

基于 GT-SUITE 进行重型商用车仿真油耗研究

李娟¹，余立轩，陈伟建¹，彭梦姣¹，刘薇¹，张宏飞¹，
(1. 东风汽车有限公司商用车研发中心，武汉 430074)

摘要：随着日益严峻的能源形势和不断严格的排放法规，油耗性能已成为商用车行业客户运营收益的最主要衡量指标和用户购买行为中最为关注的关键因素。整车运行环境较为复杂，性能比较过程中发现即使背靠背测试，边界条件仍然存在差异，可能无法得出车型配置之间、路谱与路谱之间真实差距。基于仿真模型的分析能快速且经济的实现拉通不同边界的差异分析，找出最接近的真实差距，实现不同应用市场的油耗预测。本文以某款重型商用车动力链为研究对象，建立整车纵向动力学仿真计算模型，并基于校核好的模型进行不同应用市场不同载荷模式下动力链经济性性能预测，仿真结果表明，砂石料市场油耗高于煤运油耗，其中砂石料满载油耗高出煤运满载11.46L/100km，与动力链台架测试结果吻合较好，同时从能量流等角度支持不同路谱油耗差异根本原因分析。

关键词：动力学；商用车；油耗；能量流

Abstracts: With the increasingly severe energy situation and increasingly stringent emission regulations, fuel consumption performance has become the most important measure of customer operating profitability and the most important key factor in user purchase behavior in the commercial vehicle industry. The operating environment of the whole vehicle is more complicated, and during the performance comparison, it is found that even if the back-to-back test is carried out, the boundary conditions still differ, and the true gap between the model configuration and between the road spectrum and the road spectrum may not be obtained. The analysis based on the simulation model can quickly and economically realize the difference analysis of different boundaries, find out the closest real gap, and realize the fuel consumption prediction of different application markets. This paper takes the power chain of a heavy commercial vehicle as the research object, establishes a longitudinal dynamics simulation calculation model of the whole vehicle, and predicts the economic performance of the power chain under different load modes in different application markets based on the checked model, and the simulation results show that the fuel consumption of sand and gravel market is higher than that of coal transportation, and the fuel consumption of sand and gravel is 11.46L/100km higher than that of coal transportation, which is in good agreement with the test results of the power chain bench, and supports the root cause analysis of fuel consumption differences in different road spectrum from the perspective of energy flow.

Key Words: Dynamics; commercial vehicles; Fuel consumption; Energy flow

1 概述

随着日益严峻的能源形势和不断严格的排放法规，社会对商用车的燃油经济性要求也不断提升^[1]。目前国内重型卡车燃油消耗占用户全价值链使用费用比约为30%，而驾驶员工资支出比例仅为13%，未来随着人工成本不断提高情况下，降低整车燃油消耗成为车主增加收益的重要途径。因此，油耗性能已成为商用车行业客户运营收益的最主要衡量指标和用户购买行为中最为关注的关键因素，油耗性能课题是贯彻落实为客户创造价值核心理念的体现，成为商用卡车行业产品竞争力的风向标^[2]。

整车运行环境较为复杂，性能比较过程中发现即使背靠背测试，边界条件仍然存在差异，可能无法得出车型配置之间、路谱与路谱之间真实差距。基于仿真模型的分析能快速且经济的实现拉通不同边界的差异分析，找出最接近的真实差距，实现不同应用市场的油耗预测、给出能量流分布指导改善方案、给出驾驶习惯改善带来的油耗改善等等^[3]。

本文以商用车燃油经济性分析为主导，采用理论解析、仿真分析、和台架试验相结合的方法，以某款重型商用车动力链为研究对象，利用商业软件GT-SUITE 建立整车的纵向动力学仿真计算模型，并基于校核好的模型进行不同应用市场动力链经济性性能预测，同时支持不同路谱油耗差异原因分析。

2 仿真计算原理

2.1 车辆驱动力

以发动机作为动力来源车辆，其在道路上行驶的动力全部来自于发动机，经过车辆传动系统转化为汽车的驱动力。汽车在行驶过程中，整车驱动力和行驶过程中阻力保持平衡，且发动机输出功率和车辆行驶阻力功率也保持平衡。

由发动机产生的转矩通过传动系将其传递到车辆的驱动轮。此时因驱动轮受到来自发动机的转矩作用，继而产生汽车行驶驱动力。

汽车驱动轮上的转矩 T_t 来自于发动机并通过传动系传递到驱动轮。若发动机转矩用 T_{tq} 表示，变速器的传动比用 i_g 表示，主减速器的传动比用 i_o 表示，传动系的机械效率用 η_T 表示，则汽车驱动力计算表达式为：

$$F_t = \frac{T_{tq} i_o i_g}{r} \eta_T$$

式中： F_t ——汽车驱动力，N； T_{tq} ——发动机输出使用扭矩，Nm； η_T ——传动效率， r ——车轮半径（m）。

2.2 车辆行驶阻力

车辆在道路上行驶过程中受到的来自地面的滚动阻力和来自空气产生的空气阻力；若有坡度的道路上行驶除了滚动阻力和空气阻力外，还受到坡度阻力如加速行驶过程中车辆还受到加速阻力作用。因此，车辆在行驶过程中阻力之和为：

