

文章编号:1672-9331(2018)04-0080-07

混合动力电动汽车无级变速一动力耦合机构

刘志强, 马源晖, 向青青

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提高混合动力电动汽车燃油经济性,设计了一种五杆行星轮系动力耦合机构。该机构利用双行星排实现三动力耦合,其中,发动机与行星架相连,电机 1 通过链轮 1 和太阳轮 1 相连,电机 2 和太阳轮 2 相连,并通过链轮 2 把动力传到驱动桥。推导了输出轴转速与三个动力源转速的关系,传动比分析表明,该机构在实现动力耦合的同时,还能在运行过程中无级变速。对启动、起步、加速和上坡、巡航、滑行、刹车制动、低速纯电动和倒车等 8 种运行工况进行了能量流动路径分析,采用 Advisor 软件在某车型上对耦合机构进行了新欧洲行驶工况仿真验证。研究结果表明,回收的制动能量增加了 45 kJ,回收率提高了 3.42%,有效地提高了整车燃油经济性。

关键词: 动力耦合机构; 五杆行星轮系; 混合动力电动汽车; 无级变速; 传动比; 能流图; 仿真
中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A

Continuously variable transmission-power coupling mechanism of hybrid electric vehicle

LIU Zhi-qiang, MA Yuan-hui, XIANG Qing-qing

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy of hybrid electric vehicles, a dynamic coupling mechanism of five rod planetary gear train was designed, using double planetary rows to couple three power sources, in which the engine was connected to the planet frame, the motor 1 was connected to the sun wheel 1 by the sprocket 1, and the motor 2 was connected to the sun wheel 2. The power was transferred to driving bridge through the sprocket 2. The relationship between the rotational speed of the output shaft and that of three power sources were derived. The analysis of transmission ratio showed that this mechanism could realize continuously variable transmission in operation while achieving dynamic coupling. The energy flow analysis was carried out under the operating conditions of engine launching, starting, accelerating and uphill, cruising, skidding, braking, low speed pure electric power and backing-up. The Advisor software was used to verify the effects of this coupling mechanism in a model vehicle under the new European driving condition. The results showed that the recovery of braking energy was increased by 45 kJ, and the recovery rate was increased by

收稿日期:2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572055)

通讯作者:刘志强(1970-),男,湖南湘乡人,长沙理工大学教授,博士,主要从事汽车节能减排与汽车动力学方面的研究。E-mail:lzq0228@126.com

3.42%。The fuel economy of the hybrid electric vehicle was improved effectively.

Key words: dynamic coupling mechanism; planetary gear train; hybrid electric vehicle; continuously variable transmission; transmission ratio; energy flow diagram; simulation

目前,世界各国研究开发的混合动力电动汽车,根据其驱动系统的配置和组合方式的不同,可分为并联式、串联式和混联式^[1,2]。耦合机构作为驱动系统核心部件,受到了国内外学者广泛的关注。文献[3,4]对耦合机构进行了分类研究,总结了传统动力耦合系统转速、转矩的特性。文献[5,6]针对某混合动力电动汽车的双行星排式动力耦合机构,建立了动力学模型,并进行了典型工况仿真分析,但其主要的研究工作是分析现有的耦合机构,并未涉及耦合机构设计与动力传递路线分析。文献[7,8]从能量管理和油耗的角度出发,提出了一种四轮驱动串—并联式混合动力电动汽车驱动系统的耦合机构。

国内外学者对耦合机构的研究工作表明,混合动力耦合系统朝着从分析已有机构到自主设计、从二动力耦合到三动力耦合的方向发展。作者设计了一种混合动力电动汽车的动力耦合机构,在实现三动力耦合的同时,还能在运行过程中无级变速,以提高系统燃油的经济性。

