

某 1.5L 增压直喷发动机性能提升研究

The Investigation of Performance Improvement of a 1.5T GDI Engine

王莹臻 郭凯 张小矛 陈明 徐政

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

摘要: 为了满足日益严苛的油耗法规, 对某 1.5L 增压直喷发动机进行技术升级, 采用米勒循环、高压压缩比和降低摩擦损失等技术措施, 降低油耗。本文采用 GT-Power 软件, 通过遗传算法, 优化进、排气包角及相位, 确定满足油耗目标的气门升程曲线方案。与此同时, 为了保证升级发动机的动力性, 重新匹配涡轮增压器, 最终达到油耗降低、低速扭矩有所提升, 中高速功率扭矩不损失的效果。低速瞬态响应性与采用原涡轮增压器相比提升约 11%。

关键词: 米勒循环、油耗、动力性

Abstract: In order to meet the increasingly stringent fuel economy regulation, the technical upgrade of a 1.5T GDI engine is investigated in this paper. Miller cycle, higher compression ratio and FMEP decreasing techniques will be used. The intake and exhaust valve duration and timing are optimized to determine the valve lift design using genetic algorithm by GT-Power software. At the meantime, to make sure the dynamic performance of the engine is not deteriorated, the turbocharger is re-matching. Finally, the fuel economy is improved, the low end torque is increased and the high speed power is maintained. And the transient response of low speed torque compared with the base turbocharger is increased by about 11%.

Key Words: Miller Cycle, Fuel Consumption, Dynamic Performance

1. 前言

国务院下发的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020 年)》中明确要求, 到 2020 年, 当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至 5.0 升/百公里。为了应对日益严苛的油耗法规, 发动机需要采取各种技术措施来提升有效热效率, 降低油耗, 满足目标。

与传统的奥拓循环相比, 米勒循环通过 EIVC(进气门早关)实现膨胀比大于有效压缩比, 从而提升发动机的热效率。由于有效压缩比较小, 爆震倾向小, 可配合采用更高的发动机几何压缩比, 降低油耗。采用小包角进气凸轮型线的米勒循环, 可以提升进气歧管压力, 增大节气门开度, 降低泵气损失, 进一步降低油耗。但由于采用较小的进气凸轮型线, 全负荷时进气量受到限制, 通常会影响发动机的动力性。

本文基于某 1.5L 增压直喷发动机, 采用米勒循环、提升压缩比并降低摩擦损失, 研究其降低油耗的效果以及对全负荷扭矩和瞬态影响性的影响。

2. 基础机型及其模型标定

基础发动机的技术参数如下表 1 所示。

表 1 基础发动机技术参数

技术参数	指标
排量	1.5L
气缸排列形式	直列
进气方式	增压
喷射方式	缸内直喷
气门正时	进、排气双可变（VVT）
额定功率	124kW
最大扭矩	250Nm
压缩比	10

搭建基础发动机的 GT-Power 模型如图 1 所示。根据试验结果，对模型进行标定。标定参数包括：发动机进排气系统各处温度及压力、充气效率、进气量、功率、扭矩、缸压和比油耗等。如图 2 和图 3 所示，分别为进气量和进气歧管压力的标定结果，计算误差在 3%之内，可以用于该发动机性能升级的仿真研究。

