

# 基于制动稳定性要求的电动汽车制动力分配

龚贤武<sup>1,2</sup>, 张丽君<sup>1</sup>, 马 建<sup>2</sup>, 汪贵平<sup>1</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为进一步提高电动汽车的能量利用效率以改善其续驶里程,提出一种基于制动稳定性要求的电动汽车最优能量回收制动力分配策略。通过对制动稳定性要求和 ECE R13 制动法规的分析,从理论上确定了纯电动汽车安全制动力的分配范围。考虑电机及蓄电池对能量回收的制约,在确定的安全制动范围内,分析了以最大限度回收制动能量为目标的制动力分配流程。将开发的制动控制策略嵌入 ADVISOR 2002 中,分别在城市道路工况和高速路工况下进行仿真。仿真结果表明:对比 ADVISOR 中缺省的制动力分配策略,提出的制动力分配策略在保证制动稳定性的要求下,回收能量和能量利用效率都有提高,城市道路工况能量回收提高幅度达 163.4%。

**关键词:**汽车工程;电动汽车;制动稳定性;制动力分配;最优能量回收

**中图分类号:**U461.3

**文献标志码:**A

## Braking force distribution of electric vehicles based on braking stability

GONG Xian-wu<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-jun<sup>1</sup>, MA Jian<sup>2</sup>, WANG Gui-ping<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to further improve the energy efficiency of electric vehicles, thus to improve the driving range, a braking force distribution strategy of electric vehicles was developed, which realized optimal energy recovery based on braking stability. The safe range of braking force distribution was determined by analyzing braking stability requirements and the ECE R13 rules. Considering the restriction of motor and battery on energy recovery, the strategy with optimal energy recovery was established in the safe braking range. The simulation of this strategy was performed by ADVISOR 2002 in urban road and expressway driving cycle. The results show that the proposed braking force distribution strategy is more effective on energy recovery and energy efficiency than the default strategy in ADVISOR, and the increase rate of energy recovery reaches to 163.4% in urban road driving cycle. 3 tabs, 6 figs, 11 refs.

**Key words:** automotive engineering; electric vehicle; braking stability; braking force distribution; optimal energy recovery

## 0 引言

再生制动能量回收最大化可以有效地提高电动汽车的能量利用率和续驶里程,对于降低机械制动器的磨损也具有重要意义。由于再生制动能力受车速、电机最大允许制动力、储能元件最大允许充电电流等约束而使得其制动能力有限,再生制动系统必须与机械制动共同作用,才能满足汽车较大制动强度下对制动系统的要求。因此,在保证制动稳定性的条件下,考虑制动能量回收的影响因素,确定合理的再生制动和机械制动分配比例,是电动汽车再生制动系统研究的核心<sup>[1]</sup>。对于电动汽车机电复合制动的制动力分配控制问题,文献[2-3]研究了电机、蓄电池和制动系统结构等因素对制动能量回收的影响;文献[4-5]研究了能回收较多能量的前后轮上再生制动力和摩擦制动力的分配方法,但未全面考虑影响能量回收的各因素的限制;文献[6-9]综合考虑电功率等影响因素的限制,结合安全制动范围进行制动力分配,但是该类方法均采用理想条件下的安全制动范围,理论价值较大,实际应用有待改进。电动汽车制动力分配策略的制定原则是在保证制动稳定性的基础上尽可能多地回收制动能量。为此,本文从理论上确定了满足制动稳定性要求和 ECE R13 制动法规的理想安全制动范围,引入变比例阀液压分配线来代替理想的制动力分配曲线,得出实用的制动力分配范围。考虑电机及蓄电池对能量回收的制约,开发了满足制动稳定性要求且能最大限度回收制动能量的机电复合制动力分配策略。将开发的制动控制策略嵌入 ADVISOR 2002 中进行仿真,从回收能量和能量利用效率等方面进行了仿真评价。

