

基于 GT-POWER 的某 1.5L 米勒循环发动机性能开发

A 1.5 liter Miller Cycle Engine Performance Development based on GT-POWER

钟睿 雷先华 余小草 张晓宇 刘斌

(重庆长安汽车股份有限公司动力研究院, 重庆 401120)

Zhong Rui, Lei Xian-hua, YU Xiao-cao, ZHAN Xiao-yu, Liu Bin

(Powertrain Engineering R&D Center, Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing 401120)

摘要: 为满足未来整车部门对低油耗的动力需求, 以某 1.5T 奥托循环涡轮增压发动机为原型机, 利用 GT-POWER 软件在此基础上开展米勒循环、压缩比、双涡管增压器、及排气系统管路匹配分析研究, 分析结果显示, 优选的米勒型线+高压压缩比的方案可实现中小负荷油耗改善 1.5%~6.6%;双涡管技术可使发动机扭矩提升约 10N·m, 同时改善部分负荷油耗 1%~3%;通过对以上技术的合理匹配, 在实现目标外特性的同时, 部分负荷油耗改善 3%~7.5%。

关键词: GT-POWER, 米勒循环, 压缩比, 双涡管增压器

Abstract: In order to meet low fuel consumption requirements from the vehicle department, based on the 1.5 liter Otto Cycle, the effects of the Miller Cycle, Compression Ratio, Twin scroll Turbocharger, Exhaust system pipes are calculated by GT-POWER. The results showed that, the optimized Miller Cam-profile and high CR reduced the fuel consumption for 1.5%~6.6% at the low part load; WOT increased 10N·m, and fuel consumption improved 1%~3% at part load by Twin scroll Turbocharger; through the matching of the above technologies, the fuel consumption reduced by 3%~7.5% while meeting the performance target.

Key words: GT-POWER, Miller Cycle, Compression Ratio, Twin scroll Turbocharger

1. 概述

随着油耗、排放法规的加严, 及客户需求多元化需求程度加深, 开发高效、强劲的动力输出是当前汽车厂家重点研究的领域。

相比于现有奥托循环, 采用更早或更晚进气门开闭时刻的米勒循环/阿特金森循环可进一步降低泵气损失, 同时配合更高的压缩比, 获得更高的膨胀比, 大幅改善整机的燃油经济性水平, 其中米勒循环的节油效果更好, 常配合增压机型使用。米勒循环的使用在一定程度上导致了动力性能的下降, 具体下降程度取决于米勒循环的使用程度, 即型线的宽窄程度、开闭时刻, 和压缩比提高的幅度^[1]。动力性的下降可通过增压系统的匹配优化恢复, 相比于单涡管增压器, 双涡管增压器减少了相邻气缸的排气干扰, 获得更大的排气脉冲, 使涡轮效率、响应速度和扭矩输出范围均得到了不同程度的提升^{[2][3][4]}。同时, 降低了缸内残余废气, 爆震余量更大, 可获得更好的动力性能, 配合米勒循环、高压压缩比使用可获得更好的综合性能, 是未来车用内燃机技术升级的一个主要方向之一。

2. 研究平台及方案

以 GT-POWER 为分析工具, 在某 1.5T 奥托循环涡轮增压发动机基础上开展米勒循环、高压压缩比、增压系统、及排气管路和配气相位匹配分析。

表 1 基础机部分参数

项目	参数
行程/缸径	1.197
排量 (L)	1.494
几何压缩比	10.5: 1

3. 模型搭建及精度

基础模型为1.5L单涡管奥托循环发动机模型，该模型的计算精度 $\geq 97\%$ ，满足后续分析需求精度要求。

结合米勒循环的总体技术路线，及几何结构，根据分析的需求情况，对缸内流动、传热、燃烧、排气管路、增压器模块等进行调整^[5]，逐步搭建并完善相应的米勒循环双涡管增压发动机模型。

