

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.12.017

插电式并联混合动力汽车再生制动控制策略

陈泽宇, 杨 英, 王新超, 吕 明
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 再生制动是混合动力汽车区别于传统汽车的技术特点,是提高车辆燃油经济性的重要措施之一. 以一种轴间力矩耦合的插电式并联混合动力汽车为研究对象,从再生制动分配算法的影响因素入手,提出了一种带有模糊控制的混合动力汽车再生制动能量管理策略. 所设计的控制策略主要针对两个层面的控制决策,顶层是轴间制动力矩的分配决策,底层是再生制动电机所在的后轴力矩在摩擦制动与再生制动之间的分配决策. 采用多种典型车辆行驶工况对所提出的模糊控制策略进行仿真研究. 结果表明,所提出的模糊控制策略能够明显改善车辆的能量回收效果,与传统理想制动力分配曲线控制策略相比,能量回收最多可提高23.44%.

关 键 词: 混合动力汽车;力矩耦合;再生制动;模糊控制;能量管理
中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)12-1750-06

Control Strategy of Regenerative Braking for Plug-in Parallel Hybrid Electric Vehicles

CHEN Ze-yu, YANG Ying, WANG Xin-chao, LYU Ming
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: CHEN Ze-yu, E-mail: chenzy@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Different from traditional internal combustion engine vehicles, hybrid electric vehicles (HEVs) have regenerative braking capability to improve fuel economy. Taking a plug-in parallel HEV with axles torque coupling as the research object, the influences of regenerative braking were analyzed. A regenerative braking control strategy using fuzzy control was then proposed. The presented strategy was to make two-layers control decision. The braking torque was allocated between the front axle and rear axle in the top layer, while the algorithm in bottom layer split the rear axle braking torque between mechanical braking and electric braking. The strategy was evaluated in a simulation study using several typical driving cycles. The results show that the as-proposed fuzzy control strategy can significantly improve the effect of energy recovery up to 23.44%, compared with that of the traditional ideal braking force distribution curve strategy.
Key words: hybrid electric vehicle; torque coupling; regenerative braking; fuzzy control; energy management

近年来,随着环境污染与能源危机等问题日益严峻,以电动汽车、混合动力汽车为代表的新能源车辆逐渐成为国内外汽车领域的研究热点^[1-2]. 再生制动是电动车辆与混合动力汽车提高节能率的重要途径之一^[3],在制动过程中,将电动机暂时用作发电机,使车辆动能部分地转化为电能存储在电池中,可以有效提高车辆运行过

程中的能量转换效率,且可以降低刹车时的机械磨损和放热. 目前再生制动控制技术已被视为电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车等电驱动车辆的关键技术之一,引起了国内外学者的广泛关注^[4-7]. 制动过程所涉及到的因素较多,为了提高能量回收效果,同时兼顾车辆在制动过程中的稳定性和安全性,一套合理有效的再生制动控制

策略是必不可少的^[8-9]. 针对此问题, 本文以一种轴间力矩耦合的插电式混合动力汽车 (plug-in hybrid electric vehicles, PHEVs) 为研究对象, 结合制动时的稳定性以及电机与电池特性的影响, 提出了一种基于模糊控制的再生制动分层控制策略, 采用 Mamdani 模糊逻辑对制动过程中的制动力矩分配与能量管理决策进行了优化, 最后在 MATLAB/Simulink 软件环境下, 对所设计的模糊控制策略进行了仿真研究.

1 车辆驱动系统结构

图 1 所示为轴间力矩耦合的插电式并联混合动力汽车系统结构, 该系统包含两个动力输出单元: 发动机与电动机. 发动机前置前驱, 通过变速器、减速器等驱动车辆前轴, 电机驱动系统则负责驱动后轴, 锂离子电池组作为车辆电源为电动机进行供电. 发动机力矩与电机力矩通过地面进行耦合, 共同驱动车辆行驶, 这种并联混合动力系统结构的明显优势是不需要专门的力矩耦合机构, 因此简化了系统结构, 易于实现灵活的空间布置, 同时避免了力矩耦合过程中的功率损失. 另一方面, 这样的拓扑结构有益于更好地利用地面附着力, 可以实现四轮驱动形式来提高车辆在附着较差的路面上的动力性.