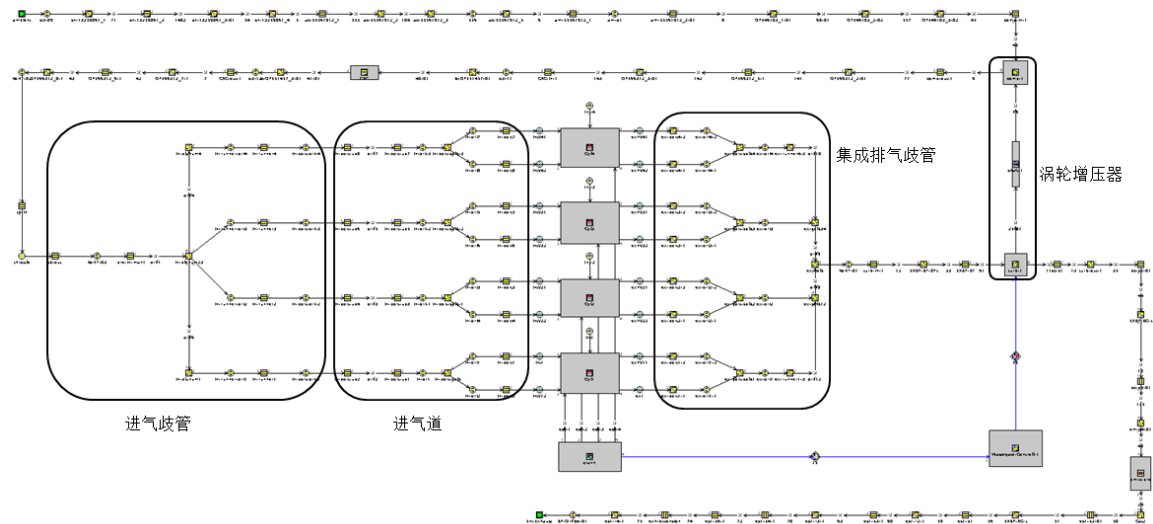


图 1 基础发动机的 GT-Power 模型

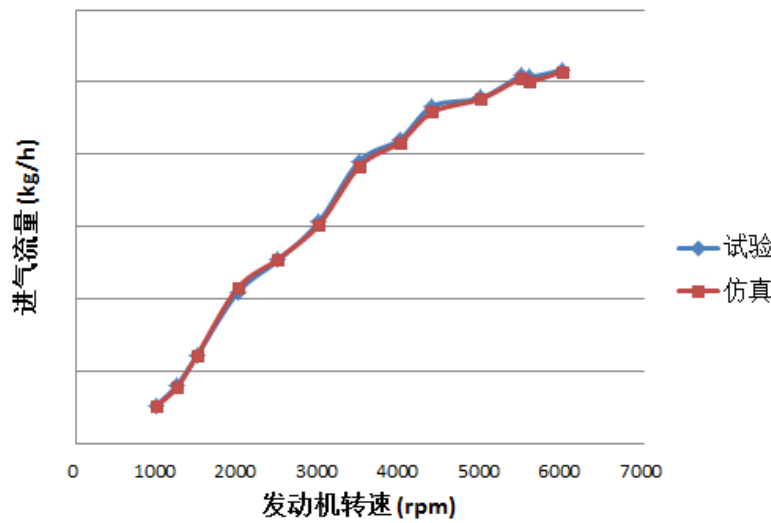


图 2 进气流量标定结果

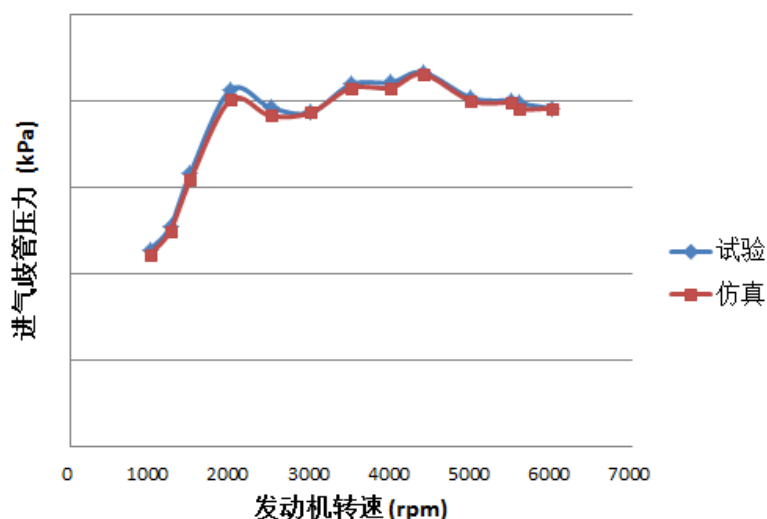


图3 进气歧管压力标定结果

3. 性能提升方案

3.1 方案设计

为了达到降油耗的目标,该发动机的升级版采用米勒循环,压缩比由 10 提升至 11.5,摩擦损失在 2000rpm 降低 6.5%左右。另外,为了配合米勒循环,燃烧系统需重新设计,采用高滚流比气道。