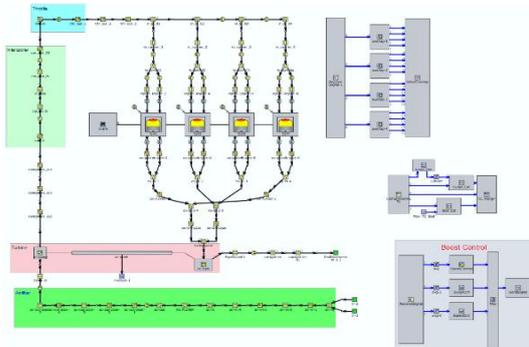


图 1 基础模型

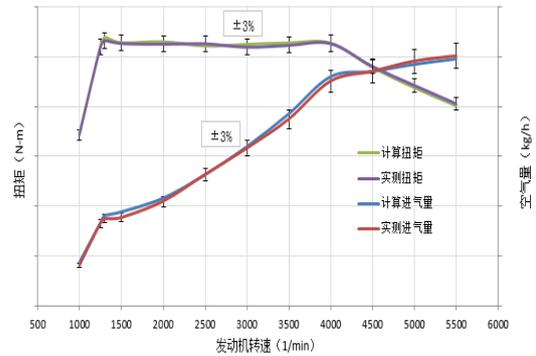


图 2 基础模型标定结果展示

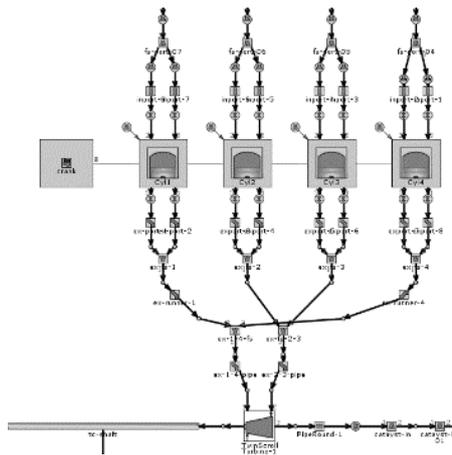


图 3 双涡管排气系统

4. 研究结果及分析

4.1 气门型线对性能的影响分析

根据目标动力性能，及对标机型的性能表现，分别制定了 0.9*base、0.85*base、0.8*base、0.75*base、0.7*base。这四组进气型线计算方案。

在阀门模块中分别输入上述缩放系数，并根据米勒循环的缸盖系统，更新气门流量系数曲线^[5]。

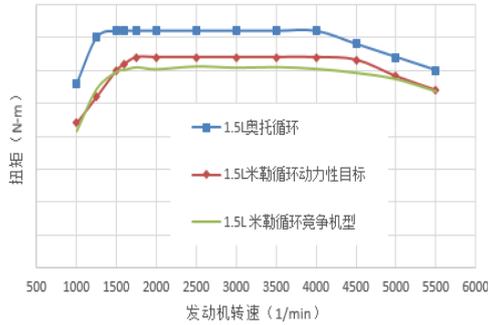


图 4 动力性能开发目标

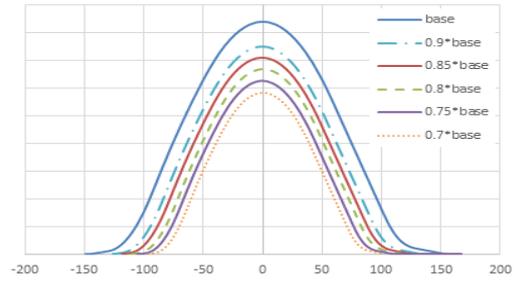


图 5 进气型线

根据搭载车型的工况分布，分别选取了部分工况点开展不同型线的油耗分析。随着型线变窄，油耗收益逐步变大，随着负荷增大，油耗的收益逐步减小。由于定截面增压器无法同时兼顾高低转速扭矩表现，为了保证输出的最大功率，型线变窄后，发动机低转速段扭矩受到较大影响。

