

文章编号:1000-582X(2008)10-1087-07

基于发动机制动的 HEV 再生制动控制策略

杨 阳¹, 褚 明¹, 秦大同¹, 周安健², 苏 岭²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆长安汽车股份有限公司, 重庆 400023)

摘 要:以 ISG(integrate starter generator)型混合动力 CVT(continuously variable transmission)轿车为研究对象,进行发动机制动性能建模与仿真计算,提出基于前轮最大可承受减速度的制动力最优分配策略。无再生制动时,根据发动机制动特性计算,通过调整 CVT 速比来以充分利用发动机制动;有再生制动时,优先采用电机制动,其次为发动机机制动,最后为摩擦制动。进行基于控制策略的混合动力汽车再生制动建模和典型工况下的仿真分析,仿真结果验证所提出的再生制动控制策略的正确性和可行性。

关键词:混合动力汽车,发动机制动;再生制动;制动力分配;控制策略;建模与仿真

中图分类号:U461

文献标志码:A

Control strategy of regenerative braking for hybrid electric vehicle based on engine braking

YANG Yang¹, CHU Ming¹, QIN Da-tong¹, ZHOU An-jian², SU Ling²

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

2. Chongqing Changan Automobile Limited Liability Company, Chongqing 400023, P. R. China)

Abstract: Focusing on a continuously variable transmission(CVT) hybrid electric vehicle with integrate starter generator(ISG), modeling and simulating of engine braking was conducted. An optimal control strategy of regenerative braking was put forward. When there is no regenerative braking, engine brake force can be used effectively by changing the CVT ratio to reduce the braking force requirements for wheel brakes based on the calculated results of engine braking. When there is regenerative braking, the braking priority sequence is generator braking, engine braking, and finally frictional braking. A forward simulation model for regenerative braking system of hybrid electric vehicle was built. The simulation and analysis under typical driving cycles was conducted. The result shows the control strategy and the models are reasonable and feasible.

Key words: hybrid electric vehicle (HEV); engine brake; regenerative braking; control strategy; modeling and simulation

再生制动是混合动力汽车最重要的功能之一,利用再生制动可在保证整车安全制动条件下将车辆的动能或位能通过电机转化电能,实现能量回收,同时产生车辆所需的制动力,因此再生制动能有效减少整车的燃油消耗、污染物排放和制动器摩擦片磨损。

混合动力汽车制动过程中,存在着电机制动、发动机制动、制动器摩擦制动和组合制动模式,因此对不同制动工况下制动能量分配策略进行深入研究,获取电机制动力、发动机制动和制动器制动力之间的最佳分配规律,对提高整车燃油经济和保障制动

收稿日期:2008-05-08

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(2006AA11A107-1)

作者简介:杨阳(1958-),男,重庆大学副教授,主要从事混合动力汽车方向的研究,(E-mail)yangyang@cqu.edu.cn.
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://jks.cqu.edu.cn>

安全性具有重要意义^[5-15]。

1 发动机制动转矩的计算

1.1 发动机制动特性的数学模型

制动工况是发动机的一种特殊工况,由于此时发动机转速高于怠速转速,造成发动机缸内的工作过程以及换气过程必然不同于一般的怠速工况^[1]。

在零维假设下,系统内的状态变化可用常微分方程来描述。根据能量守恒、质量守恒和气体理想状态方程可以写出基本微分方程。

能量守恒方程

$$\frac{d(mu)}{d\varphi} = \frac{dQ_B}{d\varphi} + \frac{dQ_W}{d\varphi} - P \frac{dV}{d\varphi} + h_s \frac{dm_s}{d\varphi} + h_e \frac{dm_e}{d\varphi} \quad (1)$$

质量守恒方程

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_s}{d\varphi} + \frac{dm_e}{d\varphi} + \frac{dm_B}{d\varphi} \quad (2)$$

理想气体状态方程

$$PV = mRT \quad (3)$$

以上方程中各主要参数见文献^[1]。

1.2 发动机制动特性计算方法

将内燃机一个工作循环划分为压缩、燃烧、膨胀、排气、进排气门叠开和进气等 6 个阶段。配气正时角度值作为已知数据输入。在不同的阶段中,质量守恒方程和能量守恒方程可做适当的简化。

