

文章编号:1672-9331(2017)03-0090-07

# 基于模糊控制的纯电动汽车再生制动策略仿真

卢 珊, 刘志强, 葛 进, 叶 青

(长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为了使纯电动汽车在制动时既能保证安全性, 又能获取最大的制动能量回馈效率, 综合考虑了 ECE 法规线、I 曲线、f 线以及 M 线对制动力分配的规范作用, 结合模糊控制算法, 提出了一种以车速  $v$ 、制动强度  $z$  以及蓄电池 SOC 三者为输入、制动能量回馈比例  $K_r$  为输出的模糊控制系统。在此基础上建立了再生制动模型, 将其嵌入到 ADVISOR 2002 中, 并在 CYC\_UDDS 工况下进行仿真。研究结果表明, 新的再生制动策略比 ADVISOR 2002 原有的控制方案回收率提高了 6.36%, 显著提高了电动汽车的实际续航里程。

**关键词:** 纯电动汽车; ECE 法规线; 制动能量回馈效率; 模糊控制系统; ADVISOR 2002; 续航里程

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

## Simulation study on regenerative braking strategy of pure electric vehicle based on fuzzy control

LU Shan, LIU Zhi-qiang, GE Jin, YE Qing

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to ensure both safety and maximum braking energy feedback efficiency of pure electric vehicles when braking, the normative action of ECE law curve, I curve, f curve and M curve are considered on braking force distribution. And combined with the fuzzy control algorithm, a fuzzy control system is proposed whose inputs are vehicle speed  $v$ , brake strength  $z$  and battery SOC and the output is braking energy feedback ratio  $K_r$ . On this basis, a regenerative braking model is established, and a simulation with ADVISOR 2002 which is embedded by the regenerative braking model under CYC\_UDDS condition is carried out. The results show that the new regenerative braking strategy is 17.85% higher than the original control scheme of ADVISOR 2002 on regenerative braking energy recovery rate, and the actual mileage of electric vehicle is obviously improved.

**Key words:** pure electric vehicles; ECE law curve; braking energy feedback efficiency; fuzzy control system; ADVISOR 2002; distribution of braking force; mileage

随着社会的高速发展, 能源与环境问题已不容忽视。电动汽车由于具有低污染、低噪声、零排

放等特点, 被称为“21 世纪绿色交通工具”<sup>[1]</sup>。再生制动能量的回收是电动汽车最有效的一种整车

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572055)

作者简介: 卢 珊(1994-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 长沙理工大学硕士研究生, 主要从事分布式驱动电动汽车动力学仿真软件集成开发与应用的研究。

节能手段。在汽车的运行中,电机除了提供必需的驱动力之外,还能为电动汽车的制动提供相应的转矩,协助制动<sup>[2]</sup>。对于纯电动汽车再生制动策略优化问题,其重点在如何协调前轴实际再生制动力、前轴实际液压制动力、后轴实际液压制动力之间分配的比例,实现在保证安全制动的前提下获得最大的制动回馈率<sup>[3-4]</sup>。对于这个问题,相关研究人员已经做了一些研究。王耀南等<sup>[5]</sup>用电动汽车前后轴制动力分配的 I 曲线结合模糊控制算法,提出了一种组合的制动力分配方案,但由于该策略忽略了车速的作用,所使用的模糊算法的模糊规则仅仅在低维的时候具有较高的精度,且前后轴制动力之间的分配关系是按照理想的前后轴制动力分配的 I 曲线进行分配,因此不能充分提高制动能量的回收效率。刘丽君等<sup>[6]</sup>将 I 曲线与 ECE 法规结合起来,并通过设计不同的制动控制策略验证了其正确性,但由于没有将制动强度、电池荷电状态以及车速用准确的数学模型表达出来,且没有考虑到车速对整个制动系统的作用,因此难以做到最大化地回收电动汽车制动时的制动能量。潘盛达等<sup>[7]</sup>考虑了车速对系统的影响,建立了 ECE 法规线、I 曲线、f 线共同决定的分配曲线,但未考虑前轮处于抱死状态时汽车后轮必须具备的最小制动力的制动力分配情况(M 曲线),该方法虽然能够提高制动能量的回收效率,但由此建立的分配方案不能有效地保证制动安全。

