

文章编号:1671-8879(2014)05-0161-08

# 混联式电动汽车动力系统的建模和性能仿真

李宪民

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了更好地评价电动汽车各种性能,在对传统轿车驱动系统的方案和传递路线进行设计和动力源优化匹配的基础上,依据整车结构,通过对传动系统进行设计、优化和匹配的同时,对电机组件进行选型与匹配,利用 Matlab/Simulink 软件,对混合动力电动汽车的传动系统和控制策略进行仿真建模,在 CYC\_UDDS 和 CYC\_1015 循环工况下对整车动力性和排放性能进行了仿真研究。结果表明:在保证原有车型动力性的前提下,节油率分别可以达到 24% 和 30%,排放性能也得到了极大的改善。这对中国开展电动汽车仿真研究具有一定参考作用。

**关键词:**汽车工程;混合动力车电动汽车;传动系统;制动能量回收;建模与仿真

中图分类号:U464

文献标志码:A

## Powertrain system modeling and performance simulation about parallel-series hybrid electric vehicle

LI Xian-min

(School of Automotive Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to better evaluate the various performance of the electric vehicle, based on the design of traditional vehicle driving system and transmission line and its power optimisation, the motor component was selected and matched after the design, optimization and match of the driving system according to the vehicle structure, and then the drive system and control strategy of the hybrid electric vehicle were modeled and simulated in Matlab/Simulink environment. The performance of the power and emission was simulated and researched under the CYC\_UDDS and CYC\_1015 cycle conditions. The results show that the premise of dynamic performance, oil saving rate can reach to 24% and 30% respectively, and the emission performance has been greatly improved in the original models. It provides some references for the study on the simulation of electric vehicle in our country. 6 tabs, 20 rigs, 11 refs.

**Key words:** automobile engineering; hybrid electric vehicle; drive system; braking energy recovery; modeling and simulation

## 0 引言

汽车的出现和发展推动了人类文明的发展,但

现在却成为世界能源危机和环境污染的罪魁祸首。为保证汽车工业的可持续发展,研究和开发清洁节能的新型电动汽车已成为各国的共识,全球各大汽

车公司争相研究无排放污染的电动汽车,中国从“八五”以后也开始研究和发展此项目,以使电动汽车与燃油汽车竞争<sup>[1]</sup>。但是纯电动汽车的续航里程还是无法与燃油汽车相比,混合动力电动汽车是在找到理想车载电源之前,纯电动汽车发展暂时受到阻挠而发展起来的新型汽车。但是由于条件所限,混合动力汽车的基本性能,通常都是在进行基本性能道路试验之后才能给予评价。这样做不但成本高,开发周期长,而且在产品设计、开发阶段,对方案的确定、结构参数的选择以及传动系与发动机的匹配等具有一定的盲目性,甚至会遗漏较优的方案,而造成浪费<sup>[2]</sup>。张翔等开展了电动汽车仿真软件 ADVISOR 的应用<sup>[2]</sup>,解决了研究电动汽车开发软件投资大,周期长问题;董晓倩等利用 ADVISOR 软件对常规汽车性能仿真进行了研究<sup>[3]</sup>,解决了目前中国研制电动汽车的燃眉之急。为此,本文选择不加控制道路试验方法,利用 Matlab/Simulink 软件对整车进行仿真,来研究混合动力电动车的燃油经济性和排放性能,分析整车运行状况,可以比较全面地考察和评估混合动力汽车的各种性能,为电动车开发设计、离线评估和开展电动汽车仿真软件的应用提供参考。

## 1 混合动力电动汽车驱动系统的方案设计

### 1.1 方案设计

方案设计期望达到的目的:①满足车辆动力性的前提下,尽可能提高汽车的燃油经济性和降低废气排放;②一条驱动线路发生故障时,能保证车辆拥有一定的功率输出和续航里程;③能量转换效率和利用效率尽量高。

