

# 基于CVT混合动力汽车的ADVISOR再生制动模块开发

杨军平<sup>1</sup>, 王歆誉<sup>2</sup>

1. 南昌工程学院机械与电气工程学院, 南昌 330099
2. 湖南大学汽车电子与控制技术教育部工程研究中心, 长沙 410082

**摘要** 在分析CVT混合动力汽车(HEV)动力系统的工作原理和ISG电机的工作特性的基础上,建立了随车速变化的制动力分配模型,并对ADVISOR原有的HEV模型进行二次开发,建立了搭载CVT的同轴并联式HEV仿真平台。对再生制动系统仿真实验表明,二次开发的仿真平台可以很好地保证实验精度,有效扩展ADVISOR的应用范围,有助于新型动力结构的HEV研究。

**关键词** 混合动力汽车;ADVISOR;再生制动;仿真

**中图分类号** U463.212

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.36.009

## Development of the ADVISOR Module for the Regenerative Braking Based on the HEV with CVT

YANG Junping<sup>1</sup>, WANG Xinyu<sup>2</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China
2. Engineering Research Center of Automotive Electronics and Control Technology of Ministry of Education; Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** Based on the operating principle of the powertrain system in the hybrid electric vehicle (HEV) with the CVT and the characteristics of the ISG motor, a new model is built with the braking force varying with the velocity, and a simulation platform of a new coaxial parallel HEV carrying CVT is set up after the redevelopment of the default HEV model in ADVISOR. For the regenerative braking system, simulative tests were carried out. It is shown that the redeveloped simulation platform can well ensure the accuracy of the tests, and the model developed can effectively extend the application of ADVISOR and be used in the study of the new power structure of HEV.

**Keywords** HEV; ADVISOR; regenerative braking; simulation

### 0 引言

高级车辆仿真器(advanced vehicle simulator, ADVISOR)是由美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)在MATLAB/SIMULINK软件环境下开发的高级车辆仿真软件。2002年公布的最新版本ADVISOR2002除继承原版本的风格外,还增加了几项新功能,其中很重要的一点是其底层模块开发,用户可更方便地对它进行再开发和配置新模块<sup>[1,2]</sup>。

ADVISOR含有丰富的车辆模型库,但是由于该软件在2003年被李斯特内燃机及测试设备公司(AVL List GmbH)买断,停止了继续研发更新,因此无法满足近年新型混合动力车辆仿真分析的需要。因此,对ADVISOR进行二次开发便成了必要的研究手段。针对装配无级变速器(Continuously Variable Transmission, CVT)的同轴并联式混合动力汽车(Hybrid Electrical Vehicle, HEV)的再生制动性能研究,首先需要了解该HEV的动力系统的工作原理,特别是分析其匹配

收稿日期: 2013-08-29; 修回日期: 2013-11-29

基金项目: 江西省教育厅科技项目(GJJ10632)

作者简介: 杨军平, 副教授, 研究方向为车辆总体设计、制造, 电子信箱: hrzaiac@163.com; 王歆誉(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为整车动力性能分析及参数匹配、动力总成NVH, 电子信箱: hnuwang@163.com

的汽车起动发电一体机(Integrated Starter and Generator, ISG)的工作特性。然后在充分理解和研究 ADVISOR 内置车辆各单元模块及控制策略的基础上,对 ADVISOR 仿真软件进行二次开发,建立该新型动力结构的 HEV 仿真平台。

### 1 ADVISOR 软件工作特性

ADVISOR 软件采用的是以后向仿真为主,前向仿真为辅的混合仿真方法。首先进行后向路径的仿真,即按照与汽车功率流相反的方向进行仿真,在考虑各部件的功率约数、惯性损耗和传递效率基础上,当前部件将下一级部件的扭矩、转速请求经过计算,转换为对上一级部件的请求,从道路循环工况到发动机模块和蓄电池模块,最后计算出所能提供的实际功率需求。完成后向仿真计算后,再顺着汽车功率流进行正向仿真,从发动机和蓄电池模块,逐级向下计算,计算出汽车的实际车速<sup>[3-5]</sup>。

ADVISOR 可以对车辆进行动力性、燃油经济性和排放性仿真,人机交互界面清晰,方便操作。不过 ADVISOR 的数据都是稳态时测定的,即模型部件都是准静态,只能进行准静态仿真分析,无法对车辆的动态特性进行仿真。但 ADVISOR 完全可以承担对整车控制策略的研究和对部件参数的匹配分析,可以满足汽车前期开发工作的需要。

