

信息融合架构下的新型再生制动控制策略

何耀, 邱振华, 刘新天[†], 郑昕昕, 曾国建

(合肥工业大学汽车工程技术研究院, 合肥 230009)

摘要: 再生制动能够实现能量的回收利用, 是电动汽车重要的工作模式之一. 现有的制动力分配方案对蓄电池和电机的限制因素考虑不够充分, 能量回收效率和制动效能较低. 对此, 提出一种基于信息融合架构下的新型再生制动控制策略. 在蓄电池和电机限制因素的基础上, 综合考虑增加电动车的续驶里程和制动时的舒适性、安全性等因素, 对于电动汽车的不同行驶工况具有自适应性, 能够实现能量高效回收; 对车辆行驶速度和制动强度进行特征提取和制动模式分类, 从而根据特征匹配结果切换制动模式. 最后, 通过搭建 Matlab/Simulink 整车动力学仿真模型, 验证所提出控制策略的有效性和先进性.

关键词: 电动汽车; 再生制动; 信息融合; 制动力分配; 能量回收

中图分类号: TP273

文献标志码: A

New type of regenerative braking control strategy based on information fusion

HE Yao, QIU Zhen-hua, LIU Xin-tian[†], ZHENG Xin-xin, ZENG Guo-jian

(Automotive Engineering Technology Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China.)

Abstract: Regenerative braking can achieve energy recycling, which is one of the important working modes of electric vehicles. The existing braking force distribution scheme has inadequate consideration of battery and motor constraints, and the energy recovery efficiency and braking effectiveness are low. Therefore, this paper proposes a new controlling strategy of regenerative braking based on information fusion. On the basis of the battery and motor limiting factors, considering the increasing of electric vehicle mileage, as well as comfort and safety when braking and other factors, the proposed control strategy has self-adaptability to different driving conditions of electric vehicles, and can achieve energy efficient recovery. The characteristics of vehicle speed and braking intensity are extracted and the braking mode is classified, thus the braking mode is switched according to the matching result, and the effectiveness and progressiveness of the proposed control strategy is verified by building the Matlab/Simulink vehicle dynamics simulation model.

Keywords: electric vehicle; regenerative braking; information fusion; braking force distribution; energy recovery

0 引言

随着能源危机的日益加剧, 大力推广电动汽车成为当务之急^[1], 然而电动汽车有限的续航里程制约了其发展和普及. 由于再生制动能够通过电机对刹车时的能量进行回馈, 成为了电动汽车的一种重要工作模式, 对电动汽车提高能量利用率及增加续驶里程具有重要的意义, 是提升电动汽车性能的关键技术手段之一^[2-4]. 因此, 研究电动汽车再生制动控制方式至关重要.

目前, 关于电动汽车制动能量回馈的研究主要包

括再生制动能量回收的有效性、驱动电机和电池等约束条件对再生制动的的影响以及再生制动控制策略和算法等^[5-9]. 文献[10]在前、后轮制动器制动力分配方面提出了理想再生制动、最优再生制动及并联再生制动3种不同的控制策略, 并进行了比较; 文献[11]对比了几种不同制动控制策略下的回馈效率, 结果表明串联制动控制策略中的电制动和机械制动可实时调节, 制动回馈效率可以最优; 文献[12-13]基于电机效率的最大化原则确定电机制动力, 通过对无级变速系统的控制可使电机的再生制动效率达到最高. 目

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-08-15.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51607052, 61603120); 安徽省国际合作项目(1303063010); 广东省科技计划项目(2013B090500070).

责任编辑: 毛志忠.

作者简介: 何耀(1984—), 男, 博士, 从事新能源汽车、电池管理的研究; 刘新天(1981—), 男, 博士, 从事电动汽车、电池管理的研究.

[†]通讯作者. E-mail: xintian.liu@hfut.edu.cn

前,最常用的汽车仿真软件 Advisor 是从运动学的角度来确定各种制动力的变化,即各种制动力份额随车速变化。

上述方法都能够提高能量回收效率,然而目前关于再生制动能量管理的研究往往仅针对电机本身的工作特性,或仅从汽车动力学角度进行分析,未能充分将电机模型与汽车动力学以及动力电池荷电状态(SOC)相结合,定量分析相关参数对制动状态的影响。

针对上述问题,本文提出一种基于信息融合技术的制动力分配策略,综合考虑制动效能和能量回收效率的再生制动控制架构。在系统运行时,根据输入的车辆行驶速度和制动强度实现制动比例系数分配模型的最佳切换。采用 NEDC(New European driving cycle)工况和美国 CYC_UDDS(Urban dynamometer driving schedule)循环道路工况进行离线仿真实验,并与常用 Advisor 的典型制动方案进行仿真对比。仿真结果表明,综合考虑制动舒适性和安全性以及能量回收的新型再生制动回馈控制策略不但能够提高制动效能,而且有较高的能量回收效率。

1 车辆动力学模型

为确定再生制动的制动力分配方案,需要建立车辆动力学模型。车辆动力学模型依据汽车行驶方程式建立,规定电机力矩为正值时表示驱动力矩,为负值时表示制动力矩^[14]。汽车行驶时的滚动阻力 F_f 和空气阻力 F_w 分别为

$$F_f = Gf \cos \alpha, \quad (1)$$

$$F_w = \frac{C_D A \rho v_r^2}{2}. \quad (2)$$

其中: G 为汽车总重量; f 为滚动阻力系数; α 为道路坡度值; F_w 为空气阻力; C_D 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; A 为迎风面积; v_r 为相对速度,在无风时即为汽车的行驶速度。

坡度阻力 F_i 和加速阻力 F_j 分别为

$$F_i = G \sin \alpha, \quad (3)$$

$$F_j = \delta m \frac{dv_\alpha}{dt} = M \frac{dv_\alpha}{dt}. \quad (4)$$

其中: m 为汽车总质量; δ ($\delta > 1$) 为汽车旋转质量换算系数,将旋转质量的惯性力转化为平移质量的惯性力; v_α 为汽车行驶速度; M 为汽车等效总质量。

由以上分析,根据牛顿第二定律,电动汽车行驶方程式为

$$F_m - F_b - F_f - F_w - F_i - F_j = m \frac{dv_\alpha}{dt}. \quad (5)$$

其中: F_m 为电机提供力, F_m 为正值时表示驱动力,为负值时表示制动力; F_b 为机械制动力; m 为汽车总质

量; dv_α/dt 为车辆的加速度。

当汽车行驶在水平路面且无风的工况下,电动汽车的行驶方程式为

$$F_m - F_b - F_f - F_j = m \frac{dv_\alpha}{dt}. \quad (6)$$

2 再生制动限制因素

2.1 电机的约束条件

电机的工作特性可以描述为:在额定转速(基速)以下,电机以恒转矩模式工作;在额定转速以上,电机以恒功率模式工作。再生制动时,电动机用作发电机,提供负的转矩,将汽车的动能转化为电能,根据电机的工作特性,发电机的可用制动转矩是电机角速度的函数,可用制动转矩表示为^[15]

$$T_{\text{mavail}} = \begin{cases} T_N k_{\text{SOC}} k_{\omega_m}, & \omega_m < \omega_b; \\ \frac{P_N}{\omega_m} k_{\text{SOC}} k_{\omega_m}, & \omega_m \geq \omega_b. \end{cases} \quad (7)$$

其中: T_{mavail} 为电机可用制动转矩; T_N 为电机额定转矩; k_{SOC} 和 k_{ω_m} 分别为电池荷电状态和电机角速度 ω_m 对制动转矩的影响因子; ω_b 为电机基速; ω_m 为电机角速度; P_N 为电机额定功率。

由式(7)可以看出,电机可产生的最大转矩是受到电机转速限制的。电机转矩与车轮产生纵向力之间存在如下关系^[14]:

$$F = \frac{T_m i_g i_0 \eta_T}{r}. \quad (8)$$

其中: T_m 表示电机转矩, i_g 表示变速器的传动比, i_0 表示主减速器的传动比, η_T 表示传动系的机械效率。

由式(7)和(8)可得,在电机工作特性限制下,电机能够产生的最大再生制动力为

$$F_{\text{mavail}} = \frac{T_{\text{mavail}} i_g i_0 \eta_T}{r} = \begin{cases} \frac{T_N k_{\text{SOC}} k_{\omega_m} i_g i_0 \eta_T}{r}, & \omega_m < \omega_b; \\ \frac{P_N k_{\text{SOC}} k_{\omega_m} i_g i_0 \eta_T}{r \omega_m}, & \omega_m \geq \omega_b. \end{cases} \quad (9)$$

2.2 蓄电池的约束条件

对于车载动力电池组,通常用 SOC 表征其能量^[16-17],其安时积分公式为

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{1}{C_N} \int_0^t I_{dc} dt. \quad (10)$$

其中: SOC_0 为电池 SOC 的初始值; C_N 为电池的额定容量; I_{dc} 正方向为电流流向逆变器,则电池充电时 I_{dc} 为负。

在电动汽车的再生制动过程中,为了不损害蓄电池,本文重点从电池的荷电状态(SOC)与电池的充电电流两方面进行考虑。当 $\text{SOC} > 0.95$ 时,为了防止过

充,不再进行能量回馈,电动汽车完全采用机械制动;蓄电池在充电过程中充电电流不应超过蓄电池可接受的最大充电电流,否则不但不能提高蓄电池充电效率,而且会对蓄电池造成损害,充电电流应满足

$$I_{\text{charge}} \leq \frac{U_{b\text{max}} - E_{\text{SOC}}}{R_{\text{SOC}}} \quad (11)$$

其中: $U_{b\text{max}}$ 为蓄电池最大开路电压, E_{SOC} 为对应于某一荷电状态下电池的电动势, R_{SOC} 为对应荷电状态下蓄电池内阻值。

电机产生的电磁转矩与电枢电流存在如下数学关系:

$$T = C_T \phi I \quad (12)$$

其中: C_T 为电机转矩常数, ϕ 为磁场磁通量。

由于蓄电池最大充电电流的限制,由式(11),电机能够产生的最大电机制动力矩为

$$T_{\text{bavail}} = C_T \phi I_{\text{charge_max}} = \frac{C_T \phi (U_{b\text{max}} - E_{\text{SOC}})}{R_{\text{SOC}}} \quad (13)$$

由式(8)可得,在蓄电池最大充电电流限制下,能够产生的最大再生制动力为

$$F_{\text{bavail}} = \frac{T_{\text{bavail}} i_g i_0 \eta_T}{r} = \frac{C_T \phi i_g i_0 \eta_T (U_{b\text{max}} - E_{\text{SOC}})}{r R_{\text{SOC}}} \quad (14)$$

3 新型信息融合架构下的控制策略

3.1 再生制动比例分配信息融合架构

信息融合技术对从单个和多个信息源获取的数据和信息进行关联、相关和综合,可以实现经验知识、理论模型和在线数据特征信息的协同处理,以获得复杂环境下目标状态更准确的认识^[18], 由此实现再生制动制动力分配的新型分段回馈 (Piecewise feedback, PF) 策略。

