

基于 GT-POWER和 modeFRONTIER的某小排量涡轮增压 发动机性能多目标优化

Multi-objective Optimization of Performance for a Turbocharged Engine with Small Displacement Based on GT-POWER and modeFRONTIER

吴胜奇 陈龙华 华寅 王森 张玉银 许敏

(上海交通大学汽车工程研究院汽车发动机研究所)

摘要 运用 GT-POWER对发动机进行一维性能仿真计算,选择匹配了合适的涡轮增压器。为了提升低速段的性能,我们运用多目标优化软件 modeFRONTIER与 GT-POWER联合仿真,对发动机进排气管路尺寸、进排气门凸轮型线、进排气 WT 进行优化。优化后发动机的低速段性能得到很大幅度的提升,扭矩提高了 49.3%,功率提高了 37.5%

关键词 :GT-POWER modeFRONTIER 联合仿真、多目标优化

Abstract: In order to improve the low-speed performance of engine greatly, the simulation was done to choose the suitable turbocharger based on GT-POWER. And also through the collaborative simulation with modeFRONTIER, some parameters are optimized, such as the size of intake and exhaust pipes, the profile of cams, and WT. The results show that the performance under the condition of low speed has a great improvement, in which the torque rose by 49.3%, and the power 37.5%.

Keywords: GT-POWER modeFRONTIER Collaborative simulation Multi-objective optimization

1 前言

利用增压技术,是这些年来提高发动机性能的有效方法。增压技术不仅能有效的提高发动机的动力性能,大大提升其功率与扭矩,并且能在很大程度上改善发动机的燃油经济性。现在常用的增压技术主要有机械增压与废气涡轮增压,现今在中国广泛得以应用的是废气涡轮增压。机械增压虽然能在发动机低转速时能发挥很好的作用,但一些关键性的技术还有待突破,而废气涡轮增压技术已经比较成熟,很多厂家已经实现涡轮增压发动机的量产。

本文以某公司一款排量为 1.0L 的发动机为原型,选择匹配一款合适的涡轮增压器后,利用 GT-POWER与 modeFRONTIER联合仿真,对其进行多目标优化,包括进排气管路结构尺寸,凸轮型线与进排气 WT,优化计算结果表明发动机性能得到很大提升。原机性能及目标性能如下表 1所示。

表 1 原机性能与目标性能

	发动机特性	功率 P (Kw)@转速 n (RPM)	扭矩 T(N.m)@转速 n(RPM)
原机	自然吸气	47@5200	90@4800
目标	涡轮增压 + 双 VT	75@5600	140@2500-4500

2 GT-POWER原机模型的建立与验证

根据该汽车公司汽车提供的相关数据，结合对样机的实验及测量，搭建了 GT-POWER 计算模型，如图 1 所示。

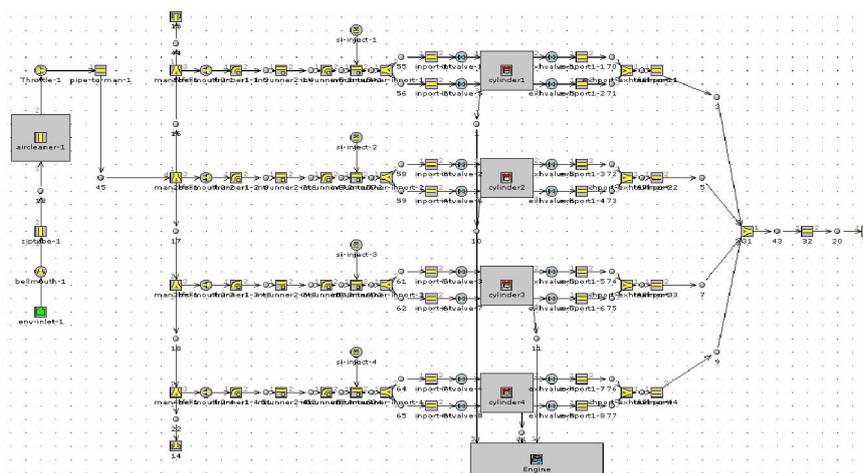


图 1 GT-POWER模型

为了验证模型准确性，将仿真计算结果与实验值进行了详细对比，确保仿真计算值与实验值的误差控制在 5%以内。图 2至图 7所示为充气效率、缸内压力（额定转速 5200）、功率、扭矩、进气压力、排气背压等实验数据（红色线 EXP_**）与 GT计算值（蓝色线 MODE_**）的比较。

