

基于模糊控制的纯电动汽车制动能量回收策略研究

张 凤, 时安宁, 任恒宇, 叶 立*, 张文韬

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2022年11月26日; 录用日期: 2023年1月12日; 发布日期: 2023年1月19日

摘 要

为了能够进一步提高纯电动汽车制动能量回收的利用率, 本文综合考虑了制动动力学与再生制动结构知识, 对汽车制动能量回收控制策略进行了优化。利用软件分别建立了模糊控制器、再生制动模块和电动汽车再生制动模型。并将传统的串、并联控制策略与基于模糊控制的制动控制策略进行对比仿真分析。结果表明: 与传统的串、并联控制策略相比, 模糊控制策略对于制动能量回收环节的优化效果更好, 制动转化率分别提高了11.9%、21.2%, 制动回收率分别提高了2.78%、4.96%, 具有更好的制动能量回收能力, 且能够提升整车能量利用水平。

关键词

纯电动汽车, 制动能量回收, 模糊控制, 联合仿真

Research on Braking Energy Recovery Strategy of Pure Electric Vehicle Based on Fuzzy Control

Feng Zhang, Anning Shi, Hengyu Ren, Li Ye*, Wentao Zhang

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 26th, 2022; accepted: Jan. 12th, 2023; published: Jan. 19th, 2023

Abstract

In order to further improve the utilization rate of braking energy recovery of pure electric ve-

*通讯作者。

文章引用: 张凤, 时安宁, 任恒宇, 叶立, 张文韬. 基于模糊控制的纯电动汽车制动能量回收策略研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(1): 212-224. DOI: 10.12677/mos.2023.121021

hicles, this paper comprehensively considers the knowledge of braking dynamics and regenerative braking structure, and optimizes the control strategy of automobile braking energy recuperation. The fuzzy controller, regenerative braking module and electric vehicle regenerative braking model were established by software. The traditional series and parallel control strategy and the braking control strategy based on fuzzy control are compared and analyzed. The results show that compared with the traditional series and parallel control strategies, the fuzzy control strategy has a better optimization effect on the braking energy recuperation link, with the braking conversion rate increased by 11.9% and 21.2%, and the braking recovery rate increased by 2.78% and 4.96%, respectively, which has better braking energy recuperation ability and can improve the energy utilization level of the whole vehicle.

Keywords

Pureelectric Vehicle, Brake Energy Recovery, Fuzzy Control, The Joint Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化脚步越来越快,汽车的需求量逐步增高,已经成为人类必不可少的交通工具,然而汽车带来的能源消耗产生了环境污染问题,因此新能源汽车的开发是必然的。其中节能高效的电动汽车研发成为了国内外的研究热点。研究表明,汽车行驶的过程中,根据行驶工况的不同,约有 35%~80%的能量损失在制动过程中[1] [2] [3] [4]。所以为了降低汽车行驶能量消耗率,可以将汽车的制动过程能量回收重新利用,这能带来明显的经济效益[5]。能量回收的悬架系统可以将汽车在颠簸路上的振动能量回收利用,但与回收汽车行驶动能相比,前者经济效益小且成本高。在电动汽车逐渐普及的情况下,分析研究制动能量回收的原理及影响因素,对进一步提高汽车制动能量回收利用率具有重大的意义[6] [7]。

近年来,根据国内外学者不同程度的研究,制动能量回收技术得到了不断地发展。不同的制动力分配策略在制动能量回收上将会有不同的效果。Cikanek [8]等对纯电动汽车进行研究,改变了电机的制动比例关系,提升了回收效率,但在制动舒适性上还有待优化。Gao [9]等研究混合动力汽车提出了两种不同的前后轮制动分配策略,节能效果提升了 20%,且大大的优化了驾驶体验。纪佳圳[10]等人提出一种基于 ECE 法规和理想制动力分配曲线的制动能量回收控制策略。利用 MATLAB/Simulink 搭建控制策略模型,并在 AVLcruise 中进行联合仿真。通过 NEDC 工况仿真,证明所提出的制动能量回收控制策略能有效提高混合动力汽车的续航里程。最后通过实车试验,进一步验证了控制策略的有效性。

除了调节制动力分配比例外,电动汽车制动能量回收率的提高往往还要依赖于控制策略。李成毅[11]通过分析传统再生制动策略缺点,并结合电动汽车制动特点、电机在制动过程中的作用,前后轮制动力的安全稳定范围,提出了一种最佳能量回收的并联再生制动策略。为验证该策略的有效性和可行性,利用 ADVISOR 进行仿真建模。综合对比了该策略和现有并联再生制动策略以及 ADVISOR2002 中自带的再生制动策略,分析不同制动策略下再生制能量的回收效果。仿真结果表明:该策略的最终荷电状态高于其它两种再生制动策略;但在不同的减速度情况下,本文策略在制动强度较小时具有更好的能量回收效果。周苏[12]对纯电动汽车制动能量回收控制策略进行了研究,以电池的 SOC、车速、制动减速度、电机发电扭矩等作为约束条件,基于 AMESim 仿真平台,对串联、并联、混联三种不同能量回收策略进

