

文章编号:1000-582X(2008)09-0971-06

全轮驱动混合动力汽车再生制动系统控制策略

秦大同, 李江, 杨阳

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要:在传统汽车制动理论的基础上,基于最大回收制动能量和制动的安全性,提出了一种全轮驱动混合动力汽车制动能量分配与再生制动控制策略。综合考虑电机电池效率等限制因素后,进行整车再生制动系统建模和典型制动工况下的仿真。结果表明,在制动车速为 30 km/h,制动强度 z 分别为 0.1、0.3、0.5 下最大能量回收率分别可达 87.5%、47.8%、28.6%,采用提出的制动能量分配与再生制动控制策略能满足整车制动力分配的要求,并实现高效的制动能量回收。

关键词:全轮驱动混合动力汽车;再生制动;控制策略;建模仿真

中图分类号:U461

文献标志码:A

A control strategy for braking energy distribution and regenerative braking in a 4WD hybrid electric vehicle

QIN Da-tong¹, LI Jiang², YANG Yang³

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

Abstract: Based on the braking theory of conventional vehicles and high efficient energy recovery and security braking, a control strategy for braking energy distribution and regenerative braking of a 4WD hybrid electric vehicle was proposed. Considering limiting factors, such as motor and battery efficiency, a simulation model of a regenerative braking system was built and a simulation of typical braking conditions was conducted. The simulation result shows that the highest energy recycle ratio can reach 87.5%, 47.8%, and 28.6% when z is 0.1, 0.3, and 0.5, respectively, at 30 km/h. The control strategy for braking energy distribution and regenerative braking can satisfy demand for vehicle braking and obtain high regenerative energy.

Key words: 4WD hybrid electric vehicle; regenerative braking; control strategy; model and simulation

随着大气污染的加剧和石油资源的日益枯竭,以混合动力汽车为代表的清洁汽车已成为世界各大汽车公司的开发重点。所研发的混合动力汽车中,采用前轮驱动较多,如丰田公司 Prius、本田的 Insight、Civic 等,2001 年丰田公司推出了全轮驱动的混合动力汽车 Estima^[1-4]。

混合动力汽车的突出优点之一是能够实现再生

制动。相对于前轮驱动,全轮驱动混合动力汽车能够回收更多的制动能量。如 Estima 采用了电控柔性制动系统,并将再生制动纳入整车动力控制系统进行集中控制,并通过 CVT 控制,提高了再生制动能量回收率^[5-8]。

中国对于混合动力汽车的研究处于起步阶段,对再生制动尤其是全轮驱动混合动力再生制动的关

收稿日期:2008-06-06

基金项目:国家自然科学基金(50475067);国家 863 高技术研究发展计划(2006AA11A107-1)

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事混合动力汽车再生制动方面研究,

(Tel)02365106506;(E-mail)dtqin@cqu.edu.cn.

键技术研究较为薄弱^[9]。相对于前轮驱动混合动力汽车,以全轮驱动混合动力汽车为研究对象,对其再生制动控制策略进行研究,有利于进一步提高整车的燃油经济性和降低排放。

1 全轮驱动混合动力系统组成

笔者研究的全轮驱动混合动力汽车是以轻度混合动力汽车为基础,在汽车后轴增加了 1 个后电机和 1 个后主减速器,其混合动力系统如图 1 所示。

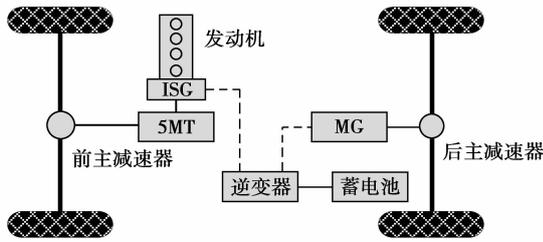


图 1 全轮驱动混合动力汽车的系统构成

全轮驱动混合动力汽车的制动系统主要由摩擦制动系统和再生制动系统组成。前者一般是指电控液压制动系统,后者包括前后电机、电机控制系统、蓄电池、电池控制系统。在汽车制动减速过程中,制动系统实际上是一个由摩擦制动和再生制动组成的复合制动系统,两者协调工作^[10-11]。

