

基于 GT-SUITE 的整车暖机阶段油耗仿真分析

Modeling and Validation of Fuel Consumption during Warm-up Using
GT-SUITE

陆渊 郭凯 邢小伟 陈明 徐政

(上海汽车集团股份有限公司技术中心,
上海市汽车动力总成重点实验室, 上海 20180)

摘要: 汽车动力性和燃油经济性是其重要的使用性能, 本文介绍了使用 GT-SUITE 软件预测 NEDC 循环工况下暖机阶段的油耗, 重点分析了集成冷却系统后对燃油消耗的修正。以某整车为例, 通过 CAE 计算得到了冷启动油耗分析结果, 并结合排气余热回收装置, 分析了该装置对 NEDC 循环工况下暖机阶段油耗的影响。

关键词: 动力性; 经济性; 冷却系统; GT-SUITE

Abstract: Fuel economy and drivability are the core evaluation standards of the vehicle performance. This paper introduced the simulation to calculate fuel consumption during warm-up, which mainly focused on the FMEP correction by considering cooling system using GT-SUITE. For example, after integrating with one fuel-benefit equipment, the fuel consumption of a passenger car during warm-up has been analyzed.

Key words: Drivability; Fuel Economy; Cooling System; GT-SUITE

随着CAFC目标逐年加严, 无论是传统汽车还是新能源汽车, 都面临着在控制成本的前提下进一步节能减排、降低能耗的巨大挑战。通过对所有相关的子系统和部件进行能量分析, 找出不同系统和部件对车辆性能的影响程度, 找到潜在的节能空间, 为明确经济而有效的燃油经济性设计方案提供决策依据, 实现动力总成降油耗路线和整车节油措施的最优匹配。

冷却系统的性能对油耗的影响在各大期刊上被广泛讨论。一些作者运用了试验的方法, 而另一些运用了仿真软件去模拟加快水温、油温对油耗的影响。最终, 都验证了一个结论, 水温、油温升温越快, 发动机油耗越低。一方面, 油耗降低与机油黏度(机油温度影响)有紧密的联系, 另一方面, 加快升温能减少冷却液和发动机本体换热过程中的能量损失。

1 整车能量管理模型建立

1.1 CAE 模型建立

利用 GT-SUITE 搭建了整车能量管理 VEM (Vehicle Energy Management) 模型, 包含了发动机、驾驶员、传动系、整车等模型, 如图 1 所示, 集成了冷却系统, 通过对标 NEDC 工况 CAE 计算结果和整车 NEDC 试验数据(发动机油耗、冷却水温、变速箱档位、发动机扭矩和半轴扭矩等), 研究瞬态温升对分解摩擦功 FMEP 的影响, 从而分析其对整车油耗的影响。

风冷和水冷是两种常用的冷却系统, 水冷被运用在如今市场上的多数汽车上。冷却系统包含了冷却液、散热器或者其他换热装置、风扇、水泵、节温器等等。

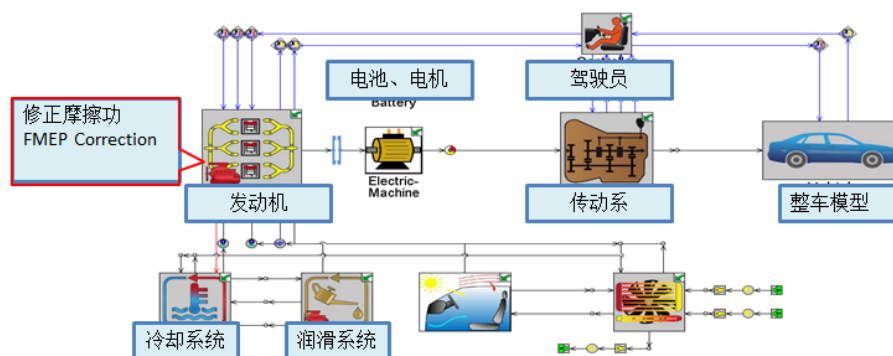


图 1 某车型能量管理 VEM 模型

图 2 为一个典型的冷却系统 CAE 模型，散热器是整个冷却系统中重量最重、体积最大的零部件，所以为了优化冷却系统性能，必须详细分析其性能。冷却液容积是影响温升过程的关键因素，通过管路连接各零部件形成了整个冷却系统工作原理图。

