

文章编号:1000-582X(2009)05-0493-06

ISG 混合动力再生制动系统压力协调控制策略

杨 阳, 杨文辉, 杨亚联, 秦大同

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:以 ISG(integrated startor and generator)型混合动力长安轿车为原型,提出了基于 HEV(hybrid electric vehicle)制动力分配的制动系统压力协调控制策略,建立了 HEV 再生制动离线仿真模型。研制了 HEV 摩擦制动液压实验系统,构建了 dSPACE 环境下的混合动力再生制动硬件在环仿真试验平台,进行了不同制动强度下的再生制动系统性能实验,验证了制动力分配和制动压力协调控制的正确有效性。

关键词:混合动力汽车;再生制动;制动力分配;压力控制;硬件在环仿真

中图分类号:U461

文献标志码:A

Coordinated pressure control of a regenerative braking system based on a hybrid electric vehicle with an integrated startor and generator

YANG Yang, YANG Wen-hui, YANG Ya-lian, QIN Da-tong

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission,
Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: With a focus on a Changan hybrid electric vehicle (HEV) with an integrated startor and generator (ISG), strategies for braking force distribution and coordinated pressure control are put forward, and a dynamic braking control model is constructed for off-line simulation. A hydraulic braking system for HEV and a regenerative braking rig are built in dSPACE environment. Tests and analyses of different deceleration events are carried out, which show the strategies for braking force distribution and coordinated pressure control for HEV are reasonable and available.

Key words: hybrid electric vehicle; regenerative braking; baking forces distribution; pressure control; hardware-in-the-loop simulation

混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)减速制动时,能将车辆动能或位能通过带动电机发电,转化为电能储存在电池中,实现能量回馈(再生制动),并产生车辆所需的部分或全部制动力。因此再生制动是混合动力汽车实现低油耗和低排放的重要措施^[1-2]。

混合动力汽车具有再生制动、组合制动和摩擦制动 3 种工作模式,即:制动强度 z 较小时,采用再

生制动,整车制动力完全由电机提供; z 较大时,采用组合制动,整车制动力由电机和摩擦制动器共同提供; z 很大时,采用摩擦制动,整车制动力完全由摩擦制动器提供^[3-10]。

笔者以 ISG(integrated startor and generator)型混合动力长安轿车为研究对象,为确保与传统燃油汽车具有相同制动安全性并实现最大程度的制动能量回收,进行了基于制动力分配控制策略的混合

收稿日期:2008-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475067);国家“863”计划资助项目(2006AA11 A107-1)

作者简介:杨阳(1958-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事流体传动与控制、混合动力汽车的研究,

(E-mail)yangyang@cqu.edu.cn。

动力汽车制动压力控制和硬件在环仿真。

1 HEV 制动力分配和制动系统压力控制

1.1 ISG 混合动力再生制动系统组成

样车混合动力再生制动系统(图 1)主要由 ISG 电机、五速手动变速器、镍氢电池组、液压制动系统和 HEV 控制器等构成。整车制动时,ISG 电机工作在发电状态,向蓄电池充电并提供整车所需的一部分制动力。