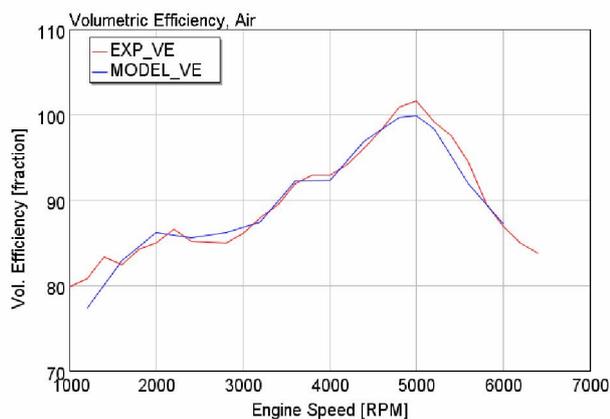


图 2 充气效率

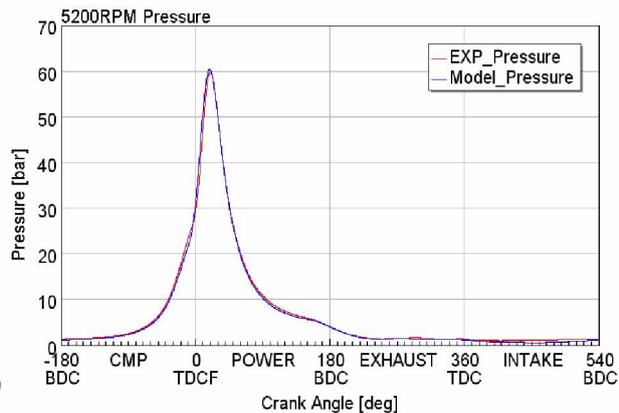


图 3 缸内压力

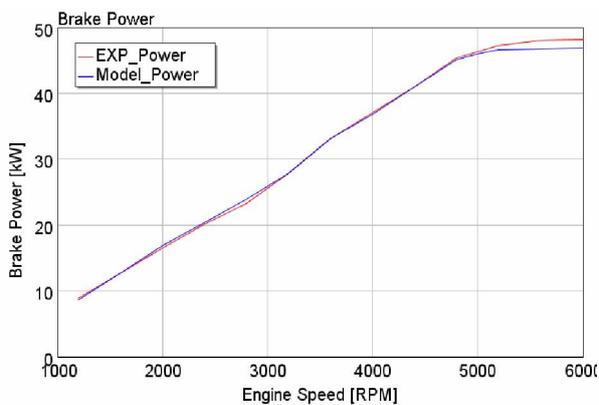


图 4 功率

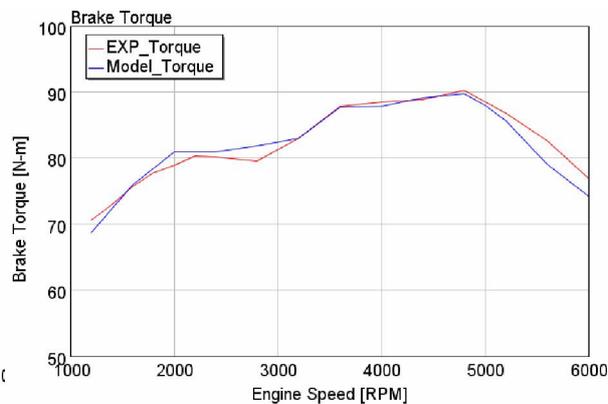


图 5 扭矩

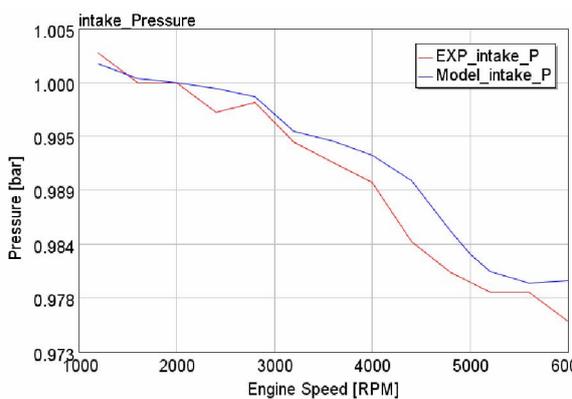


图 6 进气压力

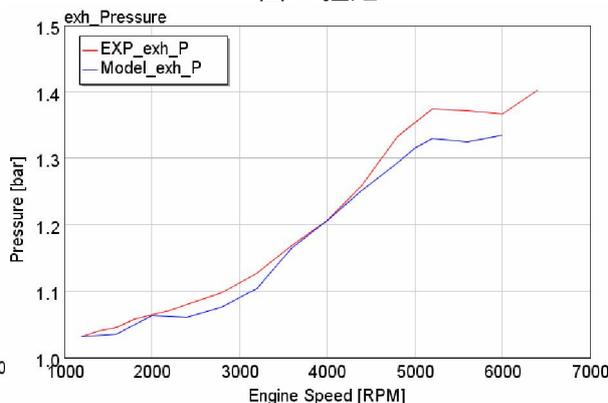


图 7 排气背压

