

基于 GT-POWER 的柴油机瞬态模型搭建与应用

Transient model building and application of diesel engine based on

GT-power

吕晓惠 李鑫善 高莹 贾德民 王晓艳

(潍柴动力股份有限公司)

摘要: 随着排放法规的日益加严以及国六排放法规的实施, 实现发动机瞬态工况的精确控制已显得尤为重要。本文基于 GT-POWER 软件的 DIPULSE 燃烧预测模型, 搭建某六缸柴油机模型, 并利用台架测试数据对稳态和瞬态性能进行了标定。基于该模型本文研究了不同发动机结构参数以及标定参数对于瞬态工况动力响应性以及经济性等的影响, 为柴油机的开发和标定提供参考。

关键词: GT-POWER、预测模型、瞬态响应、虚拟标定

Abstract: With the emission regulations be increasingly strict and the implementation of national sixth emission regulations, it has become particularly important to realize the precise control of the engine transient condition. Based on the DIPULSE combustion prediction model of GT-POWER software, the paper built a six-cylinder diesel engine model, and using the bench testing data of steady state and transient performance for calibration. Based on this model, this paper studied the influence of different engine structure parameters and calibration parameters on the dynamic response and economy in transient conditions, providing reference for the development and calibration of diesel engine.

Key words: Diesel engine, prediction model, transient response, virtual calibration

1. 前言

目前, 国内外对于增压柴油机性能的研究多集中在稳态工况下发动机动力性, 经济性以及排放, 而对于增压柴油机瞬态运行特性的研究仍然较少。而发动机在实际运行过程中, 尤其是城市道路工况下, 发动机负载及油门变化频繁, 运行工况实时变化。并且随着新的排放法规的出台, 对发动机瞬态排放提出了更高的要求, 但由于发动机进气的迟滞性, 尤其是涡轮增压发动机, 导致发动机瞬态工况的动力响应性受到制约。吉林大学的刘忠长等人^[1]利用试验方法研究了瞬态工况下喷油参数对柴油机排放及燃烧特性的影响, 北京理工大学的施新等^[2]利用仿真手段研究了可变几何涡轮与压气机协同调节对柴油机瞬态性能的影响, 本文基于 GT-POWER 一维热力学分析软件, 研究发动机结构参数及标定参数等对瞬态动力响应性、经济性等的影响。

2. 仿真模型搭建与验证

本文采用某直列 11.6L 六缸柴油机, 增压器采用机械放气阀增压器, 根据发动机三维实际结构搭建 GT-POWER 一维热力学模型。为方便研究标定参数对发动机瞬态性能的影响, 模型将 ECU 喷油控制模块在 GT-POWER 中进行搭建, 如图 1 所示。

2.1 稳态模型标定

本文采用 DIPULSE 柴油机缸内燃烧预测模型, 首先利用单缸机模型进行缸压分析以及燃烧参数的标定。经分析, 燃烧测试采集的缸压能够满足要求, 能够用于后续燃烧参数的标定。采用

DIPULSE 模型需标定卷吸系数和扩散燃烧系数、预混燃烧系数以及着火迟滞系数，其中卷吸系数和扩散燃烧系数对性能影响较大，本文采用 DOE 方法寻优确定。另外，模型精度高低不仅与燃烧参数标定相关，也依赖于喷油器喷油规律的精确采集，本文对不同轨压和加电时间下的喷油规律进行采集，以保证燃烧模型标定的准确度。采用单缸机模型标定不同转速负荷缸压结果如图 2 所示。燃烧模型标定完成后，带入进排气管路和增压器等，进行整机模型的标定，本文选取高中低不同转速和负荷 28 个稳态工况进行稳态模型标定，并利用其他 24 个工况点试验数据对模型标定精度进行验证。稳态模型全工况标定误差如图 3 所示。从图中可以看出，扭矩和油耗率、爆压的标定误差均很小，进气量及涡前排温在低速和低负荷工况误差稍大，分析一方面与增压器 MAP 效率准确性有关，另一方面可能与燃烧参数不能很好的覆盖全工况有关。总体来说，大部分工况性能参数偏差均在 3% 以内，满足后续计算要求。