行仿真计算，分析了不同回收策略在不同驾驶工况下对能耗及能量回收率的影响。

上述研究对制动能量回收策略的研究大部分是在基于传统的串、并联控制策略上做出的调整，关于制动能量回收的研究已有很多，但仍存在一些需要改进的地方，特别是在制动能量回收策略方面。本文首先对整车进行了制动动力学分析，然后基于传统的串、并联制动控制策略，提出了一种基于模糊控制的制动回收策略。经仿真结果验证，对比了三种不同控制策略下的结果，串、并联控制策略固然能提高制动能量利用率，但模糊控制策略有更好的制动能量回收能力，能够增加整车续驶里程，提升整车能量利用水平。

2. 纯电动汽车制动动力学分析

2.1. 整车运动方程

车辆在制动过程中，车速逐渐减小，其所受外力包含滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 和地面制动力 F_b 。车辆沿纵向的动力学方程为：

$$\delta m \frac{dv}{dt} = -F_f - F_w - F_i - F_b \quad (1)$$

各阻力的计算如下：

1) 滚动阻力

$$F_f = mgf \cos \alpha \quad (2)$$

式中： α 为道路坡度角。

2) 空气阻力

$$F_w = \frac{1}{2} C_d \cdot A_p (v + v_w)^2 \quad (3)$$

式中： v_w 为汽车行驶方向上的风速，与 v 方向相反时 $v_w > 0$ ，与 v 方向相同时 $v_w < 0$ 。

3) 坡度阻力

$$F_i = mg \sin \alpha \quad (4)$$

式中：上坡时 $F_i > 0$ ，下坡时 $F_i < 0$ 。

4) 地面制动力

$$F_b = F_{bf} + F_{br} \quad (5)$$

式中： F_{bf} 为前轮地面制动力， F_{br} 为后轮地面制动力。

车辆在理想水平路面行驶时(忽略地面制动力)，由上述公式可计算出车辆最小减速度 a_{\min} ：

$$a_{\min} = \frac{mgf + \frac{1}{2} C_d A_p (v + v_w)^2}{\delta m} \quad (6)$$

车辆制动时，作用在车轮上的电机制动力为：

$$F_m = T_m \cdot i_0 \cdot i_g / \eta \cdot r \quad (7)$$

式中： T_m 为电机的输出扭矩， i_0 为主减速传动比， i_g 为变速器传动比， η 为传动效率， r 为车辆半径。

2.2. 制动潜力分析

当汽车在平直的道路行驶时，其功率 P 可以表示为：

$$P = \left(mgf + \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 + m \delta \frac{dv}{dt} \right) v \quad (8)$$

式中: m 为汽车总质量; g 为重力加速度; f 为车辆滚阻系数, 受轮胎状态与路况的影响, 常取 0.01~0.035; ρ 为空气密度; C_d 为空气阻力系数, 常取 0.3~0.4; A 为行驶迎风面积; v 为行驶车速; δ 为旋转质量换算系数, $\delta > 1$ 。 $P \geq 0$ 时为驱动功率, $P \leq 0$ 时为制动功率。

车辆行驶时的能量 E 为:

$$E = \int P dt \quad (9)$$

当 $E \geq 0$ 时, 代表车辆需要的驱动能量, 用 E_w 表示; 当 $E_1 < 0$ 时, 代表车辆制动回收的能量, 用 E_r 表示。

蓄电池耗能 E_1 为:

$$E_1 = \frac{E_w}{\eta_1} \quad (10)$$

蓄电池回收能量 E_2 为:

$$E_2 = -E_r \eta_2 \quad (11)$$

式中, η_1 代表动力系统传递效率, η_2 代表动力系统回收效率, E_2/E_1 就可以表示能量回收的比例。

2.3. 制动能量回收系统结构

再生制动系统是由电机系统与液压系统组合而成的复合制动系统。再生制动控制策略集成于制动控制器中, 汽车制动时, 制动控制器通过传感器采集的制动踏板信号计算制动需求总制动力大小, 并将车速、电机转速、电池 SOC、轮速、电池电压、轮缸压力等信号进行驾驶员制动意图识别及车辆行驶状态分析, 判断是否进行制动能量回收。如果可以能量回收, 再根据分析结果对相应的再生制动分配策略; 若不能, 则由液压制动系统单独完成制动任务。

2.4. 纯电动汽车制动能量回收评价指标

(1) 制动可回收率

车辆制动情况下, 不仅受到滚动阻力、空气阻力等外界因素影响, 在变速器、主减速器等传动部件处传递时也会有一定能量损失, 之后输送至动力电池的能量 E_f 与车辆总能量 E_d 的比值定义为可回收率 η_Q 。

$$\eta_Q = \frac{E_f}{E_d} = \frac{\int \frac{T \cdot n}{9.55} dt}{\frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2)} \quad (12)$$

式中: T 为电机扭矩, m 为车辆质量, n 为电机转速, V_1 为制动末速度, V_2 为制动初速度。

2) 制动转化率

转化率 η_t 定义为制动过程中动力电池实际储能量 E_r 与输送至动力电池总能量 E_f 的比值。

$$\eta_t = \frac{E_r}{E_f} = \frac{\int U \cdot Idt}{\int \frac{T \cdot n}{9.55} dt} \quad (13)$$

式中: U 为动力电池充电电压, I 为动力电池充电电流。

3) 制动回收率

制动回收率 η_v 即制动过程中动力电池实际储能量 E_r 与整车总能量 E_z 的比值, 为整车真实的制动能量回收效率[13]。

$$\eta_v = \frac{E_r}{E_z} = \frac{\int U \cdot Idt}{\frac{1}{2} \cdot m \cdot (V_1^2 - V_2^2)} \quad (14)$$