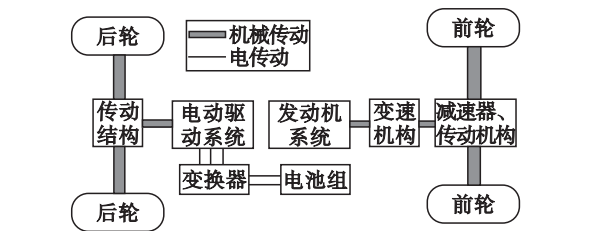


图 1 轴间力矩耦合的并联混合动力汽车系统结构
Fig. 1 Schematic diagram of parallel PHEV based on torque coupling from axis

再生制动过程中电机驱动系统输出负力矩, 即用作发电机, 将动能转化为电能存储在电池组中. 取消了发动机与电动机之间的力矩耦合装置也使得再生制动时的能量回收效率略微提高, 基于上述系统结构, 可得力矩耦合关系如式 (1) 所示:

$$T_{\text{req}} = \frac{F_d}{r_z} = T_e \eta_g \eta_{t1} + T_m \eta_{t2} \quad (1)$$

其中: T_{req} 为总的需求力矩; F_d 为车辆牵引力 (负值表示制动力); r_z 为车辆半径; T_e 与 T_m 分别为发动机力矩与电机力矩; η_g 为变速器传动效率; η_{t1} 与 η_{t2} 分别为前、后轴机械传动效率.

2 再生制动控制的影响因素

为了尽可能多地实现能量回收, 在制动过程中通常优先采用电机制动力, 然而由于电机仅连接车辆的一个轴, 而前后轴的制动力分配又涉及到制动时的操控稳定性问题, 另外, 再生制动还受到电机最大力矩与电池特性等多方面的影响. 为了建立合理有效的再生制动控制策略, 有必要对这些影响因素进行分析.

2.1 制动时的稳定性

前后轴制动力分配关系对制动时的操控稳定性具有重要的影响, 在传统内燃机汽车的研究中已经对这一问题进行了较为深入的分析, 一个通用的结论是: 如果前轴制动力过大导致前轮率先抱死, 车辆失去转向能力; 而后轴制动力过大导致后轮率先抱死, 则会发生后轴侧滑, 车辆失去制动时的稳定性. 为了在实现再生制动的同时, 保证车辆良好的操控稳定性, 则必须在再生制动力调节过程中对这一问题给予充分考虑. 图 2 所示为车辆制动过程中的动力学分析模型, 考虑制动过程中的动态载荷转移, 则前后轴的支撑力如式 (2) 所示:

$$\begin{aligned} F_{z1} &= \frac{mg}{L} (L_2 + zh_g), \\ F_{z2} &= \frac{mg}{L} (L_1 - zh_g). \end{aligned} \quad (2)$$

其中: m 为整车质量; g 为重力加速度; F_{z1} 与 F_{z2} 分别为前后轴垂直载荷的支撑力; L 为轴距; L_1 与 L_2 分别为质心到前后轴的距离; h_g 为质心高度; z 为制动强度, 表示为

$$z = \frac{du}{dt} \frac{1}{g} \quad (3)$$

其中 u 为车辆纵向速度.

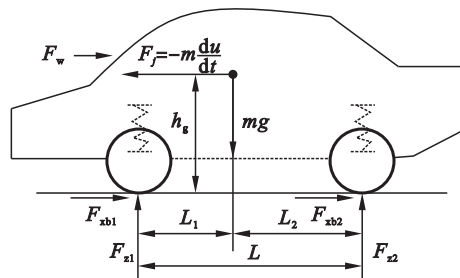


图 2 制动过程的车辆动力学分析
Fig. 2 Kinetic analysis of vehicle in braking process

忽略风阻 F_w , 前后轮同时抱死时制动强度 z 等值于附着系数 φ , 此时制动力分配满足如下关系:

$$\begin{aligned} F_{\text{xb1}} + F_{\text{xb2}} &= \varphi mg, \\ F_{\text{xb1}} &= \varphi F_{z1}, \\ F_{\text{xb2}} &= \varphi F_{z2}. \end{aligned} \tag{4}$$

