

# 天然气发动机瞬态过程及整车使用工况研究

## Research on Transient Process of Natural Gas Engine and Operating Condition of Vehicle

马义 宋涛 史艳彬 李红洲

中国第一汽车股份有限公司技术中心，长春 130011

**摘要:**为了研究天然气发动机瞬态过程,用 GT-SUITE 软件建立了天然气发动机瞬态模型,并用台架稳态试验测量数据和整车瞬态试验测量数据对计算模型进行校正。计算结果表明,燃气系统响应越慢,节气门开度变化速率越快,瞬态过程 Lambda 偏差越大;防喘振阀能有效平衡压气机前后压力,避免压气机喘振,但会影响整车加速响应;不同整车运行条件下,天然气发动机常用工况区域会发生改变,运用仿真手段可以找到发动机常用工况区域并进行优化,实现发动机性能及可靠性提升的同时满足整车性能要求。

**关键词:**天然气发动机; 瞬态响应; 喘振; C-WTVC

**Abstract:** In order to study transient process of natural gas engine, transient simulation model of natural gas engine was established by GT-SUITE, the calculation model was validated according to engine steady test measurement data as well as vehicle transient test measurement data. Calculation results show larger response time of fuel system and faster changed rate of throttle valve angle cause the increase of Lambda deviation during transient process. Surge valve can effectively balance the pressure before and after of compressor in order to avoid surge occurrence, which however is limited by vehicle acceleration response. The natural gas engine operating condition of common area will change along with variant vehicle running condition, natural gas engine operating condition of common area can be discovered and optimized by means of simulation method, which improve engine performance and reliability at the same time meeting vehicle performance requirement.

**Key words:** Natural gas engine; Transient response; Surge; C-WTVC

### 1 前言

随着排放法规的日趋严格,发动机的瞬态过程引起人们越来越多的关注,国外的整车和发动机厂家很早就开始了发动机瞬态过程的研究,许多研究成果已经开始应用于发动机的生产<sup>[1]</sup>。天然气发动机的研究是近年来国内外发动机行业的热点研究问题<sup>[2-5]</sup>,目前中重型天然气发动机一般以柴油机现有的结构为基础,更换燃气系统及控制系统进行开发,其燃料调节方式为量调节<sup>[6-7]</sup>。天然气发动机瞬态与稳态工况差异性较大,主要集中在燃气系统响应性,过渡工况标定策略等,研究天然气发动机瞬态过程可以评价发动机性能开发方案对整车性能的影响,从而做到基于整车性能要求的发动

机性能的正向开发<sup>[8]</sup>。本文利用 GT-SUITE 软件建立了天然气发动机整车瞬态模型，对燃气系统响应性、防喘振阀的影响及整车 C-WTVC（修正世界重型商用车瞬态循环）<sup>[9]</sup>下发动机运行特性进行了研究。

## 2 计算模型

### 2.1 模型建立

如图 1，利用 GT-SUITE 软件建立某款天然气发动机的一维热力学详细计算模型，并加入整车及相应的控制模块，形成瞬态计算模型。模型输入各种与发动机转速和负荷相关的参数 Map，如 Lambda、进气压力、摩擦功等。缸内燃烧数据是将各个工况点稳态试验所测放热率用韦伯函数进行拟合，形成韦伯参数随发动机转速和负荷变化的 Map，在瞬态过程中相邻工况点进行插值。进气温度与车速和空气流量相关，管路壁面温度对瞬态过程影响较小，可以设为定值。以往整车计算模型只将发动机作为动力模块输入相关油耗和摩擦功 Map 进行反向查表不同，该计算模型充分考虑瞬态过程中，由增压器放气阀或节气门开度变动引起气流压力波变化对发动机空燃比及性能的影响，发动机及整车相关参数见表 1。