3. 制动能量回收策略

3.1. 机械制动力与再生制动力分配

相较于传统燃油车, 制动能量回收是电动汽车特有的功能。在车辆制动过程中, 驱动电机产生制动力矩成为发电机, 将机械能转化为电能, 并存贮至蓄电池中, 完成制动能量回收。再生制动系统如图 1 所示, 车辆在制动时, 动能会通过传动系统传递到电机使其发电, 且电机会对车轮产生一个反向的制动转矩, 电机转速相同下此转矩在理论上与电机的转矩等大反向的[14] [15] [16]。为避免再生制动强度受限造成制动能力不足, 电动汽车采用了再生制动和机械制动结合的混合制动方式, 再生制动强度越大, 其回收能量越多, 整车能量利用率就越高, 但是电机产生的再生制动力矩受到限制, 为保证制动能力, 机械制动对于车辆来说也是必不可少的, 即电动车存在再生制动与机械制动两种制动方式, 称为混合制动。根据对再生制动、机械制动的不同分配方式, 可分为串联与并联策略[17] [18]。

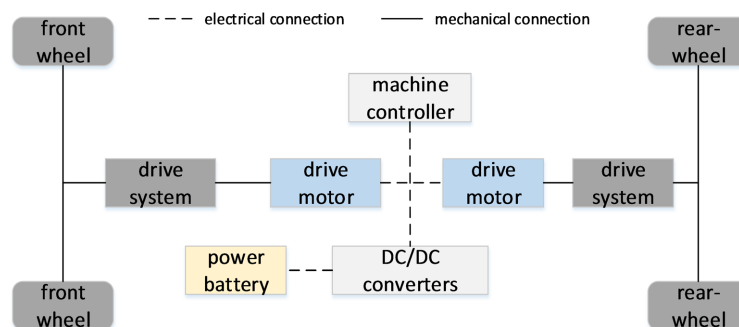


Figure 1. Regenerative braking system
图 1. 再生制动系统

串联制动能量回收策略如图 2 所示, 车辆制动过程中, 处于轻度制动时只使用再生制动。随着制动强度增大, 再生制动达到极限时, 机械制动参与车辆制动, 补充再生制动不足的制动力, 达到制动要求[19] [20]。并联制动能量回收策略如图 3 所示, 车辆制动过程中, 不管制动强度多大, 再生制动与机械制动始终按照定值比例进行分配。串联制动策略对再生制动力达到使用最大化, 能量回收情况理想, 但需要与 ABS 系统进行集成控制, 结构复杂成本昂贵。并联制动策略对再生制动的使用不充分, 回收能量较少。

3.2. 制动能量回收模糊控制策略

相较于基础的串并联控制, 模糊控制能建立更加具体的模型, 对系统达到更加精准的控制, 所以我们基于模糊控制分析了一套制动能量回收策略[21], 车辆制动过程中, 伴随着制动能量回收, 对其影响最大的几个因素包括制动强度 z 、车速 v 和电池 SOC, 故选择它们作为模糊控制器的输入变量。为实现对制动力的合理分配, 选择再生制动力分配系数 k 作为输出变量, 基于模糊控制的整车制动力分配策略如图 4 所示。

