

某国六天然气发动机的缸内燃烧与性能计算

The Combustion & Thermal Dynamic Simulation of A Europe VI Nature Gas Engine

刘林龙 钟博 郭立新 韩旭东

(一汽解放发动机事业部前瞻技术研究院, 江苏 无锡 214063)

Liu Lin-long Zhong Bo Guo Li-xin Han Xu-dong

(FAWDE Prospective Technology Research Institute, Wuxi 214063, China)

摘 要: 随着石油能源危机与排放法规的不断提高, 各国都在积极寻找替代燃料, 天然气作为一种清洁燃料, 其藏储量比较丰富, 是车用发动机替代燃料的首选。合理的进气系统布置与燃烧室结构对天然气发动机的经济性、动力性和排放特性有着非常重要的影响。本文采用 GT-power 与 CONVERGE 软件对某天然气发动机进行一三维性能与燃烧模拟计算, 以辅助完成某欧 VI 发动机的概念设计。

关键词: 天然气发动机 一维仿真 三维模拟 概念设计

Abstract: With the oil energy crisis and increasingly stringent emissions regulations, various countries are actively looking for alternative fuels. As a clean fuel which abundant reserved around the globe, natural gas is the first choice of alternative fuel for vehicle engine. Reasonable gas circuit layout and combustion chamber is important to economy, power and emission performance of natural gas engine. In this paper, software GT-Power and CONVERGE was applied to simulate the thermal dynamic process and inner combustion process, then provide the guide to the deployment of gas circuit and piston selection of an new natural gas engine series in concept design phase.

Key words: natural gas engine, 1D&3D numerical simulation, concept design

1 概述

天然气由于储存量相对比较丰富, 价格较石油燃料便宜, 燃烧产物洁净, 适合在有资源条件和环境保护要求高的地区应用, 是当前国际上首选的汽车替代燃料。本文以正在开发的某国六天然气发动机为研究对象, 采用 GT-Power 和 Converge 软件开展进气系统和燃烧系统的分析与研究, 旨在建立天然气发动机性能改善的正向开发流程, 并对计算结果进行了台架试验验证。

2 计算对象与方案设置

本次计算研究采用 1D 和 3D 相结合进行，利用各自的优势，以 1D 计算预测是否能达到设计性能开发目标，并为 3D 燃烧计算提供边界条件，3D 燃烧计算为活塞选型。

2.1 计算基本参数设置

本计算针对某国六天然气发动机为计算对象，该机采用当量比 SPI+EGR+TWC 的燃烧和后处理策略，天然气与空气在混合器当中充分混合后通入进气总管，根据实验样机搭建的一维 GT-Power 计算模型，如图 1 所示。

