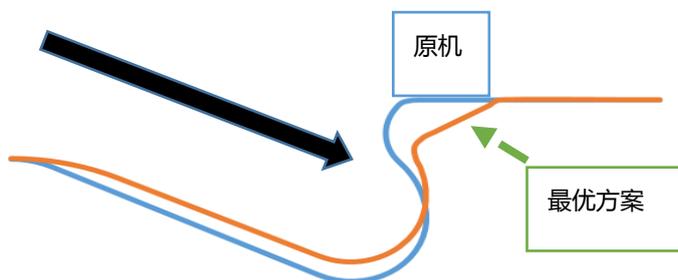


图 26 优化方案和原方案对比示意图

4 最优燃烧室原因分析

CONVERGE 仿真燃烧计算能够为研究开发提供可靠的流场信息，为优化设计的改善

提供试验所不能提供的参考信息，针对优化后的燃烧室以 1000rpm-wot 工况进行后处理流场分析。因为主喷开始时刻缸内的流场对于混合气的均匀度影响较为明显，燃烧结束后缸内空气的利用率能够反应 soot 的生成量。主喷开始时刻缸内的速度场对比图，如图 27 和图 28。燃烧结束后缸内空气如图 29 和图 30。

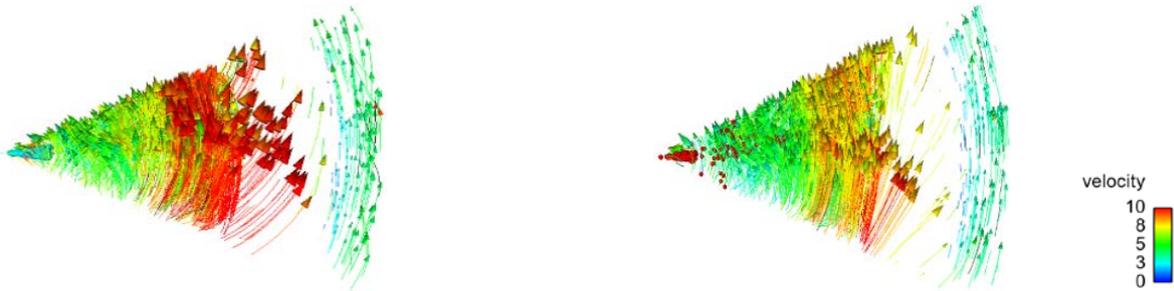


图 27 主喷开始时刻原始方案缸内速度场图

图 28 主喷开始时刻优化方案缸内速度场

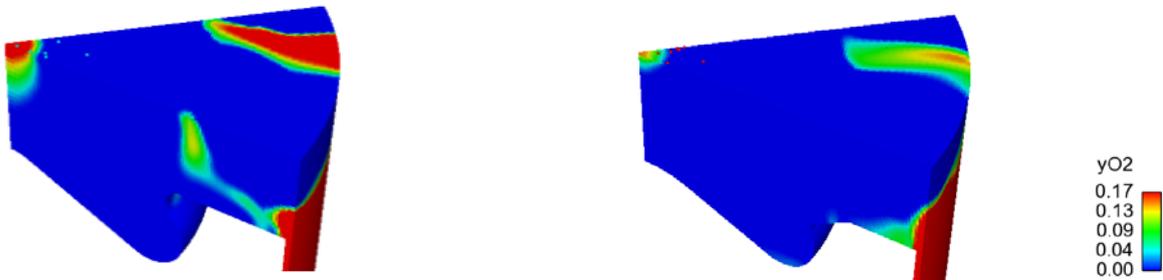


图 29 燃烧末期原始方案缸内空气分布图

图 30 燃烧末期优化方案缸内空气分布图

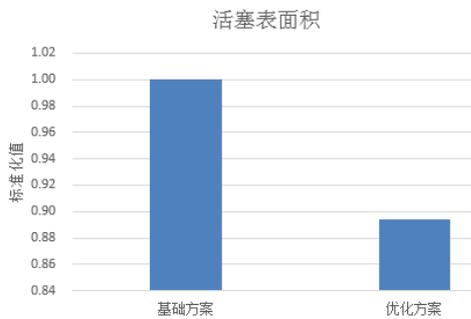


图 31 基础方案和优化方案活塞表面积对比图

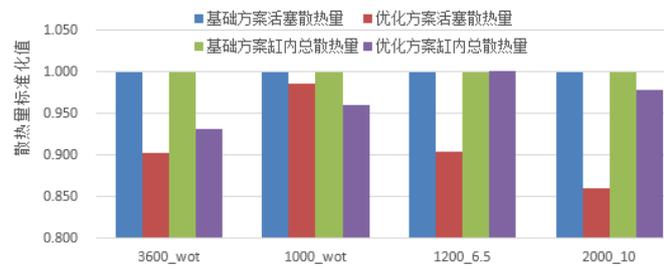


图 32 基础方案和优化方案散热量对比图

优化后的活塞主喷时刻挤流区域速度场明显小于原始方案，燃烧结束后缸内的空气利用程度较高，加之优化后的活塞表面积相比原始活塞减小 10%左右，降低了燃烧气体与活塞壁面的热传递，使得计算工况点的活塞散热量、缸内总散热量均减少，最大减少 14%，良好的空气利用率促进了缸内混合气的燃烧，降低了 Soot 排放物的生成。

5 结论

- 1) 小的面容比和较弱的逆向流动, 传热损失小, 提高了经济性。
- 2) 斜坡型结构能够促进缸内燃油更容易进入挤气区域, 充分利用该区域的空气, 降低颗粒物的生成。
- 3) 2^d部分分析因设计和响应曲面优化设计方法对三维优化仿真计算较为有利。

6 参考文献

- [1] 王建昕, 帅石金, 汽车发动机原理 [M] 北京: 清华大学出版社, 2011
- [2] McCracken M E, Abraham. Swirl-spray interactions in a diesel engine [J]. SAE Transactions , 2001, 110(3) :882- 898.
- [3] converge theory manual
- [4] Design Expert manual
- [5] 马学红 小型汽油机排放污染物的生成机理及净化措施, [J]内燃机, 2003 年第 6 期
- [6] 轻型汽车污染物排放限值及其测量方法 (中国第六阶段) (GB18352. 6-2016) [S]
- [7] 轻型汽车污染物排放限值及其测量方法 (中国第五阶段) (GB18352. 5-2013) [S]
- [8] 范钱旺 发动机颗粒物成因及满足 EURO-VI 排放限值的技术路线[J]上海汽车, 2013 年 6 月