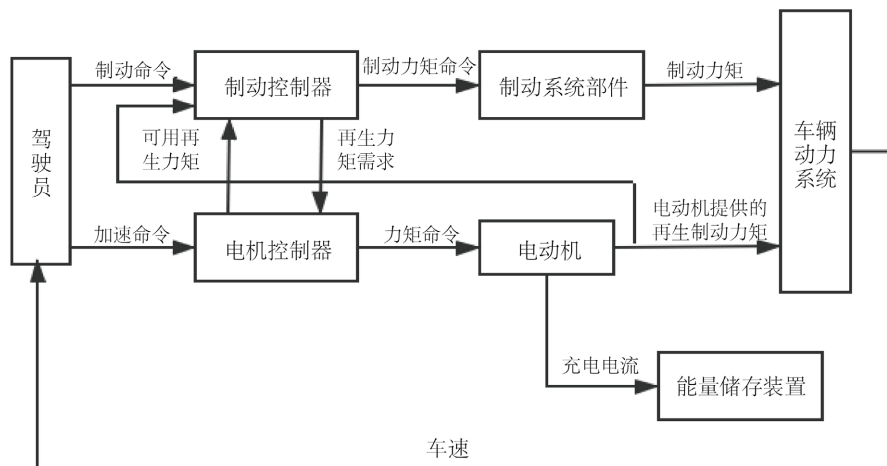


Figure 2. Series braking strategy
图 2. 串联制动策略

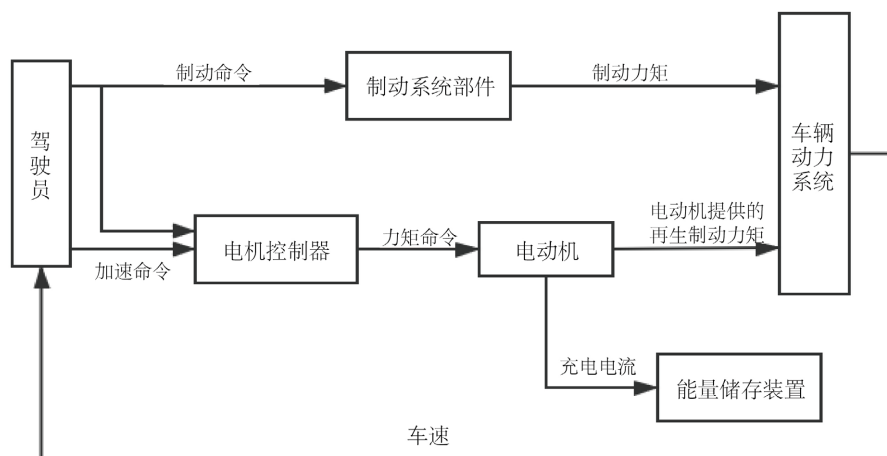


Figure 3. Parallel braking strategy
图 3. 并联制动策略

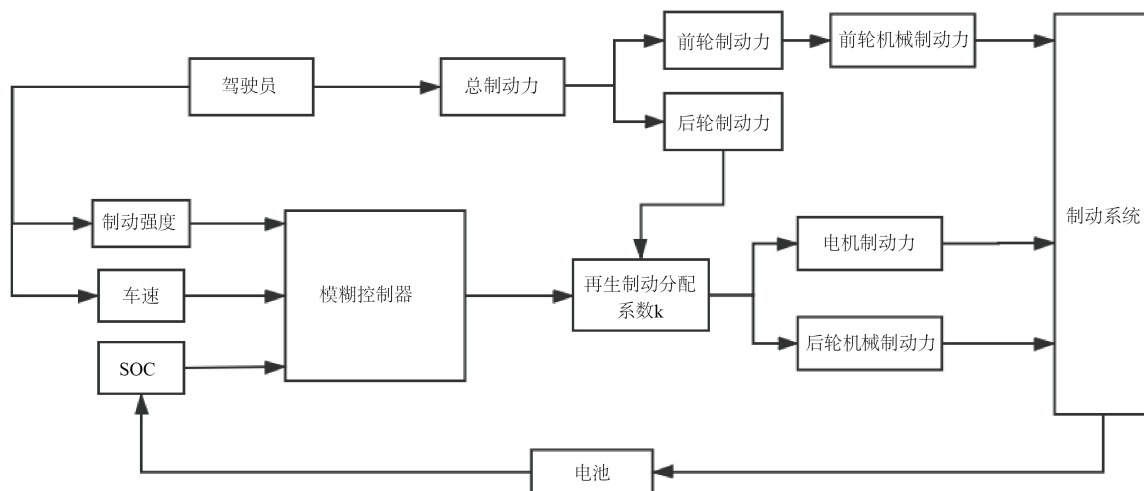


Figure 4. Braking strategy based on fuzzy control
图 4. 基于模糊控制的制动策略

4. 仿真模型建立

4.1. 模糊控制器设计

本文采用 Mamdani 型控制器，为三输入、单输出的结构，选择制动强度 z 、车速 v 和电池 SOC 作为模糊控制器的输入变量，再生制动力分配系数作为输出变量[22]。

制动强度 z 、车速 v 、电池 SOC 的隶属度函数选择钟型函数，其论域范围分别为[0, 1]、[0, 120]、[0, 100]，模糊子集划分为{L、M、H}。再生制动力分配系数 k 的隶属度函数选择三角形函数，论域为[0, 1]，模糊子集划分为{CL、L、M、H、CH}。根据制动强度 z 、车速 v 、电池 SOC 的模糊子集，推导再生制动力分配系数 k 的模糊子集，得到模糊控制规则，如表 1 所示，共 27 条规则，规则命令使用“if then”控制语言。

Table 1. Fuzzy rules table

表 1. 模糊规则表

编号	SOC	v	z	k	编号	SOC	v	z	k
1	L	L	H	CL	15	M	H	M	H
2	L	M	H	M	16	H	L	M	CL
3	L	H	H	M	17	H	M	M	CL
4	M	L	H	L	18	H	H	M	CL
5	M	M	H	H	19	L	L	L	L
6	M	H	H	M	20	L	M	L	CH
7	H	L	H	CL	21	L	H	L	H
8	H	M	H	CL	22	M	L	L	H
9	H	H	H	CL	23	M	M	L	CH
10	L	L	M	L	24	M	H	L	CH
11	L	M	M	H	25	H	L	L	CL
12	L	H	M	H	26	H	M	L	CL
13	M	L	M	M	27	H	H	L	CL
14	M	M	M	H					

将模糊推理得出的模糊值转换为精确控制信号，使用重心法实现解模糊化得到如图 5 所示的规则变化曲面。

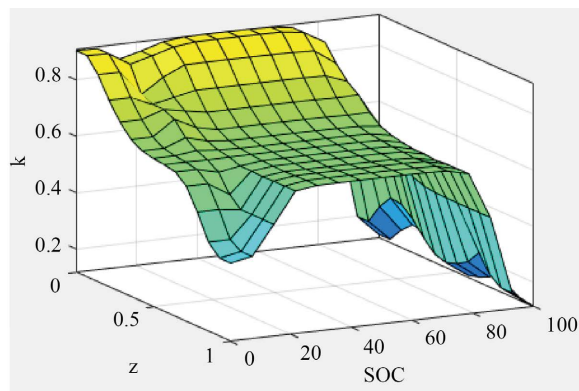


Figure 5. Regular variation surfaces

图 5. 规则变化曲面

4.2. 仿真模型构建

根据所制定的动力分配模糊控制规则和传统的串并联控制规则，可在 Simulink 环境中搭建制动能量回收控制算法模型。将其嵌入整车仿真模型中，利用典型工况进行仿真实验。表 2 为整车基本参数。

Table 2. Basic parameters of the whole vehicle

表 2. 整车基本参数

技术参数	参考值
整车装备质量/kg	1598
长 × 宽 × 高/mm	4631 × 1789 × 1495
轴距/mm	2650
前/后轮距/mm	1502/1492
轮胎滚动半径/mm	287
迎风面积/m ²	1.97
风阻系数	0.32
机械传动效率	0.92
滚动阻力系数	0.012
齿轮传动比	10
蓄电池容量/(A·h)	90
电池组电池数量/(个)	100
驱动电机额定功率/kw	20
驱动电机额定转速/(r/min)	3500

基于纯电动汽车制动力分配模糊控制策略，于 Simulink 中搭建出再生制动模块，如图 6 所示，后续将其嵌入 AMESim 整车模型中，进行联合仿真计算。

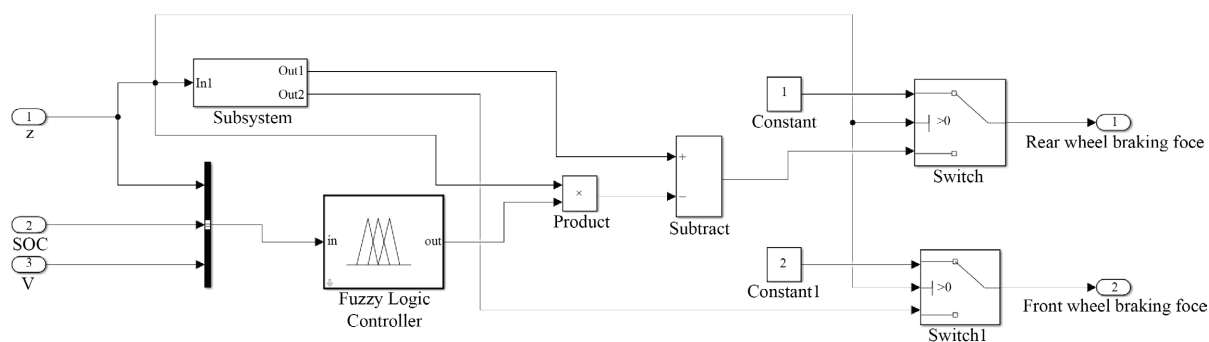


Figure 6. Regenerative braking module

图 6. 再生制动模块

在已搭建再生制动模块的基础上联合 AMESim 软件搭建出电动汽车制动系统，在控制器模块中我们

分别采用了串并联控制策略和模糊控制策略来研究制动能量的回收情况，由于本文主要在于制动能量回收的优化研究，为了减少仿真计算时间，更加快速的验证不同再生制动策略对整车能耗的影响，我们对整车系统进行了简化建模，主要包括车辆、驱动电机、蓄电池、传动系统、控制单元等模块，如图 7、图 8 所示。

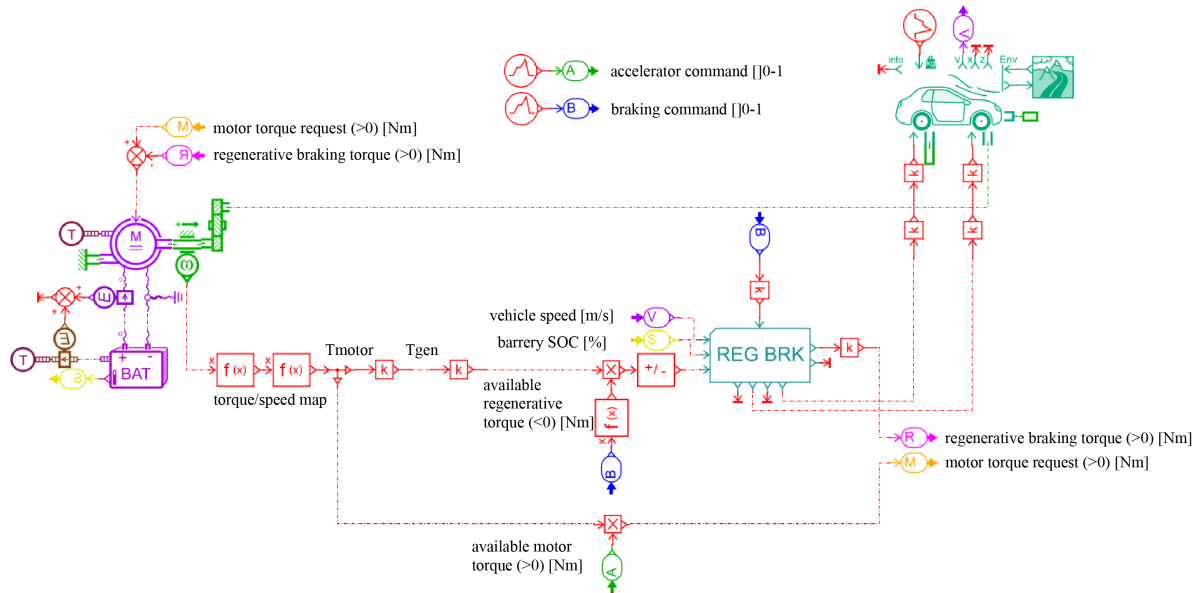


Figure 7. Serial and parallel braking strategy vehicle modeling
图 7. 串、并联制动策略整车建模

