

电动车最大化能量回收制动力分配策略研究

郭金刚^{1,2}, 王军平¹, 曹秉刚¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 长安大学汽车学院, 710064, 西安)

摘要: 为了提高电动车的回收能量,通过对汽车制动动力学和相关法规的分析,建立了电机模型和电动车动力传动系模型,从能量回收最大化角度出发,提出了一种前、后轮制动力根据电机制动转矩进行分配的策略,并采用 MATLAB/Simulink 软件进行了仿真分析. 研究表明:采用该策略,电动车可满足制动稳定性和法规的要求;与理想制动力分配策略相比,能充分利用电机制动转矩. 仿真结果表明,对日本 1015 道路循环,电机的发电能量提高了 56.1%,对其他各种道路循环,电机的发电能量均有较大幅度提高.

关键词: 电动车; 能量回收; 制动力分配策略; 仿真

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0607-05

Brake-Force Distribution Strategy for Electric Vehicle Based on Maximum Energy Recovery

GUO Jingang^{1,2}, WANG Junping¹, CAO Binggang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To heighten electric vehicle(EV) recovery energy, a brake-force distribution strategy based on motor brake torque is proposed from the viewpoint of maximum energy recovery, together with the analysis of the vehicle brake dynamics and related regulations. Motor model and EV power-train model are established, and simulation is carried out with MATLAB/Simulink. The results show that with the adoption of the strategy, the EV meets braking stability and regulations requirement. Compared with the ideal front and rear braking force distribution, the proposed strategy enables to take advantage of motor brake torque, and simulation results show that it can enhance motor regenerative energy by 56.1% for the Japanese 1015 driving cycle. A remarkable motor regenerative energy improvement can be found for the other driving cycles.

Keywords: electric vehicle; energy recovery; brake-force distribution strategy; simulation

对于再生制动力与摩擦制动力之间的分配,通常有串联和并联两种分配方法^[1]. 所谓串联,即当再生制动力达到最大值时,由摩擦制动力来弥补再生制动力的不足以满足制动需求. 并联分配则是在各种制动需求下,再生制动力和摩擦制动力均按一定的比例进行分配. 由于串联分配方法能充分发挥再生制动力的作用,因此在现代电动车上得到了广泛的应用.

在前、后轮制动力的分配方面, Gao 等人^[2]提出了 3 种策略:理想制动力分配曲线、最优能量回收和并联分配策略. 赵国柱^[3]以 Gao 等人的并联分配策略为基础,提出了基于制动力法规的分配策略,即再生制动力和前、后轮的摩擦制动力制动份额与制动强度有关,此策略同样不能最大化地回收能量. 李蓬等人^[4]在考虑制动法规、制动稳定性的前提下,提出制动力按由横轴、ECE (Economic Commission of

Europe)法规线、前轮抱死线所组成的折线分配策略,能保证满足制动法规的要求,且最大程度地回收再生能量,但因该分配线远离理想曲线,因此在一定程度上降低了汽车的制动效能和制动稳定性.邹广才等人^[5]对此有所改进,提出电动车可以根据需要随时调整前、后轮制动力的分配比例,因此在制动效能和稳定性上有所提高,但由于其限值分配线与由横轴、ECE法规线、前轮抱死线所组成的折线有一定距离,因此有可能降低能量的回收比例.

本文综合考虑了制动稳定性和制动法规的要求,以前轮驱动的电动车为研究对象,提出了一种最大化能量回收的制动力分配策略,并采用 MATLAB 软件进行了仿真.

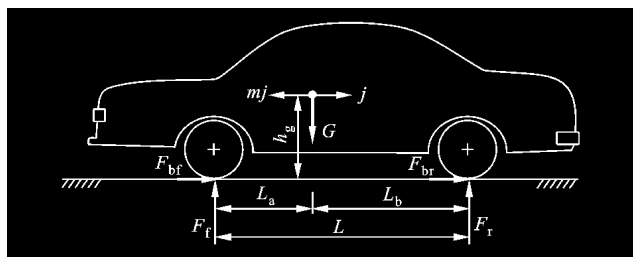
1 汽车的制动动力学

1.1 理想制动力分配曲线^[6]

图1为汽车制动时的两轮模型^[2].汽车在制动时,沿纵向平面一般受到滚动阻力、空气阻力、加速阻力、坡度阻力和地面制动力的共同作用,在水平路面上制动时,空气阻力和滚动阻力的影响较小,因此予以忽略.作用于前、后轮的地面法向作用力分别为

$$\left. \begin{aligned} F_f &= \frac{G}{L}(L_b + zh_g) \\ F_r &= \frac{G}{L}(L_a - zh_g) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: G 为汽车重力; L 为汽车轴距; L_a 、 L_b 分别为质心至前、后轴的距离; h_g 为质心高度; z 为制动强度, $z=j/g$,其中 j 为制动减速度, g 为重力加速度.