2 全轮驱动混合动力汽车的能量回收控制策略

2.1 前后电机的制动强度

在制动过程中,电机工作在发电状态,把整车动能转换成电能向动力电池组充电,实现整车能量回收,同时通过传动系统对车轮产生制动力(再生制动力)^[12],电机再生制动力由式(1)求得^[13]

$$F_{re} = \frac{i_g i_0 T_m \eta_m \eta_g \eta_0}{r} \quad (1)$$

其中: F_{re} 为电机制动转矩在车轮处产生的制动力(N); i_g 为变速箱传动比,对后电机, $i_g=1$; i_0 为主减速传动比; T_m 为电机制动转矩(Nm); η_m 为电机发电效率; η_g 为变速箱传动效率,对后电机, $\eta_g=1$; η_0 为主减速传动效率。

根据式(1)可得后电机的最大制动强度为 0.08,前后电机总的最大制动强度为 0.21。

2.2 整车制动能量分配与再生制动控制策略

采用最大化能量回收的制动能量分配控制与再生制动控制策略,在满足汽车制动安全性基础上最大程度地回收整车的制动能量^[14]。对于全轮驱动

的混合动力汽车,应充分利用前后电机的再生制动力。

由电机的外特性、效率特性和整车与传动系统参数可知,前后电机的最大制动强度分别为 0.13 和 0.08,后电机的发电效率高于前电机且无变速器损失和发动机反拖影响,因此,制动时应优先采用后电机制动,以实现高效的制动能量回收。

制动强度可分为以下 2 个阶段。

2.2.1 制动强度 $Z < 0.08$

当制动强度小于 0.08 时,后电机有可能提供全部的制动力。

如图 2, IJ 是后电机能产生的最大制动力曲线, KL 是前电机能产生的最大制动力曲线, AH 是制动强度为 0.07 的曲线。存在以下 2 种状态:

1) 后电机制动力超过 A 点制动力,制动力 F_{r-reg} 全部由后电机提供,制动模式为纯后电机制动,整车制动力 $F_{\mu} = F_{r-reg}$ (F_{r-reg} 表示后电机制动力, F_{f-m} 表示前摩擦制动力,以此类推);

2) 后电机制动力不足以提供全部制动力,如 ND ,此时需要和前电机联合制动,甚至需要摩擦制动系统的参与。制动模式为三者联合制动,整车制动力 $F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg}$ ($F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg} + F_m$)。

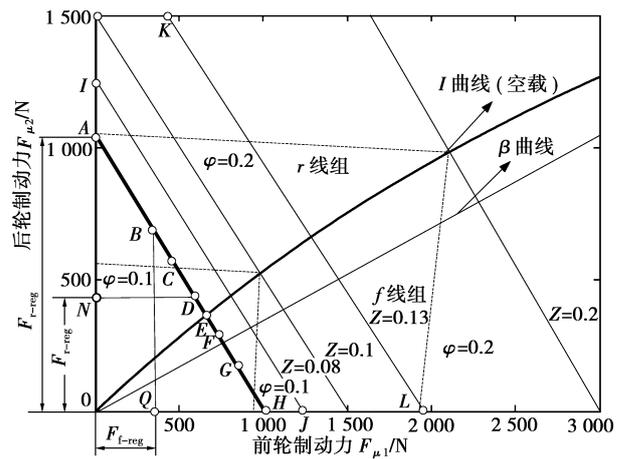


图 2 $Z < 0.08$ 的制动力分配

2.2.2 制动强度 $Z > 0.08$

制动强度 Z 大于 0.08 时,应考虑制动安全性。如图 3 中制动强度 Z 为 0.3 的 AE 线。前电机提供的制动力线为 BI ,后电机提供的制动力线为 HD 。存在以下 3 种状态。

1) BI 和 HD 交叉,可分 3 种情况。

制动强度比较小, BD 在 J 点的上方。 D 点就是最好的制动力分配点,制动模式为后电机与前液压系统联合制动,制动力 $F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg} + F_{f-m}$ 。

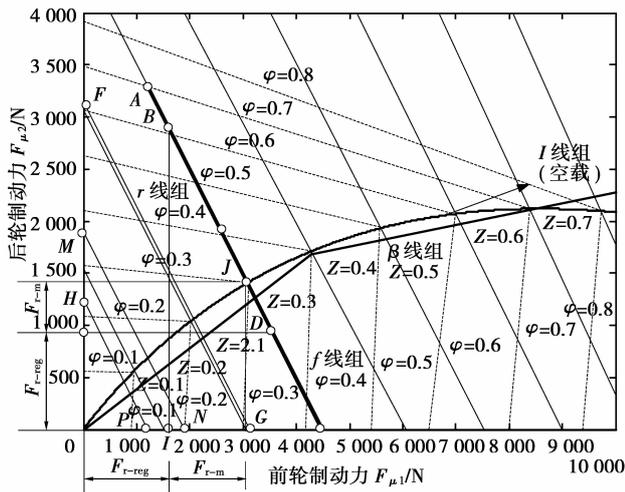


图 3 Z > 0.21 的制动力分配

制动强度较大, J 点在 BD 之间, 从回收能量和安全性考虑, J 点为最佳分配点。制动模式为电机再生制动与摩擦制动系统联合。制动力为: $F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg} + F_{f-m} + F_{r-m}$ 。

J 点在 BD 上面, 最佳制动力分配点是 B 点, 制动模式为前电机与后液压系统联合制动, 整车的制动力为: $F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg} + F_{r-m}$ 。

2) BI 和 HD 不交叉, 制动力全部可由电机提供, D 点为最佳制动力分配点, 制动模式为前后电机制动, 制动力为 $F_{\mu} = F_{r-reg} + F_{f-reg}$ 。

3) 当紧急制动(如 $z > 0.7$)或电池 SOC 较大以及电池温度较高时, 电机停止工作, 不再提供再生制动力, 制动模式为纯摩擦制动, 制动力为: $F_{\mu} = F_{f-m} + F_{r-m}$ 。

2.3 确定再生制动控制策略要考虑的因素

上面提出的基于最大能量回收再生制动力分配控制策略是一种理想的情况, 在实际中能量回收还跟很多因素有关, 包括电池充电效率、电池的 SOC、电机发电效率、速比、车速、制动强度等。

电池在每个时刻都存在一个最大的可接收充电功率 P_{max} , 汽车制动时, 不仅要考虑电池的可接收回馈功率, 还要考虑电池的 SOC 和温度状态。制动过程中, 根据车速、制动强度以及再生制动力分配策略来计算汽车可能的再生制动功率 P_{reg} , 当 P_{reg} 大于 P_{max} 时, 只回收 P_{max} 大小的制动功率; 反之则回收 P_{reg} ; 电池的 SOC 低于 0.8 时才控制电机进入再生制动充电模式, 反之则停止再生制动; 电池的温度达到其上限温度时, 停止再生制动。

再生制动过程中, 电机效率与转速和转矩的关系 $\eta_m = f(n_m, T_m)$ 由电机工作特性决定, 根据电机效率二维等高线图可得到电机优化工作曲线, 在该曲线上, 电机具有最高的发电效率, 可通过变速器速比

控制来实现。

此车型中, 采用多挡有级手动变速器, 虽然不能自动调节速比, 但可以通过换挡提示来实现相应的换挡控制, 保证电机在发电优化工作曲线的有限点上运行。

3 基于制动能量分配与再生制动控制策略的建模与仿真

3.1 全轮驱动混合动力再生制动系统建模

基于台架试验所建立的子系统(发动机、电机、镍氢电池)数值模型和基于汽车动力学建立的驾驶员与整车控制模型得到了全轮驱动混合动力汽车的整车前向仿真模型(图 4)。其中制动系统模型主要包括电池模型、电机模型、制动力分配控制模型。

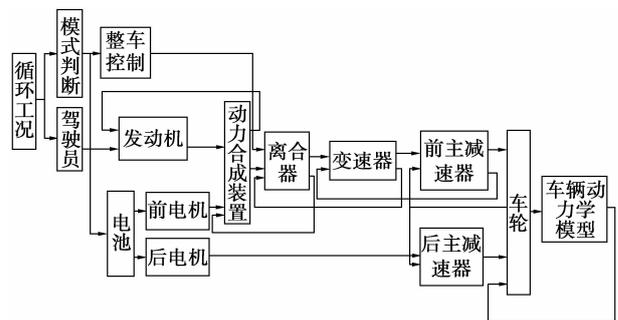


图 4 整车前向仿真模块

3.1.1 电池模型

由电流 I 的正负(正为充电, 负为放电)来判断电池处于充电还是放电工况。根据计算 SOC 的变化来建立镍氢电池的数值模型(图 5), 计算公式见式(3)~(6)^[15]

$$E(\text{SOC}) = E_0 + \sum_1^5 E_i \times \text{SOC}^i, \quad (3)$$

$$U = E(\text{SOC}) + R(\text{SOC}) \times I, \quad (4)$$

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 + \eta \int_0^t Idt, \quad (5)$$

$$R_w(\text{SOC}) = b(\text{SOC}) \frac{E(\text{SOC})}{I} + \frac{l(\text{SOC}) \times E(\text{SOC})}{\text{SOC}}, \quad (6)$$