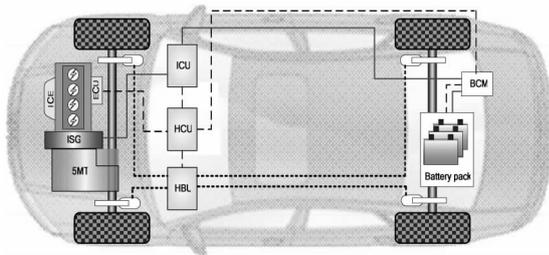


图 1 长安轿车 ISG 混合动力系统

1.2 制动力分配控制策略

采用混合动力汽车定比例制动力分配控制策略^[11-13],分配情况如图 2 所示。

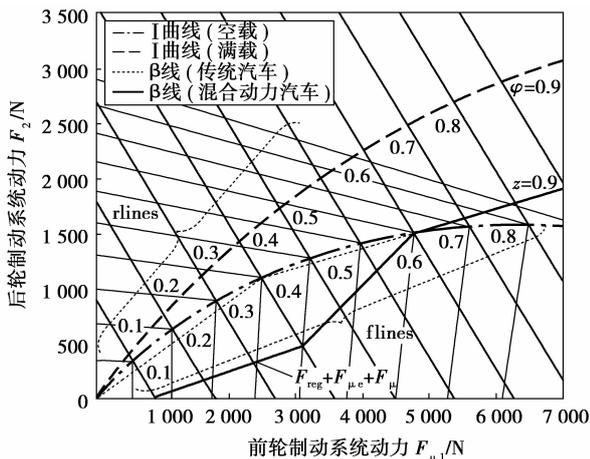


图 2 混合动力汽车前后轮实际制动力分配

再生制动工作模式控制逻辑如下:

1) 制动踏板动作时,首先判断电池的 SOC 值,如果 SOC > 0.8,就采用传统摩擦制动,即前后轮制动都采用摩擦制动。如果 SOC ≤ 0.8,进行电机再生制动。

2) 由制动踏板位移可算出制动强度。

a. 制动强度 z ≤ 0.1 时,为尽可能多地回收制动能量,此时后轮无制动力,整车制动力全由前轮再生制动力提供。

b. 制动强度 0.1 < z < 0.7 时,电机不能提供足

够的再生制动力,在保证制动安全条件下,前轮制动力由电机再生制动力和摩擦制动力联合产生。

c. 当制动强度 z ≥ 0.7 时,为保证汽车紧急制动时的安全性,无电机再生制动,整车制动力全部由摩擦制动力产生。

不同制动强度下混合动力样车制动力分配如图 3 所示。

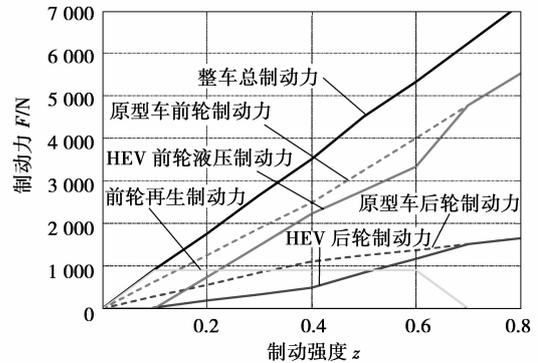


图 3 混合动力样车各制动力分配图

采用该制动力分配策略,产生的总制动力与原参考车型的总制动力相等,且在普通路面制动强度 z < 0.7 的情况下,能保证不会出现前后轮抱死以保证整车的制动安全性。

1.3 制动系统的压力协调控制策略

由于具有再生制动功能,必须对传统制动系统进行改进^[3-5],新的制动系统原理如图 4 所示。

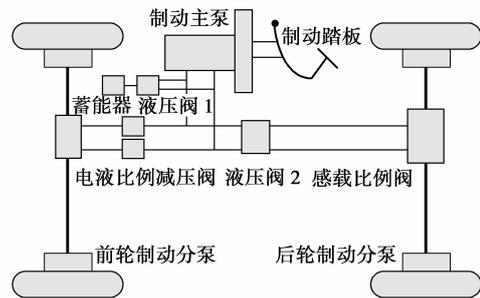


图 4 混合动力样车制动系统原理图

在 HEV 制动系统中,通过电液比例减压阀来控制前轮制动压力,使其低于主泵压力,并与整车制动力分配相适应。蓄能器和液压阀 1 构成了踏板行程模拟器,使驾驶员具有相同的制动感觉。液压阀 2 用于控制制动主泵与后轮制动分泵的油流方向,以适应不同的制动工作模式。传统制动时,电液比例减压阀不进行减压控制,行程模拟器油流被截断。

由于 ISG 电机和电池组容量较小,制动能量回收有限,车速和制动强度较高时,再生制动难以提供足够的制动力,整车所需的大部分或全部制动力必须由摩擦制动来提供;当电池 SOC 较高(>80%)或

