

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.027

纯电动乘用车再生制动系统控制策略研究

陈 军¹, 刘敢闯²

(1. 万向集团公司研究院, 浙江 杭州 311215; 2. 万向集团公司洁能智动车分公司, 浙江 杭州 311215)

摘要:针对电动汽车再生制动系统安全存在风险与经济性较差的现实问题,对电动汽车制动系统法规的要求、车辆动力学等进行研究,提出了一种基于制动法规要求的纯电动乘用车再生制动系统控制策略,根据制动强度的不同,对前后轴制动力进行分配,并且尽可能多地将制动力分配到驱动轮上,使用再生制动系统进行制动,这样就可以在保证制动安全性的同时,最大程度的回收再生电动汽车的制动能量,利用 ADVISOR2002 仿真平台,对电动汽车进行动力学仿真,并且利用实验室的轮毂台架进行实车测试。试验结果表明:该再生制动系统控制策略在 ECE 工况下续驶里程贡献率超过 32%,在保证制动安全性的同时,提高了车辆的经济性。

关键词:纯电动乘用车;再生制动;控制策略

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1363-06

A research of control strategy for regenerative braking system of pure electric passenger vehicle

CHEN Jun¹, LIU Gan-chuang²

(1. Wanxiang Group Institute, Hangzhou 311215, China;

2. Wanxiang Group Clean Intelligent Vehicle Company, Hangzhou 311215, China)

Abstract: In order to solve the problems of safety risk and poor economy of the electric vehicle, the braking regulation and vehicle dynamics were investigated. After the analysis of the braking regulation and vehicle dynamics, a control strategy for regenerative braking system of pure electric passenger vehicle was established, according to the different braking strength value, braking force distribution control strategy was carried out to allocate more braking force to the drive shaft to use the regenerative braking system as much as possible, so the method was presented to secure the safety of the braking system and regenerate the maximum energy in the braking process of electric vehicle, ADVISOR2002 simulation platform was used for vehicle dynamics, and a real car test was carried out on the chassis dynamometer in the laboratory. The experiment result showed that contribution rate for electric range is more than 32% in the ECE test cycle, the brake safety is secured, and the economy of the pure electric passenger vehicle is improved.

Key words: pure electric passenger car; regenerative braking; control strategy

0 引 言

2016年,全球范围内电动汽车的销量达到创纪录的75万辆,其中,中国占到全球电动汽车销量的40%以上^[1]。再生制动系统可以将电动汽车制动过程中耗费的动能转化为电能存储在动力电池中并再次利

用,是当前电动汽车研究的一个热点。

Tesla 的 ModelS 等车型利用加速踏板的行程来制定再生制动控制策略,成本低,实现简单,但在低附路面会有失效的风险^[2]。BOSCH 开发的 ESPhev 再生制动系统,无需额外部件即可协调车轮与电机制动^[3]。汇川在专利 CN201010231201.4 中利用加速踏板松开的速度来给定负转矩,确定再生制动的大小。韩国的

成均馆大学提出一种基自由行程,通过对低附路面的判断是否进行再生制动的策略^[4]。出于成本考虑,我国现行车辆主要采用并联再生制动系统,这种系统实现起来简单,但回收效率偏低,同时再生制动系统故障时,制动性能会发生改变,有一定的安全隐患,因此研究基于安全性、高回收效率的再生制动具有重要的工程意义。

本研究针对电动汽车再生制动系统安全存在风险,提出了一种纯电动乘用车再生制动系统控制策略。

1 典型再生制动控制策略简介

1.1 理想再生制动控制策略

理想再生制动控制策略是指车辆在制动过程中以理想制动力分配策略进行制动,此时前后轮同时抱死,前后轴的制动力的和与总的地面附着力相等,且前后轴上所受的制动力也与其地面附着力相等,此时,地面附着力受到充分的应用,其制动效能、安全性及制动稳定性均达到很好的状态^[5]。