## 2 ADVISOR 二次开发及对再生制动策略的改进

### 2.1 ADVISOR 二次开发

本文研究的搭载 CVT 的同轴并联式 HEV 结构如图 1 所示。由于 CVT 可以在速比范围内连续变速,能够使动力装置尽可能地工作在高效区,进而改善车辆的排放性能,提高动力总成的效率,所以非常适合与 HEV 匹配<sup>[6]</sup>。

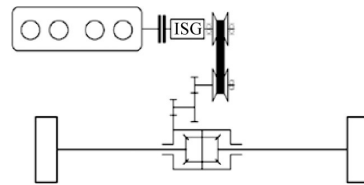


图 1 动力传动系统示意

Fig. 1 Sketch of powertrain system

ADVISOR 原模型库自带的模型中,并没有搭载 CVT 的同轴并联式 HEV。为了满足课题需求,在 ADVISOR 原并联式 HEV 模型 PARALLEL\_default\_in 的基础上进行二次开发,增添“assign strategy”SIMULINK 模块,利用 CVT 控制模块中的 IOL 理想分配曲线,对发动机和 ISG 电机进行扭矩分配,保证在离合器结合时发动机输出轴与 ISG 电机转速相同。在 CVT 控制模块中,通过信号的收集进行模式切换控制,控制模块如图 2 所示。最后修改相应的 m 文件,调试模型成功后保存、封装,如图 3 所示。

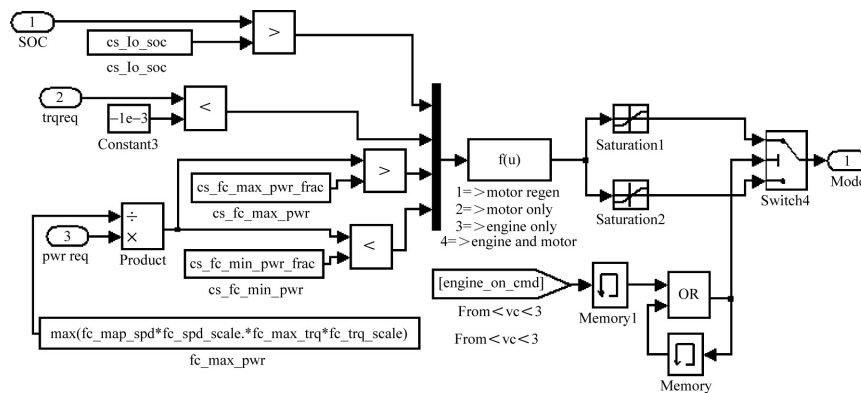


图 2 模式切换控制

Fig. 2 Mode switching control

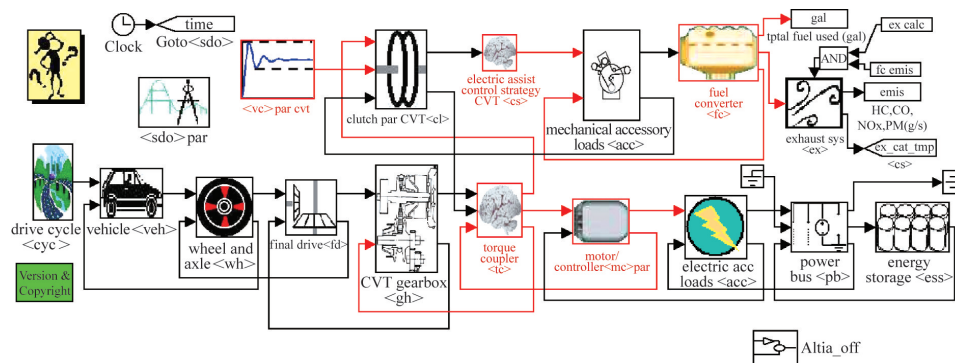


图 3 集成 ISG 电机的 CVT 混合动力汽车

Fig. 3 Model of HVE integrating ISG with CVT

## 2.2 再生制动策略的改进

ADVISOR 的制动力共分 3 部分:再生制动力(driveline brake),前轮制动力(front friction brake),后轮制动力(rear friction brake)。本文研究的 HEV 制动能回收是通过集成在发动机输出轴上的 ISG 电机实现的。在总制动力需求中,若再生制动力占总制动力的比例为  $X\%$ ,则轮胎制动力为  $1-X\%$ ,而前后轮制动力分配的大小需要通过理想制动力前后轮比例公式得出:

$$F_f + F_r = \varphi G \quad (1)$$

$$\frac{F_f}{F_r} = \frac{b + \varphi h_g}{a - \varphi h_g} \quad (2)$$

其中,  $F_f$  和  $F_r$  分别为前、后轮制动力,  $G$  为 HEV 重量,  $\varphi$  为路面附着系数,  $a$  和  $b$  为前后轴到 HEV 质心的距离,  $h_g$  为 HEV 的质心高度<sup>[7]</sup>。

