

基于多因素输入模糊控制的再生制动策略*

杨小龙[†], 杨功正, 张泽坪

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:大部分再生制动策略研究仅考虑制动方向稳定性,忽略制动效能恒定性,在理想制动前提下的研究存在缺陷,以良好制动性和能量回收率最大化为目标,对前驱型纯电动汽车进行研究,提出了基于多因素输入模糊控制的再生制动策略.在某整车模型的基础上,先以制动方向稳定性和ECE法规完成前、后轴制动力分配,同时保证前轴制动力最大化;再采用摩擦副动态摩擦因数预估机械制动效能因数,然后将电池荷电状态、制动强度和预估的机械制动效能因数引入模糊控制器,得到再生制动力分配份额,完成能量回收.研究结果表明:在频繁且强度较恒定的制动工况下,制动效能恒定性表现较好,同时制动能量回收率提升了18.5%;城市道路工况蓄电池满电到零电的整个测试中,能量回收率提升了5.3%.

关键词:再生制动;制动性;模糊控制;预估;制动效能因数

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

Regenerative Braking Strategy Research Based on Multi-factor Input Fuzzy Control

YANG Xiaolong[†], YANG Gongzheng, ZHANG Zeping

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

Abstract: Most of the regenerative braking strategies only considered the stability on the braking direction and ignored the braking efficiency constancy, thus these researches may have defect under the ideal braking condition. A front driving electric vehicle was studied with the object to obtaining good braking and maximizing energy recovery rate. A regenerative braking strategy based on the multi-factor input fuzzy control was also proposed. Using the passage vehicle model, the front and rear axle braking force distribution was first set up according to the braking stability and ECE regulations. The front axle braking force was tried to be kept at the maximum at the same time. Second, the dynamic friction coefficient was used to predict the mechanical braking performance factor. Third, the battery state of charge, the braking strength and the estimated mechanical brake efficiency factor were introduced to the fuzzy controller. Finally, the distribution of regenerative braking force was obtained, and thus energy recovery was finished. The results show that with the new method, the braking performance constancy is improved in the frequent and constant intensity braking conditions. The braking energy recovery rate is increased by 18.5%. In the urban road condition with battery full power to zero, the energy recovery rate is increased by 5.3%.

* 收稿日期:2017-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775179), National Natural Science Foundation of China(51775179)

作者简介:杨小龙(1973—),男,湖南桃源人,湖南大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: xyangusc@163.com

Key words: regenerative braking; braking performance; fuzzy control; predict; braking efficiency factor

当今,节能环保是时代的主题.新能源汽车伴随着这个主题而生.在众多先进技术中,再生制动已成为大部分车企实现节能的重要手段^[1],是提升续航里程的关键技术^[2].纯电动汽车作为新能源汽车的一种,因为单纯靠电机驱动,相对其它汽车,会配备更大功率的电机.这是应用制动能量回收技术的一大优势,再生制动可提供更大的制动力矩,能量回收潜力也更突出^[3].

关于再生制动的研究,由于影响因子偏多,系统复杂,控制精度要求高^[4],合适的解决方案仍在不断探索.初亮等^[5]从车速和制动强度两方面,并考虑电制动故障情况,设计再生制动策略,但并未考虑机械制动效能减弱或消失的情况;姜雪、张亚军等^[6-7]将锂电池荷电状态 SOC 和制动强度引入模糊控制器,完成制动力分配,仅以提高能量回收率为目标,忽略机械制动效能衰减问题;Cao 和陈赞等^[8-9]采用制动强度或总需求制动力、车速和蓄电池 SOC 进行模糊控制,完成反馈制动,其研究主要集中在模糊输入参数分析,未涉及制动效能恒定性分析;Maia 等^[10]以汽车加速度、加速度变化率和道路坡度为输入设计模糊逻辑模型,在忽略制动控制策略的情况下推导出再生制动因子.众多研究中,大部分学者均假设制动器摩擦副摩擦性能不变,其摩擦因数为一定值^[11],即假设制动器的制动效能恒定.而大量的交通事故数据统计以及相关的试验和计算表明,制动器的制动效能并不是恒定不变的.由此可知,再生制动的策略研究如果仅考虑制动方向稳定性,忽略制动效能恒定性,在理想条件下进行研究存在一定缺陷.良好的制动性可以保证车辆行驶安全,是再生制动研究必须首先考虑的.本文的研究,除考虑制动强度和蓄电池 SOC 外,通过制动器动态摩擦因数预估机械制动效能因数,得到基于多因素输入模糊控制的再生制动策略.基于此策略,搭建仿真模型,完成最终优化目标.