1 方案设计与分析

1.1 方案分析

行星齿轮机构因其具有结构紧凑、传动比大等特点,被视为混合动力汽车耦合机构的一种可灵活布置的方案,并有研究人员给出了不同的构型设计^[9]。本研究根据三动力混合系统,选择如图 1 所示的五杆行星轮系机构作为变速与耦合机构,其具体连接方式如图 2 所示,其中,发动机与行星架相连;电机 1 通过链轮 1 和太阳轮 1 相连;电机 2 和太阳轮 2 相连,并通过链轮 2 与驱动桥相连。

1.2 传动分析

设定太阳轮 1 的转速为 n_1 ,半径为 R_1 ,齿数为 $Z_1 = 21$;行星架的转速为 n_H ,半径为 R_2 ;行星轮 1 的转速为 n_3 ,半径为 R_3 ,齿数为 $Z_3 = 33$;行星轮 2 与行星轮 1 同轴,转速也为 n_3 ,半径为 R_4 ,齿数为 $Z_4 = 21$;太阳轮 2 的转速为 n_5 ,半径为 R_5 ,齿

数为 $Z_5 = 33$ 。

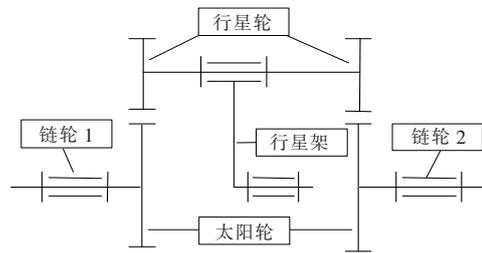


图 1 行星轮系结构简图

Fig. 1 Scheme of planetary gear system

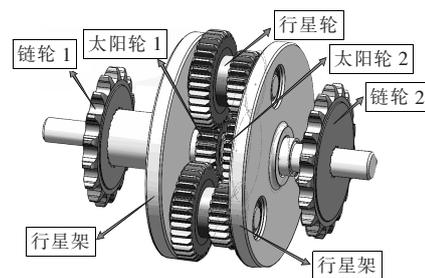


图 2 行星轮系三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of planetary gear train

该轮系为自由度 $F = 2$ 的差动轮系,任意给定两个基本构件的转速,就可以求得另外一个基本构件的转速。

太阳轮 1 的转速为:

$$n_1^H = n_1 - n_H \quad (1)$$

太阳轮 2 的转速为:

$$n_5^H = n_5 - n_H \quad (2)$$

则太阳轮 1 和太阳轮 2 之间的传动比为:

$$i_{15}^H = \frac{n_1 - n_H}{n_5 - n_H} = -\frac{Z_3 Z_5}{Z_1 Z_4} = -2.47 \quad (3)$$

整理得太阳轮 2 与太阳轮 1 的转速关系为:

$$n_5 = \frac{3.47 n_H}{2.47} - \frac{n_1}{2.47} \quad (4)$$

车速 v 与太阳轮 2 的转速关系表达式为:

$$v = \frac{2 \times \pi \times n_5}{4.58} \times r \times \frac{60}{1000} = \frac{n_5}{12.15} \quad (5)$$

式中: v 为车速, km/h; n_5 为太阳轮 2 的转速, r/min; R 为车轮半径, mm。

由式(5)可知,车速随太阳轮 2 的转速变化而变化。根据式(4),太阳轮 2 的转速随发动机与电

机1的转速变化而变化。车辆行驶时,随着车速的提高,电机1可以由正向旋转变到转速为0,再反向旋转,从而在稳定发动机转速的同时实现无级变速。

混合动力电动汽车的实际行驶过程可分为8种工况:启动、起步、加速和上坡、巡航、滑行、刹车制动、低速纯电动、倒车^[10]。

1) 启动时,蓄电池工作提供车内所需的电能,电机1带动发动机越过怠速点,发动机运转至正常热状态,电机2不工作。

2) 起步时,视车况及起步要求分两种情况。

①当发动机已热且蓄电池电量高时,直接由蓄电池驱动电机2运行,由电机2提供动能通过驱动桥传递至驱动车轮,即纯电动模式运行。其工况流能图如图3(a)所示。

②起步加速度要求较大时,即纯电动模式无法提供所需的动力时,发动机启动工作,当发动机转速进一步提高时,电机1会过速,容易损坏,因此发动机转速不会太高。此时,电机2处于低速高转矩区,提供大部分起步转矩。其工况流能图如图3(b)所示。