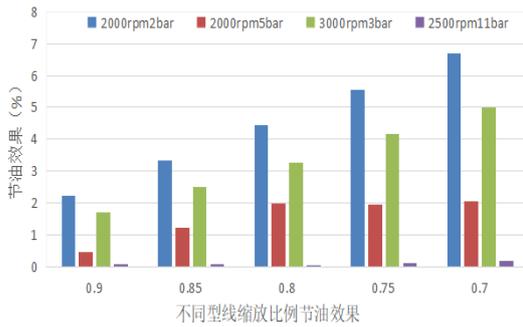


图 6 部分工况点不同型线节油效果

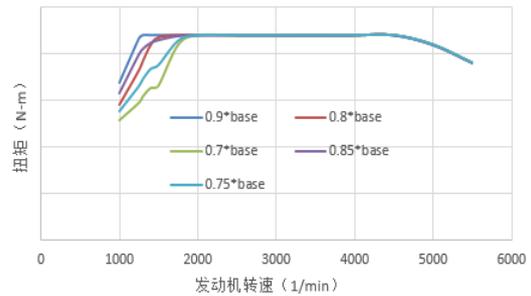


图 7 不同气门型线的动力性能表现

4.2 压缩比对性能的影响分析

为了获得更大的节油效果，米勒循环技术常常需要匹配比奥托循环更大的几何压缩比^[1]，根据热效率和压缩比的关系可知，压缩比越大，膨胀比越大，节油效果也越明显^[6]，但是随着负荷的增加，爆震趋势增加，油耗改善幅度减小，严重时影响动力性目标的达成。需要通过动力性校核来进一步缩小压缩比及型线缩放范围。

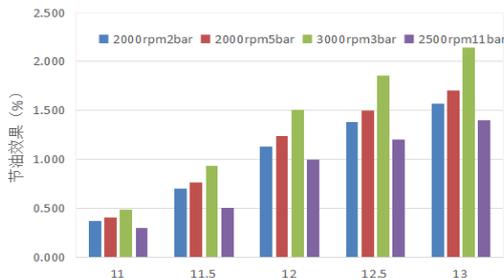


图 8 压缩比对油耗的影响

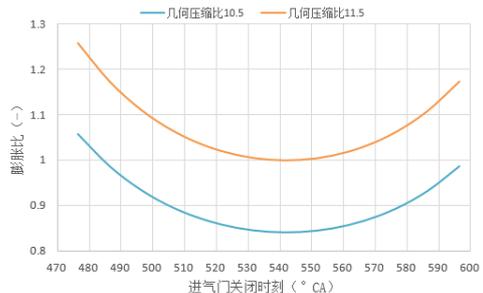


图 9 进气门关闭时刻对膨胀比的影响

通过前面的计算，综合考虑目标扭矩及节油效果，型线缩放比例校核方案减少至 $0.85*base$ ， $0.8*base$ ， $0.75*base$ 这三组方案。在第一轮计算的基础上，模型进一步考虑了压缩比增加带来的爆震风险，对压缩压力，爆震指数等参数的约束。图 7 是 $0.8*base$ 型线方案在不同压缩比下的外特性表现。

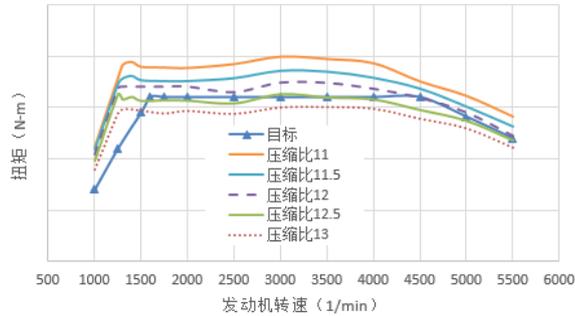


图 10 不同压缩比, $0.8*base$ 型线外特性

通过分析发现， $0.75*base$ 和 $0.8*base$ 型线能够在配合 11.5 及更大压缩比的基础上达到动力性目标，实现中小负荷区域油耗整体改善 3%~4%。

4.3 双涡管增压器性能的影响分析

结合型线和压缩比的分析结果，开展双涡管增压器及其管路的匹配，来进一步提升发动机的扭矩表现。由于篇幅有限，本文只针对匹配该发动机某一款综合性能表现较为均衡的双涡管增压器部分计算结果展开论述。

4.3.1 压力和温度分析

双涡管结构大幅降低了相邻各缸的排气干扰，提高了排气阶段涡轮机入口处的压力，使得排气更加的顺畅，缸内残余废气更低，降低了下一个循环压缩阶段的缸内温度。以发动机转速 1500 1/min WOT 这个工况为例，采用双涡管后，各缸排气冲程的最大排气压力增加了约 0.6bar，压缩终了温度降低 20°C 。

