

基于 GT-Suite 的 WLTC 工况油耗敏感性分析

Sensitivity analysis of WLTC Fuel Consumption Based on GT-Suite

沈宏丽 郑广勇 杜炜 张寿凤 曾 浩

(重庆长安汽车股份有限公司动力研究院, 重庆 401120)

摘 要: 利用 GT-Suite 软件对 WLTC (World wide Light-duty Test Cycle) 工况油耗进行参数敏感性分析, 校核仿真模型, 验证结果的准确度, 研究输入参数的变化对综合工况油耗的影响, 结论如下: 整备质量变化 5%, WLTC 工况燃油消耗变化约 1.2%; 整车阻力变化 6%, WLTC 工况燃油消耗变化约 1.0%; 主减速比变化 10%, WLTC 工况油耗变化 0.8% 左右; 传动效率变化 2%, WLTC 工况油耗变化 2%。将研究成果应用于项目, 达成降油耗 0.43 L/100km 的目标。

关键词: GT-Suite; WLTC; 参数敏感性; 降油耗

Abstract: GT-Suite is used to analyze WLTC (World wide Light-duty Test Cycle) by performing parameter sensitivity analysis, Check the simulation model and verify the accuracy of the results, and to study the influence of input parameters on fuel consumption in the working condition. Analysis of fuel consumption by observing most changes of vehicle input. Conclusions are as follows: The change of WLTC fuel consumption was about 1.2% when change in trim quality by 5%. Vehicle resistance change 6%, WLTC fuel consumption change about 1%. The final ratio changes by 10%, the WLTC fuel consumption changes by about 0.8%. The transmission efficiency changes by 2%, WLTC fuel consumption change about 2%. The conclusion is applied to the project to achieve fuel consumption reduction the target of 0.43L/100km.

Key words: GT-Suite; WLTC; parameter sensitivity analysis; fuel consumption reduction

1. 前言

根据工信部最新报告《乘用车燃油消耗量限值》和《乘用车燃油消耗量评价方法及指标》, 中国油耗测试标准于 2021 年 1 月将正式切换为 WLTC 循环工况^[1], NEDC 循环工况将被淘汰, 研究 WLTC 工况的特点变得势在必行。

GT-Suite 是一款由美国 Gamma Technologies 公司开发的汽车仿真分析系列套装软件。主要应用于车辆设计、参数分析、各种行驶情况下耗油量和噪声的计算, 在汽车开发前期, 应用仿真软件分析, 对研发过程快速反应, 有助于精准解决问题, 降本增效。开发某项目过程中, 发现某车型 WLTC 工况油耗较高, 为达到油耗目标要求, 本文应用 GT-Suite 软件对影响 WLTC 工况油耗的输入参数进行敏感性分析, 对此车型实施降油耗方案, 使油耗总体降低 0.43L/100km, 为项目的推进与开发提供了很好的思路和借鉴。

2. 仿真过程

2.1 仿真模型的建立和校正

为了保证参数敏感性研究的准确度，需要先对仿真准确度进行验证。某车型参数配置见下表：

表 2 车型配置

A 车型	整车配置
整车参数	5 门 MPV，基准质量：1440kg
发动机	4 缸 1.5 升自然吸气发动机，额定功率：78kW 最大扭矩：125N.m
变速器	5MT
轮胎型号	205/65R16