制动过程中,各制动力分配比例随车速变化而变化,如

表 1 所示。

表 1 随车速变化的制动力分配策略

Table 1 Braking force assign strategy varies with the velocity

车速/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	再生制动力比例	前轮制动力比例
0	0	0.8
20	0.5	0.4
100	0.8	0.16
>100	0.8	0.16

ADVISOR 制动力分配控制模块如图 4 所示。ADVISOR 原模型中的再生制动力分配策略先在车轮模型中确定,需求功率信息在后向仿真中传递给电机模型,直接计算出实际再生制动功率。原模型并没有考虑电机本身的工作特性和实际输出限制,因此,需要对 ADVISOR 原再生制动策略进行改进。

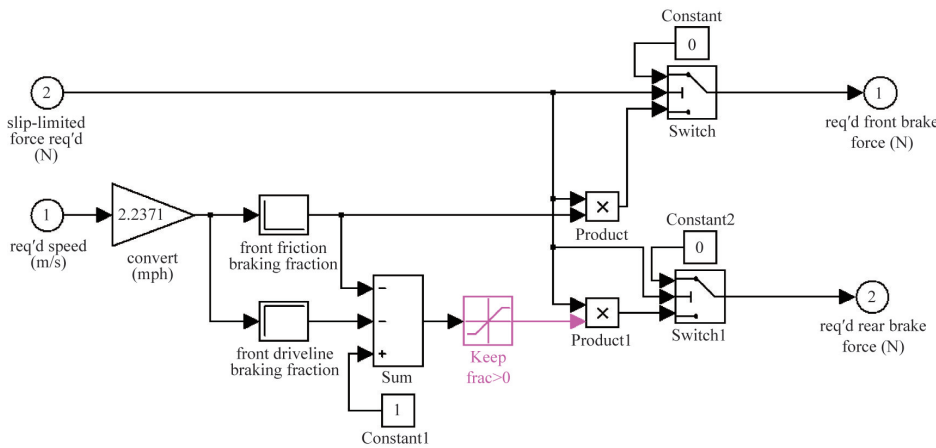


图 4 后向路径中制动控制模块

Fig. 4 Braking control functions in backward route

研究的 HEV 中, driveline brake 主要依靠 ISG 电机进行再生制动力的回收。通过对该型混合动力汽车进行 ISG 电机的选型,进行台架实验,分析电机性能特性,可得到电机在纯电动模式和制动能回收模式中,对整个传动系统的力矩贡献值,实验结果如图 5 所示。

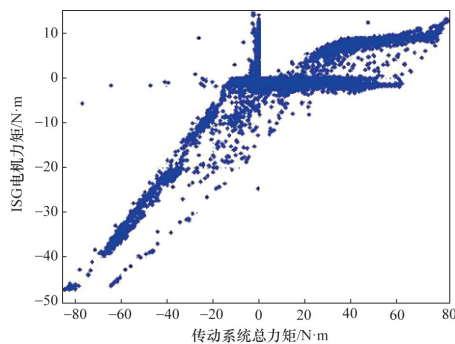


图 5 ISG 电机的实验数据

Fig. 5 Test data of an ISG motor

通过台架实验可以看出 ISG 电机在 total driveline torque

中每个力矩值所对应的实际贡献值,然后对其进行样点的拟合,做出拟合样条,配合 ISG 电机的最大发电力矩就可以得到实际电机的再生制动扭矩范围。通过拟合曲线和最大发电力矩,可以确定后向仿真中电机模块由于工作特性而产生的实际发电扭矩。

ADVISOR 仿真模型是结合了前向、后向路径的混合仿真模型。在后向路径中,通过插值查表,在工作部件性能极限约束下,计算出制动力的需求值。然后在前向路径中,通过减去各部件的效率损失值,计算出制动力的可达到值。

由于 ISG 电机模块的改进,分配的再生制动力不能按原计划完成,余留的力矩则返回分配策略,进行再计算。图 6 为后向路径中对 ISG 电机扭矩限制模块,通过接收上级模块提供的电机需求功率,利用 ISG 电机的实验拟合数据,进行查表插值。如果传动系统总力矩小于  $-15\text{N}$ ,则电机的制动力矩按照拟合曲线插值求解;如果传动系统总力矩大于  $-15\text{N}$  且小于 0,则禁止再生制动。算出约束后的电机需求力矩后再传递给下级模块。

