

GT-POWER 在 1.5T 发动机中的应用

Application Of 1.5T Engine Based On GT-POWER

高 波

沈阳航天三菱汽车发动机制造有限公司

摘要: 本文研究的是 GT-POWER 软件在某款发动机上进行一维性能仿真计算, 通过对进气歧管长度, 进气系统 VVT 的优化, 显著提高了发动机性能。结果显示, 单独加长歧管长度可以提高中低速扭矩, 使用 VVT 可以提高低速和高速扭矩。

本论文是关于我们公司在原有 4A91 1.5L 自然吸气发动机的基础上, 让我们开发一款涡轮增压发动机。对于公司 4A91 1.5T 全铝发动机的开发工作, 需要借助软件手段对整机性能做前期的验证和优化, 节省研发费用和人力资源。本论文前期选取国内外先进的仿真软件平台, 最后确定使用美国 GAMMA 公司的 GT-SUITE 仿真软件, 通过对仿真软件的研究结果分析建立模板库, 为公司以后整机模型的研发和优化工作打下良好的理论基础。

正文部分主要从五个方面撰写: 第一部分介绍涡轮增压器和 GT-SUITE 软件的使用概况, 对 GT-SUITE 软件在 1.5T 发动机上的应用进行综合描述。第二部分对 4A91 1.5T 发动机的结构参数进行整理, 建立结构参数表并确定边界条件, 建立发动机一维仿真模型。第三部分通过建模计算, 得出满足要求的模型, 并输出计算结果和校核模型。第四部分介绍对发动机性能的优化, 主要包括进气歧管的优化, VVT 的分析。论文的最后部分是对 GT-POWER 在 4A91 1.5T 发动机上的应用与实施进行了分析与总结。

关键词: 汽油机、GT-POWER、优化设计、性能提升

ABSTRACT: This article is the study of the simulation being done by the GT-POWER software, engine performance has been improved apparently by the optimization of intake manifold length and VVT design. The results show that the torque of middle and low engine speed can be increased through adding the intake manifold length, and the torque of low and high engine speed can be improved through VVT technology.

This article is about the original 4A91 1.5L natural aspirated engine of our company, let us develop a kind of turbocharged engine. About our company's 4A91 1.5T aluminum engine of development, need to use the software ways on the engine performance which be made early validation and optimization working, in order to save development costs and human resources. The preliminary selection of domestic and foreign advanced simulation software platform is done before writing this article, finally we determined to use the American company GAMMA GT-SUITE simulation software, by the results of the simulation software establish template library, in order to lay a good theoretical foundation of the company's model R & D and

optimization work

There are five parts in this article: the first part introduces the compose of the turbocharger and the use of the GT-SUITE software profiles, make the detailed description on the GT-SUITE software in 1.5T engine application . The second part is about the 4A91 1.5T engine structure parameters of the finishing work, establishes the structure parameters and determines the boundary conditions, and establishes the simulation. The third part is that ,through computational modeling establishes the model can meet the requirements ,outputs the results and check the model. The fourth part is the engine performance optimization, including intake manifold optimization, VVT analysis. The last part of this article is the GT-POWER in the 4A91 1.5T engine application and implementation are analyzed and summarized

Key words: Gasoline engine GT-POWER Optimization design Performance improvement

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，大大提升其功率和扭矩，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采用的是废气涡轮增压。机械增压虽然能在发动机低转速时发挥很好的作用，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。

本文以公司在原有 4A91 1.5L 自然吸气发动机的基础上，计划开发一款涡轮增压发动机，对于公司 4A91 1.5T 全铝发动机的开发工作，需要借助软件手段对整机性能做前期的验证和优化工作，节省研发费用和人力资源，并通过仿真软件的研究，建立模板库，为公司以后整机模型的研发和优化工作打下良好的理论基础