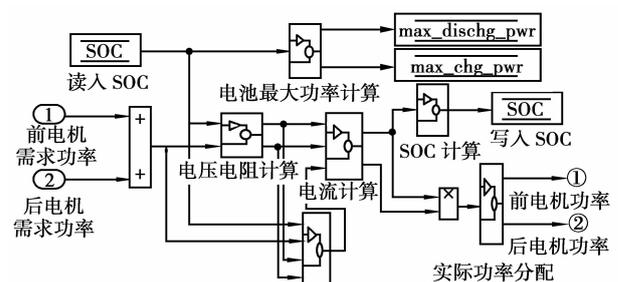


图 5 电池模型

其中： η 为电流充放电效率； $b(\text{SOC})$ 和 $l(\text{SOC})$ 是电池内阻计算参数，随 SOC 变化而变化。

3.1.2 电机模型

根据样车混合动力系统方案，前电机为 ISG 型永磁直流无刷电机，后电机为无刷直流电机，其效率曲线分别如图 6、7 所示。

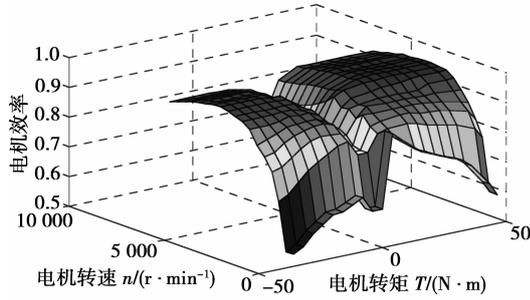


图 6 前电机效率曲线

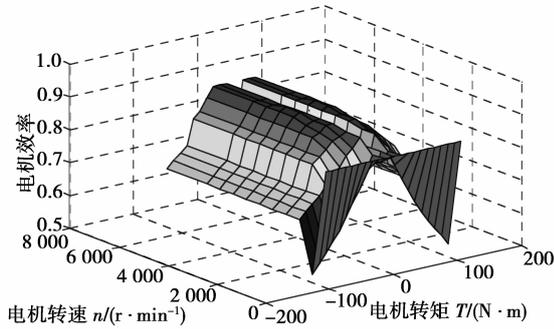


图 7 后电机效率曲线

根据电机台架实验数据并结合 ADVISOR 软件所建立的电机模型如图 8 所示。

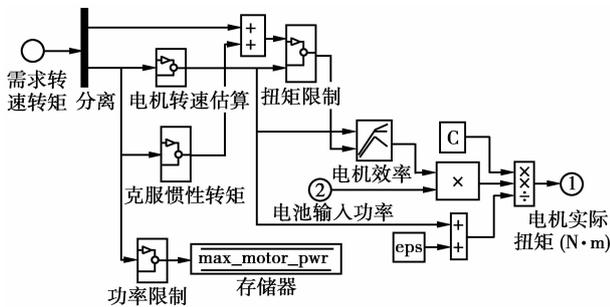


图 8 电机模型

3.1.3 制动力分配模型

根据汽车制动车速、变速器当前速比和制订的再生制动力分配策略，可确定前后电机再生制动力在总制动力中所占的比例，结合驾驶员模型给出的目标制动力可以确定前后电机目标再生制动力的大小，建立的模型如图 9 所示。

