

## 某自吸汽油机升级增程式发动机研究分析

### The research of arange extender engine transformed from a NA engine

王一聪 刘系嵩 张静 马克 豆佳永 张秀英

(北京汽车动力总成有限公司)

**摘要:** 为满足新能源汽车增程需求, 针对某 1.5L 排量自然吸气发动机进行改进升级, 设计原则为使其外特性工作在最佳经济区。通过仿真手段对其进行可行性分析, 其中使用了高压压缩比及阿特金森循环技术, 优化燃烧系统、优化进气歧管长度、优化进排气相位, 使用 GT-POWER 软件最终选取最优的压缩比、凸轮型线、进排气相位、进气歧管长度, 为设计定型及热力学开发提供依据和参考。经过试验验证, 试验和仿真具有良好的一致性, 能够达到动力性开发目标, 并能达到 37%有效热效率的经济性开发目标, 外特性工作点处于等功率最佳油耗区, 发动机整体经济性比原型机提升 5-15%。

**关键字:** 增程式发动机, 高压压缩比, 阿特金森循环, 优化

**Abstract:**To meet the range extending need of new energy vehicles, our company has been developing a range extender engine from a nature aspired engine. The principal of design is that the range extender will be working at the best efficient area. We have done the feasibility analysis for the range extender engine through simulation software, GT-POWER. We use high compression ratio and Atkinson cycle on this engine. And we have optimized combustion system, intake manifold, intake valve open timing and exhaust valve close timing. Through GT-POWER, we get the best compression ratio, best cam, best valve timing and best intake manifold length. Through these methods have provided references to engine design and engine thermodynamic development. The test result shows that test and simulation have good uniformity. The engine has reached power performance target, and the engine has reached the target of 37% effective thermal efficiency. The engine's wot is working at the best efficient area as design, and fuel economy is better 5-15% than prototype.

**key words:**Range extender engine, High compression ratio, Atkinson cycle, Optimization

## 1 概述

随着环境污染问题越来越严重, 尤其是雾霾已经越来越多出现在人们的视野, 人们对于提升环境水平的诉求越来越高。对于整车企业, 油耗法规及排放法规日益严格, 所以新能源汽车的研发成为整车企业的重点关注领域。增程式混合动力汽车与纯电动汽车不同之处在于, 装备一个以内燃机为基础的小型发电机组以备电池电量不足时为电池充电, 这个发电机组我们称为“增程器”。增程式混合动力汽车内部具有一套电力驱动系统, 包括电动机、控制电路、电池, 电动机直接驱动车轮, 发动机用来驱动发电机给电池充电。由于发动机并不驱动车轮, 所以不需要传统的变速器, 而是电动机通过减速器来驱动汽车, 相当于在纯电动汽车上装备一台发动机。增程式混合动力汽车只是在纯电动汽车的基础上多了一个发电模块, 结构简单, 而且对电池的容量要求大大降低, 解决了“里程焦虑”问题, 成本低。当短距离行驶时只需采用纯电动模式, 而进行长距离行驶时又能保证行驶里程。

增程式混合动力汽车作为一种形式简单油耗低排放低的新能源汽车型式有其特殊的优势, 本公司通过对成熟的一款 1.5L 自吸发动机进行改进升级为增程式发动机, 进而装备增程式混合动力汽车。由于增程式发动机对于动力性比传统发动机的要求降低, 所以通过合理的技术手段, 保持需求动力性的同时可以充分改善燃油经济性。本公司在原型机的基础上采用了高压压缩比、阿特金森循环技术、

优化燃烧系统、优化进气歧管长度、优化进排气相位、降摩擦等技术手段降低油耗，最终得到一款具有优异经济性的增程式发动机。本文系统介绍了此增程器的开发过程，并通过仿真的手段对此增程式发动机进行优化设计，为设计及热力学开发提供方案依据和参考。

## 2 技术方案简介

本文的研究对象为一台 1.5L 四缸自然吸气发动机，原型机及升级机型基本参数如表 1 所示。

表 1 发动机基本技术参数

类型	原型机	升级机型
排量 (L)	1.5L	1.5L
压缩比	10.5	13
进气方式	自然吸气	自然吸气
喷射方式	气道喷射	气道喷射
VVT	进气	无

为了实现经济性提升，实现最低油耗热效率 37% 的目标，同时满足增程式混合动力汽车的发动机功率要求，并考虑产品开发周期、成本、工艺、生产线改造等各方面因素，决定在上述 1.5L 自吸发动机基础上进行升级。

### 2.1 增程器工作工况选择

增程式发动机具有其工作特殊性，工作点相对稳定，设计过程中希望发动机主要使用的工况在发动机的最佳效率区。所以本文通过合理的设计，优化发动机的最佳效率区，提升发动机最佳效率区的经济性。如图 1 所示，黑色等高线为油耗万有特性，红色等高线为功率万有特性，黄色实线为增程器外特性设计目标。根据上述设计原则，并结合整车功率需求，来制定发动机的动力性目标，即增程器外特性经过最佳效率区。以此为基础，将原型机升级改进为增程式发动机，采取一系列的技术措施，下文中会详细阐述升级采用的技术方案。

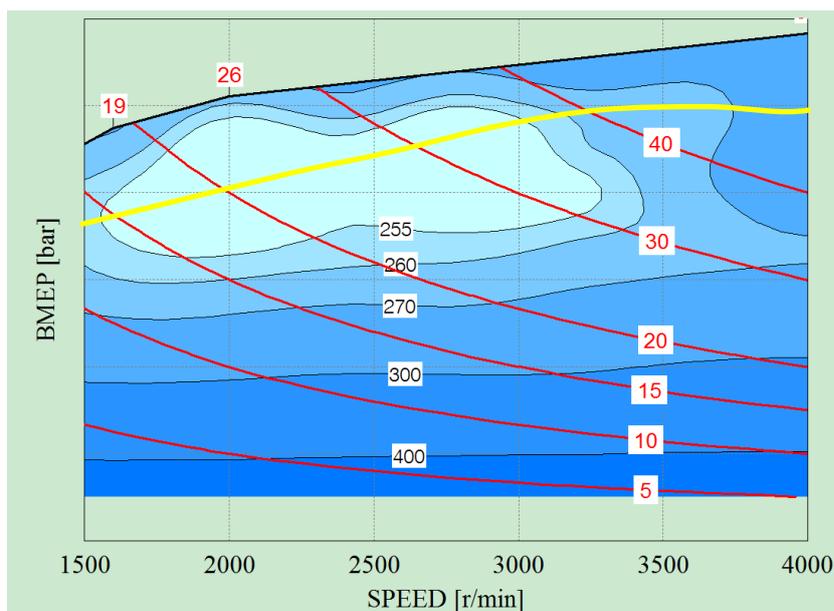


图 1 原型机万有特性图及等功率最佳运行线

## 2.2 阿特金森循环

阿特金森循环及米勒循环技术方案，分别匹配大包角及小包角型线，并配合 VVT 相位优化，即进气门晚关（LIVC）和进气门早关（EIVC）的气门控制策略，实现了降低泵气损失的作用。另外阿特金森循环和米勒循环配合高压压缩比，可进一步提升发动机经济性，由于其型线的特殊性，导致其发动机动力性的降低。图 2 所示为在部分负荷 2000r/min、2bar 时，阿特金森循环/米勒循环与原型机示功图对比，可见阿特金森循环及米勒循环都能够有效降低泵气损失。由于米勒循环对功率的不利影响，本机选择阿特金森循环作为一项关键提升经济性的技术方案。通过采用阿特金森循环，经济性提高，动力性有所降低，实现了全 map 的  $\lambda=1$ ，保证其有实现国六的潜力。

