

可变截面涡轮对增压汽油机动力性经济性影响研究

Effects of Variable Geometry Turbocharger on the Power and Economy

陈克朋, 叶伊苏, 刘岳兵

(东风汽车公司技术中心, 动力总成开发部, 武汉, 430058)

摘要: 为兼顾汽油机的动力性与经济性, 在一款 1.0L 阿特金森、高压缩比、外部冷却 EGR 增压汽油机上应用可变截面涡轮增压器, 能够有效弥补汽油机动力性损失, 改善油耗与排放。通过 GT-Power 软件建立发动机一维仿真模型并进行性能计算: 考虑到增压器匹配 (尤其涡轮 VGT 的选型), 瞬态响应, 特征工况点油耗。计算结果表明: 可变截面涡轮能够有效弥补动力性损失, 尤其低速扭矩; 1500rpm 瞬态响应时间降低 22%; 中低负荷采用大开度涡轮 VGT, 减小爆震倾向与泵气损失, 特征工况点油耗降低 0.7%-1.41%; 同时仿真匹配计算辅助设计完成增压器匹配选型, 有效减少设计与试验工作量。

关键词: 可变截面涡轮; 低速扭矩; 瞬态响应, GT-Power

Abstract: In order to balance the power and economy of the gasoline engine, a variable geometry turbocharger was applied in a 1.0L gasoline engine with high compression ratio, Atkinson cycle and external cooling EGR. The simulation model was established by GT-Power software, and the performance calculation was taken into account including the turbocharger matching, transient response and fuel consumption. The calculation results show that the variable geometry turbocharger can effectively compensate for the loss of power, especially in low-speed torque. The transient response time at 1500rpm decreased by 22%; large opening turbine VGT is used at low load, the knock tendency and pumping loss can be reduced. And the fuel consumption of the characteristic operating point reduced by 0.7%-1.41%. Simulation can provide advices for turbocharger matching and effectively reduce the work of design and test.

Key words: Variable geometry turbocharger, Low-speed torque, Transient response, GT-Power

1 概述

为应对日趋严格的整车油耗与排放法规的挑战, 开发更加高效更低排放的发动机成为世界各主机厂研发的重点。目前主流的降油耗技术路线中, 包括阿特金森/米勒循环配合高压缩技术, 能够大幅度改善油耗; 外部冷却 EGR 技术一方面通过降低最高燃烧温度与混合气含氧量来改善 NO_x 排放, 另一方面降低泵气损失, 达到降油耗的目的。但这两种主流降油耗、排放技术都将导致发动机出现动力性下降与瞬态响应变差的风险, 尤其是低速扭矩。为保证发动机动力性, 采用一种可变截面涡轮 (VGT) 增压器, 通过不同工况下调节涡轮有效流通截面 (低速工况采用小截面提高低速扭矩, 部分负荷及高速工况采用大截面, 降低泵气损失), 自动调节增压压力, 达到提高动力性的效果。

2 带 VGT 汽油机仿真模型建立

2.1 可变截面涡轮结构

某一 1.0L 增压汽油机，采用高压压缩比，配合阿特金森循环（进气门晚闭），外部冷却 EGR 技术，为保证动力性，采用可变截面涡轮增压器。阿特金森循环是通过进气门晚关，在相同进气量条件下保持较大的节气门开度，有效降低泵气损失，使得膨胀比大于有效压缩比，提高燃烧热效率，改善油耗。但进气门晚关使得部分新鲜空气回到进气管，造成动力性下降，尤其为流速慢、流动惯量较小的低速工况，存在动力性不足的风险。外部冷却 EGR 技术将部分废气引入到进气管内，降低 NO_x 排放与部分负荷油耗，但也将导致动力性的损失^[1]。