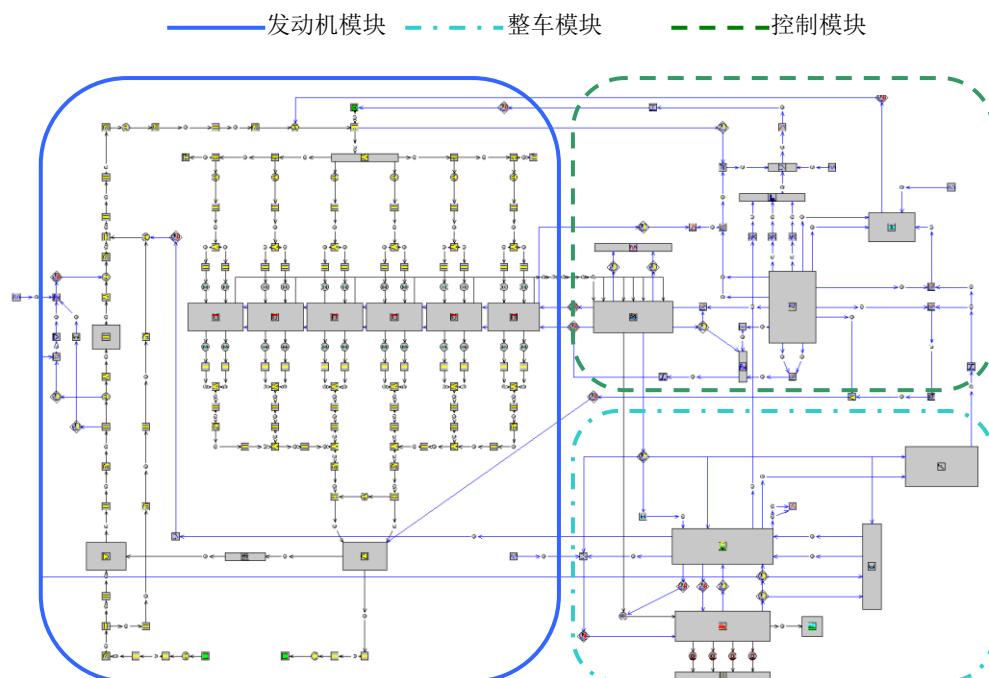


图 1 瞬态计算模型

表 1 发动机及整车参数

发动机参数		整车参数	
排量 (L)	11.05	总质量 (kg)	50000/30000 (满载/半载)
供气方式	单点喷射	迎风面积 (m <sup>2</sup> )	9
额定转速 (r/min)	1900	主减速比	4.682/4.111 (大/小)

额定功率 (kW)	276	变速箱	12TAX160M
--------------	-----	-----	-----------

## 2.2 模型校正

图 2 是对稳态试验测量的 54 个工况点分别进行模型校正, 这些工况点基本覆盖了发动机大部分工作区域, 使得模型能充分的反映发动机的稳态运行工况特性, 稳态计算结果与试验基本吻合。图 3 为整车满载 7 档加速过程模型校正结果, 可以看出整车油门、发动机转速及车速计算结果与试验值对应较好, Lambda 即空燃比误差较大, 这是由于模型里面发动机在变工况下增压器放气阀和节气门开度控制与实际发动机控制存在差异, 另外发动机实际变工况时 Lambda、点火角会进行温度湿度修正, 这也使得计算误差变大, 但在趋势上与试验结果基本一致。稳态模拟结果与实测结果误差在 5% 以内, 瞬态模拟结果与实测结果误差在 15% 以内, 表明该模型可以用于瞬态过程预测分析。