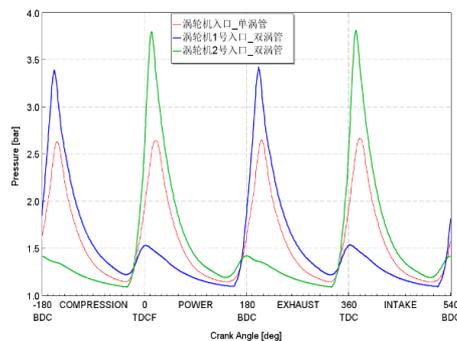


图 11 1500 1/min WOT 涡轮入口处排气压

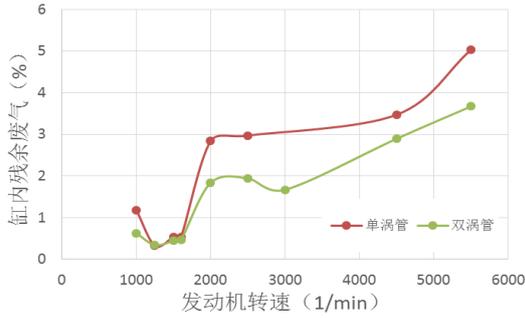


图 12 缸内残余废气

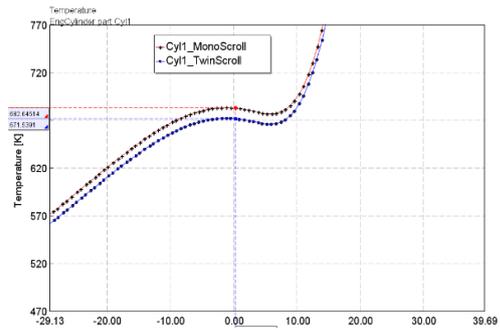


图 13 1500 1/min WOT 缸内温度

4.3.1 双涡管对动力性和油耗的影响分析

由于各缸之间的排气干扰降低，整机充气效率得到提高，可采用更低的进气歧管压力获得与基础机相同扭矩输出，降低了外特性及大负荷区域的爆震概率，其中 20001/min 以上转速区间的进气歧管压力可降低 0.4bar，即相同的进气歧管压力下，可提升外特性扭矩约 10N-m。

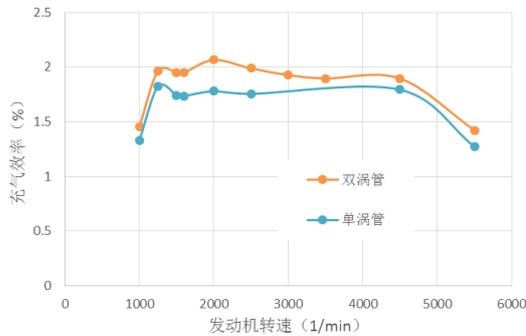


图 14 外特性充气效率图压力

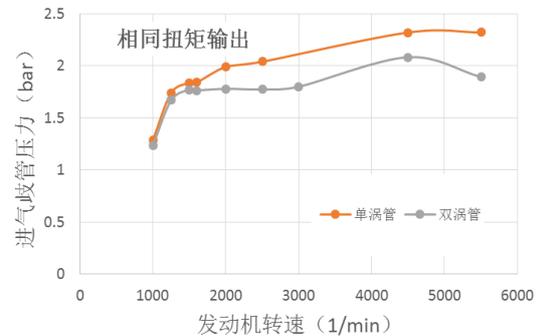


图 15 进气歧管压力性

双涡管系统降低了压气机后的气体温度，一定程度上降低了爆震趋势，可以利用其抗爆震强度减弱的优势，进一步适当提升几何压缩比进一步改善燃油经济性。配合缸盖结构和冷却的同步优化，压缩比提高 0.5 个单位，特征工况点油耗降低 0.5~4g/kW-h。

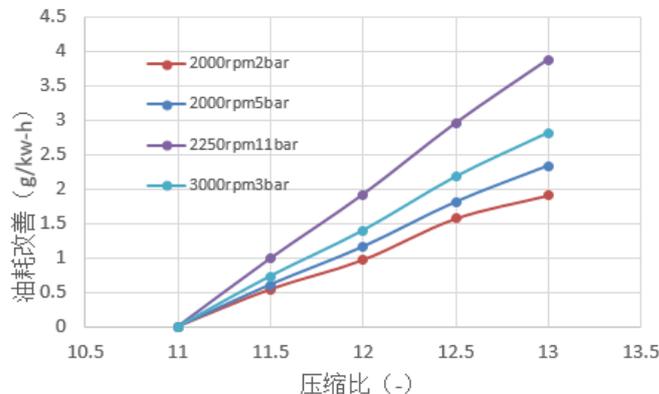


图 16 双涡管状态下，压缩比对油耗的

4.4 涡轮机入口处排气歧管管径和长度优化

根据双涡管结构和工作环境，对排气歧管的管径和涡轮入口处的管长进行了敏感性分析。通过分析发现，排气歧管和涡轮入口的管路长度设计为 20mm~30mm 是一个比较好的方案；双