### 1.2 结构设计

以 B70 轿车为基础,在保障整车技术参数不变的前提下,对传动系统进行了重新设计,设计如图 1 所示。

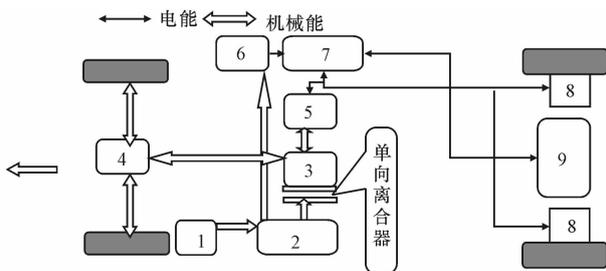


图 1 混合动力汽车驱动系统结构

Fig. 1 Drive system structure diagram of hybrid electric vehicle

注:1. 发动机;2. 动力分配装置;3. 变速器;4. 驱动桥;5. 发电/电动机;6. 发电机;7. 逆变器;8. 后轮电动机;9. 蓄电池

### 1.3 车辆的工作模式及功率分配分析

由图 1 所示,混合动力传动系统主要由发动机、ISG 电机、离合器、变速器等以不同的方式组合,可实现汽车的自动起停、高效输出/输入大功率、功率补偿和制动能量回收等多种工作模式。整车动力设备是发动机和 ISG 电机。其组合方式是在发动机动力输出轴上安装 ISG 电机,起动时 ISG 电机可以作为发动机的起动机,正常运行时动力可互相转换;车速较低时,发动机的输出功率可以完全满足车辆克服行驶阻力的需求,控制系统会起动 ISG 电机工作,将发动机富余的机械能转换成电能的形式给蓄电池充电;在大功率工况时,ISG 电机和发动机共同工作,此时 ISG 电机的动力通过发动机的输出轴与发动机动力叠加<sup>[3]</sup>;当车辆处于减速和制动的工况时,混合动力电动汽车对该工况产生的能量进行回收和再利用。

## 2 混合动力电动汽车动力源的确定和功率的优化匹配

汽车总功率是根据对整车的动力性(最高车速、加速性能、爬坡要求)的要求来确定的。

动力性要求为:①车辆的最高车速  $v_{\max} \geq 150$  km/h;②0~100 km/h 的加速时间  $t \leq 15$  s;③最大爬坡度  $i \geq 30\%$ ,速度  $v = 25$  km/h。

根据动力性要求确定出车辆的最高车速  $v_{\max}$ 、车辆的爬坡性能和加速性能确定的最大功率分别为

$$P_{\max 1} = 81.25 \text{ kW}$$

$$P_{\max 2} = 69.37 \text{ kW}$$

$$P_{\max 3} = 69.53 \text{ kW}$$

式中: $P_{\max 1}$ 为最高车速下功率; $P_{\max 2}$ 为爬坡时最大功率; $P_{\max 3}$ 为加速时最大功率。

以此可以确定出车辆所需要的最大可选功率  $P_{\text{all}}$ 为

$$P_{\text{all}} \geq P_{\max} = \max(P_{\max 1}, P_{\max 2}, P_{\max 3})$$

考虑到车辆在行驶过程中有附加功率的消耗,取  $P_{\text{all}} \geq 90 \text{ kW}$ 。

### 2.1 动力电池组的参数设计

选择容量为 84 Ah 的镍氢电池。单体电池容量为 8.4 Ah,每个单元采用 10 个单体电池并联在一起,单体电池的电压为 24 V,电阻为 0.025  $\Omega$ 。

#### 2.1.1 纯电动行驶里程

电池组容量要满足车辆能行驶一定的里程<sup>[4]</sup>。电池数量  $n$  计算式为

$$n = 1\ 000 \frac{p_c(S/v_c)}{UC} \quad (1)$$

取纯电动行驶时的速度  $v_e = 65 \text{ km/h}$ , 车辆纯电动行驶里程  $S = 100 \text{ km}$ 。

计算得,  $n \approx 32$ 。

### 2.1.2 功率需求因素

电池组容量需要满足纯电动行驶时电动机最大功率的需求<sup>[4]</sup>。电池数量计算式为

$$n' = \frac{P_{\max}}{[2E_b^2/(9R_b)]\eta_t} \quad (2)$$

式中:  $E_b$  为电压;  $\eta_t$  为效率;  $R_b$  为电阻。

计算得  $n' \approx 16$ , 综合考虑取电池数量  $n = 34$  块。

## 2.2 电动机的参数设计

### 2.2.1 主电动机的参数设计

混合动力汽车对于主电动机的要求是, 当电池电量充足时能够独立驱动汽车行驶, 并且独立工作时, 满足: ① 车辆的最大爬坡度  $i \geq 15\%$ ; ②  $0 \sim 100 \text{ km/h}$  的加速时间  $t \leq 20 \text{ s}$ 。

计算得  $P_{\max} = 55.62 \text{ kW}$

电动机功率越大越经济, 但所需电池组数目也就越多, 而且增加了整车的质量和制造成本, 从经济性和制造

成本两方面均衡考虑, 电动机最大功率  $P_D \geq 60 \text{ kW}$ 。

### 2.2.2 辅助电动机的参数设计

辅助电动机主要是协同发动机或者主电动机工作。主电动机选择永磁电动机, 额定功率  $40 \text{ kW}$ , 最高功率  $62 \text{ kW}$ ; 辅助电动机选择轮毂式永磁电动机, 额定功率  $4 \text{ kW}$ , 最高功率  $5 \text{ kW}$ 。