1 制动力分配

1.1 再生制动原理

再生制动系统相对于车辆起步或加速时,蓄电池输出电能,使电机带动车轮转动,该系统工作时

将一部分汽车惯性势能通过发电机发电转化为化学能储存到蓄电池中,同时发挥制动作用^[12].

由上可知,再生制动只发生在驱动轮上.对于两驱型的纯电动汽车,制动时由于车辆的惯性作用,大量的载荷前倾作用于前轴,可以瞬间提升前轴的最大制动力,故前驱型电动汽车比后驱型更有利于制动能量的回收.为了尽可能提高能量回收率,在模型选择时,本文应用了前驱的车型.

1.2 制动力分配策略

本文再生制动的研究,首先以 Advisor2002 整车模型进行对标分析.原模型在缺省前、后轴制动力分配的条件下,通过实时采集车速信息,进行车速-制动分配系数二维查表,从而完成电、液制动力分配和能量回收.部分学者在原模型的基础上,以制动强度和蓄电池 SOC 为输入,进行双入双出模糊控制,得到再生制动比例和前轮摩擦制动比例^[7],如图 1 所示.车速查表和双入双出模糊控制中均未进行前、后轴制动力划分,不能保证制动方向稳定性和 ECE 法规的要求.此外,以上两种策略均未考虑制动时,整个系统的效能是否保持不变,无法保证车辆行驶中良好的制动性.

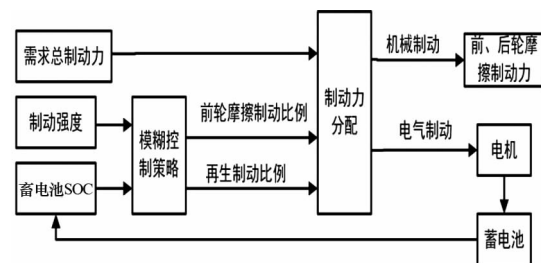


图 1 双入双出模糊策略

Fig.1 Double input and double output fuzzy strategy

若根据车辆行驶工况,保证良好制动性且兼顾制动能量回收率最大化,需对制动力分配进行精确控制.图 2 所示为改进后的控制策略.

1.3 前、后轴制动力分配

制动过程中,伴随一定概率的汽车方向稳定性丧失风险,如转向失控、汽车循迹性变差、制动跑偏和甩尾等问题.然而,前、后轴制动力依次以某些规律划分,可以很大程度地降低此风险.前、后轴制动力划分的基本方向是尽量向理想制动力分配曲线(I 曲线,如公式(1)所示)靠拢,提高制动效率.同时,需

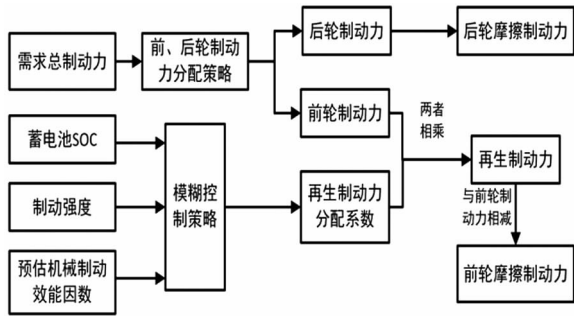


图 2 改进后再生制动策略

Fig.2 Improved regenerative braking strategy

遵循 ECE 制动法规的相关要求^[13].

$$F_{xb2} = \frac{1}{2} \left[\frac{G}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{G} F_{xb1}} - \left(\frac{Gb}{h_g} + 2 F_{xb1} \right) \right] \quad (1)$$

式中: F_{xb1} , F_{xb2} , G , h_g , L , b 分别表示前、后轴地面制动力(N), 整车重力(N), 整车质心距水平地面高度(m), 轴距(m), 质心到后轴中心线的长度(m). I 曲线仅为前、后轴制动力划分的参考依据, 如果简单采用此线划分制动力, 在雪地、冰面等偏光滑的道路行驶时, 汽车轮子容易锁死, 制动能量无法回收^[14].

ECE 制动法规规定: 当 $\varphi \in [0.2, 0.8]$ 时, $z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$. 其中, φ 为路面附着系数, z 表示制动强度. 此规定是各种类型汽车均应该达到的标准. 它确保前轮在发生锁死的情况下, 后轮制动力不致过小, 且会受到最低极限的制约, 从而保证安全减速或停车. 这条制约的界限为最小后轮制动力分配曲线, 也叫 M 曲线. M 曲线由式(2)和式(3)得出.