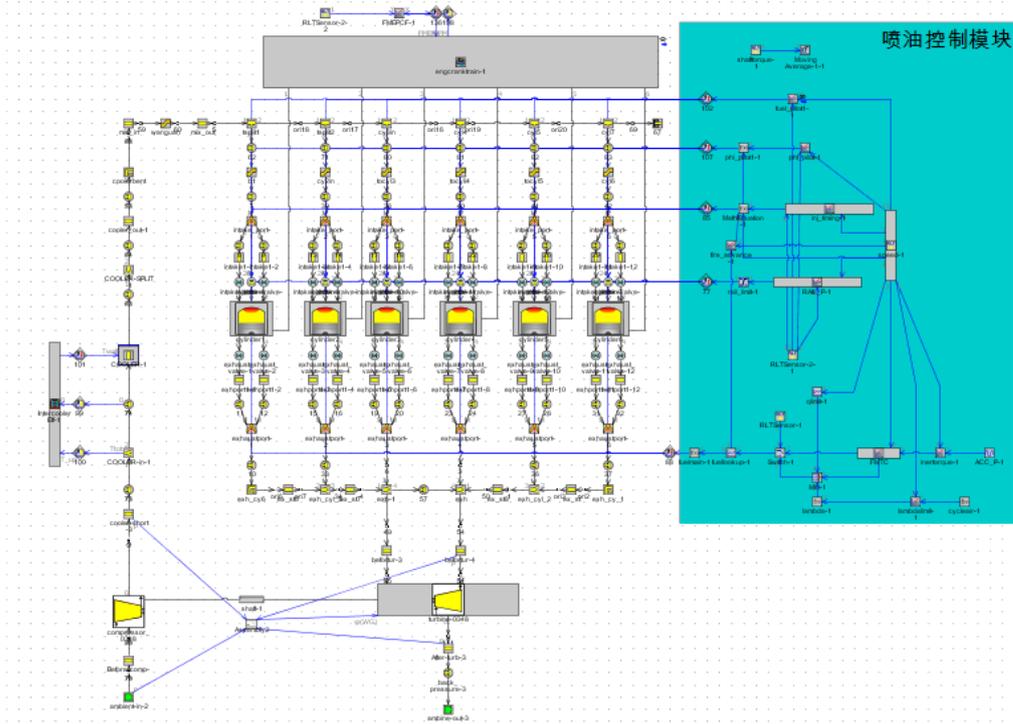


图 1 GT-Power 一维热力学模型

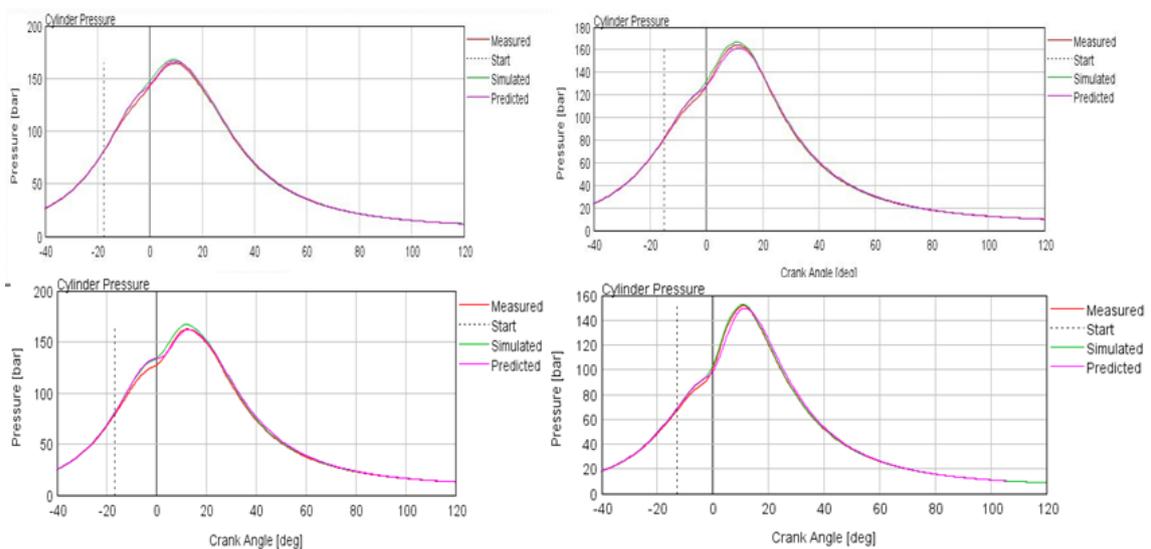


图 2 缸压标定

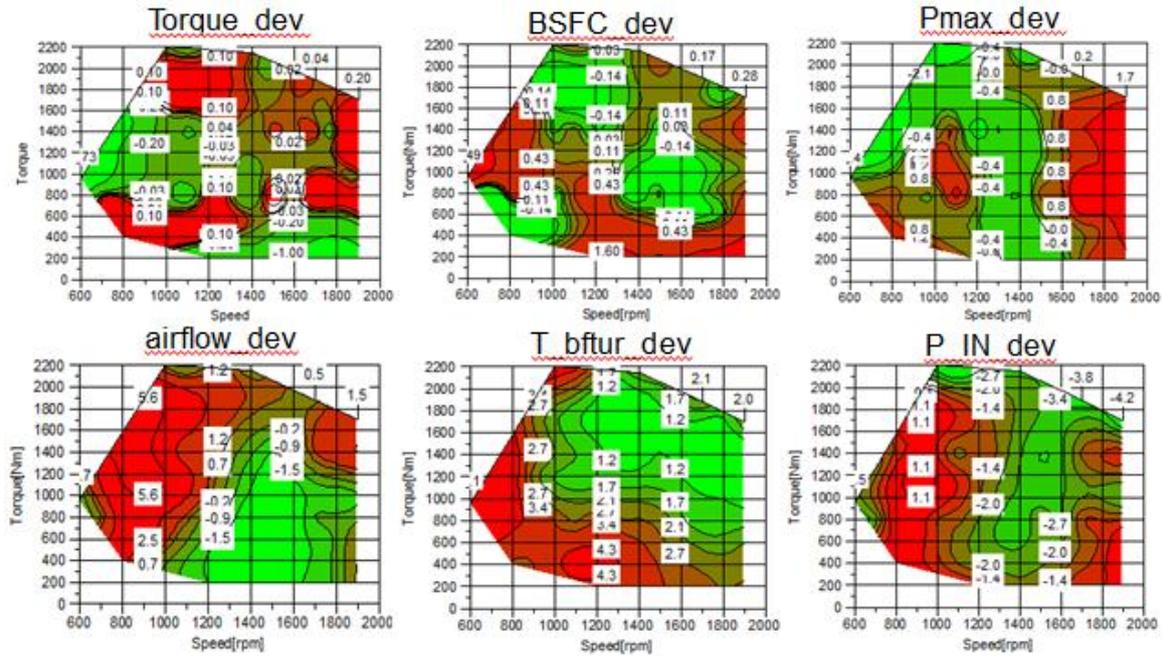


图 3 稳态模型标定误差

2.2 瞬态模型标定

稳态模型标定完成后，本文首先根据台架采集的负荷阶跃试验数据对模型进行了校正，以验证厂家提供的增压器转动惯量。之后截取整车采集的一段路谱数据进行了瞬态模型标定，图 4 所示为提取的一段整车路谱数据标定结果，进气流量和曲轴实时输出扭矩与试验值基本吻合。因此，认为该模型可以准确反映发动机瞬态工况性能，满足后续计算要求。