## 2.3 发动机的参数设计

混合动力汽车对于发动机的要求是, 发动机能够独立工作, 并且独立工作时满足:

(1) 车辆满足最高车速  $v_{\max} \geq 90 \text{ km/h}$ , 需求的功率为:  $P_F \geq 48.75 \text{ kW}$ ;

(2) 车辆满足最大爬坡度  $i \geq 15\%$ , 需求的功率为:  $P_F \geq 45.78 \text{ kW}$ , 发动机功率的选择为:  $P_D \geq 50 \text{ kW}$ 。

## 3 混合动力系统主要机构建模

### 3.1 基于 Matlab/Simulink 的整车模型

汽车在行驶过程中必须克服车辆受到的所有阻力, 才能顺利行驶。在 Matlab/Simulink 环境下建立整车的仿真模块, 如图 2 所示。

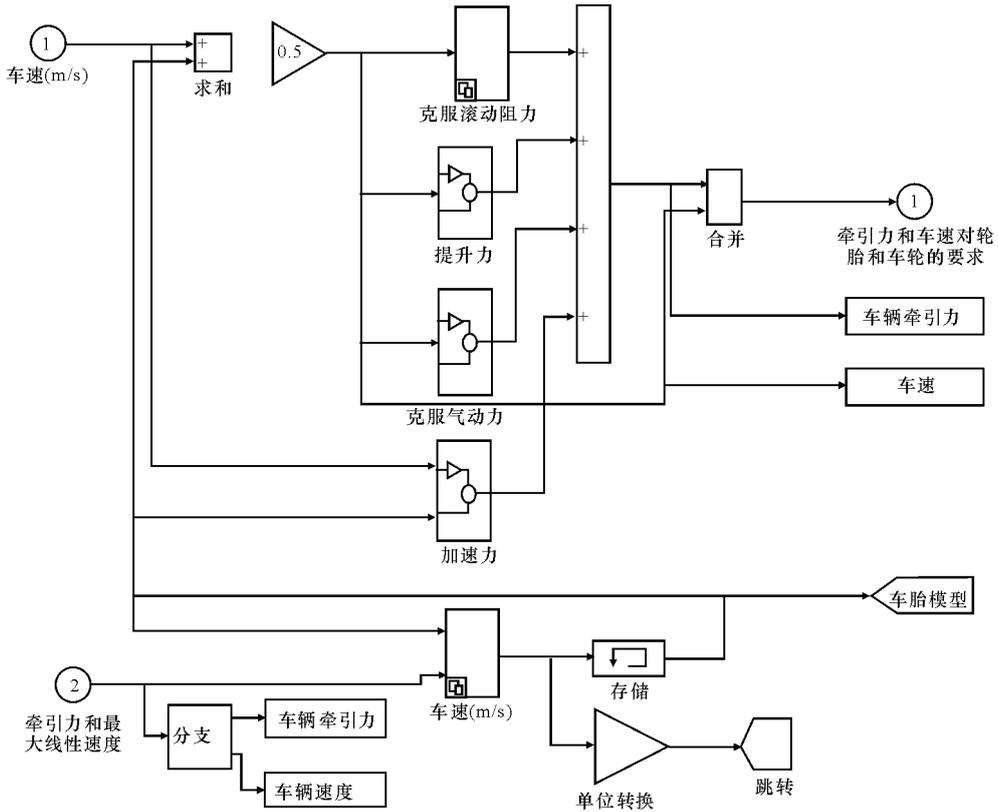


图 2 混合动力汽车 Simulink 模型

Fig. 2 Simulink model of hybrid electric vehicle

### 3.2 基于 Matlab/simulink 的发动机模型

发动机选用传统内燃机, 它是整车的最主要动力源, 所以建立准确的发动机模型, 对以后的仿真精

度的提高作用重大。建立的 Simulink 模型如下页图 3 所示。

该模型通过台架试验测试发动机外特性曲线和



表 2 CYC\_UDDS 循环工况下车辆的排放

Tab. 2 Vehicle emissions on CYC\_UDDS circulation conditions

HC 排放量/(g · km <sup>-1</sup> )	CO 排放量/(g · km <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> 排放量/(g · km <sup>-1</sup> )
0.062	0.085	0.028