在压缩、燃烧和膨胀 3 个阶段中,质量守恒方程可简化为

$$\frac{dm}{d\varphi} = 0 \quad (5)$$

在排气阶段,只有气流流出汽缸,因此质量方程可简化为

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm}{d\varphi} \quad (6)$$

在进气阶段,只有气流流入汽缸,因此质量方程可简化为

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_s}{d\varphi} \quad (7)$$

在进排气门叠开阶段,同时有气流进入和流出汽缸,因此质量方程可简化为

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_s}{d\varphi} + \frac{dm_e}{d\varphi} \quad (8)$$

由各阶段的初始条件和边界条件^[1],可对发动机不同工作阶段的基本微分方程进行求解,以获取发动机制动特性。发动机制动特性计算过程如图 1 所示。

基于 MATLAB,对混合动力轿车所配备的排量为 1.6 L 的四缸四冲程汽油机进行了制动过程

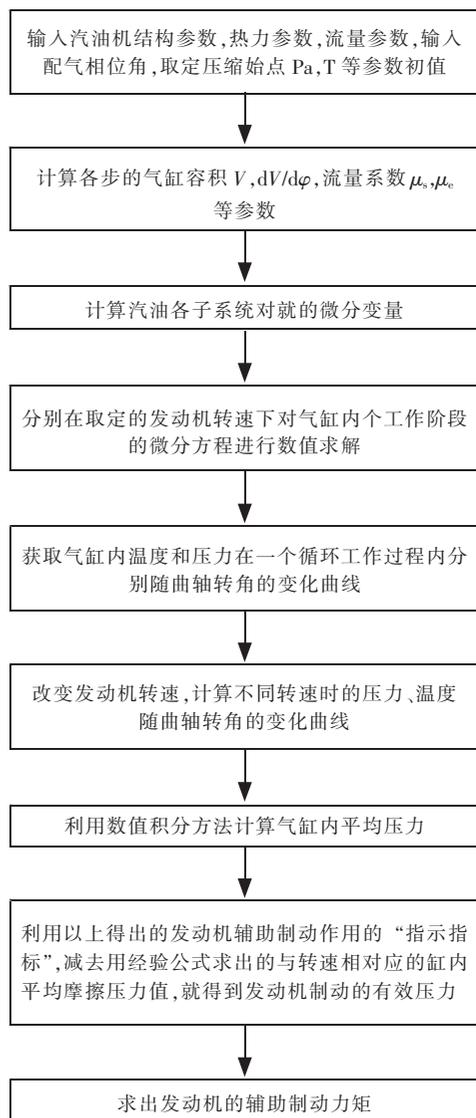


图 1 发动机制动特性计算流程图

的仿真计算,获取的缸内压力 p 随曲轴转角 ϕ 中化曲线如图 2 所示。

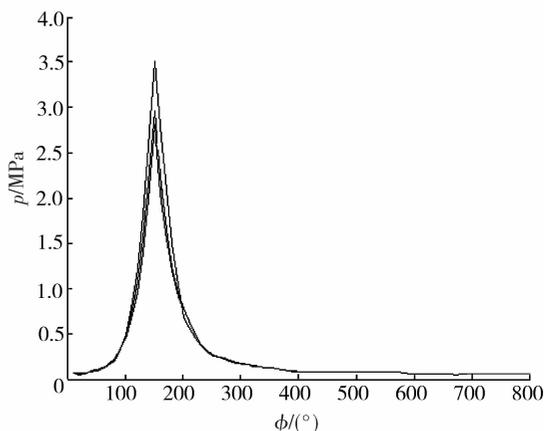


图 2 气缸压力曲线

利用数值积分方法便可求出缸内平均压力 p_i 。
平均摩擦压力采用如下经验公式计算

$$p_m = 0.0062 + 0.0016p_{\max} + 0.00003n, \quad (9)$$

其中: n 为发动机转速。

发动机制动时的有效压力可表达为

$$p_e = p_i - p_m。$$

发动机的辅助制动力矩可由下式计算

$$M = \frac{318.3p_e V_n i}{\tau}, \quad (10)$$

其中: i 为气缸数; τ 为冲程数; p_e 为有效压力 V_n 为排量。混合动力轿车发动机制动转矩曲线如图 3 所示。由图可见,在档位一定的情况下,车速越高发动机的制动作用越明显,该制动转矩将构成混合动力汽车整车制动力的一部分。