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j$$

式中： $\sum F$ —行驶阻力， F_f —滚动阻力， F_w —空气阻力， F_i —坡道阻力， F_j —加速阻力

(1) 滚动阻力

车轮在滚动过程中，轮胎与地面的接触区域会产生法向、切向的相互作用力及对应的轮胎和支撑路面变形。当弹性轮胎在硬化道路滚动时，轮胎内部的相互摩擦导致弹性迟滞损失，轮胎变形过程中做的功不能完全收回。这弹性迟滞损失产生的阻力即为车辆的滚动阻力，其数值计算为：

$$F_f = Mgf$$

式中： F_f ——试验车辆的滚动阻力，N； M ——车辆质量，kg； g ——重力加速度，9.8m/s²； f ——滚动阻力系数。

车辆行驶路面的类型、轮胎的机构、材料及轮胎的气压、车速等因素都对滚动阻力系数的大小有影响。滚动阻力系数的大小通常由试验测得，经验公式目前误差较大。

(2) 空气阻力

空气作用在直线行驶车辆行驶方向上的分力即为空气阻力，其数值大小计算如下：

$$F_w = \frac{C_D A u_a^2}{21.15}$$

式中： F_w ——风阻，N； C_D ——空气阻力系数； A ——整车迎风面积 m²； u_a ——汽车行驶车速 (km/h)。

空气阻力系数和迎风面积是影响汽车空气阻力的两个主要设计因素，受乘坐使用空间的制约，迎风面积值变化不大，近年来随着空气动力学设计的不断发展，空气阻力系数值变化较大。

(3) 坡度阻力

车辆不在平直道路上行驶时，即在有一定坡度的道路上坡过程中，车辆的重力会在沿着道路方向有个阻碍车辆上坡的分力，这个力即为车辆的坡度阻力：

$$F_i = G \sin \alpha$$

如果坡度很小 ($\alpha < 10\%$)

$$F_i = G \sin \alpha = G \tan \alpha = G\alpha$$

式中： α ——道路坡度（坡高与底长之比）

(4) 加速阻力

车辆在道路上加速前进时，由车辆的质量和加速行驶时形成的惯性力对车辆形成阻力，即为加速阻力。车辆的质量由平动质量和旋转量组成，在加速行驶过程中由平动质量产生惯性力，由旋转质量而产生惯性力矩。在实际计算中，一般将惯性力矩转化为惯性力来处理，引入换算系数来表示旋转质量力矩转化为平动惯性力后的整车旋转质量换算系数。发动机飞轮的转动惯量、传动系统的速比及轮胎的转动惯量等因素都对整车旋转质量换算系数有影响。旋转质量换算系数一般按下式计算：

$$\delta = 1 + \frac{1}{m} \frac{\sum I_w}{r^2} + \frac{1}{m} \frac{I_f i_g^2 i_o^2 n}{r^2}$$

式中： m ——汽车质量， I_w ——车轮的转动惯量， I_f ——飞轮的转动惯量

加速阻力计算公式为：

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt}$$

式中： δ ——汽车旋转质量换算系数， m ——汽车质量， $\frac{du}{dt}$ ——汽车行驶加速度。

2.3 汽车各档车速计算

$$u_a = 0.377 \frac{rn}{i_o i_g}$$

式中： u_a ——汽车速度，单位 km/h；

n ——发动机转速，单位 r/min；

r ——滚动半径，单位 m；

i_g ——变速箱各档速比；

i_o ——后桥主减速器传动比。

2.4 各档动力因素

$$D = \frac{F_T - F_W}{G}$$

式中： D ——动力因素； F_T ——汽车的驱动力，单位 N； F_W ——空气阻力，单位 N； G ——车辆总重，单位 N。

2.5 坡度计算

坡度 $i = h/l$ ；

坡度角 $\alpha = \arctan i$ ；

爬坡度；

式中： h ——高度差；

l ——水平位移；

2.6 功率平衡计算

汽车运动阻力所消耗的功率有滚动阻力功率 P_f 、空气阻力功率 P_W 、坡度阻力功率 P_i 及加速阻力功率 P_j ，即有以下公式：

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{Gfu_a}{3600} + \frac{Giu_a}{3600} + \frac{C_D Au_a^3}{76140} + \frac{\delta mu_a}{3600} \frac{du}{dt} \right)$$

全功率取力车型需要增加取力部分的功率：

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{Gfu_a}{3600} + \frac{Giu_a}{3600} + \frac{C_D Au_a^3}{76140} + \frac{\delta mu_a}{3600} \frac{du}{dt} + P_q \right)$$

式中： P_e ——发动机输出净功率，单位 kw；

P_q ——取力功率，单位 kw。

2.7 等速油耗计算

2.7.1 根据所选档位及车速 u_a 求得相应发动机转速 n 。

2.7.2 由功率平衡方程是确定发动机实际发出的功率 P ，同时确定当前转速下发动机扭矩 T 。

2.7.3 由 n 和 T ，从发动机特性图确定相应的燃油消耗率 b_e 。

$$Q_s = \frac{Pb}{1.02u_a\rho g}$$

式中：\$Q_s\$——等速百公里油耗，单位 L/100km；

\$\rho\$——燃油密度，单位 kg/L；

\$b\$——燃油消耗率，单位 g/(kW·h)。

3 动力链仿真模型

本文是以某款重型商用车动力链为研究对象，利用商业软件 GT-SUITE^[4]建立整车的纵向动力学仿真计算模型，并基于动力链台架测试数据校核模型。

3.1 动力链主要性能参数

动力链模型中发动机采用 MAP 模型，需要输入主要参数包括：发动机冲程数、排量、最低运行转速，燃油密度、低热值、转动惯量、机械输出 MAP、发动机摩擦 MAP、发动机油量 MAP。机械输出 MAP 中 Z 值可以输入 BMEP，亦可输入有效扭矩，同理，发动机摩擦 MAP 中 Z 值可以输入 FMEP，亦可输入摩擦扭矩，发动机油量 MAP 中 Y 轴输入形式可以采用指示扭矩、有效扭矩或 BMEP/IMEP 的形式，发动机排量的输入是为了进行 BMEP 与扭矩之间的转换。发动机及整车主要参数可参考表 1，表 2。

表1 发动机参数表

	型号	DDi11
结构参数	发动机型式	6 缸；四气门；直列；4 冲程
	排量/L	11
	压缩比/[-]	17.3:1
	工作爆压/bar	250bar
	涡轮增压器	WGT 增压器
	燃油喷射系统	电控共轨直喷
	喷油顺序	1-5-3-6-2-4

