

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.01.013

纯电动汽车串联式再生制动控制策略建模与仿真

刘威¹, 祁宏钟², 刘新田¹, 王岩松¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620;
2. 广州汽车集团有限公司汽车工程研究院, 广东 广州 511434)

摘要:为提高纯电动汽车能量回收率,提出一种串联式再生制动控制策略。该策略要求在保证制动稳定性的基础上尽可能多地利用电机制动,根据制动强度划分4个制动区间,并分别采取不同的制动力分配策略,同时综合考虑车速、ECE法规、电池和电机特性等影响因素。采用Simulink与Cruise建模并联合仿真,结果表明搭建的模型准确可靠,提出的串联式再生制动控制策略能够有效提高能量回收率,延长纯电动汽车的续航里程。

关键词:纯电动汽车;串联再生制动;控制策略;Simulink;Cruise

中图分类号:U469.72 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)01-0070-05

Modeling and Simulation of Serial Regenerative Braking Control Strategy for Pure Electric Vehicle

LIU Wei¹, QI Hongzhong², LIU Xintian¹, WANG Yansong¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., LTD., Guangzhou 511434, China)

Abstract: In order to increase the energy recovery rate, a serial regenerative braking control strategy was proposed. The strategy required that braking should be utilized as much as possible on the basis of ensuring the braking stability. Four braking zones were divided according to braking strength and different braking force allocation strategies were adopted respectively. Meanwhile other influencing factors such as the vehicle velocity, ECE regulations, and characteristic of battery and motor were comprehensively considered. Simulink and Cruise were used for modeling and joint simulation. The results show that the model is accurate and reliable, the proposed serial regenerative braking control strategy can effectively improve the energy recovery rate and extend the driving range of pure electric vehicles.

Keywords: pure electric vehicle; serial regenerative braking; control strategy; Simulink; Cruise

再生制动系统是利用能量转换装置,将动能转换为电能并存储到储能装置中,供汽车行驶驱动时使用,从而实现能量的循环利用,以达到延长续航里程的目的,同时提供一定的力矩用于制动^[1]。再生制动系统主要有并联和串联2种^[2]。并联式再生制动是在原机械制动基础上,叠加一部分电机制动力,具有成本低、改动小的特点,目前应用较为广泛;串联式再生制动则是耦合机械制动与电机制动,优先使用电机制动,当需求制动力较大,单一再生制动不能够满足制动需

求时,机械制动系统才起作用,保持制动状态的同时完成再生制动。

车辆在城市中行驶时,制动所消耗的能量占很大比例,虽然制动能量不能被完全回收,但最终回收的能量非常可观。如何合理地分配制动力矩,在保证车辆制动安全性和平顺性的基础上尽可能多地回收制动能量,一直是再生制动系统最为关键的问题^[3]。Yang等^[4]采用电池充电电流最小化原则分配再生制动力矩,抑制电流冲击,确保制动安全。Zhao等^[5]特别关

收稿日期:2018-07-23;修回日期:2018-10-30

基金项目:国家自然科学基金(51675324)。

第一作者简介:刘威(1990),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要研究方向为新能源汽车能量管理、再生制动等。E-mail: liuweisues@163.com

注于轮胎纵向和横向滑移,最大限度地降低再生制动能量损失。姜标等^[6]根据电机转矩特性分配电动汽车前轮制动力,并基于制动力变比值优化分配算法。李玉芳等^[7]提出多边界条件设计优化方法,根据各种附着系数路面的使用频率以及制动强度来确定前后轮制动力分配系数。高爱云等^[8]提出了基于最佳制动效果和模糊控制的再生制动控制策略,能够使驾驶员获得满意的驾驶感觉。日本丰田、德国 Bosch 等公司也对该领域进行了相关研究。

课题组针对某前驱纯电动汽车,提出一种串联式再生制动控制策略,综合考虑多种影响因素对制动力矩进行合理分配,在满足制动稳定性的基础上尽可能多地利用电机再生制动,从而提高能量回收率,建模仿真分析验证了控制策略的正确性。

1 制动力分配

1.1 理想的前后轮制动力分配

制动时前后轮同时抱死,能够更好地利用路面附着条件,提高制动时汽车的方向稳定性。理想的前后轮制动力分配曲线(简称 I 曲线)满足:

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

式中: $F_{\mu 1}$, $F_{\mu 2}$ 分别为前、后轮制动力, N; b 为汽车质心至后轴的距离, m; L 为轴距, m; h_g 为汽车质心高度, m; G 为汽车重力, N。