## 1 纯电动汽车制动稳定性要求

根据汽车理论,车辆在制动过程中对前后轮受力稳定性有以下 2 点要求:

(1)不能出现只有后轴车轮抱死或者后轴车轮比前轴车轮先抱死的情况,以防止后轴侧滑;

(2)尽量少出现只有前轴车轮抱死或者前、后轴车轮都抱死的情况,以维持汽车的转向能力。

基于汽车制动稳定性要求,需要考虑以下 3 条制动力分配曲线,以求取车辆制动时的安全制动力分配范围<sup>[10]</sup>。

### 1.1 理想的前、后轮地面制动力分配 I 曲线

I 曲线为前、后轮同时抱死时制动力分配的关

系曲线,用公式表示为

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

式中: $F_{xb1}$ 、 $F_{xb2}$  分别为汽车前、后轮的制动力; $G$  为汽车重力; $b$  为汽车质心至后轴中心线的距离; $L$  为前后轴的距离; $h_g$  为汽车质心高度。

实际中,汽车的前、后轮制动力通常不能做到按 I 曲线的要求分配。根据汽车制动稳定性要求,后轴车轮不能先于前轴车轮抱死,如果高于 I 曲线进行分配会导致后轴车轮先抱死而出现侧滑的危险工况,因而应低于 I 曲线进行分配。

### 1.2 前轮抱死、后轮不抱死的前后轮制动力分配 f 曲线

为维持转向能力,保持车辆在制动过程中前轮不抱死是最理想的状态。后轮不抱死而前轮先抱死这一临界状态下的前后轮制动力分配满足 f 曲线,用公式表示为

$$F_{xb2} = \frac{L - \varphi h_g}{\varphi h_g} F_{xb1} - \frac{Gb}{h_g} \quad (2)$$

式中: $\varphi$  为路面附着系数。

在 f 曲线左侧进行分配可保证制动过程中车辆前轮不抱死。

### 1.3 最小后轮制动力分配 M 曲线

欧洲经济委员会制定的 ECE R13 制动法规对双轴汽车前后轮制动器制动力提出了明确的要求:对于轿车,车辆在各种装载状态时,前轴利用附着系数应在后轴利用附着系数的上方;当附着系数  $\varphi$  在 0.2~0.8 之间时,要求制动强度  $z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$ 。据此要求,若前轮抱死,为保持车辆稳定和制动效率,后轮必须具有一定的制动力。后轮的最小地面制动力与前轮地面制动力的关系曲线称为 M 曲线,且应高于 M 曲线进行分配,M 曲线由式(3)、式(4)确定。

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

$$F_{xb2} = Gz - F_{xb1} \quad (4)$$

由上述 3 条曲线可得到满足制动稳定性要求的理想制动力分配范围,如下页图 1 中阴影部分所示。

## 2 再生制动及能量回收的制约条件

### 2.1 蓄电池

蓄电池作为再生制动系统的储能元件,其最大充电电流、最大充电功率、电池荷电状态 SOC 值是制约再生制动及能量回收的主要因素。再生制动过程中的充电电流不能超过蓄电池的最大充电电流,

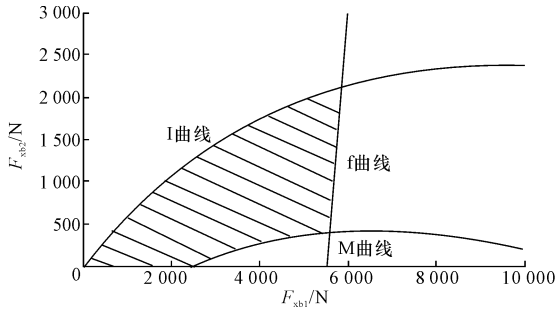


图 1 理想的汽车安全制动力分配范围

Fig. 1 Ideal safe range of braking force distribution for vehicles

充电功率也不能超过蓄电池允许的最大充电功率。每种电池都对 SOC 的运行范围有固定的要求,该范围称为蓄电池的主动充电区域。超出蓄电池主动充电区域的过充和过放都会对电池造成不利的影响。本文使用的蓄电池主动充电区域为 30%~90%。