本项目采用一种可变截面涡轮（VG），如图 1，图 2 所示，通过调节喷嘴环导流叶片的角度，改变涡轮的有效流通截面。低速时，采用较小的有效流通截面（相当于小涡轮的效果），流速增加，涡轮转速迅速上升至目标压力；高速工况下，采用较大的有效流通截面（相当于大涡轮的效果），流速降低，涡轮转速与增压压力下降，增大与超速线的裕度。同时，中高负荷工况下 VGT 增大了涡轮前后压力，增大外部冷却 EGR 的压差，有利于外部 EGR 率的增加^{[2]-[4]}。依据发动机对动力性、经济性的需求，目前采用一款满足要求的 VGT 系统。



图 1 VGT 增压器结构

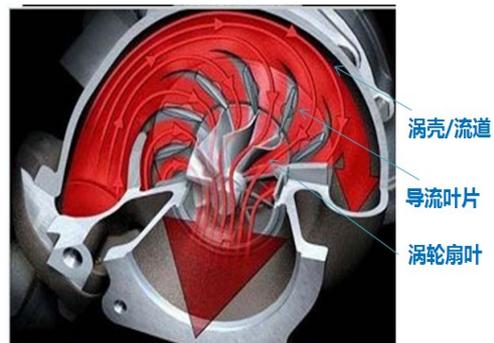


图 2 可变截面涡轮工作原理

2.2 仿真模型的建立

通过一维性能仿真软件 GT-Power 对 VGT 系统结构模型化，建立 VGT 仿真模型，输入各 VG 开度下流量/效率，如图 3、图 4。

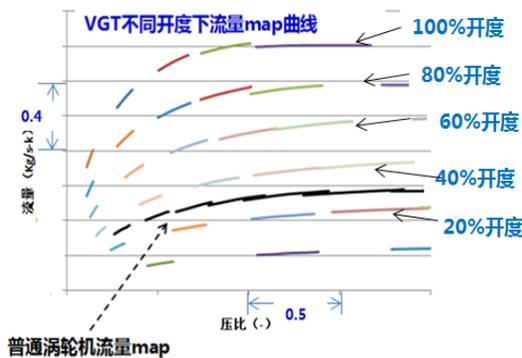


图 3 不同 VGT 开度下流量 map

Rack-Array	map
20%	涡轮流量map-20%
40%	涡轮流量map-40%
60%	涡轮流量map-60%
80%	涡轮流量map-80%
100%	涡轮流量map-100%

图 4 一维模型中 VGT 设置

图 3 表示可变截面涡轮流量特性：通过改变涡轮截面，得到不同开度下涡轮的流量系数，可以兼顾高速功率与低速扭矩的达成。普通增压器的涡轮流量 map 如图 3 中所示，处于 VGT 流量 map 偏小开度的范围，有利于低速扭矩。图 4 为一维模型中 VGT 特性的设

