

# 插电式并联混合动力汽车仿真与能量管理策略

张湘湖,金玉秀,赵岩

烟台芝罘公路建设养护中心,山东 烟台 264004

**摘要:**以某插电式并联混合动力汽车为研究对象,基于 AMESim 仿真平台搭建由驾驶员模块、发动机模块、电池模块、车辆控制单元、变速器模块、电机模块等组成仿真模型,并设计能量管理策略。对全球轻型车辆测试循环(worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC)和 JC08 2 种不同工况下混动汽车的动力性和经济性进行仿真。结果表明:仿真车速与实际控制车速的匹配度几乎完全重合,仿真模型准确可靠;纯电模式下车速由 0 加速到 100 km/h 的加速时间为 8.53 s;WLTC 工况下油耗为 5.789 L/(100 km),比传统燃油车油耗节约 28.73%,JC08 工况下油耗 5.077 L/(100 km),比传统燃油车油耗节约 27.69%。

**关键词:**混合动力汽车;AMESim;动力性;经济性

**中图分类号:**U469.7

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2022)02-0092-07

**引用格式:**张湘湖,金玉秀,赵岩. 插电式并联混合动力汽车仿真与能量管理策略[J]. 内燃机与动力装置, 2022,39(2):92-98.

ZHANG Xianghu, JIN Yuxiu, ZHAO Yan. Simulation and energy management strategy of plug-in parallel hybrid electric vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(2):92-98.

## 0 引言

随着全球石油资源的不断消耗以及环境污染日益严重,零污染车辆受到更多的关注<sup>[1-4]</sup>,汽车电气化成为一个热门话题。由于电动汽车关键技术没有得到解决,如电车寿命有待提高、配套基础设施不完善等<sup>[5]</sup>,混合动力汽车是满足更清洁、更环保汽车需求的解决方案之一<sup>[6-7]</sup>。混合动力汽车包含两个或多个动力源,因此能量管理系统是混合动力汽车不可缺少的组成部分。通过适当的能量管理策略,混合动力汽车可以通过多种动力源之间的合作高效运行,减少燃料消耗和温室气体排放<sup>[8-9]</sup>。

仿真技术是汽车研发过程中的重要手段,虞卫飞等<sup>[10]</sup>采用 Simulink 平台研究了双电机串联混动系统的动力性和经济性;韩艳艳<sup>[11]</sup>通过 AMESim 和 Simulink 联合仿真设计了混合动力汽车的仿真平台,实现对发动机油耗和电池耗电量进行预测;白军伟<sup>[12]</sup>通过 Cruise 和 Simulink 软件主要对混合动力汽车的经济性进行了仿真。

本文中以某款插电式并联混合动力汽车为研究对象,基于 AMESim 搭建整车仿真模型,设计能量管理控制策略,预测发动机油耗和电池电量,为整车能量管理和控制奠定基础。

## 1 整车物理模型搭建

### 1.1 整车基本参数

搭建整车物理模型需要搭建整车的各个子模型。插电式并联混合动力汽车结构如图 1 示。插电式并联混合动力汽车的发动机驱动系统为主动动力源,电驱动系统为辅助动力源,发动机和电动机通过动力

收稿日期:2022-03-17

第一作者简介:张湘湖(1973—),男,山东烟台人,工程师,主要研究方向为土木工程动力机械,E-mail:617533981@qq.com。

耦合装置叠加。中速行驶时混合动力汽车发动机的燃油经济性最佳,因此能量管理策略为:在车速较低时,关闭发动机,由电池组向汽车输出能量;当车速较高时,发动机驱动车辆并为蓄电池充电,电池充满时,停止充电。混合动力电动汽车整车控制器根据油门踏板和制动踏板信号确定驾驶员的操作指令。整车主要技术性能参数如表1所示。

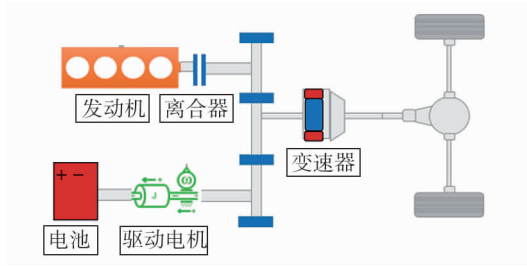


图1 混合动力汽车系统结构简图

表1 整车主要技术参数

整车质量/kg	满载质量/kg	车轮直径/m
1200	1750	0.381
迎风面积/m <sup>2</sup>	空气阻力因数	滑动阻力因数
2.28	0.32	0.0125

## 1.2 发动机模型

发动机作为混合动力汽车的主要动力源,直接影响整车的动力输出,其模型的准确性至关重要。考虑到发动机模型参数难以准确获取,通常是将静态模型应用于混合动力电动汽车的仿真中。

当高压电池处于亏电状态时,发动机需单独运行维持车辆的最高车速,因此,发动机的最大功率应不小于车辆保持最高车速所需的功率:

$$P_{\max} i_e \geq (f_0 + f_1 v_{\max} + f_2 v_{\max}^2) v_{\max}, \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 为发动机最大功率,kW; $i_e$ 为变速箱的传动比; $f_0$ 、 $f_1$ 、 $f_2$ 为滑行阻力因数; $v_{\max}$ 为最高车速,km/h。

## 1.3 驱动电机模型

对于并联式混合动力汽车,纯电动模式下驱动电机是车辆唯一动力来源,最大转矩应满足车辆在纯电模式下的动力性能要求(加速性能,爬坡能力等):

$$\int_0^a \frac{T_{p2} i i_e}{Rm} dt \geq v_t, \quad (2)$$

$$T_{p2} i_{1st} i_e \geq (mg \sin(\arctan(d_{\max})) + f_0 + f_1 v + f_2 v^2) R, \quad (3)$$

式中: $T_{p2}$ 为驱动电机最大转矩, $N \cdot m$ ;  $i$ 为变速箱速比; $i_1$ 为变速箱一档速比; $m$ 为车辆质量,kg; $g$ 为自由落体加速度, $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $a$ 为车辆加速度, $\text{m/s}^2$ ;  $v_t$ 为目标车速,km/h; $v$ 为实际车速,km/h; $t_a$ 为目标加速时间,s; $R$ 为车轮半径,m; $d_{\max}$ 为最大爬坡度,%。

在混合动力汽车电机达到最高转速时,需保证驱动电机在正常转速区间内运行,即其对应转速应低于最高转速:

$$\frac{n_{p,\max}}{i_1} \geq \frac{30v}{\pi R}, \quad (4)$$

式中: $n_{p,\max}$ 为电机最高转速,r/min; $i_1$ 为变速箱的最高挡速比。

## 1.4 传动系速比模型

在混合动力汽车电机达到最高转速时,需保证发动机和驱动电机运行在正常转速区间内,即除满足式(4)外,发动机转速需低于最高转速:

$$\frac{n_{e,\max}}{i_1} \geq \frac{30v}{\pi R}, \quad (5)$$

式中: $n_{e,\max}$ 为发动机最高转速,r/min。

当高压电池处于亏电状态时,发动机单独工作且需达到车辆最高车速,发动机最大转矩应不小于车辆保持最高车速所需的的车轮转矩:

$$T_{e,\max} i_1 i_e \geq (f_0 + f_1 v_{\max} + f_2 v_{\max}^2) R, \quad (6)$$

其中:  $T_{e,\max}$  为发动机最大转矩,  $\text{N}\cdot\text{m}$ 。

当高压电池电量较高时, 车辆低速爬坡, 发动机和驱动电机的输出功率需满足最大爬坡度要求, 发动机和驱动电机的最大转矩之和应不小于车辆保持最大爬坡度所需的转矩:

$$(T_{e,\max} + T_{p2})i_1i_e \geq (mgsin(\text{atan}(d_{\max})) + f_0 + f_1v + f_2v^2)R_0 \quad (7)$$

### 1.5 动力电池模型

动力电池电量应满足纯电工况下续航里程要求, 可按照等速法计算其所需电量。汽车等速行驶所需功率

$$P_{\text{etc}} = \frac{v_{\text{etc}}}{3600\eta_t} \left( mgf + \frac{C_D A v_{\text{max}}^2}{21.15} \right), \quad (8)$$

式中:  $v_{\text{etc}}$  为汽车等速行驶速度,  $\text{km}/\text{h}$ ;  $f$  为滑行阻力系数;  $\eta_t$  为传动系总效率;  $C_D$  为空气阻力系数;  $A$  为迎风面积,  $\text{m}^2$ 。

电机功率

$$P_m = P_{\text{etc}} / \eta_m, \quad (9)$$

式中  $\eta_m$  为电机效率。

续航里程所需总能量

$$W_{\text{road}} = P_m t = P_m L / v_{\text{etc}} = W_b \varepsilon_{\text{sos}}, \quad (10)$$

式中:  $t$  为行驶时间,  $\text{h}$ ;  $L$  为续航里程,  $\text{km}$ ;  $W_b$  为电池所需能量,  $\text{kW}$ ;  $\varepsilon_{\text{sos}}$  为电池组放电深度,  $\varepsilon_{\text{sos}} = 0.85$ 。

电池容积

$$C = \frac{1000P_{\text{etc}}L}{U_b \varepsilon_{\text{sos}} v_{\text{etc}} \eta_m}. \quad (11)$$

式中:  $U_b$  为输入电压,  $\text{V}$ 。

根据式(1)~(10)计算, 动力系统匹配参数如表2所示。

表2 动力系统参数匹配结果

发动机		驱动电机			动力电池				传动系统		
最大功率/ $\text{kW}$	最大转矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	最大功率/ $\text{kW}$	最大扭矩/ $(\text{N}\cdot\text{m})$	最大转速/ $(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	类型	结构形式	额定电压/ $\text{V}$	最大容量/ $(\text{A}\cdot\text{h})$	主减速器比	变速器挡位	变速箱比
62	124	32	186	4800	三元 铁锂电池	并联	360	32	4.25	5	3.42/1.81/1.28/ 0.98/0.77

## 2 整车仿真模型的建立

### 2.1 能量管理策略

搭建的插电式混合动力汽车仿真模型能量管理有4种工作模式, 能量管理策略流程如图2所示。

1) 纯电动模式: 当车速较低且电池电量充足时采用, 车辆需求转矩由驱动电机提供。

2) 发动机运行模式: 车速较低且电池剩余电量低于阈值, 或者车速较高时启用。

3) 混合动力工况: 车辆需求转矩大于发动机输出最佳转矩时, 发动机输出最佳转矩, 驱动电机提供剩余需求转矩, 汽车由发动机和驱动电机共同驱动; 车辆需要的转矩低于发动机的最佳转矩时, 汽车进入行驶充电模式, 发动机按照最佳转矩输出, 多余转矩带动驱动电机发电; 当车辆输出加速命令大于具体参数0.85且需求转矩大于驱动电机最大转矩时, 车辆需求转矩主要由发动机提供, 驱动电机提供剩余转矩。

4) 制动能量回收: 当制动力矩大于0, 汽车进入制动控制状况, 此时驱动电机作为发电机使用, 回收制动动能并给电池充电。

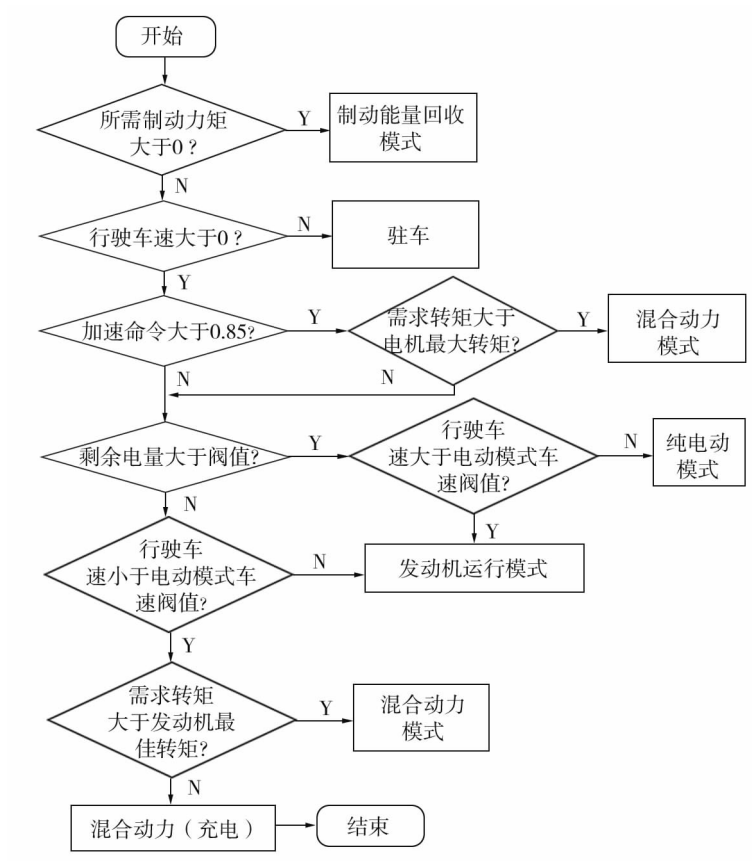


图 2 能量管理策略流程图

### 2.2 基于 AMESim 的整车物理模型

通过 AMESim 搭建整车的物理模型,如图 3 所示。该模型由驾驶模块、发动机模块、电池模块、车辆控制单元、变速器模块、电机模块等组成。

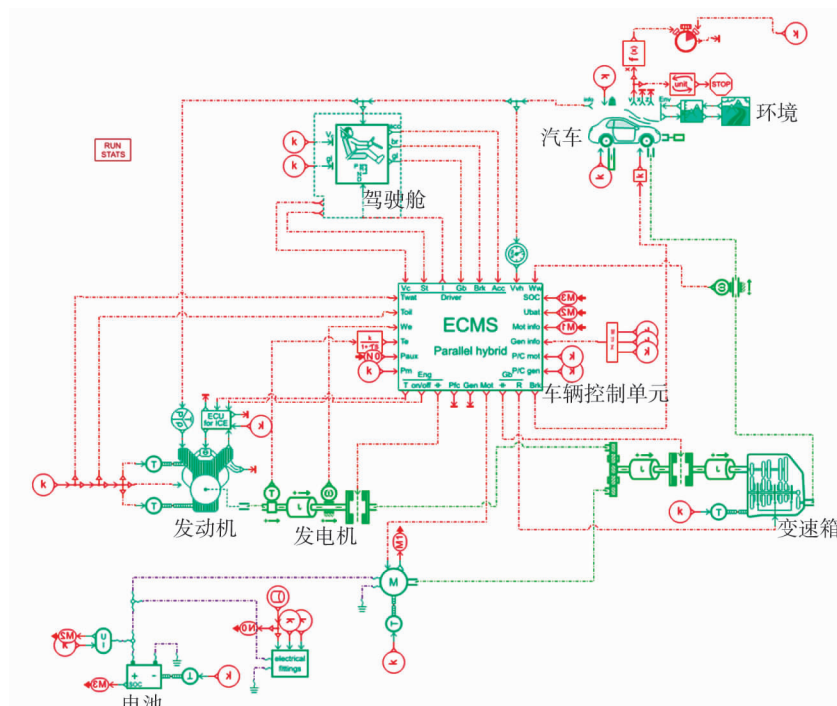


图 3 混合动力汽车仿真模型

能量管理策略为逻辑门限值,当低速行驶时车辆动力来源主要由电动机提供,同时发动机处于最佳转矩区域。

车辆控制单元为整车逻辑控制,可以实现车辆转矩需求、电机转矩需求、制动能量回收方案等功能。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 经济性仿真

循环工况下的经济性是汽车设计的重要指标之一,本文中对全球轻型车辆测试循环(worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC)、日本 JC08 工况进行仿真,并分析不同工况下的仿真车速对实际控制车速的跟随情况、电池荷电状态(state of charge, SOC)变化以及油耗变化。

WLTC 工况、JC08 工况下,混合动力汽车与传统燃油汽车的车速跟随曲线、混合动力汽车电池 SOC 变化曲线、混合动力汽车与传统燃油汽车的油耗对比曲线如图 4~9 所示。

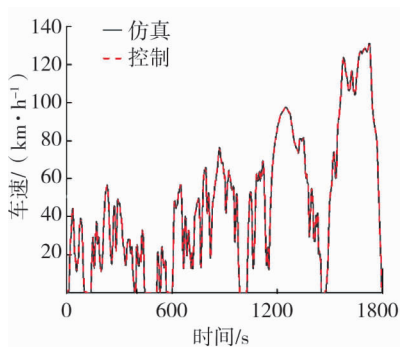


图4 WLTC 工况车速跟随曲线

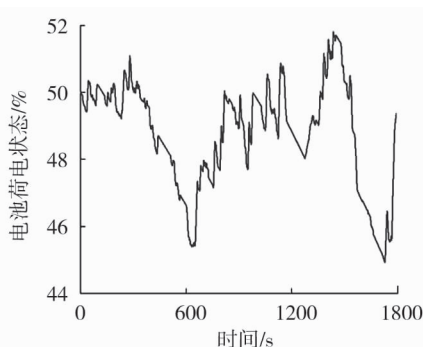


图5 WLTC 工况电池 SOC 变化曲线

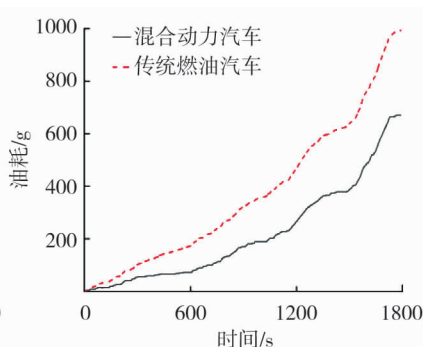


图6 WLTC 循环工况油耗对比曲线

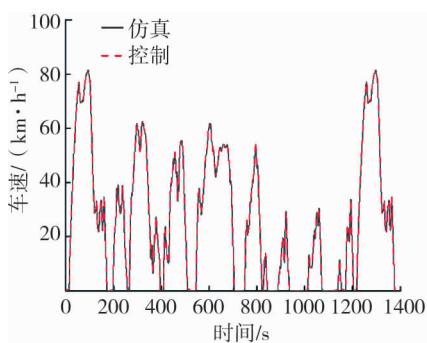


图7 JC08 工况车速跟随曲线

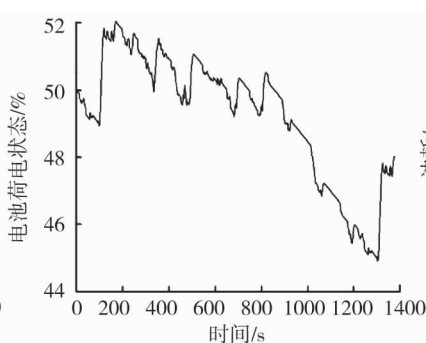


图8 JC08 工况电池 SOC 变化曲线

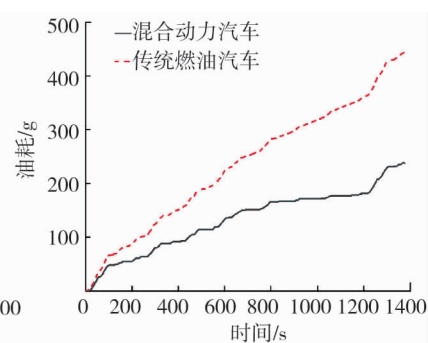


图9 JC08 工况油耗对比曲线

由图 4、7 可知:WLTC 工况、JC08 工况下的仿真车速与实际控制车速的匹配度几乎完全重合,搭建的仿真模型准确可靠,2 种工况下的车速跟随情况良好,满足各个循环工况动力性的要求。

由图 5、8 可知:在整个循环工况中,电池 SOC 不是一直上升或下降的,是随着工况的变化而不断变化的。电池初始、最终 SOC 及仿真时电池 SOC 的变化幅度如表 3 所示。由表 3 可知:WLTC 和 JC08 工况下电池 SOC 的变化幅度分别为  $-0.65\%$ 、 $-1.97\%$ ,电池 SOC 的变化幅度不大、基本保持平衡。各个工况下,混合动力汽车电池容量不会影响车辆的加速性能。

表 3 各工况电池 SOC 变化 %

工况	起始荷电状态	最终荷电状态	荷电状态变化幅度
WLTC	50	49.35	-0.65
JC08	50	48.03	-1.97

由图 6、9 可知:WLTC 和 JC08 工况下,混合动力汽车的燃油消耗比传统燃油车低,混合动力汽车更加省油。2 个循环工况下的燃油消耗换算成 100 km 油耗如表 4 所示。由表 4 可知:WLTC 工况下,混合动力汽车相对于燃油车节油约 28.73%;JC08 工况下,混合动力汽车相对于燃油车的节油约 27.69%。

### 3.2 动力性仿真

车辆动力性是整车主要的性能之一,包括 0~100 km/h 加速性能、车辆爬坡性能等。本文中通过建立的模型对混动车辆纯电模式、纯燃油模型、混动模式下的动力性能进行仿真,不同模式下最大车速和最大爬坡度仿真结果如图 10、11 所示。

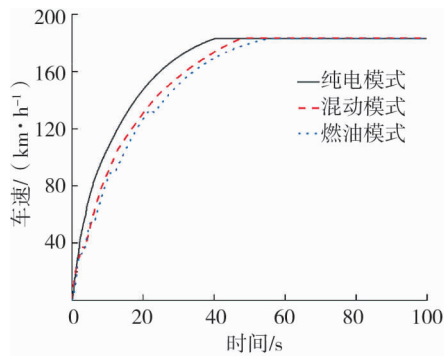


图 10 不同模式下最大车速和加速性能

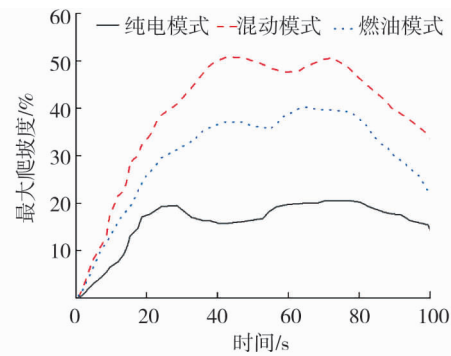


图 11 不同模式下最大爬坡度

由图 10 可知:汽车的最大车速为 183.25 km/h;纯电、混动和燃油模式下,车速由 0 加速到 100 km/h 的时间分别为 8.53、10.67、14.36 s。纯电模式下 0~100 km/h 加速时间符合国家 863 计划电动汽车重大专项——电动汽车招标书中规定的电动汽车加速性能指标要求(0~100 km/h 的加速时间小于 10 s)。由图 11 知,混动模式下最大爬坡度为 51.32%,相对于燃油模式(最大爬坡度 39.23%)提升了 23.52%。混合动力模式下动力性能比传统的燃油车更好,符合整车设计的动力性要求。

## 4 结论

以某款插电混合动力汽车为研究对象,基于 AMESim 建立其仿真模型,并在 WLTC 和 JC08 2 种工况下,对混动汽车的动力性和经济性进行仿真。

1) 仿真车速与实际控制车速的匹配度几乎完全重合,仿真模型准确可靠,仿真模型能够用于评估该混动车型的可行性。

2) 不同循环工况下,车速跟随和电池 SOC 变化情况均符合要求,且混合动力汽车比传统燃油车更加省油。

### 参考文献:

- [1] LUO Y, CHEN T, ZHANG S, et al. Intelligent hybrid electric vehicle ACC with coordinated control of tracking ability, fuel economy, and ride comfort[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2303–2308.
- [2] XIA C Y, ZHANG C. Real-time optimization control algorithm of energy management strategy for hybrid electric vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(3): 508–517.
- [3] ZHAO X C, GUO G. Survey on energy management strategies for hybrid electric vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 321–334.
- [4] JOHRI R, FILIPI Z. Optimal energy management of a series hybrid vehicle with combined fuel economy and low-emission

- objectives[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; Part D: Journal of Automobile Engineering, 2014, 228(12):1424-1439.
- [5] ZHANG P, YAN F, DU C J. A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2015, 48:88-104.
- [6] ALI A M, SÖFFKER D. Towards optimal power management of hybrid electric vehicles in real-time: a review on methods, challenges, and state-of-the-art solutions[J]. Energies, 2018, 11(3):476.
- [7] MARTINEZ C M, HU X, CAO D, et al. Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: recent progress and a connected vehicles perspective[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6):4534-4549.
- [8] 杜爱民, 岳超, 陈焱伊. 基于 AMESim 与 MATLAB 的混合动力汽车联合仿真平台设计[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(5):73-79.
- [9] 韩懿, 高晓梅. 基于 AMESim 的插电式并联混合动力汽车能量管理策略仿真分析[J]. 交通节能与环保, 2020, 16(1):5-9.
- [10] 虞卫飞, 杜成磊, 代永刚. 双电机串并联混动系统性能仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2021, 38(3):56-61.
- [11] 韩艳艳. 基于 Cruise 和 Simulink 软件对可充电式串联混动汽车经济性仿真[J]. 内燃机与动力装置, 2016, 33(5):59-63.
- [12] 白军伟. 基于 AMESim 的插电式混合动力汽车动力性和经济性仿真研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.

## Simulation and energy management strategy of plug-in parallel hybrid electric vehicle

ZHANG Xianghu, JIN Yuxiu, ZHAO Yan

Yantai Zhifu Highway Construction and Maintenance Center, Yantai 264004, China

**Abstract:** Taking a plug-in parallel hybrid electric vehicle as the research object, a simulation model composed of driver module, engine module, battery module, vehicle control unit, transmission module and motor module is built based on AMESim simulation platform, and the energy management strategy is designed. The dynamic performance and economy of hybrid vehicles under two different working conditions of world harmonized light vehicles test cycle (WLTC) and JC08 are simulated. The results show that the simulated speed meet the actual control speed quite well, which means the simulation model is accurate and reliable. In pure electric mode, the acceleration time of 0 ~ 100 km/h vehicle speed is 8.53 s. The fuel consumption under WLTC is 5.789 L/(100 km) which is 28.73% less than that of traditional vehicle. The fuel consumption under JC08 is 5.077 L/(100 km) which is 27.69% less than that of traditional vehicle.

**Keywords:** hybrid electric vehicle; AMESim; dynamic property; economy

(责任编辑:郎伟锋)