2. 模型的建立

2.1 发动机基本参数：

表 1 发动机基本参数表（注：长度单位为 mm, 面积单位为 m^2 ）

发动机的特征参数	缸数	4
	压缩比	9.5
	发火顺序	1-3-4-2
	气缸排列	直列

	V 型夹角	
	冲程数	4
气缸几何参数	缸径	75
	活塞冲程	84.8
	连杆长度	133
	活塞销的偏心率	0.55 ± 0.1
	活塞在上止点时的间隙	14.4 mm (根据曲轴旋转中心到缸体顶面的距离, 气缸垫厚度, 缸盖底面与燃烧室的最大距离, 连杆长度, 曲柄半径, 活塞压缩高度计算得出)
	燃烧室活塞表面积	4415.6
	燃烧室部分的气缸头表面积	5475
进排气系统	管路中所有的部件的几何尺寸, 包括长度、直径、容积、表面粗糙度、材料等参数。	压气机出口到中冷器的管路:1. 中冷器, 中冷器出口到节气门的管路 2. 进气道, 排气道, 排气歧管
节气门	节气门在管路中的位置	在进气歧管前
喷油器	喷油器的个数	4
	在管路中的位置(汽油机)	在气缸盖的进气道内
	燃油类型及品质	93#乙醇汽油
进排气门	气门直径	进气门: $\varnothing 29.5$ 排气门: $\varnothing 24.8$
	气门间隙	进气门: 0.22 ± 0.04 ; 排气门: 0.30 ± 0.04
增压器	涡轮的 map 图	
	压气机的 map 图	
大气状态	空气中各种物质的比例	n2-vap 0.767 o2-vap 0.233
	大气压力	1 bar
	大气温度	300 k

2.2 边界条件的建立

节气门流量系数的选取: 由于只进行全负荷计算, 所以选取了全开时的流量系数。其中, 节气门开启角度为 0 度时, 流量系数为 0.01; 节气门开启角度为 90 度时, 流量系数为 0.95。

进排气道处的流量系数通过 CFD 分析得到。

发动机的机械损失, 通过经验值进行输入。

GT-POWER 软件关于管路内流动及传热的计算原理: 采用有线容积法进行一维 N-S 方程的求解。求解关于 X 与时间 T 上的结果, 并能自动根据流体流动的状态进行时间步长的调整。发动机机体的管路采用了第一类边界条件, 也就是在不同工况, 不同位置下输入不同的管路壁面温度。

依据相关图纸及试验数据建立仿真模型。仿真模型主要由压气机，中冷器，涡轮增压器，进气系统，气缸，曲轴箱和排气系统组成。

由于进排气歧管的形状比较复杂，其结构尺寸参数是优化的重点之一，首先使用 CATIAV5 三维软件建立管内腔的模型，然后生成 STL 文件导入 GT-POWER 中的离散化工具 GEM3D 进行离散化处理，最后生成 .dat 文件导入模型中，其余形状相对简单的部分则通过参考相关图纸并利用软件提供的模板直接构建。

建立气缸内的燃烧及热力学模型时，有如下几个假设：

1. 气缸中的工质是均匀的，它是由纯粹的空气和燃烧废气组成，用过量空气系数表示这种关系；

2. 整个系统内，工质的状态不受空间的影响，仅随时间的变化，也就是符合定常，准稳态工程；

3. 不考虑气体在高温时的离散作用。

缸内的燃烧模型采用 WIEBE 函数模型进行求解，并根据发动机的工况进行如下参数的调整：起燃点，燃烧持续期和燃烧品质，以达到准确的计算结果。

2.3 建立发动机模型的管路系统

图形 2，图形 4，图形 6 及图形 8，是利用离散工具 GEM3D 处理后的管路系统模型，即完成了中冷器前后端，进气歧管，进排气道，排气歧管的管路系统模型。涡轮增压器及涡轮后管路可以直接用 GT-POWER 的模板部件直接构建。

2.4 进排气阀配气相位的确定

在发动机的建模过程中，配气相位的数值大小对计算结果有绝对的影响作用。有效的把相关参数输入准确对计算的准确性至关重要。注意：在 GT 的所有模型中，认为第一缸的压缩上止点是曲轴转角的 0° 值。