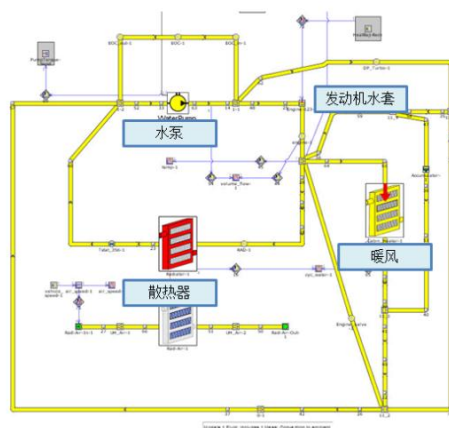


图 2 冷却系统 CAE 模型

1.2 边界条件

整车参数、发动机万有特性、散热量、变速箱传动比、传动效率、以及冷却系统中水泵、散热器等参数按实际提供参数输入。模型中发动机、整车的部分参数如表 1 所示：

表 1 某整车基本参数

参数	单位	数值
车重（空载）	kg	约1500
发动机排量	cm ³	1490
变速箱档位数		7
轮胎规格		215/60 R17

1.3 计算工况

采用动力学计算方法，在 NEDC 工况下，通过驾驶员模型控制车速，与发动机油门位置、离合器位置、制动器位置、换挡策略和瞬态水温互相匹配，得到车辆动态响应（发动机转速、输出扭矩），最终计算百公里油耗。

(1) 发动机转速计算

发动机转速仅与汽车行驶速度、轮胎半径和传动速比有关，与当前车辆状态（加速、减速或匀速等）没有关系，发动机转速如式 1 求得：

$$U_a = \frac{0.377r \times n}{i_g i_0} \quad (1)$$

式中： U_a ——汽车行驶速度，km/h；

r ——发动机转速，r/min；

n ——车轮半径，m；

i_g ——变速箱速比；

i_0 ——主减速比；

通过车速、档位既能求出当前发动机转速。

(2) 发动机扭矩计算

汽车运动过程中受到驱动力和行驶阻力的影响。驱动力通过曲轴输出，经过传动系传递到驱动轮上。行驶阻力包含滚动阻力、空气阻力、加速阻力和坡道阻力。发动机输出扭矩计算公式如下：

$$T_{tq} = \frac{r}{i_g i_0 \eta_T} (F_{\text{滑}} + F_j) = \frac{r}{i_g i_0 \eta_T} (F_0 + F_1 \times \mu_a + F_2 \times \mu_a^2 + \delta m \frac{du_a}{dt}) \quad (2)$$

式中： T_{tq} ——发动机输出扭矩，Nm；

η_T ——传动器效率；

F_0, F_1, F_2 ——道路滑行阻力系数；

δ ——汽车旋转换算系数；

m ——汽车质量；

1) 匀速行驶，加速阻力不考虑。车速和档位已知，可计算出发动机扭矩。

2) 加速行驶时，需考虑加速阻力。因 NEDC 工况加速过程均中车辆加速度保持一致，即每一段加速 $\frac{du_a}{dt}$ 为定值。 δ 可通过转动惯量求得，即可计算发动机扭矩。

3) 减速行驶时，发动机输出扭矩仅和转速相关。在 GT 中模拟时，这部分数据是不需要添加的。得到发动机转速、输出扭矩后，通过查表 BSFC 得到发动机在 NEDC 循环工况下的瞬态油耗。

2 仿真结果

M1、M2 类汽车（最大总质量不超过 5 吨）油耗试验均按照 NEDC 循环工况进行。NEDC 循环包含 4 个城市循环（195s）和 1 个市郊循环（400s），整个 NEDC 循环运行时间共 1180s。

2.1 发动机 FMEP 修正

在 GT-Suite 软件中建立了车辆 NEDC 循环油耗计算模型。为了更加充分得考虑由于水温的变化引起发动机摩擦功变化对整车油耗的影响，集成冷却系统模块并开展了专项冷却系统试验，根据节温器开启、关闭两种状态下的热耗散数据修正温升曲线。发动机 FMEP 基于发动机台架分解摩擦功试验数据，图 3 为某发动机整机在不同温度下的 FMEP 数据。

在模型中添加 FMEP 修正模块，根据不同的水温查表得到该温度下的 FMEP，当做额外的附件消耗，与整车扭矩需求相加。

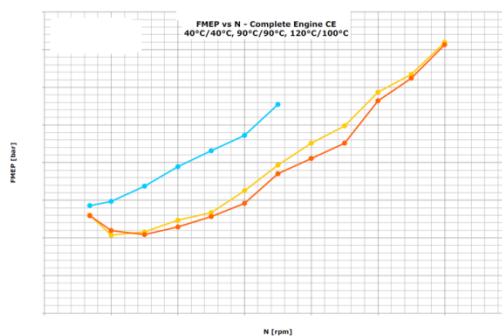


图 3 某发动机分解摩擦功试验数据

在 GT-Suite 整车模型中，对发动机台架稳态试验与整车试验瞬态温升进行标定，在 NEDC 循环工况下，对发动机出水温度进行标定，通过标定后的温升曲线（图 4）和发动机转速（图 5），得到瞬态 FMEP，如图 6 所示。