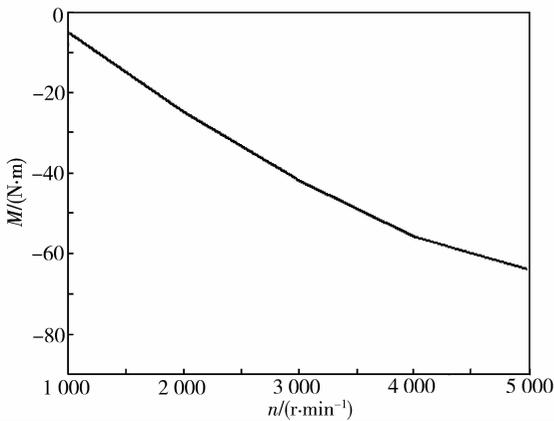


图 3 发动机制动力矩曲线

2 再生制动控制策略策略

2.1 整车制动过程的数学模型

制动过程中混合动力汽车所受总阻力为

$$F_{\text{res}} = F_b + m_a g f_r (1 + c_f v_a^2) + c_{ae} v_a^2 + F_e, \quad (11)$$

式中: F_e 为发动机反拖力,为转速 n 的函数,其余各符号的含义见文献[2]。

为保持汽车制动时的稳定性,制动力 F_b 在前后轮轴间按式(12)的比例关系进行分配^[2,6]。

$$\frac{K_{bf}}{K_{rf}} = \frac{l_2 + h(\mu + f_r)}{l_1 - h(\mu + f_r)}. \quad (12)$$

如果前轮发生锁死,汽车将会丧失稳定性,并且驾驶员将失去对车的控制。当制动减速度达到 a_t 时,前轮发生锁死^[2-4]。

$$a_t = \frac{X_1 + X_2}{X_3}, \quad (13)$$

其中: $X_1 = c_{ae} v_a (K_{bf} - \mu h/L)$;

$$X_2 = m_a g (\mu l_2/L + K_{bf} f_r (1 + c_f v_a^2));$$

$$X_3 = (m_a + \sum I_{\text{wheel}}/r_r^2) (K_{bf} - \mu h/L)。$$

2.2 制动力分配策略

制动力分配策略用于实现整车安全制动和最大程度能量回收,其主要思想为:1)对一定需求制动转矩,优先考虑电机制动;2)在前轮不抱死前提下,尽可能利用前轮制动;3)通过调整 CVT 速比来使电机/电池工作在高效曲线上,以提高制动能量回收率。

制动力分配控制策略可按以下步骤实现:

1)输入电池的 SOC,车速 V ,减速度 a ,电机电池特性。

2)判断 SOC 和 V 。当电池 SOC 小于 80%且 V_a 大于 V_{\min} 时,开启再生制动;否则不开启再生制动。

3)再生制动时,通过 SOC 计算由电池最大充电电压和电流限制的最大充电功率 $P_{\max, \text{ch_Umax}}$ 和 $P_{\max, \text{ch_Imax}}$ 。

4)比较需求减速度 a_f 与最大允许减速度 a 。如果 a 小于 a_f ,则 a 由前轮产生,理论上完全由电机提供;如果 a 大于 a_f ,为保持车辆减速时的稳定、防止前轮抱死,应让前轮提供 a_f ,余下的 $a - a_f$ 将由后轮制动器提供。

5)由 a 或 a_f 计算需求制动功率 P_{bf} ,并将电机最大制动功率 $P_{\text{gen_max}}$ 与 P_{bf} 进行比较。如果 P_{bf} 大于 $P_{\text{gen_max}}$,则多余的制动功率部分($P_{bf} - P_{\text{gen_max}}$)将由后轮提供。此时电机工作在最大功率状态。如果电机功率能满足要求,则需求制动功率完全由电机提供。

6)计算电机产生的实际制动力 F_{gen} 。调整 CVT 的速比,使电机工作在高效工作曲线上。

7)比较电机制动力 F_{gen} 与需求制动力 F_{bf} 。如果 F_{gen} 小于 F_{bf} ,余下的制动力由发动机或摩擦制动器提供,为减轻制动系统的热衰减性,优先选择发动机制动,并计算发动机的制动力 F_e 。