应用 GT-Suite 建立如图 2 所示的整车仿真模型，模型包含整车、发动机、变速器、车轮等模块。

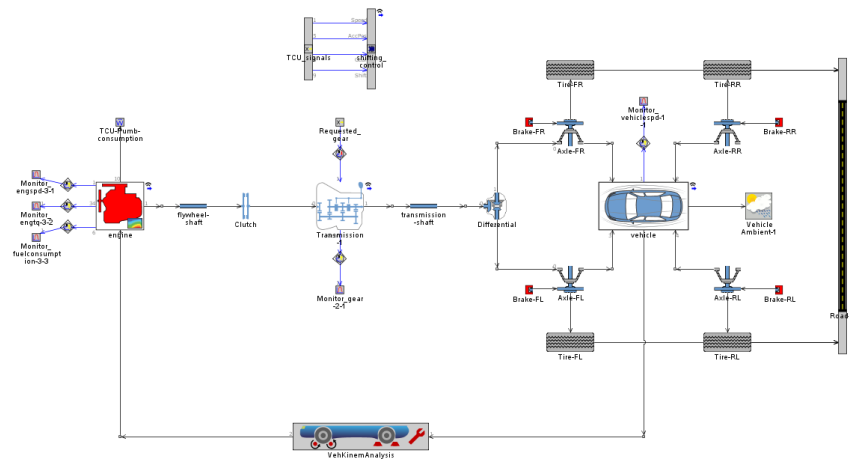


图 2 应用 GT-Suite 建立的仿真分析模型

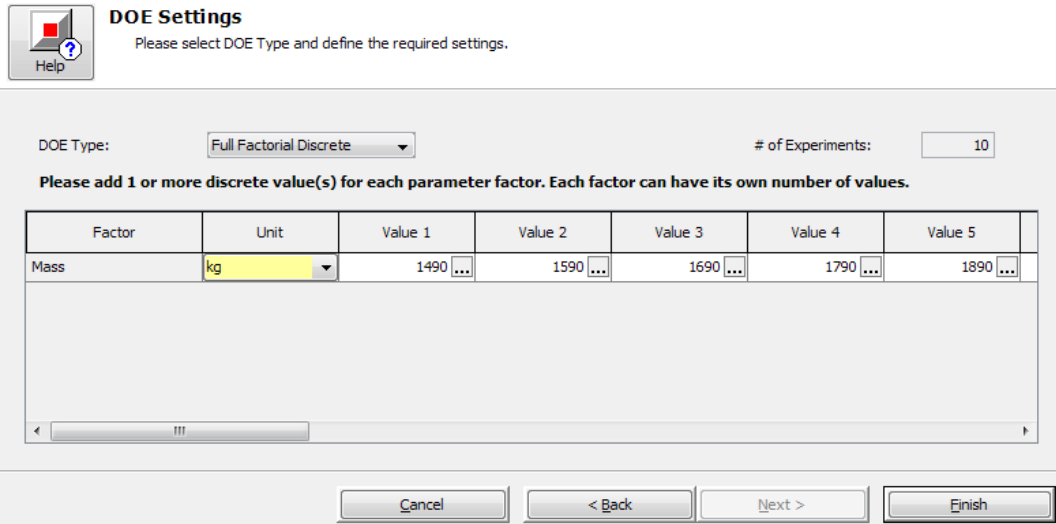
输入模型实车数据，校核模型，经过对比仿真与试验结果过程数据，油耗误差在 3%以内，仿真结果具备较高的精确度及可靠性。

表 3 整车经济性模型校正结果

工况	仿真	试验	误差 %
WLTC循环油耗/L/100km	8.04	8.23	2.3

2.2 仿真过程

为了研究参数的敏感性，需要同一变量多组数据计算，应用 GT-Suite 的全因子非连续运算设置计算任务，以整备质量为例，设置质量变化范围为 1490~2030kg，计算数据为 10 组。



DOE Settings
Please select DOE Type and define the required settings.

DOE Type: Full Factorial Discrete # of Experiments: 10

Please add 1 or more discrete value(s) for each parameter factor. Each factor can have its own number of values.

Factor	Unit	Value 1	Value 2	Value 3	Value 4	Value 5
Mass	kg	1490 ...	1590 ...	1690 ...	1790 ...	1890 ...