1.2 制动能量回收优化控制策略

制动能量回收优化控制策略的目标是在满足车辆安全的情况下,获取最大再生制动能量。一般而言,对单轴汽车来说,在制动强度偏小,车辆容易控制的情况下,尽可能多地给驱动轮以大的制动力,使用电机的再生制动力进行制动,而当制动强度较大时,则在保证安全的同时,也是尽可能多地给驱动轮施加制动力,在制动强度等于甚至大于地面附着系数时,则按理想制动力曲线进行制动力分配,这种复合式的控制策略比较复杂,控制精度要求高^[6]。

1.3 并联再生制动控制策略

相比于前两种,并联式再生制动系统控制策略更容易实现一些,其主要的特点是原来的机械制动系统不改变的同时,再增加一套再生制动系统,两套系统独立运行,在采用该方案时进行制动的过程中,驱动轴受到的制动力为原机械制动力及新增的再生制动力,而非驱动轴上,只采用传统的机械制动产生的摩擦力^[7],由于其实现起来较简单,目前在电动汽车上运用广泛。

2 基于制动法规的再生制动控制策略

制动系统设计首先要保证制动的安全性,我国的国标 GB21670-2008 是专门针对乘用车制动系统的强制性法规,它对车辆前后制动力分配及附着系数与制

动强度等关系都有具体的要求。其中在第 5.5.2 条中,要求车辆所有载荷状态时,当制动强度 z 处于 0.15 ~ 0.80 之间时,后轴附着系数利用曲线不应位于前轴上方。当附着系数 k 在 0.2 ~ 0.8 之间时,制动强度 $z \geq 0.1 + 0.7(k - 0.2)$,作为生产一致性检查时的替代要求,当制动强度在 0.15 ~ 0.8 之间时,后轴曲线应位于直线 $z = 0.9k$ 以下^[8]。

利用相应的数学公式描述该法规对制动系统的要求,具体如下:

(1) 当制动强度 $z = 0.15 \sim 0.80$ 之间时,后轴附着系数利用曲线不应位于前轴上方:

$$k_r \leq k_f \quad (1)$$

$$k_r = \frac{(1 - \beta)zL}{a - zh_g} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{\beta zL}{b + zh_g} \quad (3)$$

式中: a —车辆重心到前轴的距离; b —车辆重心到后轴的距离; L —轴距; β —前后轴制动力分配系数; h_g —车辆重心到地面的距离。

(2) 当附着系数 $k = 0.2 \sim 0.8$ 之间时,制动强度 $z \geq 0.1 + 0.7(k - 0.2)$:

$$k_f \leq \frac{z + 0.04}{0.7} \quad (4)$$

$$k_r \leq \frac{z + 0.04}{0.7} \quad (5)$$

(3) 当制动强度 $z = 0.15 \sim 0.80$ 之间时,后轴曲线应位于直线 $z = 0.9k$ 以下:

$$k_r \leq \frac{z}{0.9} \quad (6)$$

由式(1 ~ 5)可得如下方程式:

$$\beta > \frac{b + zh_g}{L} (0.15 \leq z \leq 0.80) \quad (7)$$

$$\frac{0.7zL - za + z^2h_g - 0.04a + 0.04zh_g}{0.7zL} \leq \beta \leq \frac{(z + 0.04)(b + zh_g)}{0.7zL} (0.1 \leq z \leq 0.52) \quad (8)$$

$$\beta > \frac{0.9L - a + zh_g}{0.9L} (0.15 \leq z \leq 0.80) \quad (9)$$

由上述分析及车辆的规格参数可知,在空载情况下,满足 GB21670-2008《乘用车制动系统技术要求及试验方法》的曲线如图 1 所示。

式(7)对应曲线 p ,式(8)对应曲线 n 和 m ,式(9)对应曲线 q ,其中曲线 n 为上控制线,曲线 m 、 p 、 q 为下控制线,实际上, p 为前后轮抱死制动控制线,由上述分析及图 1 可知,只有当制动力分配系数 β 在 n 和 p 之