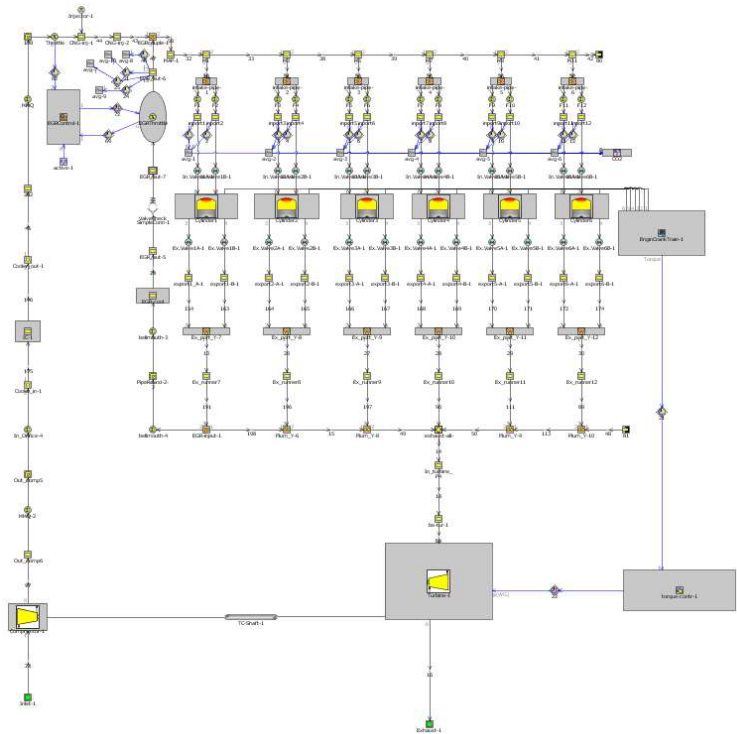


图 1 GT-Power 发动机一维计算模型

三维计算从燃烧上止点后 90° 开始，计算的工作过程包括整个进排气过程。图 2 为发动机活塞上下止点时的计算网格。采用的计算模型主要包括湍流模型、燃烧和点火模型，湍流模型采用 RNG-k- ε 模型，燃烧模型采用 G 方程模型，相应的点火模型是初始化 G 值方案，进排气压力和温度边界条件以及缸内初始条件均由一维计算提供。

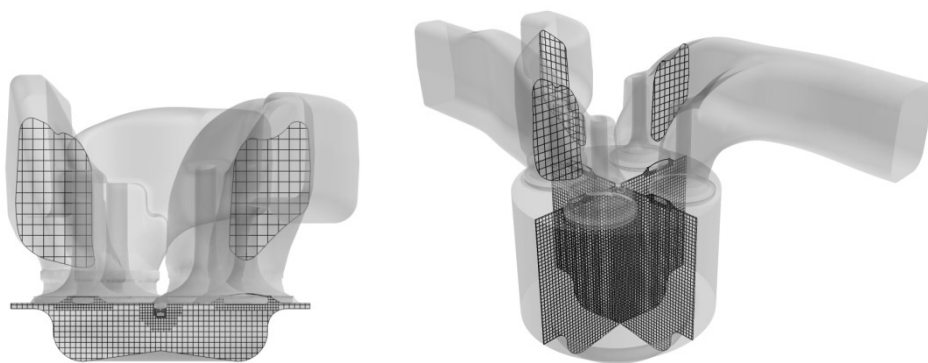


图 2 活塞上止点与下止点时的几何示意图

2.2 计算方案

一维性能计算针对外特性 14 个工况开展，三维燃烧针对扭矩点与功率点两个工况开展。

在上述工况下，首先对样机进行了模型的选择与标定，之后针对供应商提供的三款不同增压器进行选型配机计算，在选择增压器型号之后，设计了以下三种不同形式的燃烧室设计方案进行燃烧分析，为活塞选型提供依据。