Buttons: Cancel, < Back, Next >, Finish

图 3 DOE 计算设置

3. 参数变化对 WLTC 油耗的影响

我国燃油经济性的衡量指标是一定运行工况下汽车行驶百公里的燃油消耗量。根据汽车理论^[2], 等速行驶工况燃油消耗量计算如下:

$$Q_s = \frac{b_e P}{1.02 U_a} = \frac{C F b_e}{\eta_T} \quad (L / 100km) \quad (1)$$

$$u_a = 0.377 * \frac{rn}{i_0 i_g} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{\eta_T} (P_f + P_w + P_i + P_j) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{b_e}{1.02 U_a \eta_T} (P_f + P_w + P_i + P_j) = \frac{b_e}{1.02 U_a \eta_T} \left(\frac{G f \cos \alpha U_a}{3600} + \frac{C_D A U_a^3}{76140} + \frac{G \sin \alpha U_a}{3600} + \frac{\delta m U_a}{3600} \cdot \frac{du}{dt} \right) \quad (4)$$

式中, b_e 为燃油消耗率 $[g / (kW \cdot h)]$, P 为发动机提供的功率 $[kW]$, U_a 为车速 $[km/h]$; C 为常数; F 为行驶阻力, η_T 为传动系统的效率。

G 为作用于汽车上的重力, m 为汽车质量, g 为重力加速度, C_D 为空气阻力系数, A 为汽车行驶方向的投影面积 $[m^2]$, 详见汽车理论^[2]。

由上式可知, 影响燃油经济性的因素有整车整备质量、汽车行驶阻力、发动机燃油消耗率、主减速比以及传动系效率等。由于开发前期发动机已基本确定, 因此, 本文对燃油消耗敏感性的分析不考虑发动机的燃油消耗率, 而从整车整备质量、行驶阻力、传动系效率等方面展开。

3.1 整备质量

汽车的整備质量是影响汽车油耗的一个重要参数，对整備质量进行仿真评估，随整備质量的变化，WLTC 工况油耗变化率在 0.1%~0.3%之间。以整備质量 1570kg 为例，整備质量变化 5%，WLTC 工况燃油消耗变化 1.2%左右，见图 5。

表 4 整備质量与综合油耗结果对比

整備质量[kg]	...	1510	1530	1550	1570	1590	1610	1630	...
WLTC 油耗[L/100km]	...	7.73	7.75	7.78	7.8	7.82	7.85	7.87	...

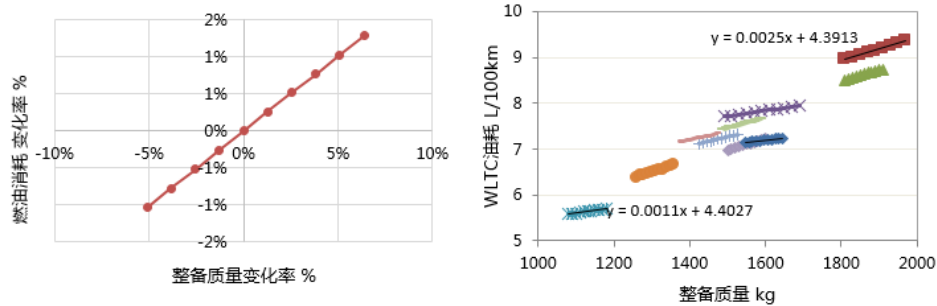


图 4 整備质量与综合油耗变化关系

3.2 整车阻力

行驶阻力增大，燃油消耗也会相应增加，对行驶阻力进行仿真分析，随阻力的变化，WLTC 工况油耗变化率在 0.7%~0.9%之间。以整车平均阻力 659.3N 为例，整车阻力变化 6%，WLTC 工况燃油消耗变化约 1.0%，见图 6。

表 5 整车滑行阻力与综合油耗结果对比

整车阻力[N]	...	629.279	639.279	649.279	659.279	669.279	679.279	689.279	...
WLTC 油耗 [L/100km]	...	7.85	7.93	8.00	8.08	8.15	8.22	8.30	...