表2 整车基本参数

整车质量	轮胎半径	发动机惯	车轮惯量	风阻系数	风阻面积	滚阻系数
kg	mm	量 kg*m ²	kg*m ²	-	m ²	-
49000	0.5267	2.27	15	*	**	***

3.2 动力链模型建立

按照动力源由发动机输出，经过离合器、变速箱、差速器、半轴，最后传至驱动轮的主线。在 GT 软件中对各个小模块进行集成，然后按照各元件间信号或能量传递的输入和输出关系，将发动机模块、离合器、变速器模块、车身模块、驾驶员模块等进行物理连接，模型采用了较多自定义模块对动力链模型进行完善，如考虑变速箱及驱动桥带载和空载效率损失不同，考虑变速箱不同档位限扭差异，动力链仿真模型如图 1 所示。

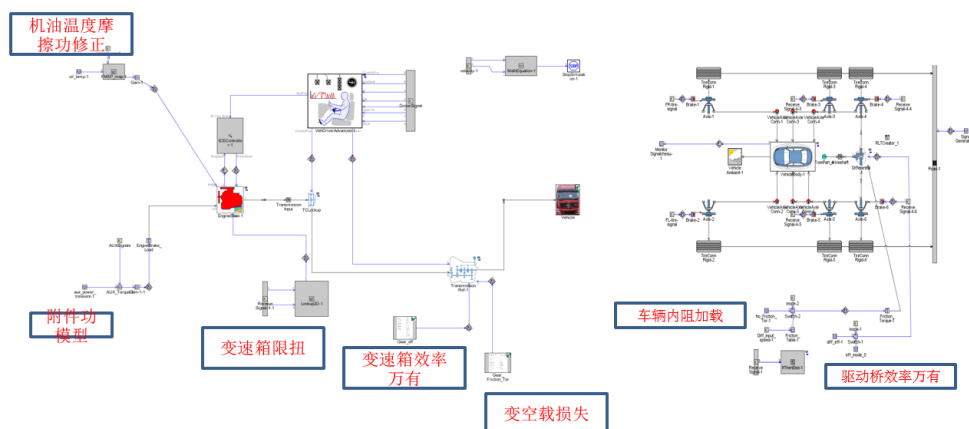


图1 动力链模型示意图

3.3 路谱工况

模型校核路谱选用 C-WTVC 循环工况，如图 2 所示，车速范围涵盖市区循环(900s)、公路循环(468s)、高速循环(432s)三部分。

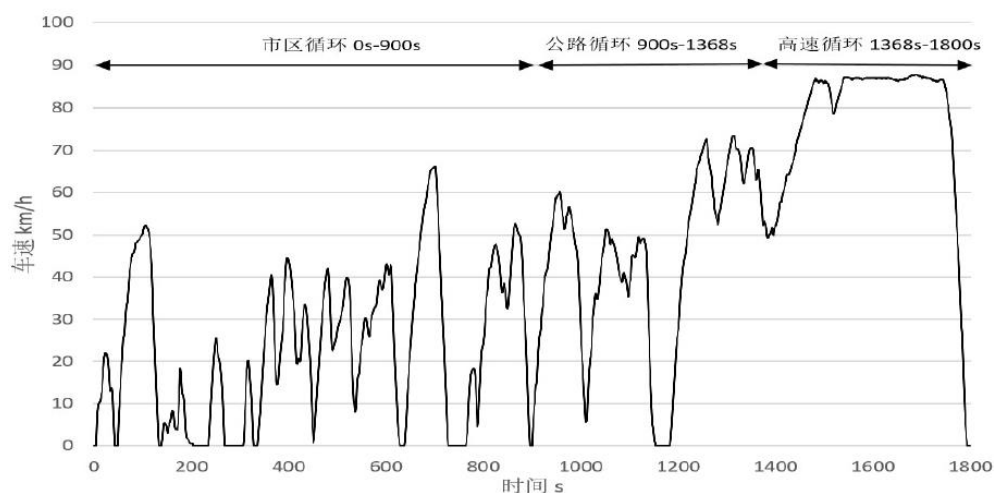


图2 C-WTVC 循环工况的时间速度曲线

4 仿真计算分析

4.1 仿真模型搭建

基于动力链仿真模型，进行满载 49T，空载 18T 路谱仿真计算，变速箱为某 14 档手动变速箱，动力链台架运行过程，实际运行时间会比路谱时间更长些，主要是台架手动换挡模式原因，自动变速箱则不会出现该问题。仿真为保持和台架一致，目标路谱设定为动力链台架实际跑出来的路谱。49T 计算结果与动力链台架测试结果比对如图 3 所示，不管是 49T 载荷还是 18T 的空载载荷模式下，车速和档位跟随较佳，仿真计算的发动机转速、扭矩、油耗也与台架测量结果吻合较佳，综合百公里油耗误差小于 5%。仿真模型能较好的复现动力链台架测试结果。