通过逐一比较，我们确保了各项误差都在 5%以内，验证了模型的准确性，说明该模型具有较高的模拟精度，这样我们就可以用此模型进行涡轮增压的匹配与优化工作。

3 匹配涡轮增压器 GT-POWER模型

通过在原机模型上增加相关设备，例如进、排气 WT, 涡轮增压器和中冷器等，并且适当调整相关参数，仿真计算 GT-POWER模型如下图 8所示。

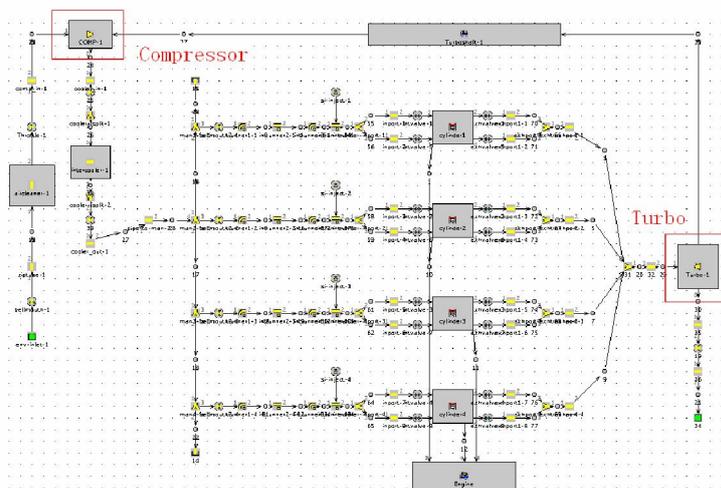


图 8 GT-POWER涡轮增压模型

为了保证增压器与发动机能够良好匹配，通过与涡轮增压器厂商咨询，计算对比了他们提供的两款比较合适涡轮增压器，其仿真计算结果如下图所示。

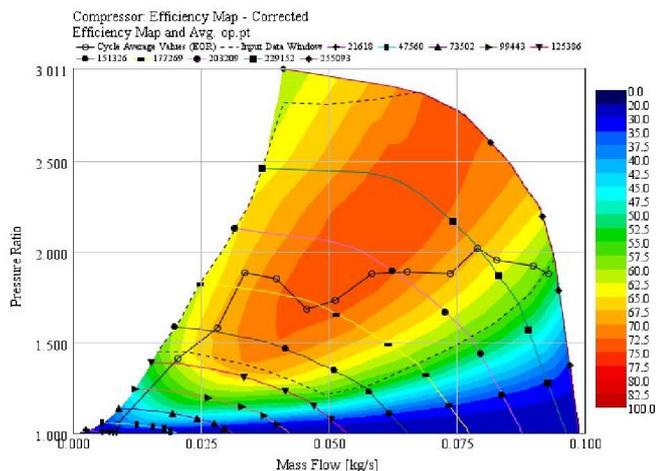


图 9 增压器 1 压气机工作点图