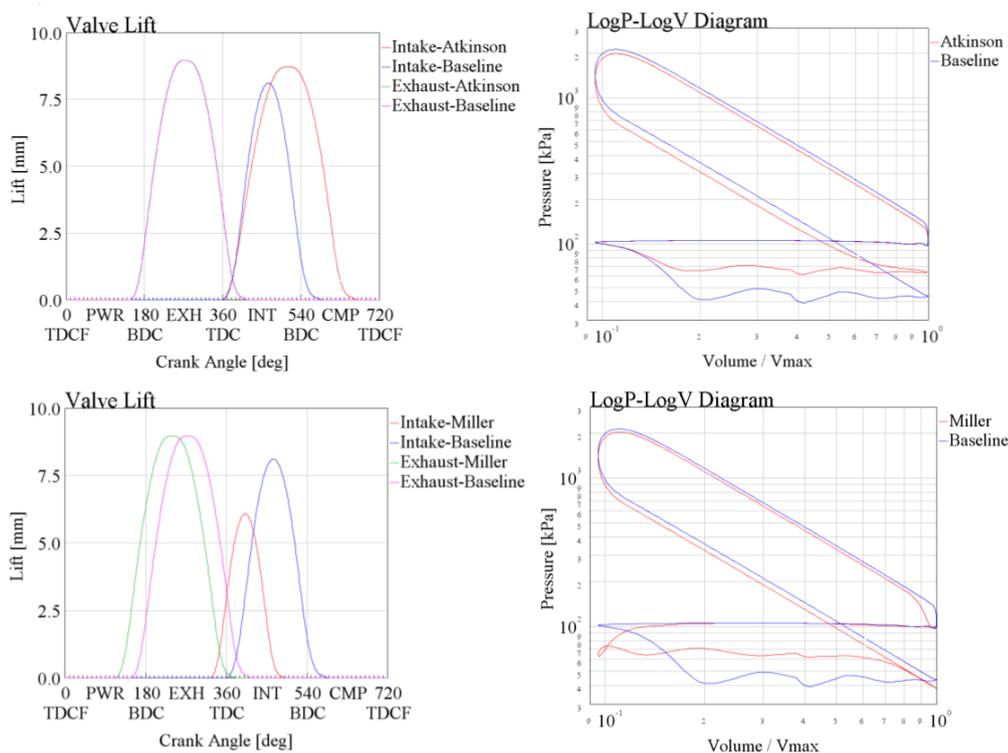


图2 阿特金森循环/米勒循环与原型机示功图对比

配合阿特金森循环，需选择合适的型线、压缩比、配气相位、进排气歧管等技术方案，本文对此进行了详尽的研究工作，下文中会有阐述。

## 2.3 燃烧系统优化

压缩比的升高，有利于燃烧效率的升高，研究表明随着压缩比的升高，燃油经济性升高，如图 3 所示为压缩比对燃油经济性影响的基础研究结果。通过 CAE 手段，优化分析计算，压缩比为 13 时，本文增程器工作最佳。

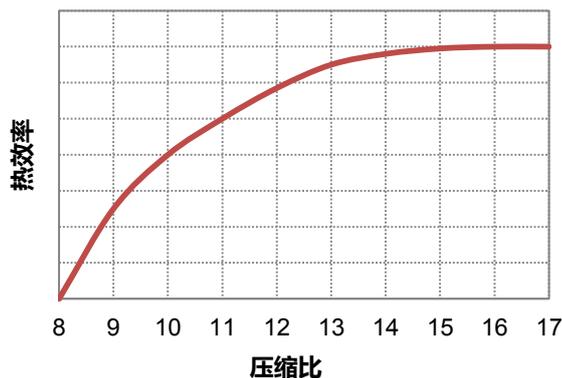


图 3 不同缸径冲程比下燃油经济性与压缩比的关系

优化燃烧室形状，可以获得最佳的抗爆震性能，进而燃烧性能得到改善，经济性得到提高，如图 4 所示为原型机与升级机型活塞形状示意。升级之后的活塞燃烧得到了显著改善，点火角提前，油耗得到改善。



图 4 原型机与升级机型活塞形状对比示意

## 2.4 优化进排气歧管

进排气歧管的合理设计，能够增加充量系数，降低缸内残余废气，提升发动机整机性能。通过 1D 性能仿真分析，选择合适的进气歧管长度，升级机型外特性经济性有微量提升。并且通过减短进气歧管长度，降低了零件成本，如图 5 所示。

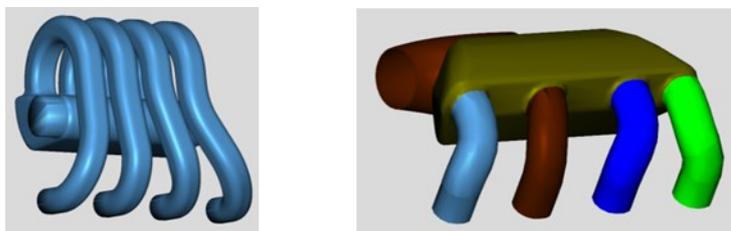


图 5 原型机与升级机型进气歧管对比示意

排气歧管的合理设计能够有效降低缸内残余废气，进而提升进气充量，降低爆震倾向，改善燃烧性能，获得更加的动力性及经济性。马自达汽车公司通过采用图 6 中 (d) 排气歧管设计，有效的降低了缸内残余废气，得到了可观的动力性及经济性提高。