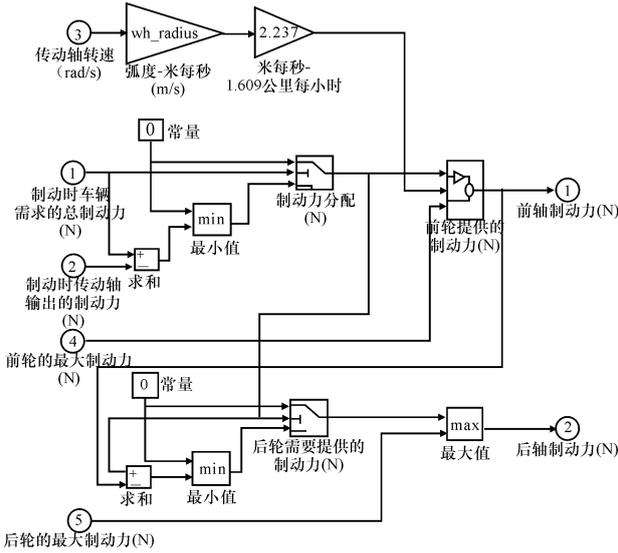
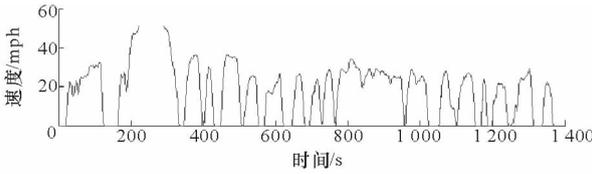
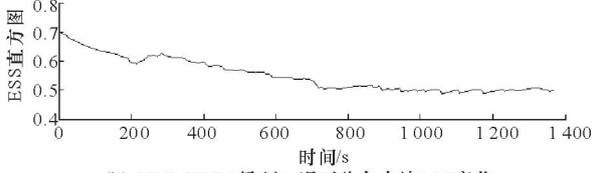


图 4 车辆制动时的控制策略模型

Fig. 4 Control strategy model of car braking



(a) CYC\_UDDS 道路循环汽车的行驶速度



(b) CYC\_UDDS 循环工况下动力电池 SOC 变化

图 5 CYC\_UDDS 循环工况下动力电池 SOC 变化和尾气排放曲线  
Fig. 5 Power battery SOC change and emissions curve on CYC\_UDDS circulation conditions

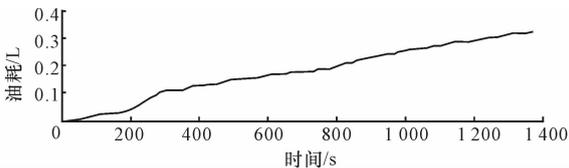


图 6 混合动力汽车在 CYC\_UDDS 循环工况下的发动机油耗  
Fig. 6 Engine fuel consumption of hybrid electric vehicle on CYC\_UDDS circulation conditions

图 8、图 9 为 CYC\_UDDS 工况下电动机的工作点图和扭矩输出。从图 8 可知:电动机在 CYC\_UDDS 工况下的扭矩输出主要集中在 20~100 N · m 范围,最大扭矩为 200 N · m 左右;从图 9 可知,电动机经常工作的区域所需求的扭矩低于 159 N ·

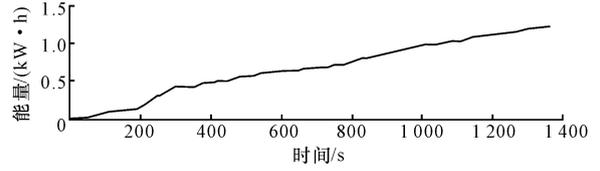


图 7 混合动力汽车在 CYC\_UDDS 循环工况下的制动能量回收  
Fig. 7 Braking energy recovery of hybrid electric vehicle on CYC\_UDDS circulation conditions

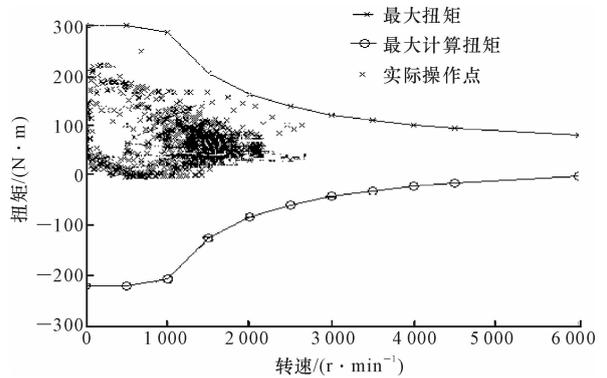


图 8 CYC\_UDDS 循环工况下电动机的工作点  
Fig. 8 Working point figure of motor on CYC\_UDDS circulation conditions