3) 加速和上坡时,太阳轮2和行星架正向转

动,电机1作发电机,电机2作电动机。当车速上升,电机2的转速也上升,而发动机转速上升到一定值时则不再上升,根据式(4)电机1转速就会下降,甚至反转到其极限转速来保证车速连续提高。该加速过程车速提高,通过电机1转速下降到零并开始反转来使车速继续提高,而发动机的转速可以稳定在高效区来实现无级变速。其工况流能图如图3(c)所示。

4) 巡航工况与加速和上坡工况类似,行星架和太阳轮2正向转动,电机1作发电机,电机2作电动机,太阳轮1可能正转也可能反转,电机2输出的电能和发动机分配到太阳轮2的机械能驱动车轮。其工况流能图如图3(c)所示。

5) 滑行时,太阳轮2转动带动电机2作发电机,行星架正向转动或静止,根据式(4),太阳轮1反向转动,电机1做反向发电机。高速滑行时,如果发动机停止工作,行星架静止,将会导致电机1以2.47倍太阳轮2的速度反向转动。为了防止电机1过速,将电机1设计成发电机给蓄电池充电,并使行星架正向转动。其工况流能图如图3(d)所示。

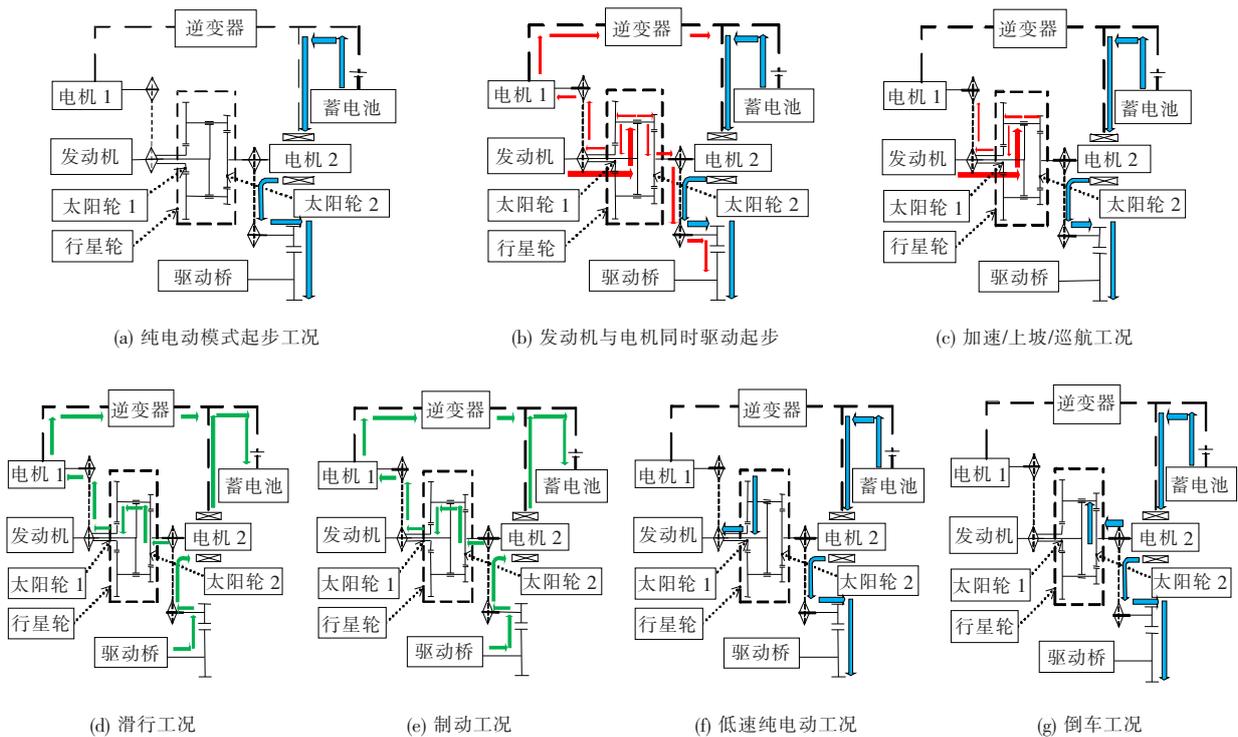


图3 不同运行工况下的能量流向图

Fig. 3 Chart of energy flow under different operating conditions

6) 刹车制动时,太阳轮 1 反转,电机 2 做发电机。在高速情况下,紧急制动需要由液压回路来消耗大部分能量,电机 2 此时做发电机回收少部分能量。在非紧急制动情况下,由于太阳轮 1 转速较高,为防止超速,将电机 1 和电机 2 同时作为发电机,回收大部分能量储存在蓄电池中。其工况流能图如图 3(e)所示。

7) 低速纯电动时,车速较低且蓄电池能量较高,蓄电池提供动力,由电机 2 驱动车辆运行。太阳轮 1 反转,行星架不动,太阳轮 2 正向转动。电机 1 自由反转,电机 2 为电动机驱动车辆。其工况流能图如图 3(f)所示。

8) 倒车时,车速较低且蓄电池能量较高,动力电池提供能量,由电机 2 驱动车辆运行。太阳轮 1 不动,行星架自由正转,太阳轮 2 反向转动。其工况流能图如图 3(g)所示。

2 系统建模

采用 Advisor 2002 对所提出的行星齿轮机构的无级变速效果进行仿真验证。该行星齿轮无级变速器(CVT)模型如图 4 所示,其控制模型如图 5 所示。以 Pruis 为原型车,将建立好的 CVT 模型和 CVT 控制模型嵌入到 Advisor 2002 中替换原有的变速器模块,并更新上层文件。