F_{bf} 、 F_{br} : 前、后轮的地面制动力; m : 汽车质量

图1 汽车制动受力图

理论和实践表明,当作用在前、后轮的制动力正比于各自的法向作用力时,地面的附着条件将得到充分利用,汽车的制动效能最高,稳定性最好,即前、后轮制动力满足

$$\left. \begin{aligned} \frac{F_{bf}}{F_{br}} &= \frac{L_b + zh_g}{L_a - zh_g} \\ F_{bf} + F_{br} &= Gz \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)所确定的前、后轮的制动力关系曲线称为理

想制动力分配曲线(I 线), I 线和汽车的结构参数有关,并随质心位置的变化而变化.

由式(1)可以看出,当汽车制动时,前轮载荷增加,后轮载荷减小,结合理想制动力分配曲线可知,汽车制动时,前轮制动力增加,后轮制动力减小,因此多数汽车选择前轮进行制动能量的回收.

1.2 前、后轮抱死曲线^[6]

汽车在制动的过程中,当某个车轮上制动器的制动力大于地面所能提供的制动力时,该车轮将抱死.抱死时,轮胎将在地面上拖滑,不但加剧轮胎的磨损,而且由于附着系数的降低,使得汽车的稳定性急剧下降,因此应避免车轮抱死.若前轮抱死,则

$$\left. \begin{aligned} F_{bf} &= \varphi \frac{G}{L}(L_b + zh_g) \\ F_{br} &= Gz - F_{bf} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: φ 为路面附着系数.随着 φ 值的变化,得到前轮抱死时的前、后轮制动力分配曲线组(f 线组).同理,可得到后轮抱死时的前、后轮制动力分配曲线组(r 线组).

1.3 ECE法规线限制^[6]

为了保证制动时汽车方向的稳定性和有足够的制动效能,联合国欧洲经济委员会制定的ECE R13制动法规,对双轴汽车前、后轮制动器的制动力提出了明确的要求,我国的国家标准GB 12676-1999也提出了类似的要求.其中对于轿车,法规规定 φ 为0.2~0.8之间的各种车辆,要求 $z \geq 0.1 + 0.85(\varphi - 0.2)$.车辆在各种装载状态时,前轴利用附着系数曲线应在后轴利用附着系数曲线的上方,按此要求,得到ECE法规曲线

$$\left. \begin{aligned} F_{bf} &= \frac{z + 0.07}{0.85} \frac{G}{L}(L_b + zh_g) \\ F_{br} &= Gz - F_{bf} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

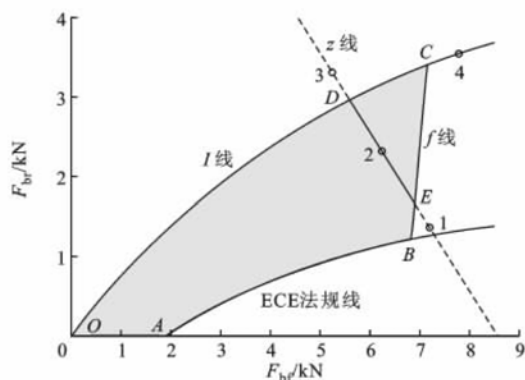
从保证汽车的制动稳定性及其制动效能的角度出发,前、后轮制动力分配点应处于由 I 线、横轴、ECE法规线和 f 线所围成的区域内,如图2中的阴影部分.

2 数学模型

2.1 电机模型

电机是影响再生制动的主要因素之一,再生制动时,电动机用作发电机,电机的制动转矩越大,回收的再生制动能量也越大.另外,电机的发电能力也直接制约再生能量的多少.

