

提升增压汽油机瞬态性能的仿真分析

The Analysis of the Improvement on Transient Response of a Gasoline Engine

刘芬 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

摘要: 本文通过 GT-Power 软件分析了增压器匹配和排气歧管结构设计对发动机性能和瞬态响应的影响。计算结果表明:原压气机和涡轮的流量均偏大,通过重新匹配选择了合适的小流量压气机和涡轮,并且瞬态响应时间提升了约 18%;通过对排气歧管和涡道的设计更改,将 4-1 形式排气歧管更改为 4-2,瞬态响应时间提升了约 7%。

关键词: 汽油机、热力学仿真、增压器匹配、瞬态响应

Abstract: This paper analyses the effect of the turbocharger and exhaust manifold on engine performance and transient response based on GT-Power software. The simulation result shows that the flow capacity of the original turbocharger is large and a smaller compressor and turbine combination will be more suitable for the engine by turbocharger matching, meanwhile the transient response of the new turbocharger will improve approximately 18%. Besides, the transient response will improve approximately 7% by changing the design of exhaust manifold and vortex path.

Key words: Gasoline engine, Thermodynamics simulation, Turbocharger Matching, Transient Response

1. 引言

涡轮增压是一种有效强化发动机性能的技术手段,它有利于发动机的小型化设计、提升动力性和经济性,目前涡轮增压技术在汽油机上得到了广泛的应用,但增压汽油机在节气门开度突然改变时,增压器的反应严重滞后于喷油器的响应,供气不足由此导致了加速性能变差。本文通过重新匹配增压器以及对排气歧管的设计更改,试图达到改善发动机响应性和兼顾动力性的要求。

2. 增压器匹配的介绍

2.1 理论公式

增压器匹配实际就是质量流量、能量以及转速的平衡,故增压器匹配须满足以下守恒方程^[1]。

质量流量守恒方程:

$$\dot{m}_i + \dot{m}_f = \dot{m}_e \quad (1)$$

能量守恒方程:

$$W_T \times \eta = W_C \quad (2)$$

转速守恒方程:

$$n_c = n_T \quad (3)$$

其中： \dot{m}_i 为进气质量流量， \dot{m}_f 为燃油质量流量， \dot{m}_e 为排气质量流量， W_T 为涡轮输出功， η 为增压器机械效率， W_C 为压气机输入功， n_C 为压气机转速， n_T 为涡轮转速。

2.2 增压器匹配要求

增压器匹配的基本方法是将发动机的联合运行线与增压器的特性曲线置于同一坐标系中，通过两者的相对位置来评估增压器是否合适，增压器匹配过程应满足如下要求^[2]：

- (1) 满足发动机的性能要求以及硬件的压力、温度限值。
- (2) 对于压气机，发动机的联合运行线应尽穿过其高效区，且尽可能和压气机的等效率曲线平行，并且没有喘振和阻塞风险。
- (3) 对于涡轮，如果联合运行线偏离其流通特性曲线，应选择较大或较小型号的涡轮。

3. 计算模型及标定

本文的仿真分析是基于一台 2.0L 的 GDI 增压汽油机，缸径为 88mm，行程为 82mm，压缩比为 10。计算模型包括：进/排气系统、中冷系统、进/排气歧管、进/排气道、增压器等零件，以及节气门和旁通废气阀的控制模块，图 1 是根据该发动机各零部件的实际几何尺寸和特性参数搭建的 GT-Power 模型。完成整机建模后，还需根据试验数据对模型的全负荷、部分负荷以及瞬态响应过程进行标定。图 2 是标定后全负荷下 5300rpm 和 2000rpm 的计算缸压和试验缸压的对比图，显示两者吻合得较好，计算模型准确，可用于后续的增压器匹配和瞬态响应的分析。