其中 F_{xb1} 与 F_{xb2} 分别为前、后轴制动力。

由于电机作用于后轴,因此在制动过程需优先采用后轴制动力以实现能量回收,但如果制动力过大导致后轮率先抱死,因此在再生制动力的决策中必须施加适当的约束. 假设后轮率先抱死,那么式(4)中只有第 3 个等式满足,联合式(2) ~ (3)可得此时的制动力分配满足式(5)所示的关系.

$$F_{\text{xb2}} = \frac{L - \varphi h_g}{\varphi h_g} F_{\text{xb1}} - \frac{mgL_2}{h_g}. \tag{5}$$

同理如果前轮率先抱死,对于任意给定的附着条件,制动力分配满足如下关系:

$$F_{\text{xb2}} = \frac{\varphi h_g}{L + \varphi h_g} F_{\text{xb1}} - \frac{\varphi mgL_1}{L + \varphi h_g}. \tag{6}$$

2.2 电机工作特性

电机工作特性对再生制动功率有着直接的约束,当转速处于基速点之前时,电机保持恒力矩工作特性,而在基速点之后,电机以恒功率曲线工作,如图 3 所示. 制动过程中,电机所能提供的最大再生制动力矩可以描述为式(7)所示的关系.

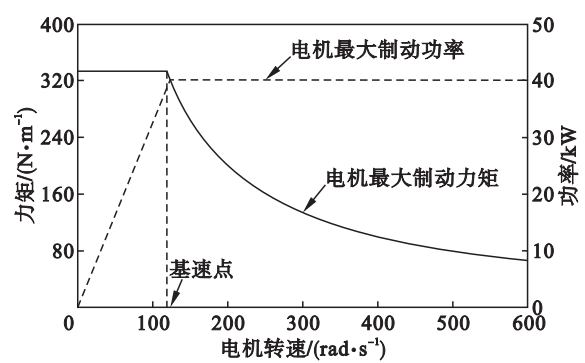


图 3 电机特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of electric motor

$$\begin{aligned} T_{\text{reg}}(t) &\leq \frac{T_{\text{m_max}} i_{\text{m}}}{\eta_{\text{t}}} \quad \text{if } \omega_{\text{m}}(t) \leq \omega_{\text{mw}}, \\ T_{\text{reg}}(t) &\leq \frac{P_{\text{m_max}} i_{\text{m}}}{\omega_{\text{m}}(t) \eta_{\text{t}}} \quad \text{if } \omega_{\text{m}}(t) > \omega_{\text{mw}}. \end{aligned} \tag{7}$$

其中: T_{reg} 为再生制动力矩; $P_{\text{m_max}}$ 为电机最大功率; $T_{\text{m_max}}$ 为电机最大制动力矩; i_{m} 与 η_{t} 分别为电机输出轴到驱动轮的传动比和传动效率.

2.3 电池最大接收功率

再生制动产生的电能存储在车载电池组中,电池组所能接受的最大充电电流存在上限. 这里采用 3C 倍率电流作为最大允许充电电流,因此受电池组限制的最大再生制动力矩可以描述为

$$\begin{aligned} T_{\text{reg}}(t) &\leq \frac{\xi_z P_{\text{batt_max}}(\sigma)}{K \omega_{\text{m}}(t)} = \\ &\frac{\xi_z I_{\text{batt_max}}(U_{\text{oc}}(\sigma) - I_{\text{batt_max}} R_0)}{K \omega_{\text{m}}(t)}. \end{aligned} \tag{8}$$

其中: $I_{\text{batt_max}}$ 表示最大充电接受电流; U_{oc} 为电池组开路电压,是电池荷电状态(state of charge, SoC)的函数; σ 表示电池 SoC; ξ_z 为防止电池组过充的限制因子:

$$\xi_z = \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma < 0.90, \\ 0 & \text{if } \sigma \geq 0.90. \end{cases} \tag{9}$$

K 为与传动比和传动效率有关的常数:

$$K = \frac{\eta_{\text{t}} \eta_{\text{m}}}{i_{\text{m}}}. \tag{10}$$

其中 η_{m} 为电机馈电效率.