置：仿真模型中给定不同开度下流量/效率 map，通过模型插值的方法自动计算其他开度下涡轮的流量/效率。

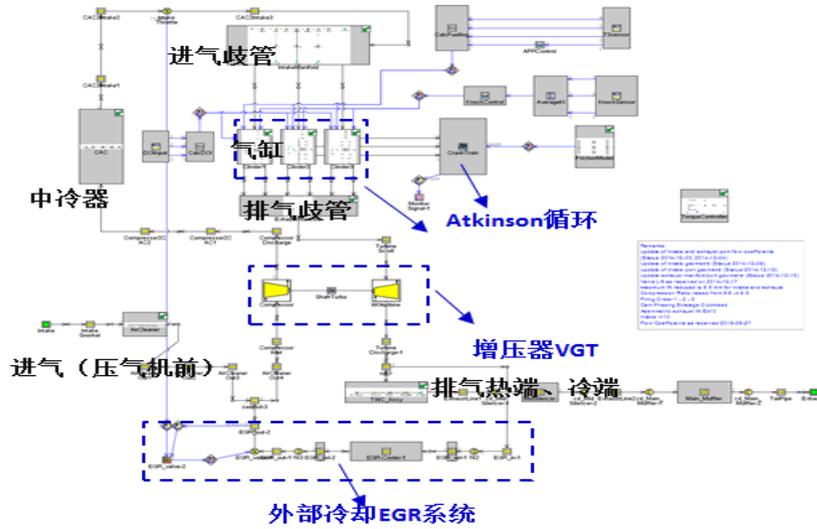


图5 一维热力学仿真模型

图5为1.0L汽油机一维性能仿真模型，主要的仿真参数来源于实际发动机参数与benchmark参考数据。

- 1) 发动机 Engine 模块中主要结构参数（如缸径、连杆长度、排量、冲程及发火顺序等）按照实际发动机参数进行输入；
- 2) 原型机模型除气缸外，其它进、排气结构模型（包括 EGR 系统）均由实际结构的 3D 数模在 GEM3D 软件中离散所得；
- 3) 发动机气缸模块中参数（温度、换热参数，燃烧参数，摩擦参数等），进排气凸轮型线，参考 benchmark 机型及经验进行输入，根据供应商提供的 VGT 增压器 map 进行输入。

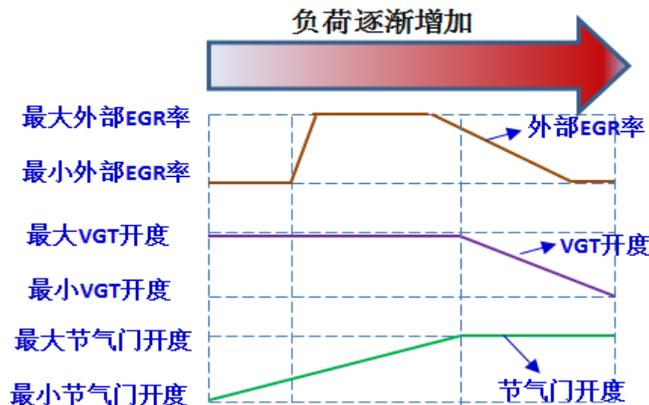


图6 节气门开度/VGT开度/外部EGR调节先后顺序

与传统增压器负荷控制参数不同，可变截面增压器通过调节 VGT 开度代替废气旁通阀开度来控制负荷。如图6所示，随负荷增加，节气门开度/VGT开度/外部EGR先后调节顺序：低负荷时，通过节气门开度控制负荷（不采用外部EGR，VGT最大开度）；达到中低负荷时，保证燃烧稳定性前提下采用外部EGR，降低油耗；中高负荷下，节气门达到全开，通过调节VGT开度增加动力性；高负荷工况下，保证动力性，不采用外部EGR。

3 VGT 的性能影响仿真结果及分析

3.1 VGT 开度对汽油机动力性的影响

计算工况: 1500rpm、节气门全开、不采用外部 EGR, 验证不同 VGT 开度对动力性的影响。

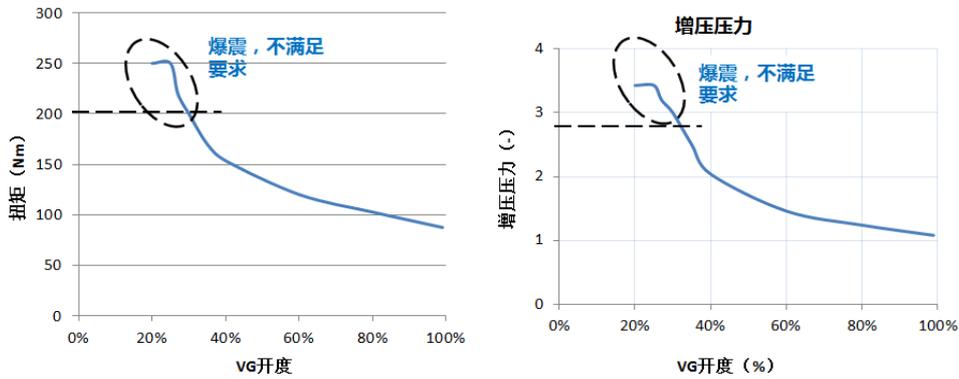


图7 不同涡轮VG开度对扭矩与增压压力的影

图7 为定转速下(以1500rpm为例), VGT增压器不同的VG开度对扭矩/增压压力的影响。计算结果表明: 随VGT增压器开度减小, 动力性(扭矩与增压压力)增加, 但达到最大扭矩值将发生爆震风险, 不满足要求。同时, 小于10%开度后, VGT本身流动阻力增加, 背压急剧上升, 动力性下降^{[5]-[8]}。