典型电机具有中、低转速恒转矩和中、高转速恒



O、A、B、C、D、E:制动力分配策略特征点;

1~4:典型再生制动力点

图2 前、后轮制动力分配图

功率的典型转矩转速特性^[3],即

$$T_r = \begin{cases} T_N & n < n_N \\ 9549P_N/n & n \geq n_N \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_r 为电机的再生制动转矩; T_N 为电机额定转矩; P_N 为电机额定功率; n_N 为电机额定转速; n 为电机转速,可根据车速得到.电机的发电功率为

$$P_m = T_e \omega \eta_m \quad (6)$$

式中: T_e 为电机的实际再生制动转矩; ω 为电机角速度; η_m 为电机的发电效率.电机的发电能量为

$$E = \int P_m dt \quad (7)$$

2.2 动力传动系模型^[7]

电动车的动力传动系统一般包含能量储存装置、电动机、离合器、变速器、传动轴、主减速器、半轴和车轮等,本文主要研究制动力分配策略,因此假设汽车具有一档传动比.在车轮处产生的再生制动力为

$$F_a = \frac{T_r i W}{R} \eta \quad (8)$$

式中: i 为传动系传动比; R 为车轮滚动半径; η 为传动系效率; W 为车速对再生制动转矩的影响因子^[8],即

$$W = \begin{cases} 0 & v < v_1 \\ (v_1 - v)/(v_2 - v_1) & v_1 \leq v \leq v_2 \\ 1 & v > v_2 \end{cases}$$

其中 v 为车速, v_1 、 v_2 为选择的特征车速.

3 制动力分配策略^[2,4-5]

根据对汽车制动动力学的分析,前、后轮制动力的分配点应处于由 I 线、横轴、ECE法规线和 f 线

所围成的区域内,如图2所示.图中 D 点与 E 点的连线 DE 为在特定减速度下前、后轮制动力的分配变动线,当分配点处于 O 、 A 、 B 、 C 点的连线上时,可使前轮提供的制动力最大,从而有可能提高再生制动力的比例,但此时分配点远离 I 线,汽车的制动稳定性和效能也最差.因此,从某种意义上来说,提高制动稳定性和效能与增加能量回收是相互矛盾的.由于电机所能提供的再生制动转矩受电机转矩转速特性、车速等诸多因素的影响,即使按照最大可能分配比例来分配前、后轮制动力,电机也不一定能单独提供前轮的制动力,此时既不会增加回收能量,反而会降低制动稳定性和制动效能.综上所述,前、后轮制动力的分配应根据电机所能产生的再生制动力的大小,在 D 、 E 点的连线上变动.

根据分析,制定的制动力分配策略如下.

(1)当 $F_a \geq F_1$ (图2中的点1)时,则

$$F_e = F_1; F_c = 0$$

式中: F_e 为电机的实际再生制动力; F_1 为由横轴、ECE法规线和 f 线所确定的前轮制动力的最大值; F_c 为前轮摩擦制动力.

(2)当由 I 线所确定的前轮制动力的最小值 $F_i \leq F_a < F_1$ (图2中的点2)时,则

$$F_e = F_r; F_c = 0$$

(3)当 $F_a < F_i$ (图2中的点3)时,则

$$F_e = F_a; F_c = F_i - F_a$$

(4)当需求的制动强度大于 C 点所对应的制动强度(图2中的点4)时,由于制动力要求大于路面的附着极限,因此汽车只能获得 C 点所对应的制动强度.从提高制动效能的角度出发,前、后轮制动力分配按 C 点进行.前轮上再生制动力与摩擦制动力的分配比例根据再生制动力的大小,由再生制动力单独提供或由再生制动力与摩擦制动力共同提供.

对于以上各种情况,后轮上的摩擦制动力在保证制动强度要求的情况下,由各分配点相应确定.

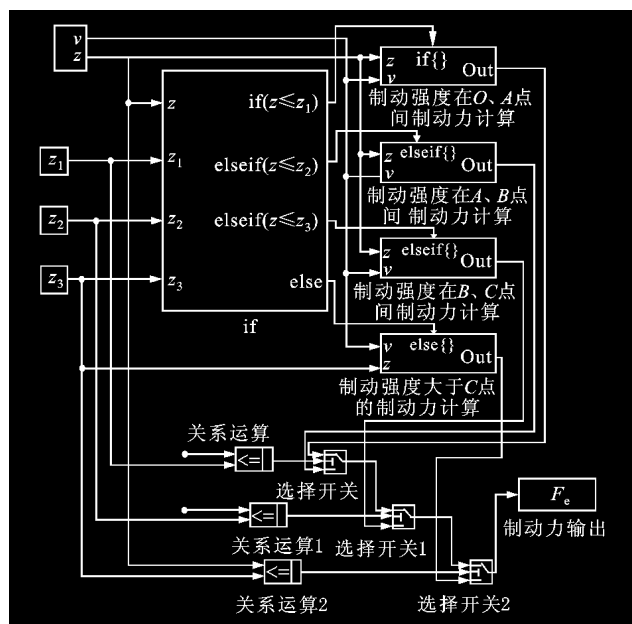
4 仿真分析

为了对电动车的制动能量回收控制策略进行验证,利用由MATLAB/Simulink软件构造的仿真模型(见图3)进行分析,并在表1中列出了仿真用到的汽车的基本参数.