因此,作者对纯电动汽车机电复合回馈制动进行深入研究,在此基础上结合模糊控制算法的基本思想,提出一种驱动轴机电制动力分配的优化策略。该策略不仅考虑了 ECE 法规线对制动力分配的规范限制,还将 I 曲线、f 线以及 M 线纳入考虑的范围之内,在确保制动时制动安全性的条件下达到最大化回收制动能量的目的。同时,考虑到车速对汽车制动的的作用,所设计的控制器将电动汽车的车速  $v$ 、制动时的强度  $z$  以及蓄电池的荷电状态 SOC 作为模糊控制器的输入,将制动能量回馈比例  $K_r$  作为输出。

## 1 机电制动力的分配方案

图 1 为本研究提出的纯电动汽车制动时制动

力的分配框图。假设汽车制动时所需的总制动力为 1,前轴为驱动轴,后轴为从动轴,并假设其实际的再生制动力占总制动力的比例为  $\alpha$  ( $0 < \alpha \leq 1$ ),前轴实际的机械制动力占总制动力的比例为  $\beta$  ( $0 < \beta \leq 1$ ),则后轴实际机械制动力总制动力为  $(1 - \alpha - \beta)$ 。

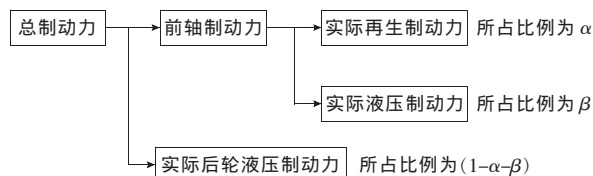


图 1 机电复合制动力分配框图

Fig. 1 Distribution diagram of electromechanical compound braking force

由于车辆制动的安全性是车辆制动的基本要求,也是本研究的前提条件,因此分别考虑 I, M 以及 f 三条制动力分配曲线(如图 2 所示)。

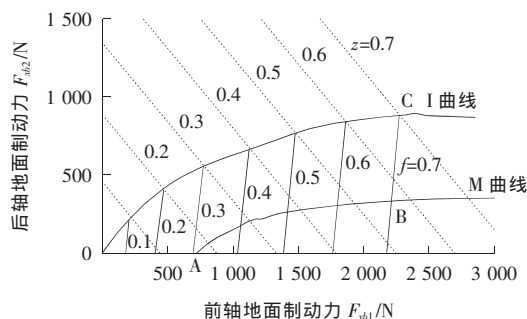


图 2 前后轴制动力分配曲线

Fig. 2 Front and rear axle braking force distribution curve

I 曲线为前、后轮全部都处于抱死状态时,车辆制动时的制动力分配关系曲线<sup>[8]</sup>,其关系式为:

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

$$F_{xb1} = \frac{zG(b + zh_g)}{L}. \quad (2)$$

式中:  $F_{xb1}$ ,  $F_{xb2}$  为前、后轮制动力, N;  $z$  为制动强度;  $h_g$  为汽车质心高度, m;  $b$  为质心距后轴中心线的距离, m;  $L$  为汽车前后轴的距离, m;  $G$  为汽车重力。

当汽车处于制动状态时,若前、后轮制动力分

配关系的曲线处于 I 曲线之上,则有较大可能引起后轴的侧滑,从而使制动具有很大的危险性。

f 曲线表示后轮不处于抱死状态而前轮处于抱死状态时,前后轮制动力的分配关系曲线。此时若需要保证车辆的制动安全性,则需满足:

$$F_{xb2} - \left( \frac{L - \varphi h_g}{\varphi h_g} F_{xb1} - \frac{Gb}{h_g} \right) \geq 0. \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为轮胎与路面的附着系数。

当前轮处于抱死状态时,前后轮制动力关系满足 M 曲线。ECE R13 制动法则明确规定:对于附着系数  $\varphi$  在 0.2~0.8 之间的汽车,其制动强度  $z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$ ,那么 M 曲线表示为:

$$F_{xb1} = \frac{z + 0.07}{0.85} \times \frac{G(z h_g + b)}{L}. \quad (4)$$

$$F_{xb2} \geq Gz - F_{xb1}. \quad (5)$$

车辆的安全制动范围可用图 2 中的闭合曲面 0ABC0 表示。

电动汽车制动时要求的总制动力完全由其制动时的制动强度  $z$  所决定,由于制动时制动强度  $z$  各不相同,因此可以将驱动轴的机械制动力和再生制动力按照如下原则<sup>[9]</sup>进行大致分配:当  $z < 0.1$  时,制动力不会参与到电机制动中,并且在当前的机械制动下不进行相应的制动;当  $0.1 \leq z \leq 0.7$  时,前轴制动力会与后轴制动力按照 I 曲线模式进行相应的匹配,按照图 2 也可以将其进行有效的表达;当  $z > 0.7$  时,车辆的制动过程将不再有再生制动系统的参与,而制动过程中所需的总制动力全部由机械制动产生,以此来保证车辆的制动安全性。