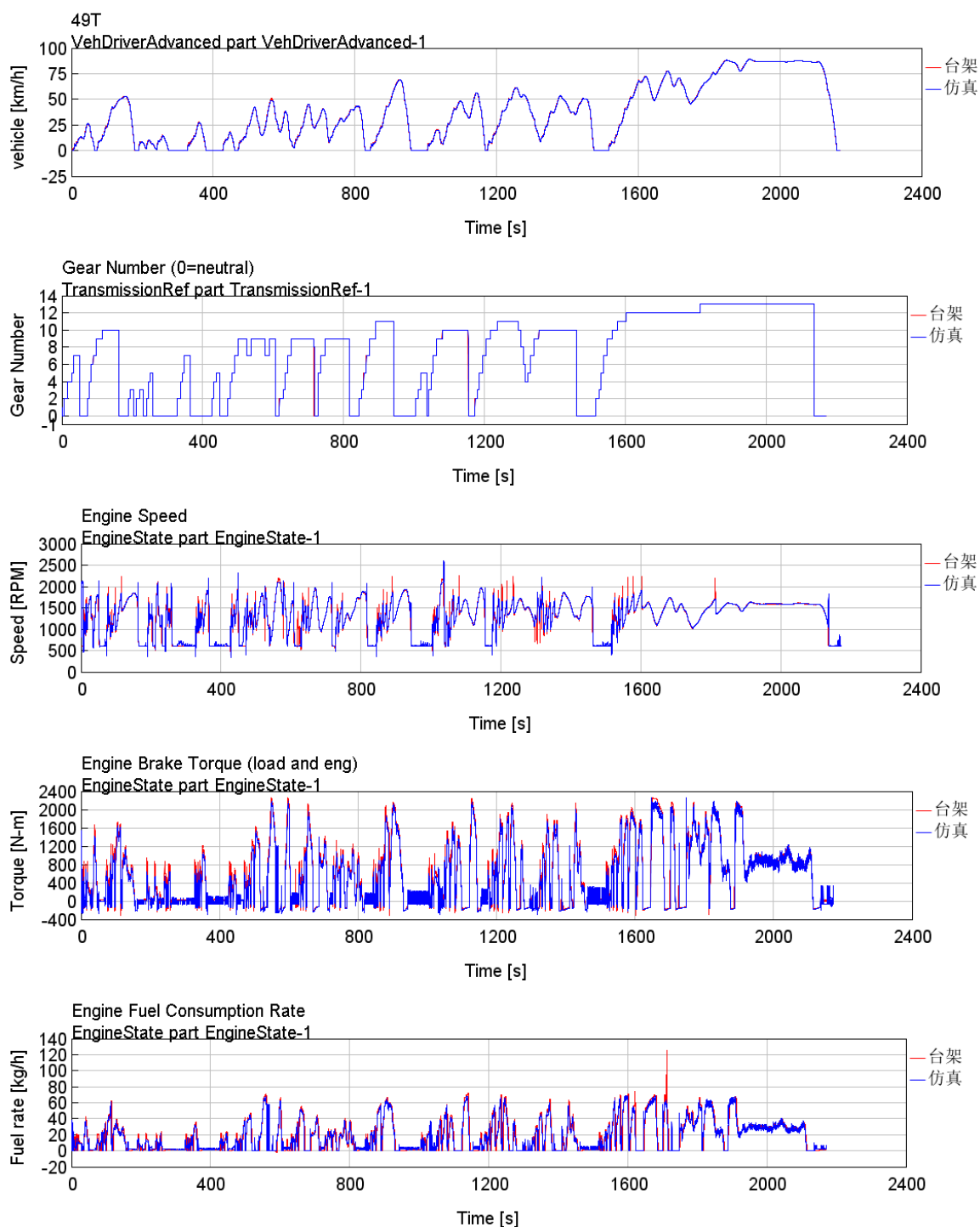


图3 49T 模型校核结果比对

4.2 砂石料市场及煤运市场性能预估

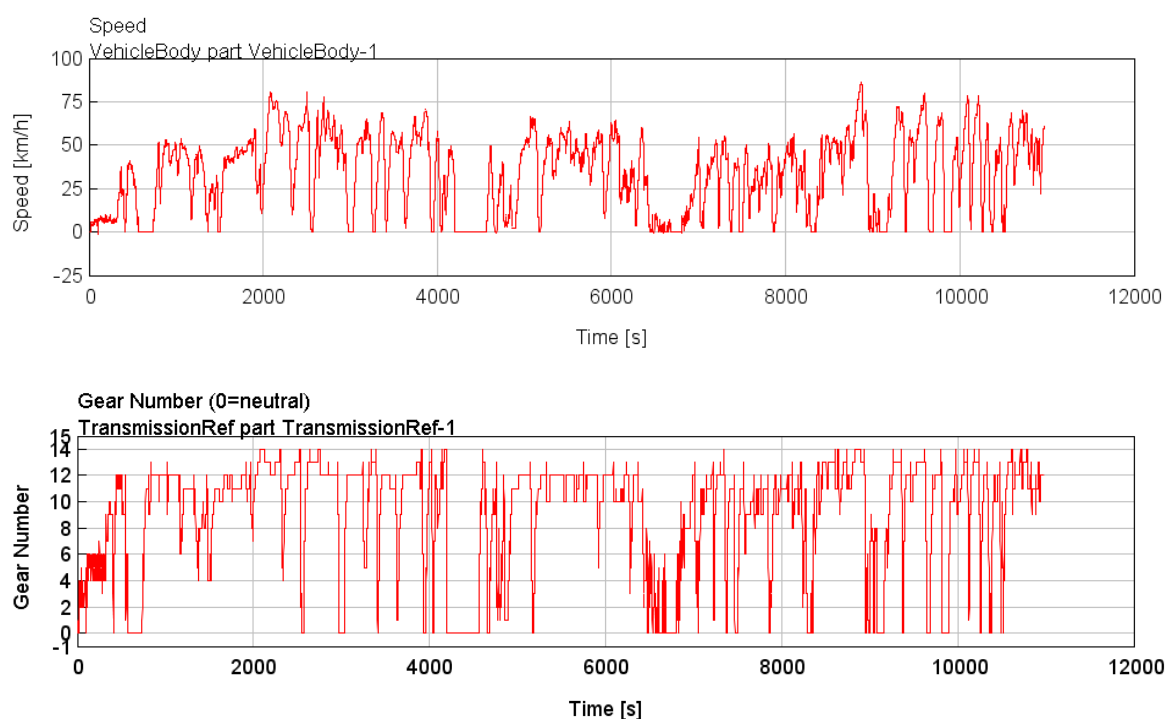
对于该动力链车型，砂石料市场及煤运市场是其主要应用细分市场，下面将基于校核好的动力链仿真模型，进行不同应用市场的性能仿真分析，探索该市场下发动机的主要运行区域、以及该动力链配置在不同应用市场的燃油经济性表现。