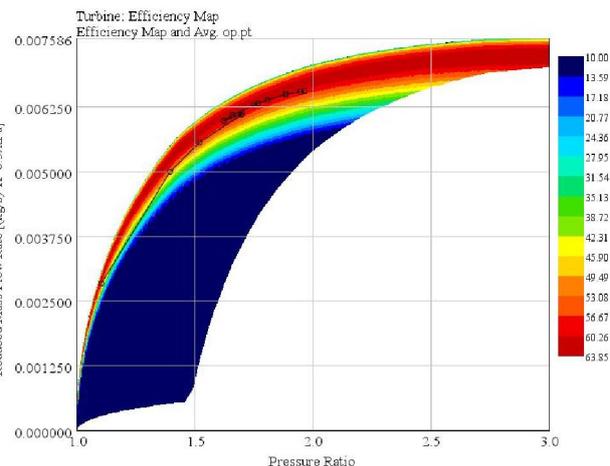


图 10 增压器 1 涡轮机工作点图

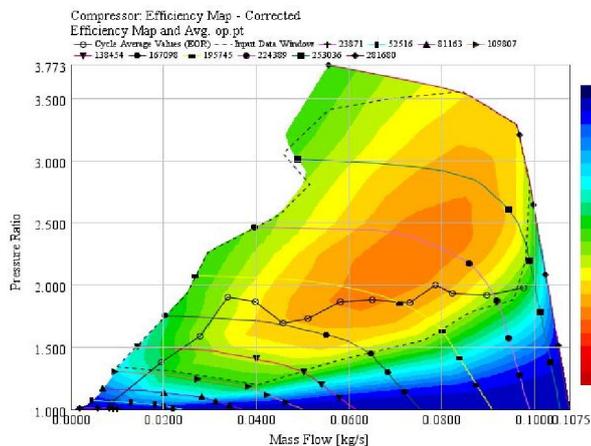


图 11 增压器 2 压气机工作点图

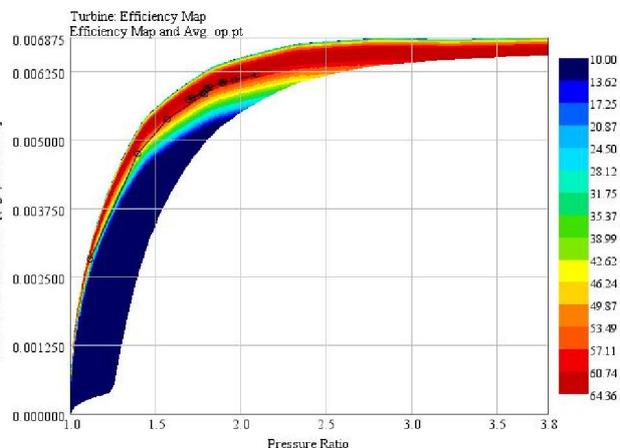


图 12 增压器 2 涡轮机工作点图

通过对比涡轮增压器 1, 增压器 2 的压气机和涡轮机的工作点图, 我们可以看出两款增压器基本上都能与发动机匹配良好, 都能在比较高的效率下运行, 但是相比之下增压器 1 的压气机能在更高的效率下运行, 因此我们最终选择涡轮增压器 1。涡轮增压器 1 与发动机匹配后, GT-POWER 仿真计算结果如下所示。