将 F_e 与 $\Delta F(F_{bf} - F_{\text{gen}})$ 比较。如果 F_e 大于 $\Delta F(F_{bf} - F_{\text{gen}})$,则离合器 1 将滑磨,传递的发动机制动力为 F_e' 。如果 F_e 小于 $\Delta F(F_{bf} - F_{\text{gen}})$,余下的 ΔFF ($\Delta F(F_{bf} - F_{\text{gen}}) - F_e$)由后轮摩擦制动来提供;如果 F_{gen} 大于 F_{bf} ,则以 F_{bf} 为电机制动力,电机不能工作在最高效率曲线上。

8)如果 F_{gen} 能满足要求,将 F_{bf} 的分别与 $P_{\max, \text{ch_Umax}}$ 和 $P_{\max, \text{ch_Imax}}$ 比较。

如果 F_{bf} 大于其中之一或全部,选择 $P_{\max, \text{ch_Umax}}$ 和 $P_{\max, \text{ch_Imax}}$ 中较小者作为再生制动功率,由 F_{bf} 与较小功率的差值作为后轮额外需求制动功率;如果

F_{bf} 比 P_{\max, ch_Umax} 和 P_{\max, ch_lmax} 小, 则由 F_{bf} 作为再生制动功率。

如果 F_{gen} 小于 F_{bf} , 将 F_{gen} 分别与 P_{\max, ch_Umax} 和 P_{\max, ch_lmax} 比较。如果 F_{gen} 其中之一或全部, 由 P_{\max, ch_Umax} 和 P_{\max, ch_lmax} 中较小者作为再生制动功