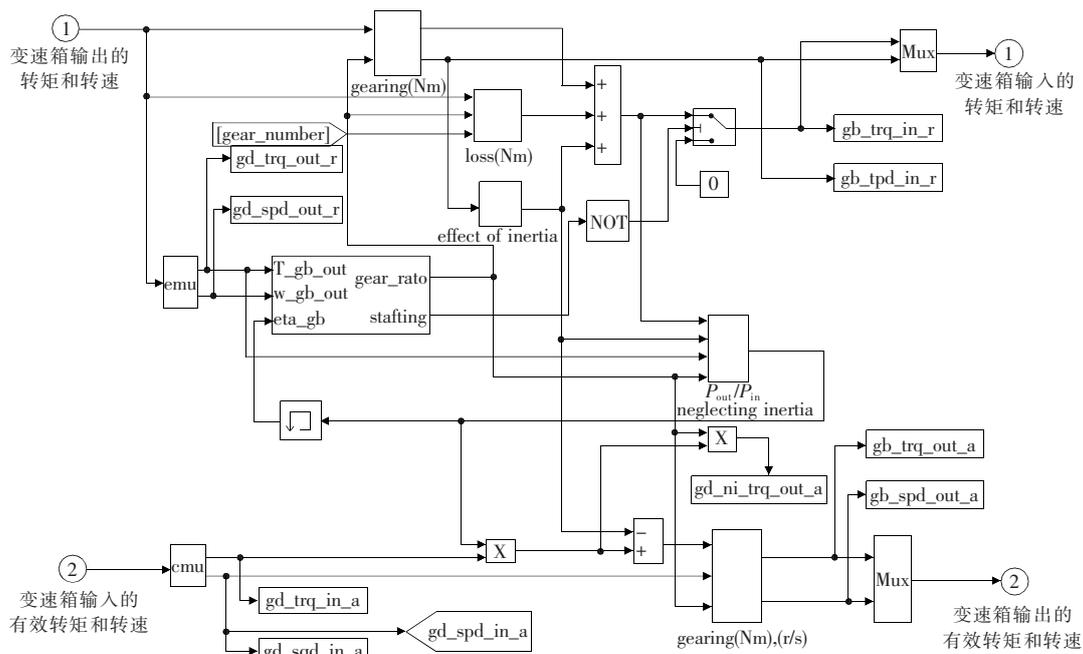


图 4 CVT 模型图

Fig. 4 Diagram of CVT model

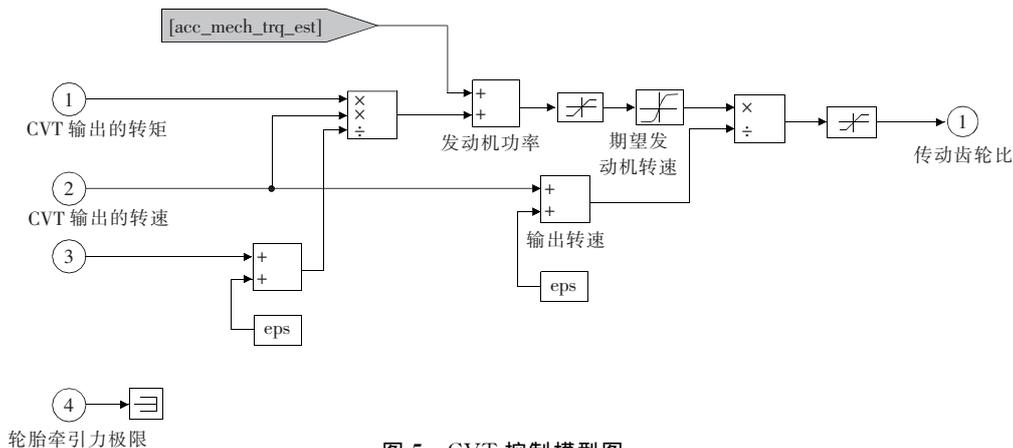


图 5 CVT 控制模型图

Fig. 5 Control model of CVT

3 仿真

因为中国的轻型车国四排放标准的试验工况

采用的是欧盟的轻型车排放油耗试验工况 CYC_NEDC, 所以选取 CYC_NEDC 进行仿真研究。

NEDC 工况的基本参数如表 1 所示。

表 1 CYC_NEDC 循环工况的基本参数

Table 1 Parameters of CYC_NEDC

	行驶时 间/s	行驶距 离/km	最大速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	最大减速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	怠速时 间/s	停车 次数	坡度/ ($^{\circ}$)
数值	1 184	10.93	120	1.06	-1.39	298	13	0

动力性仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知, 仿真车速与循环工况完全一致, 系统具有极好的速度跟随性。