传统涡轮增压汽油机均存在瞬态响应迟滞现象(定转速下, 发动机从初始状态达到最终目标状态的响应时间), 由于发动机本身进排气系统存在阻力以及涡轮本身的惯量特性, 废气推动涡轮达到目标转速需要一定时间, 使得新鲜空气量达到目标值。同时, 发动机瞬态响应迟滞也是影响整车加速性的重要因素之一, 尤其是低速扭矩。

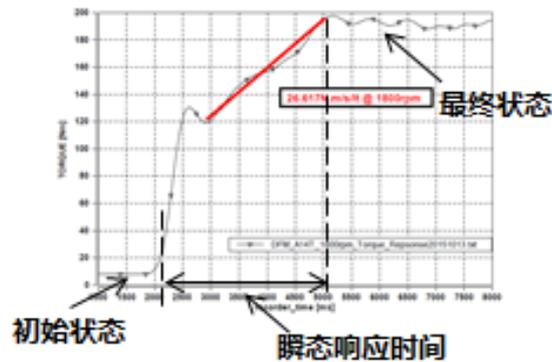


图8 发动机台架瞬态响应

低速工况采用小涡轮有利于增加低速动力性与改善瞬态响应: 相同排气流量下, 小涡轮的流速高, 更快的推动涡轮达到目标转速, 降低瞬态响应性迟滞。可变截面涡轮(VGT)利于导流叶片的特性, 低速工况采用小开度VGT, 增大涡轮入口的废气流速, 改善瞬态响应。

3.2 外特性增压器匹配—VGT 匹配选型仿真计算

发动机增压器匹配选型工作, 主要包括: 外特性动力性匹配, 需满足传统增压器动力性

匹配要求；高原工况满足超速要求；万有特性油耗计算；瞬态响应计算。

- (1) VGT 压气机匹配原则，与传统压气机相同：满足高速功率与最大增压压力要求；增压器匹配点与喘振线、超速线留有裕度；匹配点尽可能在高效率区内。

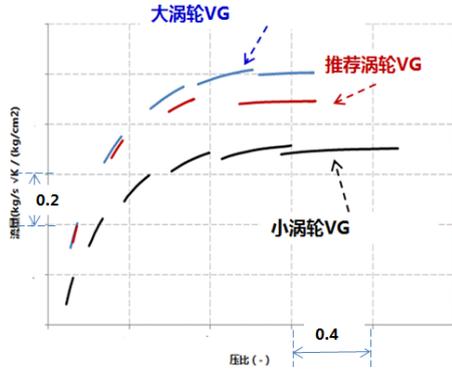


图9 涡轮 VG 最大开度流量对比

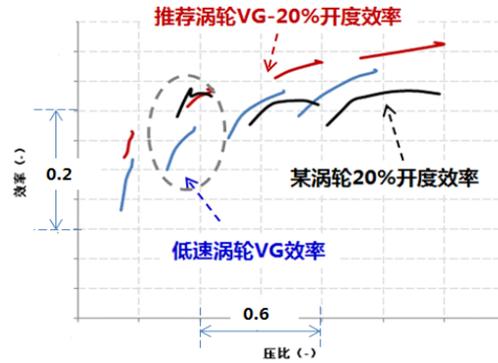


图 10 不同 VG 相同开度下效率对比

- (2) 可变截面涡轮 VG 选取原则：

VGT 匹配最重要的参数是 VG 最大开度下的流量与各开度下涡轮效率。涡轮 VG 最大开度下流量对比，如图 9 所示，当涡轮 VG 最大流量偏小（小涡轮 VG），会出现功率点超速的风险（推荐功率点处涡轮 VG 的开度为 90%–95%）；当涡轮 VG 最大流量偏大（大涡轮 VG），会有低速扭矩不足的风险。尽可能提高涡轮 VG 的效率，尤其是小开度下涡轮 VG 效率（低速扭矩匹配的涡轮开度在 20%–40%范围内），如图 10 所示，推荐的涡轮 VG 在 20%开度下的效率，处于高效率水平。