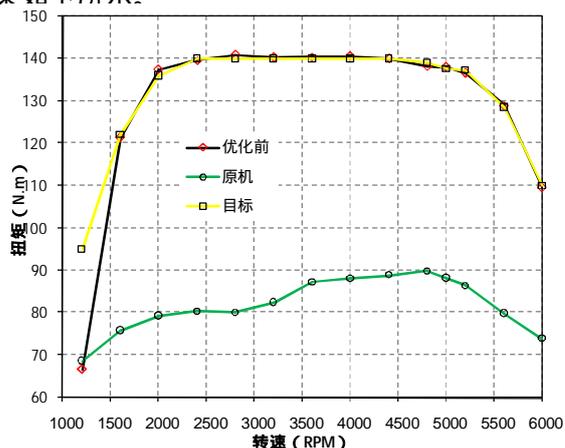


图 13 扭矩

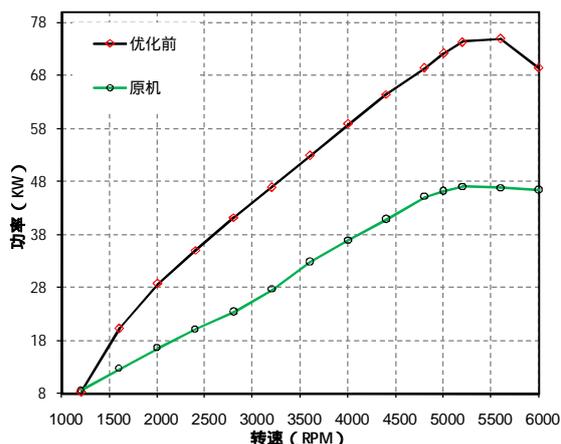


图 14 功率

由图 13与图 14我们不难发现，在匹配合适的涡轮增压器及进排气 WT之后，发动机的性能得到了极大的提升，扭矩最大提升了 75%，功率最大提升了 60%。但是低速段扭矩与目标值相差太远，需要做进一步处理。

4 GT-POWER与 modeFRONTIER联合仿真

由上述涡轮增压器的匹配结果我们不难看出，低速段性能与该公司所给的目标性能还存在很大差距，这就要求我们必须对发动机的相关结构尺寸进行优化，本次优化计算采用 GT-POWER 与 modeFRONTIER联合仿真，进行多目标优化。运用 GT-POWER进行仿真计算，运用 modeFRONTIER软件对输入变量按照一定的规律在一定的范围内进行取值，并对每次 GT-POWER的计算结果进行分析，并反馈到 变量的选取过程中，使得优化的方向更加明确。

经过分析对比，最后决定对发动机的进排气歧管管径、长度，凸轮型线，进排气 WT, 进气稳压腔容积进行优化，优化的目标为低速段扭矩最大，油耗最低。首先将所有变量一起优化，然后分组进行再次优化，逐一确定各个变量的最佳值。其中优化流程采用 Sobol 伪随机算法结合 MOGA2代遗传算法。

4.1 分组前联合仿真

在不知道所有需要优化参数之间关系的情况下，将所有变量一起优化，建立 modeFRONTIER优化计算模型如图 15所示，modeFRONTIER计算结果如图 16-18所示。