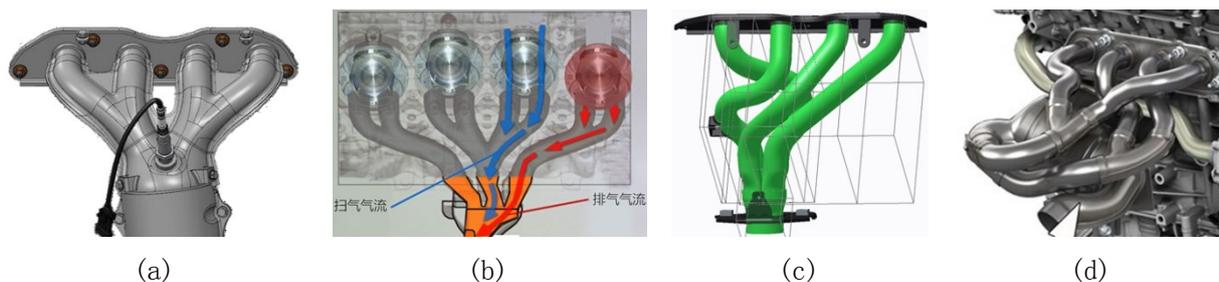


图 6 不同排气歧管设计对比

我司对不同排气歧管进行深入的研究工作，对不同排气歧管的表现进行了大量的仿真及试验工作，如图 7 所示，为上述四种排气歧管设计的残余废气及动力性表现。

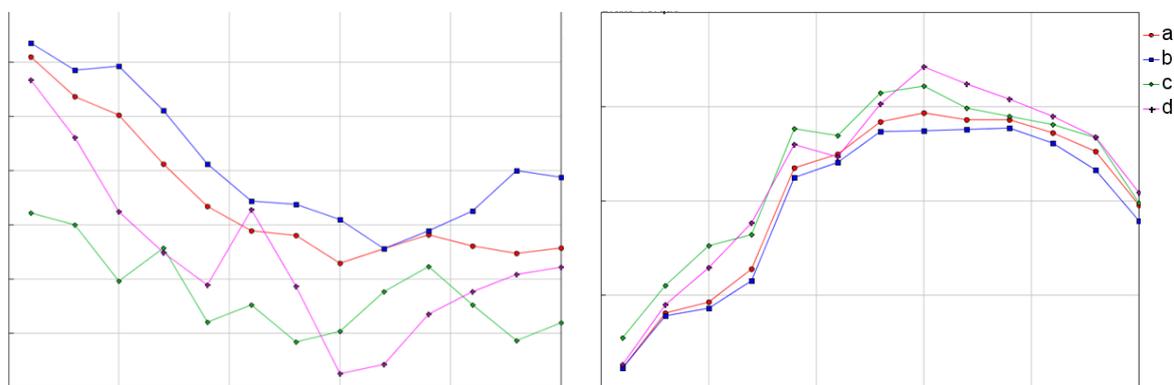


图 7 不同排气歧管设计缸内残余废气及动力性表现

本文研究的升级机型对不同排气歧管设计进行了试验研究，但是基于整车的布置因素及成本考虑，沿用了原型机的排气歧管设计，即图 6 (a) 所示。

## 2.5 优化型线设计及进排气相位

经研究显示，在大负荷 VVT 对于经济性的提高作用很小，所以经过仿真分析及试验数据的统计，项目决定取消升级机型的 VVT 装置，这样节约了整机成本。型线作为进气的关键部件，合理的设计能够保证发动机的进气量要求，进而达到动力性目标。本文通过型线设计、动力学分析、性能分析相结合，得到最适合此机型的型线和进排气相位，保证动力性的同时，获得了最佳的经济性目标。另外，通过降低气门升程，降低弹簧预紧力，降低摩擦，提高发动机经济性。如图 8 所示为升级机型与原型机型线的对比。

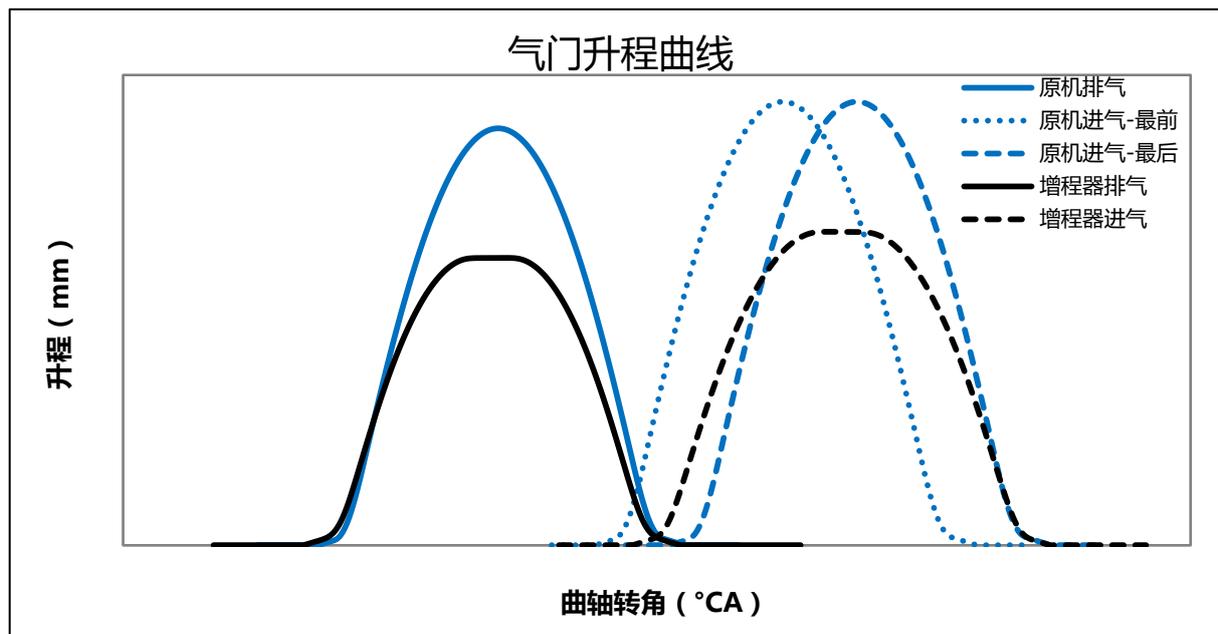


图 8 原型机与升级机型气门型线对比

## 2.6 降低摩擦

降低摩擦能有效的提升发动机经济性，本文升级机型开发过程中采用了如下降摩擦措施：

### 1. 气门弹簧预紧力：

降低气门升程，降低弹簧预紧力，降低摩擦。

### 2. 空气压缩机、发电机：

空气压缩机在增程器式混合动力车型上可以不通过发动机驱动，直接采用电驱动，降低发动机功耗；取消发电机，同样降低了发动机功耗。

另外项目开发过程中还考察了电动水泵、电动机油泵、气门减摩涂层、降低主轴承直径等减摩措施，但综合考虑到项目周期、工艺加工、零件共用、开发成本等因素，没有采用这些减摩措施。因此，对于摩擦方面，此机型还具有比较大的升级空间，下一代机型会进一步提升性能。

## 2.7 当量空燃比

发动机最佳运行工作状态为当量空燃比运行，这样有利于经济性，而且后处理装置三元催化器运行效率最高，所以本文增程器优化过程中希望发动机运行在当量空燃比。如图 9 所示，增程器的目标运行线在高转速时，出于排气系统部件保护原因， $\lambda$  已经小于 1。在增程器优化过程中，优化燃烧、降低摩擦、优化进排气相位等措施都能够降低排气温度，保证增程器实现全工况当量空燃比运行，实现经济性提高，排放降低，进而使本机型具有达到国六标准的潜力。