- (3) 增压器瞬态响应匹配计算：

发动机增压器匹配不仅要关注动力性、经济性、排放等，同时，增压器瞬态响应也成为增压器匹配选型的重要指标。增压器瞬态响应评判指标：低转速下（定转速），10%负荷–90%负荷瞬态响应时间。

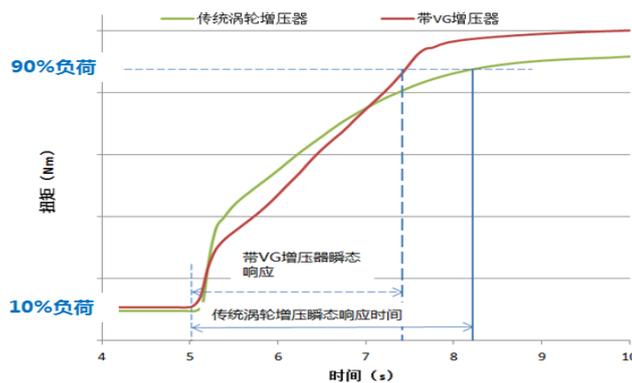


图 11 1500rpm 下传统增压器与 VGT 瞬态响应对比

如图 11 为定转速 1500rpm 下，传统涡轮增压器与带 VG 增压器瞬态响应时间（10%负荷–90%负荷）对比：带 VG 增压器比传统涡轮增压器瞬态响应时间缩短约 22%。传统涡轮增压器瞬态响应过程：节气门瞬时打开，发动机迅速补气；随负荷增加，涡轮逐渐介入，由于涡轮特性使得负荷增加速率减缓，稳定在外特性工况。带 VG 增压器瞬态响应过程：节气门瞬时打开，开始自然补气；当涡轮介入时，采用小 VG 开度，，负荷增加速率快速平稳，稳定在外

特性。涡轮介入后可变截面涡轮的作用明显，VGT 有助于提高增加瞬态响应时间。

3.3 VGT 对汽油机油耗的影响

3.3.1 工况点的选取原则

为验证 VGT 对各转速各负荷油耗影响，仿真工况选取范围：选取 1500rpm、3000rpm、5000rpm 三个转速；25%，50%，75%以及 100%负荷工况。本文以 50%负荷为例，计算涡轮 VG 开度对性能的影响分析。

VGT 开度调整原则如图 6 所示，表明节气门开度/VGT 开度/外部 EGR 调节先后顺序。EGR 系统选取原则：低负荷工况的残余废气系数高，为保证燃烧稳定性，20%以下低负荷工况不使用 EGR 系统；为兼顾汽油机动力性，高负荷工况不使用 EGR。为保证汽油机低负荷燃烧稳定性，根据经验，残余废气系数 $<25\%$ 。

3.3.2 VGT 对各工况影响计算

图 12 为定转速下（1500rpm、3000rpm、5000rpm）、50%负荷工况，主要性能参数（油耗、扭矩、燃烧参数 CA50、泵气损失）随涡轮 VG 开度的变化。

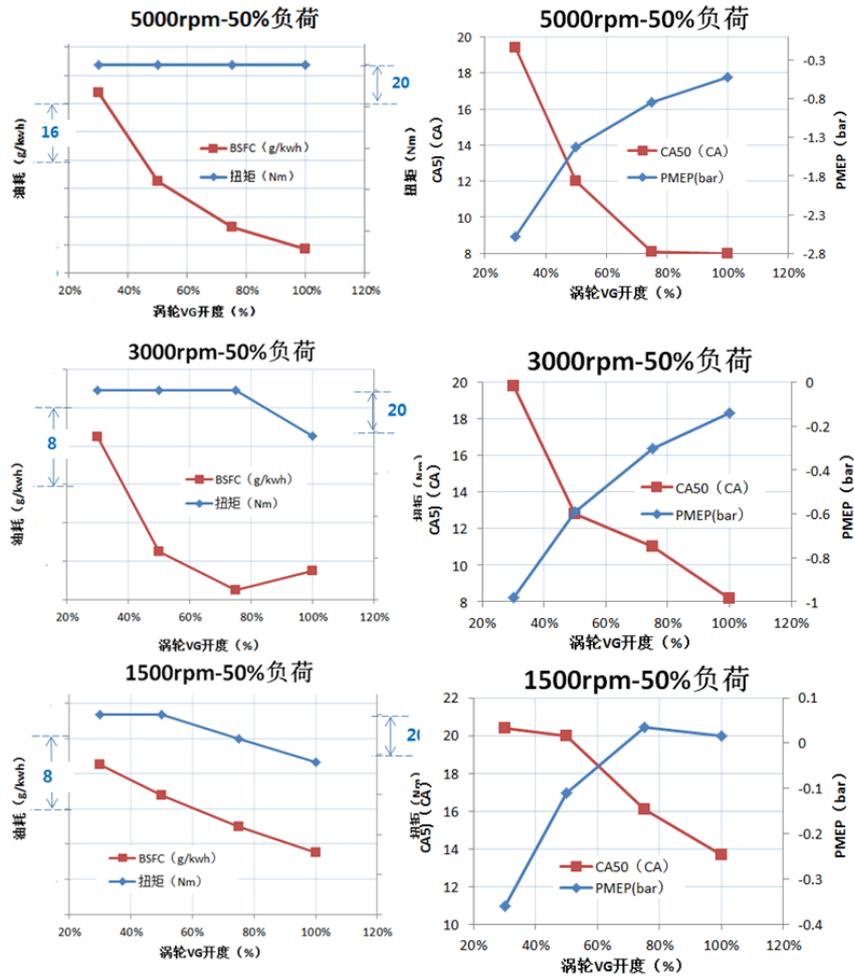


图 12 为定转速下、50%负荷工况，主要性能参数随涡轮 VG 开度变化

从图 12 中可以看到：(1) 涡轮 VG 开度对油耗的影响。各转速下，随涡轮 VG 开度增加，油耗降低；并且，高转速 5000rpm 油耗降低幅度高于 3000rpm 与 1500rpm。但是，随着涡轮

VG 开度增加, 涡轮转速降低, 动力性有降低的风险, 如 3000rpm 在 VG 开度达到 75%后动力性下降, 1500rpm 在 50%开度后动力性下降, 转速越低, 动力性降低的风险越高。

(2) 涡轮 VG 降低油耗的原因分析: 如图 12 第二列数据图所示, 随涡轮 VG 开度增加, 燃烧 CA50 值降低(燃烧参数 CA50 表示缸内燃料燃烧 50%所对应的曲轴转角), 爆震倾向降低, 点火角提前; 转速越低, CA50 值降低幅度越高, 有利于改善油耗; 另一个重要原因为泵气损失, 随涡轮 VG 开度增加, 废气通过涡轮的阻力降低, 泵气损失明显改善, 转速越高, 泵气损失改善幅度越大。

3.3.3 VGT 对特征工况点油耗影响计算

根据整车 NEDC 循环试验工况点, 选取部分负荷特征点进行仿真计算。仿真选取 1500rpm/10bar, 2000rpm/2bar, 2000rpm/8bar, 3000rpm/3bar, 3000rpm/11bar 五个工况点进行计算, 与传统增压器油耗相比, 计算各特征点的节油效果。