采用简单的内阻模型,蓄电池的充电功率  $P_{\text{bat}}$  可表示为

$$P_{\text{bat}} = (U_{\text{oc}} + IR)I \quad (5)$$

式中: $U_{\text{oc}}$  为开路电压,是电池 SOC 的函数; $R$  为电池内阻; $I$  为当前的充电电流,可利用马斯定律计算为<sup>[11]</sup>

$$I = I_0 e^{-\sigma t} \quad (6)$$

式中: $I_0$  为  $t=0$  时的最大初始充电电流; $\sigma$  为衰减系数,也称充电接受比。

由式(5)、式(6)计算的电池充电功率限制了再生制动力的最大值,即

$$F_{\text{reg1}} \leq \frac{P_{\text{bat}}}{v\eta_i\eta_m\eta_b} \quad (7)$$

式中: $F_{\text{reg1}}$  为电池充电功率限制下电机的最大再生制动力; $v$  为车速; $\eta_i$  为机械传动效率; $\eta_m$  为电动机发电效率; $\eta_b$  为蓄电池充电效率。

## 2.2 电机再生制动

电机作为再生制动系统中能量转换的部件,是影响能量回收的主要因素之一。电机所能提供的回馈制动转矩受电机转矩转速特性、车速等因素的影响。再生制动时电机工作在发电机状态,其转矩输出特性与电动状态下的输出特性基本相同。即基速以下恒转矩输出,基速以上恒功率输出,即

$$T_{\text{reg1}} = \begin{cases} 9550P_N/n_b & n \leq n_b \\ 9550P_N/n & n \geq n_b \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{\text{reg1}}$  为电机再生制动转矩 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ );  $P_N$  为电机额定功率 ( $\text{kW}$ );  $n_b$  为电机基速 ( $\text{r/min}$ );  $n$  为转速。

较低的车速下制动时,由于低速时电动汽车的动能不足,使电机转速降低,电机驱动反电动势降低,因此再生制动能力就会随着车速降低而减小。为了保证制动安全,设置电机转速降到 500  $\text{r/min}$  时,电机能提供的再生制动力为 0,故进行以下修正为

$$T_{\text{reg}} = \lambda(n) T_{\text{reg1}} \quad (9)$$

式中: $\lambda(n)$  为与电机转速有关的修正因子。

$$\lambda(n) = \begin{cases} 0 & n \leq 500 \text{ r/min} \\ 1 & n > 500 \text{ r/min} \end{cases} \quad (10)$$