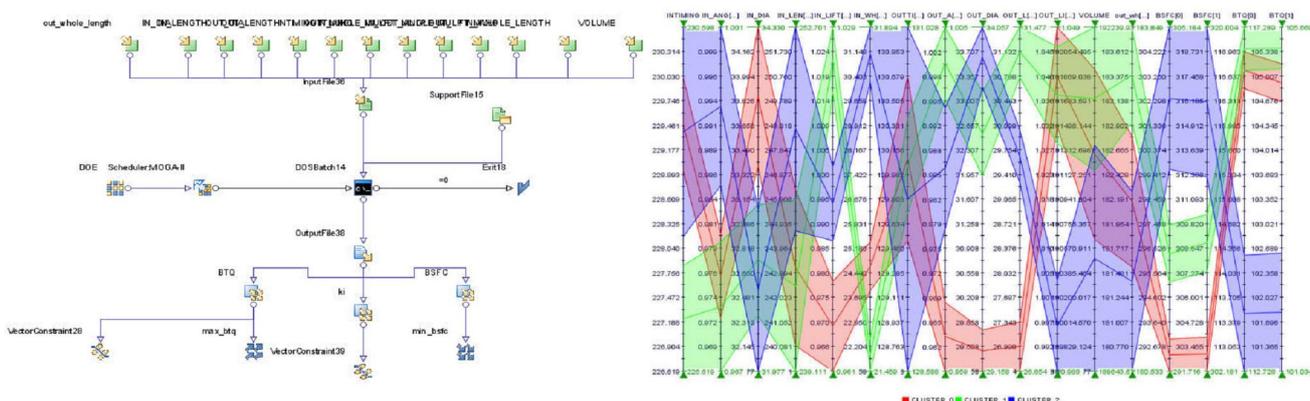


图 15 modeFRONTIER模型

图 16 变量 DCE值分类图

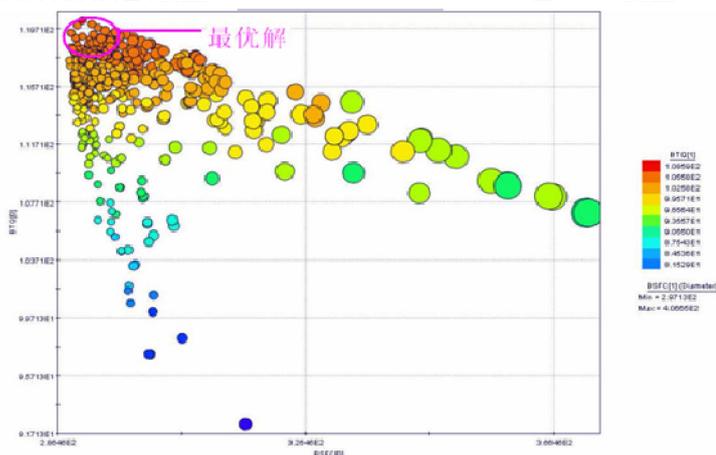


图17 优化结果4D气泡图

通过图 16 我们可以看出，变量取值在红色区域内取值时，既能使其扭矩达到很大，又能使油耗最低，并且结合图 17，我们可以较为准确的知道每个变量的合理取值，这也大大降低了后续优化工作的计算量。

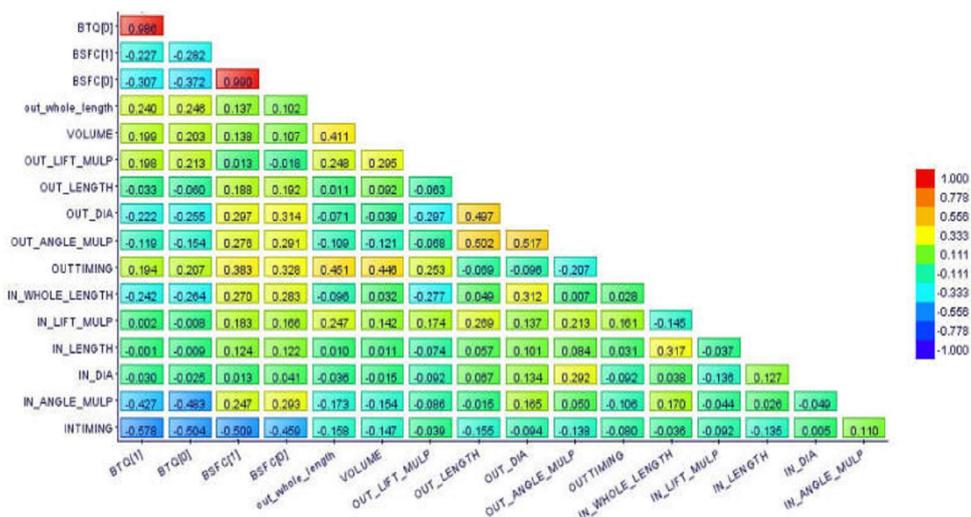


图 18 相关性系数图

图 18 也是我们这次联合仿真的主要结果，也是我们后面进行分组优化的依据。通过此图，我们可以得出各变量对输出扭矩和油耗的影响，正数表示正相关，负数表示负相关，数值绝对值的大小表示影响的程度，并且我们可以得出哪些变量之间的耦合度较大，哪些变量之间几乎不存在联系，这就给我们后面分组优化提供了有效的依据。将耦合度较小的分开优化，耦合度大的一起优化，这样既能减少优化计算的工作量，又能准确的得出优化计算结果。

通过分析，我们发现管路结构尺寸之间耦合度较大，凸轮型线的包角因子、升程因子之间的耦合度较大，而他们之间的相关性很小，相关性系数都在 0.1 左右。所以我们将这些变量分三组进行优化，进排气管路结构尺寸为第一组，凸轮型线的包角因子、升程因子为第二组，最后优化进排气 WT，确定各个转速的正时。