电池温度较高时,为保证电池使用寿命均不宜采用再生制动。因此混合动力汽车制动系统是由摩擦制动和再生制动组成的复合制动系统。

对一定车速、油门踏板和制动踏板的位置可得到整车制动力、制动功率以及电机再生制动力,根据制动力分配策略可得前轮摩擦制动力,从而获取前轮制动器目标压力。利用电液比例阀即可实现前轮制动压力的动态调节。基于制动力分配控制策略的 HEV 前轮制动压力协调控制策略如图 5 所示。

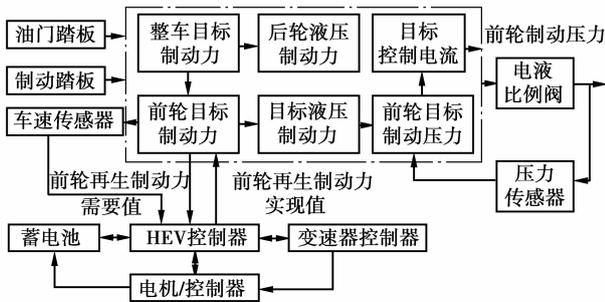


图 5 制动系统压力控制简图

1.4 混合动力汽车再生制动离线仿真模型

ISG 型混合动力汽车的系统模型如图 6 所示。

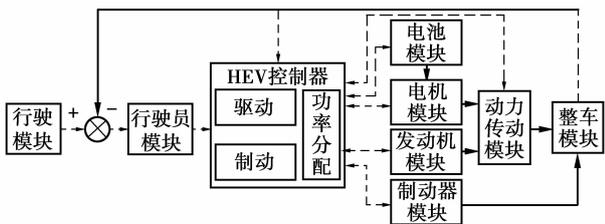


图 6 整车离线仿真模块组成框图

在给定车辆行驶工况下,与车速比较得到的误差反馈信号经驾驶员模型调节产生控制动力系统的转矩控制量,根据 HEV 控制器的能量管理与控制算法进行转矩命令修改,对发电机和蓄電池进行功率分配,以满足动力传动系统驱动车辆行驶的功率要求^[7-9]。

笔者采用理论与数值建模相结合的方法进行再生制动系统的前向建模,利用整车动力学理论建立动力传动系统和制动器模型,通过台架试验建立 ISG 电机、发动机和电池的数值模型^[11-13]。