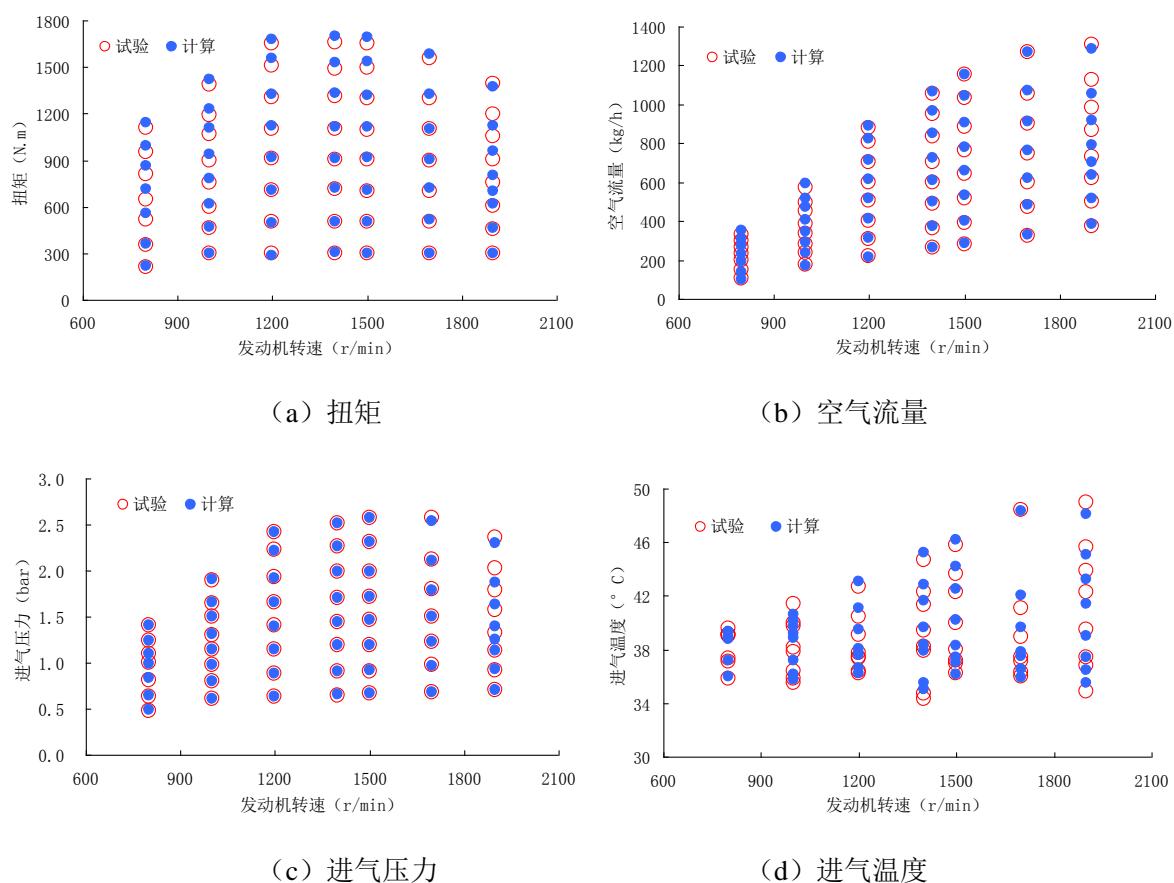
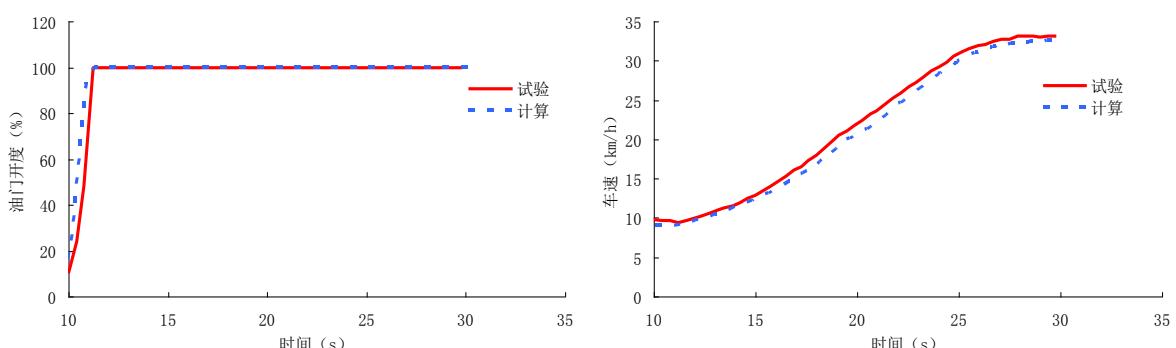