## 2 机电制动力模糊控制分配

图 3 为经典模糊控制的系统结构框图,其中,模糊控制器属于输入的范畴,而控制对象则属于输出的范畴。模糊控制器实际上是反应人工智能的一种控制手段<sup>[10]</sup>,其优点在于,不需要明了被控制对象的精确数学模型就可以对目标进行精确控制,而且有着极好的鲁棒性以及适应性,无论被控制的目标是线性的还是非线性的,均可以实行合理的控制<sup>[11]</sup>。

### 2.1 模糊控制器的结构

图 4 为本研究所建立的机电制动力分配模糊

控制系统的整体框架图。

在所设计的模糊控制系统中,制动的强度  $z$ 、车速  $v$  和电池的 SOC 三者是本研究设计的控制器的输入参数,制动能量分配比例  $K_r$  为模糊控制器的输出参数。在得出  $K_r$  的基础上,进一步可以得到驱动轴的再生制动力。

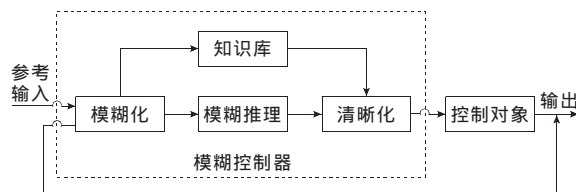


图 3 模糊控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy control system

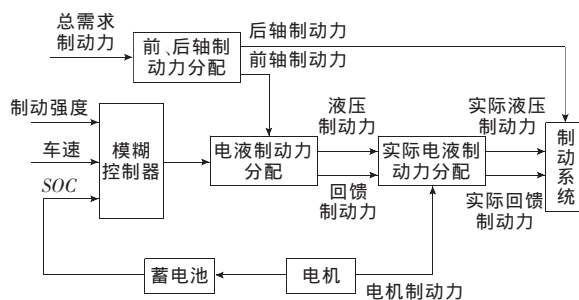


图 4 机电复合制动力分配模糊控制结构图

Fig. 4 Fuzzy control structure diagram of electromechanical compound braking force distribution

### 2.2 模糊规则的设计

本研究所实施制定的机电复合制动力分配模糊控制器在输入量的模糊子集为:车速  $E(v) = \{L, M, H\}$ , 范围为 0 ~ 100 km/h; 制动强度  $E(z) = \{L, M, H\}$ , 范围为 0 ~ 1; 荷电状态  $E(SOC) = \{L, M, H\}$ , 范围为 0~100%。依据理论经验和仿真分析,模糊控制器的输入和输出的隶属度函数如图 5 所示。

在对机电复合制动力分配比例进行模糊控制规则制定时,不但要顾虑到蓄電池荷电状态 SOC 以及车速  $v$  对机电复合制动力分配的影响,同时还应将电动车辆所具有的制动强度  $z$  涵盖在内,以确保其安全性指标。依据当前的理论与研究的状况,本研究所采用的模糊控制规则如表 1 所示。