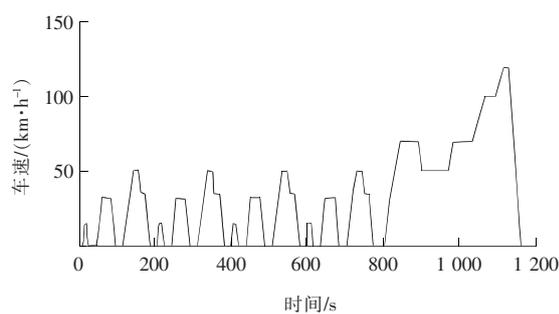


图 6 对 CYC_NEDC 循环工况的速度跟随

Fig. 6 Following speeds of CYC_NEDC

在 CYC_NEDC 循环工况下, 蓄电池荷电状态的变化如图 7 所示。

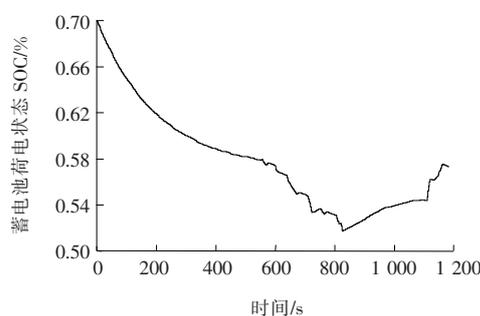


图 7 CYC_NEDC 循环工况下蓄电池荷电状态的变化

Fig. 7 SOC-time profiles under CYC_NEDC driving schedule

其他仿真结果如图 8~12 所示, 其中, 图 8 为驱动电机(电机 2)的输出转速, 图 9 为驱动电机(电机 2)的输出转矩, 图 10 为发电机(电机 1)的输出转速, 图 11 为发电机(电机 1)输出转矩, 图 12 为发电机输出转速。