率, 由 F_{gen} 与较小功率的差值作为后轮额外需求制动功率的。

如果 F_{gen} 比 P_{\max, ch_Umax} 和 P_{\max, ch_lmax} 都小, 则由 F_{gen} 作为再生制动功率。

制动力分配策略与算法如图 4 所示。

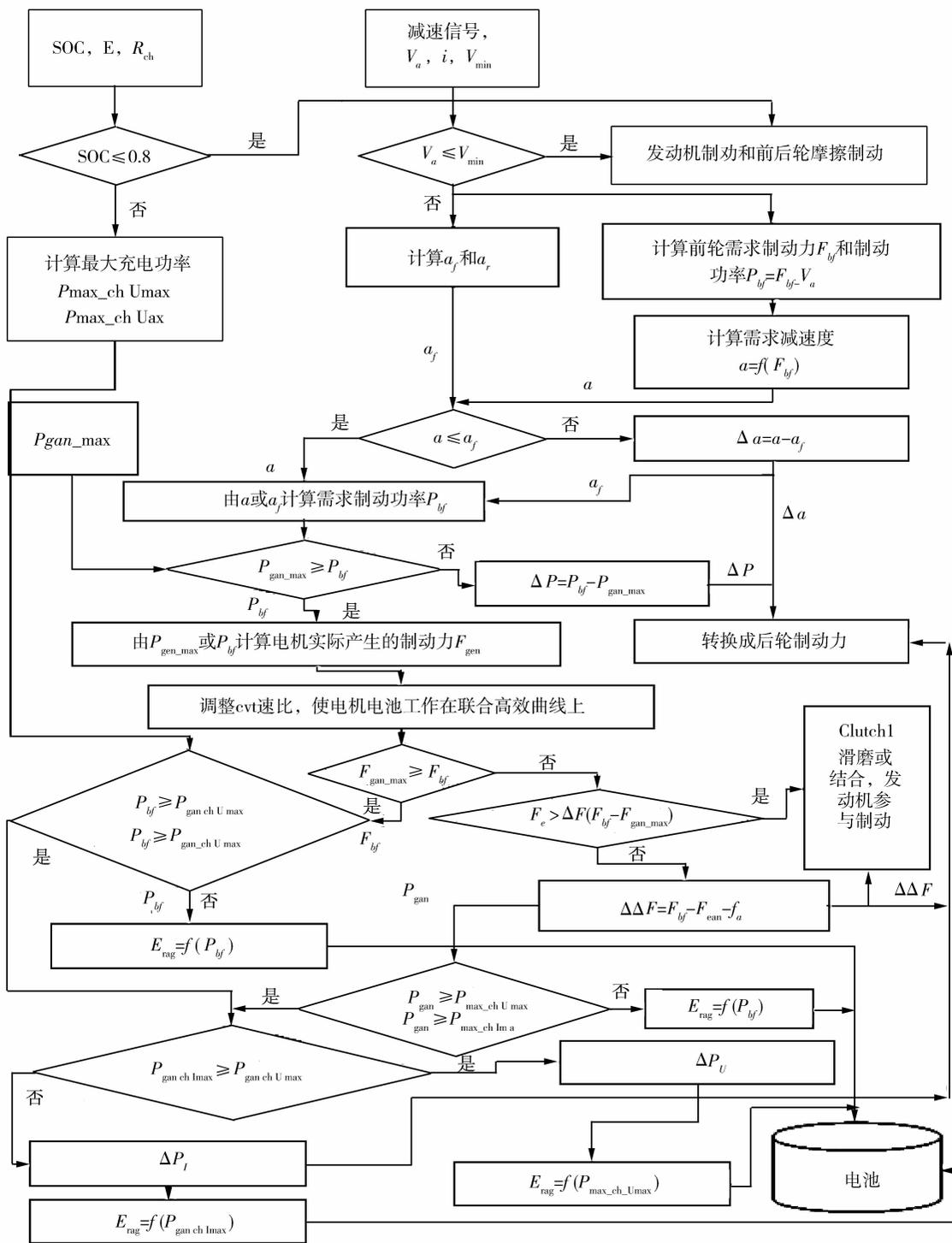


图 4 制动力分配策略图

3 再生制动建模与仿真分析

3.1 整车前向仿真模型

由台架试验建立的子系统(发动机、ISG 电机、镍氢电池和 CVT)数值模型与利用控制理论和汽车动力学建立的驾驶员和整车控制器等理论模型得到了基于前向仿真的 CVT 混合动力汽车整车模型,如图 5 所示。

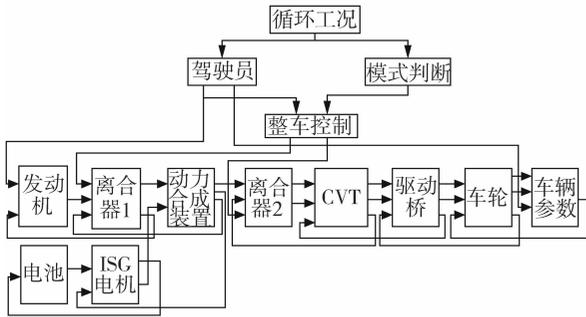


图 5 整车前向仿真模型

整车模型主要由驾驶员模型^[10]、整车控制器(离

合器 1、CVT 速比和夹紧力控制^[10]、最优制动力分配)模型、镍氢电池模型^[8]和 ISG 电机模型^[10]等组成。

3.2 仿真与分析

在 EUDC、UDDS 行驶循环和强制制动工况(初始车速 96 km/h,制动强度为 0.45)下分别进行了仿真。其中 EUDC 和强制制动工况下仿真结果如图 6、7 所示。

由图 6 可知,EUDC 循环工况下整车减速度较小,需求减速度值始终小于车辆前轮能承受的最大减速度,所以行驶过程中全部需求制动力可以完全由前轮提供。由于整个循环中需求制动功率小于电机最大有效功率,所以需求制动力基本上由电机单独提供。

由图 7 可知,由于整车制动减速度较大,制动过程需求减速度始终大于前轮能承受的最大减速度 a_f ,由 a_f 换算得到前轮需求制动力,由 a 与 a_f 的差值换算得到后轮需求制动力。此时前轮需求制动功率在制动初期始终大于电机最大有效功率,所以电机工作在最大功率状态。在制动最后阶段,车速不断降低, a_f 也不断减小,前轮需求制动功率不断减小,直到小于电机最大功率,此时整个前轮的制动力将全部由电机提供。