间时,此时车辆才能满足国标的要求。

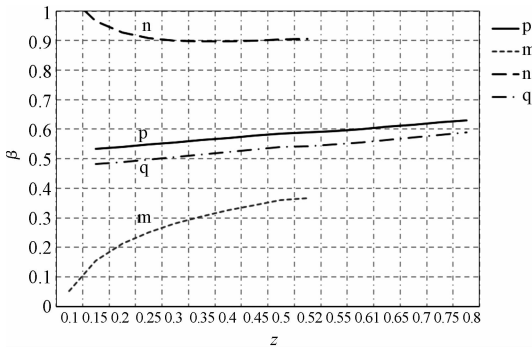


图 1 满足法规要求的制动力分配系数曲线

将 n 曲线与 p 曲线分别作为制动力分配的上下限,并将其转化为前后制动力的关系,可得:

$$\begin{cases} \frac{F_{xb1}}{F_{xb2}} = \frac{a + zh_g}{b - zh_g} \\ F_{xb1} + F_{xb2} = Gz \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{F_{xb1}}{F_{xb2}} = \frac{(z + 0.04)(b + zh_g)}{0.7zL - (z + 0.04)(b + zh_g)} \\ F_{xb1} + F_{xb2} = Gz \end{cases} \quad (11)$$

按上述方程作图,可得制动力分配曲线图,如图 2 所示。

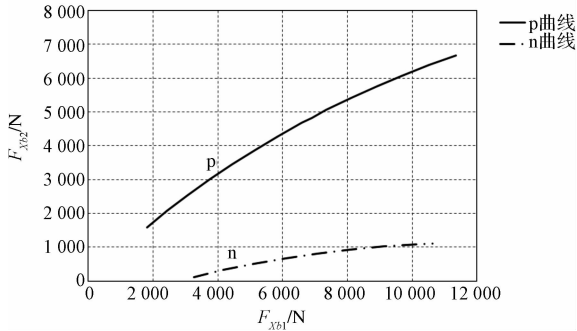


图 2 制动力分配曲线图

其中, n 曲线作为制动力分配下限,而 m 曲线作为制动力分配上限,同时可知, m 曲线与理想的制动力分配曲线重合。

通过前面对制动法规要求的分析可以获得前后制动力分配的范围,在再生制动系统运行的过程中,将再生制动与传统制动进行策略的结合,可以设计本文的再生制动控制策略,如图 3 所示。

(1) OA 阶段 ($z \leq 0.1$)

在制动强度较小的情况下,车辆处于可控的范围,此时法规也未对前后制动力分配做强制性要求,因此在再生制动系统控制策略设计时,可以尽可能多地使用再生制动力,如果此时再生制动系统能提供的制动力满足车辆的要求,则全部采用再生制动力,如果不能

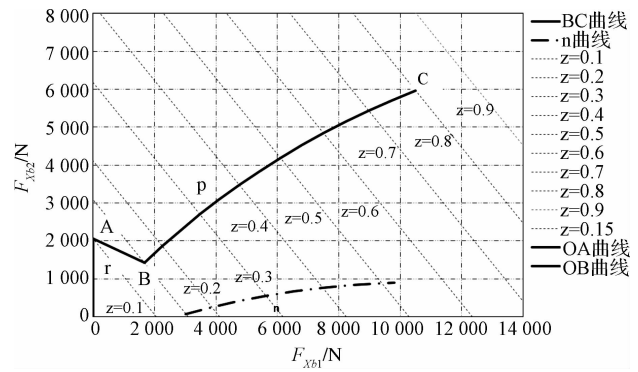


图 3 前后制动力分配图

满足,则同时使用液压制动,两者共同作用。

$$\begin{cases} F_{xb1} = 0 \\ F_{xb2} = Gz \end{cases} \quad (z \leq 0.1) \quad (12)$$

(2) AB 阶段 ($0.1 < z \leq 0.15$)