由以上分析得到发电功率限制下电机能够提供的驱动轮处最大再生制动力为

$$F_{\text{reg2}} = \frac{T_{\text{reg}} i}{r} \eta_t \quad (11)$$

式中: $i$  为电动汽车总传动比; $r$  为车轮半径。

制动过程中,若电机能够提供的最大再生制动力不能满足驱动轮处要求的再生制动力,为了保证制动安全,需要对制动力分配比例进行调整。

## 3 制动力分配策略

以某前驱型纯电动汽车为例,在安全制动力分配范围内,为了最大程度地回收制动能量,建立制动力分配策略,如图 2 所示。

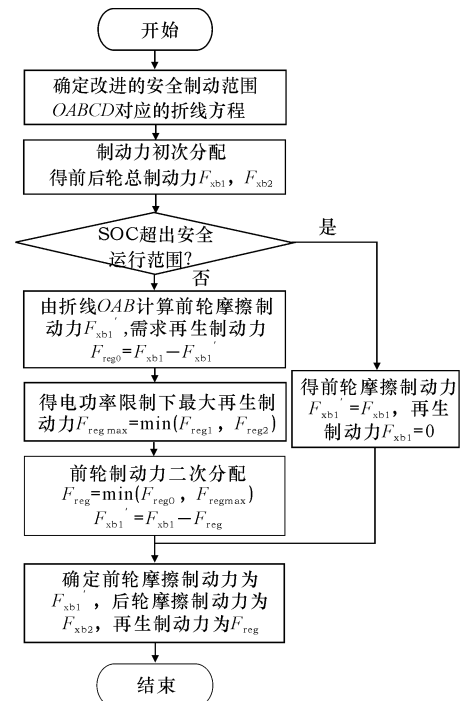
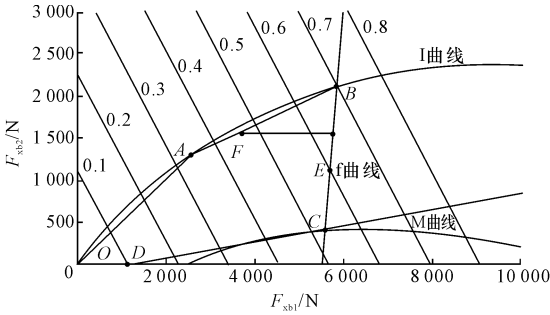


图 2 制动力分配策略控制流程

Fig. 2 Control flow of braking force distribution

具体步骤如下：

第 1 步：确定安全制动力分配范围。对制动力进行初次分配，得到车辆的前、后轮总制动力。为了方便实际应用，引入现代燃油车中常用的变比例阀液压分配线来代替理想制动力分配曲线，即在理想制动力分配 I 曲线上选取合适的折点(如图 3 中 A 点)，使该变比例阀分配线最大程度也趋近于理想的制动力分配曲线。同时，用 M 曲线的切线 CD 代替 M 曲线。最终得到如图 3 所示的制动力分配策略示意图。图 3 中多边形 OABCD 所包围的部分为改进的安全制动力分配范围，该制动力分配范围中的各点均满足制动稳定性要求。



注：0.1,0.2...0.8 为制动强度。

图 3 制动力分配策略

Fig. 3 Braking force distribution strategy

为了保证制动稳定性要求前提下最大程度提高再生制动力分配比例，采用 f 曲线与 M 曲线的切线 CD 实现前轮总制动力及后轮摩擦制动力的分配，即初次分配。具体计算过程如下：

(1)将汽车参数和路面附着系数代入曲线 I、M、f 的方程，求得对应于实际车辆的 3 条曲线方程。在此基础上求取 M 曲线的切线 CD 及折线 OAB 的方程。

(2)根据制动强度确定前、后轮总制动力。首先计算制动强度线与折线 CD 或 f 曲线的交点(如图 3 中的 E 点)，其横坐标值和纵坐标值即为需求的前后轮总制动力  $F_{xb1}$ 、 $F_{xb2}$ 。

第 2 步：根据蓄电池 SOC 的当前值和设定的电池主动充电区域范围确定是否可以再生制动。当电池 SOC 超出主动充电区域时，电机再生制动力  $F_{reg}=0$ ，不进行再生制动。制动力由前后轮摩擦制动共同提供，其中前轮摩擦制动力  $F_{xb1}'=F_{xb1}$ ，后轮摩擦制动力为  $F_{xb2}$ ，制动力分配结束。

第 3 步：若蓄电池 SOC 的当前值未超出设定的电池主动充电区域范围，则允许进行再生制动，需对前轮总制动力进行二次分配。具体分配过程如下：

(1)进行前轮最小摩擦制动力及需求再生制动

力的分配。即先在折线 OAB 上求取纵坐标为  $F_{xb2}$  的点(如图 3 中 F 点)，该点的横坐标即为需求的最小前轮摩擦制动力  $F_{xb1}'$ ，再由公式  $F_{reg0}=F_{xb1}-F_{xb1}'$  得到需求的电机再生制动力  $F_{reg0}$ 。