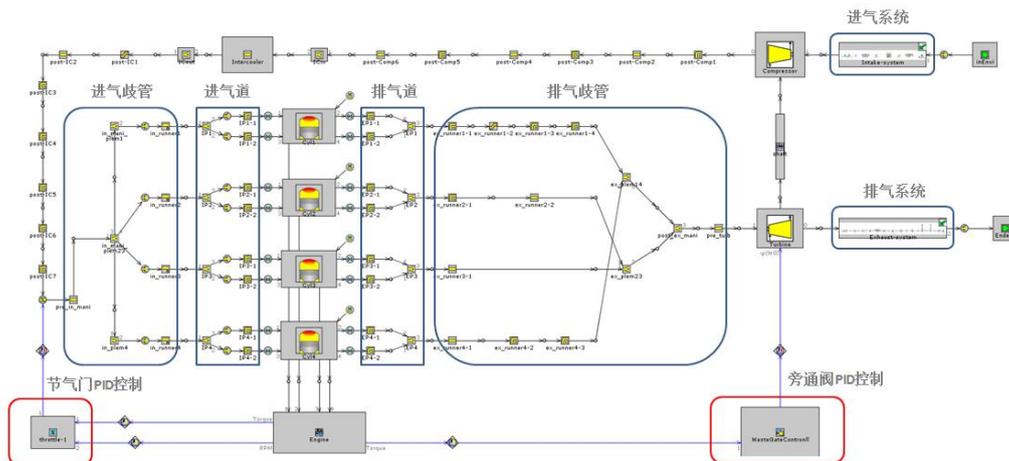


图 1 一维整机模型

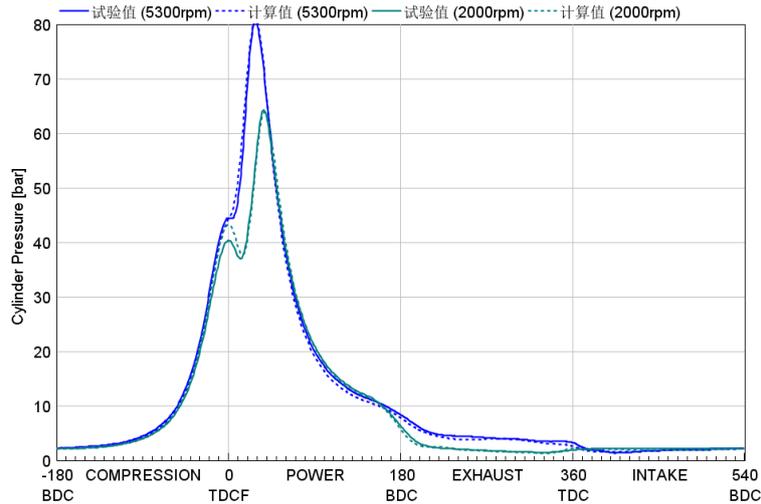


图 2 计算缸压与测试缸压

4. 计算结果

4.1 分析重新匹配增压器对瞬态响应的影响

本文进行了多轮增压器匹配的选型工作，重点对优选方案与原方案的匹配结果进行分析，其他方案略过。表 1 是各增压器方案能否满足性能目标及压力温度限值的结果，其中方案 1、方案 4 均满足，图 3 和图 4 为压气机、涡轮与发动机的匹配结果，图 5 是增压器效率的对比结果。从流量来看：原方案的压气机流量范围较宽，喘振、阻塞裕度均很大，并且原方案的涡轮流通能力也偏大，可以选择小流量的压气机和涡轮进行匹配，同时小涡轮的转动惯量小，也有利于提升发动机瞬态响应性。

方案 1 和方案 4 的压气机流量比原方案分别约减小了 10% 和 15%，方案 1 和方案 4 的涡轮流量比原方案分别约减小了 14% 和 6%。从压气机 map 图来看：方案 4 联合运行线在发动机高转速区的增压器转速余量偏小，高原有阻塞风险，方案 1 的压气机流量更适合；从效率来看：方案 1 的涡轮效率最高、方案 4 次之、原方案最低，但是原方案的压气机在发动机高转速区的效率最高，弥补了其涡轮的效率，因此原方案的涡轮前压力最低。

表 1 各增压器方案是否满足性能目标及限值

增压器方案	原方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
转动惯量 (kg*mm ²)	14.72	9.36	8.33	15.67	9.39
低速扭矩	是	是	否	否	是
最大扭矩	是	是	是	是	是
额定功率	是	是	是	是	是
压力限值	是	是	是	是	是
温度限值	是	是	是	是	是