考虑电机的最大发电功率、发电效率、电池的可

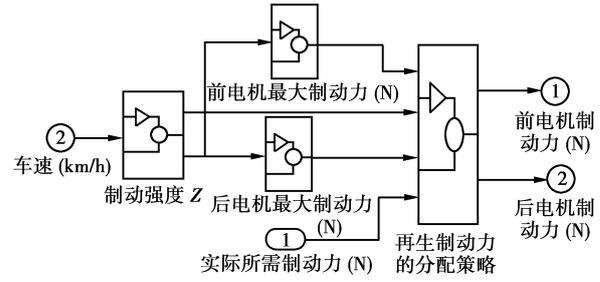


图 9 再生制动力分配模型

接受充电功率、充电效率等限制因素，可得到前后电机实际再生制动力的大小，通过整车控制器得到前后车轮实际摩擦制动力的大小，实际制动力分配模型如图 10 所示。

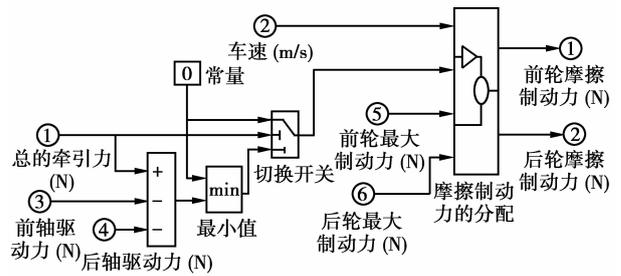


图 10 实际制动力分配模型

3.2 再生制动控制策略的仿真分析

3.2.1 仿真参数

仿真参数主要包括整车参数和各动力传动部件主要参数见表 1。

表 1 汽车整车、动力传动部件主要参数

汽车整车及动力传动部件		参数
整车参数	整备质量 m	1 540 kg
	滚动阻力系数	0.013 5
	车轮半径 r	0.31 m
	迎风面积 A	2.28 m ²
	空阻系数 C_D	0.32
	发动机	1.3L
前电机	ISG	10 kw/6 000 r/min
	(永磁无刷直流电机)	45 Nm/2 000 r/min
后电机	无刷直流电机	18 kw@6 500 r/min
		106 Nm/1 625 r/min
变速器	五速手动(5MT)	速比 0.757~3.416
电池	NiH 电池组	公称电压 230 V
		容量 6.5 A·h

3.2.2 仿真结果

采用定步长仿真，其中仿真步长为 0.1 s，求解器采用 ode4(Runge-Kutta)求解器。路面附着系数

选择为 0.7, SOC 初始值为 0.7。典型制动工况的初速度为 30 km/h, 制动初始时间为 16 s, 制动强度为 0.1, 在这里主要考虑回收的能量, 由于紧急制动时不回收能量, 所以在这暂时不考虑紧急制动的情况, 其仿真结果如图 11-13 所示。