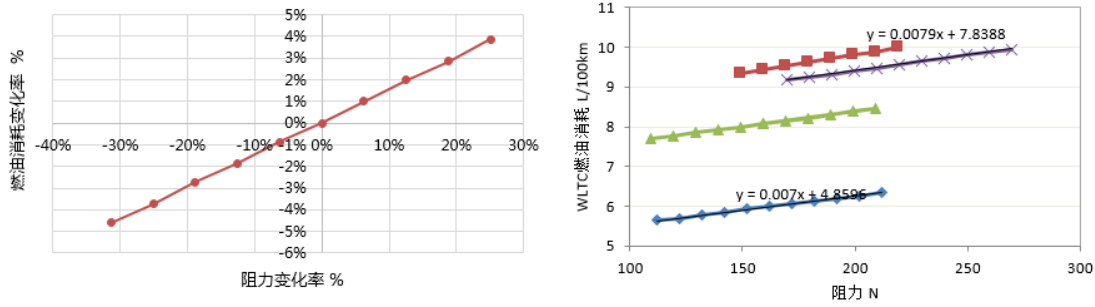


图5 整车滑行阻力与综合油耗变化关系

3.3 主减速比的影响

改变主减速比，进行 WLTC 工况的燃油经济性仿真，如表 6：速比变化 10%，WLTC 工况油耗变化 0.8%左右。

表 6 速比变化与综合油耗关系

类别	基础值	速比改变	变化率
主减速比	4.5	4.95	10.00%
WLTC[L/100km]	7.08	7.14	0.80%

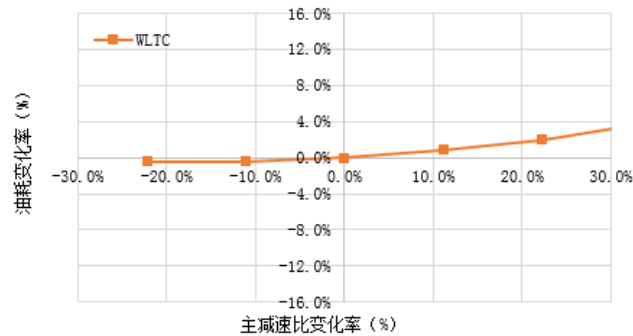


图6 主减速比与综合油耗关系

3.4 传动效率的影响

改变传动效率，进行 WLTC 工况的燃油经济性仿真，如表 7，传动效率变化 2%，WLTC 工况油耗变化 2%。

表 7 传动效率与综合油耗关系

类别	基础值	效率改变	变化率
传动效率	90.24%	92.16%	2.00%
WLTC[L/100km]	7.76	7.62	1.90%

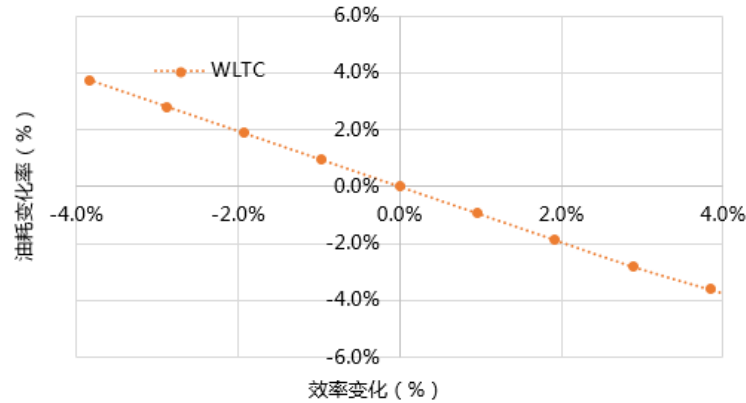


图 7 传动效率与综合油耗关系

通过以上分析，WLTC 工况油耗对整备质量和整车阻力相对敏感，因此在发动机性能一定的情况下，制定降油耗方案时可以首先考虑降阻力和降重量的措施。传动效率对油耗的影响也很明显，提高变速器的传动效率也能很好的改善油耗过高的情况。