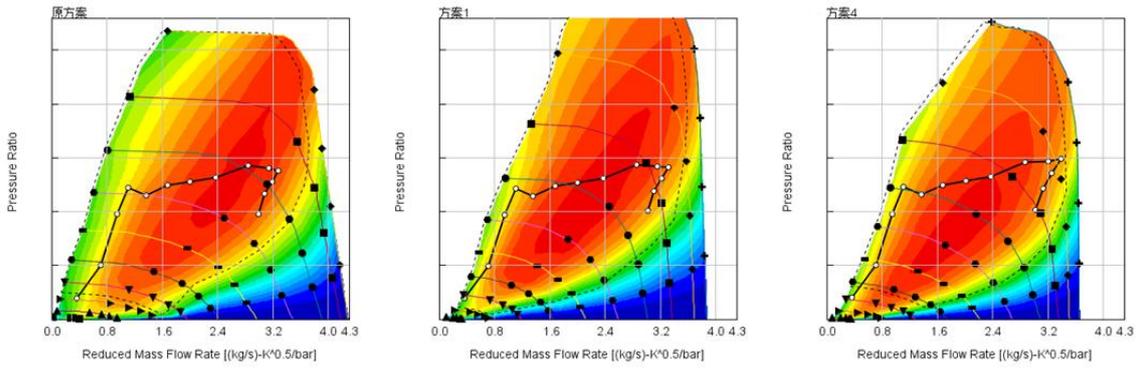


图 3 压气机与发动机匹配的对比结果

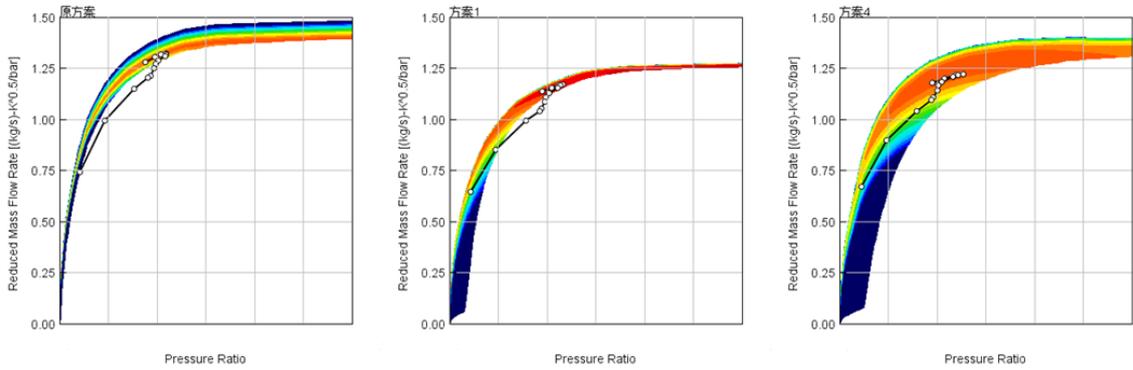


图 4 涡轮与发动机匹配的对比结果

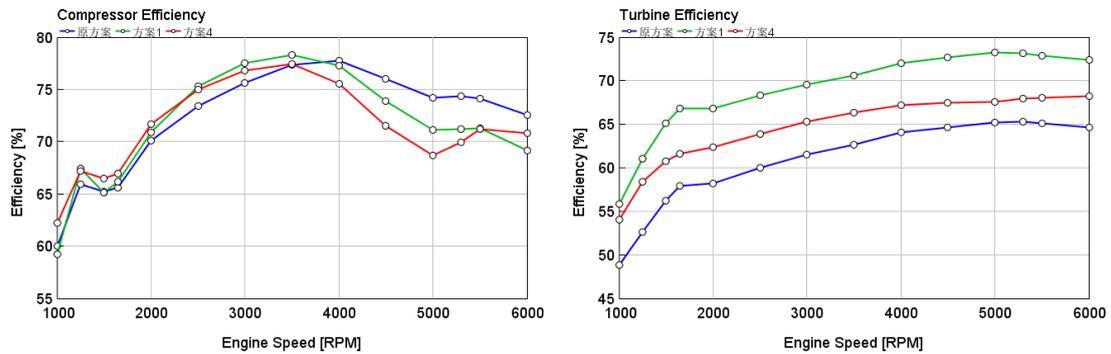


图 5 增压器效率的对比结果

图 6 是各增压器瞬态响应的对比结果，方案 1 和方案 4 均显著改善了发动机的瞬态响应，虽然方案 4 的响应时间更短，但综合评估更推荐方案 1。其中方案 4 的响应时间比原方案缩短了 0.7s，约提升了 18%。