该阶段对于后轴制动力来说,主要仍由再生制动提供,不足的情况下由液压制动提供,前轴制动力主要由液压部分提供。

$$\begin{cases} F_{xb1} + F_{xb2} = Gz \\ F_{xb2} = -0.383F_{xb1} + 2058 \end{cases} \quad (0.1 < z \leq 0.15) \quad (13)$$

(3) BC 阶段 ($0.15 < z \leq 0.7$)

按制动法规要求,制动力分配曲线应在曲线 p 和曲线 n 之间,由于再生制动系统主要作用在后轴上,为了最大限度的使用再生制动,制动力按 p 曲线进行分配。

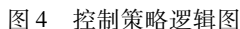
$$\begin{cases} \frac{F_{xb1}}{F_{xb2}} = \frac{(z + 0.04)(b + zh_g)}{0.7zL - (z + 0.04)(b + zh_g)} \\ F_{xb1} + F_{xb2} = Gz \end{cases} \quad (0.15 < z \leq 0.7) \quad (14)$$

(4) CD 阶段 ($z > 0.7$)

当制动强度比较大时,由于此时制动时间短,回收能量有限,安全起见,此时制动力全部由液压系统提供,再生制动系统关闭。

$$\begin{cases} \frac{F_{xb1}}{F_{xb2}} = \frac{b + zh_g}{a - zh_g} \\ F_{xb1} + F_{xb2} = zG \end{cases} \quad (z > 0.7) \quad (15)$$

以上所述的控制策略流程如图 4 所示。EBCM (电子制动控制模块) 采集驾驶员踩下的制动踏板行程,通过查表,计算出总的制动力需求,按制动强度大小对制动力分配,同时接收 VCU (整车控制器) 发来的可用最大的再生制动扭矩,在制动强度不同的情况下,通过对比分析对再生制动与液压制动进行分配。



