

# 基于 GT-SUITE 软件的整车油耗预测仿真研究

## A simulation study of vehicle fuel consumption prediction based on GT-SUITE software

孙丹 王晓艳 贾德民 侯建军 吕晓惠  
潍柴动力股份有限公司

**摘要:** 本文基于 GT-SUITE 软件, 通过发动机稳态模型建立, 发动机预测模型和瞬态模型验证, 建立发动机模型与整车动力总成耦合模型。整车耦合模型在 C-WTVC 循环工况下对整车油耗进行预测, 并将预测值与试验值进行对比分析。

**关键词:** 发动机模型与整车耦合; 整车油耗预测; C-WTVC 循环; GT-SUITE

**Abstract:** Based on GT-SUITE software, this paper established the coupling model between the engine model and the vehicle powertrain by establishing the steady-state model, and verification of engine prediction model and transient model. The vehicle coupling model predicted the fuel consumption of the vehicle under the C-WTVC cycle condition, and the predicted value was compared with the test value.

**Key words:** The engine model is coupled with the vehicle; Vehicle fuel consumption prediction; C-WTVC cycle; GT-SUITE

### 1. 背景

燃油经济性和排放性能一直以来是发动机研究的两大主题。近年来, 随着能源紧缺和环境污染问题日益严重, 各国提倡节能减排, 排放标准也不断加严。追逐最大燃油经济性是发动机研究开发的目标之一, 尤其是当今汽车行业竞争日趋激烈。

汽车燃油经济性能的优劣, 很大程度上取决于动力传动系统匹配的合理程度<sup>[1]</sup>。采用整车循环工况仿真方法优化汽车的动力传动系统匹配, 预测整车的燃油经济性, 具有开发成本低、开发周期短的优点。目前, 整车循环工况仿真计算模式一般包括<sup>[2]</sup>: (1) 发动机试验稳态特性场-整车循环工况计算; (2) 发动机稳态工况点工作过程计算-整车循环工况计算; (3) 发动机稳态工况点工作过程计算(瞬态验证)-整车循环工况计算; (4) 发动机动态工作过程计算-整车循环工况计算。其中, 模式(1)是最传统和最常用的计算方式, 模式(4)计算复杂, 计算难度高, 一般不常用。

本文采用发动机稳态工况点工作过程计算(瞬态验证)-整车循环工况仿真计算模式, 在发动机预测模型和瞬态模型验证基础上建立整车耦合模型, 然后在 C-WTVC 循环工况下对整车油耗进行预测, 并与试验值进行对比分析, 从而为发动机及整车的开发过程提供一种有效仿真方法。

### 2. 模型建立及验证

本文选择的发动机为潍柴某型号发动机, 其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 发动机主要技术参数

参数名称	发动机
气缸	六缸直列式

额定转速/ (r/min)	1900
额定功率/Kw	316
最大扭矩/ (N m)	2060
缸径/mm	126
行程/mm	155
排量/L	12

## 2.1 发动机稳态模型的预测验证

利用 GT-POWER 建立详细的发动机稳态模型,如图 1 所示。发动机模型包括气缸模块、曲轴箱(机体)模块、增压器模块、中冷器模块和 ECU 控制模块。

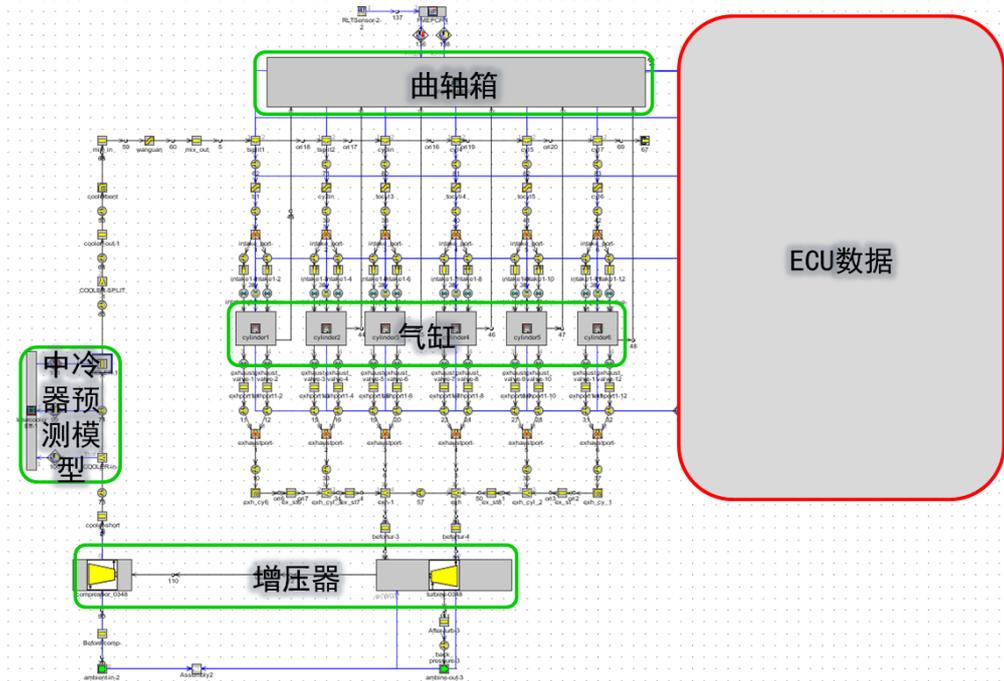


图 1 发动机稳态模型

本文发动机稳态模型的预测验证包括 DIpulse 预测模型验证、FMEP 预测模型验证和全模型验证。

**DIpulse 预测模型验证:**

采用 GT-power 和 ModeFrontier 软件耦合优化计算,主要分析爆压值和燃烧率 RMS 的误差分析,主要确定卷吸系数和扩散系数参数,一般需要分区标定:高速高负荷区、高速低负荷区、低速高负荷区、低速低负荷区。

表 2 为 DIpulse 预测模型的仿真计算结果。由表得出,从缸压数据分析结果看,低速一致性较差;总体来说,误差均在允许范围内,计算值均能满足要求。

表 2 仿真结果

转速 [r/min]	扭矩[Nm]	Improved Burn Rate RMS Error (Meas vs Pred)	缸压偏差 [%]	转速 [r/min]	扭矩[Nm]	Improved Burn Rate RMS Error (Meas vs Pred)	缸压偏差 [%]
数值范围		<5%	<5%	数值范围		<5%	<5%
1900	1701	0.2%	0.9%	1200	2156	0.3%	0.25
1900	1600	0.2%	1.6%	1200	2000	0.3%	-3.63
1900	1200	0.3%	0.0%	1200	1600	0.3%	-1.77
1900	800	0.4%	-0.8%	1200	1200	0.5%	-3.12
1900	400	0.6%	-1.1%	1200	800	0.8%	-1.29
1600	1971	0.2%	0.6%	1201	400	0.8%	-1.35
1600	1600	0.2%	2.7%	1000	2210	0.5%	1.06
1600	1199	0.3%	0.0%	1000	2000	0.4%	0.91
1600	800	0.5%	-0.7%	1000	1600	0.5%	1.65
1600	400	0.8%	0.2%	1000	1200	0.8%	-2.34
1400	2160	0.2%	-1.2%	1000	800	1.3%	-0.03
1400	2000	0.2%	-1.3%	1001	399	1.4%	1.03
1400	1599	0.3%	-1.8%	800	1470	0.8%	4.67
1400	1200	0.5%	-0.7%	800	1200	1.0%	3.32
1400	800	0.6%	1.1%	801	800	1.7%	0.20
1400	400	1.0%	-0.6%	801	400	1.8%	-0.13

FMEP 预测模型验证:

在 GT 模型中, FMEP 采用 Chen-Flynn Engine Friction Model 模型, 计算公式为式 (1), 其中需要确定 A、B、C 三个参数, 理论上可以采用油耗线法、倒拖法和示功图法三种方法中的任意一种求出 A、B、C 三个参数, 实际模型确定过程中传热很难标定, 所以确定整个模型时, 会把一部分误差项累积到 FMEP 上。

$$FMEP = FMEP_{Const} + A * P_{cylmax} + B * c_{p,m} + C * c_{p,m}^2 \quad (1)$$

式中:  $FMEP_{Const}$ —FMEP 常数项;

A—缸内爆压系数;

B—活塞平均速度系数;

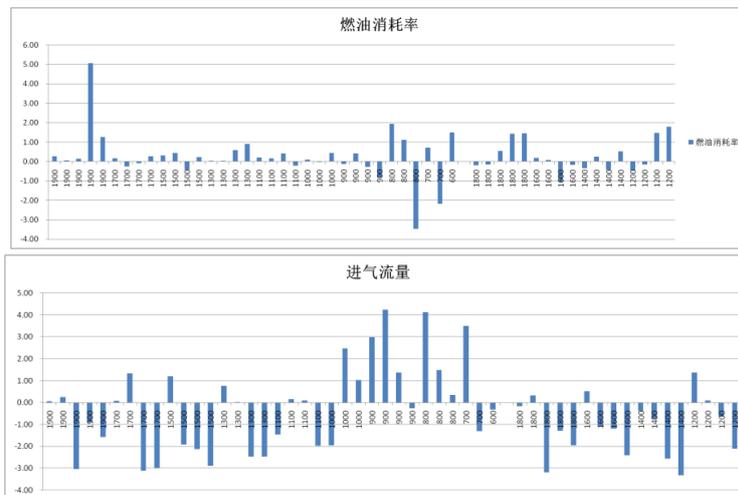
C—活塞平均速度平方系数;

$c_{p,m}$ —平均速度。

全模型验证:

带入增压器模型后, 因试验值和计算值差异较大, 所以采用自动标定模型, 增压器参数主要对涡轮机的效率和流量进行修正, 压气机参数不变。

图 2 为计算参数误差分析图。根据图 2 得出, 燃油消耗率、进气流量、爆发压力等参数的误差均在 5% 以内, 但涡前状态偏差较大。



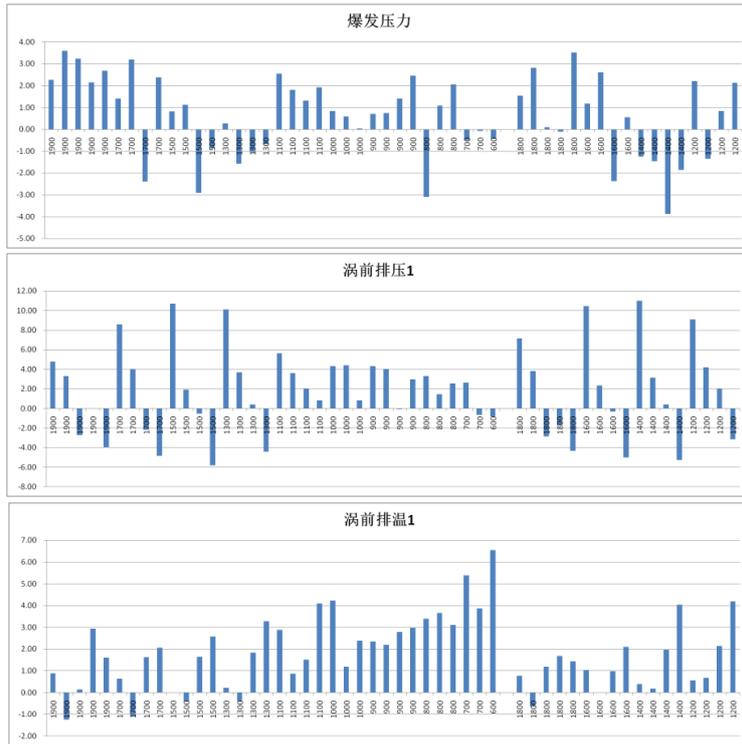


图 2 计算参数误差分析

## 2.2 发动机瞬态模型验证

发动机瞬态模型如图 3 所示。发动机瞬态模型通过超越加速工况模拟和负荷阶跃模拟来验证。超越加速工况模拟用于标定发动机的转动惯量，负荷阶跃模拟用于标定增压器转动惯量。

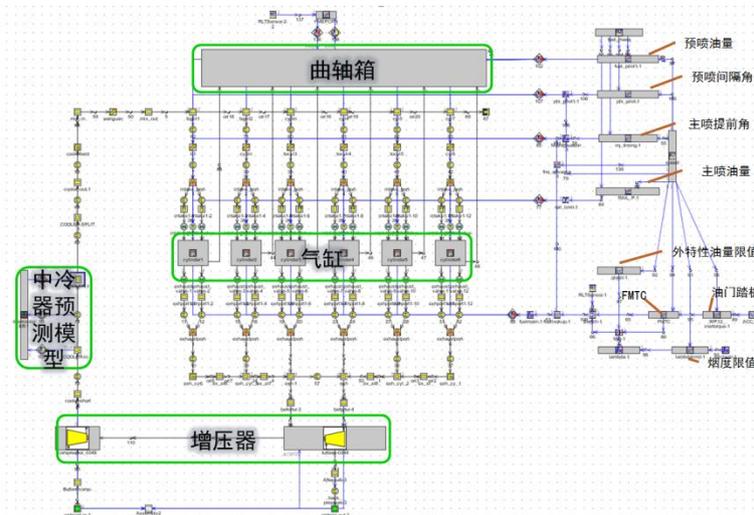


图 3 发动机瞬态模型

超越加速工况模拟：12 档，突加油门。图 4 为超越加速工况模拟计算值与试验值对比。由图 4 可以看出，转速、扭矩和油耗量的模拟计算值均与试验值相吻合，说明发动机的转动惯量标定符合要求，模型计算精度高。

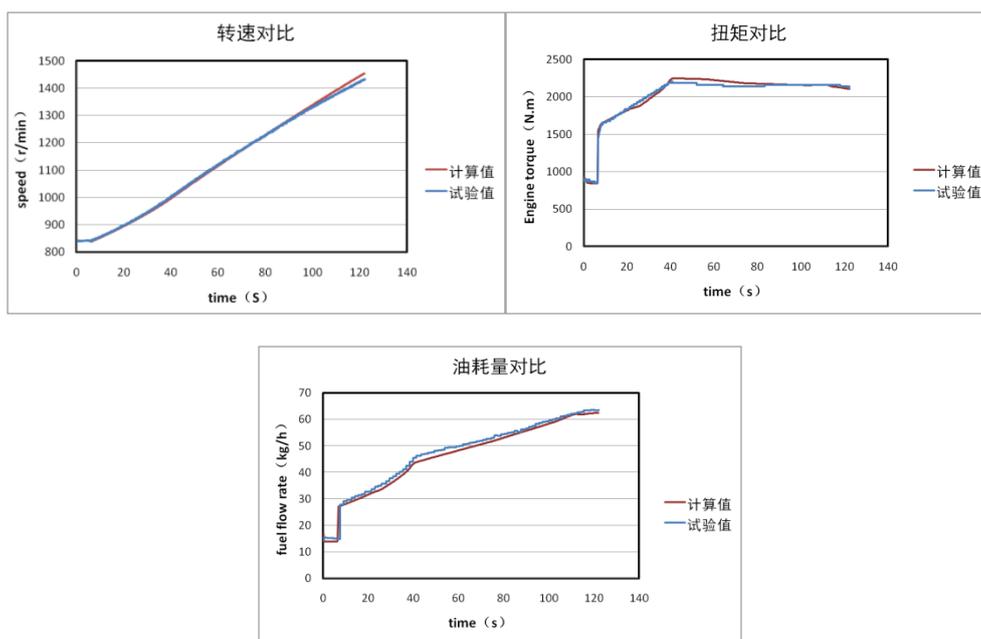


图 4 超越加速工况模拟计算值与试验值对比

负荷阶跃模拟：1200r/min，油门位置 10%-100%。图 5 为负荷阶跃模拟计算值与试验值对比。由图 5 可以看出，负荷阶跃、循环喷油量和进气流量的模拟计算值均与试验值相吻合，说明增压器的转动惯量标定符合要求，模型计算精度高。

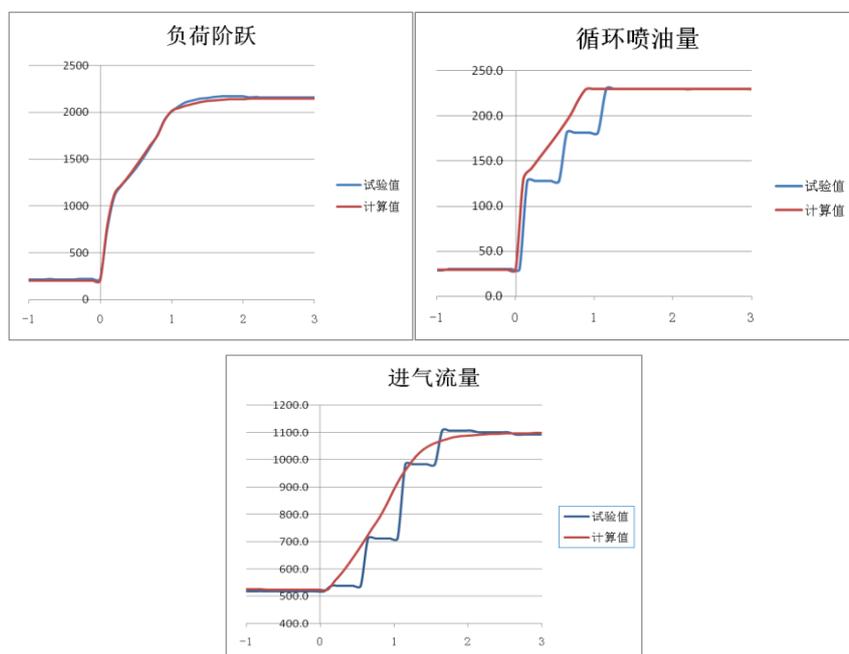


图 5 负荷阶跃模拟计算值与试验值对比

### 3. 发动机模型与整车动力总成耦合及整车油耗预测

#### 3.1 发动机模型与整车动力总成耦合

在 GT-DRIVE 仿真模型基础上，建立了详细发动机模型的耦合整车模型，如图 6 所示。该耦合整车模型是一种正向动力学模型，以整车经济性预测为研究内容，它根据用户输入的

发动机油门踏板信号、制动器动作等，使得车辆按所需目标运行，实际上就是由驾驶员直接控制车辆即所说的开车。本文是使得车辆按 C-WTVC 驾驶循环行驶。模型输入主要参数包括传动系统参数和整车参数，其中传动系统参数包括各档位传动比、各档位传动效率、变速器惯量、主减速比、主减速器效率、驱动桥惯量、车轮滚动半径、车轴（含车轮）惯量，整车参数包括整备质量、最大总质量、行驶阻力（风阻系数、迎风面积、滚阻系数）等。

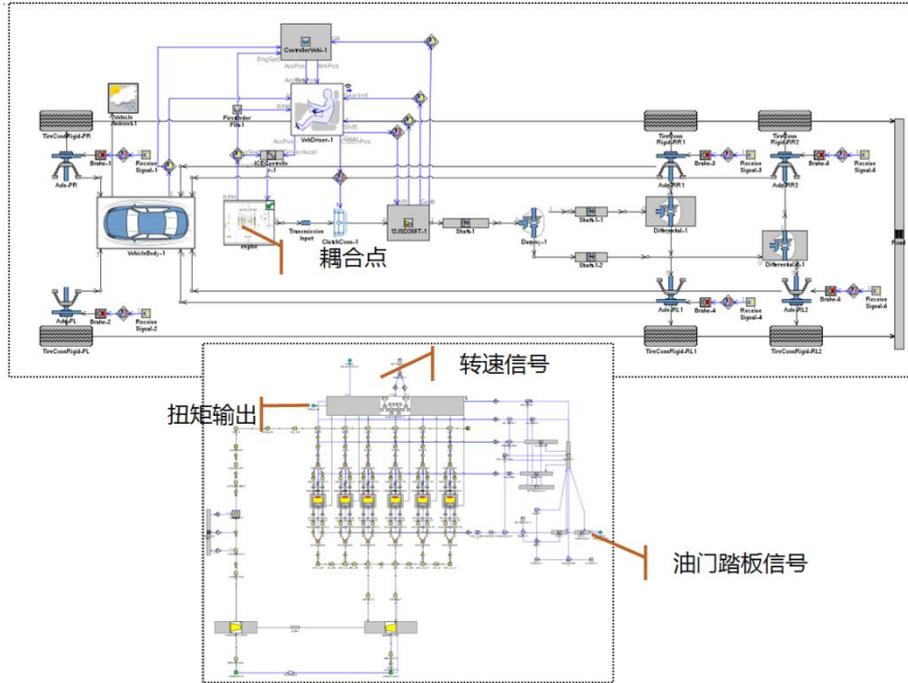


图 6 发动机与整车耦合模型

### 3.2 整车油耗预测

在仿真中按照 C-WTVC 循环工况进行计算。GB/T27840-2011《重型商用车辆燃料消耗量测量方法》中规定 C-WTVC 循环 1800s<sup>[3]</sup>，由市区、公路、高速 3 部分工况循环组成，各个部分的时间长度分别为 900s、438s、462s。为了更好地预测重型商用车在长途运输中的燃料消耗量，本文在仿真计算中截取了部分 C-WTVC 循环工况，即 0~438s 为公路路段，439~900s 为高速公路路段，如图 7 所示。

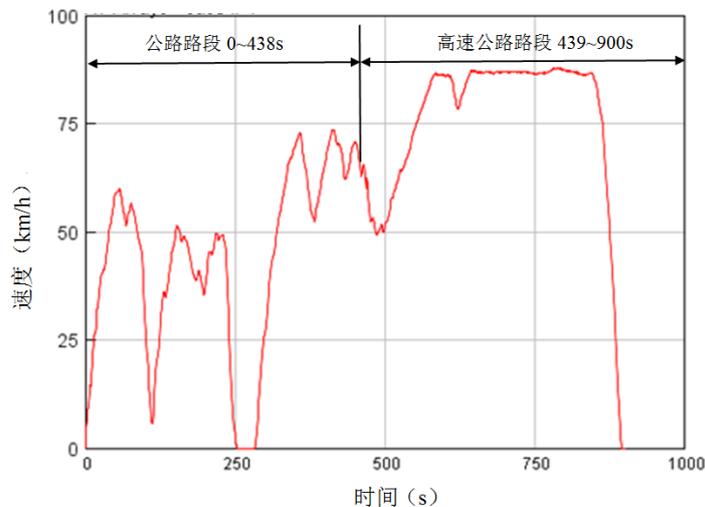


图 7 C-WTVC 循环工况

通过计算，得到整个循环过程中的百公里油耗值为 48.4L/100km。模型仿真计算所得到的百公里油耗与试验值对比如表 3。其中，计算模型配置为老增压器，试验用配置为新增压器。由表 3 得出，模型所计算的百公里油耗值偏大。

表 3 仿真计算所得到的百公里油耗与试验值对比

	百公里油耗 (L/100km)	配置
仿真计算	48.4	老增压器
试验	44.4	新增压器

计算值和试验值偏差较大，主要是由于试验采用发动机配置与模拟采用发动机配置不同，导致利用运动学计算模式时发动机的需求转速、扭矩和试验值存在较大差异，油耗预测偏差较大。发动机转速、扭矩的计算值与试验值对比如图 8、图 9。

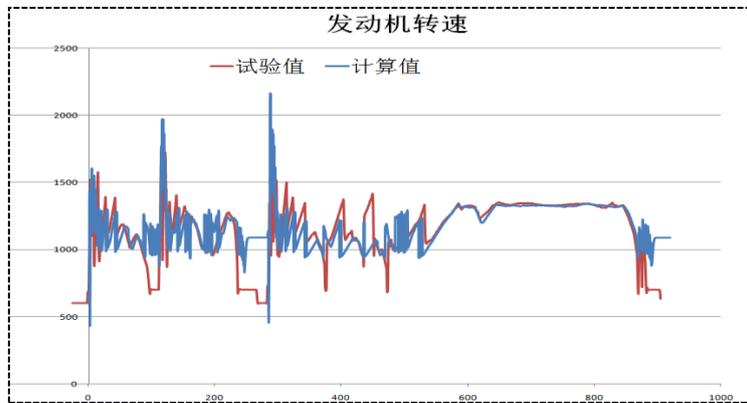


图 8 C-WTVC 循环工况下发动机转速计算值与试验值对比

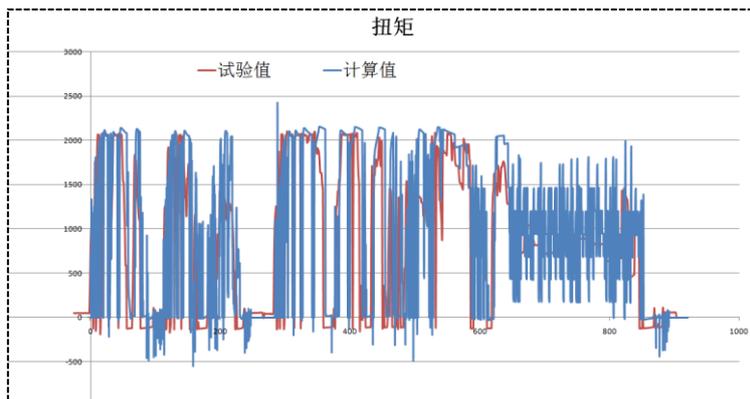


图 9 C-WTVC 循环工况下扭矩计算值与试验值对比

## 4. 总结

本文基于 GT-SUITE 软件，采用发动机稳态工况点工作过程计算（瞬态验证）-整车循环工况仿真计算模式，首先验证了耦合模型的可行性，然后在 C-WTVC 循环工况下对整车油耗进行预测，并与试验值进行对比分析，得出结论如下：

- (1) 发动机瞬态模型可以实现负荷阶跃、超越加速、输入转速和油门踏板信号的实际道

路模拟，从而得出发动机和整车模型耦合是可行的；

- (2) 由于影响因素较多，该仿真方法用于预测整车油耗目前还不太精确，需要进一步完善模型，以提高计算准确性；
- (3) 文中对于预测整车油耗目前没有合适的试验数据相匹配，因此为进一步完善模型，还需要进行相关试验。

## 5 参考文献

- [1] 邓阳庆, 王登峰, 王建华等. 面向用户的重型自卸车节油研究[J]. 吉林大学学报, 2009(39):74-77.
- [2] 高懿, 倪计民, 袁益禧. 涡轮增压乘用车循环油耗瞬态仿真与评估[J]. 设计研究, 2013: 25-28.
- [3] GB/T27840-2011 《重型商用车辆燃料消耗量测量方法》.