

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.024

# 基于 Simulink 的 ISG 型客车混合动力系统的仿真研究\*

孙贵斌<sup>1,2</sup>, 马腾腾<sup>3</sup>, 唐友名<sup>1</sup>, 杨云东<sup>1</sup>, 王 耀<sup>1</sup>, 曹竞辉<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 福建 厦门 361024; 3. 福建省福工动力技术有限公司, 福建 厦门 361000)

**摘要:**针对 ISG 型混合动力系统结构、控制复杂,传统开发风险高、周期长、成本高等问题,采用后向仿真的思想,应用 Simulink 仿真工具,对其动力系统完成了能量管理策略的设计与建模,建立了工况输入模型和驾驶员 PI 控制模型,结合相关理论公式及试验标定数据对其主要部件如驱动电机、发动机、发电机、动力电池进行了模型建立。结合中国城市典型工况,基于功率分配思想提出了以发动机优先驱动优化发动机工作效率的整车能量管理策略。仿真结果研究表明,仿真模型可以准确模拟实车进行循环工况行驶,完成经济性试验和实时输出各部件工作特性参数的功能,该模型可以作为动力系统能量管理策略研究和部件参数优化的基础,对车辆前期开发阶段快速确定整车控制策略,提高匹配该系统车型的经济性具有重要意义。

**关键词:** ISG 混合动力; 动力系统; 城市客车; 整车仿真

中图分类号: TP391.9; U462.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)11-1415-06

## Simulation on ISG hybrid powertrain based on simulink

SUN Gui-bin<sup>1</sup>, MA Teng-teng<sup>2</sup>, TANG You-ming<sup>1</sup>, YANG Yun-dong<sup>1</sup>,  
WANG Yao<sup>1</sup>, CAO Jing-hui<sup>1</sup>

(1. Xiamen University of Technology School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen 361024, China;  
2. Fujian Collaborative Innovation Center for R & D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 361024, China;  
3. Fujian FuGong EV Tech Co., Ltd, Xiamen 361000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of ISG powertrain's structure complexity and control complexity, some lacks such as high risk, long period and high cost in traditional development and so on, the Simulink simulation tool was applied according to rear simulation thought, the energy management strategy was designed and modeled, the input model and the driver PI controlling model were modeled, the main components such as the driving motor, engine, generator, power battery were modeled combined with relevant theoretical formulas and demarcated test data. Combining with the typical Chinese traffic, the energy management strategy of engine first driving for optimizing engine's working efficiency was put forward withing the power distribution. The simulation results turns out that this model can accurately simulate the true bus on the cycle traffic driving and complete the economy simulation and output real-time working characteristic parameters of every parts, it can be the foundation for studying powertrain's energy management strategy and optimizing parts' parameters, this is useful for confirming the vehicle control strategy in early development period and improving the economy of related matched bus.

**Key words:** ISG hybrid; power system; city bus; vehicle simulation

收稿日期: 2016-05-31

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金资助项目(11504308); 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2012AA1111105); 福建省科技创新平台资助项目(2016H2003)

**作者简介:** 孙贵斌(1964-), 男, 齐齐哈尔人, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源汽车动力系统控制方面的研究. E-mail: 1464278484@qq.com

## 0 引 言

Matlab/Simulink 仿真工具在汽车技术研发中应用越来越普遍,在车辆前期研发过程中,应用仿真技术可以大大减少开发风险<sup>[1]</sup>。ISG 型混合动力汽车结构复杂,动力源不单一,与其系统匹配的控制策略具有可调性。文献[2]从发动机输出负荷的角度,开展了控制规则优化和转矩分配控制策略研究,文献[3-4]通过研究动力系统部件在不同循环工况下的负荷功率分布,对各部件参数进行了优化匹配等。对整车部件参数和能量管理策略进行优化,首先需要基于既定的控制策略建立各部件之间逻辑与数据联系。