ADVISOR2002 是其最新的免费版本。由于其实用性而为广大用户所认可^[9]。

ADVISOR2002 系统的主要架构如图 5 所示,可根据整车系统的参数对车辆各个子系统进行建模。

ADVISOR 是由美国 NREL 开发的免费仿真软件,



由于 ADVISOR2002 中的车辆模型为前驱模型,而本文研究的车型为后驱车型,首先对整车模型进行修改,建立整车的后驱动模型,而对本文所研究的再生制

动控制策略模型主要在 $<vc > ev$ 中,可以依据前面制定的再生制动系统控制策略按制动强度大小进行建模,建立的主要模型如图 6 所示。

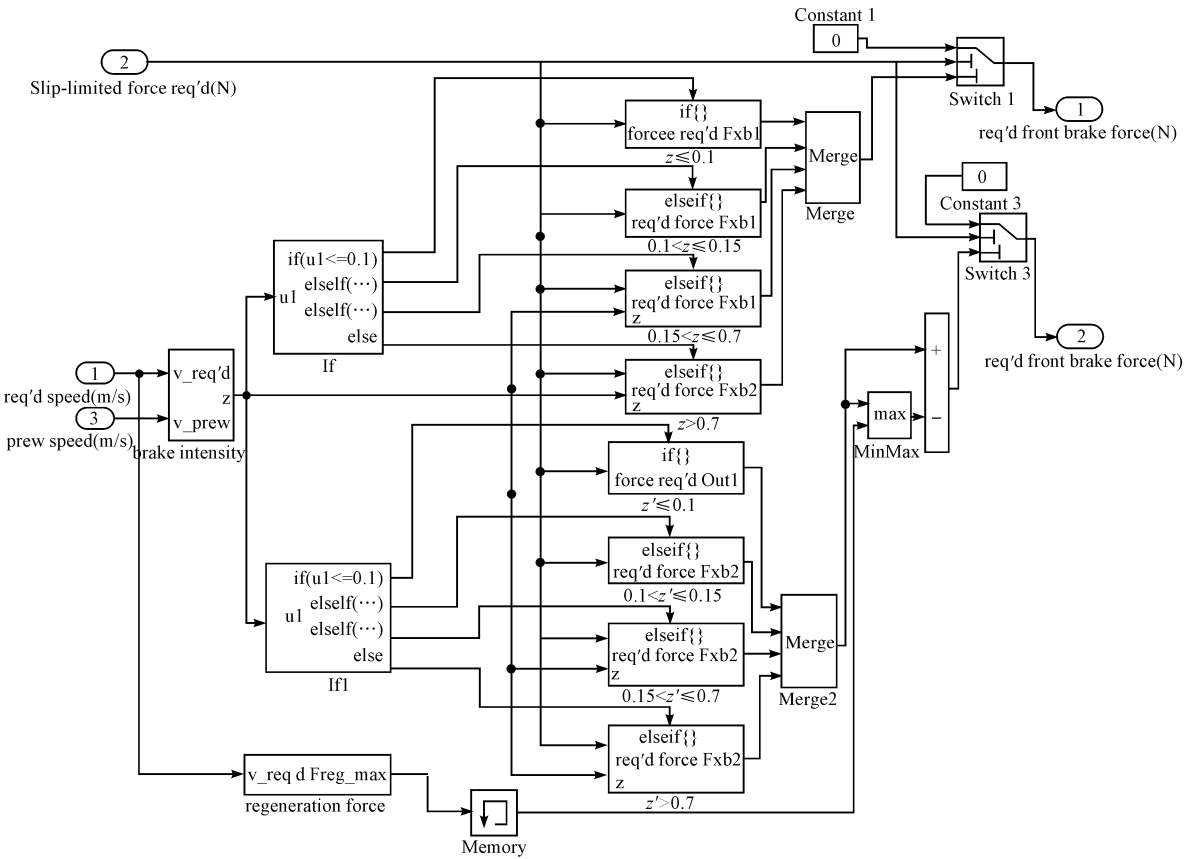


图 6 再生制动控制策略模型

对于电动汽车再生制动系统的制动能量回收效果的评价目前主要采用的是制动能量回收率或续驶里程贡献率的方法,前者是通过计算制动能量回收的能量与系统消耗的能量之间的比例来确定再生制动效果,后者是被测车辆在再生制动系统打开和关闭的情况下的续驶里程,通过续驶里程的变化来评价其再生制动系统的效果,续驶里程贡献率的定义如下:

$$C_{续驶里程} = \frac{\text{开启再生制动续驶里程} - \text{关闭再生制动续驶里程}}{\text{关闭再生制动续驶里程}}$$

(16)

参考发改工信 2015 年第 27 号令《新建纯电动乘用车企业管理规定》,对再生制动效果的评价是依据 ECE 工况来进行的,ECE 工况主要模拟低发动机负载,低排放温度,最大车速不超过 50 km/h 时的典型工况,它有 4 个各自为 195 s 的基本循环构成,总共持续 780 s,平均车速 18.77 km/h。

ADVISOR2002 仿真过程中,在开启再生制动的情况下,SOC(电池荷电状态)的变化如图 7 和图 8 所示。

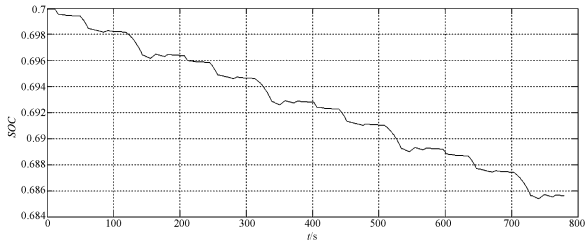


图 7 再生制动系统开启时 SOC 变化示意图

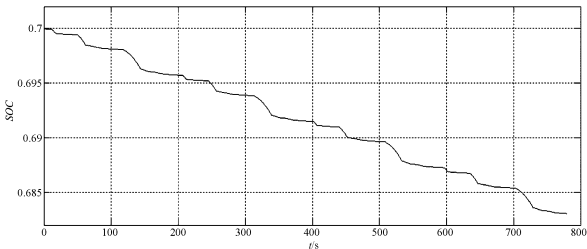


图 8 再生制动系统关闭 SOC 变化示意图

相同的循环工况条件下,开启再生制动系统情况下的 SOC 变化量比关闭再生制动制动情况下 SOC 的变化量少约 27%,由于续驶里程与能耗成反比的关系,可知,再生制动系统的开启对车辆的续驶里程贡献