1.2 ECE 法规

欧洲经济委员会(Europe economical committee, ECE)制动法规对 M1 类车辆前后轮制动力提出了明确要求^[9]:在路面附着系数为 0.2~0.8 的路面上制动时,要求制动强度

$$z \geq 0.85\varphi - 0.07,$$

且前轮利用附着系数曲线应位于后轮利用附着系数曲线之上。前后轮同时抱死为车辆制动最理想的状态,此时前后轮利用附着系数曲线重合^[10]。制动强度 z 处于(0.3, 0.5)区间时,若后轮利用附着系数曲线不超过直线

$$\varphi = z + 0.05,$$

则允许后轮的利用附着系数曲线在前轮利用附着系数曲线之上。可得 ECE 法规限制曲线(简称 M 曲线):

$$\left. \begin{aligned} F_{\mu 1} &= \frac{G(z + 0.07)(b + zh_g)}{0.85L}; \\ F_{\mu 2} &= zG - F_{\mu 1}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.3 路面附着系数

路面附着系数决定了地面所能提供的最大制动力,

在路面附着系数为 φ 的路面上进行制动,后轮没有抱死而前轮抱死时的前后轮制动力关系如下(简称 f 线):

$$F_{\mu 2} = \frac{L - \varphi h_g}{\varphi h_g} F_{\mu 1} - \frac{Gb}{h_g} \quad (3)$$

1.4 制动力分配控制线

日常生活中,汽车大部分时间行驶在市区和郊区之间,拥堵的交通路况导致车速不高且频繁制动,其中绝大多数制动工况属于中低强度制动($z \leq 0.2$),其中 75% 以上 $z \leq 0.1$ 的情况^[11]。为最大化回收能量,在中低强度制动时应尽可能利用电机制动。在前轮不抱死及满足制动稳定性的情况下,尽量采用前轮制动,并尽可能利用电机制动力。制动力分配控制线 OABCD 如图 1 所示。

1) 轻度制动($z \leq 0.1$, OA) 完全依靠电机制动。表现为较小回馈电流的长时间充电,主要限制因素为蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)。

2) 中度制动($0.1 < z \leq 0.5$, AB) 为机电混合制动。AB 为 M 曲线的切线,目的是在满足 ECE 制动法规的基础上,尽可能增大前轮制动力矩分配占比,以提高制动能量回收率。

3) 重度制动($0.5 < z \leq 0.7$, BC), 此时制动强度较大,为确保制动稳定性,应进一步提高后轮制动力矩所占比例,此制动区间为制动能量回收优先到制动稳定性优先的过渡区间。

4) 紧急制动($z > 0.7$, CD) 通常是汽车发生危险状况时的急剧、大强度制动工况,基于安全性考虑,此时应关闭再生制动系统,完全依靠机械制动。

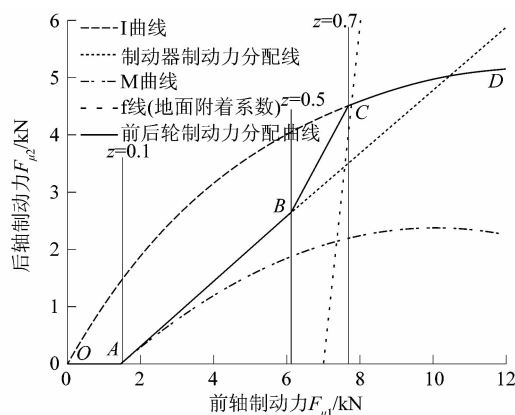


图1 制动力分配示意图

Figure 1 Diagram of braking force allocation

2 控制策略

制动过程中,若前轮不抱死则尽可能地利用电机

再生制动,只有在满足制动稳定性需求及法规要求下才使用机械制动,实现最大化的能量回收^[12-13]。文中再生制动控制策略如图2所示,中心思想包括:

1) 车速 V 大于允许能量回收的最低车速 $V_{\min}$ 时才进行能量回收,车速比较低时 ($V \leq 5$ km/h) 会因电机反电动势过低而导致再生制动功能失效;

2) 当电池荷电状态较低时,允许电池充电;当电池荷电状态较高 ($S_{\text{SOC}} \geq 0.95$) 时,则禁止电池充电,以免过充损伤电池寿命,即不再进行制动能量回收;

3) 如果电机能够满足再生制动力矩需求,则全部采用电机制动;当电机制动力矩不能满足制动需求时,由机械制动系统予以补充;

4) 必须考虑蓄电池不同荷电状态对充电功率的限制。

图2中:电机再生制动力矩 T_m ;前轴机械制动力矩 T_{fb} ;后轴机械制动力矩 T_{rb} 。

3 建模

整车基本参数和动力系统参数如表1所示。

表1 仿真车辆主要参数
Table 1 Main parameters of simulation vehicle

整车							
长×宽×高/(mm×mm×mm)	轴距/mm	整备质量/kg	滚阻系数	迎风面积/m ²	传动比	风阻系数	轮胎规格
4 337×1 825×1 637	2 560	1 667	0.008	2.54	9.07	0.32	215/55 R18
电池		低压负载		电机			
SOC 工作范围	标称电压/V	电量/(kW·h)	平均功率/W	额定/最高转速/(r·min ⁻¹)	额定/峰值功率/kW	额定/峰值扭矩/(N·m)	
7%~97%	317	46	200	4 340/12 000	50/120	110/280	