4.2 分组优化

首先对进排气管路结构尺寸进行优化，仿真计算模型与 3.1 中类似，这里就不一一赘述，优化计算结果如下。

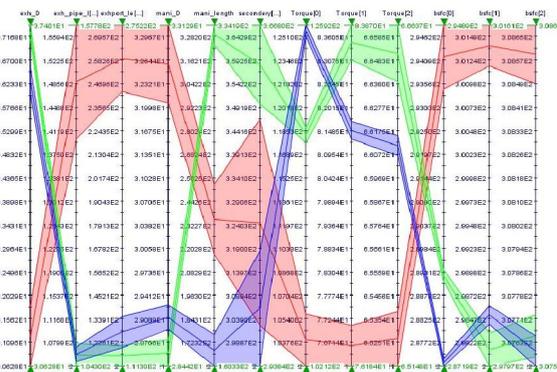


图 19 变量 DOE 值分类图

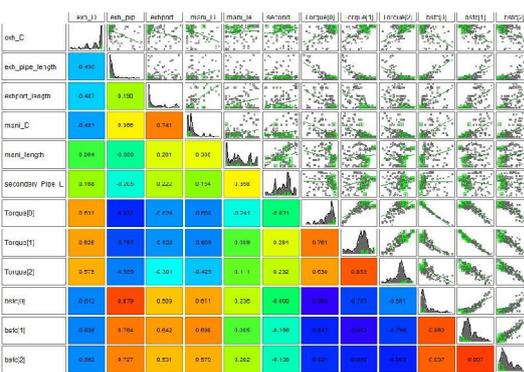


图 20 相关性系数图

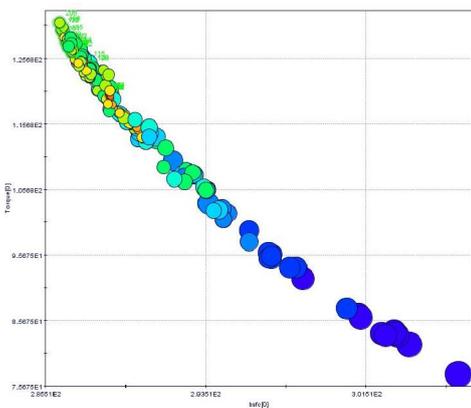


图 21 优化结果 4D 气泡图 (1)

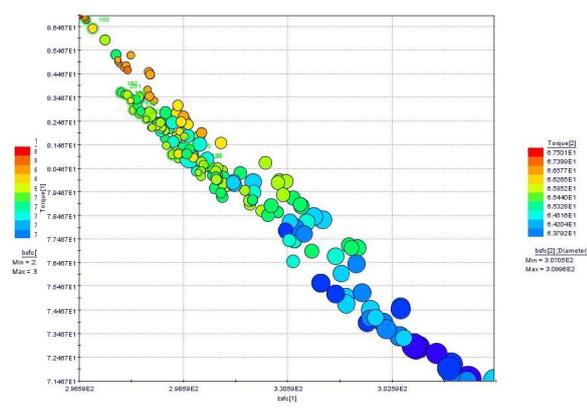


图 22 优化结果 4D 气泡图 (2)

通过分析比较以上结果图，按照最优性和稳定性选取原则，即在低燃油消耗率的情况下获得较大的扭矩，同时该最优点不是奇点具有很好的稳定性。综合考虑整台发动机的布置空间，最终确定结构尺寸：进气总管长度 =300mm；进气歧管长度 =133mm；进气歧管直径 =37mm；排气总管长度 =100mm；排气歧管长度 =45mm；排气歧管直径 =35mm。同上，对凸轮型线与 WT 分开进行优化，最终优化结果如下表所示。

表 2 优化结果

		原机	优化后
结构参数	进气歧管直径 mm	30	37
	进气歧管长度 mm	384	133
	排气歧管直径 mm	30	35
	排气歧管长度 mm	30	45
	进气总管长度 mm	350	300
	排气总管长度 mm	185	100
凸轮型线	进气门包角因子	1	0.9
	进气门升程因子	1	0.95
	排气门包角因子	1	0.94
	排气门升程因子	1	1.04
进气门正时	2000RPM degCA	464	446
	1600RPM degCA		442
	1200RPM degCA		435
排气门正时	2000RPM degCA	254	266
	1600RPM degCA		269
	1200RPM degCA		280