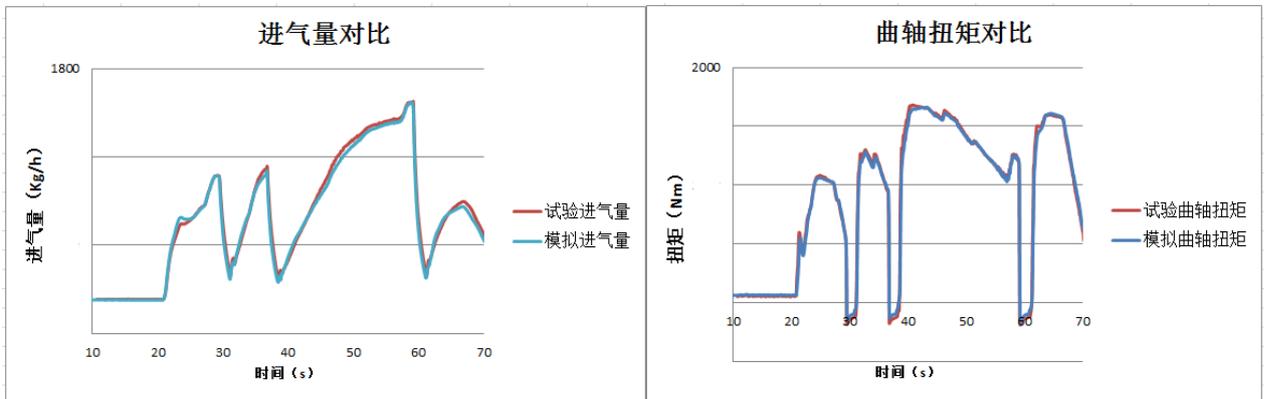


图 4 提取整车路谱标定结果

3. 发动机结构参数对瞬态性能影响研究

基于搭建的瞬态模型，本文研究了不同进排气系统结构参数对发动机瞬态性能的影响规律。在发动机设计研发中，多缸柴油机为保证各缸进气均匀性，倾向于将进气稳压腔做大，以减小进气压力的波动，从而提高各缸均匀性，因此本文通过仿真模拟了不同进气稳压腔容积对发动机瞬态性能的影响，采用保持发动机转速不变油门开度 0.01s 从 15%变化到 100%的过程进行对比，如图 5 所示。为保证瞬态初始工况收敛，固定转速油门不变运行 10s 至发动机工况稳定。如图所示，不同进气管容积下发动机扭矩响应性差别不大，进气量在烟度限制起作用的时间段内有稍许差别，较小的