1. 进气阀的配气相位角度确定

进气阀的升程曲线，持续期角度（包括过渡段）： 161° 。最大升程是：8.71mm。

对于此进气阀的配气相位是：对应于曲轴转角，提前开启角度： -19 度到 31 度（不含过渡段）

在 GT-POWER 模型中输入数值计算如下：

最大升程到过渡段结束之间凸轮轴转角是： $79-21=58^\circ$ 。

当配气相位角中进气阀提前开启曲轴转角为 31° 时，阀升程对应为：0.31mm 所对应的曲轴角度是： 329 度（值的计算是： $360^\circ - 31^\circ = 329^\circ$ ），此时，最大升程对应的曲轴转角是： $329+58*2=445^\circ$ 。所以在进气阀的配气相位角度属性输入中，最大升程对应的曲轴转角范围是： 445° ，而 VVT 的变化范围是 50° ，所以这个属性的输入范围是： $445-495^\circ$ 。

2. 排气阀的配气相位角度确定

排气阀的升程曲线，持续期角度（包括过渡段）：167°。最大升程是：8.28mm。

排气阀提前开启曲轴角度：50°；迟闭曲轴角度是：5°；

最大升程与过渡段结束之间的凸轮轴转角是：59°；（85° - 26° = 59°）

当排气阀的升程为 0.38mm 时，对应的曲轴转角是：130°（曲轴转角值是：180-50=130°）；

此时，最大升程对应的曲轴转角是：130° + 59° * 2 = 248°；所以在 GT-POWER 模型中，输入的此属性数值是：248°。

2.5 相关流量系数

对于 GT-POWER 模型来说，有三个流量系数需要输入，它们是进、排气阀在不同升程下的流量系数，节气门不同开度下的流量系数。

具体的流量系数计算是由三维数模，进行 CFD 分析计算得出。具体的参数如下表所示：

表 2 进、排气阀流量系数

阀门参考直径：75mm			
进气阀		排气阀	
升程 (mm)	流量系数	升程 (mm)	流量系数
1	0.030439	1	0.02452532
3	0.085233	3	0.07445389
5	0.121583	5	0.10039643
7	0.141185	7	0.10475916
9	0.149234	8	0.10501225

表 3 节气门流量系数

节气门开度	流量系数	参考直径
90	0.95	44mm

2.6 发动机模型的建立

在输入发动机的几何参数，如：缸径、冲程等，以及相应的涡轮增压器的 MAP 图后，发动机模型可以进行相应的计算与分析。最终模型如下图所示：

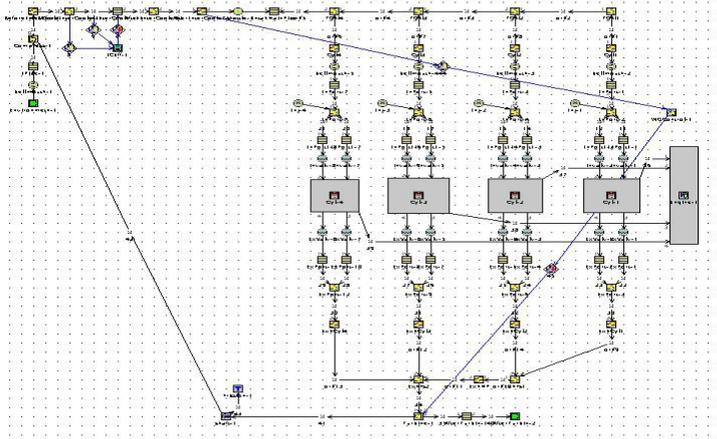


图 1 4A91 1.5T 发

到此，GT-POWER 模型的建立基本完成。

3.计算结果

3.1 校核发动机空气流量

在校核发动机的流量过程中，为了提高效率，提高准确性。一般而言分为两步。

第一步：只保留模型的节气门与涡轮进气管之间的部件，分别加上对应的边界条件，以此来确定这部件的设置是否满足要求。

第二步：加上中冷器，看对应的空气流量是否满足要求。以此来确定中冷的相关参数是否满足要求。

第三步：加上增压器，进行计算，确认空气流量是否满足要求，以达到整个发动机系统满足要求。

- 1、 在上面建立的模型中，节气门前的环境采用测试相关参数，涡轮进气管后的也采用相应的输入参数。具体参数如下表所示。

表 4 无增压器空气流量校核边界输入

转速	节气门前压力	进气温度	涡轮前排气压力	涡轮前排温
rpm	mbar	° C	kPa	° C
1000	1113.2	26.3	9.4	632.2
1250	1210.5	26.3	15.1	695
1500	1427.0	26.3	28	800.9
1800	1736.5	26.3	48.2	853.6
2000	1831.3	31.5	58.9	888.3
2500	1897.0	32.3	78.8	920.2
3000	1920.5	32.3	92.9	914.3
3500	1752.3	31.5	100.2	905.6
4000	1628.5	32.3	108.7	908.1