5 联合仿真优化结果

通过优化后，发动机的性能得到很大程度上提升，达到该汽车厂家的目标要求。结果如下：

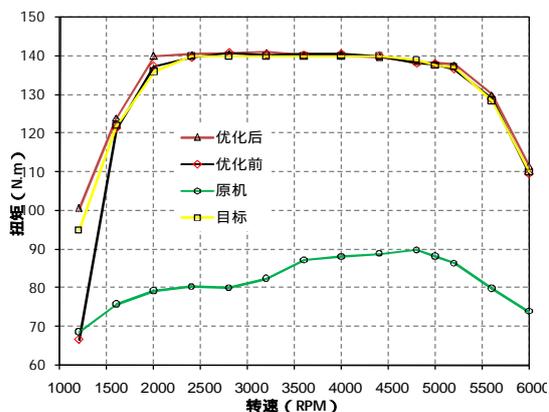


图 23 扭矩

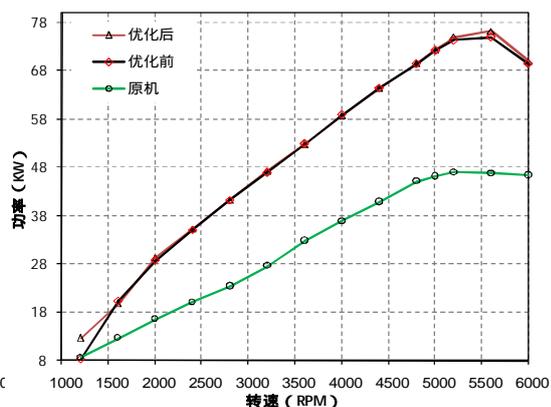


图 24 功率

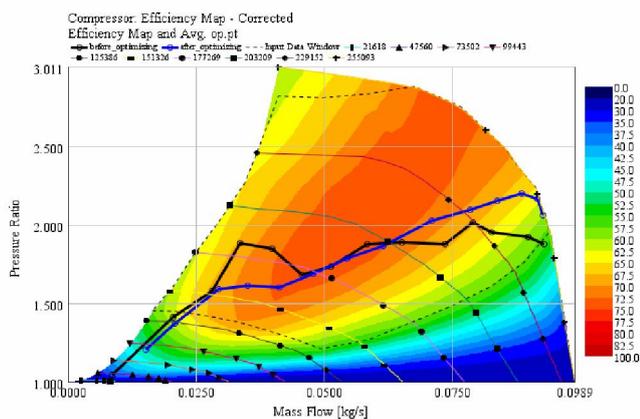


图 25 压气机工作点图

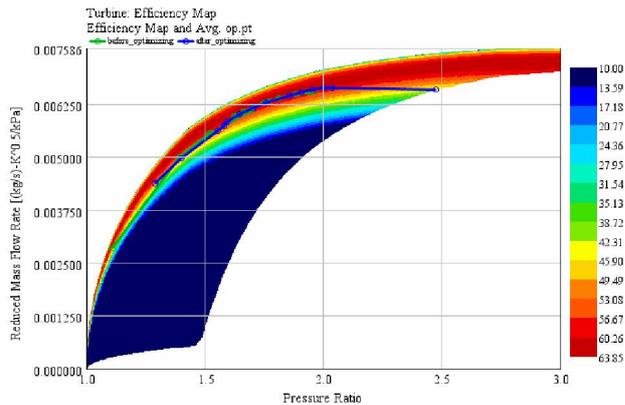


图 26 涡轮机工作点图

由图 23 24可知, 优化后大大提升了发动机低速段的外特性, 扭矩提高了 49.3%, 功率提升了 37.9%。由图 25 26可知, 优化后压气机的工作效率得到大幅度的提升, 涡轮机的工作效率也略有增加(图中蓝色线表示优化后)。

6 总结

(1) 运用 GT-POWER对发动机建模, 与试验结果比较表明该模型有较高的模拟精度, 使得对其匹配涡轮增压器的模拟计算有较高的准确度;

(2) 运用 GT-POWER与 modeFRONTIER联合仿真, 进行多目标优化, 首先确定了各变量之间的耦合关系, 然后对变量进行合理的分组, 最后通过分组多次优化计算, 比较准确的确定了各个变量的最佳值, 大大提升了发动机低速段的性能。

参考文献

- [1] 刘 峥, 王建昕 汽车发动机原理教程 [M]1 北京: 清华大学出版社, 20011
- [2] 宋龙甫, 郑国世, 王建昕 .B231 发动机性能优化及循环模拟计算, 内燃机工程, 2006 年第 1 期
- [3] 胡必谦, 涡轮增压汽油发动机的匹配研究, 合肥工业大学学报(自然科学版), 2007 年 12 月