(2)考虑电机和蓄电池对再生制动及能量回收的制约，由式(7)和式(11)分别计算电机能够提供的最大再生制动力  $F_{reg1}$ 、 $F_{reg2}$ ，最终得到电功率限制下电机能够提供的最大再生制动力为

$$F_{regmax}=\min(F_{reg1},F_{reg2}) \tag{12}$$

(3)根据式(12)得到的  $F_{regmax}$  调整再生制动力分配，最终得到电功率限制下电机再生制动力分配值  $F_{reg}=\min(F_{reg0},F_{regmax})$ ，并调整前轮摩擦制动力为  $F_{xb1}'=F_{xb1}-F_{reg0}$ 。

4 仿真试验及分析

选择某前驱型纯电动汽车作为对象，其主要参数见表 1。

表 1 某前驱型电动汽车主要参数

Tab. 1 Main parameters of electric vehicle

整车质量/kg	1 159
重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )	9.8
质心距前轴距离/m	1.04
质心距后轴距离/m	1.56
质心高度/m	0.50

根据本文制定的制动力分配策略，纯电动汽车制动过程中各制动力与制动强度之间的关系如图 4 所示，将图 4 中各制动力与制动强度的关系制成二维查询表，嵌入 ADVISOR 2002 中，建立新的制动力分配控制模块，选择某前驱型纯电动汽车为对象进行仿真试验。

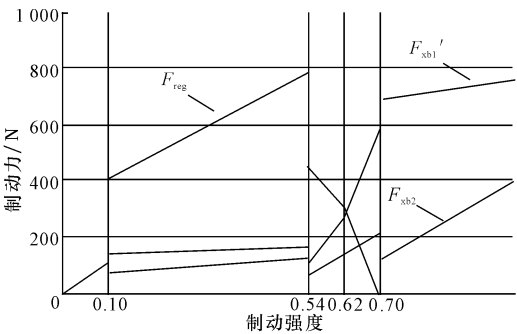


图 4 各制动力与制动强度关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of braking force and braking intensity

选用回收的能量、能量利用效率和 SOC 变化曲线作为制动力分配策略的评价指标，在 UDDS、US06-HWY 这 2 种典型循环工况下，对本文制定的制动力分配策略与 ADVISOR 中缺省的制动力分

配策略仿真结果进行对比分析。图 5 给出了 2 种不同循环工况下的速度跟踪曲线,可见本文制定的制动力分配策略能够满足工况的运行要求。图 6 给出了 2 种制动力分配策略在不同循环工况下的 SOC 变化曲线。

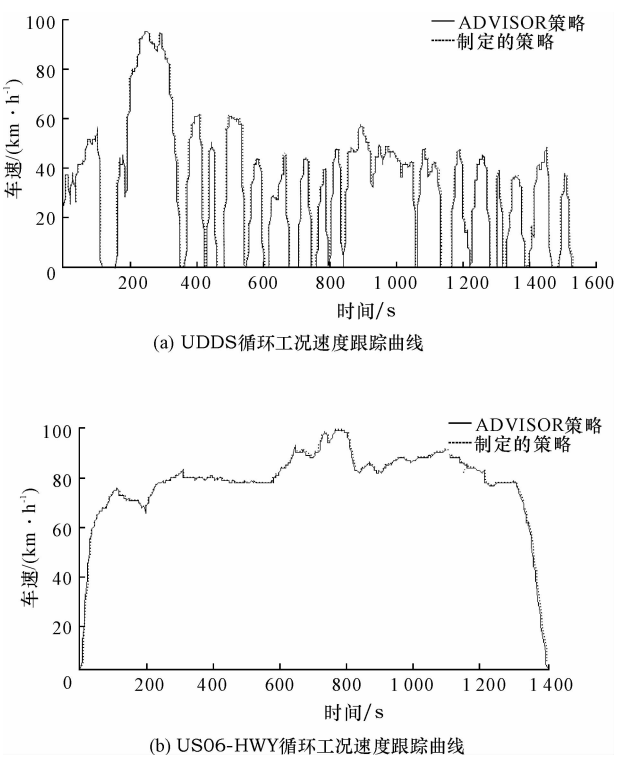


图 5 不同循环工况下速度跟踪曲线  
Fig. 5 Vehicle speed versus time curves of different driving cycles