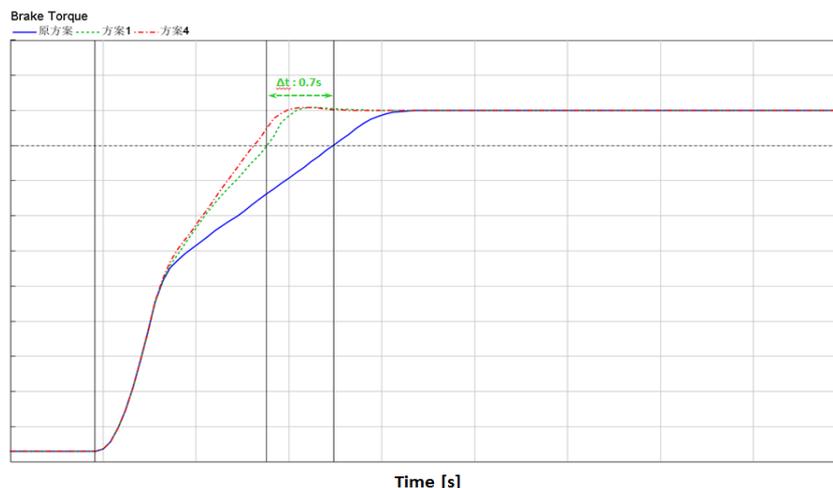


图 6 各增压器方案的 1500rpm 瞬态扭矩对比结果

4.2 分析排气歧管对瞬态响应的影响

压气机和涡轮的流通能力对匹配性能十分敏感，但在确定了增压器型号后，排气歧管的设计会影响涡前压力温度，从而影响发动机的性能和响应速度。图 7 是排气歧管和涡道更改前后的对比，原方案是 4-1 排气歧管，其中 1/4 缸相连，2/3 缸相连，然后再汇合进入涡道，更改方案将排气歧管改为独立的 4-2 结构，同时在涡道内增加一段隔板。一般增压器建模，只输入增压器的流通特性曲线，但本次计算为了保证可比较性，在建模上除了离散排气歧管，还保留了一段相同长度的涡道用来反映设计更改。

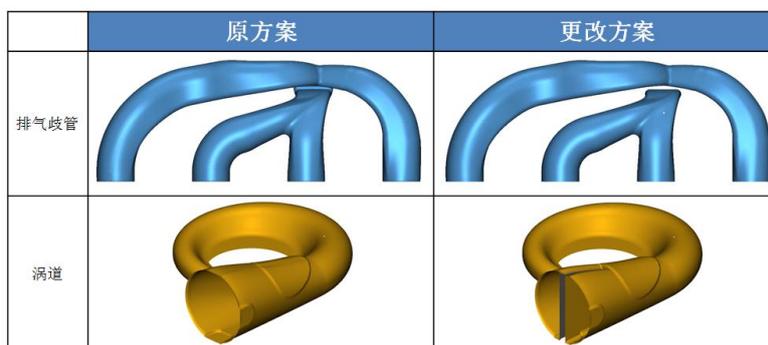


图 7 排气歧管及涡道的结构对比

图 8、图 9 是原方案和更改方案的外特性和 1500rpm 瞬态响应的对比结果，从外特性来看：额定功率下，更改方案的涡前压力比原方案升高了 10kPa，压后压力增加了 7kPa，同时泵气损失也相应增加。这是因为与原方案相比，更改方案的流通面积减小，导致排气歧管中的压力和泵气损失升高。同时更改方案也减少了各缸排气压力波的相互干扰，管道中的气流速度也会增大，这有利于排气能量的利用和增压压力的迅速建立，图 9 显示了更改方案的响应时间比原方案约缩短了 0.3s，约提升了 7%。

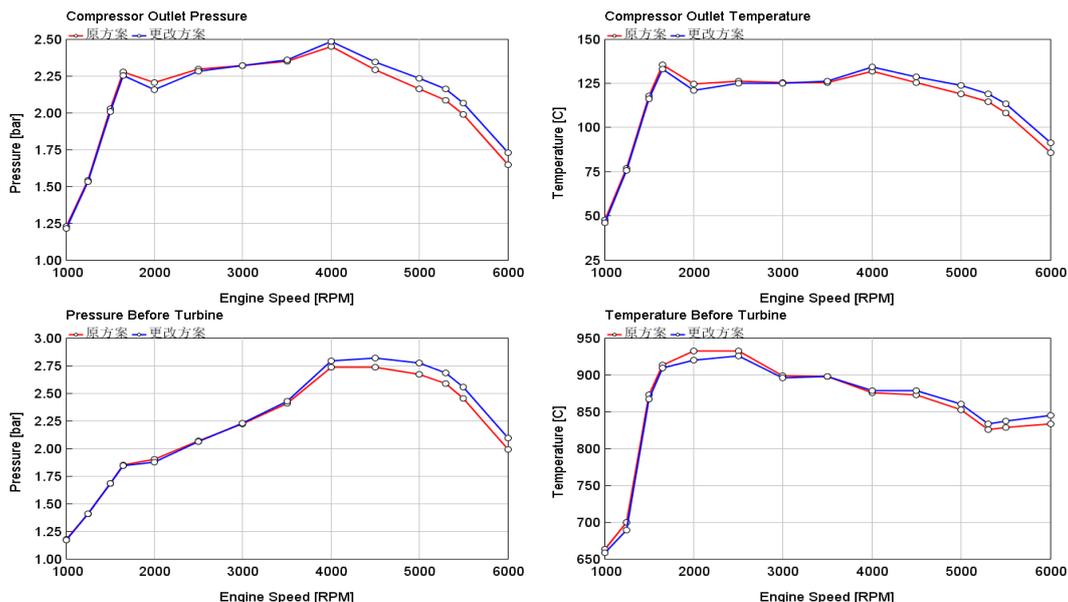


图 8 原方案和更改方案的外特性对比

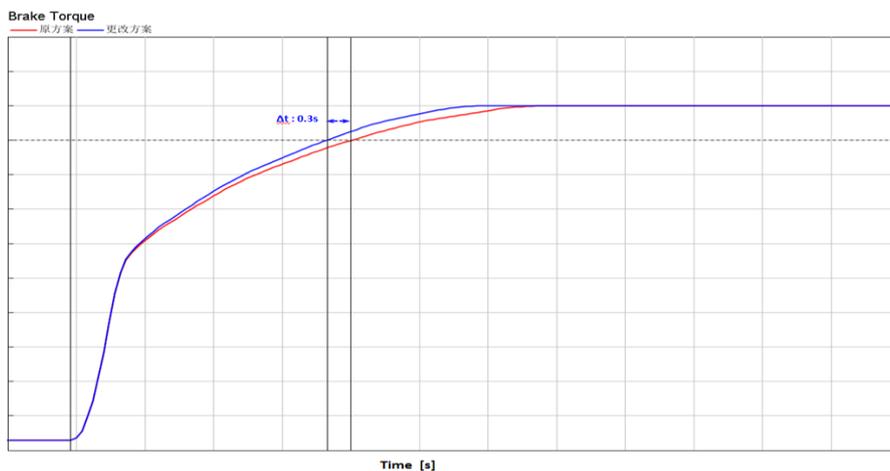


图 9 原方案和更改方案的 1500rpm 瞬态响应扭矩对比

5. 小结

- 1) 通过分析发现原增压器的压气机和涡轮均偏大，重新匹配选择了合适的小流量压气机和涡轮，新方案在满足性能目标的同时还缩短了瞬态响应时间，约提升了18%；
- 2) 通过对排气歧管和涡道的设计更改，瞬态响应时间约提升了7%。

6 参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [2] 刘永长. 内燃机原理 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001:172 — 179