图4 49T 砂石料市场性能预测

砂石料市场及煤运市场由于其主要运行工况不同，选用路谱自然不同，选择计算路段如图 4 所示，砂石料路况平均车速较低，其中砂石料 60~70km/h 占比较煤运低 5.7%；二者 70~80km/h 占比相当；砂石料 80~100km/h 占比几乎为 0，而煤运占比 6.2%。

另外，驾驶室也不同，仿真模型在计算时充分考虑了风阻、滚阻模型的输入差异，相关输入均取自标准滑行试验分析结果。49T 砂石料市场主要性能参数预测结果如图 5 所示。为保证车速控制结果与实车一致，添加了车速偏移大终止运行模块，当目标车速跟随差异大于 10km/h 时，终止模型运行。本次计算中车速跟随较好，未进入终止运行模式。



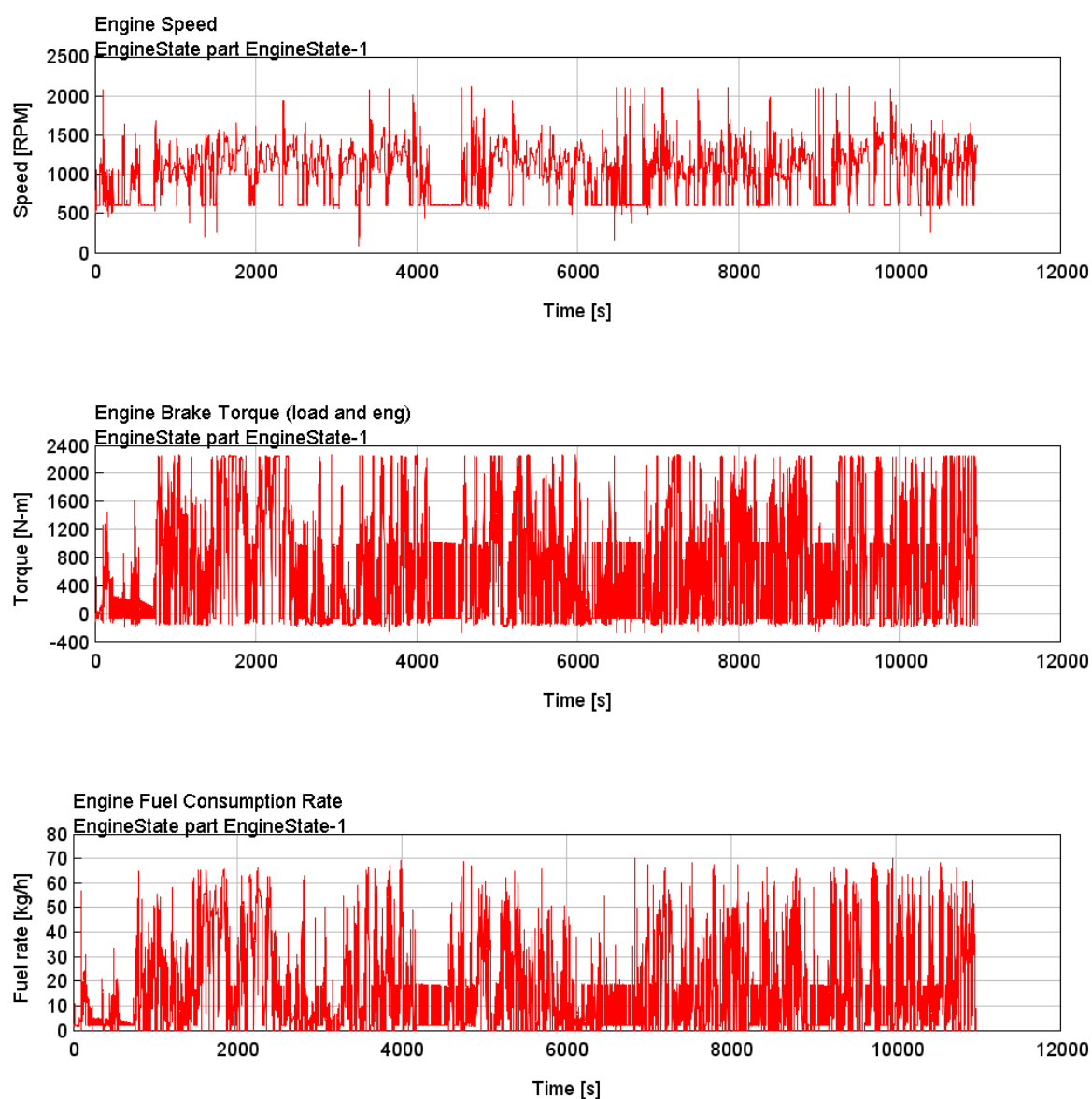


图5 49T 砂石料市场性能预测

煤运市场满载及空载负荷下，发动机运行工况分布如图 6 所示，砂石料市场满载及空载负荷下，发动机运行工况分布如图 7 所示，

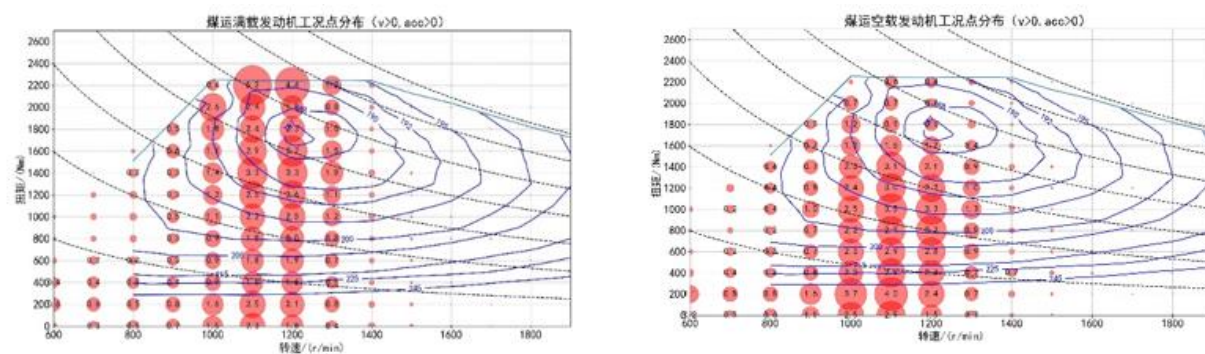


图6 煤运市场工况分布预测

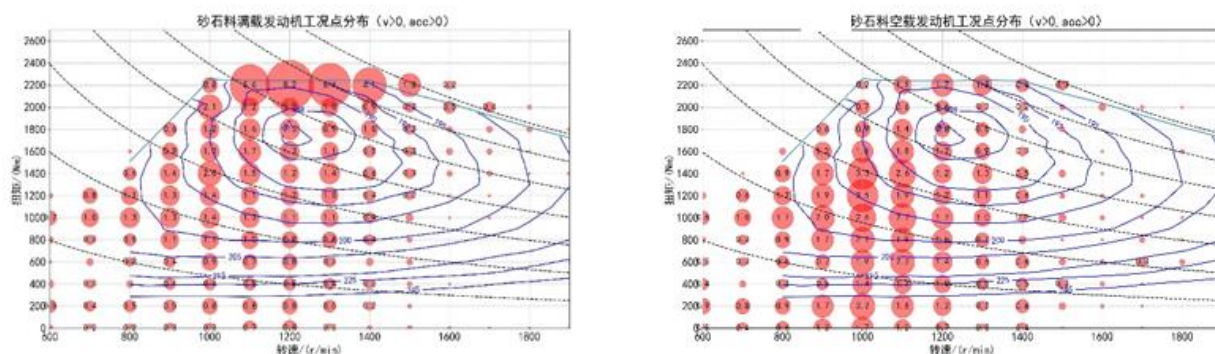


图7 砂石料市场工况分布预测