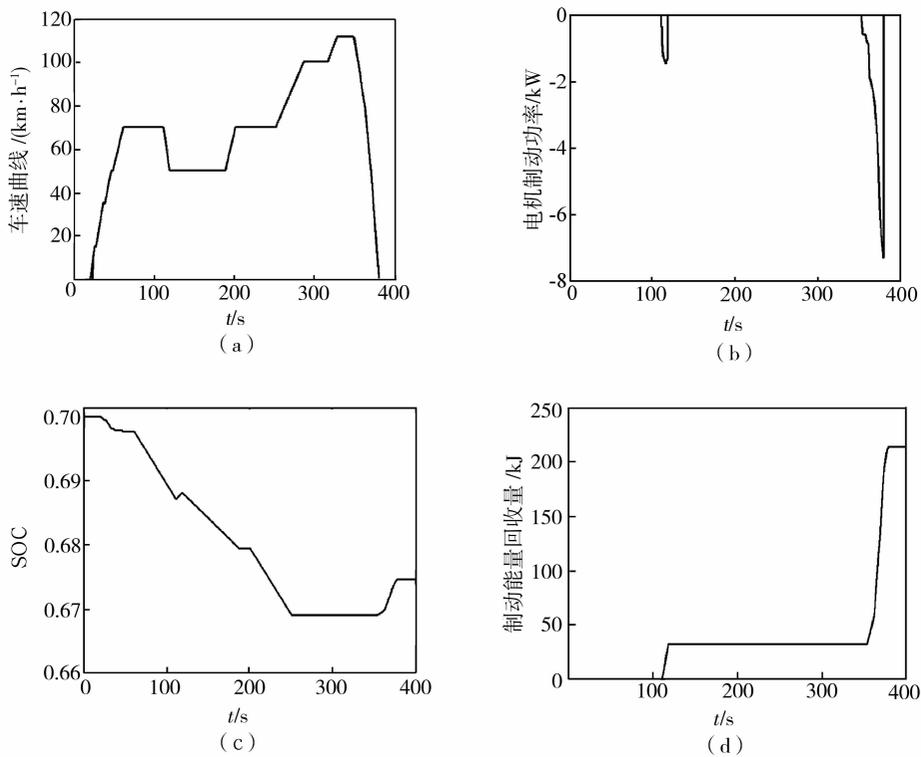
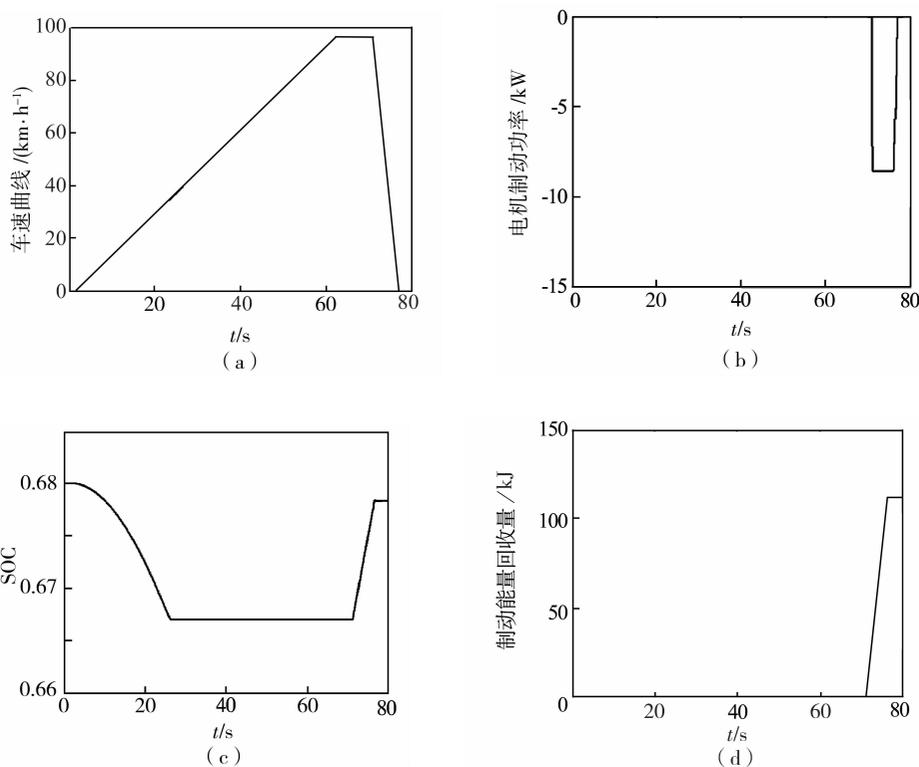


图 6 EUDC 工况的仿真结果

图7 强制制动工况(96 km/h, $z=0.45$)的仿真结果

制动能量回收效果可用制动能量回收量(E_b)、制动能量回收率(E_r)和有效制动能量回收率(E_t)等3个指标评价^[5], EUDC、UDDS 和强制制动工况下的制动能量回收效果如图8、9所示。

在行驶循环工况下,由于制动需求功率,基本上采用前轮电机制动,能量回收效果较好;在强制制动条件下,由于制动需求功率较大且时间较短,部分功率由发动机和制动器提供,能量回收效果不如行驶循环工况,但由于优先采用发动机制动,减小了制动器热衰减性,延长了制动器工作寿命。