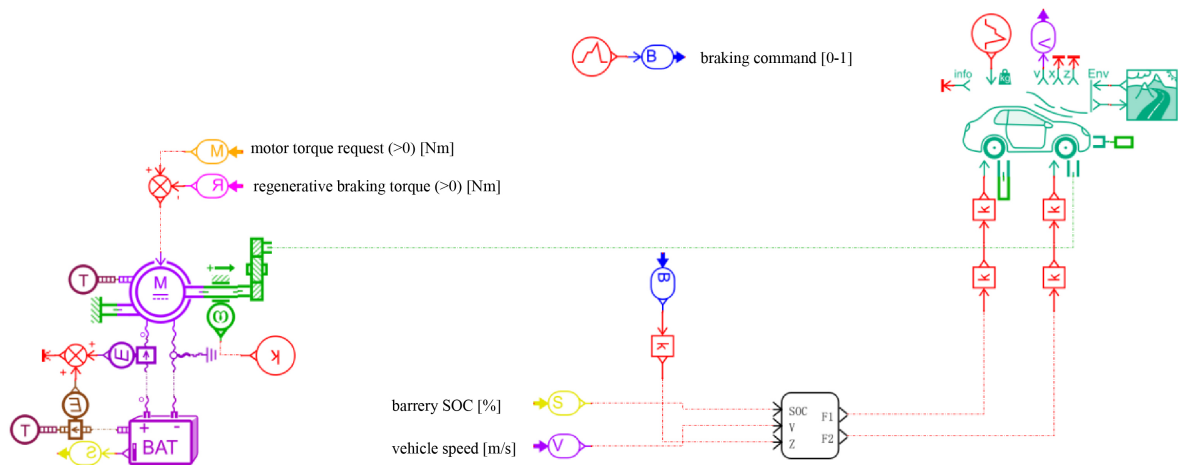


Figure 8. Fuzzy braking strategy vehicle modeling
图 8. 模糊制动策略整车建模

5. 仿真结果分析

5.1. 工况分析

制动能量回收功能仅在 SOC < 95 时启动，因此设置电池的初始电量为 95%，行驶工况为 WLTC 工况，工况图如图 9，仿真时间为 1800 s，仿真步长为 0.5 s。

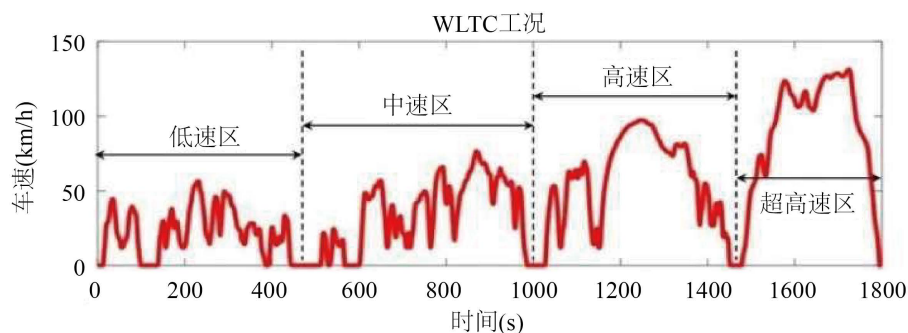


Figure 9. WLTC conditions
图 9. WLTC 工况

5.2. 不同控制策略下电机扭矩变化分析

根据图 10 我们看到，驱动电机扭矩在正负区间内反复振荡，符合 WLTC 工况要求。车辆加速时，电机扭矩为正，驱动车辆行驶，提供动力；在车辆制动过程中，电机扭矩为负，电机作为发电机运行，将部分动能转化为电能供给蓄电池，实现制动能量回收。在三种不同制动策略下，车辆加速扭矩基本相同，但在制动过程中产生的制动力矩差异较大，模糊控制制动策略的制动力矩最大(最大可处于 60 N·m 左右)，其制动回收效果最好，其次是串联制动策略、并联制动策略。

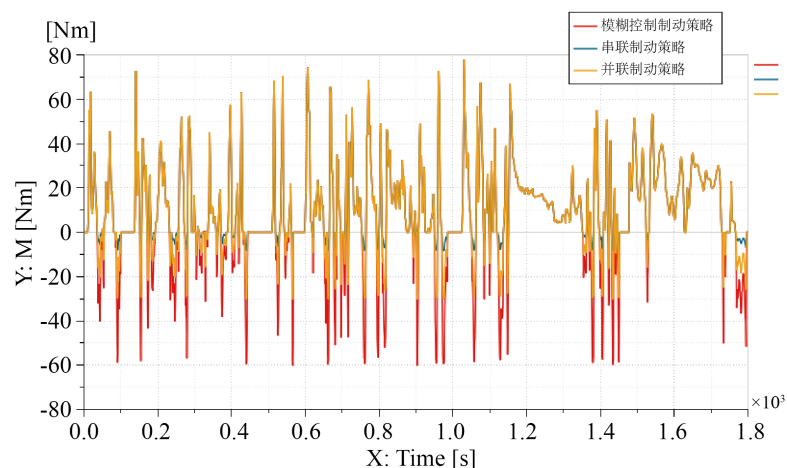


Figure 10. Motor torque changes
图 10. 电机扭矩变化

5.3. 不同控制策略下电机效率变化分析

从图 11 中可以看出，在 WLTC 运行工况下，电机工作效率呈波动变化趋势，且波动范围较大。在模糊控制制动策略下，电机工作点更多分布在高效率区；在并联制动策略下，电机工作点较多的分布在低效率区。