3 控制策略设计

再生制动控制策略的设计问题可以概括地描述为:在确保制动效能不受影响的前提下,通过合理地分配制动力矩,实现最佳的能量回收效果. 所设计的控制策略包含两个层次,如图 4 所示. 顶层控制策略根据驾驶员操作信号计算出所需的总制动力及制动强度,结合车辆状态实现前、后轴制动力的合理分配;底层控制策略则负责将后轴的制动力在电制动(再生制动)与机械制动之间进行二次分配. 为了便于描述,定义后轴制动力分配系数 β_1 与电制动分配系数 β_2 如式(11)所示.

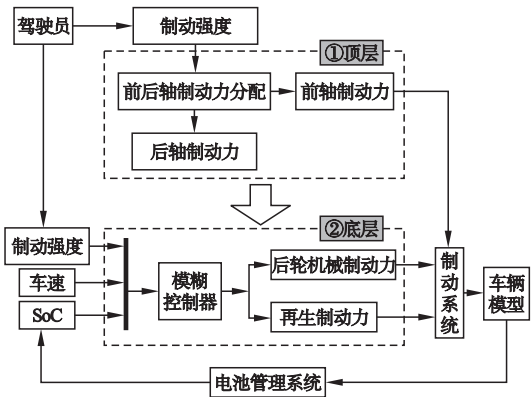


图 4 再生制动控制策略流程图

Fig. 4 Diagram of regenerative braking control strategy

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{F_{\text{xb2}}}{F_{\text{xb1}} + F_{\text{xb2}}}, \\ \beta_2 &= \frac{F_{\text{m}}}{F_{\text{xb2}}}. \end{aligned} \tag{11}$$

其中 F_{m} 为后轴的电制动力.

3.1 顶层制动力分配算法

图 5 所示为顶层轴间制动力的分配策略示意

图,其中 I 线表示根据式(4)所得的任意附着系数情况下的前后轮同时抱死时的制动力分配关系, f 线组与 r 线组则分别表示根据式(5)~(6)所得前轮率先抱死和后轮率先抱死时的制动力分配关系。

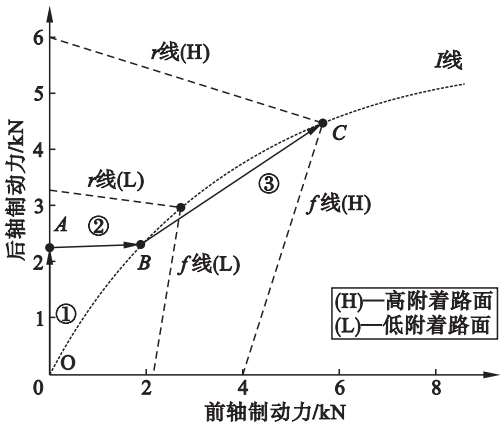


图 5 轴间制动力分配示意图

Fig. 5 Schematic diagram of braking force allocation between axes

图 5 中共绘制了两组 f 线与 r 线,分别代表车辆行驶过程中的附着上限与附着下限所对应的情况.与传统的理想制动力分配曲线法不同,这里基于制动时的稳定性分析,得到一种适用于再生制动的前后轴制动力分配策略:①在制动强度略低时,制动力优先作用于电制动所在的后轴,此时制动力分配没有触及 r 线或 f 线,在这个区域内前后车轮都没有抱死,因此所有的制动力都由后轴的电制动来提供.②为了避免当路面附着力较低时制动力分配曲线触碰到 r 线致使后轮抱死,随着制动强度的进一步增大,前轮开始分担制动力直至触碰到 I 线.③如果制动强度继续增加,则前后轴制动力沿着理想制动力分配曲线一起增大,以保证车辆良好的制动稳定性和附着条件利用率.上述制动力分配算法可进一步描述为

$$\beta_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } z < \kappa_1, \\ \frac{F_{xb} - \kappa_1 mg}{F_{xb}} & \text{if } \kappa_1 \leq z < \kappa_2, \\ \frac{1}{L}(L_1 - zh_g) & \text{if } z \geq \kappa_2. \end{cases} \quad (12)$$