$$F_{xb1} + F_{xb2} = Gz \quad (2)$$

$$F_{xb1} = \frac{(z + 0.07) G(b + z h_g)}{0.85L} \quad (3)$$

高速特殊工况需立即减速或停车时, 制动强度 z 一般超过 0.7. 为避免发生行车危险, 使车子快速停下来, 需要整车达到最大的减速度且制动效率最高, 此时选择 I 曲线是最佳的分配方案. M 曲线过渡到 I 曲线, 为防止前轮抱死, 制动力分配沿路面附着系数 φ 为 0.7 的 f 线上升, 此曲线由式(4)得到.

$$F_{xb2} = \frac{L - \varphi h_g}{\varphi h_g} F_{xb1} - \frac{Gb}{h_g} \quad (4)$$

对于前驱型纯电动汽车, 前轴制动力满足下式:

$$F_{xb1} = F_{fr1} + F_{reg} \quad (5)$$

式中 F_{fr1} , F_{reg} 分别为前轴摩擦制动力、再生制动力. 为了尽可能减少制动中的能量损失, 实现更高的

能量回收率, 应要求再生制动力所占份额尽量在有限的范围内处于最高值. 同时, 最大再生制动力受到电机发电功率和蓄电池充电功率的限制, 为简化计算, 模型中选用电机和蓄电池均满足最大功率需求. 表 1 所示为本次所研究车型的相关参数.

表 1 整车参数

Tab.1 vehicle parameters

整车质量	轴距	质心高度	质心至后轴	车轮半径
m/kg	L/m	h_g/m	距离 b/m	r/m
1 144	2.6	0.5	1.56	0.282

综上所述, 图 3 中阴影部分所示为前、后轴制动力的取值可以分布的区域. 该区域的分配方案以满足制动方向稳定性和 ECE 法规的要求为原则, 本文所采用分配曲线沿图中的 ABCDE 曲线. 沿 ABCD 曲线分配, 可实现在不同制动强度下, 前轴制动力达到最大化, 从而可以提供更大的再生制动力供发电机发电, 实现制动能量回收率最大化. 此外, DE 段仅在紧急制动时发挥作用.

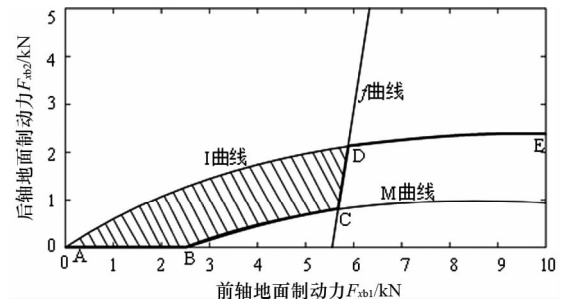


图 3 前、后轴制动力分配

Fig.3 Front and rear axle braking force distribution

ABCDE 曲线中, B 点为 M 曲线与横轴的交点. 由公式(2)(3)和条件 $F_{xb2} = 0$, 可得到方程式(6).

$$F_{xb1} = Gz = \frac{(z + 0.07) G(b + z h_g)}{0.85L} \quad (6)$$

解得 $z_1 = 0.215$. C 点为 M 曲线与路面附着系数 $\varphi = 0.7$ 的 f 线的交点. 由公式(2)(3)和(4)联立, 可得到方程式(7).

$$F_{xb1} = \varphi \left(\frac{Gb}{L} + \frac{Gz h_g}{L} \right) = \frac{(z + 0.07) G(b + z h_g)}{0.85L} \quad (7)$$

解得 $z_2 = 0.525$.

在制动强度 z 节点计算分析清晰的情况下, 对前、后轴制动力进行了更详细的划分. 具体策略如下:

1) 当 $0 \leq z \leq 0.215$ 时, 前、后轴制动力沿 AB 线划分.

2)当 $0.215 \leq z \leq 0.525$ 时,沿 M 曲线的 BC 段分配前、后轴制动力.

3)当 $0.525 \leq z \leq 0.7$ 时,前、后轴所受力沿 CD 段路面附着系数 φ 为 0.7 的 f 曲线划分.

4)当 $0.7 < z \leq 1$ 时,即紧急制动工况,需要充分发挥制动系统的制动效能,故选用 I 曲线的 DE 段完成分配.

2 再生制动模糊控制

2.1 预估机械制动效能因数

制动效能因数是单位制动轮缸推力所产生的制动器摩擦力^[13].经过理论计算和大量试验分析可知:对于盘式制动器,机械制动效能因数与摩擦副动态摩擦因数呈一定比例关系,推导过程如公式(8)所示^[15]:

$$B_{ef} = \frac{F}{F_p} = \frac{2\mu_a F_p}{F_p} = 2\mu_a \quad (8)$$

式中: B_{ef} 为机械制动效能因数; F 为制动器制动力; F_p 为制动轮缸推力; μ_a 为摩擦副动态摩擦因数.由公式(8)可知:预估机械制动效能因数的最直接方法是预估摩擦副动态摩擦因数.本文主要从计算分析制动副动态摩擦因数的变化,来预估机械制动效能因数,预估流程如图 4 所示.由于摩擦界面之间的压力、相对滑动速度是导致动态摩擦因数在一定范围内发生变化的主要原因^[16],故预估流程也主要基于这两个因素考虑.