涡轮入口处的管路内径控制在 28mm 以上可获得更好的性能表现。

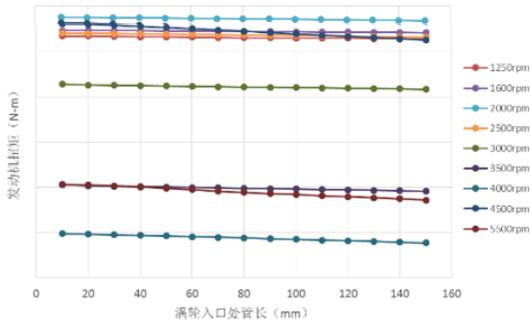


图 17 涡轮增压器入口管长对性能的影响

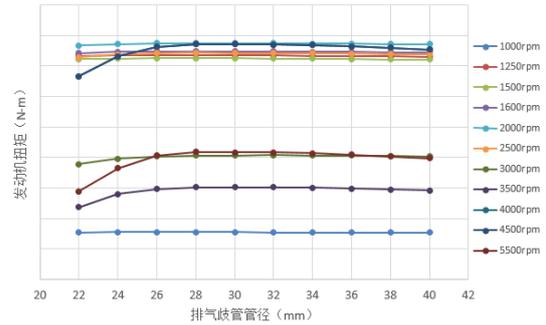


图 18 涡轮增压器入口管径对性能的影响特性

4.5 整机性能表现

通过上述分析匹配优化，同时考虑缸盖抗爆震特性和本体强度进行同步升级，双涡管匹配 0.75*base 和 0.8*base 型线，12 及更大压缩比的技术组合可实现图 19 紫色区域的动力性能表现。同时，部分负荷油耗降低 3%~7.5%不等。

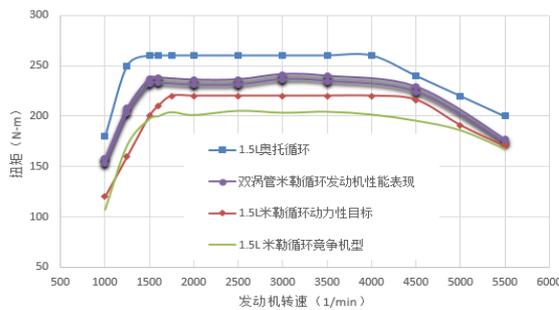


图 19 扭矩输出



图 20 油耗改善幅度

5. 结论

本文基于 GT-POWER 软件开展了某 1.5L 米勒循环发动机性能分析，得到了如下结论：

(1) 型线越窄，油耗越大，随着负荷增大，油耗收益逐步减小，通过对气门型线和压缩比的合理匹配发现，采用 0.8*base、12.5 的压缩比方案和 0.75*base、12 的压缩比方案在满足动力性能目标的前提下，可实现中小负荷油耗改善 1.5%~6.6%。

(2) 双涡管技术降低了相邻各缸的排气干扰，提高了充气效率；降低了大负荷的缸内残余废气，降低了爆震发生几率，通过排气管路及配气相位的同步优化，发动机扭矩有 10N·m 左右的提升空间，大负荷油耗改善 1%。

(3) 通过米勒循环，高压比，双涡管等技术的合理匹配，在实现目标的外特性同时，部分负荷油耗改善 3%~7.5%。

6 参考文献

[1]Uwe Wagner, Martin Rauch, et al. 48 V P2 Hybrid Vehicle with an Optimized Engine Concept - Optimum Drivability with Excellent Fuel Economy and Cost-Efficiency, 37. Internationales Wiener Motoren-symposium 2016
 [2]Apoorv Agarwal, Robert A. Stein, Christian Spanner et al. Blowdown Interference

on a V8 Twin-Turbocharged Engine. SAEInternational, 2011-01-0337.

[3] Izumi Watanabe, Takashi Kawai, Kouichi Yonezawa, Teru Ogawa. The New Toyota 2.0-Liter Inline 4-Cylinder ESTEC D-4ST Engine. 23rd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2014

[4] 谢丹. 基于 2015 款皇冠 2.0T 涡轮增压系统新技术分[J]. 科技与创新, 2015(24): 6835-6835

[5] Engine_Performance-tutorials

[6] 周龙宝主编. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011