其中: F_{xb} 为总制动力; κ_1 与 κ_2 为A、B点对应的制动强度门限值。

3.2 底层模糊控制策略

后轴制动力由电制动与机械制动两个部分组成,在明确了后轴总的制动力之后,进一步确定电制动分配系数 β_2 .底层控制算法引入三输入一输出的 Mamdani 结构模糊控制器^[10]来实现后轴制

动力在电制动与机械制动之间的二次分配,三个模糊输入分别为车速、制动强度和电池 SoC,输出为分配系数 β_2 ,量化后的隶属度函数设计如图 6 所示.车速较低时,由于可利用的制动功率很小,且为了实现平稳的制动停车效果,采用机械制动提供车辆所需的制动力,而车速过高时电机转速也较高,此时尽管优先使用电制动,但可以利用的电机力矩十分有限,进一步结合电机与电池的工作特性分析,得出 27 条模糊控制规则如表 1 所示。

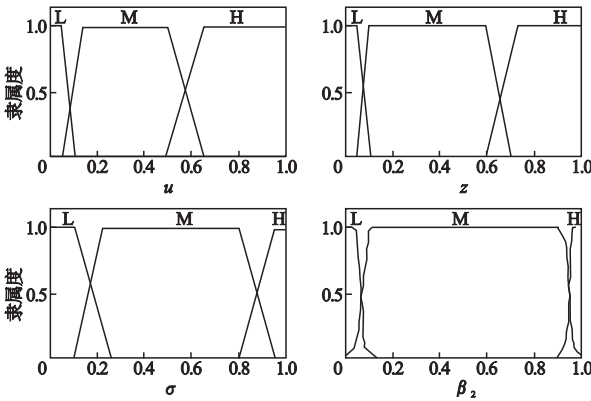


图 6 模糊变量隶属度函数图

Fig. 6 Membership function diagram of fuzzy variables

表 1 再生制动模糊控制规则

Table 1 Fuzzy control rules for regenerative braking									
规则	u	z	σ	β_2	规则	u	z	σ	β_2
1	L	L	L	L	15	M	H	M	L
2	L	M	L	L	16	M	L	H	L
3	L	H	L	L	17	M	M	H	L
4	L	L	M	L	18	M	H	H	L
5	L	M	M	L	19	H	L	L	M
6	L	H	M	L	20	H	M	L	M
7	L	L	H	L	21	H	H	L	L
8	L	M	H	L	22	H	L	M	H
9	L	H	H	L	23	H	M	M	H
10	M	L	L	M	24	H	H	M	L
11	M	M	L	M	25	H	L	H	L
12	M	H	L	L	26	H	M	H	L
13	M	L	M	H	27	H	H	H	L
14	M	M	M	H					

4 仿真分析

为确定所提出的再生制动控制策略的有效

性,本文在 MATLAB/Simulink 软件环境中进行仿真分析,开始制动时的初始车速为 40 km/h,制动强度分别为 $z=0.1$ 与 $z=0.2$,仿真结果如图 7 所示.可以看出随着制动强度的增大,制动力分配倾向于前轴,以制动强度为 0.2 的情况为例,图 8 所示为模糊控制下的电制动力仿真结果与无模糊控制情况下的对比结果.显然,采用了模糊控制算法之后,电制动向机械制动的过渡更为平顺.

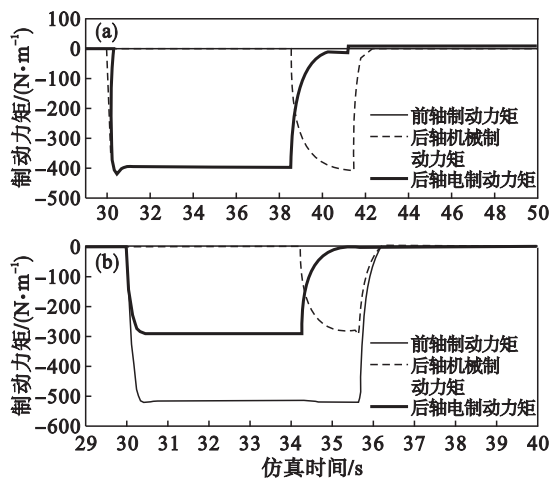


图 7 制动力矩分配仿真结果

Fig. 7 Simulation results of braking torque allocation
(a)— $z=0.1$; (b)— $z=0.2$.