驱动轴回馈制动是经过模糊控制规则所获取的。分配比例随着蓄電池荷电状态和制动强度以及车速的整体变化关系如图 6 所示。

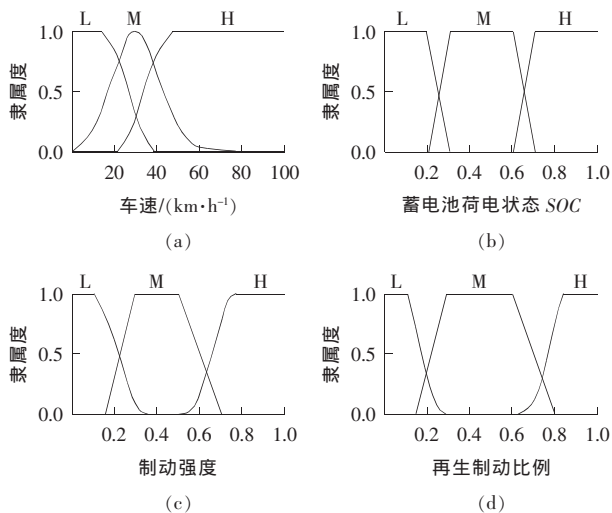


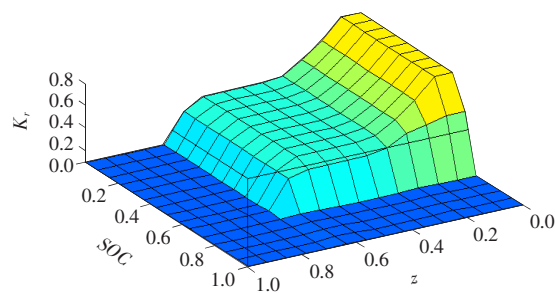
图 5 输入量与输出量的隶属度函数

Fig. 5 Membership function of input quantity and output quantity

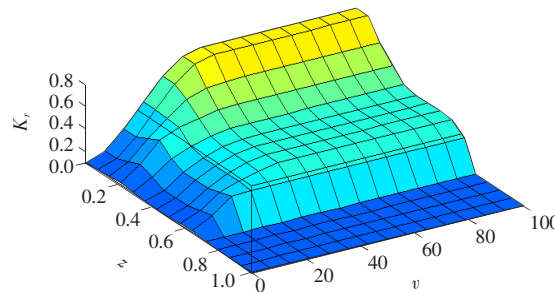
表 1 机电复合制动力分配模糊规则表

Table 1 Fuzzy rules table for electromechanical compound braking force distribution

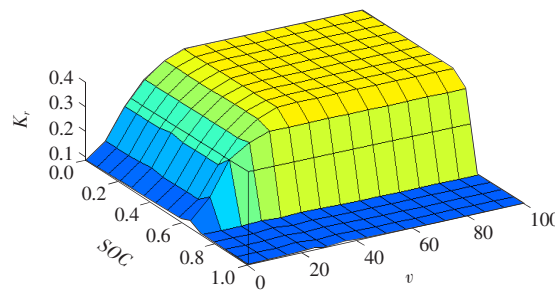
编号	$z$	SOC	$v$	$K_r$
01	L	H	L	L
02	L	H	M	L
03	L	H	H	L
04	M	H	L	L
05	M	H	M	L
06	M	H	H	L
07	H	H	L	L
08	H	H	M	L
09	H	H	H	L
10	L	M	L	L
11	L	M	M	H
12	L	M	H	H
13	M	M	L	L
14	M	M	M	M
15	M	M	H	M
16	H	M	L	L
17	H	M	M	L
18	H	M	H	L
19	L	L	L	L
20	L	L	M	H
21	L	L	H	H
22	M	L	L	L
23	M	L	M	M
24	M	L	H	M
25	H	L	L	L
26	H	L	M	L
27	H	L	H	L



(a) 回馈制动分配比例与蓄电池 SOC、制动强度的关系图



(b) 回馈制动分配比例与制动强度、车速的关系图



(c) 回馈制动分配比例与蓄电池 SOC、车速的关系图

图 6 模糊推理规则三维图

Fig. 6 Three-dimensional map of fuzzy inference rules

### 2.3 解的模糊化

由于通过模糊推理之后得出的输出量为一个模糊化的量,但在现实的控制过程中控制所得的输出量是一个准确的量,因此需要将得到的模糊量进行清晰化。而模糊量转为清晰量最常用的方法就是重心法。所谓重心法其实是一种仿照技术,可以将其中隶属度函数的曲线和基础变量轴所组成区域的重心的变量值表征为准确值<sup>[12]</sup>。本研究依据重心法的实施规则得出驱动轴再生制动的分配系数为:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{27} \beta_i P_i}{\sum_{i=1}^{27} \beta_i} \quad (6)$$