2 HEV 摩擦制动液压实验系统的研制

2.1 摩擦制动液压实验系统组成原理

所研制的摩擦制动液压系统由电动泵、高速开关阀、制动液缸和蓄能器等组成(图 7、8),液缸制动

压力由 2 只高速开关阀(进油阀和回油阀)组合调节。

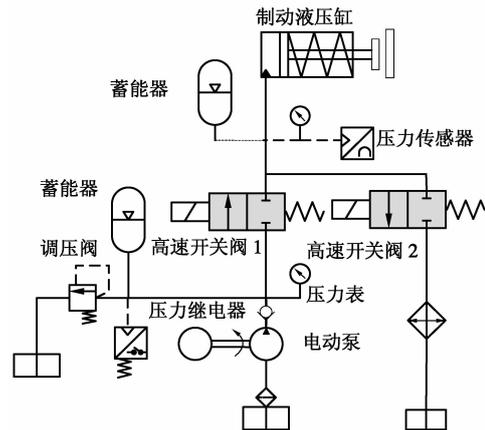


图 7 混合动力试验台制动液系统



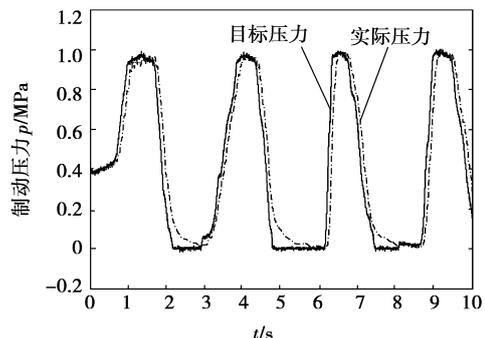
图 8 研制的摩擦制动液系统

再生制动控制器根据制动踏板位移和再生制动控制策略决定实际制动压力并由 PWM 控制器输出占空比信号以控制液缸的进回油的相对开度,实现压力控制。

纯摩擦制动(包括紧急制动)时,制动压力与踏板位移成正比;再生制动时,制动压力为零;组合制动时,实际制动压力小于制动踏板所决定的目标压力,实际总制动力和样车相当。

2.2 液压制动系统的压力控制

摩擦制动系统硬件在环仿真试验表明(图 9),采用 PID 进行进油阀和回油阀的占空比组合控制可实现较高的响应速度和压力控制精度,因此液压制动系统能满足混合动力系统的制动要求。



(a) 快速制动

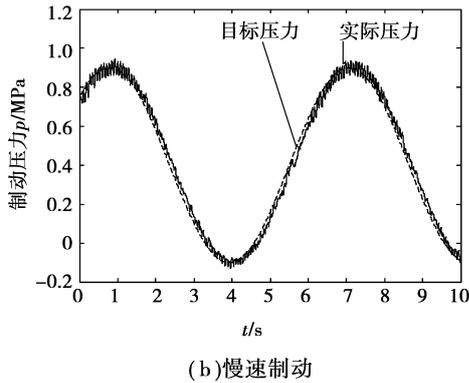


图 9 制动压力响应实验

表 1 ISG 型混合动力试验系统参数

类型	参数值
整车整备质量	865 kg
等效制动惯量	1.3 kg · m ²
JL474 Q2 汽油机	49 kW/6 000 r/min 82 N · m/4 500 r/min
ISG 电机 (永磁无刷直流)	10 kW/4 000 r/min 45 N · m/1 000 r/min
5 MT 变速器	速比 1.000~3.927
NiMH 电池组	标称电压 144 V 容量 6.5 A · h
制动系统供油压力	3 MPa
制动压力	0~2.5 MPa

3 混合动力再生制动硬件在环仿真系统

3.1 HEV 再生制动硬件在环仿真系统构成

笔者应用 dSPACE/Autobox 控制箱^[14],用被控实物替代相应的 Simulink 数值模型,控制系统仍然采用 Simulink 制动力分配控制模型,两者合一构建硬件在环仿真系统(图 10、11)。

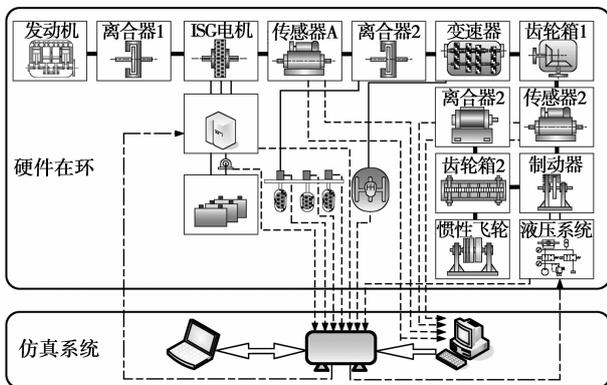


图 10 混合动力再生制动硬件在环仿真系统

3.2 再生制动硬件在环仿真系统的控制模型

由于试验系统上无法模拟道路情况及整车制动过程中的载荷转移等情况,须对图 3 所示的制动力分配曲线进行修改,即将整车制动力分为整车液压制动力和电机再生制动力,而前后轮不再分配制动力。

根据硬件在环仿真系统修改后的目标制动力曲线如图 12 所示。 $z < 0.1$ 时,采用再生制动; $0.1 \leq z < 0.7$ 时,采用再生制动和摩擦制动; $z \geq 0.7$ 时,只采用摩擦制动。