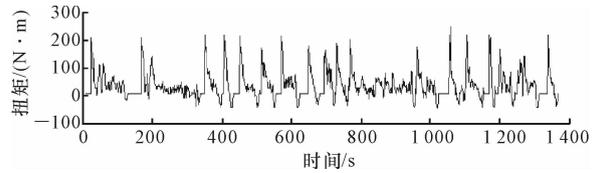


图 9 CYC\_UDDS 循环工况下电动机的扭矩输出  
Fig. 9 Torque output figure of motor on CYC\_UDDS circulation conditions

m,电动机可以正常工作,同时,电动机的过载能力,保证电动机峰值时车辆动力性的需求<sup>[7]</sup>。

从下页图 10、图 11 可知,发动机工作时的扭矩输出主要集中在 45~85 N · m 之间,峰值扭矩接近于 100 N · m,满足设计要求的发动机的最大功率不低于 50 kW,所以在 CYC\_UDDS 循环工况下,发动机能够正常工作,并且工作效率较高。

下页图 12 所示为车辆在 CYC\_UDDS 工况下电池的充电和放电效率,此工况下电池的充电主要来源于制动能量的回收。仿真结果表明,电池的充电效率主要集中在 0.9 左右,由于在此工况下,速度变化频繁,减速制动较多,电池的充电效率较高。电池放电主要是为电动机提供电能,以满足车辆正常行驶时的动力需求<sup>[8]</sup>。

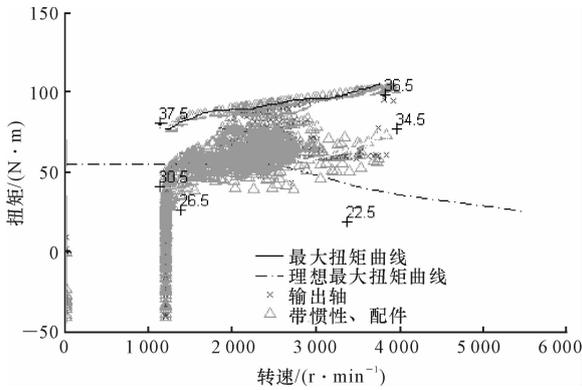


图 10 CYC\_UDDS 循环工况下发动机的工作点

Fig. 10 Working point figure of engine on CYC\_UDDS circulation conditions

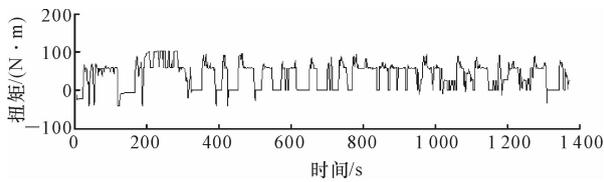


图 11 CYC\_UDDS 循环工况下发动机的扭矩输出

Fig. 11 Torque output figure of engine on CYC\_UDDS circulation conditions

表 3 CYC\_1015 循环工况下车辆的加速度、减速度及油耗变化

Tab. 3 Change of acceleration, deceleration and fuel consumption on CYC\_1015 circulation conditions

电池初始 SOC	仿真结束 SOC	平均车速/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	平均加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	最大减速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	平均减速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	发动机 油耗/L	制动能量 回收/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )
0.7	0.565	53.5	4.2	3	-4.4	-3.4	0.285	0.07

表 4 CYC\_1015 循环工况下车辆的排放

Tab. 4 Vehicle emissions on CYC\_UDDS circulation conditions

HC 排放量/ ( $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ )	CO 排放量/ ( $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ )	NO <sub>x</sub> 排放量/ ( $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ )
0.073	0.098	0.032

## 5 混合动力电动汽车的经济性与排放性分析

### 5.1 车辆的燃油经济性分析

电动汽车的研发,主要目的是有效改善汽车的燃油经济性和排放,旨在通过合理设计车辆结构,选择合适的部件,优化匹配参数,在一定的控制策略下,使其在保证动力性的前提下,能够最大化的改善燃油经济性和排放性能<sup>[10]</sup>。论文中选择了 CYC\_UDDS 和 CYC\_1015 两种循环工况进行仿真研究,下面分别讨论在这两种工况下的汽车燃油经济性和排放性能。

下页表 5 为混合动力汽车在 CYC\_UDDS 和 CYC\_1015 工况下的能量消耗。仿真结果表明,车辆在 CYC\_UDDS 工况下的等效百公里油耗为 5.9 L/100 km,节油率约为 24%;在 CYC\_1015 工况下的等效百公里油耗为 5.4 L/100 km,节油率约为 30%。从以上两组数据可以看出,车辆的节油效果

### 4.2 CYC\_1015 循环工况下整车性能仿真

CYC\_1015 道路循环工况是日本城市道路循环标准,仿真结果如下页图 13~图 15 所示。加速度、减速度及油耗的变化如表 3 所示。

下页图 16、图 17 所示为 CYC\_1015 循环工况下电动机工作点图和输出扭矩。仿真结果表明,CYC\_1015 工况下,电动机的输出扭矩主要集中在 0~100 N·m,峰值扭矩在 100 N·m 左右,说明在此工况下,电动机工作性能良好,其动力指标能够满足车辆对于动力性的需求<sup>[9]</sup>。

下页图 18、图 19 所示为发动机在 CYC\_1015 工况下的工作点图和扭矩输出。从仿真结果看,发动机的输出扭矩主要集中在 0~65 N·m 之间,并且在循环仿真中,发动机的扭矩输出较为平顺,无较大波动,发动机能够正常工作。

下页图 20 所示为 CYC\_1015 工况下发电机扭矩输出图。仿真结果表明,发电机的输出扭矩主要集中在 0~15 N·m 之间,CYC\_1015 工况下车辆的加、减速较少速度变化幅度较小,此工况下,发电机可回收的制动能量较少。

明显。由于此结构采用了 3 个电机,当行驶路况复杂多变时,车辆可回收的制动能量较多,发动机的工作得到了极大的改善,这对于车辆燃油经济性的提高非常有利<sup>[11]</sup>。

### 5.2 车辆的排放性能分析

下页表 6 是按《轻型汽车污染物排放限值及测量方法》(GB18352.3-2005)(中国 IV 阶段),对混合动力汽车在 CYC\_UDDS 和 CYC\_1015 工况下所得的尾气排放。从表中可以看出,2 种工况下,车辆的尾气排放均低于国家标准规定的排放限值。

## 6 结 语

(1)设计了一套新型的并且适应现阶段中国社会发展需要的混合动力电动汽车结构。

(2)对传动系统的主要部件进行了参数设计和理论计算,并在此基础上分别对整车和制动能量回收控制策略进行了 Simulink 建模。

表 5 混合动力汽车的能源消耗

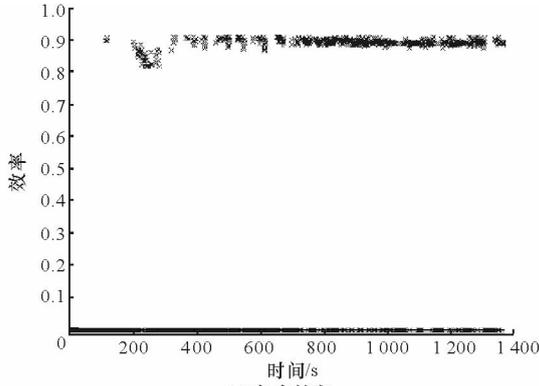
Tab. 5 Energy consumption of hybrid electric vehicle

循环工况	仿真里程/km	电池初始 SOC	电池结束 SOC	电耗/(kW·h)	油耗/L	制动能量回收/(kW·h)	等效百公里油耗/L	原车百公里油耗/L
CYC_UDDS	12.0	0.7	0.498	8.62	0.336	1.248	5.9	7.8
CYC_1015	9.8	0.7	0.575	11.50	0.285	0.070	5.4	7.8

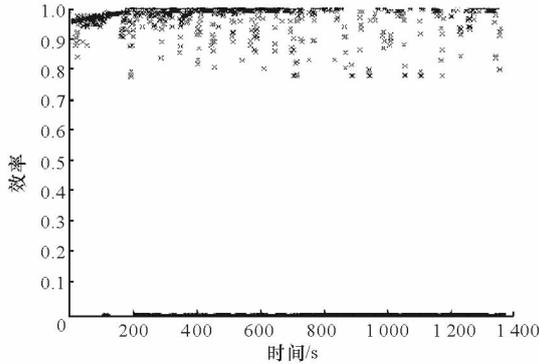
表 6 混合动力汽车的尾气排放

Tab. 6 Automobile exhaust pollution of hybrid electric vehicle

循环工况	HC 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )	国标 HC 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )	CO 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )	国标 CO 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )	国标 NO <sub>x</sub> 排放量/(g·km <sup>-1</sup> )
CYC_UDDS	0.062	0.13	0.085	1.81	0.028	0.1
CYC_1015	0.073	0.13	0.098	1.81	0.032	0.1



(a) 充电效率



(b) 放电效率

图 12 CYC\_UDDS 循环工况下动力电池的充电效率和放电效率

Fig. 12 Charging and discharging efficiency of power battery on CYC\_UDDS circulation conditions

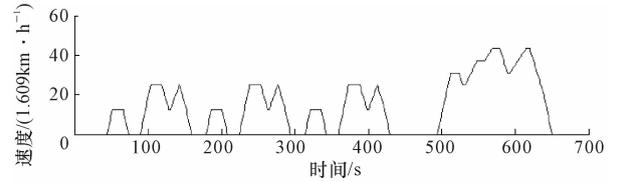
(3) 以奔腾 B70 轿车为例,对整车进行了 CYC\_UDDS 和 CYC\_1015 循环工况下的性能仿真研究。结果表明,车辆的节油率可以分别达到 24% 和 30%,其排放性能也得到了极大的改善,HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 的排放量均低于国家标准所规定的值。

(4) 为中国电动汽车的设计和研发提供了新的思路和研究方法,缩短了研发试制过程。

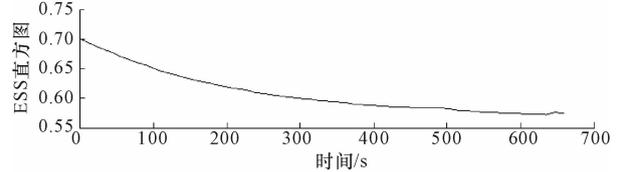
参考文献:

References:

[1] 刘潇潇,漆文辉,黎曦,等.电动汽车及其发展趋势分析[J].湖南电力,2010,30(5):59-62.  
LIU Xiao-xiao, QI Wen-hui, LI Xi, et al. Research on



(a) CYC\_1015 道路循环汽车的行驶速度



(b) CYC\_1015 循环工况下动力电池 SOC 变化

图 13 车辆在 CYC\_1015 循环工况下的动力电池 SOC 变化曲线和尾气排放曲线

Fig. 13 Power battery SOC change and emissions curve on CYC\_1015 circulation conditions

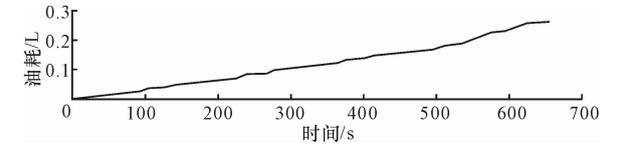


图 14 混合动力电动汽车在 CYC\_1015 循环工况下的发动机油耗

Fig. 14 Engine fuel consumption of hybrid electric vehicle on CYC\_1015 circulation conditions

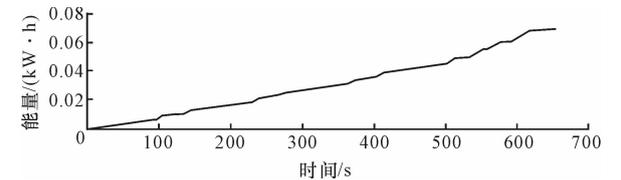


图 15 混合动力电动汽车在 CYC\_1015 循环工况下的制动能量回收

Fig. 15 Braking energy recovery of hybrid electric vehicle on CYC\_1015 circulation conditions

electric vehicle and its developing trend[J]. Hunan Electric Power, 2010, 30(5): 59-62. (in Chinese)

[2] 张翔,赵韩,钱立军,等.电动汽车仿真软件 ADVISOR 的应用[J].交通科技与经济,2004,(3):40-43.  
ZHANG Xiang, ZHAO Han, QIAN Li-jun, et al. Ap-

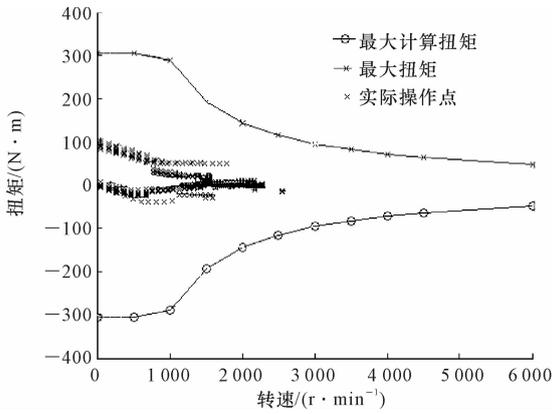


图 16 CYC\_1015 循环工况下电动机的工作点

Fig. 16 Working point figure of motor on CYC\_1015 circulation conditions

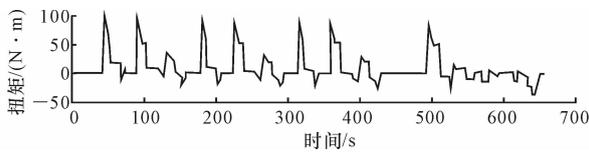


图 17 CYC\_1015 循环工况下电动机的扭矩输出

Fig. 17 Torque output figure of motor on CYC\_1015 circulation conditions

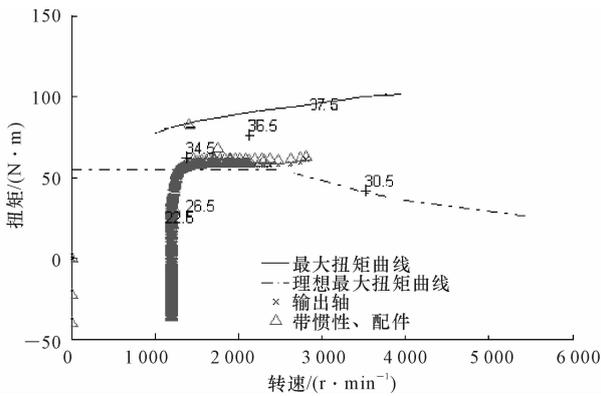


图 18 CYC\_1015 循环工况下发动机的工作点

Fig. 18 Working point figure of engine on CYC\_1015 circulation conditions

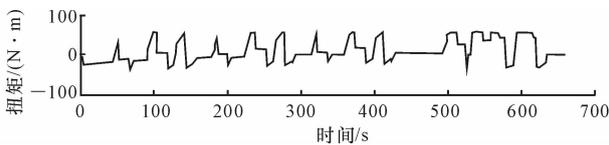


图 19 CYC\_1015 循环工况下发动机的扭矩输出

Fig. 19 Torque output figure of engine on CYC\_1015 circulation conditions

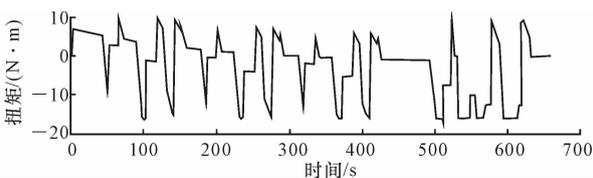


图 20 CYC\_1015 循环工况下发电机的扭矩输出

Fig. 20 Torque output figure of generator on CYC\_1015 circulation conditions  
application of electric vehicle simulation software ADVISOR[J]. Technology & Economy in Areas of Com-

munications, 2004, (3): 40-43. (in Chinese)

[3] 董晓倩, 管卫华, 高俊文. 基于 ADVISOR 的常规汽车性能仿真研究[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2011, 10(1): 65-67.

DONG Xiao-qian, GUAN Wei-hua, GAO Jun-wen. Simulation of conventional vehicle performance base on ADVISOR[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2011, 10(1): 65-67. (in Chinese)

[4] 倪光正, 倪培宏, 熊素铭. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车-基本原理、理论和设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

NI Guang-zheng, NI Pei-hong, XIONG Su-ming. Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles: fundamentals, theory and design second edition[M]. Beijing: China Mechine Press, 2008. (in Chinese)

[5] 刘博, 杜继宏, 齐国光. 电动汽车制动能量回收控制策略的研究[J]. 电子技术应用, 2004, 30(1): 34-36.

LIU Bo, DU Ji-hong, QI Guo-guang. The research of control algorithm of electrical vehicle braking energy recovery[J]. Application of Electronic Technique, 2004, 30(1): 34-36. (in Chinese)

[6] Ockwell D G, Watson J, MacKerron G, et al. Key policy considerations for facilitating low carbon technology transfer to developing countries[J]. Energy Policy, 2008, 36(11): 4104-4115.

[7] 程鸾, 冯能莲, 李克强, 等. ADVISOR 混合动力电动汽车仿真系统的二次开发及应用[J]. 汽车工程, 2004, 26(3): 249-252.

CHENG Luan, FENG Neng-lian, LI Ke-qiang, et al. Redevelopment and Its application of powertrain simulation system for hybrid electric vehicle based on ADVISOR[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(3): 249-252. (in Chinese)

[8] Gao W Z, Porandla S K. Design optimization of a parallel hybrid electric powertrain[C]//IEEE. Conference on Vehicle Power and Propulsion, 2005. Chicago: IEEE, 2005: 589-596.

[9] 吴光强, 孙贤安. 汽车自动变速器发展综述[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 1478-1483.

WU Guang-qiang, SUN Xian-an. Development survey of automobile automated transmission[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(10): 1478-1483. (in Chinese)

[10] Kulkarni M, Shim T, Zhang Y. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(2): 168-182.

[11] 陈全世, 朱家琏, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

CHEN Quan-shi, ZHU Jia-lian, TIAN Guang-yu. Advanced electric vehicle technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)