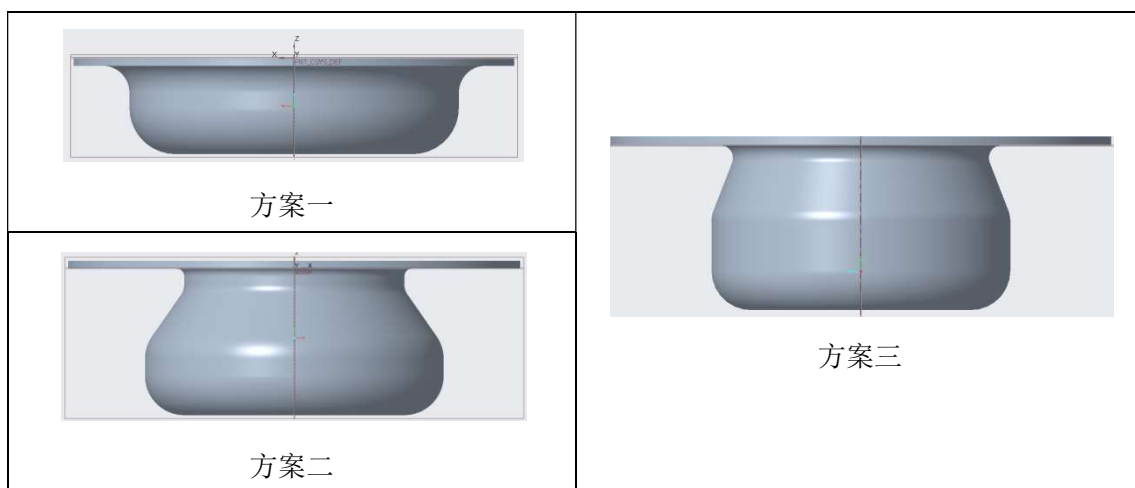


图 3 不同形式的燃烧室设计方案

3 计算结果分析

3.1 一维模型验证

根据测试结果对图1所示计算模型进行标定分析。计算对比分析了外特性工况下，比油耗、增压压力、中冷器前后温度、涡前压力温度，试验测试值与计算值的差异，如图4所示。

综合图4可以看出：计算最大误差不超过5%，在工程允许范围内，计算值能准确反映和预测测试结果，因此，认为该发动机一维计算模型满足计算需求，采用该计算模型进行进一步的计算分析。