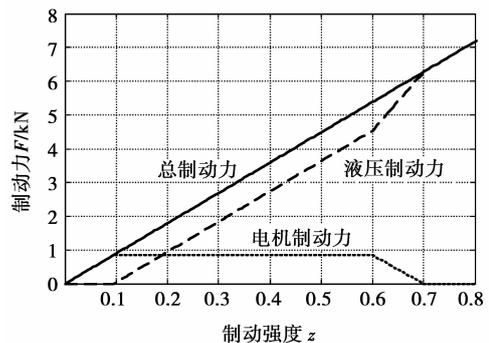


图 12 基于实验系统的制动力分配

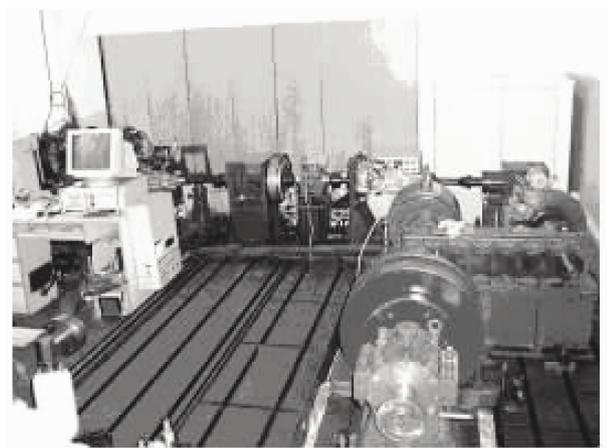


图 11 ISG 混合动力试验系统

ISG 型混合动力系统部件性能参数见表 1。

制动力分配控制模块中,通过输入转速转矩、挡位、加速踏板、制动踏板、电流等信号,利用电机制动力判断模块对液压制动力进行修正,最终决定整车制动工作模式。

在 MATLAB/Simulink 环境下,利用 dSPACE/RTI 工具即可完成混合动力汽车制动力分配控制等模块的代码生成并下载到 dSPACE/Autobox 控制箱中,实现硬件在环仿真试验^[14-15]。

4 整车制动力分配和压力控制的实验模拟

利用 dSPACE/ControlDesk 软件,建立了面向对象的实时再生制动监测调试系统,系统界面如

图 13所示。

为验证制动力分配控制策略的正确性和制动压力控制的有效性,进行了 30 km/h 车速、不同制动强度($z=0.1, 0.5, 0.7$)下制动能量回收率和车辆制动性能试验,结果如图 14-16 所示。由图可见,在某一车速下制动时,根据不同制动强度,系统能实现再生制动($z=0.1$)、复合制动(再生制动+摩擦制动, $z=0.5$)和摩擦制动($z=0.7$)3 种制动工作模式,在前 2 种模式下尽可能利用 ISG 电机发电产生的制动力以提高制动能量回收率(SOC 较大),较好地实现了制动力分配的控制目标。