4500	1665.3	33.0	139	929.5
5000	1510.3	28.5	130	928.7

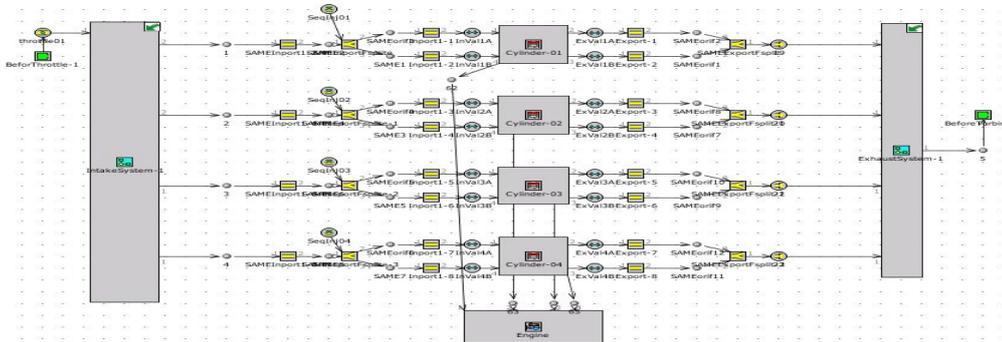


图2 无增压器空气校

核模型

根据计算后得出空气流量对比如下表所示。

表5 空气流量对比

发动机转速	仿真结果	测试结果	误差
rpm	Kg/h	Kg/h	%
5000	415.235	418.28	-0.72798
4500	394.409	411.559	-4.16708
4000	334.637	347.42	-3.67941
3500	291.212	308.818	-5.70109
3000	277.213	263.621	5.155887
2500	229.482	228.188	0.567076
2000	171.457	169.05	1.423839
1800	149.424	140.488	6.360686
1500	100.845	98.931	1.934682
1250	71.5093	67.62	5.751701
1000	51.642	50	3.284