图 2 发动机稳态模型校正



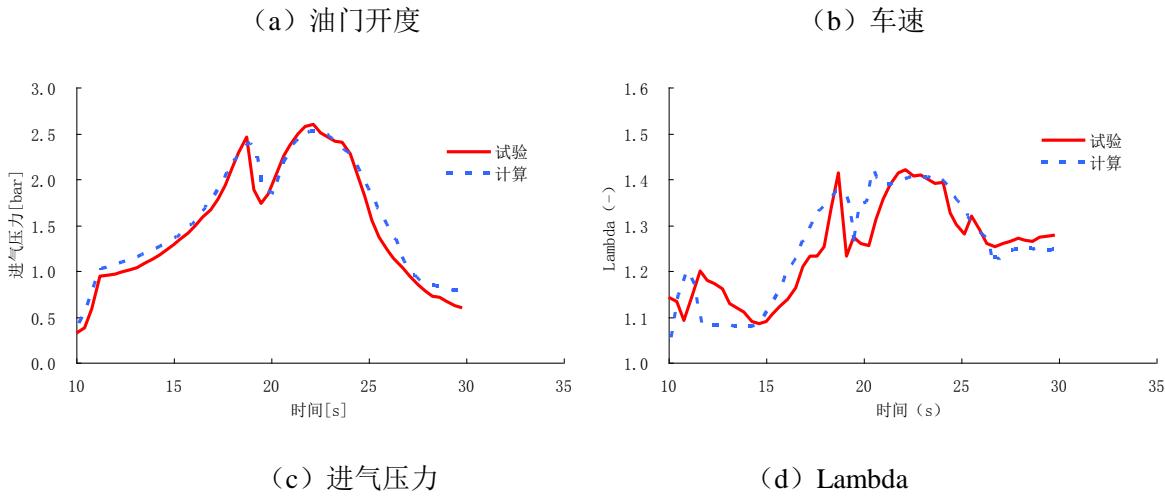


图 3 整车瞬态模型校正

### 3 计算结果

#### 3.1 燃气系统响应性分析

天然气发动机开发难点在于瞬态空燃比控制，其中燃气系统响应性直接决定了变工况尤其是急加减速工况中燃气跟随性，过浓过稀都会影响燃烧稳定性。图 4 为整车满载 7 档加速时不同燃气系统响应时间下 Lambda 波动变化对比，当燃气系统响应时间为 0.05s、0.10s 和 0.20s 时，加速初期（10s）实际 Lambda 与目标值的最大偏差分别为 5%、12% 和 25%；加速中期（20s）实际 Lambda 与目标值的最大偏差分别为 4%、8% 和 15%；加速末期（27s）实际 Lambda 与目标值的最大偏差分别为 2%、4% 和 9%。可以看出，燃气系统响应越慢，加速过程中 Lambda 偏差越大；相同燃气系统响应时间下，节气门开度变化速率越快，Lambda 偏差越大。因此提高燃气系统响应速度和适当减小节气门开度变化速率可以大大减小 Lambda 偏差，提高瞬态燃烧稳定性。

采用单点喷射系统的天然气发动机是利用混合器促进天然气与空气的混合，增加混合器出口至进气总管末端容积可以延长天然气与空气的混合时间，进一步提升混合均匀性。为了验证混合管路容积对整车瞬态的影响，采用油门全开 1 档起步连续换挡加速至 50km/h，对比不同燃气混合管路容积所需的时间，从图 5 可以看出，将容积由 2L 增加到 4L，加速时间只增加了 0.15s，对整个加速过程影响不大。

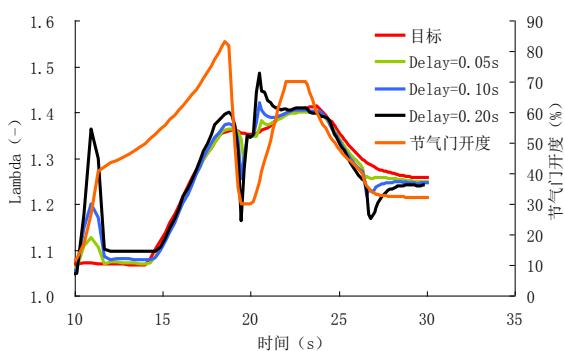


图 4 燃气系统响应时间的影响

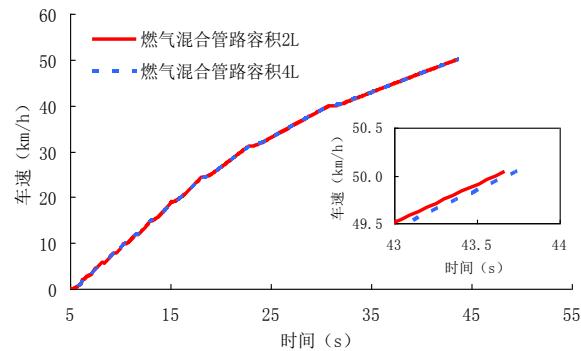


图 5 燃气混合管路容积的影响

#### 3.2 防喘振阀影响分析

天然气发动机防喘振阀的作用是当发动机变工况节气门突然关闭时，通过喘振阀通气软管将节气门后的低压压力传递到防喘振阀的压力反馈接头上，打开防喘振阀单向截止膜片，使增压器压气机前后压力平衡，避免增压器喘振，保护增压器。