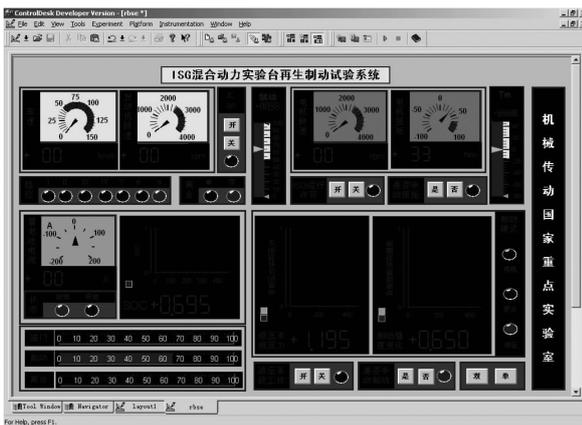


图 13 再生制动硬件在环仿真测试系统主界面

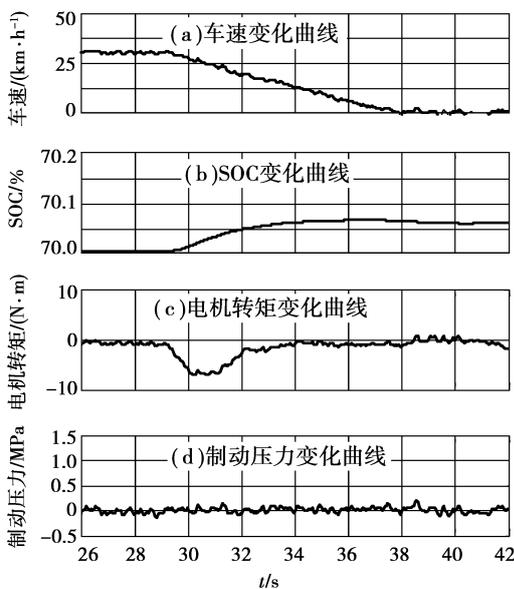


图 14 $z=0.1$ 的试验结果

在不同制动模式下,液压制动系统具有不同的工作状态。低制动强度下,整车制动力完全由电机提供,制动液压系统停止工作,制动器压力为零;中等制动强度下,整车制动力由电机和制动液压系统

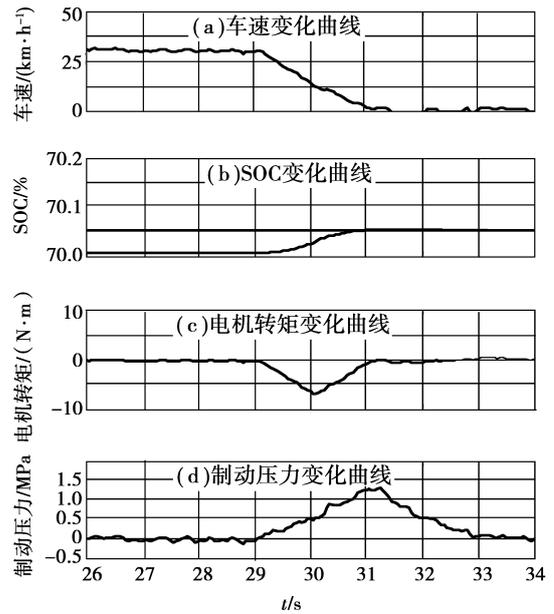


图 15 $z=0.5$ 的试验结果

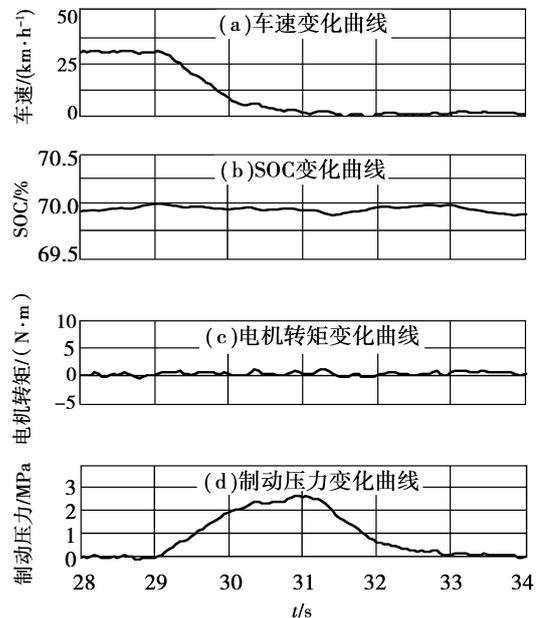


图 16 $z=0.7$ 的试验结果

共同提供,制动器压力能随电机制动力协调变化,以满足不同时刻整车制动力的需要,并实现尽可能大的制动能量回收;强制制动条件下,整车制动力仅由制动液压系统提供,制动器具有较高的油液压力。在后 2 种工作模式下,制动液压系统具有较高的压力控制精度和响应速度。

5 结 语

笔者以 ISG 型混合动力长安轿车为研究对象,进行了基于制动力分配控制和压力协调控制策略的研究,取得了以下成果:

1) 确定了能实现安全制动和高效能量回收的混合动力汽车制动力分配控制和制动系统压力协调控制策略, 建立了 HEV 再生制动系统离线仿真模型。

2) 研制了 HEV 摩擦制动液压试验系统, 采用 PID 进行进油阀和回油阀的占空比组合控制可实现制动系统较高的响应速度和压力控制精度, 满足混合动力系统的制动要求。