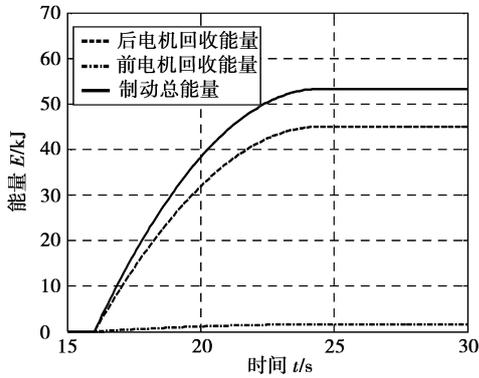


图 11 Z=0.1 时的制动能量回收

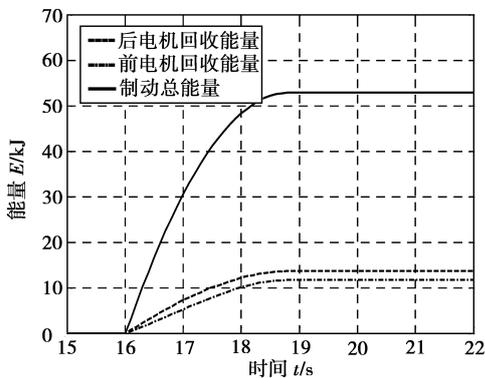


图 12 Z=0.3 时的制动能量回收

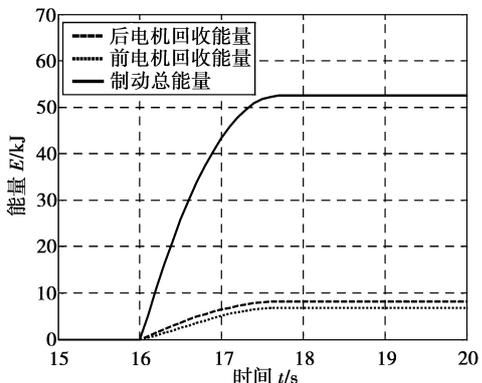


图 13 Z=0.5 时的制动能量回收

3.2.3 仿真结果分析

同时仿真了 $v=30\text{ km/h}$, $Z=0.1, 2$ 挡的情况, 同样得到了前后电机的回收能量。从仿真结果来看, 车速、速比、制动强度都可以影响制动能量的回收, 电池和电机的效率同样起着非常重要的作用。图 14 是全轮驱动混合动力汽车在相同车速、不同挡位、不同制动强度下的制动能量回收率, 图 15 是

$z=0.1, 1$ 挡下的电机电池效率。

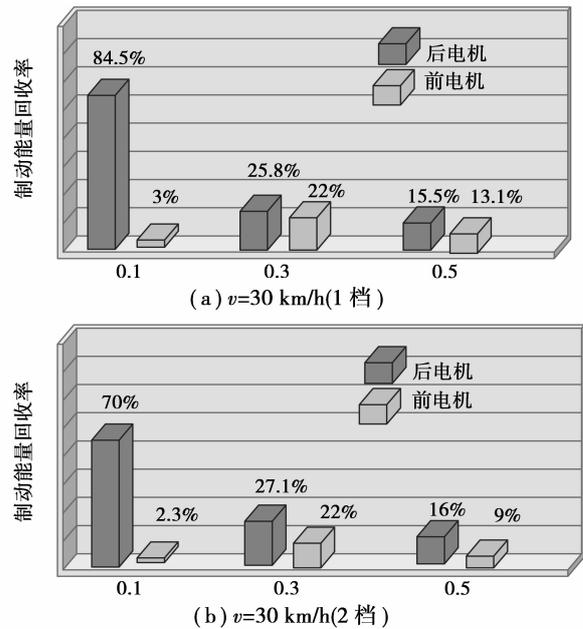


图 14 不同挡位、速比下制动能量回收率

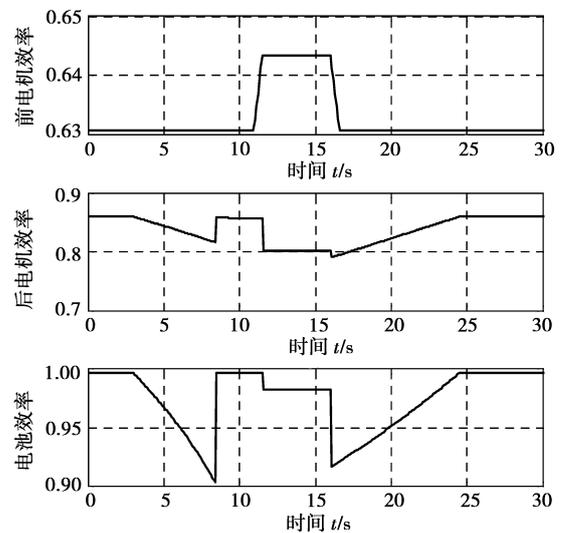


图 15 Z=0.1, 1 挡下的电机电池效率

由仿真结果可知:

1) 制动强度较低 (如 $Z=0.1$) 时, 理论上整车制动力全部由电机提供, 能量回收率为 100%, 且后电机提供了制动力的绝大部分, 但由于此时前电机效率非常低, 后电机效率不足 0.9, 电池效率不足 0.95, 导致最终后电机回收了制动能量的 84.5%, 前电机回收了制动能量的 3%, 剩下的 12.5% 只能由摩擦制动力提供。

2) 相同的初始车速和挡位下, 随着制动强度的增大, 由于前电机的参与, 后电机的制动能量在制动总能量中所占的比例下降, 前电机能量回收率会有

所增加,但由于电机和电池效率不高, $Z=0.3$ 时,总的能量回收仅为47.8%,到 $Z=0.5$ 时,总的能量回收下降到了28.6%。

3)在相同的制动初速度和制动强度下,随着挡位的增加,在制动强度较低的情况下,前后电机的制动能量回收率呈减少趋势,但在制动强度较大的情况下,后电机的能量回收率会有小幅度上升,这是由于后电机发电效率较高的缘故。