进气管容积下发动机进气量跟随性稍好，但达到外特性最大扭矩的时间几乎一致。因此，可以认为，在达到理想稳压效果和各缸均匀性要求的前提下，可以适当缩小进气管容积。

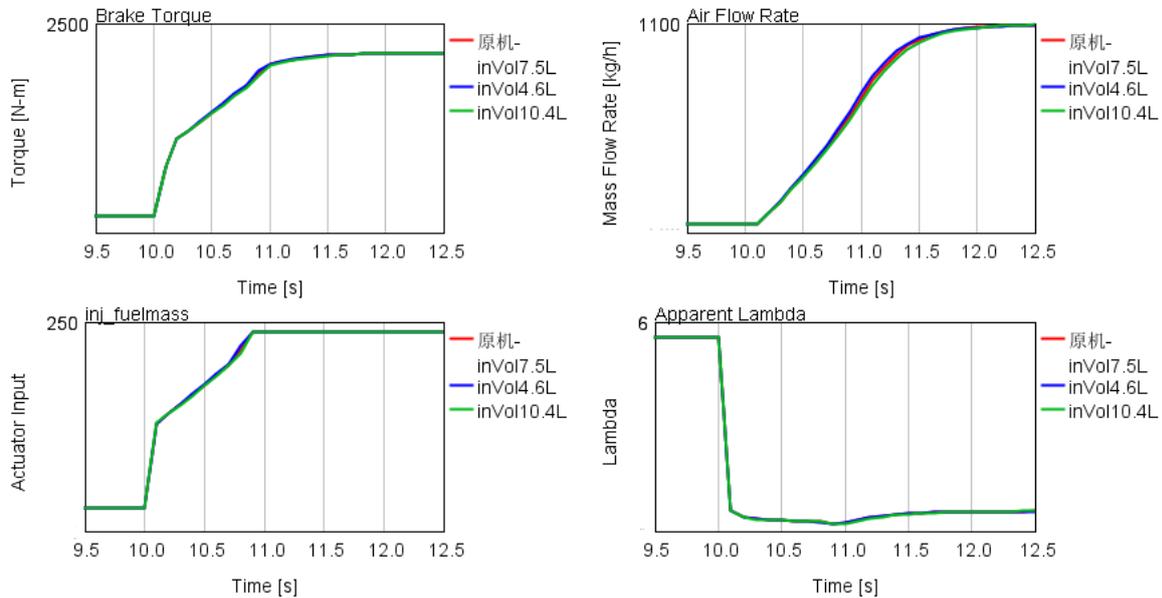


图5 不同进气管容积瞬态性能对比

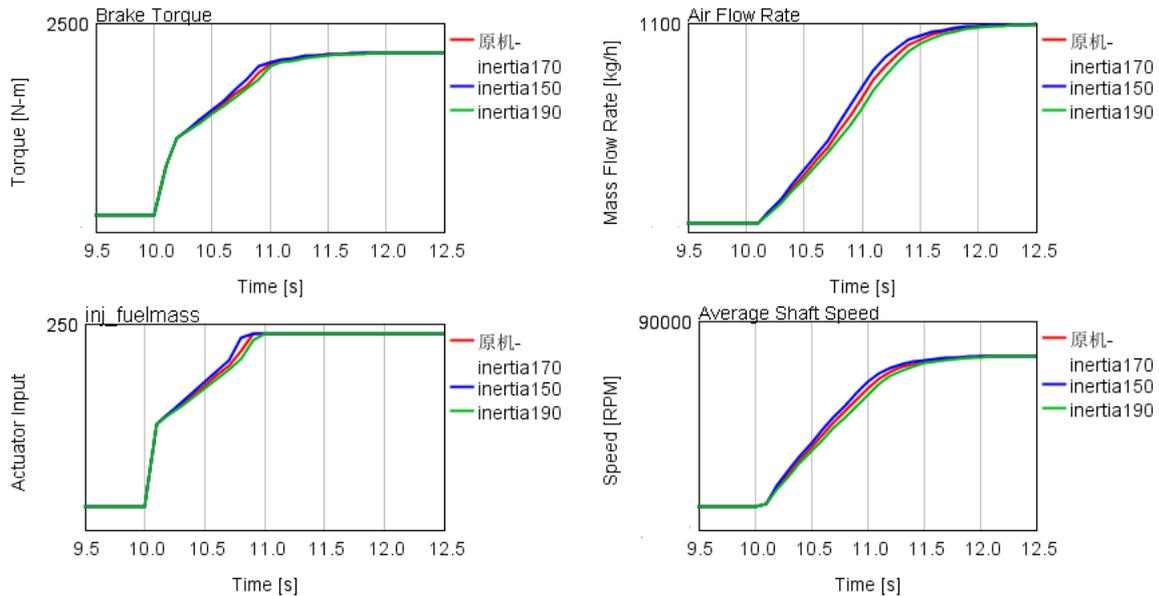


图6 增压器转动惯量对瞬态性能影响

在瞬态加速加载过程中，增压柴油机的响应性在一定程度上取决于增压器的响应性。而影响增压器响应性的主要是增压器的转动惯量以及其结构尺寸。本文首先研究了不同增压器转动惯量下发动机定转速加载的瞬态响应性，如图6所示。可以看到，适当减小增压器转动惯量后增压器转速响应性稍好，进气量跟随性好，因而瞬时循环喷油量能达到更高，但由于增压器转动惯量变化范围不大，不同转动惯量下发动机达到90%外特性扭矩的时间相差很小。

在此基础上，本文研究了增压器流量大小对发动机瞬态性能的影响，如图7所示。从图中可以看出，相比于进气管容积，增压器流量大小对发动机瞬态性能的影响相对较大，适当减小增压器涡端流量可以明显看到发动机瞬态加载过程增压器转速响应加快，伴随着发动机进气流量响应性提升，瞬时循环喷油量的限制减小，发动机达到90%外特性扭矩的时间也相对提前。