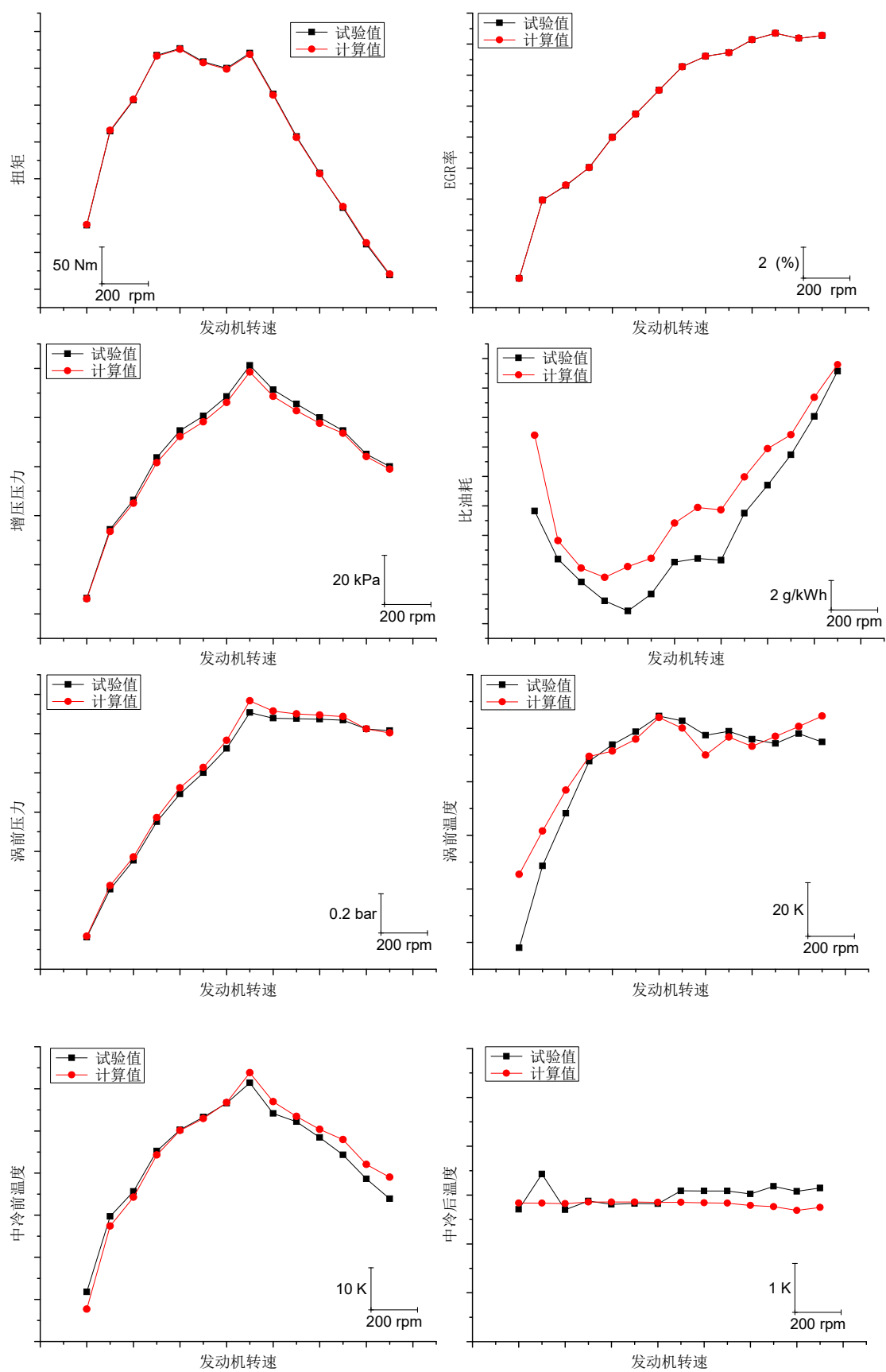


图 4 一维模型对标结果

3.2 新机型的增压器匹配计算

在上述一维模型的基础上,按照开发目标和设计部门的概念设计方案修改模型结构参数与功率指标,之后根据供应商提供的 A、B、C 三款增压器方案 MAP 图,对不同增压器方案进行了计算。

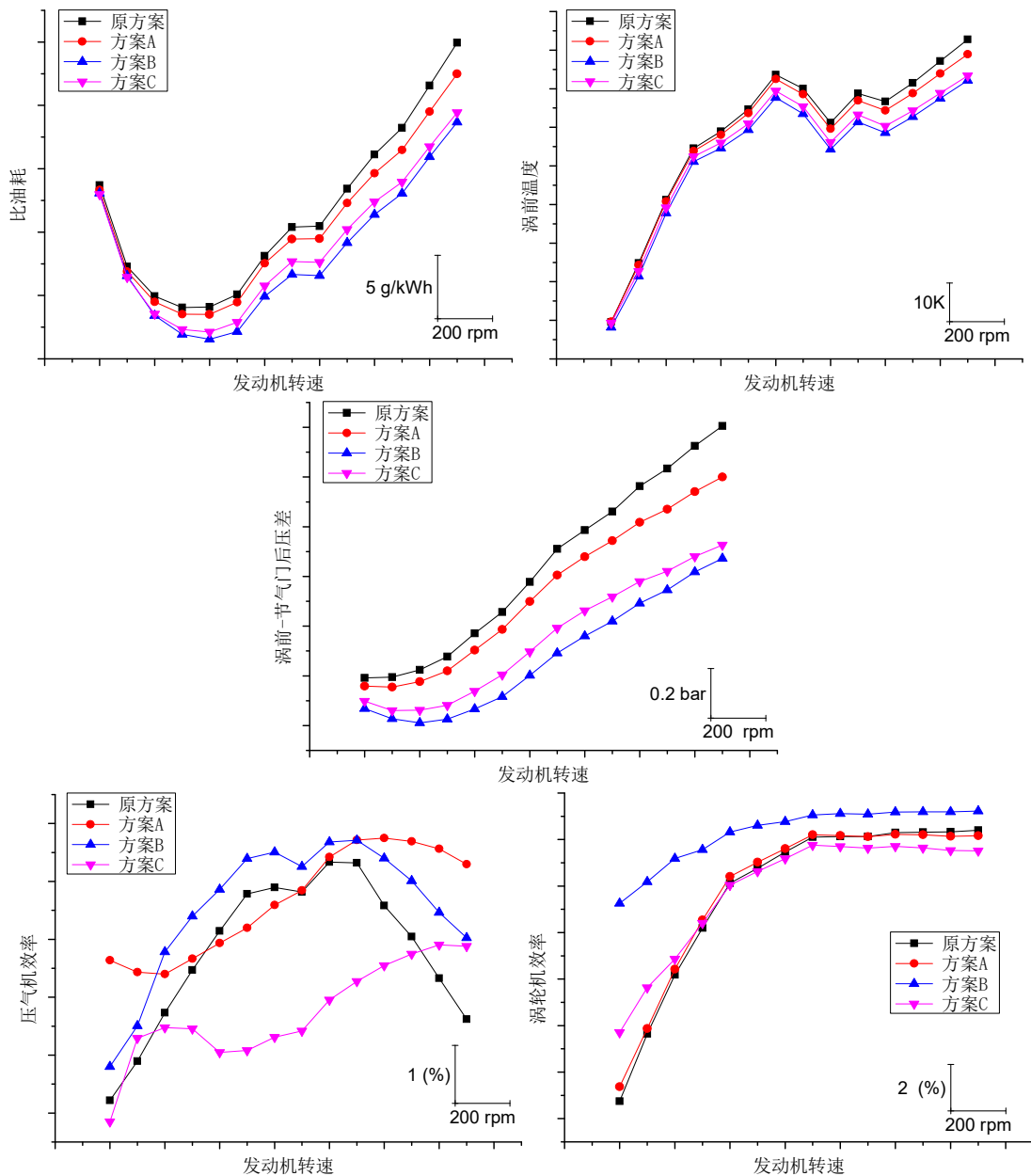


图 5 一维模型对标结果

根据图 5 的计算结果来看,采用方案 B 较其它方案能得到更低的比油耗与排气温度,虽然能反映 EGR 率提升潜力的涡轮压力与节气门后压差相对较低,但综合考虑还是具有明显优势,故最终选取方案 B 为概念设计阶段增压器方案。

3.3 燃烧室设计方案分析

在确定增压器方案之后,采用选定的增压器和初步设计的一维进气系统模型,计算了两

个工况下三维燃烧边界与初始条件，针对三种不同形式的燃烧室设计方案，结合开发原型的气道模型，搭建模型进行了燃烧计算。

燃烧室结构对天然气燃烧的影响主要体现在对流场结构、火焰传播距离以及燃烧室尤其是活塞凹坑面容比的影响。因此，能做到加强点火及燃烧时湍动能、缩短火球沿各方向传播距离以及减小燃烧室表面积的措施都能使热效率得以改善。