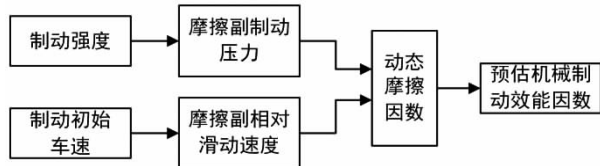


图 4 机械制动效能因数预估

Fig.4 Mechanical braking efficiency factor estimation

在预估模型中,摩擦副制动力通过计算的制动强度采用二维查表法得到,相对滑动速度可以通过制动初始车速计算得到.为简化计算,计算动态摩擦因数时,直接以制动初始车速来代替摩擦副相对滑动速度.根据试验分析^[17],由测试数据进行二次回归,得到惯性制动动态摩擦因数 μ_a 关于制动压力 p 和制动初始车速 v 的表达式,如式(9)所示.图 5 所示为动态摩擦因数的空间分布,更加清晰地显示了相关参数的变化规律.

$$\mu_a = 0.368 - 0.450 \times 10^{-3}v + 0.136 \times 10^{-5}v^2 +$$

$$0.556 \times 10^{-2}p - 0.116 \times 10^{-2}p^2 + 0.267 \times 10^{-3}vp - 0.157 \times 10^{-5}v^2p \quad (9)$$

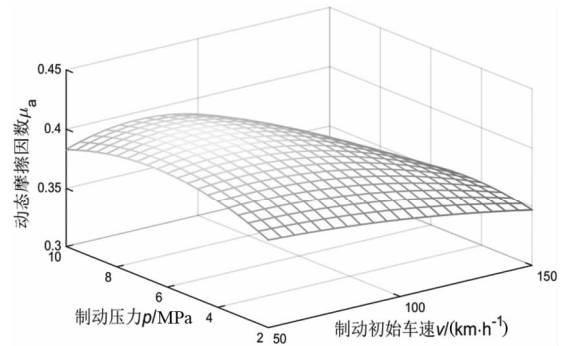


图 5 动态摩擦因数空间分布

Fig.5 Dynamic friction factor spatial distribution

2.2 模糊控制器

2.2.1 隶属度函数设计

预估模型完成机械制动效能因数的预估后,需要将此值引入模糊控制器,完成整套再生制动策略的开发,故模糊控制器的研究也至关重要.基于多因素输入实现更精确模糊控制的考虑,本文设计的模糊控制器设置了三个输入端和一个输出端:输入端依次为制动强度 z 、蓄电池荷电状态 SOC 和预估机械制动效能因数 B_{ef} ,输出端为再生制动力的分配系数 α .三个输入参数为制动安全、能量回收的关键影响因素,其值域分布、组合关系和模糊规则,直接决定着本文所设计控制策略的优劣.

1) 制动强度 z

行车记录的大数据表明,绝大部分驾驶情况下,行车制动的强度不超过 0.3.结合具体的前、后轴制动力分配策略,采用梯形函数,将制动强度 z 划分为 4 个子集 {S(小), MS(较小), MB(较大), B(大)},如图 6 所示.

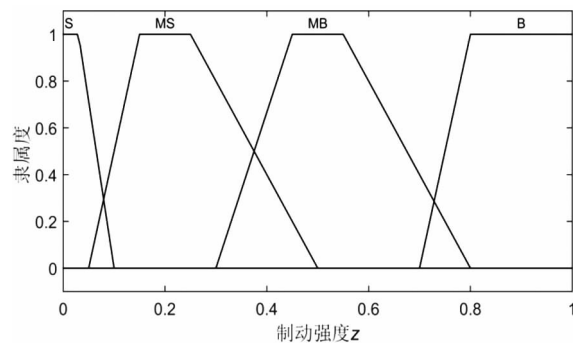


图 6 制动强度 z 隶属度函数

Fig.6 Braking strength z membership function

2) 蓄电池 SOC

蓄电池充、放电时,需要使用智能监控设备实

时对 SOC 值进行估算,并将此值反馈到控制器.如果监控设备故障,蓄电池使用时发生 SOC 值过高或过低,都会对其造成不同程度的损坏.研究表明,当蓄电池 SOC 低于 10%或高于 90%时,为保证充电安全,不适合进行充电^[8],故 SOC 值在一定范围内才能进行制动能量回收.综上考虑,蓄电池荷电状态 SOC 划分出 3 个子集{L(低),M(中),H(高)},具体分布情况如图 7 所示.