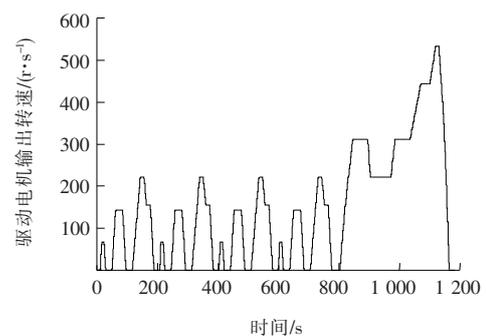


图 8 驱动电机输出转速

Fig. 8 Output rotate speed of motor

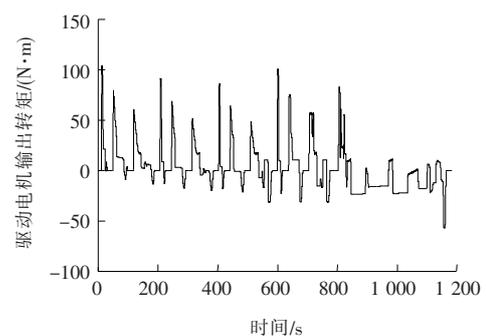


图 9 驱动电机输出转矩

Fig. 9 Output torque of motor

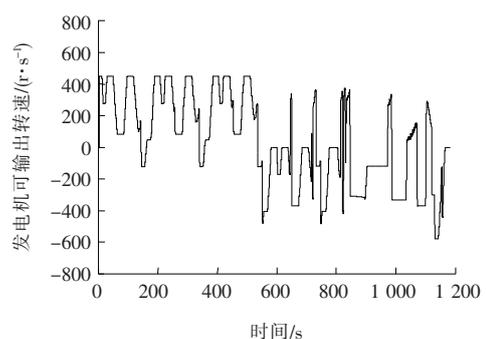


图 10 发电机输出转速

Fig. 12 Output rotate speed of generator

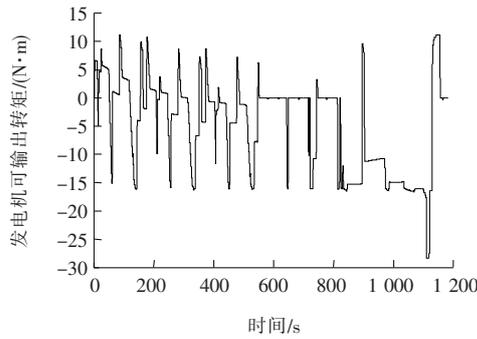


图 11 发电机输出转矩

Fig. 11 Output torque of generator

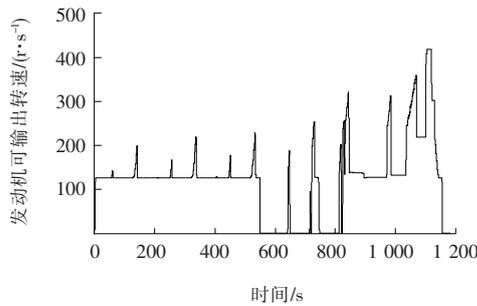


图 12 发动机输出转速

Fig. 12 Output rotate speed of engine

分别读取原型变速器和本研究变速器模型下燃油经济性和仿真能源消耗图并进行比较,结果如表 2 所示。通过文献 [11, 12] 的数据可知,Advisor 软件中 Pruis 车型的燃油经济性为 5.5 L/100 km。由表 2 可知,当处于 CYC_NEDC 工况时,本研究的无级变速器动力耦合机构对燃油经济性和制动能量的回收效率提升明显,数值分别为 0.404 L 和 45 kJ,相应的提高幅度分别为 7.35% 和 3.42%。这进一步说明,本研究提出的行星齿轮机构的方案具有一定的优越性,对提高燃油经济性和制动能量回收率有显著的作用。

表 2 不同变速器模型仿真结果

Table 2 Simulation results of different transmission models

	燃油经济性/ (L · 100 km ⁻¹)	制动总 能量/kJ	回收的 制动能量/kJ	回收的 制动能量回 收效率/%
原变速器	5.500	1 315	520	39.54
本研究无级变速 动力耦合机构	5.096	1 315	565	42.97

4 结论

1) 作者设计了一种五杆行星轮系动力耦合机

构,利用双行星排实现三动力耦合。传动比分析表明,该机构在实现动力耦合的同时,还能在运行过程中无级变速。

2) 能量流动路径分析表明,该行星轮系动力耦合机构能够实现电机启动发动机、电机单独驱动、发动机单独驱动、电机与发动机共同驱动,以及再生制动功能。

3) 建立了行星轮系动力耦合机构的 Simulink 模型及其控制模型,采用 Advisor 软件在某车型上对耦合机构进行了新欧洲行驶工况仿真验证,结果表明,回收的制动能量增加了 45 kJ,回收率提高了 3.42%,有效地提高了整车燃油经济性。

〔参考文献〕