5.4. 不同控制策略下电池 SOC 分析

图 12 反映了不同制动控制策略下电池 SOC 变化，三种控制策略下电池 SOC 均处于波动下降趋势，频繁的波动代表着 WLTP 工况下频繁的加减速过程中，电机的制动能量回收将电量回馈给蓄电池，导致

SOC 短暂回升。经过一个 WLTP 工况时间 1800 s，模糊控制制动策略下电池 SOC 余量为 87.28%，串联制动策略下电池 SOC 余量为 86.51%，并联制动策略下电池 SOC 余量为 85.83%；从制动回收效果上看，模糊控制制动策略 > 串联制动策略 > 并联制动策略。

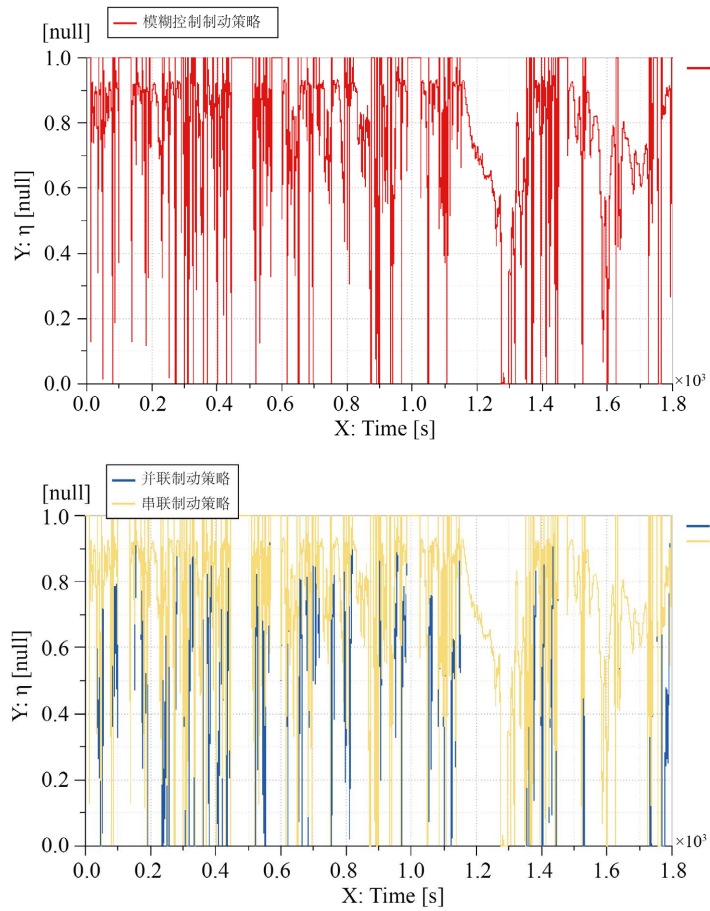


Figure 11. Motor efficiency changes
图 11. 电机效率变化

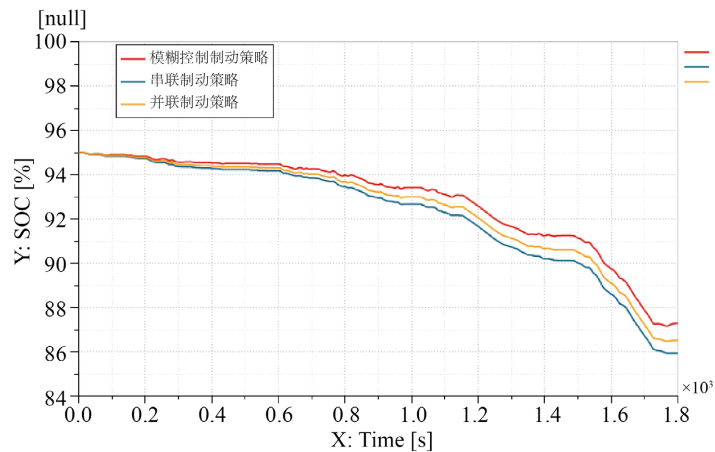


Figure 12. Battery SOC changes
图 12. 电池 SOC 变化

为了更直观的量化制动能量回收情况, 本文选择制动转化率和制动回收率作为制动能量回收情况的评价指标。由表 3 可以得出, 相较于常规的串联、并联制动策略, 采用基于模糊控制的制动策略时, 制动转化率分别提高了 11.9%、21.2%, 且制动回收率分别提高了 2.78%、4.96%, 有较好的优化效果。

Table 3. Brake recuperation
表 3. 制动回收情况

策略方式	整车总耗能/kJ	制动总能量/kJ	回收制动能量/kJ	制动转化率/%	制动回收率/%
串联	8224	1902.4	789.5	41.5	9.60
并联	8258	1902.4	612.6	32.2	7.42
模糊控制	8205	1902.4	1015.9	53.4	12.38