图 6 为不带与带防喘振阀整车 1 档起步连续换挡加速至 50km/h 对比，从图 6 可以看出，防喘振阀直径为 28mm 的整车加速时间比不带防喘振阀增加了 4s。由图还可以看出，在换挡过程中，油门突然松开而节气门瞬间关闭，不带防喘振阀时，压气机压比突然升高，压气机转速下降较少，同时流量下降明显，喘振风险增加；带防喘振阀时，压气机压比及转速下降明显，而流量下降较少，喘振风险降低。图 7 为发动机与增压器联合运行特性，蓝色实线为发动机外特性运行线，黑色圆点为发动机瞬态工况点的分布。由图可以看出，不带防喘振阀时，发动机部分工况点在瞬态过程中会运行在压气机喘振线之外，发生了喘振；带防喘振阀时，发动机所有工况点都运行在压气机喘振线以内，没有发生喘振。

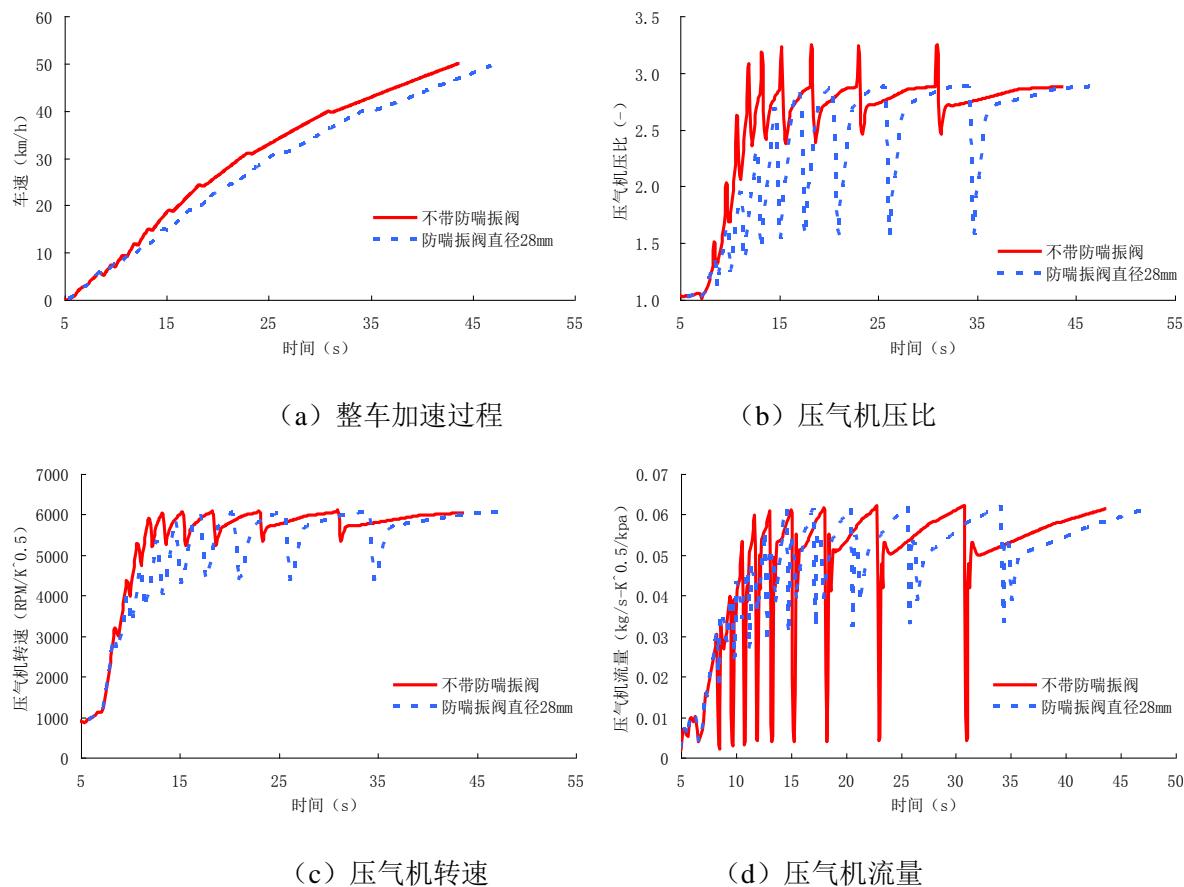


图 6 防喘振阀对瞬态过程的影响

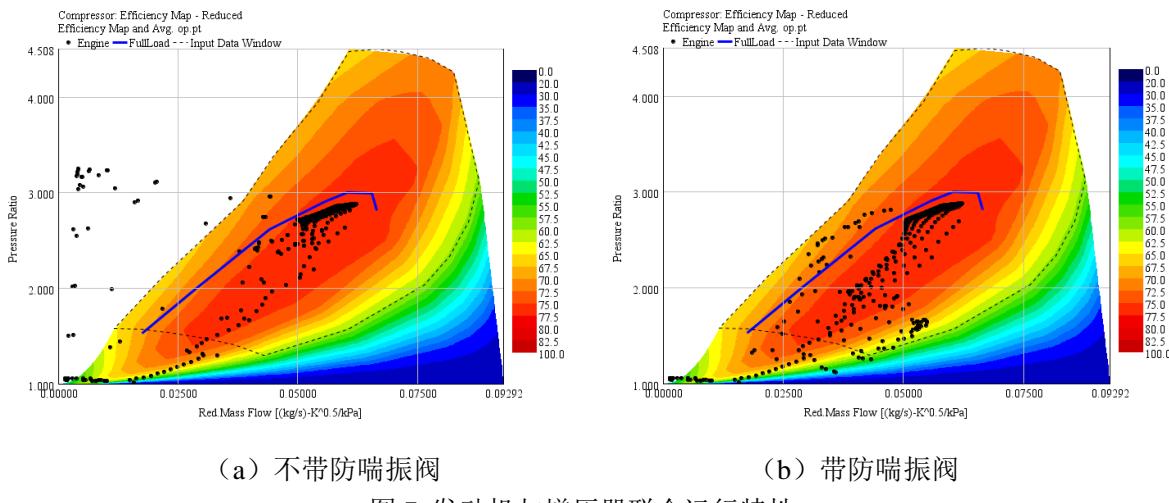


图 7 发动机与增压器联合运行特性

### 3.3 整车 C-WTVC 循环分析

GB/T 27840-2011《重型商用车辆燃料消耗量测量方法》定义的C-WTVC循环，能较好反映目前国内重型商用车运行工况的特点。利用搭建的整车瞬态模型进行了三次C-WTVC整车循环计算，使用相同的换挡策略，主要研究不同载荷和不同主减速比条件下，发动机运行工况点分布情况。

表 2 为 C-WTVC 循环计算参数, 图 8 为车速计算结果, 从表 2 和图 8 可以看出三次计算的运行距离及平均车速偏差小于 2%, 大部分工况车速跟随性较好, 偏差均满足  $\pm 3\text{km/h}$  的要求, 但在 1500s 附近满载时的偏差达到  $5\text{km/h}$ , 这并不影响整个循环下的发动机总体运行特性。

图 9 为三次整车循环计算的发动机运行工况分布对比, 计算 1 结果表明, 天然气发动机常用工况主要集中在中高转速和中高负荷, 此区域发动机热负荷较高, 需要适当加大空燃比, 并在瞬态过程中严格控制空燃比, 同时保证各缸均匀性; 计算 1 与计算 2 结果表明, 当整车采用小速比时, 发动机常用工况会向低速大负荷区域移动, 此区域发动机气耗较低, 有利于提高整车燃气经济性, 但由于负荷增大导致爆震风险增加, 若采用小速比, 此区域爆震余量需要进一步加大; 计算 1 与计算 3 结果表明, 整车载荷变小时, 发动机常用工况会向低负荷区域移动, 热负荷较低, 爆震风险减小, 有利于提升发动机可靠性水平。因此, 运用仿真手段找到不同整车运行条件下发动机常用工况分布区域, 针对这些区域对发动机性能进行优化, 从而实现发动机性能及可靠性水平提升的同时满足整车性能要求。

表 2 C-WTVC 循环计算参数

项目	载荷	主减速比	运行距离 (km)	平均速度 (km/h)
C-WTVC	-	-	20.510	40.997
计算 1	满载	大	20.145	40.282
计算 2	满载	小	20.150	40.295
计算 3	半载	大	20.445	40.885

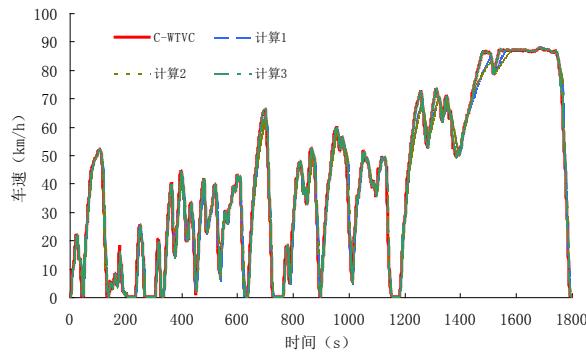


图 8 C-WTVC 车速计算结果

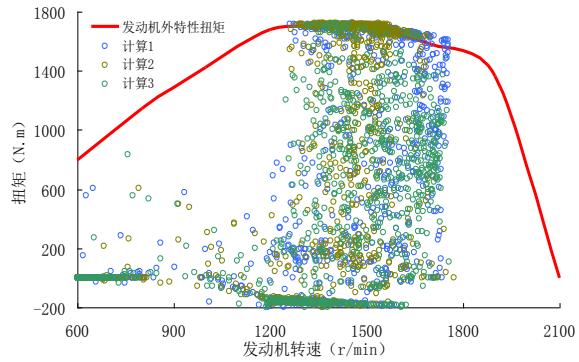


图 9 C-WTVC 下发动机运行工况分布

## 四、结论

1. 天然气发动机燃气系统响应速度和节气门开度变化快慢对瞬态 Lambda 偏差影响较大，提高燃气系统响应速度和适当减小节气门开度变化速率可以大大减小 Lambda 偏差，提高瞬态燃烧稳定性，适当增加燃气混合管路的容积对整车加速响应影响较小；
2. 节气门突然关闭时，防喘振阀可以平衡压气机前后压力，有效避免压气机喘振，但会影响整车加速响应，下一步需要优化防喘振阀直径来权衡压气机喘振保护与整车加速响应；
3. 天然气发动机常用工况主要集中在中高转速和中高负荷，当整车采用小速比时，发动机常用工况会向低速大负荷区域移动，整车载荷变小时，发动机常用工况会向低负荷区域移动。运用仿真手段找到不同整车运行条件下发动机常用工况分布区域，针对这些区域对发动机性能进行优化，从而实现发动机性能及可靠性水平提升的同时满足整车性能要求。

## 参考文献：

- [1] Ivan Arsie, Ivan Criscuolo and Luigi De Simio. Optimization of Control Parameters for a Heavy-Duty CNG Engine via Co-Simulation Analysis [C]. SAE Paper 2011-01-0704, 2011.
- [2] 张坤鹏. 满足国 V 排放的天然气发动机开发 [D]. 天津：天津大学, 2011.
- [3] George Karavalakis, Maryam Hajbabaei and Thomas Durbin. Influence of Different Natural Gas Blends on the Regulated Emissions, Particle Number and Size Distribution Emissions from a Refuse Hauler Truck [C]. SAE Paper 2012-01-1583, 2012.
- [4] Marco Chiodi, Alessandro Ferrari and Oliver Mack. Improvement of a High-Performance CNG-Engine based on an innovative Virtual Development Process [C]. SAE Paper 2011-24-0140, 2011.
- [5] Mirko Baratta, Stefano D'Ambrosio and Daniela Anna Misul. Performance and Emissions of a Turbocharged Spark Ignition Engine Fuelled with CNG and CNG/Hydrogen Blends [C]. SAE Paper 2013-01-0866, 2013.
- [6] 余小草, 刘忠长, 王忠恕. 不同稀释方式降低天然气发动机 NOx 排放的研究 [J]. 内燃机工程, 2012, 33(6): 22-27.
- [7] 窦慧莉, 刘忠长, 李 骏. 电控喷射稀燃天然气发动机的开发 [J]. 内燃机学报, 2007, 25(2): 137-143.
- [8] 郑广勇. 基于整车性能要求的 CA4DD 系列柴油机性能设计及开发 [D]. 长春：吉林大学, 2013.
- [9] GB/T 27840-2011《重型商用车辆燃料消耗量测量方法》.