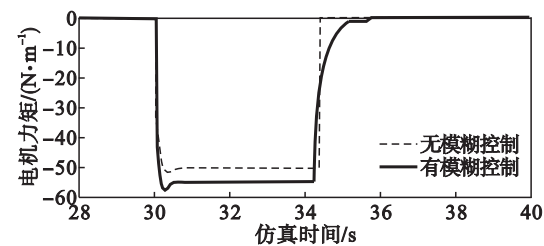


图 8 模糊控制效果

Fig. 8 Control performance of fuzzy logic

为了进一步验证本文所提出的基于模糊逻辑的分层控制策略的节能效果,采用 NYCC, US06 与 New York Bus 等三种典型工况进行系统仿真,并与传统的理想曲线分配策略进行对比.理想曲线分配策略简要描述为:对任意给定的制动强度,采用 I 曲线(如图 5 所示)进行制动力分配,并优先采用电制动以实现能量回收.重复仿真得到三种典型工况下的电池 SoC 变化结果,如图 9 所示,容易看出,采用所提出的模糊分层控制策略时,电池的 SoC 下降速度明显得以减缓.在一次循环结束时,统计控制策略所实现的能量回收总量,归纳于表 2 中,可见与传统理想曲线分配策略相比,本文提出的控制策略可以显著提高能量回收效果,在本文采用的工况中,最多可提高

23.44%.

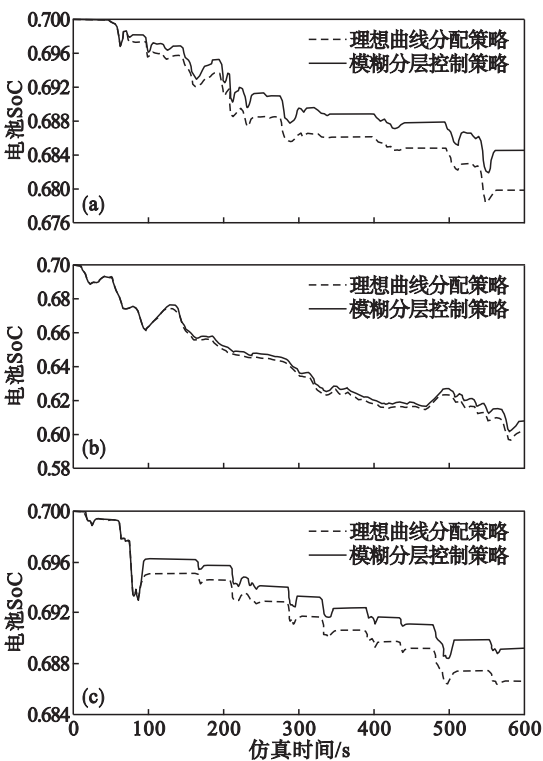


图 9 三种典型工况下的电池 SoC 仿真结果

Fig. 9 Simulation results of battery SoC at three typical driving cycles
(a)—NYCC 工况; (b)—US06 工况;
(c)—New York Bus 工况.

表 2 三种工况下的制动能量回收量
Table 2 Energy regeneration at three driving cycles

行驶工况	理想曲线分配策略/kJ	模糊分层控制策略/kJ	提高比例/%
NYCC	401	495	23.44
US06	1 582	1 871	18.27
New York Bus	276	342	23.91

5 结 语

针对轴间力矩耦合的插电式并联混合动力汽车进行了再生制动控制策略的研究,分析了制动力分配的主要影响因素,进而提出了一种基于模糊控制的再生制动分层控制策略.通过三种典型驾驶工况的仿真对所提出的控制策略进行了验证,结果表明所构建的模糊分层控制策略可以有效提高再生制动过程中的能量回收效果,与传统的理想制动力分配曲线策略相比,三种工况下能量回收效果可分别提高 23.44%, 18.27% 和 23.91%.

(下转第 1763 页)