满载模式下，砂石料市场运行工况多集中在外特性曲线上，经济区占比较少，相比之下，煤运各扭矩段工况分布较均匀；二者发动机转速都集中在 1000~1300rpm，其中砂石料工况下发动机转速分布较为分散。空载模式下，砂石料市场发动机转速集中在 900~1200rpm，煤运市场发动机转速集中在 1000~1200rpm，其中砂石料工况下发动机转速分布较为分散。

相同动力链配置，不同应用市场下，仿真计算结果表明，砂石料油耗高于煤运油耗，其中砂石料满载油耗高出煤运满载 11.46L/100km。

4.3 基于能量流分布分析动力链台架油耗差异

整车能量流计算可进一步分析整车关键系统和零部件的工作状态及效率，计算分析出整车能量的走向。最后通过与同类别车辆的各评价带对比分析，确定各系统及零部件的能耗特性，为后续优化方案的确定提供理论依据。

整车动力链系统中，燃油输出能量最终主要去向分别是：发动机排气及传热损耗、发动机摩擦、附件损失、变速箱损耗、离合器损耗、驱动桥损耗、风阻滚阻损耗等。整车现市场问题分析过程中常会遇到，配置相同，难以解释的油耗差异问题，下面将以两组动力链台架路谱，如图 8 所示，平均车速相当，油耗差异大的实际问题，通过能量流分析角度，探寻其本质原因。

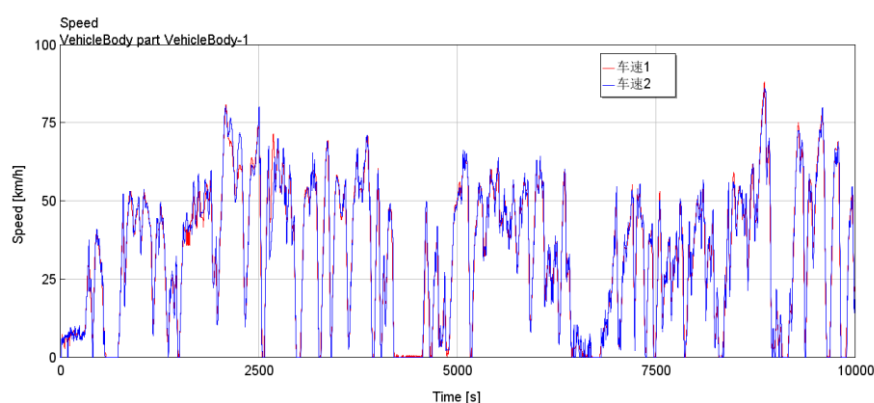


图8 两款台架路谱

两款路谱从全局来看，车速、坡度均较接近，平均车速数值差距小于 5%，动力链台架测试出，二者油耗差异较大，为排除坡度信息处理带来的影响，台架在不设置坡度情况下，再次运行，二者百公里油耗差距依旧接近 9L。