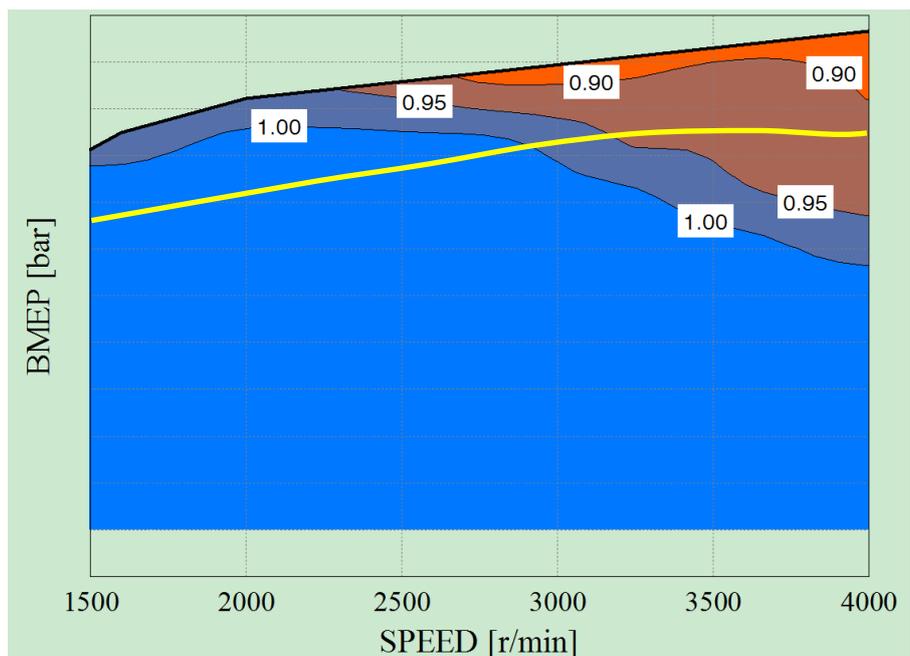


图9 原型机 lambda 万有特性及增程器目标运行线

## 2.8 技术方案总结

综上所述，基于 1.5L 自吸机型，升级为增程器，采用了如下技术方案：

1. 阿特金森循环技术，宽进气型线，优化进排气型线；
2. 高压缩比，优化活塞形状；
3. 取消 VVT，降低产品成本，优化进排气相位，降低缸内残余废气；
4. 进气歧管优化，降低进气歧管长度，降低成本；
5. 减少摩擦损失，取消发电机、取消空气压缩机、降低气门弹簧预紧力等（本文涉及的仿真分析未体现）；
6. 当量空燃比。

## 3 GT-POWER 模型

在 GT-POWER 中搭建该发动机模型，如图 10 所示。使用试验数据对原型机模型进行标定，经标定，平均误差小于 1.8%，最大误差 3.5%，该模型可以用于进一步分析计算，如图 11 所示为模型标定结果。基于原型机模型，创建增程器模型，进行进一步计算分析工作。

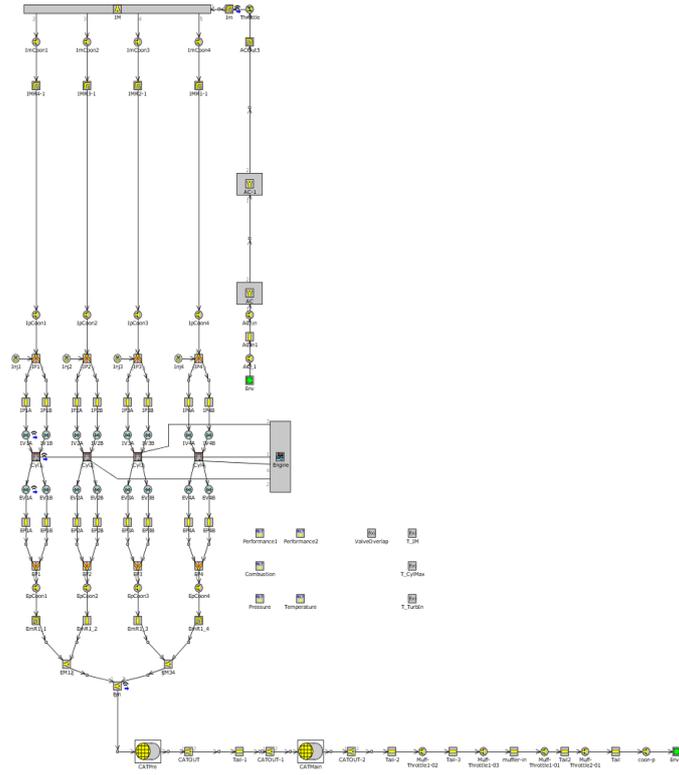


图 10 GT-POWER 模型

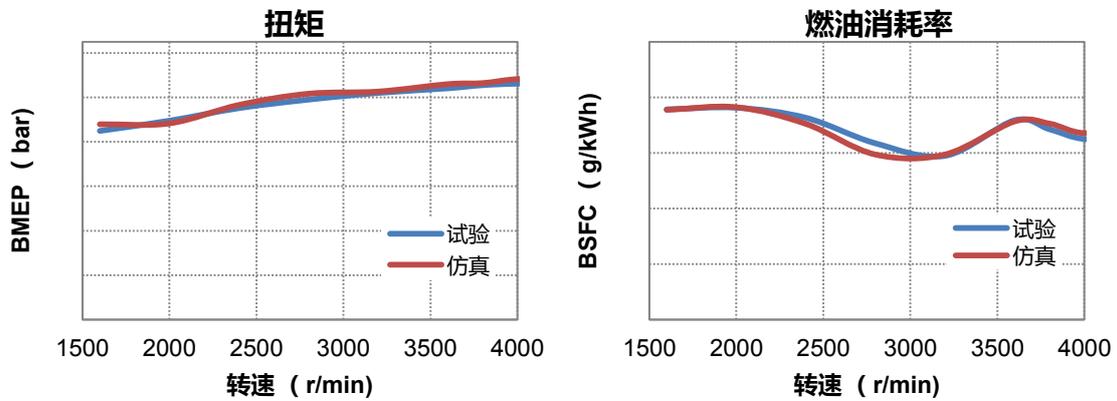


图 11 模型标定结果

#### 4 方案评价

升级之后的增程器具有新的动力性及经济性目标，增程器动力性目标比原型机降低，经济性获得巨大的提升，如图 12 所示。基于上述提出的升级方案，并以图 12 所示的动力性及经济性为目标，以 CAE 的手段下文会对上文提到的技术措施进行优化分析，获得最佳的技术匹配方案。

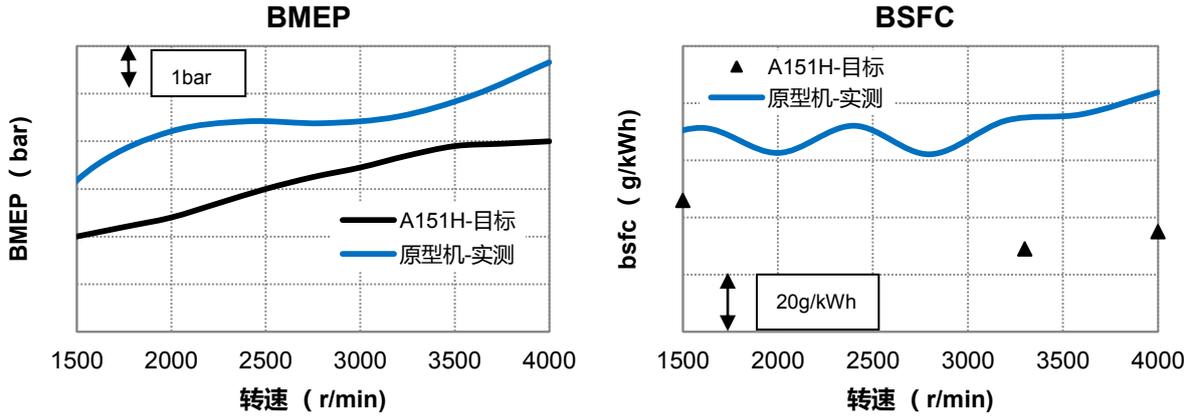


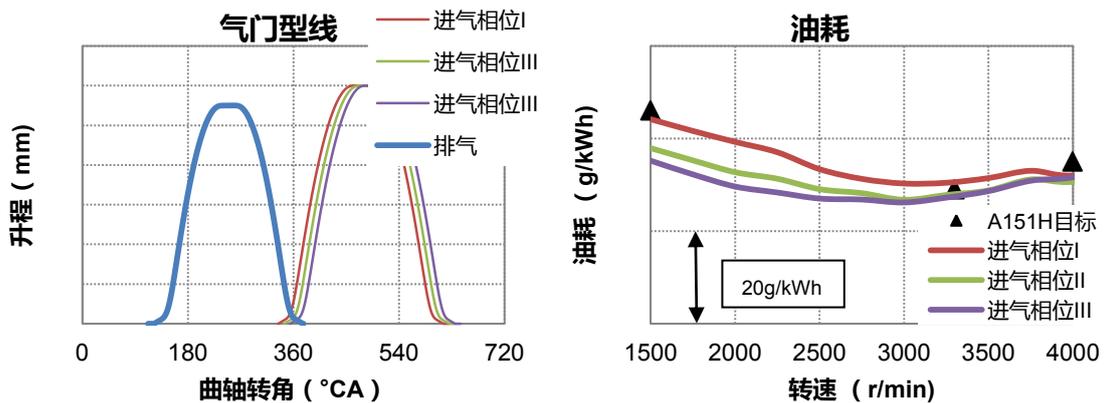
图 12 增程器开发目标

#### 4.1 阿特金森循环评估

原机具有进气单侧 VVT，采用阿特金森循环之后需要取消进气 VVT，对进气相位进行优化设计，进气相位选取的原则是：在达到功率目标的前提下，尽量降低缸内的残余废气系数，以降低发动机的爆震倾向，进而改善燃烧，提升经济性。

从仿真结果可以看出，如图 13 所示：相位前移，低速残余废气增多，低速区爆震风险增大，低速油耗恶化显著；相位后移，阿特金森效果加大，扭矩功率下降明显，不足以满足扭矩功率目标，而且当进气相位退到一定程度之后，残余废气水平不再降低。

综合考虑燃油经济性及扭矩功率（留有一定裕度）等因素，进气相位 II 是最优的选择。



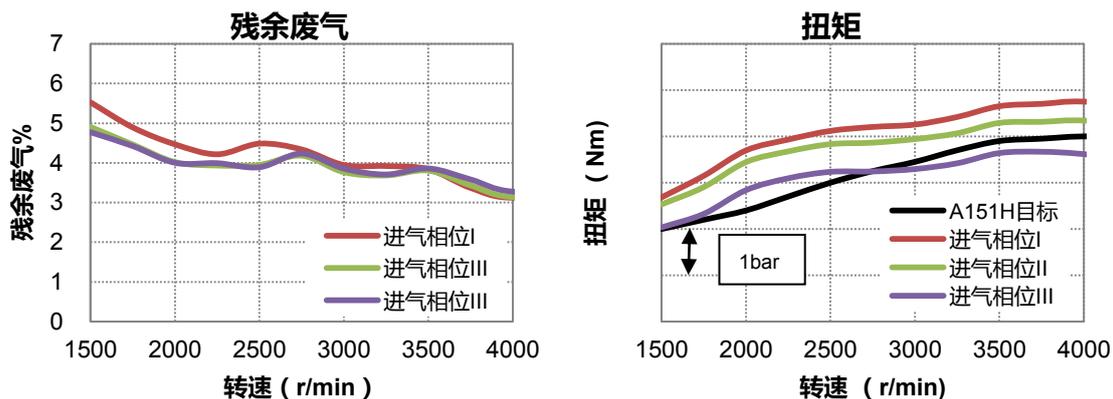


图 13 发动机气门型线、油耗特性、残余废气、扭矩随进气相位的变化趋势

阿特金森型线包角的设计需要进行优化分析，包角设计的原则为：保证功率扭矩目标的情况下，加强阿特金森循环效果，降低爆震，改善燃油经济性。

从仿真结果可以看出，如图 14 所示：加强阿特金森有利于抗爆震水平的提高，进而改善燃烧，提前点火角，有利于燃油经济性的改善；阿特金森+10° CA，功率扭矩水平下降显著，动力性目标不能实现（不推荐）；阿特金森+6° CA，能够满足功率扭矩目标。考虑到高的进气温度对功率扭矩不利因素的存在，动力性需要保留一定的裕度，推荐保留原方案的包角设计。

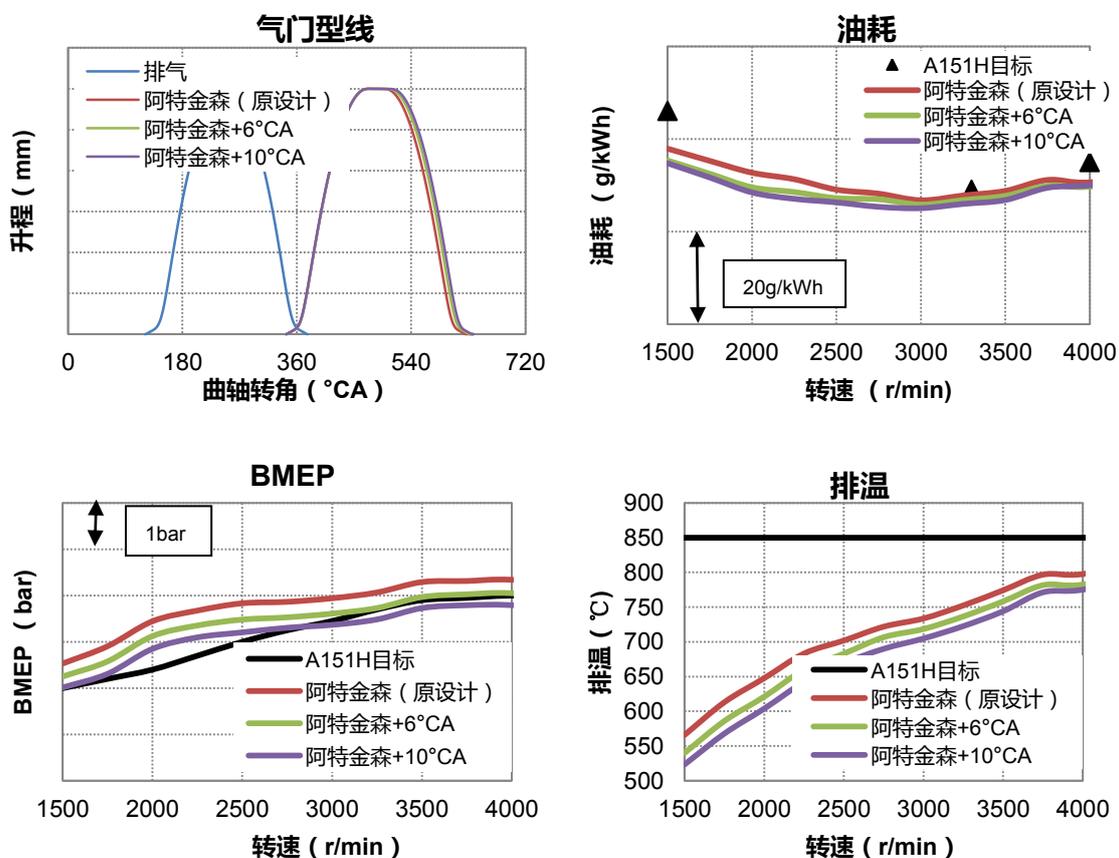


图 14 发动机气门型线、油耗特性、扭矩、排温随进气型线包角的变化趋势

## 4.2 压缩比选型

压缩比的选型首先通过一维的初步选型进行确定，然后通过 CFD 模拟优化进一步进行压缩比的选型，通过一维概念计算优化分析压缩比对动力性及经济性的影响。

压缩比的升高有利于燃烧效率的升高，压缩比升高必然导致爆震倾向的升高，进而导致点火退角的产生，所以需要选择合适的压缩比，保证最优的经济性。从仿真结果可以看出，如图 15 所示：压缩比的升高导致点火退角的产生，当压缩比过大和过小时（14 和 11）都不利于外特性的经济性，当压缩比为 12 和 13 时，燃油经济性最优。

为了能够兼顾可能应用到的部分负荷区域，部分负荷可以做到点火角最优，压缩比越高热效率越高，所以推荐选择压缩比 13，压缩比 12 作为备选方案，并对燃烧室进行必要的燃烧优化，保证达到最佳热效率。

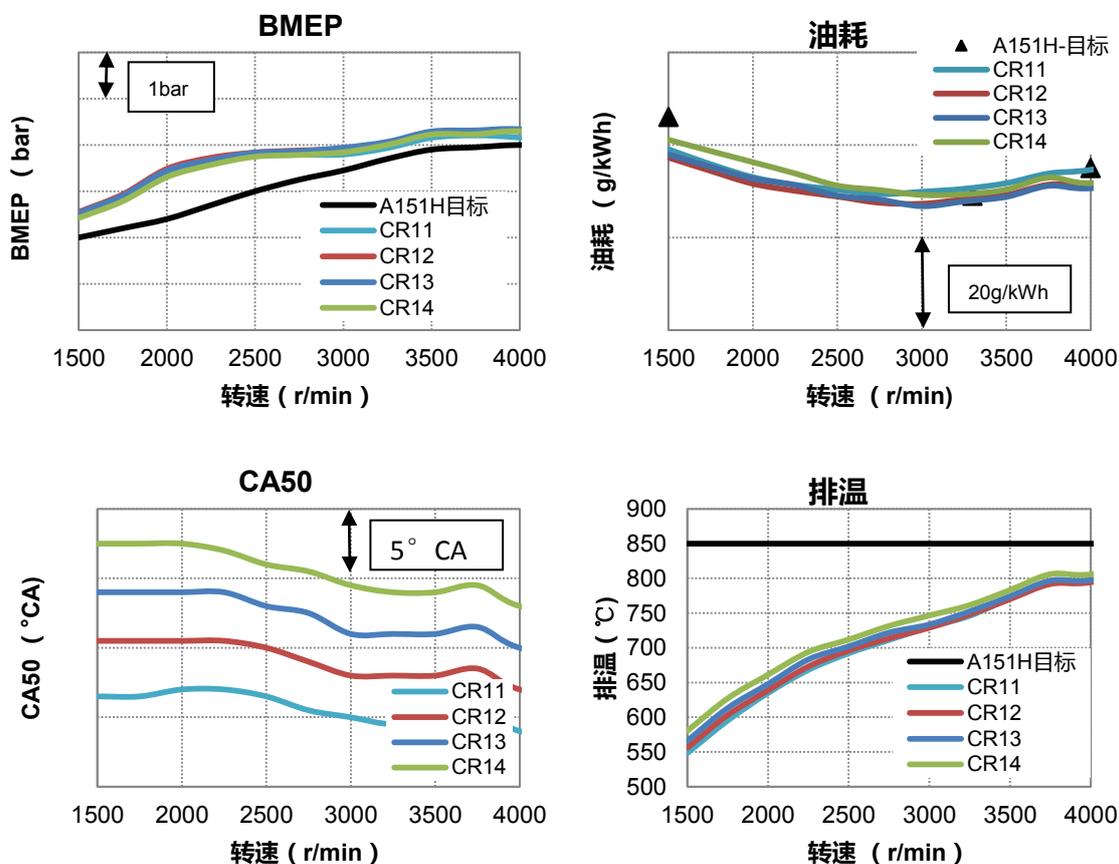


图 15 发动机扭矩、油耗特性、CA50、排温随压缩比的变化趋势

## 4.3 进气歧管选型

对于自吸机型，进气歧管的长度能够影响进气谐振，进而影响发动机的充量系数，提升发动机新鲜空气充量，提升发动机的动力性。增程式发动机有其特殊性，即满足动力性要求即可，追求更优的经济性，并不追求更高的动力性。遵循这样的原则通过一维优化分析，对进气歧管进行优化选型。

其中进气歧管长度  $I < II < III$ ，从仿真结果可以看出，如图 16 所示：随着进气歧管增长，扭矩有

一定的提升，扭矩的提升带来爆震倾向的加大，进而必须通过点火角退角抑制爆震，导致燃烧效率下降，燃油经济性的下降。当进气歧管 I 时，经济性最佳。

进气歧管通过一维进行初步选型，然后根据布置要求进行合理设计，推荐进气歧管设计 I 最佳。

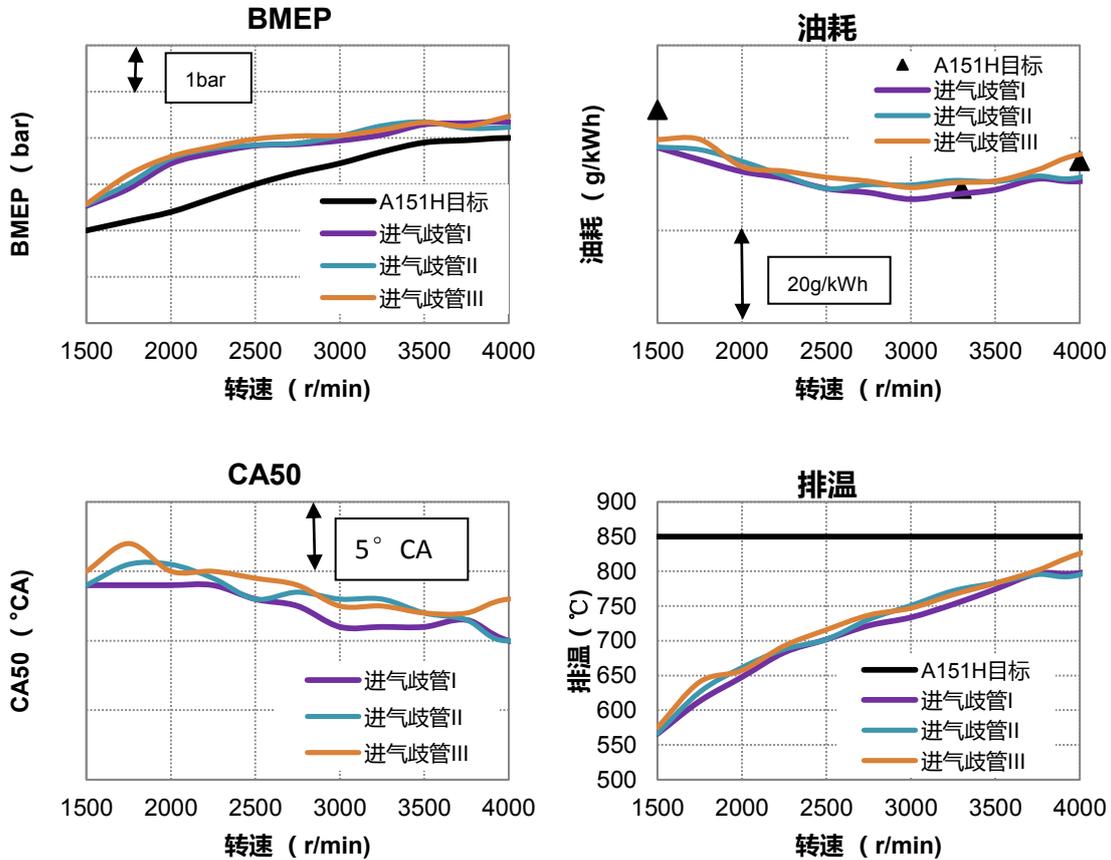


图 16 发动机扭矩、油耗特性、CA50、排温随进气歧管的变化趋势

#### 4.4 VVT 分析

增程器设计过程中，取消了进气 VVT 机构，降低了整机成本，而取消进气 VVT 机构会对油耗有一定的不利影响。通过仿真的手段对 VVT 是否采用进行了系统分析，如图 17 所示为采用进气 VVT 万有特性油耗改善情况。

在外特性工况，由于阿特金森循环技术的应用，如果进气相位后移会导致功率扭矩的不足，不能满足动力性目标，如果进气相位前移，进气重叠角加大，残余废气增多，爆震倾向增大，点火退角，热效率降低，油耗升高。所以在外特性工况使用相位保持与上文优选相位一致。

在中大负荷区域，考虑到 VVT 的平顺及调节范围，而且 VVT 在中大负荷区域对于泵气损失的降低作用比较小，所以节油效果有限。

在小负荷区域，通过调整 VVT 相位能达到改善燃油经济性的目的，节油潜力主要受到燃烧稳定性和 VVT 平顺性的影响。在小负荷小转速区域，不能采用大的重叠角，过大的残余废气系数会导致燃烧稳定性不合格。

综上所述，对于此款增程式发动机，虽然 VVT 能够提升部分负荷的经济性，但是增程器的运行区域为最佳效率区-外特性。而在外特性经过优化设计相位及型线，VVT 不起作用，所以可以去除 VVT 机构，这样合理的技术措施和控制策略既节约了成本又保证了发动机的经济性。

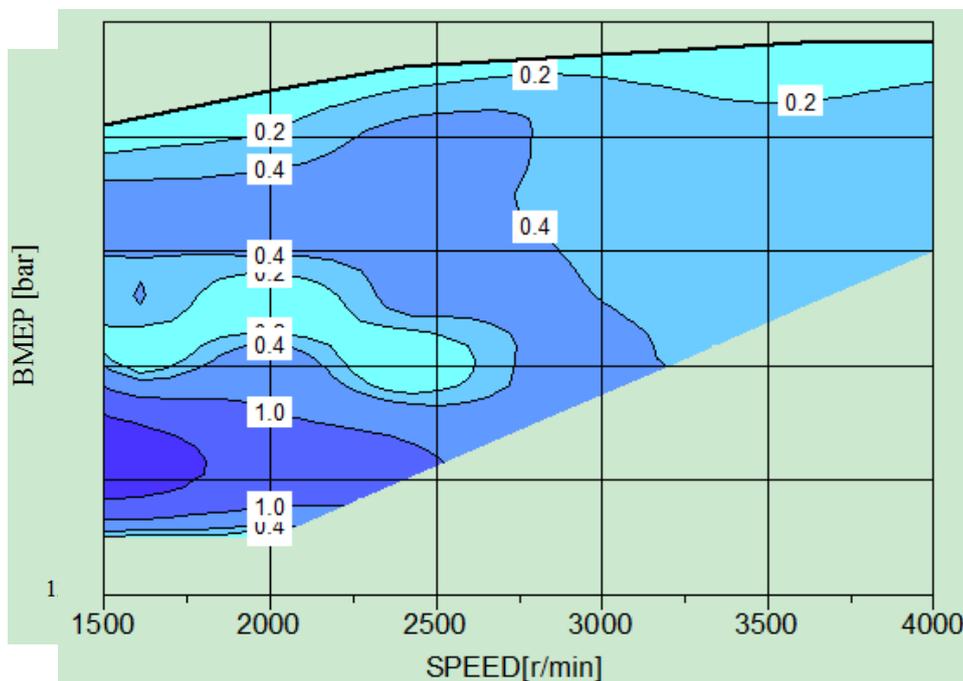


图 17 发动机采用 VVT 节油效果

#### 4.5 动力性经济性评估

从基础发动机改进升级为增程式发动机，经过了上述一系列的优化设计：1. 选取最佳压缩比，保证最佳热效率；2. 优化型线设计，选取合适的阿特金森型线，保证动力性的同时优化经济性；3. 选取最佳的进排气相位，降低缸内残余废气；4. 取消 VVT，降低成本，并与阿特金森循环型线配合；5. 优化进气歧管长度，改善经济性；6. 采用当量比燃烧，充分利用燃油能量。通过这些措施，在原机基础上采取尽量小的改动，保证动力性的同时达成最好经济性的目的。

对此增程器进行风险评估，如图 18 所示：1. 能够满足功率扭矩目标；2. 能够实现经济性目标，但是最低油耗目标具有一定的风险。油耗风险最终取决于燃烧开发的结果，通过合理优化燃烧系统、优化进排气系统、降低系统摩擦可以进一步提高燃油经济性，进而降低风险。

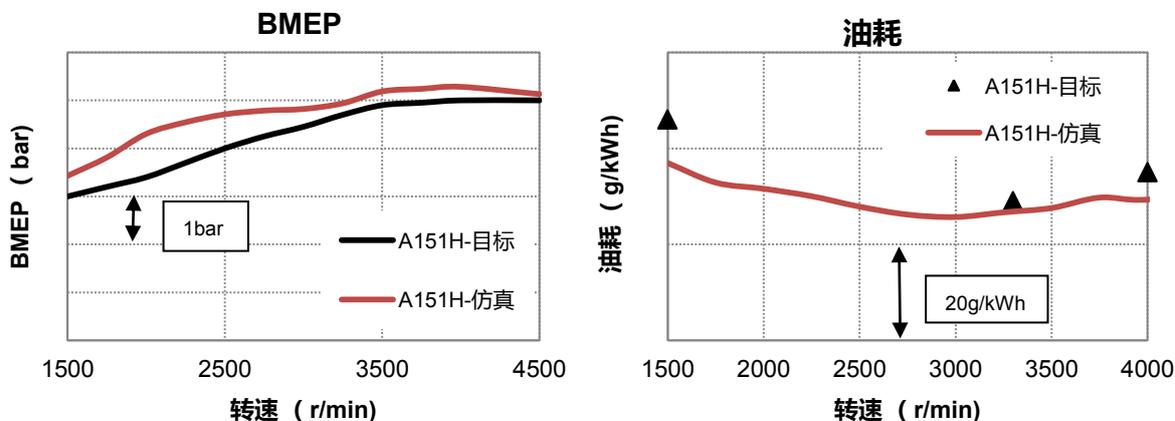


图 18 发动机动力性与经济性结果

#### 4.6 万有特性油耗分析

万有特性油耗分布情况如图 19 所示，黑色线为等油耗分布线，红色线为等功率分布线，可以看出在发动机同功率输出线上，燃油经济性在外特性经过了发动机的最佳效率区，符合设计的标准。在整车充电工况中，根据发电需求功率，增程器运行在外特性都能够实现最佳的运行效率。