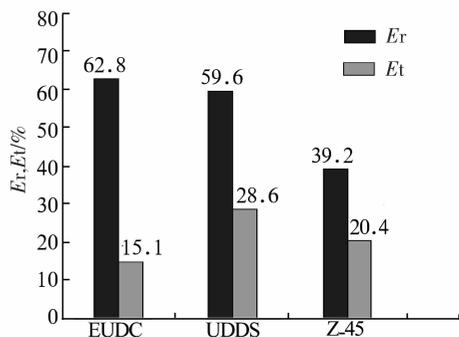


图9 制动能量回收率和有效制动能量回收率

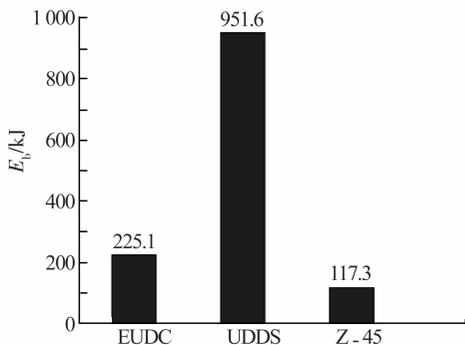


图8 制动能量回收量

4 结论

对 ISG 型 CVT 混合动力汽车再生制动控制策略进行了研究,取得了以下成果:

1)对发动机制动过程进行了建模与仿真计算,获取发动机制动力矩与发动机转速的关系特性为制动力分配控制策略的制定和实现提供了依据。

2)提出了基于前轮最大稳定减速度的最优制动力分配策略。在保证制动稳定性的前提下,尽可能采用前轮制动和再生制动,非再生制动时尽可能采用发动机制动,并通过 CVT 速比调节以充分利用发动机制动,提高汽车制动的抗热衰减性。

3)建立基于控制策略的混合动力汽车再生制动前向仿真模型,并进行 EUDC、UDDS 和强制制动工况下的仿真计算。

4)仿真结果表明,采用提出的再生制动控制策略能保证整车制动安全性和较高的制动能量回收率。

参考文献:

- [1] 朱访君,吴坚. 内燃机工作过程数值计算及其优化[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [2] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [3] WONG J Y. Theory of ground vehicles [M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 2001.
- [4] 顾柏良. BOSCH 汽车工程手册[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [5] EMADI A, RAJASHEKARA K, WILLAMSON S S, et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicle power system architectures and configurations [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2005,54(3): 763-770.
- [6] OBA H, YAMANAKA A. Development of a hybrid powertrain system using CVT in a minivan[J]. Toyota Technical Review,2002,51(2):52-57.
- [7] TERATANI T, KURAMOCHI K. Development of Toyota mild-hybrid system (THS-M) [J]. Toyota Technical Review,2002, 52 (1):46-51.
- [8] 杨阳,林志煌,秦大同,等. HEV 再生制动时 NiMH 电池快速充电控制策略与仿真[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007, 30(3):1-5.
YANG YANG, LIN ZHI-HUANG, QING DA-TONG, et al. Control strategy and simulation of the NiMH battery fast charge when HEV regenerative braking[J]. Journal of Chongqing University; Natural Science, 2007, 30(3):1-5.
- [9] YEO H, KIM H. Hardware-in-the loop simulation of regenerative braking for a hybrid electric vehicle[J]. ProcInstn MechEngrs, 2002 , 216(11):855-864.
- [10] 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.
QING DA-TONG, DENG TAO, YANG YANG, et al. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric vehicle with ISG based on forward modeling[J]. Mechanical Engineering of China, 2008, 19(5): 618-624.
- [11] ZHANG Y, ZOU Z, CHEN X, et al. Simulation and analysis of transmission shift dynamics[J]. International Journal of Vehicle Design,2003,32:273-289.
- [12] 谭强俊. CVT 混合动力汽车再生制动系统性能仿真与试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- [13] 邹广才,罗禹贡,边明远. 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)16-20.
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):16-20.
- [14] 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 EQ6110 hybrid electric vehicle [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(3):253-256.
- [15] BAUMANN B M, WASHINGTON G, BRADLEY C G, et al. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicle [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2000(1):3-6.

(编辑 赵 静)