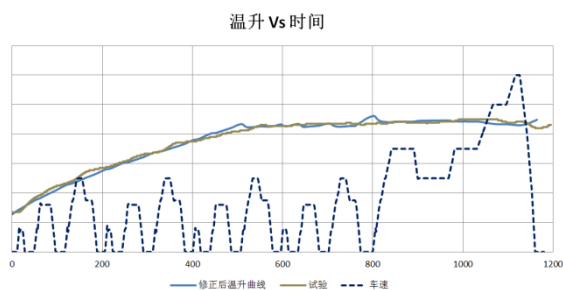


图 4 冷却液瞬态温升 Vs. 时间

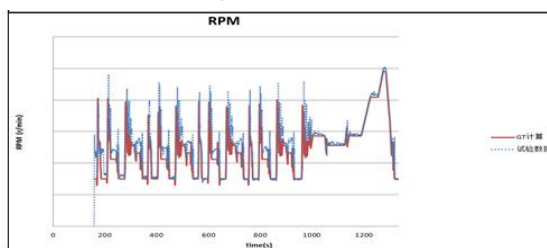


图 5 某发动机转速 CAE 结果与试验结果对比

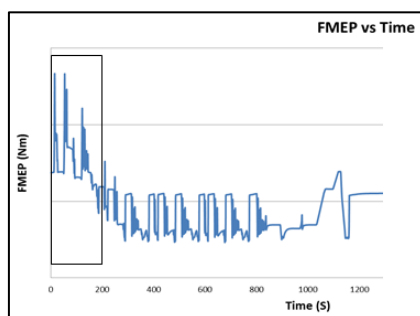


图 6 某发动机瞬态 FMEP

2.2 仿真结果与试验结果对标

某车型 NEDC 油耗计算结果与试验结果对比如表 2。

表 2 仿真与试验对比

Model	仿真油耗值 考虑瞬态温升	仿真油耗值 不考虑瞬态温升	测试油耗值
NEDC results			
BASE	7.82L	7.65L	7.91L

如图 5、图 7 所示，进行了发动机扭矩、转速、变速箱档位、冷却温升的 CAE 计算结果和试验数据对比，模拟了瞬态温升对发动机 FMEP 和油耗的影响。

通过对比，可以看出计算结果与试验结果整体上都比较接近。CAE 计算和试验输出时间节点有差异，发动机转速与真实值可能存在偏差。

综上所述，仿真结果是合理可信的，所建立的模型精度也在一定的范围内，能够用于下一步能量流分析。

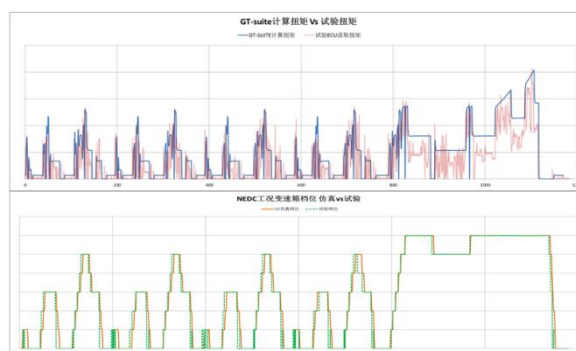


图 7 发动机输出扭矩和变速箱档位

2.3 能量流分析

对于以内燃机为能量来源的车辆，发动机工作过程中，能量被分解成有效功、排气带走的能量、冷却液带走的能量和其他余项。图 7 为某车型发动机能量流消耗分布，可用于后续发动机改型项目及平台的相关开发和优化。能量平衡关系，如式 3 所示：

$$Q_{\text{fuel}} = Q_m + Q_{\text{ex}} + Q_{\text{re}} + Q_{\text{another}} \quad (3)$$

式中： Q_{fuel} ——燃料总的放热量，J；
 Q_m ——有效功，J；
 Q_{ex} ——排气系统消耗的热量，J；
 Q_{re} ——传递给冷却系统的热量，J；
 Q_{another} ——其他损失的热量，J；