3) 构建了混合动力再生制动硬件在环仿真平台, 进行了基于制动力分配控制策略的混合动力再生制动仿真试验, 验证了制动力分配和压力协调控制策略的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] 方景瑞. 国内外混合动力汽车技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2005(5):1-3.
FANG JING-RUI. Development of HEV technology at home and abroad[J]. Tractor & Farm Transporter, 2005(5):1-3.
- [2] GAO Y, CHEN L P, EHEHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. SAE Transactions, 1999, 108(6): 3184-3190.
- [3] YEO H, KIM H. Development of regenerative braking hydraulic module and HIL simulator for hybrid electric vehicle[C]// Proceeding of 19 th International Electric Vehicle Symposium (EVS-19), Oct. 19-23, 2002, Busan, Korea. [S. l.]: IEEE, 2002:108-115.
- [4] ENDO H, ITO M, OZEKI T. Development of Toyota's transaxle for mini-van hybrid vehicles [J]. JSAE Review, 2003, 24 (2): 109-116.
- [5] GAO Y, EHEHSANI M. Electronic braking system of EV and HEV-integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS [J]. SAE Transactions, 2001, 110(7): 576-582.
- [6] YEO H, KIM D, HWANG S, et al. Regenerative braking algorithm for a HEV with CVT ratio control during deceleration [J]. Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(11): 1589-1600.
- [7] ZOU G C, LUO Y G, BIAN Y M, et al. Simulation and study on control strategy for brake energy recovery of parallel type HEV [J]. Auto Technology, 2005 (7): 14-16.
- [8] WALKER A M, LAMPERTH M U, WILKINS S. On friction braking demand with regenerative braking[J/OL]. SAE 2002 Transactions Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2002, 111: 2139-2145[2002-10-25]. <http://www.sae.org/technical/papers/2002-01-2581>.
- [9] 邹广才, 罗禹贡, 边明远, 等. 并联式 HEV 制动能量回收控制策略的仿真研究[J]. 汽车技术, 2005(7):14-16.
ZOU GUANG-CAI, LUO YU-GONG, BIAN MING-YUAN, et al. Simulation and study on control strategy for brake energy recovery of parallel type HEV [J]. Automobile Technology, 2005(7):14-16.
- [10] 耿聪, 刘溧, 张欣, 等. EQ6110 混合动力电动汽车再生制动控制策略研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(3):253-256.
GENG CONG, LIU LI, ZHANG XIN, et al. A study on control strategy for regenerative braking in EQ6, 110 hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(3):253-256.
- [11] 詹迅, 秦大同, 杨阳, 等. 轻度混合动力汽车再生制动控制策略与仿真研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3): 321-324.
ZHAN XUN, QIN DA-TONG, YANG YANG, et al. A study of control strategy and simulation for regenerative for braking in mild hybrid electric vehicle[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3):321-324.
- [12] 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 DA-TONG, TAN QIANG-JUN, YANG YANG, et al. Simulation on regenerative braking control strategy for hybrid electric vehicle with CVT [J]. Automotive Engineering, 2007, 29(3):220-225.
- [13] 秦大同, 邓涛, 杨阳, 等. 基于前向建模的 ISG 型 CVT 混合动力系统再生制动仿真研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5):618-624.
QIN DA-TONG, DENG TAO, YANG YANG, et al. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric vehicle with ISG based on forward modeling[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5):618-624.
- [14] YEO H, KIM H. Hardware-in-the-loop simulation of regenerative braking for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Automobile Engineering, 2002, 216(11): 855-864.
- [15] 秦大同, 杨阳, 詹迅, 等. ISG 混合动力再生制动系统硬件在环仿真[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29(3):1-5.
QIN DA-TONG, YANG YANG, ZHAN XUN, et al. Hardware-in-loop simulation on regenerative braking for hybrid electric powertrain with ISG[J]. Journal of Chongqing University:Natural Science Edition, 2006, 29(3):1-5.

(编辑 张 革)