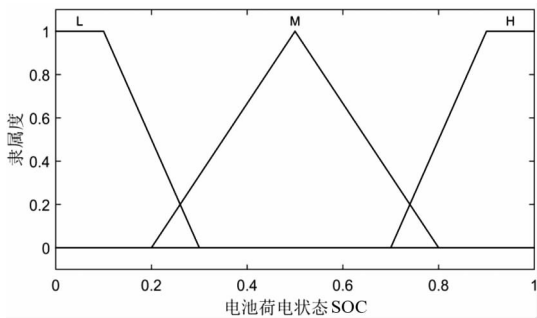


图 7 蓄电池 SOC 隶属度函数

Fig.7 Battery SOC membership function

3) 预估机械制动效能因数 B_{ef}

根据上文得到的动态摩擦因数分布图及公式(8),预估机械制动效能因数范围确定为 $[0.5, 1]$,并划分为 3 个模糊子集{L(低),M(中),H(高)},如图 8 所示.

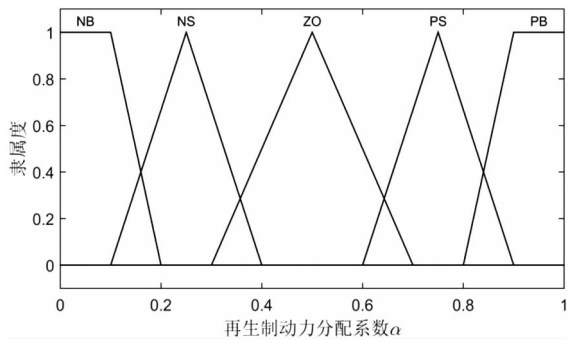


图 8 B_{ef} 隶属度函数

Fig.8 B_{ef} membership function

4) 再生制动力分配系数 α

α 取值区间为 $[0, 1]$,采用梯形和三角形隶属度函数,划分为 5 个模糊子集{NB(负大),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PB(正大)},如图 9 所示.

2.2.2 模糊规则设计

通过大量的试验和仿真数据,并结合专家经验和预估机械制动效能因数 B_{ef} ,对双入双出模糊控制规则进行了改进,得到能够兼顾制动性和制动能量回收率最大化的模糊控制规则,表 2 所示为其中部分模糊规则^[18].

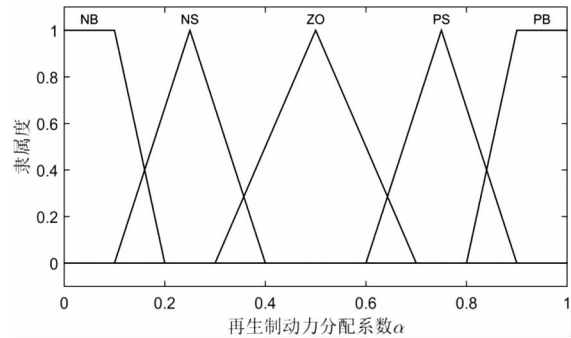


图 9 α 隶属度函数

Fig.9 α membership function

表 2 再生制动模糊控制规则

Tab.2 Regenerative braking fuzzy control rules

序号	制动强度 z	蓄电池 SOC	预估机械制动效能因数 B_{ef}	再生制动力分配系数 α
1	S	L	L	ZO
2	S	L	M	ZO
3	S	L	H	ZO
4	S	M	L	PS
5	S	M	M	PS
6	S	M	H	PS
7	S	H	L	NS
8	S	H	M	NB
9	S	H	H	NB
10	MS	L	L	PS
11	MS	L	M	ZO
12	MS	L	H	ZO
13	MS	M	L	PB
14	MS	M	M	PB
15	MS	M	H	PB
16	MS	H	L	PS
17	MS	H	M	ZO
18	MS	H	H	ZO
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

3 仿真试验及结果分析

可进行能量回收的车型,其制动性一般以制动距离和能量回收率 2 个指标评价^[19].制动距离在最大减速度下测得,仅由机械制动,未涉及再生制动,故未使用制动距离作为评价指标.基于对车辆制动能量流的分析^[20],本文研究时以制动效能恒定性和能量回收率为两个重要指标,完成仿真结果分析.

选用制动频繁、制动强度较恒定且符合实际用车情况的主干道循环行驶工况(CYC_ARTERIAL)进行仿真,该工况如图 10 所示.其次,对于主要行驶在城市工况的纯电动汽车,为测试改进后策略在城市行驶工况下的制动能量回收率,选用了 CYC_

UDDS 城市道路循环工况,具体工况如图 11 所示.