以上仿真结果表明, 相较于串联与并联控制策略, 本文制定的基于模糊控制的制动策略拥有更好的制动能量回收能力, 提升了整车能量利用水平。

6. 结论

针对纯电动汽车, 从制动能量回收的机理入手, 对整车进行了制动动力学分析和再生制动结构分析, 在传统的串、并联制动控制策略基础上, 本文提出了一种基于模糊控制的制动回收策略。根据评价制动能量回收系统的评价指标, 分析了在不同控制策略下的制动能量回收能力, 得到如下结论。

1) 在三种不同制动策略下, 车辆加速扭矩基本相同, 但在制动过程中产生的制动力矩差异较大, 模糊控制制动策略的制动力矩最大可处于 60 N·m 左右, 电机工作点更多分布在 0.8 以上的高效率区; 在串、并联制动策略下, 电机工作的较多分布在 0.4 以下的低效率区。

2) 模糊控制制动策略下电池 SOC 余量为 87.28%, 串联制动策略下电池 SOC 余量为 86.51%, 并联制动策略下电池 SOC 余量为 85.83%; 从制动回收效果上看, 模糊控制制动策略 > 串联制动策略 > 并联制动策略。

3) 相较于常规的串联、并联制动策略, 采用基于模糊控制的制动策略时, 制动转化率分别提高了 11.9%、21.2%, 且制动回收率分别提高了 2.78%、4.96%, 有较好的优化效果。

参考文献

- [1] Sun, X., Li, Z., Wang, X., *et al.* (2020) Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*, **13**, 90. <https://doi.org/10.3390/en13010090>
- [2] Tahir, Y., Khan, I., Rahman, S., *et al.* (2021) A State-of-the-Art Review on Topologies and Control Techniques of Solid-State Transformers for Electric Vehicle Extreme Fast Charging. *IET Power Electronics*, **14**, 1560-1576. <https://doi.org/10.1049/pe12.12141>
- [3] Xiao, B., Ruan, J., Yang, W., *et al.* (2021) A Review of Pivotal Energy Management Strategies for Extended Range Electric Vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2021**, Article ID: 111194. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111194>
- [4] 申伟, 陆敏恂. 中国新能源汽车产业的发展现状与展望[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(22): 239-242. <https://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2020.22.082>
- [5] 郭金刚, 董昊轩, 盛伟辉, 涂超. 电动汽车再生制动能量回收最优控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 132-138.
- [6] 翟国柱, 赵国柱, 朱思洪. 电动汽车再生制动控制策略研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(11): 160-163, 280.
- [7] 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, 31(4): 244-251.
- [8] Powell, B.K., Bailey, K.E. and Cikanek, S.R. (1998) Dynamic Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Power-

- train Systems. *IEEE Control Systems Magazine*, **18**, 17-33. <https://doi.org/10.1109/37.722250>
- [9] Gao, Y. and Ehsani, M. (2010) Design and Control Methodology of Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **57**, 633-640. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027918>
- [10] 纪佳圳, 熊锐, 吴坚, 等. 混合动力汽车制动控制策略的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(3): 39-43, 47.
- [11] 李成毅. 电动汽车最佳能量回收并联再生制动策略研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [12] 周苏, 许长立. 基于 Amesim 的纯电动汽车制动能量回收策略研究[J]. 今日制造与升级, 2021(Z1): 56-58.
- [13] 王计广, 李孟良, 徐月云, 方茂东. 电动汽车制动能量回收系统评价方法研究[J]. 汽车技术, 2014(12): 35-39.
- [14] 任玉龙. 纯电动汽车的再生制动控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019. <https://doi.org/10.27063/d.cnki.ghlg.2019.000029>
- [15] 杨建翠. 纯电动汽车制动能量回收控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2018.
- [16] 张亮, 李益华. 基于模糊控制的纯电动汽车再生制动系统的仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(3): 131-133. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.1001-9227.2017.03.131>
- [17] 王静怡. 纯电动汽车再生制动控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西华大学, 2021. <https://doi.org/10.27411/d.cnki.gscgc.2021.000502>
- [18] 叶敏. 电动汽车再生制动及其控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 218.
- [19] Passino, K.M., Yurkovich, S. and Reinfrank, M. (1998) Fuzzy Control. Addison-Wesley, Reading.
- [20] Postlethwaite, B. (1997) An Introduction to Fuzzy Control: Edited by D. Driankov, H. Hellendoorn and M. Reinfrank 2nd Revised Edition, 1996, 316 pp., 152 figs, Hardcover DM 88—ISBN: 3-540-60691-2. *Journal of Process Control*, **7**, 153. [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(97\)82770-9](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(97)82770-9)
- [21] 靳立强, 孙志祥, 王熠, 郑迎. 基于模糊控制的电动轮汽车再生制动能量回收研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(10): 1101-1105+1197. <https://doi.org/10.19562/j.chinasae.qcgc.2017.10.001>
- [22] In'kov, Yu.M., Feoktistov, V.P. and Tretinnikov, O.V. (2015) Control of Recuperative Braking of a Locomotive under Limitation of the Energy Recovery to a Contact System. *Russian Electrical Engineering*, **86**, 509-513. <https://doi.org/10.3103/S1068371215090059>