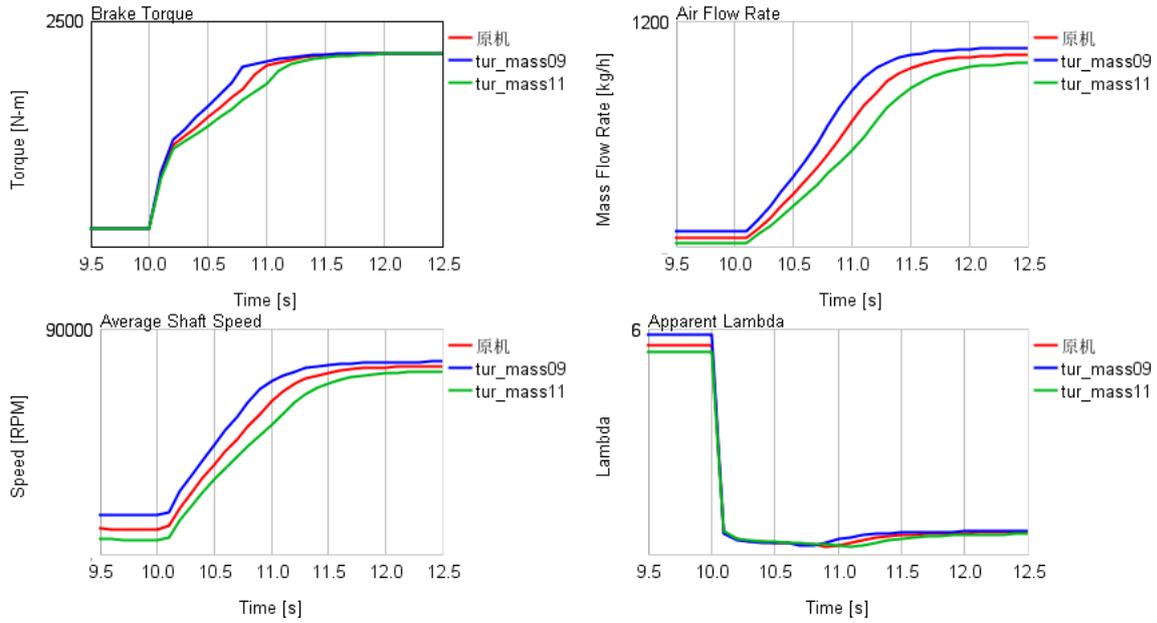


图 7 增压器涡端流量大小对瞬态性能影响

4. 发动机标定参数对瞬态性能的影响

4.1 烟度限制 MAP 对瞬态加载过程的影响

发动机瞬态急加速过程中，由于进气量的迟滞性，发动机瞬态烟度排放会急剧增大，而为满足严格的排放法规，需要对发动机瞬态循环喷油量进行限制，以降低 PM 排放。本文在台架标定烟度限制 MAP 的基础上，研究不同 λ 限制标定对发动机瞬态性能以及排放等的影响^[3-4]，如图 8 所示。可以明显看到，增大 λ 烟度限制后，瞬时循环喷油量被限制，进而导致进气量和扭矩响应滞后。参考发动机瞬时过量空气系数和缸内最高燃烧温度，不难看出，在急加载过程中，过量空气系数瞬间下降，缸内最高燃烧温度急剧升高，但由于空气量不足，NO_x 生成先急剧升高然后呈下降趋势，稍后随进气量上升并慢慢稳定，NO_x 生成量也逐渐上升至稳定。由于 NO_x 排放模型未经过精确标定，因此，本文只针对 NO_x 排放做趋势性分析。

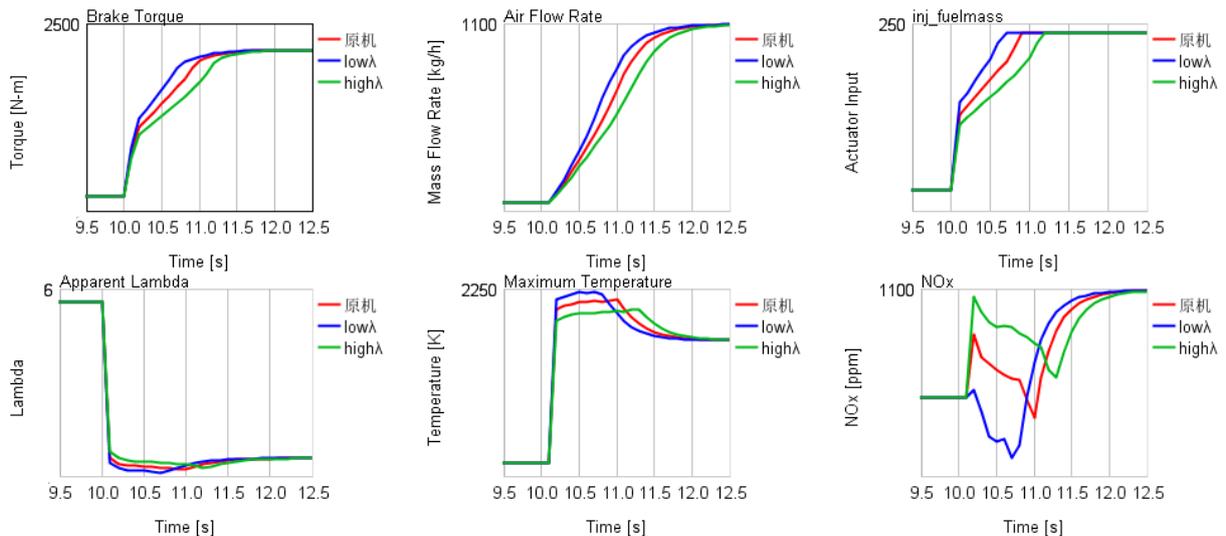


图 8 烟度限制 MAP 对瞬态性能影响

5. 发动机瞬态工作过程经济性评估

该机型在前期开发满足排放要求的情况下，欲更换小涡端以优化发动机动态响应性。本文采用涡端流量小 10% 的增压器对其瞬态性能进行了模拟。为了与整车行驶车况更贴合，本文提取一段整车典型路谱工况，模拟更换小涡端流量增压器对其瞬态燃油经济性的影响。与台架瞬态排放测试循环相同，本文采用转速模式，以曲轴输出扭矩为控制目标，控制电子油门，以实现发动机预设瞬态工况的模拟。同样的，发动机在初始工况运行 10s 至稳定后进入瞬态预设工况。由于 PID 控制的滞后性，发动机输出扭矩在只有 PID 控制的情况下未能按照预设工况运行，如图 9 (a) 所示。因此，为提高发动机输出扭矩的跟随性，加入油门踏板前馈控制 MAP，发动机实时输出扭矩与目标扭矩基本吻合，如图 9 (b) 所示。

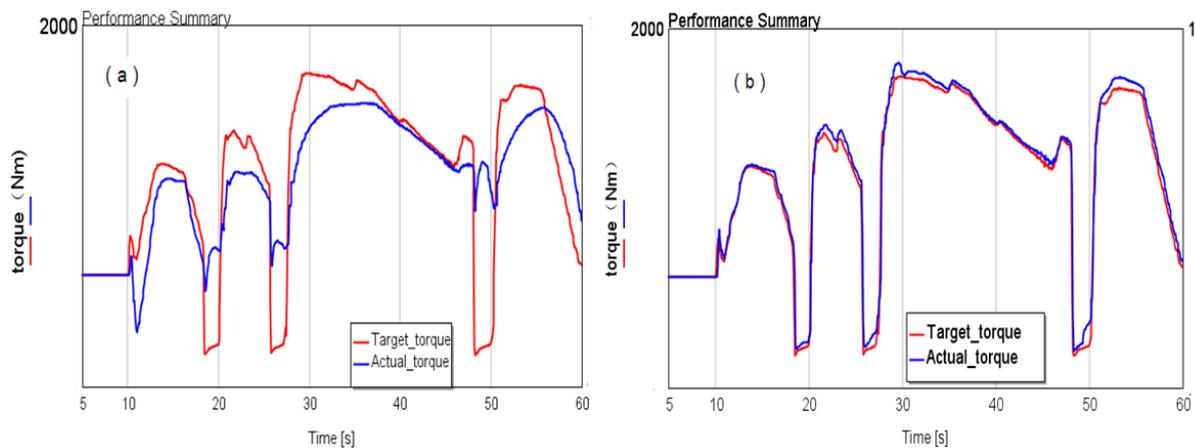


图 9 发动机瞬态工况扭矩跟随性

如图 10 所示，更换小涡端后，发动机曲轴扭矩输出仍达到原预设瞬态工况，可以看到，小涡端瞬时进气量响应更好，瞬时过量空气系数稍高，排气门开启时刻 NOx 浓度也稍高，发动机瞬时油耗率在低速工况小涡端稍好，而转速高于 1500rpm ($t > 40s$) 后小涡端由于泵气损失增加，气耗率稍差。

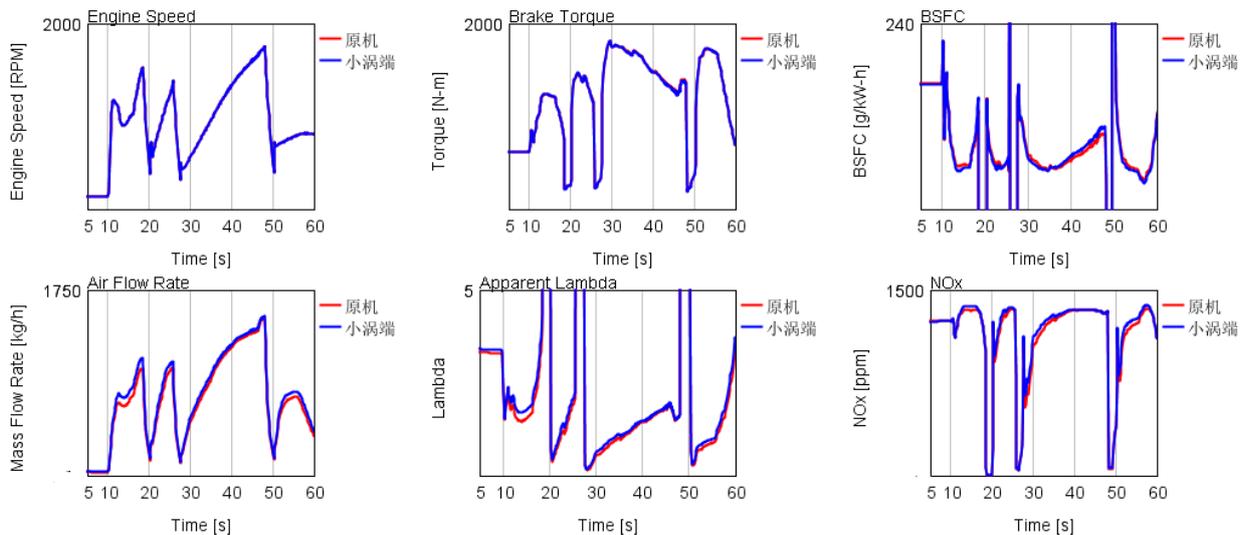


图 10 发动机更换小涡端瞬态性能对比

6. 结论

本文基于 GT-POWER 搭建某增压柴油机 DIPULSE 燃烧预测模型，并经过了稳态和瞬态工况标定，在此基础上研究发动机结构参数以及发动机标定参数等对瞬态性能的影响规律。提出一种基于模型的虚拟标定与研究方法，用于分析发动机瞬态动力响应性及排放等。主要有以下结论：

1. 进气管容积对发动机瞬态响应影响较小，进气管设计应优先满足发动机各缸均匀性要求；
2. 增压器转动惯量与涡端流量大小对发动机瞬态响应影响较大，为提高瞬态响应性，减少 PM 排放，应尽量减小增压器转动惯量，并在满足排放要求的前提下适当减小涡端流量大小；
3. 发动机烟度限制标定 MAP 对瞬态急加载过程影响较大，若烟度排放有余量，可适当放宽 λ 限值，以提高瞬态动力响应性；
4. 基于 DIPULSE 预测模型，可以实现不同配置的发动机典型工况瞬态性能预测，对其经济性进行对比评估。

另外，基于搭建 DIPULSE 预测模型，可以实现与 MATLAB/SIMULINK 的联合仿真，从而方便地进行 ECU 不同控制 MAP 的虚拟标定，尤其是包含 VGT、EGR、TVA 等部件的复杂控制系统，同时也可以用于高低压 EGR、两级增压、相继增压等技术的应用研究及控制策略开发与验证。

7 参考文献

- [1] 刘忠长, 孙士杰, 田径, 徐瑞辰, 汪泊舟. 瞬态工况下喷油参数对柴油机排放及燃烧特性的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(06): 1639-1646.
- [2] 施新, 张双双, 李斌. 可变几何涡轮与压气机协同调节对柴油机瞬态性能影响的仿真研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(09): 1046-1050.
- [3] 张斌, 吴淑梅, 韩峰, 李万洋. 联合 GT 及 Matlab 的柴油机虚拟标定[J]. 内燃机工程, 2017, 38(04): 139-142+150.
- [4] 庄继晖, 谢辉, 朱仲文. 基于模型的电控柴油机自动标定平台的开发[J]. 汽车工程, 2013, 35(07): 624-628.
- [5] GT-SUITE 帮助文档.