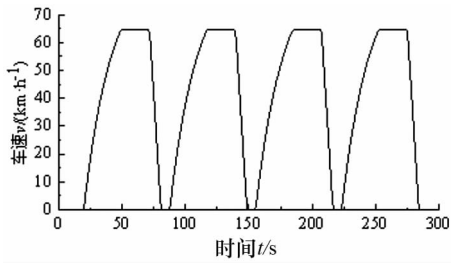


图 10 CYC_ARTERIAL 循环行驶工况
Fig.10 CYC_ARTERIAL condition

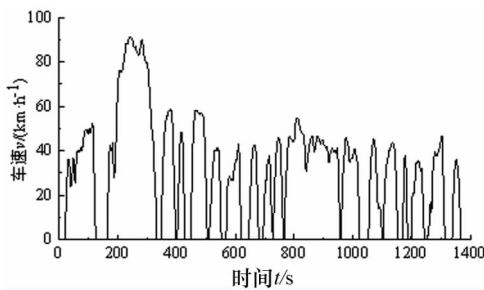


图 11 CYC_UDDS 循环行驶工况
Fig.11 CYC_UDDS condition

CYC_ARTERIAL 循环工况测试在频繁制动且制动强度较恒定的工况下,改进后策略的制动效能恒定性和制动能量回收率,仿真结果如图 12、图 13 和表 3 所示.

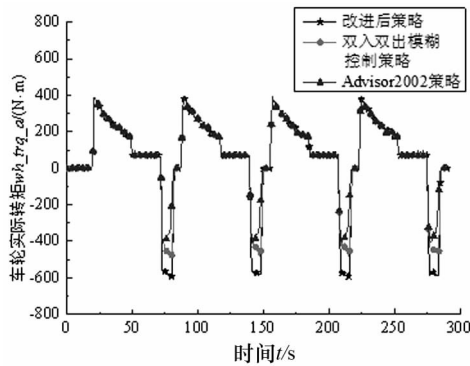


图 12 CYC_ARTERIAL 工况车轮实际转矩
Fig.12 CYC_ARTERIAL condition wheel actual torque

表 3 CYC_ARTERIAL 工况仿真结果

Tab.3 The simulation results of CYC_ARTERIAL

策略类型	整车消耗能量 /kJ	制动总能量 /kJ	回收能量 /kJ	制动能量回收率 /%	有效能量回收率 /%
改进后策略	2 049	678	479	70.6	23.4
双入双出模糊控制策略	2 049	681	355	52.1	17.3
Advisor2002策略	2 052	683	302	44.2	14.7

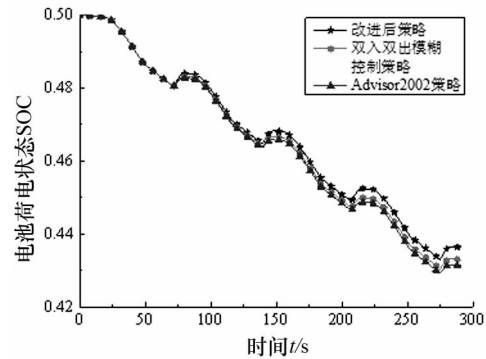


图 13 CYC_ARTERIAL 工况 SOC 曲线
Fig.13 CYC_ARTERIAL condition SOC curves

此工况下,考虑纯电动汽车蓄电池 SOC 大部分时间处于 20%~80% 区间, SOC 初始值设置为 0.5. 车轮实际转矩为负值时,表示行车制动,其大小等于机电制动之和,其波动情况可以反映制动效能恒定性.由图 12 可知,频繁制动且制动强度较恒定的工况下,改进后策略制动时,车轮实际负转矩在峰值附近的波动情况相比另外两种策略要小.这表明,改进后的系统可维持相对稳定行车减速度的性能更强,即整车制动效能恒定性更好.双入双出模糊控制和 Advisor2002 策略均未考虑刹车盘效能恒定性问题,无法根据效能因数变化实时调控,所以机电制动的匹配能力较弱,能量回收率表现较差.由图 13 和表 3 可知,改进后策略的能量回收率相比双入双出模糊控制和 Advisor2002 策略,分别提升了 18.5% 和 26.4%.

城市道路工况的测试,在目前人们日常用车的情况下,显得尤为重要.该工况主要测试了纯电动汽车从满电到零电整个过程中的能量回收率,图 14 和表 4 所示为本次对比测试的结果.