[1] LIU Yong-gang, CHEN Da-qi, LEI Zhen-zhen. Modeling and control of engine starting for a full hybrid electric vehicle based on system dynamic characteristics[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2017, 18(5): 911-922.

[2] Shabbir W, Evangelou S A. Real-time control strategy to maximize hybrid electric vehicle powertrain efficiency[J]. Applied Energy, 2014, 135(C): 512-522.

[3] 张硕,张承宁,王志福. 电动汽车多动力耦合系统结构与分析[J]. 大功率变流技术, 2012(5): 47-50. ZHANG Shuo, ZHANG Cheng-ning, WANG Zhi-fu. The structure and analysis of multi-power coupling systems for electric vehicle[J]. Control and Information Technology, 2012(5): 47-50.

[4] 邹乃威,章二平,任友存,等. 混合驱动系统动力耦合机构分类研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 200-203. ZOU Nai-wei, ZHANG Er-ping, REN You-cun, et al. Classification power coupler of hybrid drive system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 200-203.

[5] 郑铭垠,左言言,吴传刚,等. 双行星排式动力耦合机构动态特性分析[J]. 重庆理工大学学报:自然科学, 2017, 31(6): 47-56, 77. ZHENG Ming-yin, ZUO Yan-yan, WU Chuan-gang, et al. Dynamic characteristic analysis of double planetary gear power coupling mechanism[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2017, 31(6): 47-56, 77.

[6] 杨亚联,米娇,胡晓松,等. 混合动力汽车行星耦合传动系统的图论建模及动力学分析[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 9-15, 54.

- YANG Ya-lian, MI Jiao, HU Xiao-song, et al. Graph theory modeling and dynamics analysis on the coupled planetary transmission system of HEV[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 9-15, 54.
- [7] WANG En-hua, GUO Di, YANG Fu-yuan. System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series-parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications[J]. Energy Conversion and Management, 2015(106): 1264-1275
- [8] ZHANG Li-peng, QI Bing-nan, ZHANG Ru-sheng, et al. Powertrain design and energy management of a novel coaxial series-parallel plug-in hybrid electric vehicle[J]. Science China: Technological Sciences, 2016, 59(4): 618-630.
- [9] 朱福堂, 陈俐, 殷承良, 等. 混合动力汽车行星齿轮机构的方案设计与优选[J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 104-109.
- ZHU Fu-tang, CHEN Li, YIN Cheng-liang, et al. Scheme design and optimal selection for hybrid electric vehicle planetary gear mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(1): 104-109.
- [10] 崔星, 项昌乐. 混合动力系统分流耦合机构工作模式分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 158-163.
- CUI Xing, XIANG Chang-le. Analysis on working mode of power-split mechanism for hybrid power system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 158-163.
- [11] 刘文杰, 舒红, 袁景敏, 等. 基于 ADVISOR 的混联型混合动力汽车研究[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2007, 9(2): 37-40.
- LIU Wen-jie, SHU Hong, YUAN Jing-min, et al. Study on a parallel-series hev based on ADVISOR[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2007, 9(2): 37-40.
- [12] 夏超英, 杜智明. 丰田 PRIUS 混合动力汽车能量优化管理策略仿真分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2017, 47(2): 373-383.
- XIA Chao-ying, DU Zhi-ming. Simulation analysis on energy optimization strategy for Toyota PRIUS hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2017, 47(2): 373-383.
- (上接第 72 页)
- [9] 潘雨红, 张宜龙, 蔡亚军, 等. 基于 GA-BP 算法的公路工程造价估算研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2016, 35(2): 141-145.
- PAN Yu-hong, ZHANG Yi-long, CAI Ya-jun, et al. Research on highway engineering cost estimation based on GA-BP algorithm[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2016, 35(2): 141-145.
- [10] 马永军, 杨志远. 基于模糊神经网络的公路造价估算模型探究[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 41-47.
- MA Yong-jun, YANG Zhi-yuan. Exploration of highway cost estimation model based on fuzzy neural network[J]. Highway Engineering, 2017, 42(6): 41-47.
- [11] 钱强. 模糊神经网络在公路工程造价估算中的应用[J]. 交通世界, 2017(29): 147-148.
- QIAN Qiang. Application of fuzzy neural network in highway engineering cost estimation [J]. Transportation World, 2017(29): 147-148.
- [12] 林晓元. 基于神经网络的工程造价估算研究[J]. 价值工程, 2018, 37(27): 77-80.
- LIN Xiao-yuan. Research on engineering cost estimation based on neural network [J]. Value Engineering, 2018, 37(27): 77-80.
- [13] 吴海龙. 基于 RBF 人工神经网络的建设项目造价估算方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- WU Hai-long. Research on cost estimation method of construction project based on RBF artificial neural network[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.
- [14] 廉大为. 民用飞机总装生产线投资决策阶段造价管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- LIAN Da-wei. Research on cost management of civil aircraft assembly line in investment decision stage [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [15] 牛春媛. 应用显著性成本法建立保障性住房项目投资预测模型的实证研究[J]. 黑龙江科技信息, 2013(24): 35-36.
- NIU Chun-yuan. Application of significant cost method to establish an investment forecast model for affordable housing projects[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2013(24): 35-36.
- [16] 段晓晨, 田贺, 张小平. 绿色高铁运营环境成本非线性估算方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(5): 123-128.
- DUAN Xiao-chen, TIAN He, ZHANG Xiao-ping. Study on the nonlinear estimation of environmental cost of green high-speed railway operation [J]. Journal of Railway Engineering, 2016, 33(5): 123-128.