从上表看来，空气流量基本满足要求。

- 2、 增加中冷器相关参数，进行流量的校核。

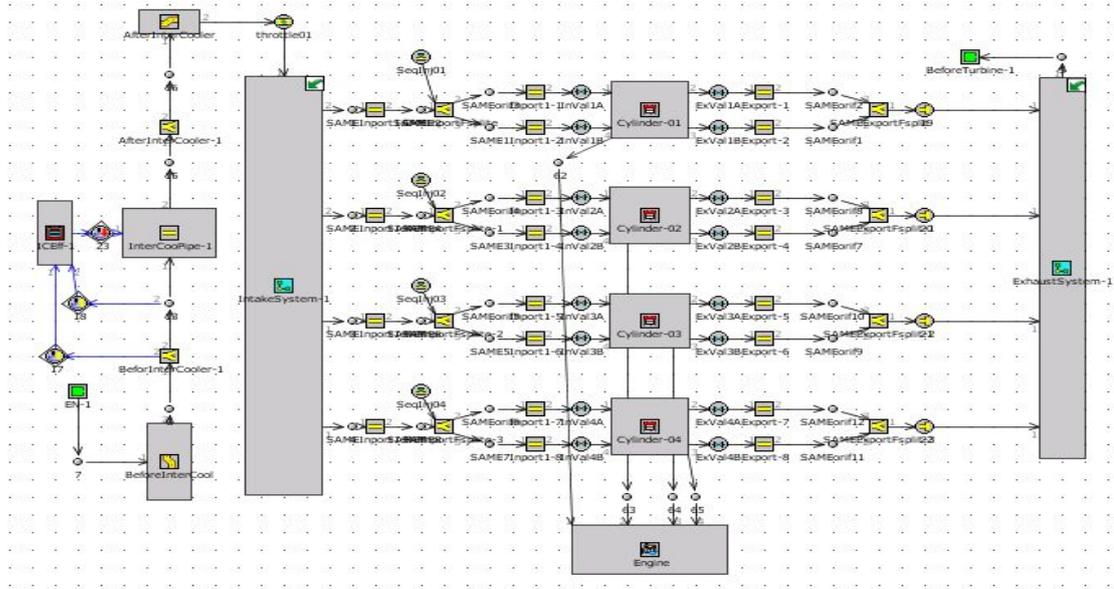


图 3 增加中冷器后的模型

增加中冷器后的模型如下图所示。在此计算过程中主要的目的是为了标定中冷器的冷却效果与压力损失。

增加中冷器后的发动机流量差对比，如下表所示。

表 5 加中冷器后空气流量对比

发动机转速	仿真结果	测试结果	误差
rpm	kg/h	kg/h	%
5000	417.471	418.28	-0.19341
4500	401.675	411.559	-2.4016
4000	326.031	347.42	-6.15653
3500	292.6	308.818	-5.25164
3000	255.094	263.621	-3.23457
2500	219.942	228.188	-3.61369
2000	174.665	169.05	3.321503
1800	150.446	140.488	7.08815
1500	107.159	98.931	8.316908
1250	71.3053	67.62	5.450015
1000	50.3035	50	0.607