由图 6 可见,2 种工况下优化策略都能使电池 SOC 下降减缓,UDSS 循环工况下电池剩余电量提高幅度更大。表 2、表 3 分别给出了不同工况下车辆回收的能量、能量利用效率的仿真结果。从表 2、表 3 中可以看出,2 种工况下优化策略在回收的能量和能量利用效率 2 个方面都有提高,UDSS 比 US06-HWY 工况提高更为明显。分析 2 种工况不同的特点可知,UDSS 为城市道路循环工况,车辆起停较为频繁,平均速度为 31.51 km/h,最大制动强度为 0.151,平均制动强度低于 0.1。由图 4 可知,制动强度小于 0.1 时制动力完全由再生制动提供,因此,本文制定的优化策略可以充分回收 UDSS 工况下的制动能量。而 US06-HWY 属于高速工况,制动过程不多,平均速度达到 97.91 km/h,最大制动强度为 0.316,制动强度普遍较大。由图 4 所示,制动强度大于 0.1 时制动力由再生制动系统与机械制动共同提供,因此,高速公路工况下回收制动能量的优势不明显。

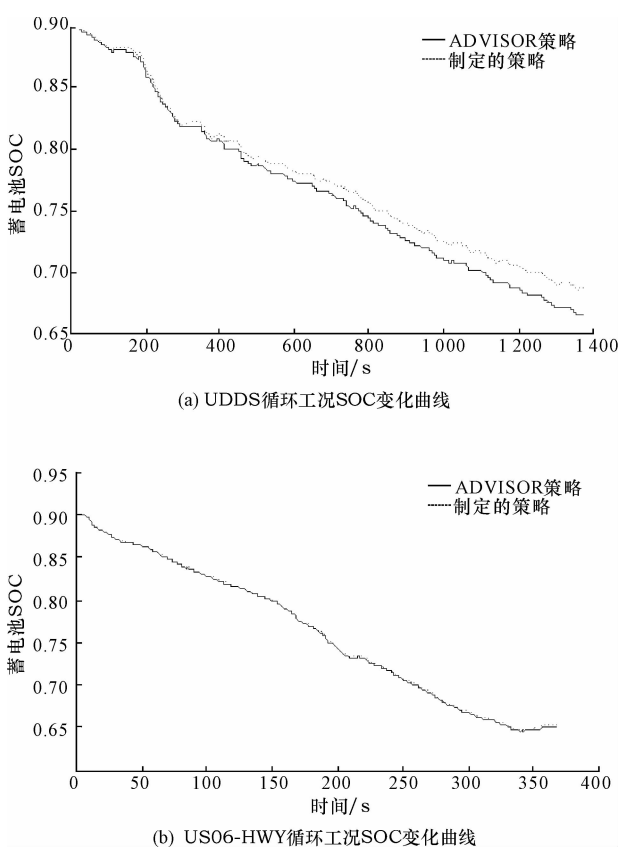


图 6 不同循环工况 SOC 变化曲线  
Fig. 6 SOC-time curves of different driving cycles

试验结果表明,本文制定的制动力分配策略相比于 ADVISOR 中缺省的制动力分配策略,能够回收更多的制动能量,提高电池剩余电量。在车辆平均行驶速度较小且制动频繁的城市工况下制动能量回收效果尤为明显,因而能充分发挥电动汽车的优点,从而增加电动汽车续航里程。更为重要的是,由于本制动力分配过程严格限定在安全制动力范围内,故保证了制动的稳定性。