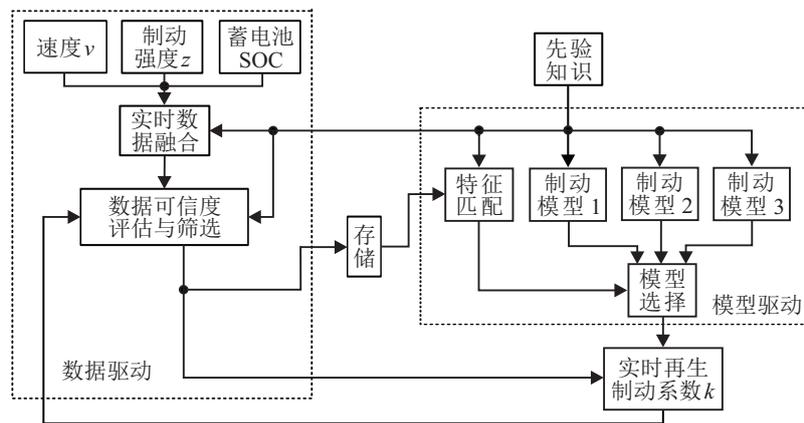


图1 再生制动比例系数分配信息融合框图

再生制动比例系数分配信息融合框图如图1所示。数据驱动模块首先通过整车CAN总线获取车速、制动强度和蓄电池SOC的信息,其中制动强度用百分比表示,其通过制动踏板偏离起始无刹车时位置角度进行量化;然后应用数据融合模块对各传感器实时采集信息进行融合;最后通过特征提取和匹配模块筛选数据。模型驱动中通过先验知识和机理建模建立3个备选计算模型。通过数据驱动中经过筛选的数据与模型驱动选择的计算模型协作处理,对制动时的再生制动比例系数 k 进行实时计算。融合性能的评价结果最终分别反馈给模型驱动模块和数据驱动模块,及时调整、优化特征库和数据可信度评估准则^[19]。

3.2 再生制动比例系数计算多模型切换

所提出的PF策略再生制动比例系数 k 计算特征值及模式划分如表1所示。其中:制动模型1对应机械制动,制动模型2对应电机制动,制动模型3对应机电

混合制动^[20]。

表1 再生制动比例系数 k 计算特征值及模式划分

模式	特征I	特征II	对应过程
1(或)	$v < 5 \text{ km/h}$	$z > 0.8$	低速制动或紧急制动
2(与)	$v \geq 5 \text{ km/h}$	$z \leq 0.1$	轻度非紧急制动
3(与)	$v \geq 5 \text{ km/h}$	$0.1 < z \leq 0.8$	中轻度非紧急制动

在不同的模式下选择适配的制动方式可兼顾提高能量回收效率和制动效能的提升。如图1所示,输入车速 v 、制动强度 z 和蓄电池荷电状态SOC,通过信息融合、特征提取和模式匹配,根据表1中匹配的模式选择适配的制动模型。当车速较低时,能量回馈易造成汽车剧烈地抖动,影响制动舒适性和平顺性^[21-22],本文速度 v 以5 km/h为分界点, $v \geq 5 \text{ km/h}$ 才进行电机制动,可以较大程度地提高制动舒适性,同时兼顾能量回收效率的提高。

综合考虑驾驶员制动意图、汽车制动时的舒适

性、制动安全性等因素,本文采用的再生制动控制策略考虑如下。

1) 当蓄电池荷电状态SOC < 0.95时,才进行再生制动。

2) 在车辆速度较低时,电机制动平稳性差,为了不影响制动时的舒适性,当电动汽车 $v \geq 5 \text{ km/h}$ 时,才进行制动能量回馈,否则只进行机械制动。

3) 在条件2)下,当 $z \leq 0.1$ 时,分析驾驶员的制动意图,此时不需要很大的制动力,采用电机制动足够满足制动需求,回收能量也能达到最大化。

4) 在条件2)下,当 $0.1 < z \leq 0.8$ 时,此时根据驾驶员对制动力的需求越来越大,单纯的电机制动已不能够满足驾驶员的需求,应采用机电混合制动方式,即电动汽车在进行电机制动的同时,进行机械制动。

5) 当 $z > 0.8$ 时,根据驾驶员的制动意图分析,此时需要很大的制动力,使汽车在短时间短距离内停车。考虑行驶安全性,此时应采用机械制动方式。

基于以上分析,在模式1中,特征I为 $v < 5 \text{ km/h}$ 和特征II为 $z > 0.8$,是“或”的关系,属于低速制动或者紧急制动状态。当 $v < 5 \text{ km/h}$ 时,采用电机制动会产生较大的抖动,影响制动舒适性;当制动强度 $z > 0.8$ 时,从驾驶员的制动意图分析,此时属于紧急制动。以上两种情况采用传统的机械制动, $k = 0$ 。

在模式2中,特征I为 $v \geq 5 \text{ km/h}$ 且特征II为 $z \leq 0.1$,属于轻度非紧急制动状态,采用电机制动能够较大程度地回收制动能量。