从以上数据可以看出中冷器的标定数据，基本满足要求。

3.2 校核发动机的燃烧模型

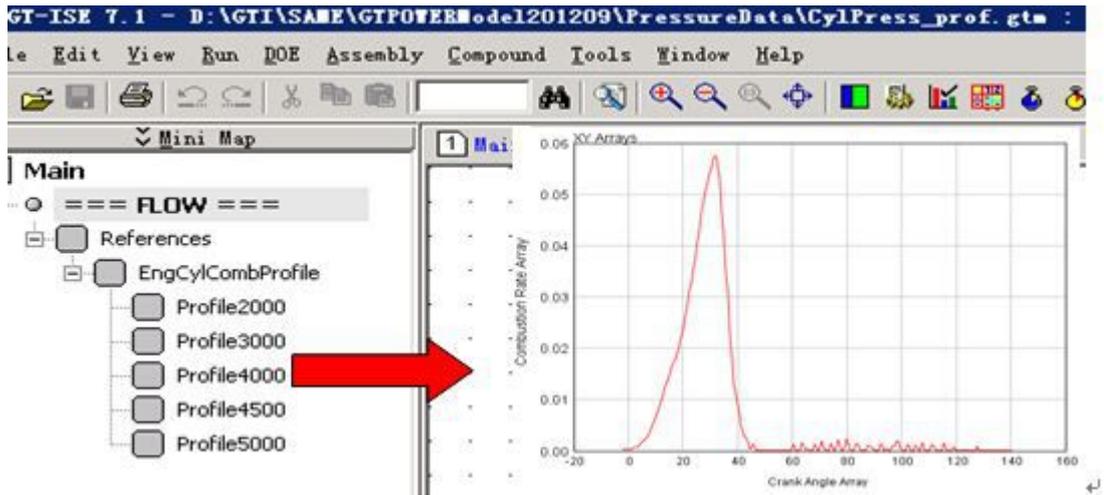


图 4 燃烧放热率结果

根据测试的气缸压力数据，对发动机的燃烧模型进行一定的校核，并把不同转速下的缸压数据引入到模型中去，结果如下：

把上述结果，引入到最终模型中去，与对应的转速对应上达到特定工况下采用特定的燃烧模型。

4. 发动机性能的优化

由于这款发动机要求有比较好的低速动力性，所以下面从进气歧管长度, VVT 两方面优化发动机的低速动力性

4.1 发动机进气歧管的优化

原模型进气歧管长度的基础上，增加 20mm, 40mm, 60mm, 80mm, 得到四组数据，与原模型比较，结果如下所示：

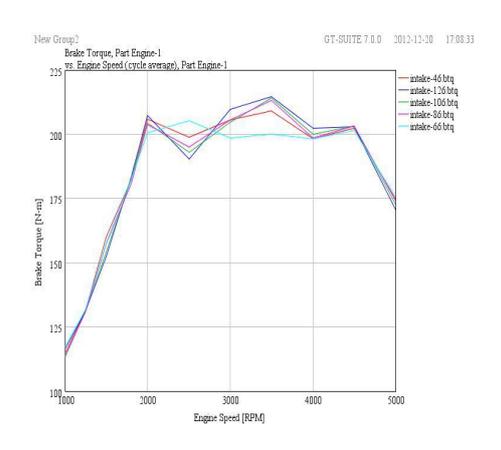


图 5 扭矩

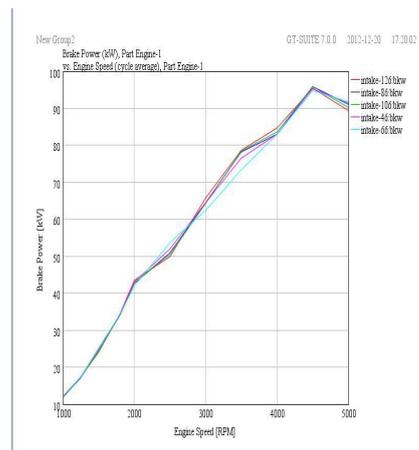


图 6 功率

通过上图比较进气歧管加长后，发动机的低速扭矩动力性有所增大，但高速动力性也会适当

降低。综合考虑，我们选择原有的进气歧管长度为最优。

4.2 进气 VVT 的优化

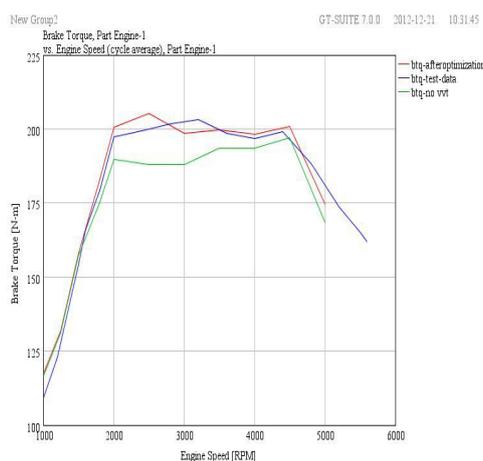
在进气歧管优化的基础上，通过软件自带的 OPTIMIZER 的功能对进气正时角度进行优化，本次优化的范围为 50 度凸轮转角范围，在 50 度凸轮转角范围内，通过优化找到每个转速下的最大扭矩以及所对应的进气门正时角度，本次优化以曲轴箱的最大进气量为目标，进气正时凸轮角度初始值设定 230 度，根据软件的设计原理，即变化范围为 215 度-255 度之间选择最优值。

优化后的进气 VVT 正时角度如下表：

表 6

发动机转速	带 VVT 优化仿真结果	不带 VVT	试验用 VVT 值
rpm	°	°	°
5000.0	236.25	230	236.1225
4500.0	235.078	230	232.038
4000.0	234.297	230	229.9915
3500.0	235.078	230	228.059
3000.0	235.859	230	227.4985
2500.0	236.641	230	228.533
2000.0	235.078	230	229.5395
1800.0	234.297	230	227.5235
1500.0	228.438	230	230.0035
1250.0	228.828	230	231.1225
1000.0	228.047	230	233.038

运算结果如下图所示：



图形 7 比较扭矩值

4.3 排气正时角度 DOE 优化

DOE 是 Design Of Experiments 也就是试验设计。主要目的是为了找出独立变量和相关

变量的关系 DOE 包括其后处理 (DOE-Post) 作为一个工具集成在 GT_Suite 软件中, 包括 4 部分: DOE SETUP , Create DOE. dat file, Launchu DOE-Post, Clear DOE setup.