以上分析表明,仿真结果与提出的再生制动力分配策略是相符的,在综合考虑电机电池效率、制动安全性的前提下,全轮驱动混合动力汽车有较高的制动能量回收率。

4 结 论

以全轮驱动混合动力汽车为研究对象,对其制动能量分配与再生制动控制策略进行了研究,取得了如下成果:

1)基于最大制动能量回收和制动安全性,提出了一种全轮驱动混合动力汽车的制动能量分配与再生制动控制策略,在保证制动安全的前提下,优先采用后电机制动,充分利用前后电机的再生制动力,实现了整车制动能量的高效回收;

2)在Matlab/Simulink环境下对整车和制订的制动能量分配与再生制动控制策略进行了前向建模与仿真,在建模仿真中,考虑了电池的效率和可接收回馈能量、电机的发电效率和发电限制功率等限制因素;

3)仿真结果表明,此车型在制动初速为30 km/h,制动强度 Z 分别为0.1、0.3、0.5下最大能量回收率分别可达87.5%、47.8%、28.6%,与制订的制动能量分配与再生制动控制策略是相符的。

参考文献:

- [1] DUOBA M, BOHN T, LOHSE-BUSCH H. Investigating possible fuel economy bias due to regenerative braking in testing HEVs on 2WD and 4WD chassis dynamometers[J]. SAE, 2005, 114:324-334.
- [2] 范健文, 吴彤峰. 本田INSIGHT控制策略仿真研究[J]. 广西工学院学报, 2004, 15(3):9-12.
FAN JIAN-WEN, WU TONG-FENG. Simulating study of the control strategy for Honda Insight[J]. Journal of Guangxi University of Technology, 2004, 15(3):9-12.
- [3] YAMAMOTO T, SHIMIZU H, ITO M, et al. Development of simple driver-friendly electric 4WD system[J]. Hitachi Review 2004, 53(4):186-190.
- [4] MATSUHASHI S, OBA H, OTSUKA A. The estimate hybrid equipped with a new hybrid system[R]. Technical Award News, 2004.
- [5] SASAKI A Y, MTOMO F, KAWAHATA A M. Toyota braking system for hybrid vehicle with regenerative system[J]. EVS-14, Proceeding CD, 1997, 6(2):253-259.
- [6] 朱敏惠. 丰田混合动力技术一瞥[J]. 发展动态: 汽车配件, 2002, 8:17-18.
ZHU MIN-HUI. The technology of Toyota hybrid electrical vehicle [J]. Evolutive Developments: Automobile Fittings, 2002, 8:17-18.
- [7] 张金柱. 丰田第二代混合动力系统(THS II)[J]. 内燃机, 2005, 3:6-14.
ZHANG JIN-ZHU. Second generation of Toyota hybrid system (THS II) [J]. Internal Combustion Engines, 2005, 3:6-14.
- [8] ENDO H, ITO M, OZEKI T. Development of Toyota's transaxle for mini-van hybrid vehicles[J]. JSAE Review, 2003, 24(1):109-116.
- [9] 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 JIN-RUI. Development of HEV technology at home and abroad[J]. Tractor and Farm Transporter, 2005, 5:1-3.
- [10] 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, 2003, 7:14-16.
ZOU GUANG-CAI, LUO YU-GONG, BIAN YUAN-MING, et al. Simulation and study on control strategy for brake energy recovery of parallel type HEV[J]. Auto technology, 2003, 7:14-16
- [11] HAYASHIDA M, NARUSAWA K, KAMIYA Y. Energy regeneration of city commuter-car by ultracapacitor and battery [J]. EVS-15, Proceeding CD, 1998, 3:13-17.
- [12] WALKER A M, LAMPERTH M U, WILKINS S. On friction braking demand with regenerative braking[J]. SAE Technical, 2003(1):2581.
- [13] 詹讯, 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 on control strategy for braking distributions in mild hybrid electric vehicle [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(3):321-324.
- [14] CONLEY J, CLARLK N N. Optimal hybrid vehicle design using real world data to determine actual regenerative braking energy [C] // Proceeding of the Total Vehicle Technology Conference. Sussex, Britain: Professional Engineering Publishing, 2004:11-28.
- [15] 秦大同, 邓涛, 杨阳. 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. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric vehicle with ISG based on forward modeling[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5):618-624.

(编辑 赵 静)