式中: $P_i$  为各模糊控制规则下输出量  $\beta_i$  的隶属度函数值。

### 3 ADVISOR 2002 建模及仿真分析

#### 3.1 ADVISOR 2002 建模

本研究采用 ADVISOR 对上文提出的模糊控制方法进行仿真验证,其运用的是一种混合模拟

技术,日后则是以模拟作为主要目标,前向模拟作为辅助<sup>[13]</sup>。

图 7 和图 8 为本研究建立的再生制动控制系统的前向路径与后向路径模块图,将其与 ADVISOR 2002 中原有的模块进行替换,并更新上层文件。

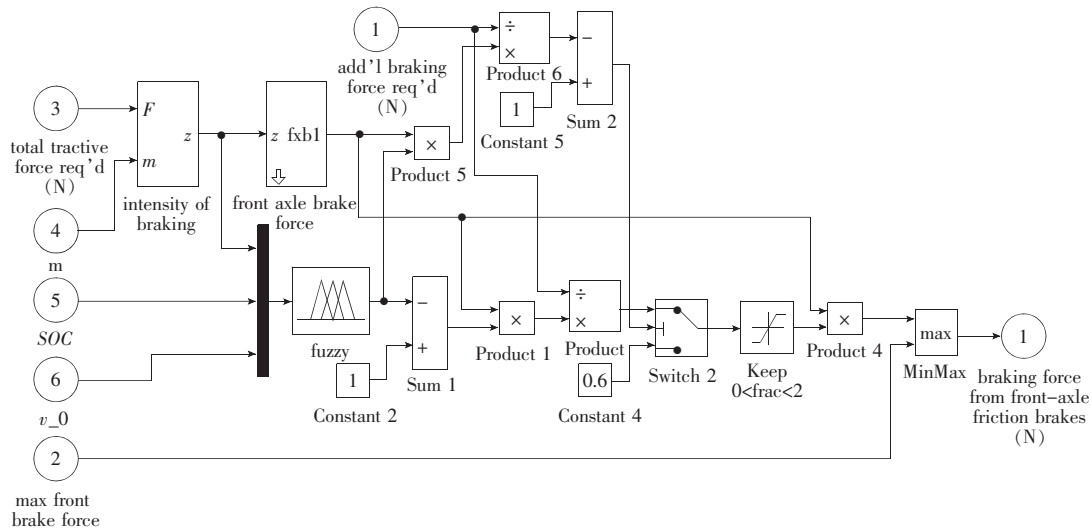


图 7 前向路径模块图

Fig. 7 Forward path module diagram

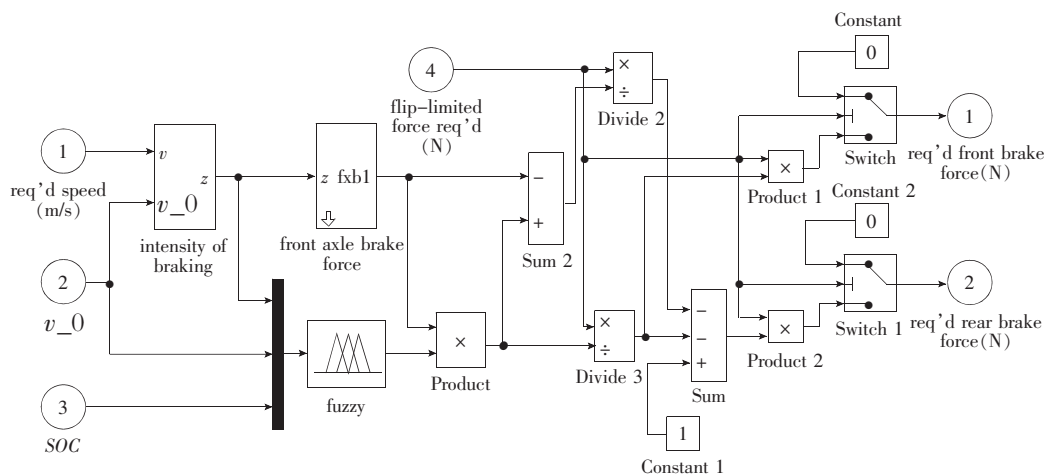


图 8 后向路径模块图

Fig. 8 Backward path module diagram

由图 7 和图 8 可知,Fuzzy 子模块是依据模糊控制方法设立所谓的模糊控制器系统子模块;Front Axle Brake Force 属于前轮制动力计算模块;而 Intensity of Braking 则属于制动强度  $z$  的计算子模块,其相应的计算公式为  $z = a/g$  ( $a$  为车辆制动时的减速度,  $g$  为重力加速度),其中,前向路径是通过车辆动力学方程来计算的,而后向路