为了实现米勒循环,除了提前进气门正时外,重新优化设计进气升程曲线,采用小包角和小升程的设计。考虑到排气门升程曲线以及进、排气正时也会对油耗有影响,故从进气升程曲线、排气升程曲线、进气正时和排气正时四个方面对 2000rpm 2bar 特征点油耗进行优化仿真。由于配气机构运动学和运动学的要求,气门升程与包角有一定的关系,通常较小的包角对应较小的升程曲线。为了简化设置,在模型中将气门升程的缩放比例设置为与包角缩放比例相等。如表 2 所示,设置进气包角缩放比例系数 In_Ang_Mult 、排气包角缩放比例系数 Exh_Ang_Mult 、进气门开启角 IVO 和排气门关闭角 EVC 四个自变量的变化范围。约束条件为缸内残余废气比例 Internal-EGR,优化目标为比油耗 BSFC 最小,采用遗传算法进行直接优化。

表 2 自变量设置

	In_Ang_Mult	Exh_Ang_Mult	IVO	EVC
最小值	0.75	0.9	-35	-40
最大值	0.95	1.1	25	20

3.2 优化结果

如图 4 所示,为比油耗 BSFC 的优化收敛过程,由于存在约束条件,优化结果并非图中的最小值。最终优化结果显示 2000rpm 2bar 的 BSFC 降低约 8%,满足油耗目标。四个自变量和约束变量的优化结果如表 3 所示。优化过程计算点的四个自变量与因变量 BSFC 的对比关系如图 5 所示,其中蓝色十字点为最终的优化点。

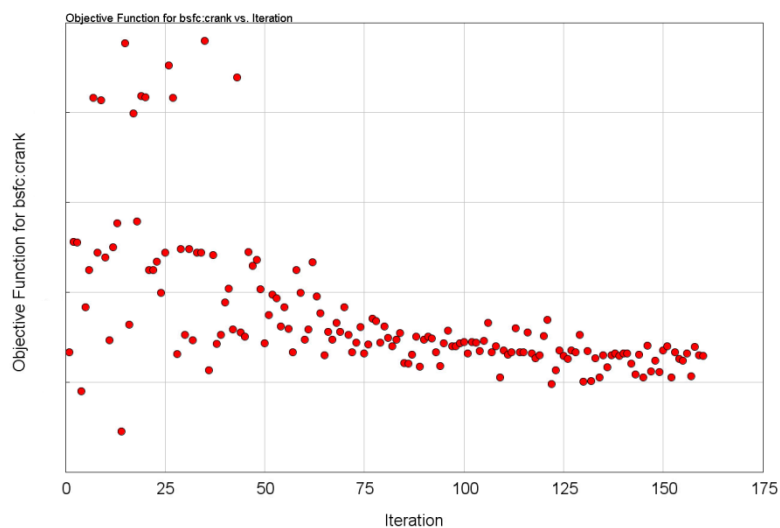


图 4 BSFC 的优化收敛过程

表 3 自变量和约束变量的优化结果

	In_Ang_Mult	Exh_Ang_Mult	IVO	EVC
优化值	0.79	0.95	-28	-26

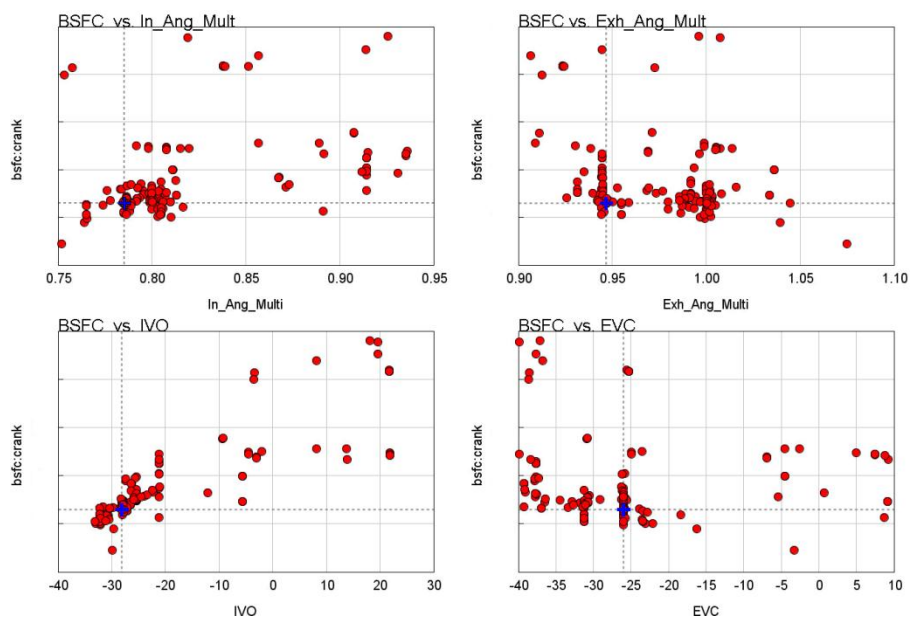


图 5 自变量和因变量的关系

优化结果的进、排气升程曲线是通过基础机型缩放得到的，根据该结果设计满足运动学和动力学的升程曲线，与基础发动机的对比情况如图 6 所示。