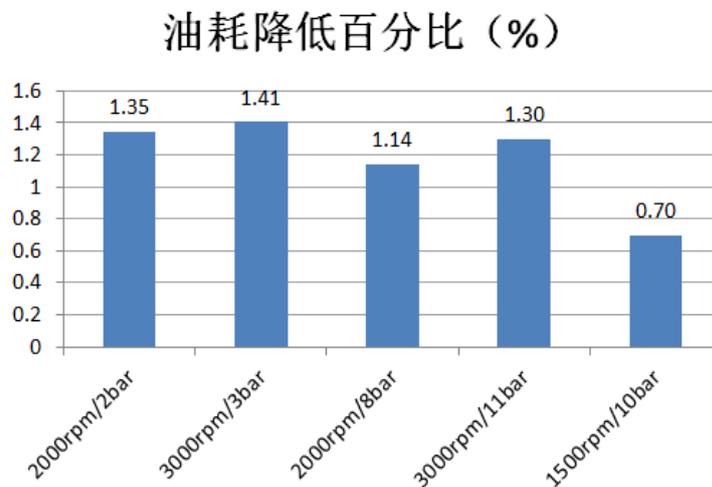


图 13 涡轮 VG 对特征工况点节油效果

如图 13 所示, 本项目采用可变截面涡轮后, 相对于原涡轮增压器, 油耗降低的百分比: 中低负荷油耗降低 1.14%-1.41%, 对于中高负荷, 涡轮 VG 开度逐渐减小, 保证动力性, 节油效果降低, 1500rpm/10bar 节油月 0.7%; 随负荷增加, VG 开度继续减小, 节油效果不明显甚至会有恶化趋势。

根据前期对可变截面涡轮的仿真探索, 通过仿真计算: 包括动力性匹配、高原工况计算、特征工况点及万有特性油耗计算、瞬态响应时间计算, 辅助设计完成 VGT 增压器匹配选型工作; 同时, 通过仿真 DOE 优化计算结果, 能够为后续试验提供进排气 VVT、EGR 率、VGT 开度、点火提前角等选取建议, 大量减少试验工作量。

4 结论

- 1) 采用阿特金森循环、高压压缩比、外部冷却 EGR 增压汽油机, 在降低油耗的同时, 为弥补动力性损失, 采用可变截面涡轮增压器。通过减小 VG 开度保证中高负荷动力性, 尤其为低速扭矩; 同时, 改善涡轮增压汽油机瞬态响应, 与传统相比, 瞬态响应时间缩短 22%。
- 2) 中低负荷 VGT 采用涡轮 VG 最大开度改善油耗, 一方面降低爆震倾向, 减小 CA50, 另一

方面减小泵气损失。可变截面涡轮导致特征工况点油耗改善 0.7%–1.41%。

- 3) 通过前期仿真对 VGT 计算, 辅助完成增压器的匹配选型, 减少试验、设计工作量; 同时, 仿真 DOE 优化计算, 为后续试验提供进排气 VVT、EGR 率、VGT 开度等选取建议。

参考文献:

- [1] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [2] Hong, S. Park, I. Chung, J. , et al. Gain Scheduled Controller of EGR and VGT Systems with a Model-Based Gain Scheduling Strategy for Diesel Engines [C].//IFAC PapersOnLine 2015 48(15):109–116.
- [3] 杜 锴, 孙跃东, 姚建明, 等. 双循环 E G R 对 V G T 柴油发动机 N O x 排放和油耗影响的模拟分析[J]. 内燃机工程, 2016, 37(6): 50–53
- [4] 周军, 张继果, 杨传雷, 等. 某型柴油机与 VGT 增压器的匹配计算研究[J]. 内燃机与配件, 2015, 1
- [5] 唐 蛟, 李国祥, 王志坚, 等. 基于欧VI柴油机 E G R 阀与 V G T 阀解耦控制策略研究[J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 19–24.
- [6] Hatami, M. Cuijpers, M. C. M. Boot, M. D., et al. Experimental optimization of the vanes geometry for a variable geometry turbocharger (VGT) using a Design of Experiment (DoE) approach [C]// In Energy Conversion and Management December 2015 106:1057–1070
- [7] Kim, S. Choi, S. Jin. H., et al. Pressure model based coordinated control of VGT and dual-loop EGR in a diesel engine air-path system [C]// 10.1007/s12239-016-0019-8.
- [8] 郭林福, 马朝臣, 施新, 等. VGT 对柴油机经济性和动力性影响的试验研究[J]. 内燃机学报, 2012, 22(2):19–22.