径中  $z$  则是利用车速来计算的。

#### 3.2 ADVISOR 2002 仿真与分析

选取 ADVISOR 中美国公路循环工况 CYC\_—UDDS 作为本研究的仿真工况,其基本参数如表 2 所示。在此情况下,根据 ADVISOR 的原有控制办法和模糊控制策略依次展开模拟,并将该模拟效果进行比较分析。

图 9 为 UD DS 工况下的车速,图 10 为该工况下 2 种控制策略 SOC 的对比图。依据图 9,10 可以得出,当 UD DS 循环工况结束时,本研究所设计的模糊控制在再生制动策略下的荷电状态要明显高于 ADVISOR 原生的控制方法, SOC 的提升幅度约为 2%,表明制动能量的回收率增加了,能量的有效回收率也有所增加。

表 2 CYC\_UD DS 循环工况参数

Table 2 CYC\_UD DS cycle condition parameters

行驶时间/ s	行驶距离/ km	最大速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均速度/ ( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )
1 369	11.99	91.25	31.51
最大加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	最大减速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	平均加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	平均减速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
1.48	-1.48	0.51	-0.58

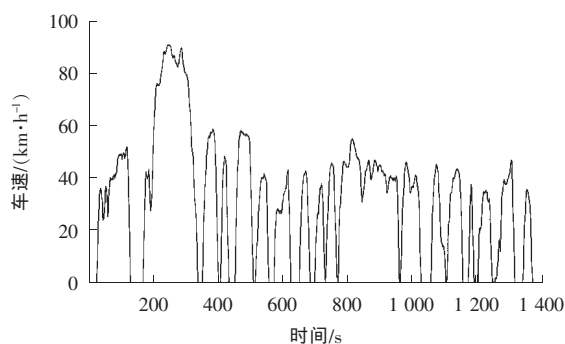


图 9 CYC\_UD DS 循环工况车速

Fig. 9 CYC\_UD DS cycle speed

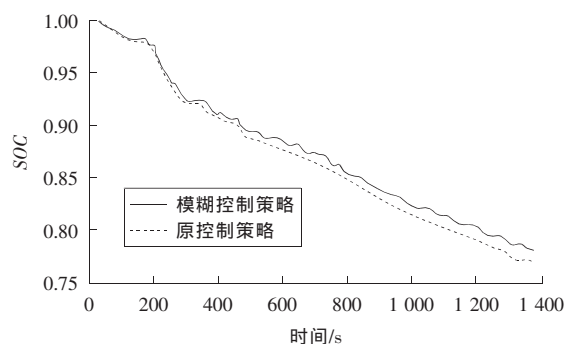


图 10 2 种控制策略下 SOC 的变化

Fig. 10 The change of SOC under two control strategies

分析以上 2 种控制策略下仿真能源消耗并进行比较,结果如表 3 所示。由表 3 的数据可知,当处于 CYC\_UD DS 工况时,本研究的控制方法对制动能量的回收效率提升明显,数值约为 108 kJ,相

应的回收率提高幅度为 6.36%。这进一步说明本研究提出的基于模糊控制的再生制动策略对制动能量的回收效果有一定的改善,对提高制动能量回收率和有效能量回收率有一定的意义。

表 3 不同控制方法下的仿真结果

Table 3 Simulation results under different control methods

	整车消耗 的能量/ kJ	制动总 能量/ kJ	回收的 能量/ kJ	制动能量 回收效 率/%	有效能量 回收率/ %
原控制 策略	6 798	1 697	440	25.93	6.47
模糊控 制策略	6 672	1 697	548	32.29	8.21

## 4 结论

1) 本研究设计并建立了以车速  $v$ 、蓄电池荷电状态 SOC 以及制动强度  $z$  为输入、制动能量回馈比例  $K_r$  为输出的模糊控制器,实现了回馈制动能量最大化。

2) 利用本研究提出的控制策略,在 CYC\_UD DS 循环工况进行仿真,结果表明,制动能量的回收增加了 108 kJ,回收率提高了 6.36%,有效提高了续航里程。

## 〔参考文献〕

- [1] 周洪如,孙丽,宋敬滨.电动汽车传动系统动力性能仿真及试验研究[J].机械传动,2016,40(8):111-114.  
ZHOU Hang,SUN Li,SONG Jing-bin.Dynamic performance simulation and experimental research of electric transmission system[J].Journal of Mechanical Transmission,2016,40(8):111-114.
- [2] ZHANG Zi-jian.Regenerative braking for electric vehicle based on fuzzy logic control strategy[A].2nd Mechanical and Electronics Engineering International Conference[C].USA:IEEE,2010.
- [3] Chan C C,Bouscayrol A,Chen K.Electric,hybrid,and fuel-cell vehicles: architectures and modeling [J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,2010,59(2):589-598.
- [4] 杨洋.纯电动汽车新型电液复合制动系统研究[D].重庆:重庆大学,2012.