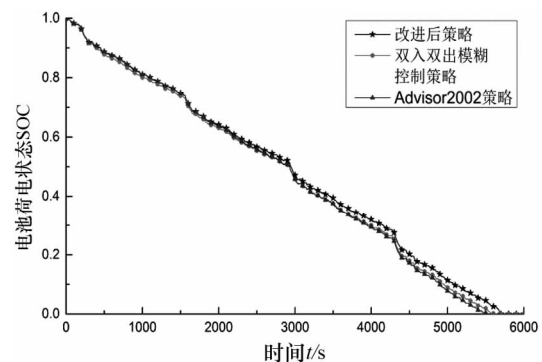


图 14 CYC_UDDS 工况 SOC 曲线
Fig.14 CYC_UDDS condition SOC curves

表 4 CYC_UDDS 工况仿真结果

Tab.4 The simulation results of CYC_UDDS

策略类型	行驶里程 /km	制动总能 /kJ	回收能量 /kJ	制动能量回收率/%	能量总传递效率/%
改进后策略	50.51	7 067	2 586	36.6	34.2
双入双出模糊控制策略	49.01	7 093	2 217	31.3	33.2
Advisor2002 策略	47.95	6 859	1 846	26.9	32.8

由图 14 可知,蓄电池 SOC 从 1 降为 0 的整个过程中,改进后策略在制动能量回收方面均占有一定优势,曲线下降更加平缓。Advisor2002 策略因为没有考虑蓄电池 SOC,在 SOC 值偏大时,再生制动比例仍然可以随车速的增加而变大,制动能量回收表现较好。但随着 SOC 值的下降,改进后策略和双入双出模糊控制,能够根据制动强度 z 和 SOC 值变化进行调控,可以得到相对更合理的再生制动比例,且能量总传递效率更高,故蓄电池电量消耗更慢。此外,根据预估机械制动效能因数,动态调整前轴再生制动和摩擦制动比例的改进后策略,可根据机械制动效能的衰减情况,完成更好的机电制动比例匹配,故能量回收率在三个对比测试对象中最高。相较于双入双出模糊控制,改进后策略在相同测试环境中制动能量回收率提升了 5.3%,且续航里程增加了 1.5 km。

4 结 论

以良好制动性和能量回收率最大化为目标,经确定研究对象、综合推导分析提出了基于多因素输入模糊控制的再生制动策略。经过仿真验证,得到以下结论:

1)前、后轴制动力更加精细的划分,保证了制动方向稳定性和前轴制动力更高配比,为前驱型测试车的再生制动力取得更高值创造了条件。

2)预估机械制动效能因数引入模糊控制,确保前轴摩擦制动力与再生制动力根据机械制动效能衰减情况进行合理分配。与对比测试方案相比,在很大程度上改善了整个制动系统的效能恒定性问题,提升了能量回收率。

3)改进后的整车模型相比双入双出模糊控制模型和 Advisor2002 模型,更接近于实际用车情况,可为进一步研究实车再生制动技术提供参考。

参考文献

- [1] EHSANI M, GAO Y, EMADI A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design [M]. CRC Press, 2009.
- [2] 袁希文, 文桂林, 周兵. 分布式电驱动汽车 AFS 与电液复合制动集成控制[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(2): 28-35.
YUAN Xiwen, WEN Guilin, ZHOU Bing. Integrated control of active front steering and motor/hydraulic hybrid braking in distributed electric drive vehicles[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(2): 28-35. (In Chinese)
- [3] HANO S, HAKIAI M. New challenges for brake and modulation systems in hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs) [J]. SAE Technical Paper, No. 2011-7210.
- [4] 肖博一, 曾细强, 张震邦, 等. 纯电动汽车再生制动策略现状与展望[J]. 汽车电器, 2016(12): 1-6.
XIAO Boyi, ZENG Xiqiang, ZHANG Zhenbang, et al. Present status and prospect of the regenerative braking control strategies of electric automobiles [J]. Automotive Appliances, 2016(12): 1-6. (In Chinese)
- [5] 初亮, 何强, 富子丞, 等. 纯电动汽车再生制动控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2016, 6(4): 244-251.
CHU Liang, HE Qiang, FU Zicheng, et al. Brake energy recovery control strategy for pure electric vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2016, 6(4): 244-251. (In Chinese)
- [6] 姜雪, 胡荣强, 赵武. 基于模糊控制的电动汽车复合制动力分配策略[J]. 仪表技术, 2010(8): 9-13.
JIANG Xue, HU Rongqiang, ZHAO Wu. Control strategy of compound braking force distribution for electric vehicle based on fuzzy logic control [J]. Instrumentation Technology, 2010(8): 9-13. (In Chinese)
- [7] 张亚军, 杨盼盼. 纯电动汽车再生制动系统的建模与仿真[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(15): 90-94.
ZHANG Yajun, YANG Panpan. Modeling and simulation of regenerative braking system for pure electric vehicle [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(15): 90-94. (In Chinese)
- [8] CAO X, ISHIKAWA T. Optimum design of a regenerative braking system for electric vehicles based on fuzzy control strategy [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(S1): 186-187.
- [9] 陈赞, 谭光兴, 林聪, 等. 基于模糊算法的纯电动汽车制动能量回收[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(3): 32-42.
CHEN Zan, TAN Guangxing, LIN Cong, et al. Pure electric vehicle braking energy recovery based on fuzzy algorithm [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2014, 25(3): 32-42. (In Chinese)
- [10] MAIA R, SILVA M, ARA ÚJO R, et al. Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking [J]. Ex-