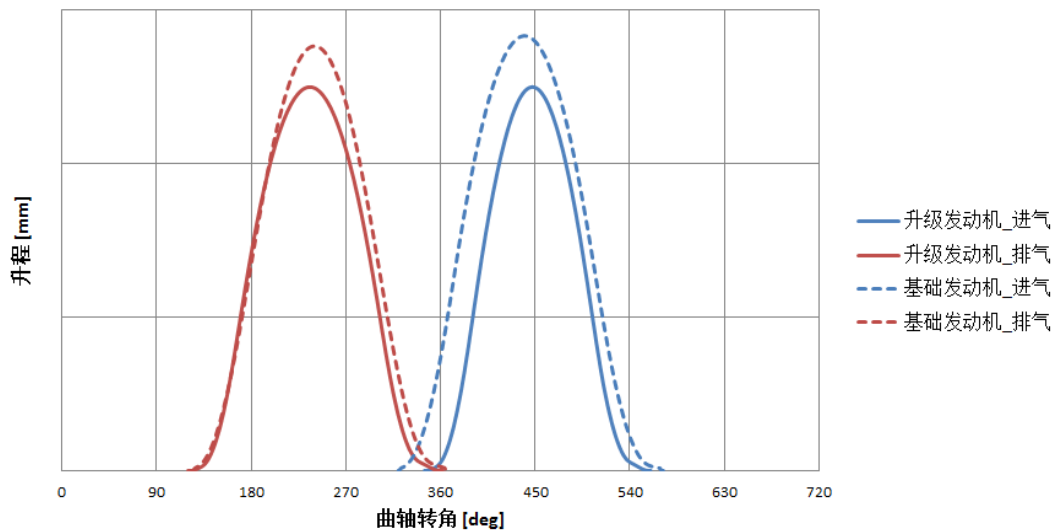


图 6 优化前后的气门升程曲线

4. 部分负荷油耗收益

将进、排气升程曲线更新为最终设计，计算升级发动机四个部分负荷特征点的比油耗 BSFC。如图 7 所示，为升级机型与基础机型的 BSFC 对比及收益情况。可以看到采用高压压缩比的米勒循环在低速低负荷时的收益更大，转速和负荷越低，收益越大。这主要是由于低速低负荷时，节气门开度较小，泵气损失更大，采用米勒循环后，节气门开度增大，可以大幅降低泵气损失，获得油耗收益。