将串联式再生制动 Simulink 模型编译成动态链接库文件(DLL),嵌入 Cruise 整车模型中。控制策略顶层模型如图3所示,输入车速、电池荷电状态、加速踏板开度、制动踏板开度和电机转速,输出电机再生制动力矩和前、后轮机械制动力矩。

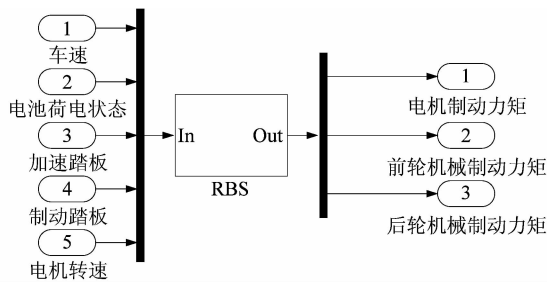


图3 控制策略顶层模型

Figure 3 Top model of control strategy

如图4所示,根据制动使能条件判断是否进行能量回收,同时计算出总的的需求制动力矩和前轮制动力矩比例系数,从而可得前、后轮制动力矩。根据前轮需

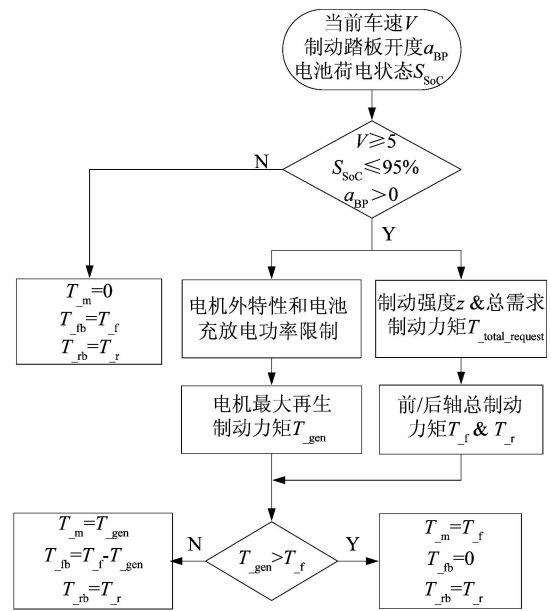


图2 串联式再生制动控制策略流程

Figure 2 Flow chart of serial regenerative braking control strategy

求制动力矩、电机和电池限制,可得电机制动力矩和前轮机械制动力矩。

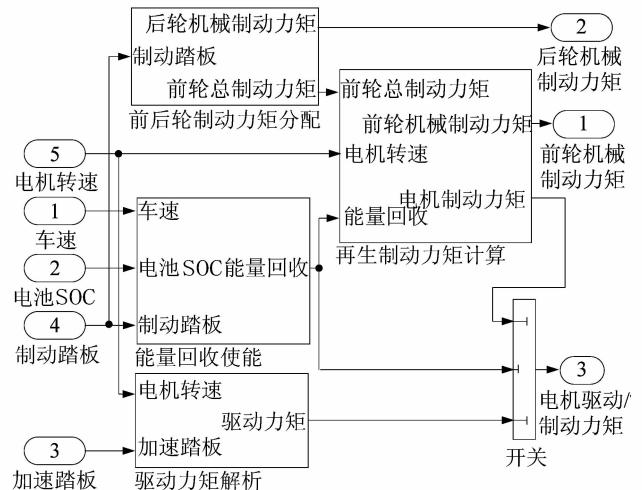


图4 串联式再生制动模型

Figure 4 Model of serial regenerative braking

4 仿真分析

基于新欧洲驾驶循环(new Europe driving cycle, NEDC)采用 Simulink 和 Cruise 进行联合仿真,仿真结果如图 5 和图 6 所示。当前车速能够很好的跟随目标车速,机械制动力矩和再生制动力矩的分配也能满足整车制动力矩需求,表明该仿真模型是准确可靠的。