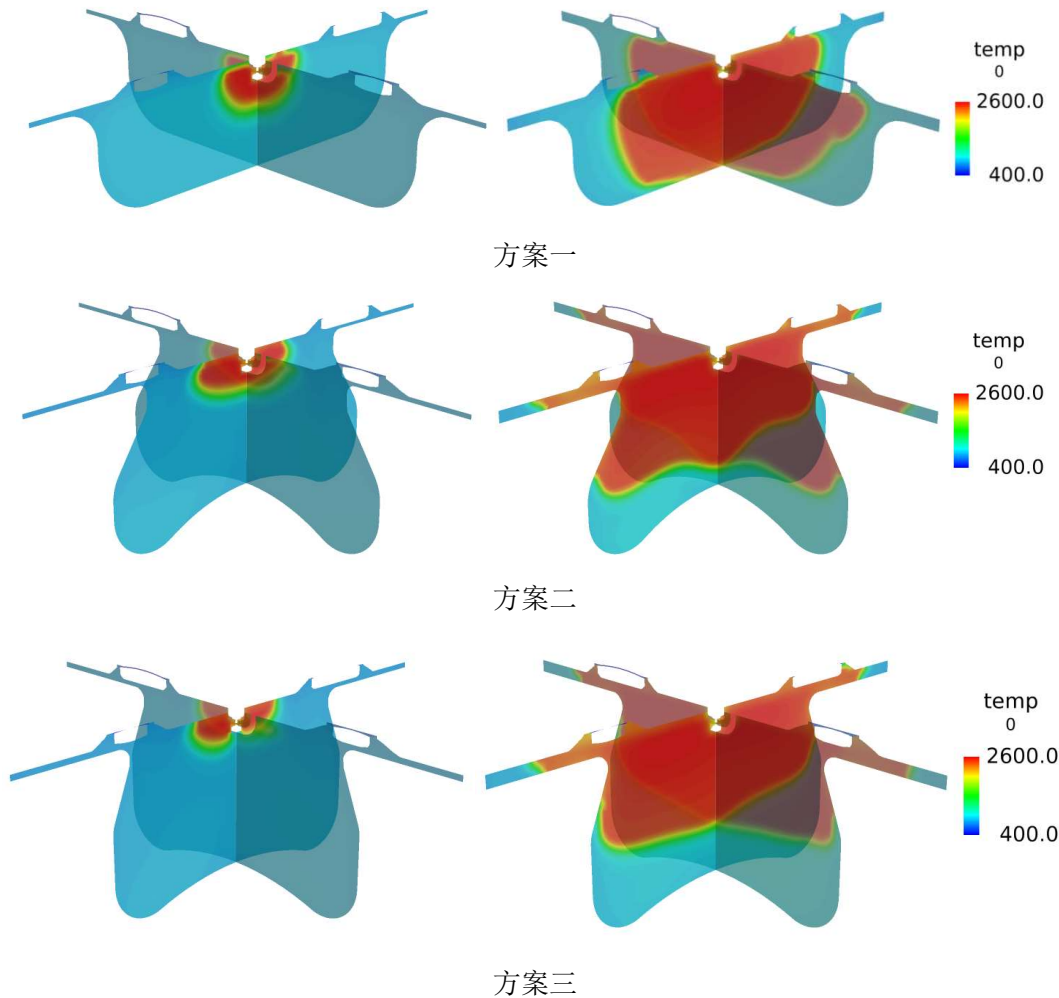


图 6 上止点（左）与上止点后 10°（右）时的缸内温度（K）分布

根据燃烧放热重心分析，与燃烧重心相关的是燃烧等容度和燃烧相位，而在点火正时相同的情况下，直接控制因素为火焰向各个方向的传播距离与湍动能。温度的分布可以反映火焰的传播情况，图 6 是三个设计方案上止点与之后 10° 时的缸内温度分布，从图 6 中各个方案的温度分布上可以发现，三个方案的火焰前沿面形状都受到活塞几何的影响而发生扭曲，其中方案一是发生在竖直方向上，方案二和方案三是发生在水平方向上。这种扭曲从火焰传播的均匀性上来说是不利的，故方案一的修改方向是缩小直径加深深度；方案二、三的修改方向是加大凹坑直径，上提凹坑底面，如此进行，缩口程度则将随之增加。

仅从现有的几何设计来看，方案二、方案三的燃烧等容度还是要优于方案一的。从上止点后 10° 的温度分布来看，方案一的火焰前锋面已触及活塞凹坑底面，而方案二、三在水平和竖直方向上仍在自由发展，且三个方案燃烧过程的缸压（图 7）曲线也表明了这一点。

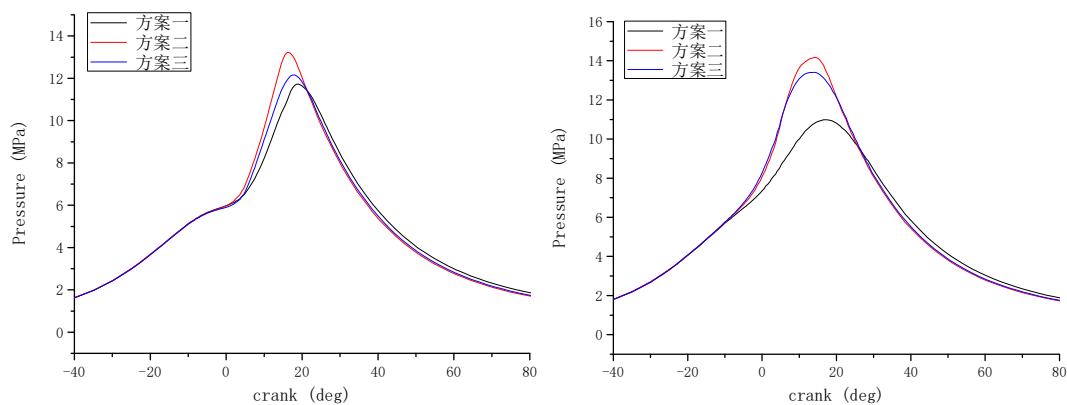


图 7 扭矩点（左）与功率点（右）三款燃烧室的缸压曲线

方案一较方案二、方案三放热缓慢，后燃现象严重。它在燃烧初期做功相对后两个方案较少，但在燃烧后期做功较多，整个循环内做功高于方案二、方案三，且在扭矩点燃烧效率略高，如图 8 所示。