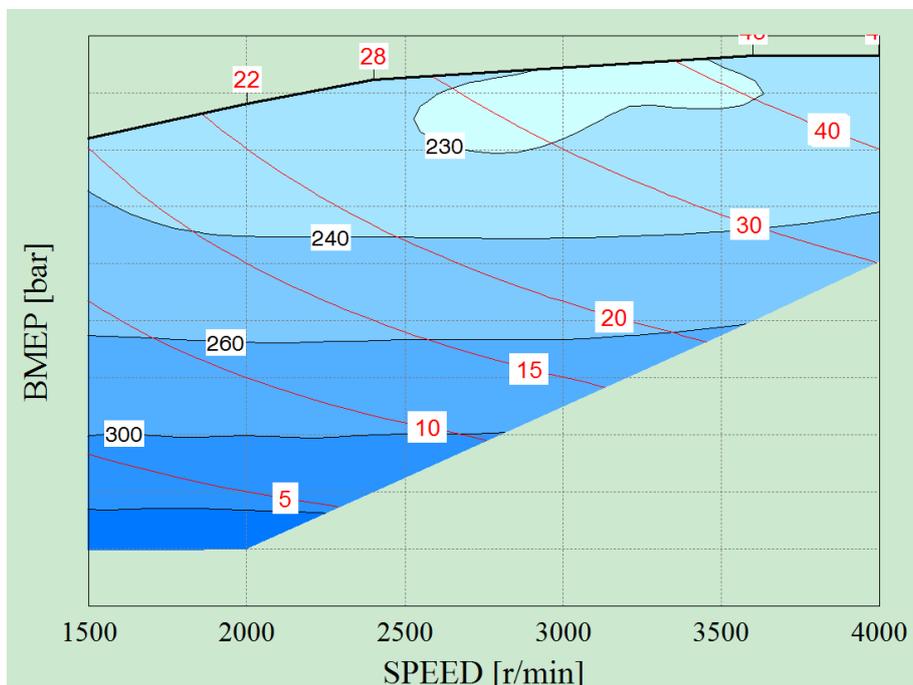


图 19 增程器万有特性油耗分布

### 5 试验结果

对升级之后的增程器进行了试验，如图 20 所示，试验结果表明：仿真预测具有很高的精度，动力性及经济性都能达到良好的预测。通过仿真对发动机性能的预测具有很好的前瞻性，CAE 手段对项目的开发起到了重要的作用。

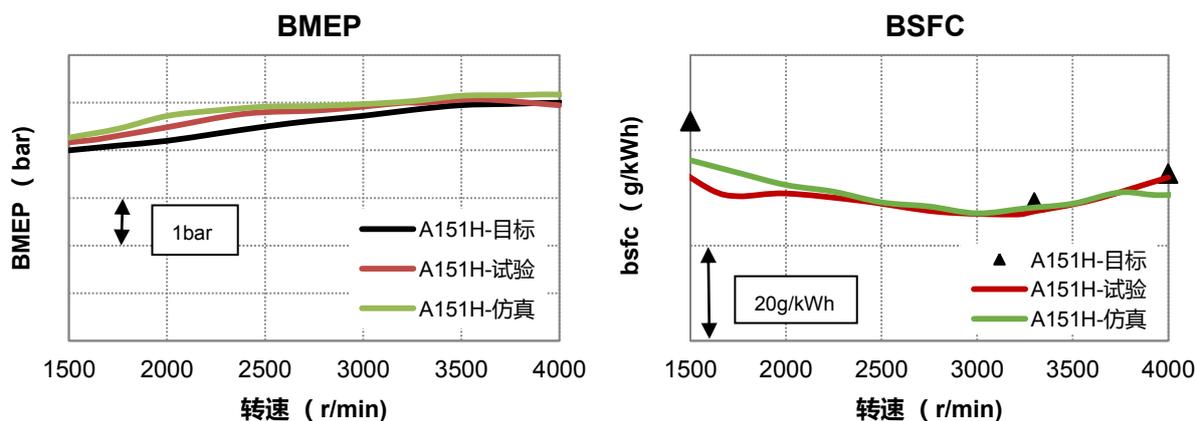


图 20 试验与仿真结果对比

对升级的增程器与原型机进行万有特性对比，发现升级机型油耗降低 5-15%，经济性有了巨大的提升，如图 21 所示。

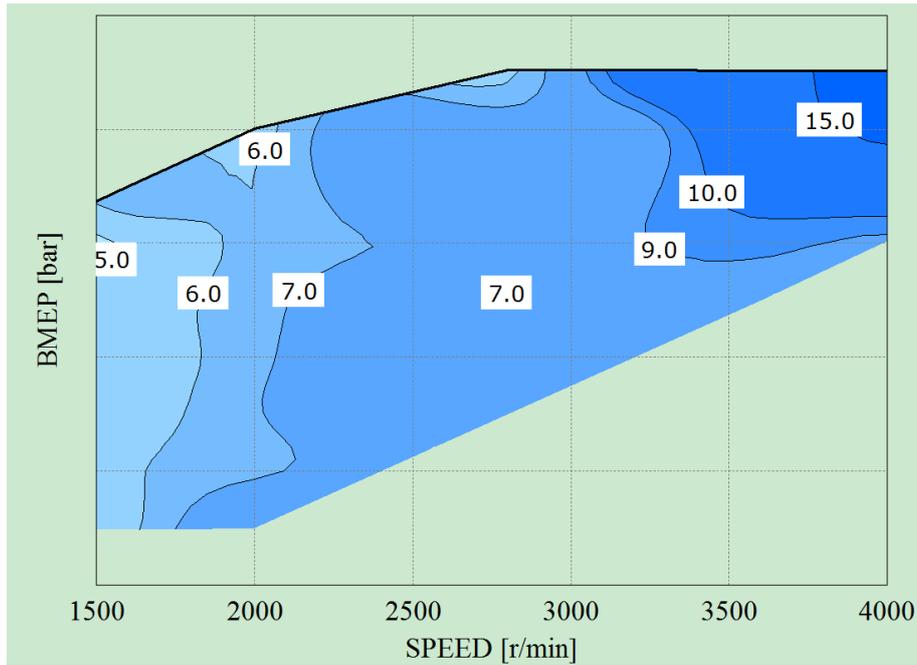


图 21 增程器与原型机万有特性油耗降低比例

## 6 结论

- 1) 以量产 1.5L 自吸发动机为基础，通过一维计算分析，优化了阿特金森循环进气型线、优选了进排气相位，选择最佳压缩比 13，选择最佳进气歧管长度 100mm，采用当量空燃比，最终达到最优经济性的目的，为设计及开发工作提供依据和参考；
- 2) 进行优化选型之后，发现动力性及经济性目标能够实现；
- 3) 通过对万有特性油耗的分析，验证了外特性运行线为此增程式发动机的等功率最佳经济性运行线，增程器运行在发动机最佳效率区，并验证了可以取消进气 VVT，降低整机成本；
- 4) 试验及仿真结果均表明，升级后增程器经济性得到了巨大的提高，油耗降低 5%–15%；
- 5) 通过与试验对比分析发现，仿真预测具有很高的精度，动力性及经济性都能达到良好的预测，CAE 手段对项目的开发起到了重要的作用。
- 6) 此机型有进一步提升经济性的基础和潜力，需要优化燃烧系统、优化进排气系统、进一步降低摩擦等措施。

## 7 参考文献

- [1]周龙宝，《内燃机学》，机械工业出版社，1999 年 6 月；
- [2]陈家瑞，《汽车构造》，机械工业出版社，2009 年 1 月。