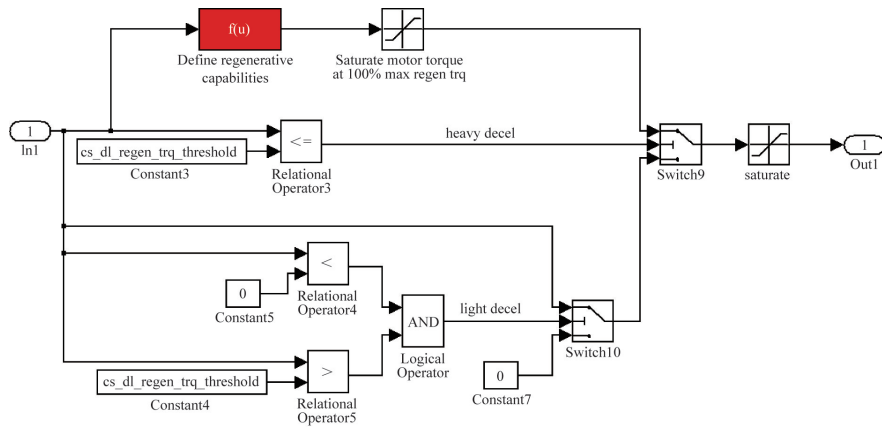


图6 后向路径中ISG电机的力矩约束模块

Fig. 6 Restraint functions for ISG motor torque in backward route

在后向路径中,收到约束的电机电力矩信号还应该考虑到电器附件的影响。因为在再生制动过程中,离合器踏板分离,使ISG电机成为汽车的发电源,发出的电量一部分储存在电池中,另一部分则被用电设备消耗。因为电池的电荷状态

(State Of Charge, SOC)值超过0.8,电池的充电效率会变得很低,所以定义当SOC值大于0.8时,停止再生制动。因此,电机信号需要进一步进行约束,如图7所示。

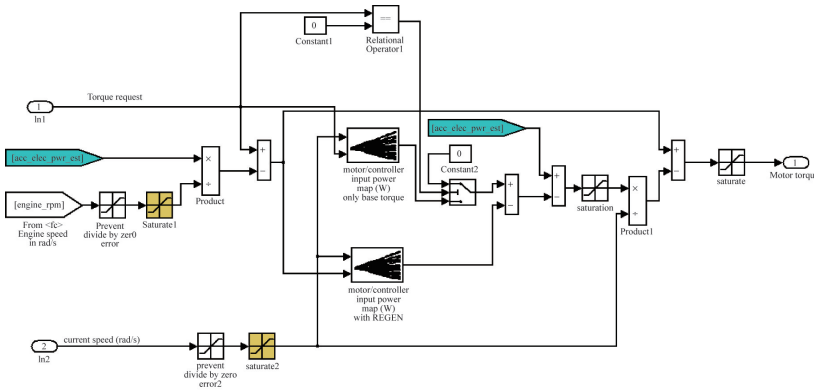


图7 后向路径中电器约束模块

Fig. 7 Restraint functions for electrical equipments in backward route

### 3 再生制动系统性能仿真实验

完成模型的建立后,利用UDDS工况验证模型的正确性。定义混合动力系统控制策略中的4个模式分别为:1—制动回收;2—纯电动行驶;3—发动机驱动;4—电机助力驱动<sup>[8-10]</sup>,仿真结果见图8。

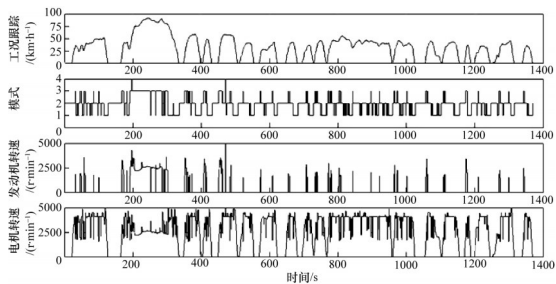


图8 UDDS工况仿真结果

Fig. 8 Simulation results of UDDS

由图8可看出,仿真车速结果对实际工况跟踪良好,发动机和电机的工作都能按照设定模式切换,且在离合器结合时发动机和电机的转速相同,说明建立的模型有实际参考价值,能够保证实验精度,可进行进一步研究。选用带有坡度的实验工况CYC\_VAIL2NREL进一步分析二次开发的HEV模型的再生制动性能,CYC\_VAIL2NREL实验工况如图9所示。

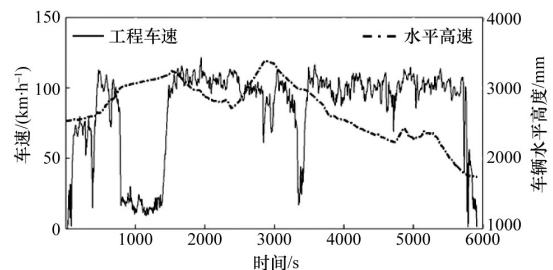


图9 CYC\_VAIL2NREL工况

Fig. 9 Condition of CYC\_VAIL2NREL

进行仿真实验时,设定SOC初始值为0.8,CYC\_VAIL2NREL工况的跟踪结果如图10。由图10可看出,二次开发的HEV工况跟踪效果较好。与二次开发前HEV模型SOC值的变化情况对比,仿真结果如图11所示。

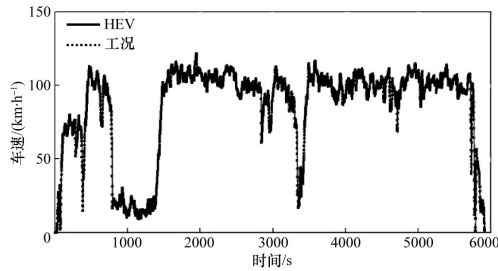


图10 工况跟踪对比

Fig. 10 Tracking contrast

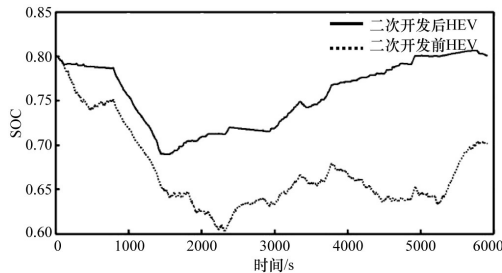


图11 SOC变化对比

Fig. 11 SOC changing contrast

通过分析实验工况,在1500~2400s、3000~6000s这两段下坡工况期间,二次开发的HEV模型的SOC增量大于原模型的增量。

由于传动系统的改变,电机与变速器输入轴同轴连接,减小了机械损失,同时由于控制策略的改变,使电机的实际特性得到体现。根据仿真实验结果可知,二次开发后的HEV模型的再生制动性能得到了提高。

#### 4 结论

在ADVISOR软件的再生制动模块基础上,基于ISG电机的工作特性,建立了CVT混合动力汽车的仿真模型。仿真结

果表明所建模型是正确稳定的,验证了CVT混合动力汽车制动动能回收的效率,有效扩展了ADVISOR的应用范围,有助于新型动力结构的混合动力汽车研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曾小华,王庆年,李骏,等.基于ADVISOR2002混合动力汽车控制策略模块开发[J].汽车工程,2004,26(4):394-396.  
Zeng Xiaohua, Wang Qingnian, Li Jun, et al. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 394-396.
- [2] Oba H, Yamanaka A, Katsata H, et al. Development of a hybrid powertrain system using CVT in a minivan[J]. Toyota Technical Review, 2002, 51(2): 74-79.
- [3] 赵国柱,魏民祥,杨正林.基于制动稳定性要求的ADVISOR再生制动模块的开发[J].机械与电子,2007(6):10-14.  
Zhao Guozhu, Wei Minxiang, Yang Zhenglin. Machinery & Electronics, 2007(6): 10-14.
- [4] Wipke K B, Cuddy M R, Burch S D. ADVISOR2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/ forward approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1751-1761.
- [5] Markel T, Brooker A, Hendricks T, et al. ADVISOR: A systems analysis tool for advanced vehicle modeling[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 255-266.
- [6] Datong Q, Tao D, Yang Y, et al. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric with ISG based on forward modeling [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 618-624.
- [7] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009:108-110.  
Yu Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 108-110.
- [8] Gao Y M, Chen L P, Ehsani M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. SAE, 1999, 29(10): 26-28.
- [9] 张宇,周美兰,王旭东,等.基于ADVISOR混合动力电动汽车再生制动控制策略研究[J].黑龙江大学自然科学学报,2010,27(4):551-555.  
Zhang Yu, Zhou Meilan, Wang Xudong, et al. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2010, 27(4): 551-555.
- [10] Ryu W, Cho N, Yoo I, et al. Performance analysis of a CVT clutch system for a hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(1): 115-121.

(责任编辑 王媛媛)

#### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。