本研究从工程应用的角度出发,采用逻辑门限值的控制规则应用 Matlab/Simulink 仿真工具,从发动机优先驱动的角度,以优化发动机工作效率为目的,对车辆动力系统建模仿真,该模型将验证整车动力系统功能的准确性,查看动力系统关键部件的消耗数据,实现对比不同能量控制策略对车辆动力性和经济性影响的功能,从而为后续动力系统部件参数及其能量控制策略优化提供指导方向。

## 1 ISG 型混合动力客车构型分析

城市客车运行工况特殊,公路平坦坡度低,运行车速不高,可不增设变速箱。功率型动力电池可满足大电流充放电使用,也可以代替超级电容作为混合动力汽车的储能装置。本研究的 ISG 型混合动力系统构型如图 1 所示。

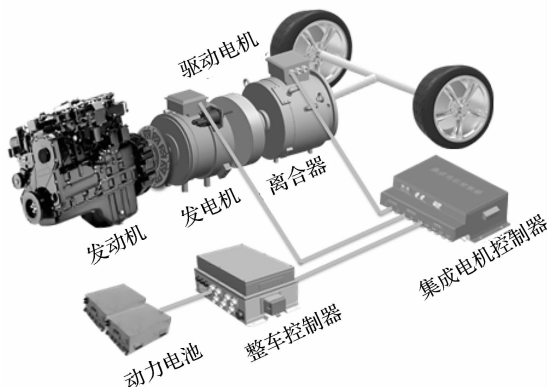


图 1 动力系统架构图

发动机、ISG 电机、驱动电机同轴相连,ISG 电机与驱动电机之间设有主离合器进行结合与分离,驱动电机输出端直接与传统轴相连通过后桥输出动力到车轮,电机控制器负责控制电机的运行,动力电池负责向

驱动电机供电和回收整车制动和多余的能量,整车控制器负责协调所有部件,保证整车的运行<sup>[5-6]</sup>。

## 2 整车动力系统及各部件模型建立

基于汽车理论中的行驶方程,经相关变形后,可以建立车辆任一状态下的功率平衡数学模型如下式所示:

$$\frac{T_{iq}i_0\eta_i}{r}u = mgf\cos\alpha + \frac{C_D A}{21.15}u^3 + mg\sin\alpha + \delta m \frac{du}{dt}u \quad (1)$$

式中: $T_{iq}$ —电机输出端输出扭矩, $i_0$ —主减速比, $\eta_i$ —传动系统效率, $r$ —车轮半径, $m$ —整车最大质量, $g$ —重力加速度常数, $f$ —滚动阻力系统, $u$ —车速, $\alpha$ —道路坡度, $C_D$ —风阻系统, $A$ —车辆迎风面积, $\delta$ —车辆旋转质量系数。

据式(1)可建立车辆的动态行驶模型。车辆在行驶过程中,由发动机和驱动电机分别针对不同的工作模式下对车辆进行单独或联合驱动,克服滚动阻力、迎风阻力和加速阻力达到驱动车辆的目的<sup>[7]</sup>。

### 2.1 工况及驾驶员模型的建立

对整车动力系统的建模,首先要建立行驶工况模型和驾驶员模型来确定整车行驶功率需求。本研究的工况为中国城市典型工况,由于单个工况路程较短,为了有效模拟整车行驶过程中各部件的消耗参数变化,要求工况具有可循环性。可建立循环工况输入模型:

$$\begin{cases} u = f(t) \\ t \leq nT, n \in \mathbf{N} \\ T = 1\ 314 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T$ —周期常数,仿真步长设置为 0.01。

同时,驾驶员模型要求驾驶员能控制车辆按照目标工况进行行驶。本研究基于 PI 控制,调节输入变量为实际车速  $U_a$  与目标车速  $U_{a-aim}$  的差值,调节输出为车轮转矩  $T_{wheel}$ ,与整车模型一起形成闭环调节,建立驾驶员模型内部 PI 调节模型。

### 2.2 动力系统控制模型

在确定需求功率后,需要设计合理的控制策略来实现能量的合理分配。当需求功率大于 0 时,车辆处于驱动模式,当需求功率小于 0 时,车辆处于制动模式。根据城市客车的行驶特点,本研究以车速为节点,将整车的工作模式分为以下 3 个方面:  
(1) 纯电动模式。当车速小于 22 km/h 时,由驱动电

机单独启动并驱动车辆运行;(2)混合驱动模式。当车速在 22 km/h 以上且小于 45 km/h 时,由发动机和驱动电机共同驱动车辆运行;(3)发动机独驱模式。当车速大于等于 45 km/h 时,由发动机单独驱动整车运行。

以下分不同工作模式对动力系统能量控制策略进行分析<sup>[8]</sup>,为方便讨论,定义控制变量如下: $P_{aim}$ —整车的需求功率, $P_{motor\_aim}$ —电机的需求功率, $P_{ICE\_motor\_aim}$ —发动机的需求功率, $P_{Batt\_aim}$ —电池的需求功率, $P_{Mec\_Brake}$ —机械制动功率。

### 2.2.1 驱动模式

#### (1) 纯电动模式

此时驱动力只来源于电机;整车需求功率首先由电机在该转速下的最大功率  $P_{n\_max}$  进行限制,取整车需求功率和电机在当前转速下可输出的最大功率中的较小值。驱动电机电功率的计算需考虑电机及其控制器效率  $\eta_{mc}$ ,动力电池负责向驱动电机供电。电池供电电功率计算应分 2 种情况考虑:

① 电池  $SOC > 0.2$ ,则电池所提供的功率应在剩余的需求功率和电池在最大放电电流下所能提供的最大功率  $P_{i\_max}$  之间取最小值。

② 电池  $SOC \leq 0.2$ ,电池不再放电。

纯电动模式下遵循的逻辑关系式如下式所示:

$$\begin{cases} P_{aim} = \min(P_{n\_max}; P_{aim}) \\ P_{motor\_aim} = P_{aim} \\ P_{motor\_aim} = P_{Batt\_aim} \\ P_{Batt\_aim} = \min(P_{i\_max}; P_{Batt\_aim}), SOC > 0.2 \\ P_{Batt\_aim} = 0, SOC \leq 0.2 \end{cases} \quad (3)$$

#### (2) 混合驱动模式

此时驱动力来源于电机和发动机。本研究采取发动机优先进动策略,始终保证发动机工作于高效区<sup>[9-10]</sup>。若当前转速下发动机工作于最小燃油消耗率的工作点的功率大于需求功率时,若电池 SOC 大于 0.9,则发动机工作于需求功率,若电池 SOC 小于等于 0.9,则发动机工作于当前转速下的最小燃油消耗率点(建模中采用迭代法寻找最小燃油消耗点),且发动机将剩余功率  $P_{temp}$  通过 ISG 电机对电池进行充电,充电功率为  $P_{ISG\_aim}$ ;若当前转速下发动机工作于最小燃油消耗率的工作点的功率小于需求功率时,由驱动电机负责补充剩余的需求功率,驱动电机的电功率计算需考虑电机及电机控制器效率,驱动电机由动力电池负责供电。电池供电电功率计算应分 2 种情况考虑:

① 电池  $SOC > 0.2$ ,则电池所提供的功率应在剩余的需求功率和电池在最大放电电流下所能提供的最大功率之间取最小值。

② 电池  $SOC \leq 0.2$ ,电池不再放电。

混合驱动模式下遵循的逻辑关系式如式(4)所示:

$$\begin{cases} P_{ICE\_motor\_aim} = P_{aim}, SOC > 0.9 \\ P_{ICE\_motor\_aim} = P_{ICE\_motor\_b\_min}, SOC \leq 0.9 \\ P_{temp} = P_{aim} - P_{ICE\_motor\_aim}, SOC \leq 0.9 \\ P_{motor\_aim} = P_{temp}, P_{temp} \geq 0, SOC \leq 0.9 \\ P_{ISG\_aim} = P_{temp}, P_{temp} < 0, SOC \leq 0.9 \\ P_{Batt\_aim} = \min(P_{i\_max}; P_{Batt\_aim}), SOC > 0.2 \\ P_{Batt\_aim} = 0, SOC \leq 0.2 \end{cases} \quad (4)$$

#### (3) 发动机独驱模式

此时驱动力只来源于发动机,若当前转速下发动机工作于最小燃油消耗率的工作点的功率大于需求功率,且电池 SOC 小于 0.9 时,发动机工作于当前转速下的最小燃油消耗率点,且发动机将剩余功率向电池进行充电;其余情况,发动机工作于需求功率。

发动机独驱模式下遵循的逻辑关系式如式(5)所示:

$$\begin{cases} P_{ICE\_motor\_aim} = P_{aim}, SOC > 0.9 \\ P_{temp} = P_{aim} - P_{ICE\_motor\_b\_min}, SOC \leq 0.9 \\ P_{ICE\_motor\_aim} = P_{aim}, P_{temp}, SOC \leq 0.9 \\ P_{ICE\_motor\_aim} = P_{ICE\_motor\_b\_min}, P_{temp} < 0, SOC \leq 0.9 \\ P_{ISG\_aim} = P_{temp} \\ P_{Batt} = \min(P_{i\_max}; P_{Batt\_aim}), SOC > 0.2 \\ P_{Batt\_aim} = 0, SOC \leq 0.2 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2.2 制动模式

此时制动来源来自两个方面:机械制动和电制动。此时控制策略为最大可能回收电能。在进行制动能量回收时,驱动电机切换为发电模式,负责能量的回收,此时 ISG 电机不工作。

(1) 电池  $SOC \leq 0.9$ ,回收功率应小于电机在该转速下所能回收的最大电功率和电池的最大充电功率的最小值。

(2) 电池  $SOC > 0.9$ ,电池不再充电。

在制动电功率分配完成后,剩余的制动功率分配给机械制动。发动机独驱模式下遵循的逻辑关系式:

$$\begin{cases} P_{aim} = P_{Mec\_Brake}, SOC > 0.9 \\ |P_{motor\_aim}| = \min(|P_{motor\_aim}|; |P_{i\_Batt\_max}|), SOC \leq 0.9 \\ P_{temp} = |P_{aim}| - |P_{motor\_aim}|, SOC \leq 0.9 \\ P_{motor\_aim} = P_{aim}, P_{temp} < 0, SOC \leq 0.9 \\ |P_{Mec\_Brake}| = |P_{aim}| - |P_{motor\_aim}|, P_{temp} > 0, SOC \leq 0.9 \end{cases} \quad (6)$$

根据以上分析可在 Simulink 中完成动力系统控制模型搭建。

### 2.3 驱动电机模型建立

电机模型的建立通常有 2 种方式:(1) 根据电机本身物理特性及电机相关理论公式建立电机的扭矩输出和能量损耗模型;(2) 通过电机匹配试验得来的电机的外特性及电机系统效率数据通过查表建立的电机模型。

本研究研究重在电机的功能及能量传递,因此选用后者作为电机建模的指导思路。电机遵循的数学关系式如:

$$\begin{cases} T = 9\ 550 \frac{P}{n} \\ P_{motor} = \frac{P_{motor\_aim}}{h_{mc}}, P_{motor\_aim} \geq 0 \\ P_{motor} = P_{motor\_aim} g h_{mc}, P_{motor\_aim} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

由此可完成电机的仿真模型搭建,其中输入端为电机的需求功率,输出端为电机的转矩和电机的电功率  $P_{motor}$ 。

### 2.4 发动机模型建立

发动机模型同样是根据发动机的外特性和万有特性数据结合式(7)中转速、转矩与功率计算公式进行建模。发动机仿真模型中输入端为发动机需求功率和电池 SOC,输出端为发动机转矩、发动机转速、发动机油耗和发动机总功率(包含发动机附件功率)。

### 2.5 发电机模型

ISG 发电机的作用主要有:

- (1) 当电池 SOC 低于下限时,对电池进行充电;
- (2) 将发动机的剩余功率转化为电池的电能。

由发动机模型可知 ISG 发电机的发电功率,基于 ISG 电机的外特性和发电效率试验数据(与驱动电机建模原理类似),可完成建立 ISG 发电机的仿真模型,其中,输入端为发电机的需求功率,输出端为发电机的转速,转矩和电功率。

## 2.6 动力电池模型

本研究电池研究对象为快充型镍氢电池,并参照标准电池模型 PNGV 模型进行建模。模型建立主要分 2 个步骤:(1) 建立电池的 SOC 计算模型;(2) 结合模型参数辨识试验确定的 PNGV 模型参数运用数学建模的思想建立完整的 PNGV 模型。其中,输入端为电池需求功率和发电机发电功率,输出端为电池电压、电池当前 SOC 和电池净耗电量。

综上所述,整车动力系统模型如图 2 所示。

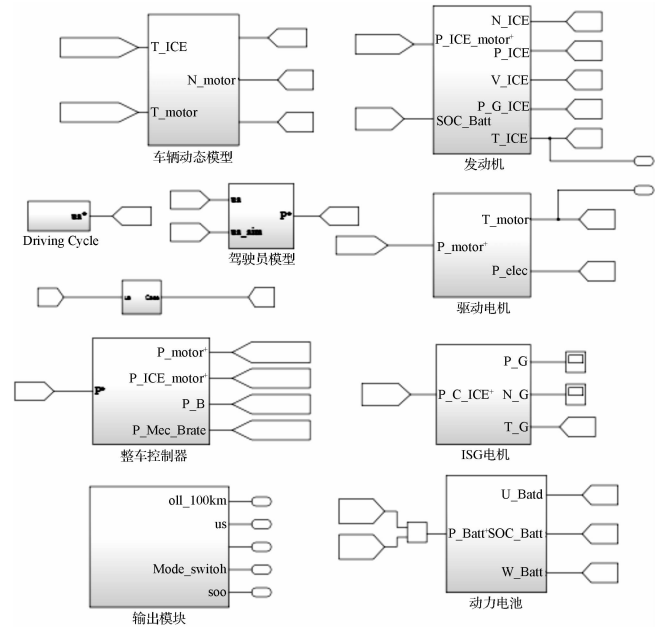


图 2 整车动力系统仿真模型

模型主要包含上述各个模块和输出模块,模块之间变量传递通过 simulink 中 from 和 goto 模块实现。

## 3 整车主要性能仿真及结果分析

在完成各子系统的建模后,可对全部子系统进行封装,封装后的混合动力系统仿真模型如下图 3 所示。

模型开放性强,本研究为方便后续分析,选择输出路况行驶情况、发动机与驱动电机扭矩变化情况、车辆百公里油耗折算和电池 SOC 变化情况数据。

在 Matlab 当前工作环境下,对 m 文件中各定义变量进行赋值更改,可完成不同车型的 ISG 型混合动力城市客车系统仿真。

本研究以 12mISG 型混合动力城市公交车为例,整车基本参数如表 1 所示。主要部件选型参数如表 2 所示。

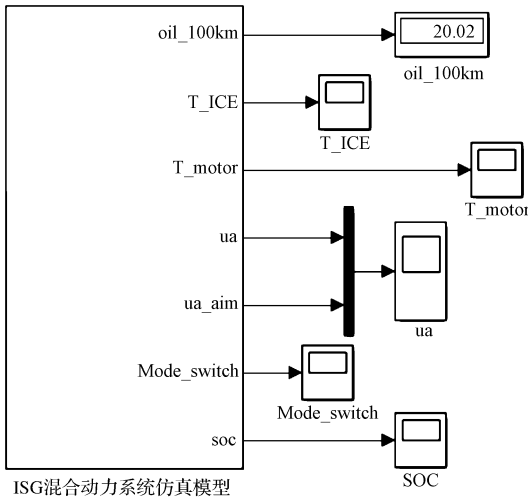


图 3 ISG 型混合动力城市客车整车仿真模型

表 1 整车主要参数

参数类型	数值
轮胎半径 $r/\text{mm}$	526
最大总质量 $m/\text{kg}$	18 000
主减速器比 $i_0$	6.14
迎风面积 $A/\text{m}^2$	8.13
风阻系数 $Cd$	0.55
滚动阻力系数 $f$	0.012
传动效率 $\eta_i/\%$	0.92
电机及其控制器效率 $\eta_{mc}/\%$	0.92
旋转质量系数 $\delta$	1.09

表 2 车辆主要部件选型参数

部件类型	参数类型/单位	数值
发动机	额定扭矩/转速/ $\text{kW}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	730/1 200 - 1 700
	额定功率/转速/ $\text{kW}/(\text{N} \cdot \text{m})$	147/2 300
驱动电机	额定功率/扭矩/ $\text{kW}/(\text{N} \cdot \text{m})$	75/980
	峰值功率/扭矩/ $\text{kW}/(\text{N} \cdot \text{m})$	150/2 000
发电机	额定功率/ $\text{kW}$	30
动力电池	电池组容量/ $\text{Ah}$	50
	电池组额定电压/ $\text{V}$	550

完成参数和仿真步长设置后,运行仿真模型,可得到该车型在中国典型城市工况下的相关性能仿真和部件消耗数据结果。

速跟随情况和车辆工作模式切换情况如图 4 所示。

从图 4 可以看出,车辆可很好地完整行驶整个典型工况,实际车速跟随情况良好,证明整个仿真系统有效。此外,动力系统能够按照所设计控制策略,以车速为节点进行 3 种工作模式 (Model\_switch) 切换。

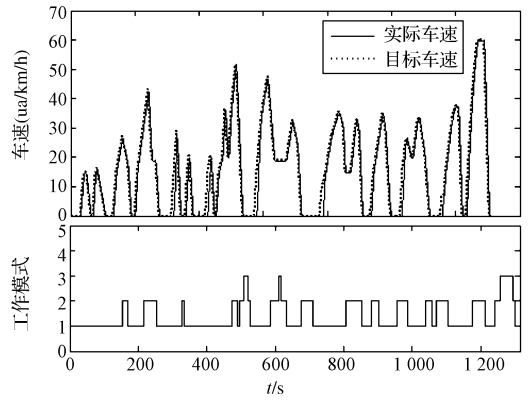


图 4 速跟随情况和车辆工作模式切换情况

其中,纵坐标 1—纯电动模式;2—混合驱动模式;3—发动机独驱模式。

发动机和驱动电机扭矩输出情况如图 5 所示。

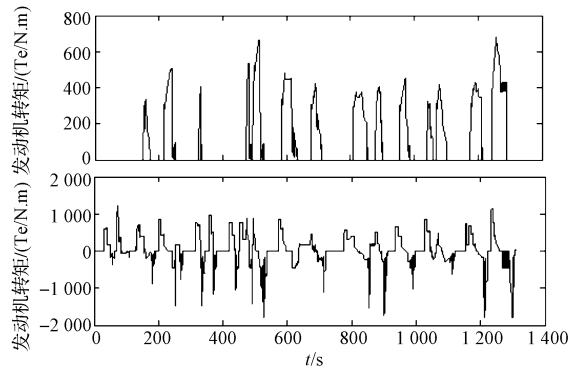


图 5 发动机和驱动电机扭矩输出情况

从图 5 可以看出,按照本研究设计逻辑,本模型单个循环仿真工况,电池 SOC 初始值设为 0.6,即电池 SOC 高于充电下限,因此发动机只在混动模式和发动机独驱模式下输出扭矩,同时发动机在功率富裕时对电池充电,驱动电机可以按照既定控制策略,进行 3 种工作模式下的驱动 (扭矩为正) 和制动模式下的能量回收 (扭矩为负)。

单个循环工况下的电池 SOC 变化情况如图 6 所示。

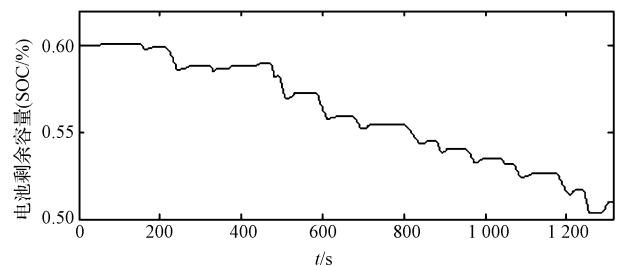


图 6 单个循环工况下的电池 SOC 变化情况

从图 6 可以看出,动力电池在整个工况行驶中可有效进行充电放电 (电池 SOC 呈波浪式下降),完成单

个典型工况, 电池 SOC 从 0.6 降低到 0.51。

此外, 运行模型后从整车仿真模型的百公里油耗输出模块 Display 上, 查看整车折算后的百公里油耗为 20.02 L。传统 12 m 客车油耗大约为 37.2 L, 依据本仿真模型结果, 节油率可达 46.2%。

## 4 结束语

本研究基于功率分配的思想, 从工程应用的角度出发, 主要以控制策略优化研究验证为目的, 建立了 ISG 型混合动力城市客车整车模型。样例车型仿真结果表明, 该模型可有效地验证整车动力系统控制策略, 实时动态输出任一状态下的各部件的工作参数。该模型可在车辆控制策略前期开发阶段方便地帮助确定控制策略优化方向, 缩短研发时间。但由于整车实际控制中, 考虑因素更多, 控制也更为复杂, 因此, 该模型同时也存在一定的缺陷, 后期需要进一步优化改进, 主要从以下几点出发:

(1) 丰富驾驶员模型, 加入加速踏板模型, 更进一步贴和驾驶员实际操作, 并可实现驾驶员意图识别。

(2) 基于本模型输出的转矩需求, 结合整车实际通讯控制信号和电信号, 改进发动机、电机的仿真模型, 定量模拟控制信号, 使仿真思想更为贴近实际。

(3) Simulink 仿真模型可编译为执行代码进行硬件控制器开发, 可根据整车实际控制需求, 精简模型输入输出, 合理布局内部控制, 为进一步的开发改进整车控制器控制程序做铺垫。

## 参考文献(References):

- [1] 孙忠潇. Simulink 仿真及代码生成技术入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [2] 周世勋, 曹世宏, 季新杰. ISG 混合动力汽车控制规则优化与转矩分配策略研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 751-756.
- [3] 万帆, 傅春耘, 盖江涛, 等. 插电式混合动力汽车动力系统的参数匹配及仿真[J]. 重庆理工大学学报, 2015, 29(6): 19-26.
- [4] 张爱国. 插电式混合动力轿车动力总成参数匹配及控制策略研究[D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2013.
- [5] 刘玺斌. 插电式混合动力城市公交大客车关键技术研究[D]. 长安: 西安大学汽车学院, 2013.
- [6] ALIZADEH M, SCAGLIONE A, DAVIES J, et al. A scalable stochastic model for the electricity demand of electric and plug-in hybrid vehicles [J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2014, 5(2): 848-860.
- [7] 余志生. 汽车理论. [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [8] 赵韩, 吴迪. ISG 混合动力汽车模型预测控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报, 2014, 37(1): 1-5.
- [9] YADAV, ANIL K, GAUR, et al. Robust adaptive speed control of uncertain hybrid electric vehicle using electronic throttle control with varying road grade[J]. **Nonlinear Dynamics**, 2014, 76(1): 305-321.
- [10] 叶心, 叶明, 罗勇. ISG 型混合动力汽车驱动工况控制策略的试验研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 915-920.

[编辑: 周昱晨]

## 本文引用格式:

孙贵斌, 马腾腾, 唐友名, 等. 基于 Simulink 的 ISG 型客车混合动力系统的仿真研究[J]. 机电工程, 2016, 33(11): 1415-1420.

SUN Gui-bin, MA Teng-teng, TANG You-ming, et al. Simulation on ISG hybrid powertrain based on simulink[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(11): 1415-1420.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>