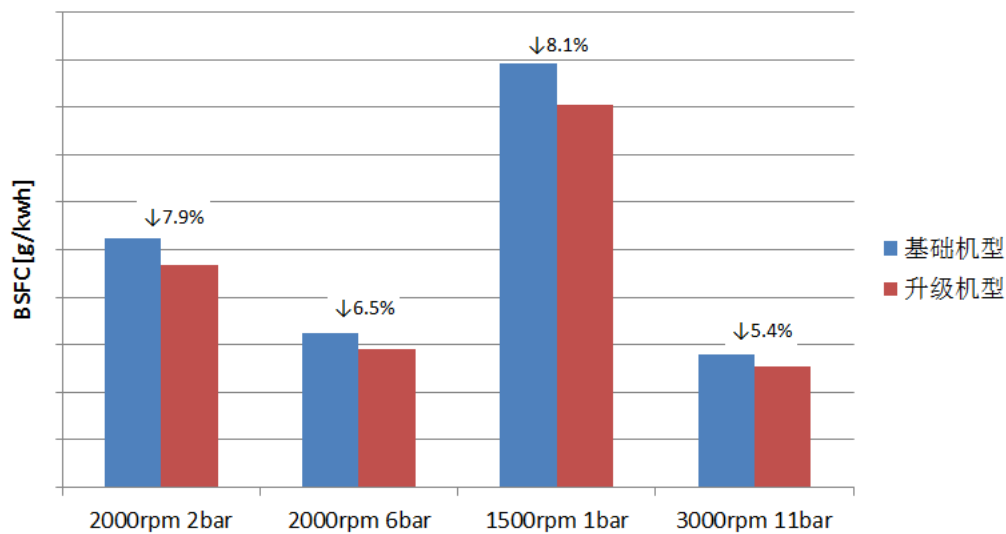


图 7 升级机型与基础机型油耗对比及收益

以 2000rpm BMEP2bar 为例，分解各技术措施的油耗收益，如图 8 所示。泵气损失 PMEP 降低带来的油耗收益最大，为 4.7%。

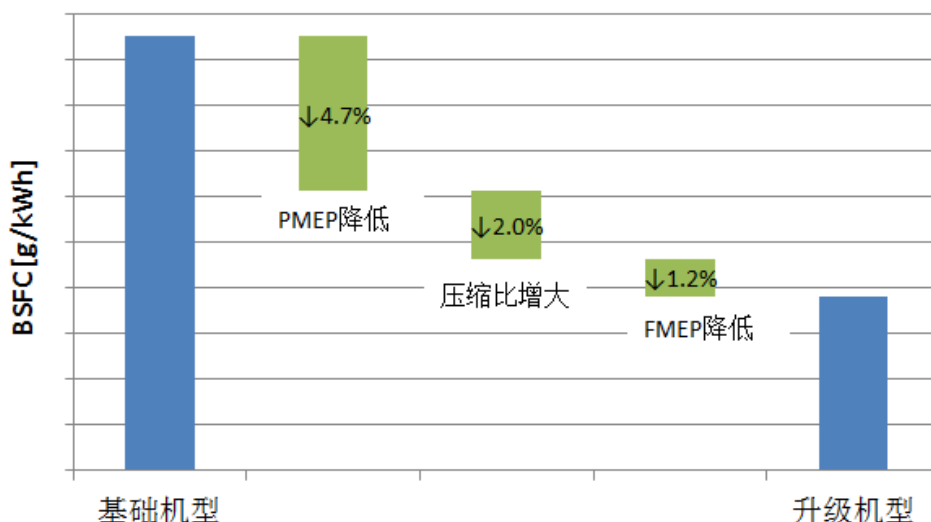


图 8 2000rpm2bar 各项技术措施油耗收益分解

5. 对动力性的影响及优化

5.1 全负荷扭矩

采用新设计的进、排气升程曲线，且压缩比提升、摩擦损失降低后，全负荷扭矩仿真结果与基础机型相比，基本达到相同水平。采用米勒循环后，功率扭矩未损失的主要原因在于，一方面，由于各项技术措施使得热效率有所提升，达到相同功率所需的进气量减小，另一方面，基础机型的涡轮增压器还有一定的余量，通过提升增压压力，扭矩得到了补偿。如图 9 所示为基础机型和升级机型的压气机匹配图对比。

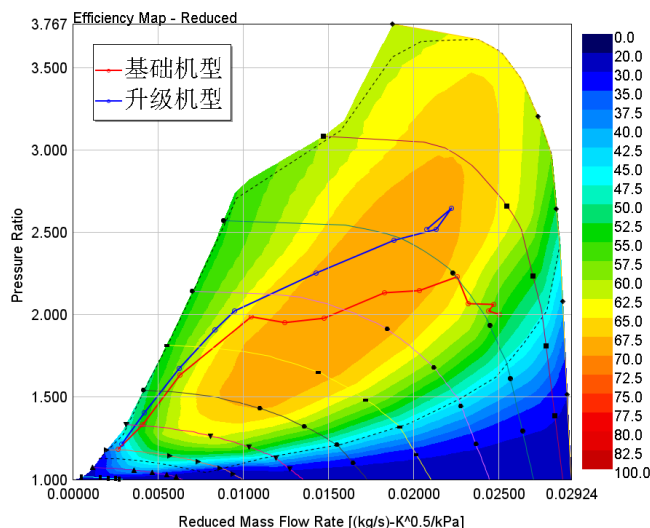


图 9 基础机型和升级机型的压气机匹配图对比

为了提升低速扭矩及响应性，重新进行涡轮增压器匹配，如图 10 所示为重新匹配涡轮增压器前后升级机型的扭矩与基础机型的对比。通过重新匹配涡轮增压器，1000rpm~1500rpm 扭矩提升 10%~25% 左右。升级机型的新压气机匹配情况如图 11 所示，与图 9 对比可知，新压气机的效率更高，且低速余量更大。