表 8 输入参数敏感度分析

类别	整备质量	整车滑行阻力	主减速比	传动效率
输入参数变化率	6%	4%	12.50%	1.05%
WLTC 工况油耗变化率	1%	1%	1%	1%

4 敏感性结果的应用

某车型 WLTC 工况仿真油耗 7.77L/100km，油耗偏高，经与项目组商议，在满足动力性目标的前提下，对油耗实施优化方案。

通过轻量化处理，减少材料厚度和改变材料的工艺，整车能够实现 20kg 的降重；采用底盘封装，降低风阻，同时使用低拖滞卡钳，低滚阻轮胎等技术，整车阻力能实现 30N 的降低。使用低粘度齿轮油，变速器效率能够提升 1%。

整车重量、整车阻力及传动效率的优化，整车动力性得到提升，通过仿真分析，在满足动力性目标的情况下，可以使用更小的主减速比。通过整车重量、整车阻力、传动效率及主减速比的优化，WLTC 综合油耗得到 0.43L/100km 的提升，具体如下：

表 9 动力经济性结果

动力性	目标	优化前	优化后
3 档 40-80km/h 加速时间[s]	≤8.5	8.43	8.25
4 档 60-100km/h 加速时间[s]	≤14	14.04	13.57
5 档 60-100km/h 加速时间[s]	≤19.5	18.41	18.9
0-100km/h 加速时间[s]	≤15.5	15.47	14.76
WLTC 综合油耗[L/100km]	6.8	7.77	7.34

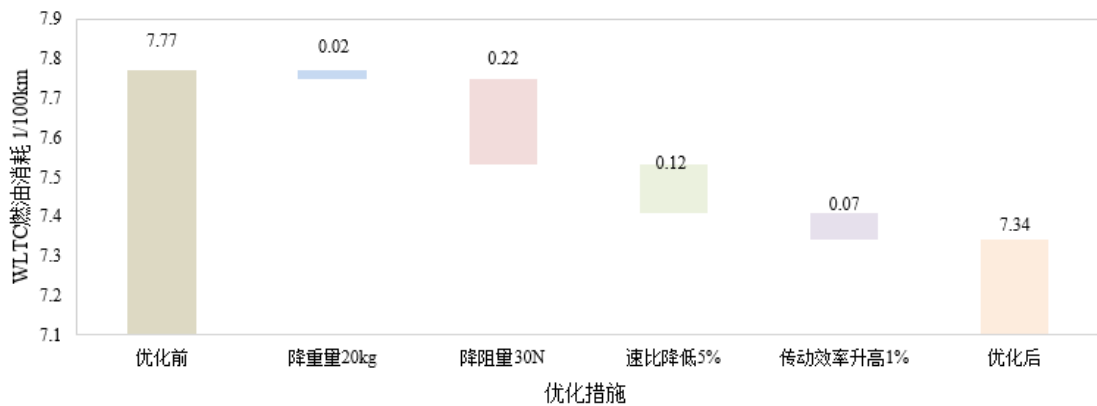


图 8 降油耗方案

5 结论

本文研究了整备质量，整车阻力，传动参数及主减速比这些对经济性有重要影响的因素的变化，对 WLTC 工况油耗的定量影响，得到结论如下：

- 1) 整备质量变化 5%，WLTC 工况燃油消耗变化约 1.2%左右；
- 2) 整车阻力变化 6%，WLTC 工况燃油消耗变化约 1.0%左右；
- 3) 速比变化 10%，WLTC 工况油耗变化 0.8%左右；
- 4) 传动效率变化 2%，WLTC 工况油耗变化 2%；
- 5) 传动效率、整备质量及阻力对油耗的影响相对敏感。

通过对整车参数对 WLTC 工况的油耗敏感性分析，研究单一变量与 WLTC 工况油耗的定量关系，用于前期参数变化对油耗的影响判断，可以对油耗目标达成提供借鉴和解决思路。

6 参考文献

- [1] 法规认证所. 汽车法规发展趋势及适应性分析研究报告[R]. 天津：中国汽车技术研究中心，2018. 12.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京：机械工业出版社，2009. 3：41-46.
- [3] GT-Suite User's Manual