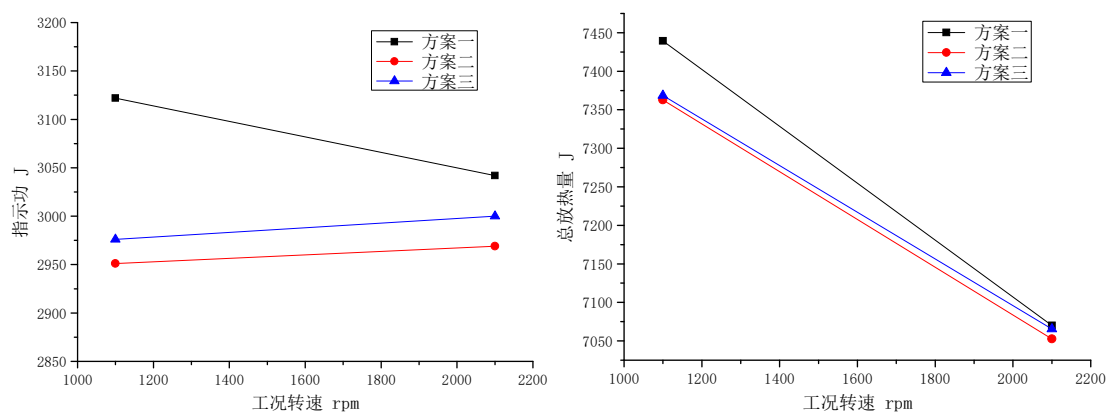


图 8 三款燃烧室两个工况点的指示功与总放热量

图 9 展示的是三款燃烧室设计方案活塞火力面的表面积大小，又由图 7 可知，燃烧发展阶段缸内压力温度的关系为方案二>方案三>方案一，综合考虑传热面积与温差可知，方案二的散热量高于方案三高于方案一，故三个燃烧室设计方案的指示功大小顺序为方案一>方案三>方案二，如图 8 所示。

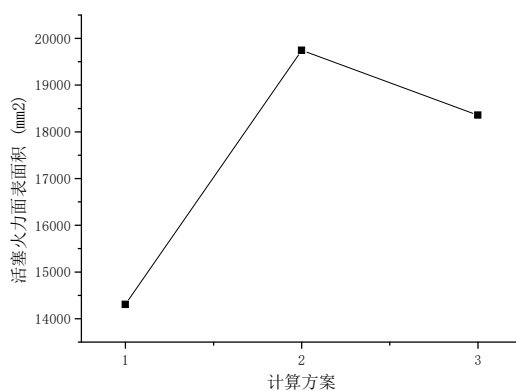


图 9 三款燃烧室活塞火力面的表面积

以上只是从燃烧和做功的角度进行的比较分析，对于气体发动机而言，湍动能的大小对

火焰传播速率有重要影响，虽然膨胀过程中的湍动能与燃烧室形状关系密切，但决定进气过程中湍动能分布的气道几何设计也十分重要，所以在改进燃烧室形状之后，还需搭配气道模型进行多轮优化设计与验证计算。

4 总结

在某欧 VI 天然气发动机的概念设计阶段，通过 GT-Power 搭建一维模型，在经过开发原型样机标定后进行了新开发机型的一维计算，为新机型的增压器匹配提供了参考；之后采用 Converge 软件对缸内工作过程进行计算模拟分析，并对该机三种不同形式的活塞设计方案进行了评价，给出了基于三个初始燃烧室设计方案的改进方向。

5 参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学第二版 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.1.
- [2] Benoit Douailler, Frederic RavetRenault, et al. Direct Injection of CNG on High Compression Ratio Spark Ignition Engine: Numerical and Experimental Investigation [C]. SAE Paper 2011-01-0923.
- [3] Boretti, Lappas, Zhang, et al. CNG Fuel Strategies For Commercial vehicles engines-A literature review [C]. SAE Paper 2013-01-2812.
- [4] John B Heywood. Internal Combustion Engine Fundamental [M]. New York: McGraw-Hill Company, 1988.