率约为 27%。

4 实车测试及结果分析

参考 GB/T 18386-2005 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法^[10],2016 年 5 月 6 日至 8 日期间,在天津国家轿车质量监督检验中心实验室转毂试验台架上,采用 ECE 工况,在开启再生制动系统与关闭再生制动系统的情况下分别对车辆的续驶里程进行了测试,其测试结果如表 1 所示。

表 1 实车测试数据	
试验项目	试验结果
开启制动能量回收功能,ECE 工况下的续驶里程/km	403.6
关闭制动能量回收功能,ECE 工况下的续驶里程/km	304.9
ECE 工况下制动能量回收对续驶里程的贡献率 $C_{续驶里程}/\%$	32.4

由表可知,开启再生制动系统对车辆续驶里程贡献率为 32.4%。

由前述 ADVISOR2002 的仿真结果及实际车辆的对比可知,再生制动对续驶里程的贡献率吻合度较高,实车测试效果比仿真高出 5.4%,其主要原因由于 ADVISOR2002 的开放性,使得其建模需要整车的全部参数及子系统模型建立,整车及子系统参数的准确性将对仿真结果会有影响,比如,动力电池综合了化学、物理、材料等多个学科,目前还不能用模型来准确得描述其实际运行的状态,而其他车辆各子系统在运行过程中的温升、机械效率、阻力参数等与车辆测试的实际情况不一致也会影响最终的测试结果。

5 结束语

本研究从制动法规及制动理论出发,使用 ADVISOR2002 作为仿真工具,并通过实车测试进行验证,最

终结果表明,本研究的再生制动系统控制策略对续驶里程的贡献率可达到 32.4%。对比实车测试与仿真研究发现,仿真研究与实车测试与基本吻合,仿真研究的数据略低于实车测试,主要原因是仿真模型与实车状态的差异。如何优化 ADVISOR 仿真模型,使得与实车测试更加一致,成为下一步研究的重点。

参考文献(References):

[1] International Energy Agency. Global EV outlook 2017[R]. France: IEA,2017.

[2] 肖博一,曾细强,张震邦,等. 纯电动汽车再生制动策略现状与展望[J]. 汽车电器,2016(12):1-6.

[3] 博 世. 博世底盘控制系统提升安全性与舒适性[J]. 汽车零部件,2014(6):11-12.

[4] KO J W, KO S Y, KIM I S, et al. Co-operative Control for Regenerative Braking and Friction Braking to Increase Energy Recovery Without Wheel Lock[J]. **International Journal of Automotive Technology**,2014,15(2):253-262.

[5] 赵国柱. 电动汽车再生制动稳定性研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院,2006.

[6] 王 军,熊 冉,杨振迁. 纯电动大客车制动能量回收系统控制策略研究[J]. 汽车工程,2009(10):932-937.

[7] 张俊智,陆 欣,张鹏君,等. 混合动力城市客车制动能量回收系统道路试验[J]. 机械工程,2009(2):26-30.

[8] GB 21670-2008. 乘用车制动系统技术要求及试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[9] WANG Liang-mo, BAI Wei-jun. Development and simulation of electric vehicle based on ADVISOR[J]. **Journal of Southeast University (English Edition)**, 2006, 22(2): 196-199.

[10] GB/T18386-2005. 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

陈 军,刘敢闯. 纯电动乘用车再生制动系统控制策略研究[J]. 机电工程,2017,34(11):1363 – 1368.

CHENJun, LIUGan-chuang. A research of control strategy for regenerative braking system of pure electric passenger vehicle[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(11):1363 – 1368.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn