



混联式混合动力再生制动控制策略

尧文亮, 周云山

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082

摘要 再生制动系统是混合动力汽车和电动汽车特有的系统。该系统可将汽车制动过程中消耗的汽车动能和势能通过电动机发电的方式储存在电池中, 在启动和加速过程中加以利用。本研究以长丰 CJY6470E 越野车为对象, 在传统汽车制动理论的基础上, 基于制动安全及制动效能, 提出一种混联式混合动力汽车制动能量分配与再生制动控制策略。前后轴采用理想制动力分配, 在分配好后, 再对前后轴的再生和摩擦制动进行二次分配。进行二次分配时, 主要考虑电机及电池的使用寿命, 以车速及 SOC 作为电机再生制动功率影响因素, 并通过 ADVISOR2002 进行二次开发, 建立整车模型, 最后进行仿真。结果表明, 采用所提出的再生制动控制策略可实现高效的制动能量回收, 延长电池的使用寿命, 且该策略具有可行性。

关键词 混联式混合动力; 再生制动; 建模仿真

中图分类号 U461.3

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)08-0089-05

A Control Strategy for Braking Energy Distribution and Regenerative Braking in an SP-HEV

YAO Wenliang, ZHOU Yunshan

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, 410082, China

Abstract The regenerative braking system is a unique system in electric vehicles and hybrid electric vehicles. The system can restore the kinetic energy and potential energy, during start and accelerating, into battery through electrical machines. The focus of this paper is on Changfeng CFA6470E HEV. Based on the braking theory of conventional vehicles and security braking and high efficient energy recovery, a control strategy for braking energy distribution and regenerative braking of an SP-HEV is proposed. The ideal braking force distribution is used in the front axle and real axle braking force distributions. After the front axle and real axle's braking force is distributed, regenerative braking and friction braking are assigned. The characteristics of motor and battery's life have been taken into account in the quadratic distribution method. The motor's speed and SOC are taken as the braking power's influencing factors. ADVISOR2002 is re-developed for the simulation model. The simulation result shows that the control strategy for braking energy distribution and regenerative braking can satisfy demand for vehicle braking and extend the life of battery. The strategy proves to be practical.

Keywords SP-hybrid; regenerative braking; model simulation

0 引言

制动作为汽车的三大基本功能(行驶、转向和制动)之一, 直接影响汽车的安全性。在混合动力汽车的研究和开发中, 再生制动是一种降低能耗、减小排放、增加续驶里程的重要手段。以一辆自重 1500kg 的轿车为例, 当它以 70km/h 的速度行驶时开始制动, 起始动能可达 300kJ, 如果这些能量能够

全部回收并用于整车行驶, 可以驱动车辆行驶 1.8km。但在传统汽车中没有再生制动系统, 这些能量大部分以热能的形式消耗掉。中国西部大部分地区道路起伏变化明显, 常有数百米的坡道, 在下坡时将车辆的制动减速能量回收储存起来, 需要时再释放出来使用, 不但可以节省能源, 还可减少制动系统的磨损^[1]。在中国的城市交通中, 由于汽车保有量的急剧

收稿日期: 2010-12-28

作者简介: 尧文亮, 硕士研究生, 研究方向为混合动力, 电子信箱: yao8672017@163.com; 周云山(通信作者), 教授, 研究方向为 CVT 及混合动力, 电子信箱: zys_8888@sina.com

增加导致道路拥堵等问题日益严重,频繁的加速和减速更需再生制动系统回收能量。因此,对有量化的混合动力汽车再生制动系统的研究具有重要意义,技术成熟后将产生巨大的经济价值和社会效应。

对于再生制动技术,国外已经开展了 10 多年的研究,目前大多采用向蓄电池充电吸收回馈能量。在选定储能装置后,很多公司和科研机构对如何提高再生制动能量回收效率进行了深入研究,Yimin Gao 等提出了混合动力汽车基于开关磁阻电机再生制动的神经网络控制系统^[2],Donghyun Kim 等针对 4WD 混合动力汽车提出了四轮驱动混合动力汽车再生制动系统制动力分配控制策略^[3]。中国关于制动能量回收的研究尚处起步阶段,再生制动系统研究距离实用还有较大差距。本研究是以长丰 CJY6470E 越野车改造的混合动力汽车为对象,其总体结构如图 1 所示。由图 1 可知,长丰 CJY6470E 混合动力越野车属于一种混联式结构,主要包括发动机、电机、动力电池组、各装置的控制单元及构成传动系统的无级变速器 CVT、减速器、驱动桥等。

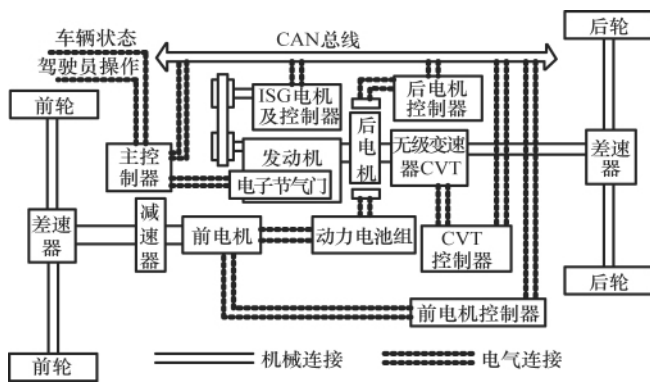


图 1 SP-HEV 总体结构
Fig. 1 Structure of SP-HEV

1 再生制动的影响因素

制动过程中,希望最大限度地回收能量,但实际上,并不是所有的制动能量都可以回收,只有驱动轮的制动能量可以沿着与之相连接的驱动轴传送到能量存储系统。因此,较之单轴驱动的汽车,本研究选择的四轮驱动混合动力汽车对制动能量回收有很大优势。从总体上看,影响混合动力汽车再生制动的主要因素包括以下方面^[4-5]。

1) 电机。电机是影响再生制动的主要因素之一,电机的制动能力越强,在分配再生制动和摩擦制动之间的比例关系时,可使再生制动的比例增大,从而增加回收的再生制动能量。

2) 储能装置。主要是各种蓄电池,目前多采用 NiMH 电池。能否将电机所发出的电能全部、快速的吸收是研究和设计再生制动系统最重要和急需解决的问题之一。

3) 控制策略。控制策略规定了前后轮制动力及再生制动

和摩擦制动的比例关系,决定了再生制动能量回收的多少,是本研究的重点。

4) 使用环境。使用环境包括路况、环境温度和车辆的当前状态等。

2 前后轴制动力分配

2.1 传统汽车轴间制动力分配

对一般的汽车,其制动过程可能出现前轮先抱死、后轮先抱死、前后轮同时抱死 3 种状态^[6],因此,须对前、后轮制动力的分配比例进行研究,以保证汽车制动时的稳定性和较高的附着条件利用率。以图 2 所示的汽车制动受力简图进行分析。

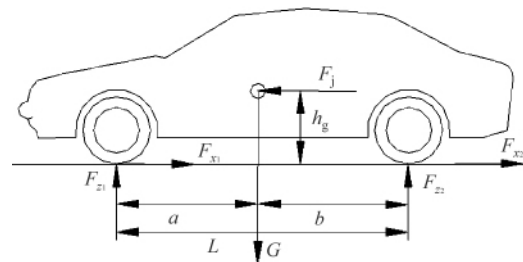


图 2 汽车制动时的受力图
Fig. 2 Force diagram of auto's braking

地面作用于前后轮的法向反作用力 F_{z1} 和 F_{z2} 可表示为

$$\begin{cases} F_{z1} = \frac{G}{L}(b + zh_g) \\ F_{z2} = \frac{G}{L}(a - zh_g) \end{cases} \quad (1)$$

其中, G 为整车重量, F_{z1} 为前轮所受的地面法向反作用力; F_{z2} 为后轮所受的地面法向反作用力, h_g 为整车质心高度; L 为轴距; z 为制动强度,等于 $\frac{du}{dt}/g$; u 为车速。

汽车制动时出现的 3 种情况下,前后轮同时抱死对附着条件的利用和汽车稳定性均较为有利。在任何附着系数 φ 的路面上,前后车轮同时抱死的条件是:前、后轮制动器制动力之和等于附着力,并且前、后轮制动器制动力分别等于各自的附着力,其间关系为

$$\begin{cases} F_{\mu 1} + F_{\mu 2} = \varphi G \\ \frac{F_{\mu 1}}{F_{\mu 2}} = \frac{b + \varphi h_g}{a - \varphi h_g} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $F_{\mu 1}$ 为前制动器制动力, $F_{\mu 2}$ 为后制动器制动力, φ 为附着系数, μ 为摩擦系数。

将式(1)代入上式,消去变量 φ ,得

$$F_{\mu 2} = \frac{1}{2} \left[\frac{G}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{G} F_{\mu 1}} - \left(\frac{Gb}{h_g} + 2F_{\mu 1} \right) \right] \quad (3)$$

根据式(2)中的 2 个方程按不同 φ 值画图,得两组直线,把不同 φ 值的两直线交点连接起来,便得到理想制动力分配

曲线 I (图 3)。曲线上任一点代表在该附着系数路面上前、后制动力应有的数值。本研究控制策略前后轴是采用理想分配的形式。

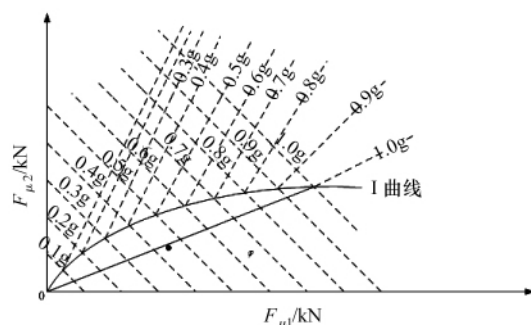


图 3 理想制动力分配曲线

Fig. 3 Ideal braking force distribution curve

2.2 混合动力汽车的制动力分配

混合动力汽车总的制动力是再生制动力和摩擦制动力的组合。前轮驱动或后轮驱动的两驱混合动力汽车,制动能量回收存在于追加了电动机/发电机的车轮,另一车轮的制动能量将全部被摩擦制动消耗,造成一定的浪费。本研究选择的混合动力汽车,由于前轮和后轮分别与各自的电机连接,这样的四轮驱动对制动能量回收比较理想。

不计滚动阻力等被动阻力影响,混合动力汽车的制动过程可表示为

$$\begin{cases} F_{\mu 1} + F_{re1} = F_{lf} \\ F_{\mu 2} + F_{re2} = F_{lr} \\ F_{lf} + F_{lr} = m \cdot \frac{du}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

其中, F_{lf} 为前轮制动力, F_{lr} 为后轮制动力, $F_{\mu 1}$ 为前轮摩擦制动力, $F_{\mu 2}$ 为后轮摩擦制动力, F_{re1} 为前轮电机再生制动力, F_{re2} 为后轮电机再生制动力, m 为整车质量。

3 再生制动控制策略

混合动力汽车的制动控制策略是在保证制动安全性前提下解决制动力的分配问题,其控制策略直接影响整车能量的回收率、制动方向稳定性和驾驶员的制动感觉^[7]。随着 X-by-wire 技术的不断成熟,使汽车制动力理想分配成为可能^[2]。所以本研究中前后轴制动力分配采用理想制动力分配。在前后轴制动力分配好后,再对前后轴的再生和摩擦制动进行二次分配(图 4)。

初次分配按理想制动力分配,制动时安全有保障,二次分配时,主要考虑再生功率,因为只有再生功率才决定了回收的能量多少。应该根据整车制动时的初速度及电机、电池等部件的运行状况使发电机尽可能发挥作用。在整车制动过程中,希望电机在任意车速下都能以很高的能量回收效率提供需求的制动转矩,但这一需求常受到电机自身特性和电池吸能功率等的制约^[8]。当假定电池充电功率为一定时,电机的

再生自动力矩和车速有很大的关系,如图 5 所示在较高的车速时所能产生的制动力矩有限,较低车速时产生的制动功率也很有限,只有在额定转速附近才能产生较大的制动功率和制动力矩。同时,电池的 SOC(State of Charge, 充放电状态)对再生制动产生很大影响,当 SOC 很高时,对电池充电将大大降低电池的使用寿命,所以本研究中着重考虑这两个因素对电机再生制动功率的影响。车速影响因子为 C_1 , SOC 影响因子为 C_2 , 最终再生制动功率影响因子为 $C = C_1 C_2$ 。对于影响因数 C_1 的制定,主要根据图 5 车用电机特性确定。

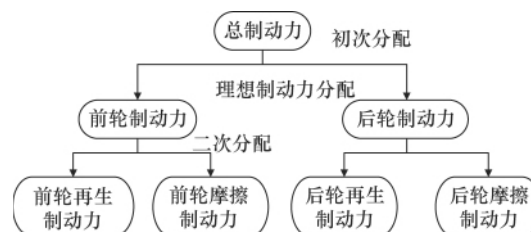


图 4 二次分配法示意

Fig. 4 Diagram of quadratic distribution method

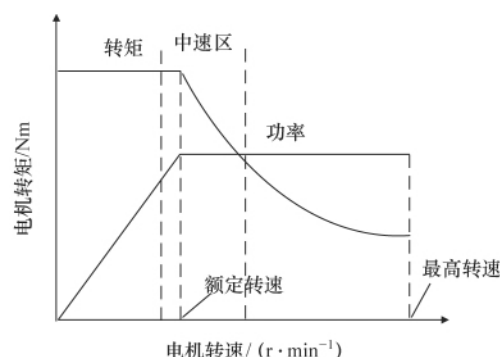


图 5 电机特性

Fig. 5 Motor's characteristics

车速低于 10km/h 时,电机所发出的功率相当小,加上在充电过程中的消耗,最终充给电池的能量几乎没有。所以这一期间设定 C_1 为 0,不启动再生制动。随车速提升到电机稳定功率区前, C_1 是一个线性增大过程。到达稳定功率后, C_1 是常数 1。图 6 显示 C_1 与车速的关系。对 C_2 的制定主要考虑电池寿命,在 SOC 低于 0.6 时,由于电池还不是处于很饱和的状态,设置其为 1,在 0.6~0.7 之间, C_2 是线性变小的过程,当 SOC 大于 0.7 时,由于不再采取再生制动,所以设置 C_2 为 0 (图 7)。最终求出前后电机的功率为

$$\begin{cases} P_{reg} = P_{reg_max} C \\ P_{reg} = P_{reg_max} C \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_{reg} 为前电机制动功率, P_{reg_max} 为前电机最大功率, P_{reg} 为后电机制动功率, P_{reg_max} 为后电机最大功率, P_{ch_max} 为电池最大充电功率。

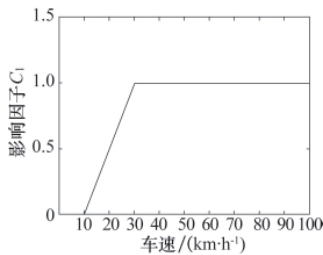


图 6 C_1 与车速的关系图
Fig. 6 The relationship between C_1 and speed

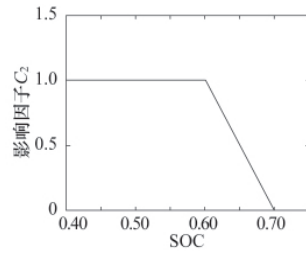


图 7 C_2 与 SOC 的关系
Fig. 7 The relationship between C_2 and SOC

根据功率和车速,通过式(6)求出电机所产生再生转矩 T_{reg} 。同时,考虑电池的最大充电功率 $P_{\text{ch,max}}$,电池的充电功率由前后电机再生功率相加组成,由于前电机的额定功率为 30kW,后电机的额定功率为 15kW,所以对前电机最大再生功率限定小于 $0.65P_{\text{ch,max}}$,后电机最大再生功率限定小于 $0.35P_{\text{ch,max}}$,这样对电池具有很大的保护作用。

$$T_{\text{reg}} = \begin{cases} \frac{9550P}{n_{\text{额定}}} & (n_{\text{EM}} \leq n_{\text{额定}}) \\ \frac{9550P}{n_{\text{EM}}} & (n_{\text{EM}} > n_{\text{额定}}) \end{cases} \quad (6)$$

得出的前后电机功率可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{freq}} = \min(P_{\text{freq_max}} \cdot C, 0.65 |P_{\text{ch_max}}|) \\ P_{\text{neg}} = \min(P_{\text{neg_max}} \cdot C, 0.35 |P_{\text{ch_max}}|) \end{cases} \quad (7)$$

制定的再生控制策略如图 8 所示。

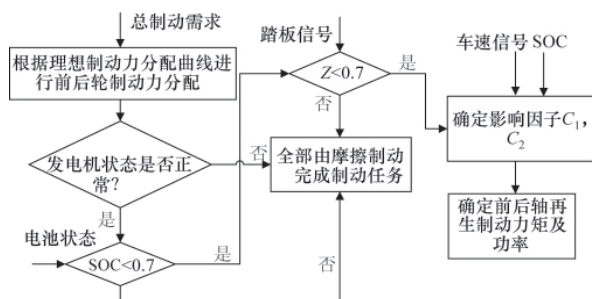


图 8 再生控制策略流程图

Fig. 8 Flowchart of the control strategy for braking energy

4 仿真及结果分析

应用 Advisor2002 进行仿真分析。Advisor2002 提供一个开放的开发环境,用户可以随意增减模块,并应用其内部通用的成熟模块来组装用户所需要仿真分析的新车型^[3]。基于此,本研究在 Advisor 原有的丰田 Prius 模型的基础上,通过修改发动机模块、行星齿轮机构模块、电机/控制器模块、电池模块、整车控制模块替换为四轮驱动整车控制模块^[9-10],添加前电机、前驱,并将本研究确定的再生制动控制策略加入到模块中,所建混动式四轮驱动越野车模型顶层模块如图 9 所示。整车的主要参数如表 1 所示。

表 1 整车主要参数

Table 1 Main parameters of the vehicle

汽车整车及动力传动部件		参数
整车参数	整车质量 m	1910kg
	滚动阻力系数	0.018
	车轮半径 R	0.377m
	迎风面积 A	2.24m ²
	气阻系数 C_D	0.33
发动机	2.35L	92kW/5500r·min ⁻¹
前电机	交流异步感应电机	30kW/4500r·min ⁻¹
		80Nm/4500r·min ⁻¹
后电机	永磁同步电机	15kW/3000r·min ⁻¹
		100Nm/3000r·min ⁻¹
变速箱	CVT	0.478~2.396
电池	NINH 电池组	电压 288V/容量 16Ah

采用日本 1015 城市循环工况来再生制动系统进行仿真和分析。图 10 的仿真结果表明,在循环工况的车速上升阶段发动机与电机同时提供输出扭矩,以满足整车的动力性需求,此时,电池放电,SOC 值下降;相反地,在车速下降阶段发生制动时,发动机不再工作,电机输出扭矩的负号代表其处于发电状态,电池的 SOC 值稍有上升。另外,循环的 SOC 值变化情况表明,仿真中 SOC 值总体为下降趋势,但在减速制动时又略有上升。这是由于仿真的初始 SOC 值设为 0.7 时,电池能为电机提供充足的电量,电机处于驱动状态能量有所消耗,但同时,制动工况回收了整车的部分动能,导致 SOC 值短

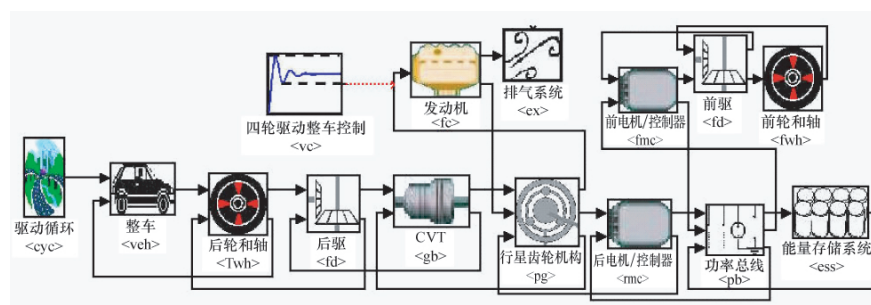


图 9 仿真模型

Fig. 9 Model of simulation

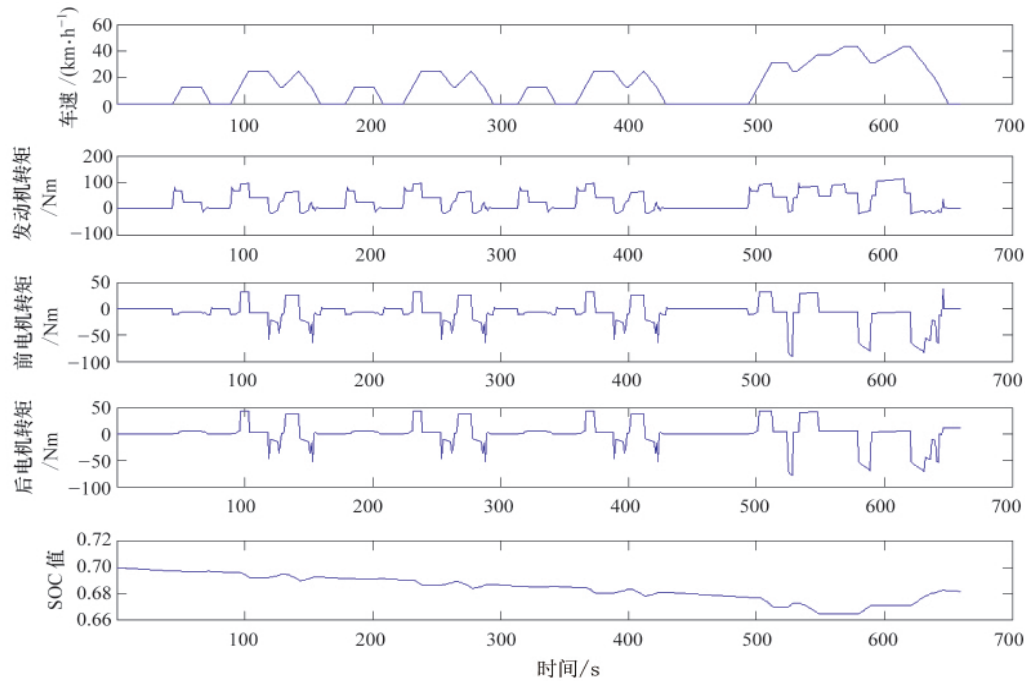


图 10 仿真结果

Fig. 10 The result of simulation

暂上升。循环结束后,电池的 SOC 值减少 0.015。电池的 SOC 值变化很小,几乎维持其平衡。同时在整个循环中,前后电机的工作状态几乎一致,同时助力、同时再生制动。

5 结论

以长丰 CJY6470E 混合动力越野车为对象,提出了一种新型的再生制动控制策略。通过更改 Advisor2002 丰田 Prius 的模型,植入本研究所提出的再生控制策略,在日本 1015 城市循环工况进行仿真。从仿真结果看,保证了制动时的安全性、能量回收的高效性。由于在充电时考虑到电池的 SOC 的影响,在高 SOC 值时,做到少充和不充,延长了电池寿命,对未来混合动力实车的开发具有一定指导意义。

参考文献 (References)

- [1] 舒红,袁景敏,胡明辉,等. 中度混合动力汽车匀速下坡再生控制策略优化[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(9): 965-970.
Shu Hong, Yuan Jingmin, Hu Monghui, et al. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(9): 965-970.
- [2] Hongwei Gao, Yimin Gao, Mehrdad Ehsani. A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV [C]// Electric machines and drives conference. Wisconsin: IEEE, 2001: 571-575.
- [3] Donghyun Kim, Hyunsoo Kim. Vehicle stability control with regenerative braking and electronic brake force distribution for a four-wheel drive hybrid electric[J]. *Automobile Engineering*, 2007, 220: 683-693.
- [4] 秦大同, 谭强俊, 杨阳 等. CVT 混合动力汽车再生制动控制策略与仿

真分析[J]. 汽车工程, 2007, 29(3): 220-225.

Qin Datong, Tan Qiangjun, Yang Yang, et al. *Automotive Engineering*, 2007, 29(3): 220-225.

- [5] 秦大同, 颜静, 杨阳, 等. HEV 再生制动过程中 CVT 速比控制策略 [J]. 重庆大学学报, 2007, 30(1): 1-5.

Qin Datong, Yan Jing, Yang Yang, et al. *Journal of Chongqing University*, 2007, 30(1): 1-5.

- [6] 钟兵. 汽车前后轴制动力分配原理 [J]. 农业装备与车辆工程, 2006, 5 (1): 40-42.

Zhong Bing. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2006, 5(1): 40-42.

- [7] 李玉芳, 林逸, 何洪文, 等. 电动汽车再生制动控制算法研究 [J]. 汽车工程, 2007, 29(11): 1059-1062.

Li Yufang, Lin Yi, He Hongwen, et al. *Automotive Engineering*, 2007, 29 (11): 1059-1062.

- [8] 陈庆樟, 何仁. 汽车再生制动系统机电制动力分配 [J]. 江苏大学学报, 2008, 29(5): 394-397.

Chen Qingzhang, He Ren. *Journal of Jiangsu University*, 2008, 29(5): 394-397.

- [9] 王庆年, 王伟华, 初亮. 基于 ADVISOR 软件的双轴驱动混合动力汽车性能仿真模块开发[J]. 汽车工程, 2003, 5(5): 425-427.

Wang Qingnian, Wang Weihua, Chu Liang. *Automotive Engineering*, 2003, 5(5): 425-427.

- [10] 彭育辉, 王良模. 对四轮汽车制动过程计算机仿真研究[J]. 福州大学学报, 2003, 31(2): 182-185.

Peng Yuhui, Wang Liangmo. *Journal of Fuzhou University*, 2003, 31(2): 182-185.

(责任编辑 杨书卷)