- YANG Yang. New electro-hydraulic braking system for pure electric vehicle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [5] 王耀南, 刘东奇. 电动汽车机电复合制动力分配策略研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 347-351.
- WANG Yao-nan, Liu Dong-qi. A study of mechanical and electrical compound braking force distribution strategy for electric vehicle [J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 347-351.
- [6] 刘丽君, 姬芬竹, 杨世春, 等. 基于 ECE 法规和 I 曲线的机电复合制动控制策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2013 (1): 138-142.
- LIU Lin-jun, JI Fen-zhu, YANG Shi-chun, et al. Control strategy for electro-mechanical braking based on curves of ECE regulations and ideal braking force [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (1): 138-142.
- [7] 潘盛辉, 宋仲达, 王系朋. 基于模糊控制的纯电动汽车机电复合制动控制策略研究[J]. 电脑知识与技术, 2015(2): 251-255.
- PAN Sheng-hui, SONG Zhong-da, WANG Xi-peng. A study of strategy for electro-mechanical braking of electric vehicle based on fuzzy control [J]. Computer knowledge and Technology, 2015(2): 251-255.
- [8] 石庆升, 张承慧, 崔纳新. 一种新型的电动汽车再生制动力分配策略[J]. 电工技术学报, 2007, 22(2): 125-129.
- SHI Qing-sheng, ZHANG Cheng-hui, CUI Na-xin. A new model of renewable braking force assignment for electric vehicles [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2007, 22(2): 125-129.
- [9] Gao Y, Ehsani M. Electronic braking system of EV and HEV-integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS [R]. USA: SAE, 2001.
- [10] 任黎明, 张凤营, 于红. 基于模糊-PID 智能化控制系统的研究[J]. 艺术科技, 2012(6): 227-227.
- REN Li-ming, ZHANG Feng-ying, YU Hong. Application of fuzzy-PID intelligent control system [J]. Art Science and Technology, 2012(6): 227-227.
- [11] 赵正黎, 于惠钧, 张发明, 等. 基于模糊 PID 控制的直流电机调速系统[J]. 湖南工业大学学报, 2015 (2): 38-43.
- ZHAO Zheng-li, YU Hui-jun, ZHANG Fa-ming, et al. DC motor speed control system based on fuzzy PID control [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015(2): 38-43.
- [12] 杜冠磊, 马向华. 基于模糊逻辑的混合动力汽车制动力动态分配控制策略研究[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(3): 17-20.
- DU Guan-lei, MA Xiang-hua. Research of control strategy for braking force distribution of hybrid electric vehicle based on fuzzy logic [J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(3): 17-20.
- [13] Wipke K B, Cuddy M R, Burch S D. ADVISOR 2002 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1751-1761.

#### (上接第 83 页)

- [13] 李伶杰, 宋松柏, 王银堂, 等. 变化环境下石羊河流域年径流频率计算[J]. 水文, 2016, 36(4): 19-25.
- LI Ling-jie, SONG Song-bo, WANG Yin-Tang, et al. Frequency analysis of annual runoff for shiyanghe river in a changing environment [J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(4): 19-25.
- [14] 曾亮, 毛成校. 浅谈闭式循环阀冷设备在韶山换流站换流阀系统中的应用[J]. 湖南电力, 2017 (37): 91-94.
- ZENG Liang, MAO Cheng-xiao. The application of closed cycle valve cooling equipment in Shaoshan converter station [J]. Hunan Electric Power, 2017 (37): 91-94.
- [15] 刘晓波, 许鸿飞, 刘源. 酒湖工程阀水冷系统设计优化分析[J]. 湖南电力, 2017(37): 77-82.
- LIU Xiao-bo, XU Hong-fei, LIU Yuan. Design optimization analysis for valve cooling system of Jiuhu DC Project [J]. Hunan Electric Power, 2017 (37): 77-82.