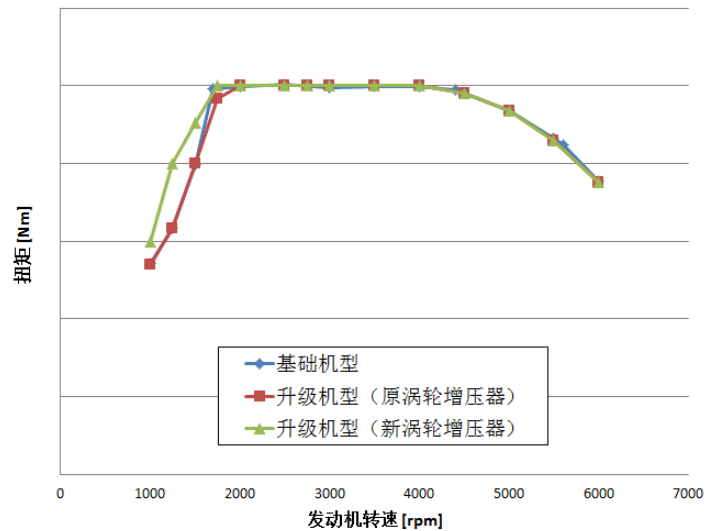


图 10 升级机型与基础机型的扭矩对比

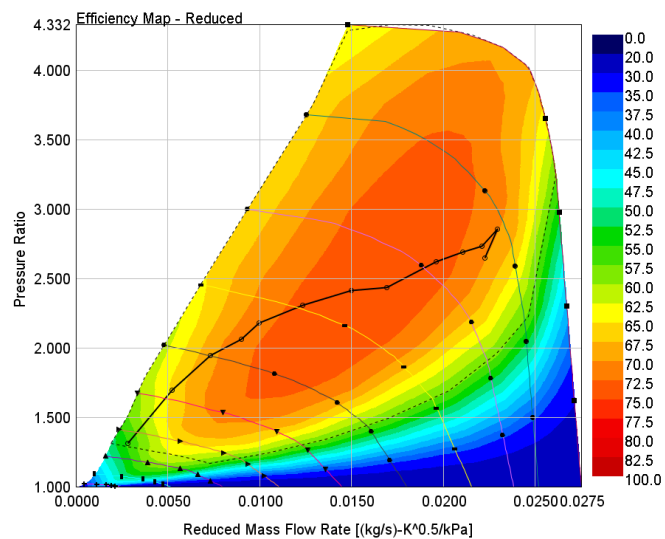


图 11 升级机型与新压气机的匹配图

5.2 瞬态响应性

本文评估发动机瞬态响应性的计算工况为转速 1500rpm，负荷从 BMEP 2bar 到全负荷瞬态工况，最终比较 2bar 到 90%全负荷的响应时间。基础发动机、采用原涡轮增压器和新涡轮增压器的升级发动机的瞬态响应时间的计算结果如图 12 所示，采用米勒循环后，1500rpm 的响应时间变长了 27%左右。通过涡轮增压器优化，与基础发动机的差距缩小到 16%。

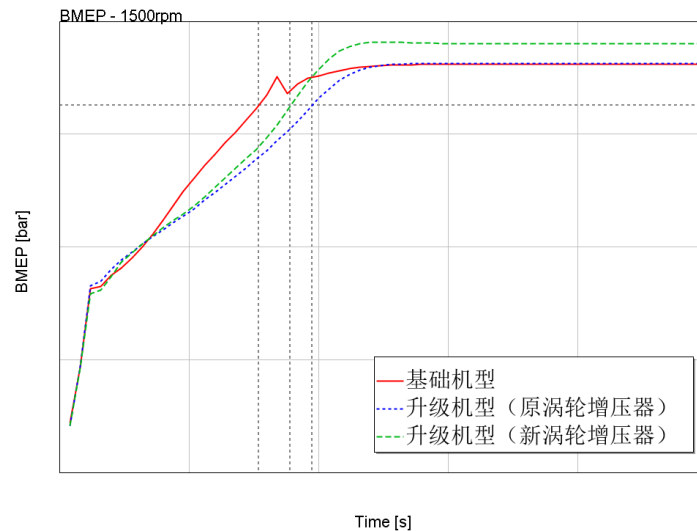


图 12 基础发动机和升级发动机的 1500rpm 瞬态响应性对比

6. 结论

本文研究了某 1.5L 增压直喷发动机，采用米勒循环、增大压缩比并降低摩擦损失的降油耗技术升级。仿真结果显示，四个部分负荷工况点比油耗平均降低 7%。通过涡轮增压器重新匹配，达到了采用米勒循环，低速扭矩有所提升，中高速功率扭矩不损失的效果。瞬态响应性与采用原涡轮增压器相比提升约 11%。

7. 参考文献

- [1] 周龙宝 主编. 《内燃机学》[M]. 机械工业出版社, 2006. 01
- [2] Yu Wan, Aimin Du. Reducing Part Load Pumping Loss and Improving Thermal Efficiency through High Compression Ratio Over-Expanded Cycle[C]. SAE Paper 2013-01-1744
- [3] Martin Scheidt, Christoph Brands, Matthias Kratzsch, Michael Gunther. Combined Miller/Atkinson Strategy For Future Downsizing Concepts[J]. MTZ, 2014; 2014-75.

本项研究工作得到了上海市科学技术委员会的资助，资助课题编号为 14DZ2260600，课题名称为上海市汽车动力总成重点实验室。