为进一步寻找油耗差异大的原因，我们进行了动力链仿真模型搭建，并将计算结果分析如图 9，图 10 所示。

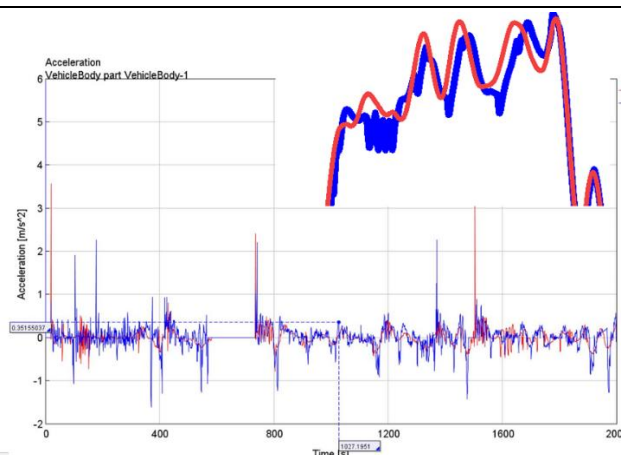


图9 加速度差异

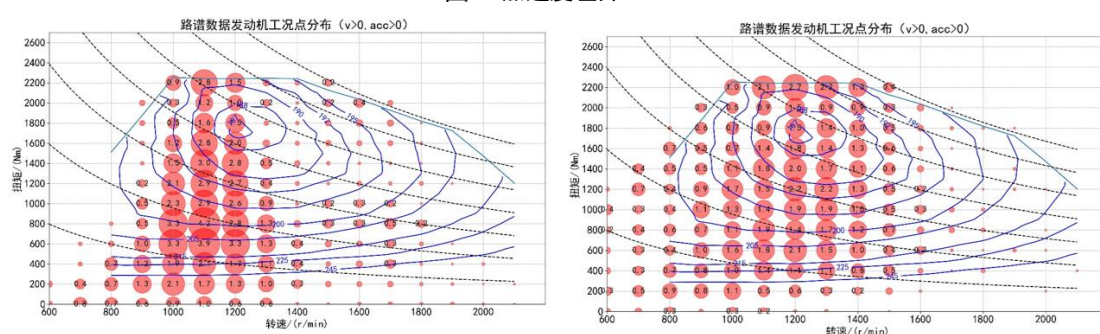


图10 运行工况点差异

两款路谱，平均车速相当，但加速度在时域上存在差异，放大之后差异更为明显，这种波动容易导致发动机运行工况点负荷改变，如图 10 所示的发动机运行工况点分布差异明显，第 2 条路谱运行工况点分布比较分散，较多运行工况均远离经济区域，能量流分布图更是很好的解释了这一点，如图 11 所示。能量损耗占比中显示，路谱 2 和路谱 1 制动能量损耗相差 40kw，发动机尾气排放及冷却等损耗相差约 64kw。变速箱、离合器、驱动桥路谱 2 均有不同程度的提升。

综合分析，认为平均车速相当，但时域上每个点的加速度均存在差异，波动大，影响发动机负荷，改变发动机运行工况，从而影响经济性，此为影响主要因素；换挡规律差异为次要因素。

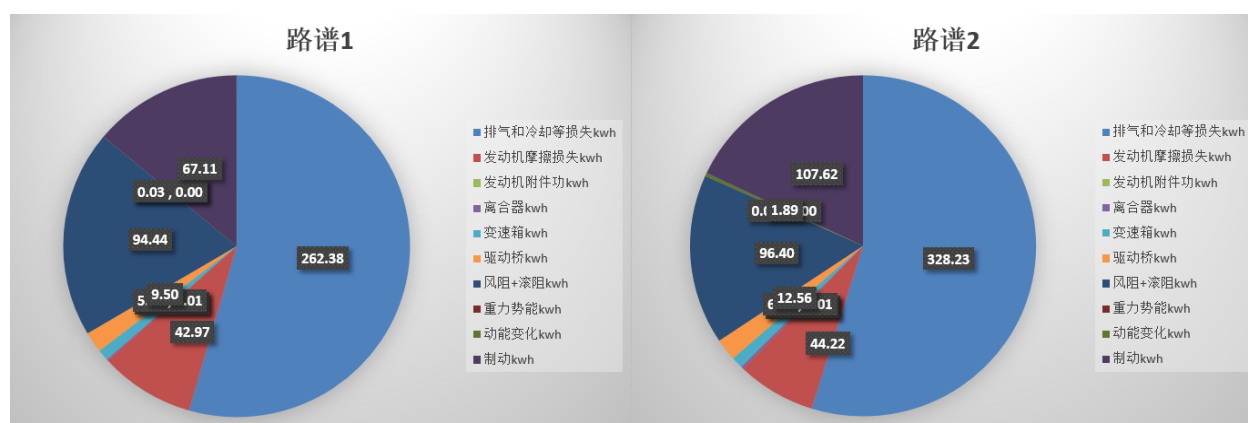


图11 能量分布

5 动力链台架测试

5.1 动力链台架主要测试设备

试验中使用的主要测试设备如表 3 所示。试验设备都是为了尽可能地模拟车辆的真实行驶状况，以便更加贴近整车实际运行，动力链台架整体布局如图 12 所示。

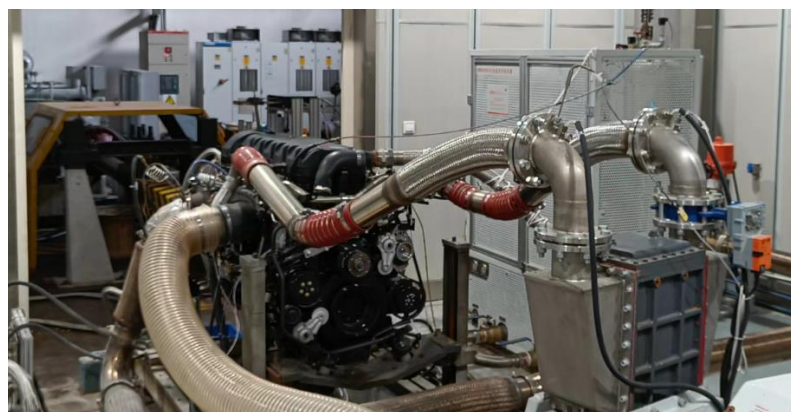


图12 台架现场布置示意图

表3 动力链试验台主要设备

试验设备	生产厂家	型号
油耗仪	Horiba	FQ-3210CR250
发动机信号测量箱	Horiba	9U
发动机加载测功机	Horiba	HD 576
变速箱换挡机械手	德国 Haussmann	GSE9801
离合器执行器	德国 Haussmann	KA9111S
驱动桥轮边负载测功机（2台）	Horiba	WM50000
传动加载测功机	Horiba	PT35000

5.2 动力链台架结果及分析

动力链台架对不同应用市场路谱及载荷情况进行了测试，测试结果如下图所示。经仿真先验证过的路谱及坡度工况，动力链台架运行时一气呵成，未出现任何卡死状况，煤运及砂石料不同应用市场下，二者发动机转速多分布在 1000~1300rpm，其中砂石料工况下发动机转速分布较为分散，煤炭工况分布区域更为集中，如图 13 所示。