在模式3中,特征I为 $v \geq 5 \text{ km/h}$ 且特征II为 $0.1 < z \leq 0.8$,属于中轻度非紧急制动状态,采用机电混合制动。本段融合了 Advisor 再生制动策略^[23], Advisor 自带的制动力分配策略简单有效,但却存在着非常明显的缺陷,即忽略了蓄电池 SOC 对蓄电池充电的限制,未能充分考虑电机工作特性对电机能够产生的最大再生制动力的限制等。根据上文分析,本文考虑了 SOC、电机能够产生的最大再生制动力

矩等再生制动限制因素,本段融合 Advisor 制动策略,既发挥了其简单有效的特性,又克服了上述缺陷,兼顾能量回收效率和制动效能的提升。

综上,根据制动强度 z 分类可将 PF 策略再生制动比例系数 k 与 v 的关系表示成如图2所示。值得一提的是,由于总制动力的连续性,所提出的再生制动方案不会影响制动时的舒适性。

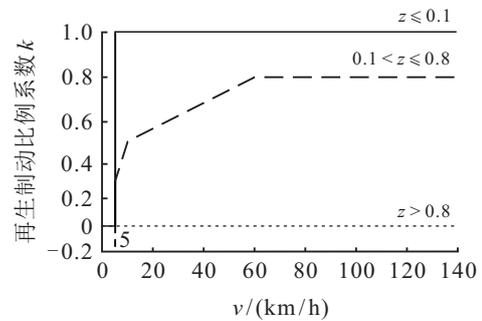


图2 策略 $k-v$ 关系

PF 策略逻辑表示如图3所示,其具体步骤如下。

Step 1: 通过整车 CAN 读取车速 v 、制动强度 z 和蓄电池荷电状态 SOC。

Step 2: 判断 SOC 是否大于 0.95, 若大于 0.95, 则只进行机械制动。

Step 3: 模式识别与制动所需力矩计算。

Step 3.1: 根据特征提取输入 v 和 z , 通过表1判断制动模式;

Step 3.2: 通过车辆动力学模型计算当前制动所需的制动力矩 T 。

Step 4: 根据 Step 3 中识别的制动模式, 计算出再生制动力矩 T_e 。

Step 5: 比较环节。将 T_e 与按照电机当前所能提供最大制动力矩 $T_{e \max}$ 进行比较, 取两者最小值 $\min(T_{e \max}, T_e)$, 即为制动时分配给电机的再生制动力矩 T'_e 。

Step 6: T 减去 T'_e 即为实际分配的机械制动力矩 T_L 。

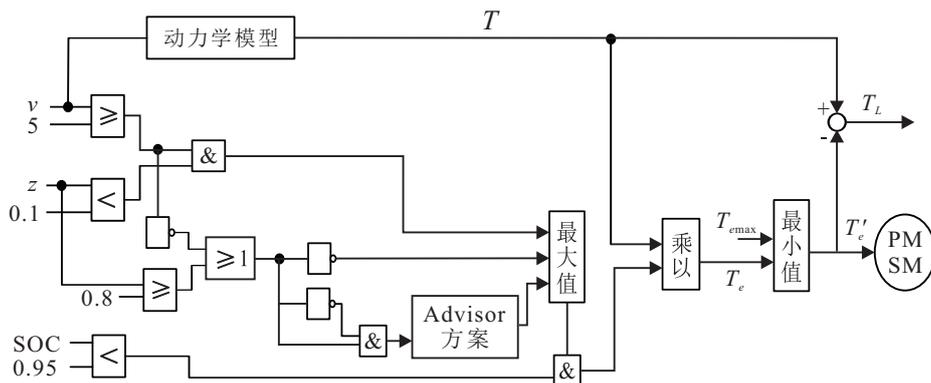


图3 再生制动PF策略多模型切换逻辑

4 仿真和实验验证

4.1 车辆动力学模型精度验证

为了对第2节中所建立的车辆动力学模型精度进行验证,选取CYC_UDDS工况进行循环工况实验.准确地计算车辆的驱动力或制动力是按照所提PF策略进行制动力分配的前提,所以选取车辆所需的驱动力或制动力作为模型精度验证的参数较为可靠.将CYC_UDDS循环工况下的车辆驱动力或制动力理论模型计算值与实测值进行比较,仿真参数依照实车相关参数进行设置,本文相关仿真和实验参数设置如下.