- pert Systems with Applications, 2015, 42(22): 8504–8519.
- [11] 赵凯辉. 汽车制动器热衰退性能及相关制动安全检测研究[D]. 西安: 长安大学, 2010: 25–26.
ZHAO Kaihui. Study on the brake's heat-fade performance and corresponding braking safety detection of vehicle[D]. Xi'an; Chang'an University, 2010: 25–26. (In Chinese)
- [12] 赵国柱. 电动汽车再生制动若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
ZHAO Guozhu. Several key problems in research of electric vehicle regenerative braking[D]. Nanjing; Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (In Chinese)
- [13] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 108–118.
YU Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 108–118. (In Chinese)
- [14] KO J W, KO S Y, KIM I S, *et al.* Co-operative control for regenerative braking and friction braking to increase energy recovery without wheel lock[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(2): 253–262.
- [15] 唐平. 轿车制动系统的设计与优化[D]. 成都: 西华大学, 2012.
TANG Pin. Design and optimization of braking system based on a car[D]. Chengdu: Xihua University, 2012. (In Chinese)
- [16] 张剑, 夏长高. 盘式制动器瞬态温度场与摩擦因数分析[J]. 机械设计与制造, 2014(2): 119–121.
ZHANG Jian, XIA Changgao. Analysis of the transient temperature field and friction factor on disc brakes[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(2): 119–121. (In Chinese)
- [17] 王仁广, 李志远, 张彪, 等. 盘式制动器平均摩擦系数的试验研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(1): 29–39.
WANG Renguang, LI Zhiyuan, ZHANG Biao, *et al.* Experimental research on average friction coefficient of disk brake[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(1): 29–39. (In Chinese)
- [18] ZHENG H, CHEN Y, ZONG C. Braking stability control algorithm for vehicle based on fuzzy logic[C]//Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 73–82.
- [19] 何莉萍, 李庆锋, 丁舟波, 等. 基于模糊神经网络控制的汽车辅助再生制动系统研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(10): 35–41.
HE Liping, LI Qingfeng, DING Zhoubo, *et al.* Research on the vehicle assist regenerative braking system based on the fuzzy neural network[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(10): 35–41. (In Chinese)
- [20] QIU C, WANG G. New evaluation methodology of regenerative braking contribution to energy efficiency improvement of electric vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 119: 389–398.

(上接第 16 页)

- [7] SUN Hui, JIANG Jihai, WANG Xin. Parameters matching and control method of hydraulic hybrid vehicle with secondary regulation technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 57–63.
- [8] 曾小华, 蒋渊德, 李高志, 等. 重型车辆液压辅助驱动系统的前馈+反馈复合控制[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2016, 44(9): 116–122.
ZENG Xiaohua, JIANG Yuande, LI Gaozhi, *et al.* Feedforward + feedback control for hydraulic assistance drive system of heavy truck[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 44(9): 116–122. (In Chinese)
- [9] 黄祖永. 地面车辆原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985: 159–182.
HUANG Zuyong. Ground vehicle principle[M]. Beijing: China Machine Press, 1985: 159–182. (In Chinese)
- [10] WALKER P D, ZHU Bo, ZHANG Nong. Nonlinear modeling and analysis of direct acting solenoid valves for clutch control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2014, 136(5): 562–576.
- [11] LI Huimin, WANG Xiaobo, SONG Shangbin, *et al.* Vehicle control strategies analysis based on PID and fuzzy logic control[J]. Procedia Engineering, 2016, 137: 234–243.
- [12] 王庆年, 孙磊, 唐先智, 等. HEV 制动意图识别的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(9): 769–774.
WANG Qingnian, SUN Lei, TANG Xianzhi, *et al.* A study on braking intention identification for HEV[J]. Automotive Engineering, 2013, 35(9): 769–774. (In Chinese)
- [13] PAN Chaofeng, LIAO Chen, CHEN Long, *et al.* Research on motor rotational speed measurement in regenerative braking system of electric vehicle[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 66(2): B33–B36.