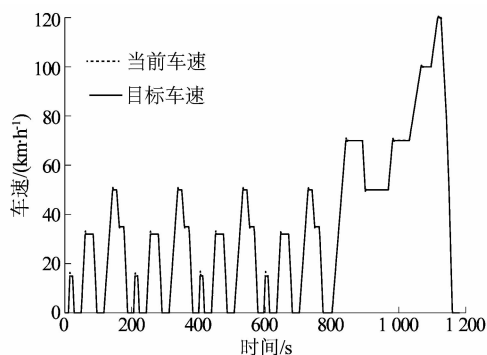


图 5 NEDC 工况仿真结果

Figure 5 Simulation results under NEDC

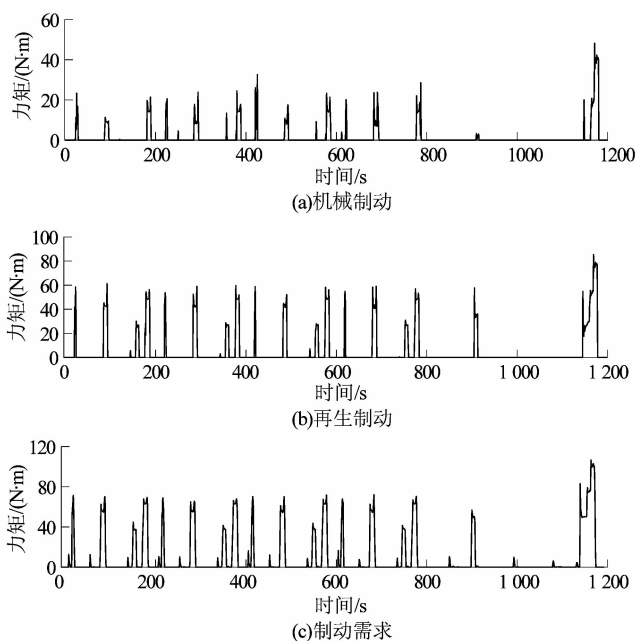


图 6 制动力矩分配

Figure 6 Braking torque allocation

从图 7 可以看出串联式再生制动控制策略的电池荷电状态曲线下缓慢,净能量消耗较少,再生制动能量回收更多。

对电流进行积分可以得到总输入能量和总输出能量,前者除以后者为再生制动能量回收效率。从表 2 可以看出采用串联式再生制动控制策略,能量回收效率达到 25.21%,相比于并联再生制动控制策略,能量回收率提高了 11.55%。

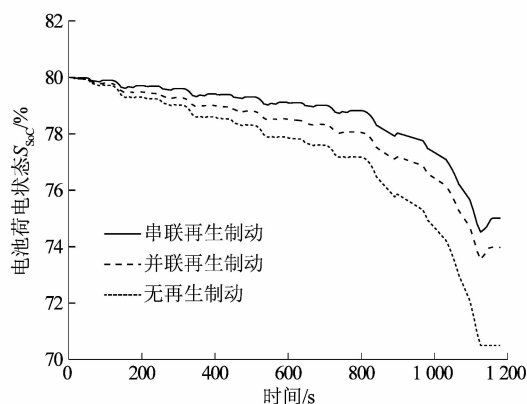


图 7 不同控制策略的荷电状态曲线

Figure 7 SOC curve under various control strategies

表 2 不同控制策略的能量回收率

Table 2 Energy recovery rate under various control strategies

控制策略	总输入/kJ	总输出/kJ	能量回收率/%
并联制动	1 280.70	5 934.44	22.60
串联制动	1 495.80	5 934.44	25.21

5 结论

1) 提出了一种串联式再生制动控制策略,基于 I 曲线和 ECE 法规对前后轮制动力矩进行合理分配,并综合考虑车速、电池和电机特性对再生制动力矩的限制。

2) 基于 Cruise 和 Simulink 搭建仿真模型并进行联合仿真分析,结果表明搭建的模型准确可靠,提出的串联式再生制动控制策略在保证制动稳定性的基础上,有效提高能量回收率,延长纯电动汽车续航里程。

3) 提出的串联式再生制动控制策略具有较高的可行性,为实车应用提供了基础,对纯电动汽车的推广普及具有理论与现实意义。

参考文献:

- [1] 葛恒勇. 纯电动汽车再生制动控制策略研究[D]. 成都: 西华大学, 2016:10.
- [2] 黎同辉. 新能源汽车再生制动技术浅析[J]. 汽车实用技术, 2016(12):21-26.
- [3] 陶丽华, 李寿涛, 张路玉, 等. 一种基于制动强度的制动力分配策略[J]. 科学技术与工程, 2017(35):134-139.
- [4] YANG Yang, LUO Chang, LI Pengxi. Regenerative braking control strategy of electric-hydraulic hybrid (EHH) vehicle[J]. Energies, 2017, 10(7):1038.
- [5] ZHAO Yang, DENG Weiwen, WU Jian, et al. Torque control allocation based on constrained optimization with regenerative braking for electric vehicles [J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(4):685-698.

(下转第 77 页)