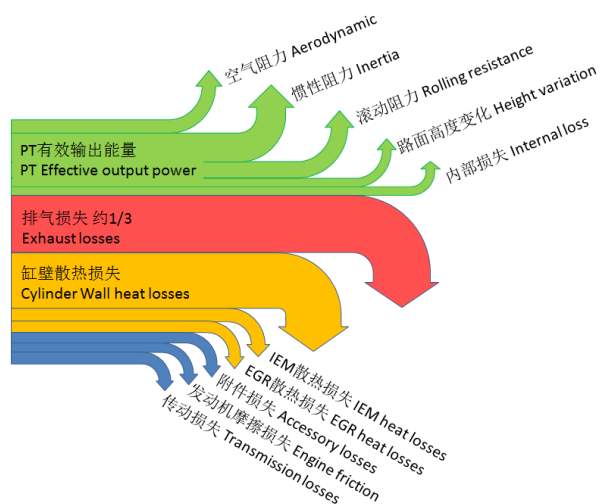


图 7 发动机能量消耗

将近三分之一的发动机能量被排气系统带走，排气再利用有很大的潜力用来降低油耗。

3 瞬态温升对整车暖机时油耗的影响

图 6 为某发动机在 NEDC 工况下瞬态 FMEP，可以看出在发动机暖机过程中（0-200s），水温对 FMEP 的影响因子较大，加快暖机过程中水温和油温温升速度能有效得降低 FMEP，发动机摩擦损失能量变小，从而优化整车油耗。

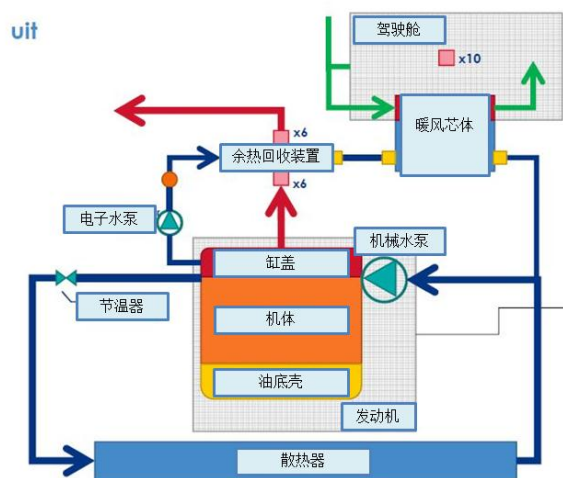


图 8 余热回收原理图

图 8 为发动机余热回收装置原理图，该装置可以回收排气中的部分余热来加热冷却液，不但可以快速提高暖机或小负荷运行时的冷却液和机油温度，提高燃烧效率，降低排放和油耗；而且在冬季时，可以提高降霜效果。

利用 GT-SUITE 建立整车模型在概念阶段预测余热回收装置对整车油耗的影响。

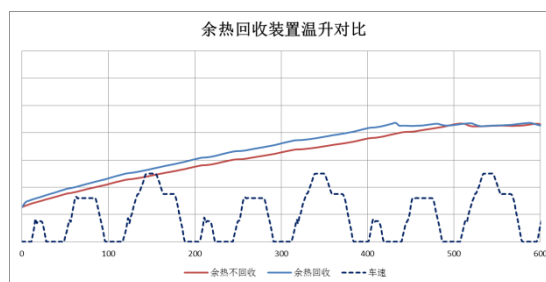


图 9 采用余热回收装置瞬态温升

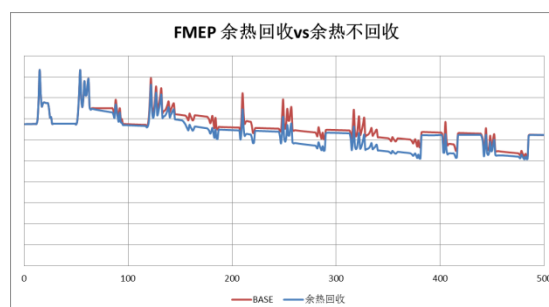


图 10 暖机过程中 FMEP 变化对比

图 9 展示了某发动机采用余热回收装置后, NEDC 工况下, 水温达到 80°C 加快了 13.8%。暖机过程中 FMEP 变化如图 10 所示, 油耗下降 0.58%

4 结论

- (1) 利用 GT-SUITE 搭建了能量管理 VEM 仿真模型, 集成了冷却系统, 通过对比试验结果, CAE 模型能满足计算需求, 且达到了一定的计算精度。
- (2) 得到了发动机能量分配结果, 为研究子系统之间的相互关联及发动机改型方案奠定了基础。
- (3) 分析了余热回收装置对暖机过程油耗的影响, 该装置在 NEDC 工况下, 暖机过程中油耗收益达到 0.58%。

5 参考文献

- [1] 周宝龙, 高宗英. 内燃机学. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] 陈家瑞, 汽车构造. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [3] 张申祥, 陈玮, 王善强等. 基于发动机台架试验的整车油耗测试方法, 2016.
- [4] Gamma Technologies. GT-Suite. Vehicle Driveline and HEV Tutorials, 2017
- [5] Wamei L and BengtS. Vehicle Cooling Systems for Reducing Fuel Consumption and Carbon Dioxide: Literature Survey. SAE Paper 2010-01-1509.
- [6] Sammer S, Jean-Francois H and Alain M, et al. Combined Modeling of Thermal Systems of an Engine in the Purpose of a Reduction in the Fuel Consumption. SAE Paper 2013-24-0142.