表 2 不同工况下车辆回收的能量

Tab. 2 Energy recovery in different driving cycles			
工况	回收的能量/kJ		提高幅度 /%
	ADVISOR 策略	优化策略	
UDSS	440	1159	163.4
US06-HWY	272	387	42.2

表 3 不同工况下车辆的能量利用率

Tab. 3 Energy efficiency in different driving cycles			
工况	能量利用效率/%		提高幅度 /%
	ADVISOR 策略	优化策略	
UDSS	34.6	36.5	1.9
US06-HWY	63.2	64.0	0.8

## 5 结 语

(1)以“保证车辆制动稳定性的条件下,最大限度地回收再生制动能量”为原则,考虑电机及蓄电池对能量回收的制约,在确定的纯电动汽车安全制动范围内,开发了以最大限度回收制动能量为目标的机电复合制动力分配策略。

(2)将开发的制动控制策略嵌入 ADVISOR 2002 中进行仿真。仿真结果表明:对比 ADVISOR 中缺省的制动力分配策略,本文提出的制动力分配策略在回收能量和能量利用效率方面都有提高,而且在车辆平均行驶速度较小且制动频繁的城市工况下制动能量回收效果尤为明显,验证了制动力分配策略的有效性。

(3)制动力分配策略充分考虑了制动安全性要求及电功率对能量回收的制约,使车辆再生制动能力的发挥受到了一定限制,但很适合制动强度较小的工况。如何在制动强度较大的条件下更多地回收制动能量有待进一步研究。

### 参考文献:

### References:

- [1] Ehsani M, Emadi A, Gao Y. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design[M]. London: CRC, 2005.
- [2] 王 猛, 孙泽昌, 卓桂荣, 等. 电动汽车制动能量回收最大化影响因素分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 583-588.  
WANG Meng, SUN Ze-chang, ZHUO Gui-rong, et al. Analysis of influence factor of electric vehicle braking energy recovery maximization [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(4): 583-588. (in Chinese)
- [3] Hellgren J, Jonasson E. Maximization of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car[J]. International Journal Electric and Hybrid Vehicles, 2007 (1): 95-121.
- [4] 石庆生, 张承惠, 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 type of electric vehicle regenerative braking force distribution strategy[J]. Electrical Technology Journal, 2007, 22(2): 125-129. (in Chinese)

- [5] 李玉芳, 林 逸, 何洪文, 等. 电动汽车再生制动控制算法研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(11): 1060-1073.  
LI Yu-fang, LIN Yi, HE Hong-wen, et al. A study on control algorithm of regenerative braking for EV/HEV[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(11): 1060-1073. (in Chinese)
- [6] 查鸿山. 电动汽车能量回馈制动仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(4): 572-577.  
ZHA Hong-shan. Simulation research of electric vehicle regenerative braking [J]. Mechanical Science and Technology, 2012, 31(4): 572-577. (in Chinese)
- [7] 王 猛, 孙泽昌, 卓桂荣, 等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 6-10.  
WANG Meng, SUN Ze-chang, ZHUO Gui-rong, et al. Research of electric vehicle brake energy recovery [J]. Agricultural Machinery Journal, 2012, 43(2): 6-10. (in Chinese)
- [8] 刘志强, 过学迅. 纯电动汽车电液复合再生制动控制[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(2): 2687-2691.  
LIU Zhi-qiang, GUO Xue-xun. Electro-hydraulic composite regenerative braking control of pure EV [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(2): 2687-2691. (in Chinese)
- [9] 郭金刚, 王军平, 曹秉刚. 基于优化的电动车制动力分配[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1485-1499.  
GUO Jin-gang, WANG Jun-ping, CAO Bing-gang. Optimization based braking force distribution for electric vehicles [J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(9): 1485-1499. (in Chinese)
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.  
YU Zhi-sheng. Automobile theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 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 Guo-zhu. Several key problems in research of electric vehicle regenerative braking [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)