进行 DOE 计算, 首先要建立好一个完整的计算模型, 然后再进行 DOE Setup 才能运行运算和后处理。

在进气歧管, 进气 VVT 角度优化的基础上, 进行排气正时角度的优化, 由于模型中排气最大升程的凸轮正时角度输入值为 124 度是根据试验结果得出的, 我们在此基础上在 110° - 130° 之间进行优化设置进行 10 等分, 即 11 个 CASE, 分别为: 110° , 112° , 114° , 116° , 118° , 120° , 122° , 124° , 126° , 128° , 130° . 模型中不同发动机转速工况有 11 个 CASE, 所以 DOE 运算次数为 $11 \times 11 = 121$ 次。

本次 DOE 优化运算以曲轴箱的最大进气量设定为相关变量, 即可以理解为在各个工况的条件下, 目标为最大功率, 扭矩时的排气正时角度为 121.6° 。

把 DOE 优化结果 排气正时角度 121.6° 输入到模型的参数中, 进行再一次运算。

4.4 分析优化结果

通过 4.2 优化结果可以看出, 进气歧管加长后, 发动机的低速扭矩动力性有所增大, 但高速动力性也会适当降低, 整体性能不如最初状态, 所以选用最初的进气歧管长度。

VVT 的优化可以看出:

在不带进气 VVT 的情况下, 各个工况下的扭矩值较小, 通过采用进气 VVT 并优化后, 1800RPM-3000RPM 扭矩性能平均能提升%5 左右, 平均增加 10 N-m。3000RPM 以上的工况也有%3 左右的提升, 所以使用 VVT 后可以显著提高低速和高速扭矩。

在使用进气 VVT 的情况下, 比较优化后与优化前试验值的结果来看, 在 1000RPM-2800RPM 内, 扭矩值平均能提高 3 N-m, 但是在 2800RPM-3500RPM 扭矩有所下降, 平均下降 3 N-m. 在 3500RPM 以上的工况下, 性能也稍有提升。

排气正时角度的优化可以看出:

排气正时角度改变为 121.6° , 在 1800RPM-4000RPM 的工况下, 扭矩略有提升, 但是总体提升幅度不大。

综合以上得出本次优化结论: 进气歧管长度不变, 进气 VVT 和排气正时采用优化后的结果可以提升低速和部分高速扭矩。

5. 结 论

1. 利用 GT-POWER 建立发动机模型, 首先要满足定义的各项边界条件的要求, 并且根据所需参数大量整理图纸, 数模, 和试验结果等资料。明确优化目标, 根据虚拟仿真结果, 对比试验结果, 在以后的开发工作中更加明确哪些是关键参数, 优化关键参数对性能提升的范围有更加具体的认识, 计算结果同时作为设计边界进行零部件开发, 并把完成的 GT-POWER 模型作为模板库, 为以后的开发工作打下坚实的理论基础。

2. 本模型中发动机的进气歧管长度已经达到最优值, 可以通过其他手段进行优化, 例如: 加大进气歧管的管径, 增加歧管容积腔的容积等, 需要在以后 GT-POWER 的建立和优化工作中

逐步摸索和进行理论，实际验证。

3. 如果气门正时角度选择的好，在使用 VVT 后可以显著提高性能，并在优化 VVT 过程中，选取最优的 VVT 角度，可以显著提高低速和高速扭矩。

4. 本次论文在进气带 VVT 并进行优化的基础上，排气正时角度通过 DOE 优化运算，也可以稍微提升低速和高速扭矩。

参考文献

- [1]周龙保，内燃机学【M】，北京：机械工业出版社，2005.1
- [2]麻友良，配气相位可变技术的现状与发展【J】.公路交通科技，2002，(04)
- [3]苏岩，李理光，肖敏，曾朝阳，可变配气相位对发动机性能的影响【J】.汽车技术，2000，(10)
- [4]王力彪，何帮全，谢辉，赵华，发动机可变气门技术的研究进展【J】.汽车技术，2005，(12)
- [5]孙玉亮，可变配气系统对汽油机动力性及燃油经济性能影响的研究【D】，天津：天津大学，2008
- [6]柯亚仕，蒋德明，可变气门定时研究回顾及展望【J】.车用发动机，1996(1)
- [7]王爱民，孙伯刚，刘萍，汪家兴.基于 GT-POWER 的 BN6V87QE 汽油机性能优化仿真【J】.北京工业大学学报，2007，(06)
- [8] GT-SUIITE 帮助文档