4.1 制动强度线性增加

给定汽车的初速为120 km/h,设汽车的制动强度由0~1线性增加,仿真结果如图4、图5所示.

由图4、图5可见,在 $C_1 \sim C_3$ ($z=0 \sim 0.165$)点

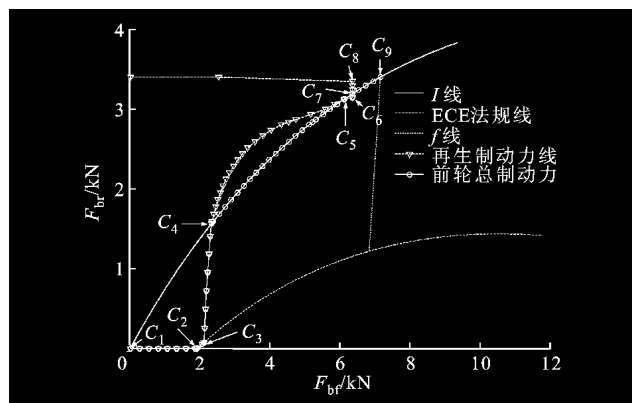


$z_1 \sim z_3$: 图2中A~C点的制动强度

图3 Simulink软件构造的仿真模型

表1 汽车仿真基本参数

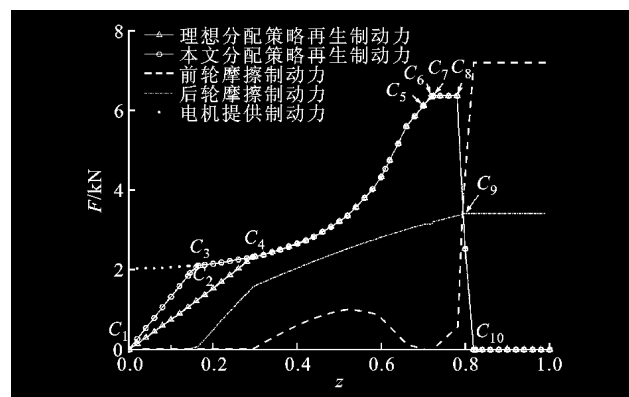
m/kg	1 345	i	7.34
L/m	2.51	R/m	0.28
h_g/m	0.40	η	0.90
L_a/m	1.13	P_N/kW	75.00
L_b/m	1.38	$T_N/\text{N} \cdot \text{m}$	271.00



$C_1 \sim C_9$: 制动力分配策略特征点

图4 汽车前、后轮制动力分配仿真

间,再生制动力沿横轴、ECE法规线变化,并且电机提供的制动力大于实际再生制动力,因此该阶段再生制动力主要受横轴、ECE法规线的限制.在 $C_1 \sim C_4$ ($z=0 \sim 0.294$)点间,前轮的制动力完全由再生制动力提供,表现为再生制动力线与前轮总制动力线重合,前轮摩擦制动力为0.在 C_4, C_5 ($z=0.294 \sim 0.7$)点间,由于再生制动力小于前轮由I线所限制的最小制动力,因此由前轮摩擦制动力来补充差值.



$C_1 \sim C_{10}$: 制动力分配策略特征点

图5 制动力大小仿真

在 $C_6 \sim C_8$ ($z=0.724 \sim 0.78$)点间,由于电机的再生制动转矩已达到最大值,因此再生制动力不变.此后,受到W的影响,再生制动力线性下降,直至 C_{10} 点变为0.在 $C_3 \sim C_{10}$ 点的整个变化过程中,再生制动力主要受电机制动力的影响,随电机制动力的变化而变化,当制动强度增加到 C_9 ($z=0.8$)点即规定的路面附着系数时,制动强度不再增加,前、后轮制动力的总值保持恒定.

另外,由图5还可看出,在 $C_1 \sim C_4$ 点间,按本文策略所得到的再生制动力明显大于按理想分配的再生制动力.在 $C_5 \sim C_7$ 点间也略有增加.从以上分析可知,采用Simulink软件所建立的仿真模型完全符合本文提出的再生制动力分配策略的要求,并且按策略分配的再生制动力要大于按理想分配的再生制动力.