。

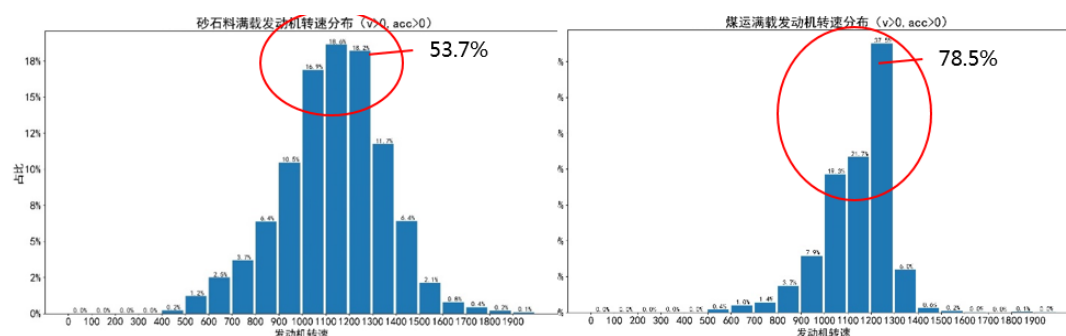


图13 发动机转速分布

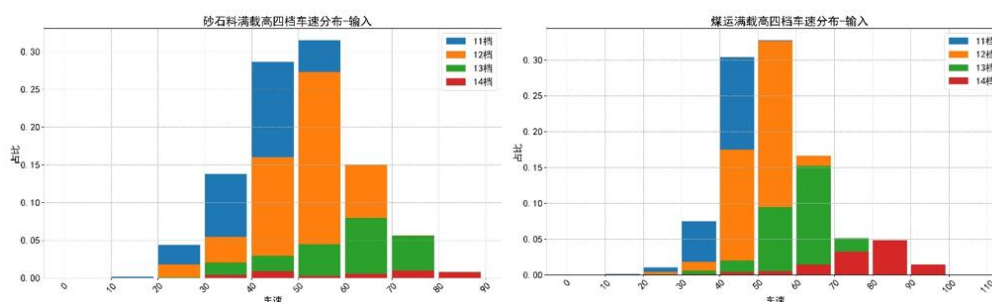


图14 变速箱高四挡分布占比

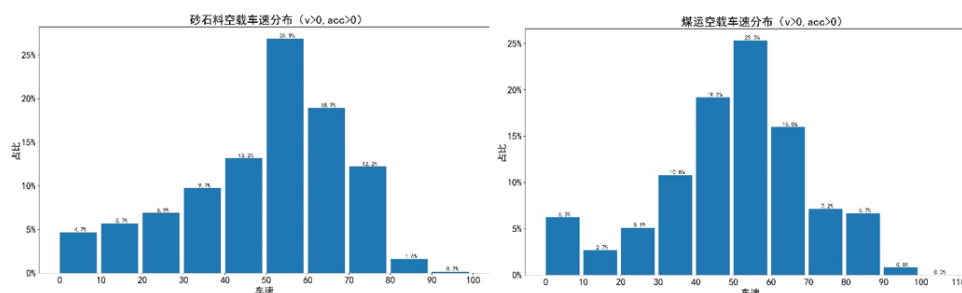


图15 平均车速分布占比

变速箱高四挡分布占比如图 14 所示, 其中, 砂石料工况 14、13 档占比较煤运工况少, 而对于超速挡变速箱而言, 次高档传递效率最高。砂石料车辆在外特性曲线上工况占比相对较多、煤运车辆在中低负荷占比较多, 就平均车速而言, 不管是满载还是空载, 砂石料工况平均车速均低于煤运工况, 如图 15 所示。动力链台架测试结果表明, 砂石料油耗整体高于煤运油耗, 其中, 砂石料市场满载油耗较煤运市场满载油耗高出约 12.7L/100km。

6 结论

论文的研究结果将为商用车燃油经济性的理论研究和工程分析奠定基础, 为面向不同应用市场燃油经济性的商用车动力总成系统设计提供理论及技术支撑, 本文以某款重型商用车动力链为研究对象, 并基于校核好的模型进行不同应用市场不同载荷模式下动力链经济性性能预测, 同时探索不同路谱油耗差异根本原因。结合动力链台架测试形成如下结论:

- 1) 基于 GT-SUITE 建立的整车纵向动力学仿真模型, 能很好的复现动力链台架工况, 发动机转速、扭矩、油耗也与台架测量结果吻合较佳, 综合百公里油耗误差小于 5%;
- 2) 煤运及砂石料不同应用市场下, 二者发动机转速多分布在 1000~1300rpm, 其中砂石料工况下发动机转速分布较为分散, 煤炭工况分布区域更为集中;
- 3) 砂石料油耗高于煤运油耗, 其中砂石料满载油耗高出煤运满载 12.7L/100km, 与仿真结论无论是趋势还是量级均吻合较佳;
- 4) 平均车速相当, 但时域上每个点的加速度差异大, 会影响发动机负荷, 改变发动机运行工况, 从而影响动力链综合经济性。

整车运行环境较为复杂, 边界难以完全固化, 基于仿真模型的分析能快速且经济的实现拉通不同边界的差异分析, 找出最接近的真实差距, 同时实现不同应用市场的油耗预测, 对该动力总成系统的选型匹配开发提供强有力的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 苏万华, 张众杰, 刘瑞林, 等. 车用内燃机技术发展趋势[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 97-103.
- [2] 中国生态环境部. 2020 年中国移动源环境管理年报[R]. 2021
- [3] 范鲁艳、孙万臣, 等. 混合动力商用车发动机高效清洁燃烧与整车匹配技术研究. 吉林大学博士学位论文. 2022
- [4] Gamma Technologies. Engine Performance Tutorials, 2022