4.2 按道路循环的仿真

对本文提出的前、后轮制动力分配策略和理想制动力分配策略,按照日本1015、美国城市UDDC、美国公路HWFET、欧洲公路EUDC和欧洲市区ECE法规线道路循环进行了仿真对比,其结果如图6和表2所示.

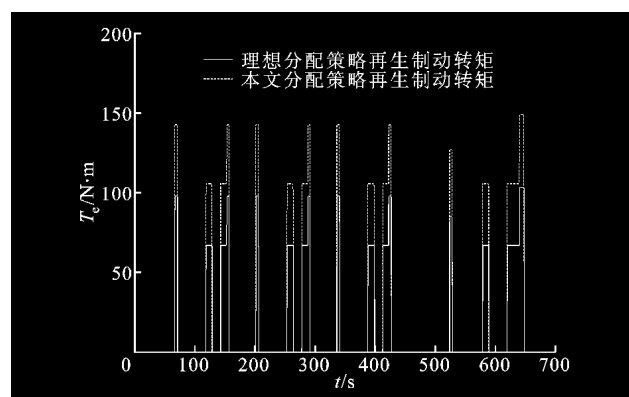


图6 2种分配策略在日本1015道路循环的仿真对比

表2 电机发电能量的对比

实际道路循环	道路循环				
	1015	UDDS	HWFET	EUDC	ECE
发电能量 ^Δ /kJ	1 838	5 179	3 020	1 810	389
发电能量 [*] /kJ	2 870	7 943	4 954	2262	588
发电能量增长/%	56.1	53.4	64.0	25.0	51.2

Δ:理想分配策略;*:本文分配策略.

由图6可见,按本文策略时的电机实际再生制动转矩明显大于按理想分配时的电机实际再生制动转矩,在其他道路循环时也有类似的结果.由表2可看出,在各种道路循环下,按本文分配策略所获得的电机发电能量均有很大程度的提高.在美国公路HWFET道路循环中的增长幅度最大,达到64%,在欧洲公路EUDC道路循环中的增长幅度也达到了25%.这种增长除与各种道路循环的具体特点有关外,还与汽车的结构参数、电机参数、车速影响因子等因素有关.

5 结 论

(1)本文在考虑汽车制动稳定性、制动效能、ECE法规线和电机特性等因素的前提下,提出了一种前、后轮制动力的分配策略,从而可最大限度地回收再生制动能量.

(2)仿真分析表明,采用本文制动力分配策略的电动车,能够满足制动法规对制动稳定性和制动效能的要求.与理想制动力分配策略相比,本文策略能充分利用电机再生制动转矩,在各种道路循环下,均能大幅度地增加电机的发电能量.

参考文献:

[1] MICHAEL D, THEODORE B, HENNING L. Investigating possible fuel economy bias due to regenerative

braking in testing HEVs on 2WD and 4WD chassis dynamometers[J]. SAE Transactions, 2005, 114(4):324-334.

[2] GAO Yimin, CHEN Liping, EHSANI M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV[J]. SAE Transactions, 1999, 108(6):3184-3190.

[3] 赵国柱. 电动汽车再生制动稳定性研究[D]. 南京:南京航空航天大学能源与动力学院, 2006.

[4] 李蓬, 金达锋, 罗禹贡, 等. 轻度混合动力汽车制动能量回收控制策略研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(5):570-574.

LI Peng, JIN Dafeng, LUO Yugong. Regenerative braking control strategy for a mild HEV[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(5):570-574.

[5] 邹广才, 罗禹贡, 边明远, 等. 并联式 HEV 制动能量回收控制策略的仿真研究[J]. 汽车技术, 2005, 36(7):14-18.

ZOU Guangcai, LUO Yugong, BIAN Mingyuan, et al. Simulation and study on control strategy for brake energy recovery of parallel type HEV[J]. Automobile Technology, 2005, 36(7):14-18.

[6] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2003: 87-96.

[7] YEO H, HWANG S, KIM H. Regenerative braking algorithm for a hybrid electric vehicle with CVT ratio control[J]. Proc IMechE, Part D: Automobile Engineering, 2006, 220(11):1589-1599.

[8] 王保华, 张建武, 罗永革. 并联混合动力客车再生制动仿真研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(6):648-651.

WANG Baohua, ZHANG Jianwu, LUO Yongge. A study on regenerative braking for parallel hybrid electric bus[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6): 648-651.

(编辑 管咏梅)