1) 整车参数.根据上述车辆动力学模型的分析,对车辆行驶过程进行建模,仿真实验车辆参数通过实车得到,通过设置相同的工况和风阻等系数,进行仿真实验.本文所取单位均为国际标准单位,个别可能小范围波动的值均取定值,取值如表2所示.

表2 整车模型参数

参数	取值	参数	取值
f	0.01	m / kg	2 500
$g / (\text{m/s}^2)$	9.8	C_D	0.45
α	0.5	$\rho / \text{NS}^2\text{m}^{-4}$	1.255 8
δ	1.07	A / m^2	1

2) 电机参数设置如下:电压为300 V,效率为0.88,功率因数为0.6.

通过对图4中CYC_UDDS工况下车辆驱动力或制动力理论模型计算值与实测值进行比较分析,二者差距不大.为进一步精确衡量理论模型的误差,以实测值作为标准,求取理论模型计算值的相对误差,设驱动力或制动力的理论模型计算值与实测值分别为 F_1 和 F_2 ,则有相对误差

$$\text{RE} = \frac{\int_0^T |F_1 - F_2| dt}{\int_0^T |F_2| dt} \times 100\%, \quad (15)$$

其中 $T = 1369 \text{ s}$,为CYC_UDDS循环工况行驶时间.此时求得 $\text{RE} = 1.37\%$,误差较小,验证了车辆动力学模型的准确性.

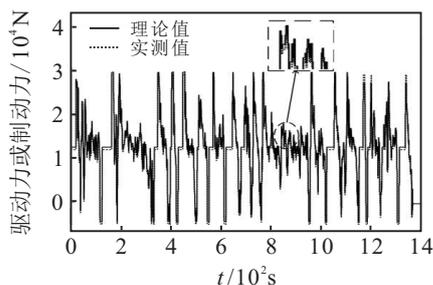


图4 车辆驱动力或制动力理论模型计算值与实测值(CYC_UDDS工况)

4.2 PF策略有效性验证

为了验证所提再生制动PF策略的有效性,根据上述车辆动力学模型在Matlab/Simulink中进行整车建模,通过建立s-fuction实现相应的PF策略,并对Advisor制动方案和PF制动方案进行相关仿真验证,分别验证NEDC工况和CYC_UDDS工况.

4.2.1 NEDC工况仿真和实验结果

NEDC工况下,认定市区工况为30%,市郊工况为70%.一个完整测试循环共计1 180 s,其中市区工况共780 s,最高车速50 km/h;郊区工况400 s,最高车速120 km/h.

NEDC工况下,车辆行驶过程中相关参数变化如图5所示.

根据车辆动力学模型可以计算出车辆行驶过程中所需的实时驱动力或制动力如图5(a)所示,车辆需要驱动力为图中大于0的部分,小于0的部分对应车辆需要的制动力.

仿真模型中,针对两种制动方案分别编写了对应的s-function模块,图5(b)和图5(c)分别对应两种制动方案在任意时刻制动时对应的再生制动比例系数随时间变化关系图.

从两种方案的对比可以看出,所提出的PF策略能够提高再生制动的比例系数,从而增加能量回收效率.同时,由于总制动力的连续,不会影响制动时的舒适性.结合实际仿真工况,再生制动发生在车辆需要制动的时刻,即图5(a)中数值小于0的部分.因此,两种制动比例分配方案实际的再生制动比例系数如图5(d)和5(e)所示.

设置相应的工况和风阻等系数,在轮毂试验台上进行相同工况的实车验证,得到相关参数随时间变化的关系图.图5(f)所示为电机功率变化图,电机功率为正代表电机处于驱动状态,为负代表制动回馈状态.图5(g)为两种制动力分配策略下电机功率差值.

两种制动方案对应SOC变化情况如图5(h)所示,电池初始状态假设为满电状态(50 Ah),可以看出,一个工况过程中,PF策略对应的SOC的下降值更少.

4.2.2 CYC_UDDS工况仿真和实验结果

该仿真路况是美国环境保护署EPA制定的城市道路循环UDDS(Urban dynamometer driving schedule).

CYC_UDDS循环工况下,车辆行驶过程中相关参数变化如图6所示.

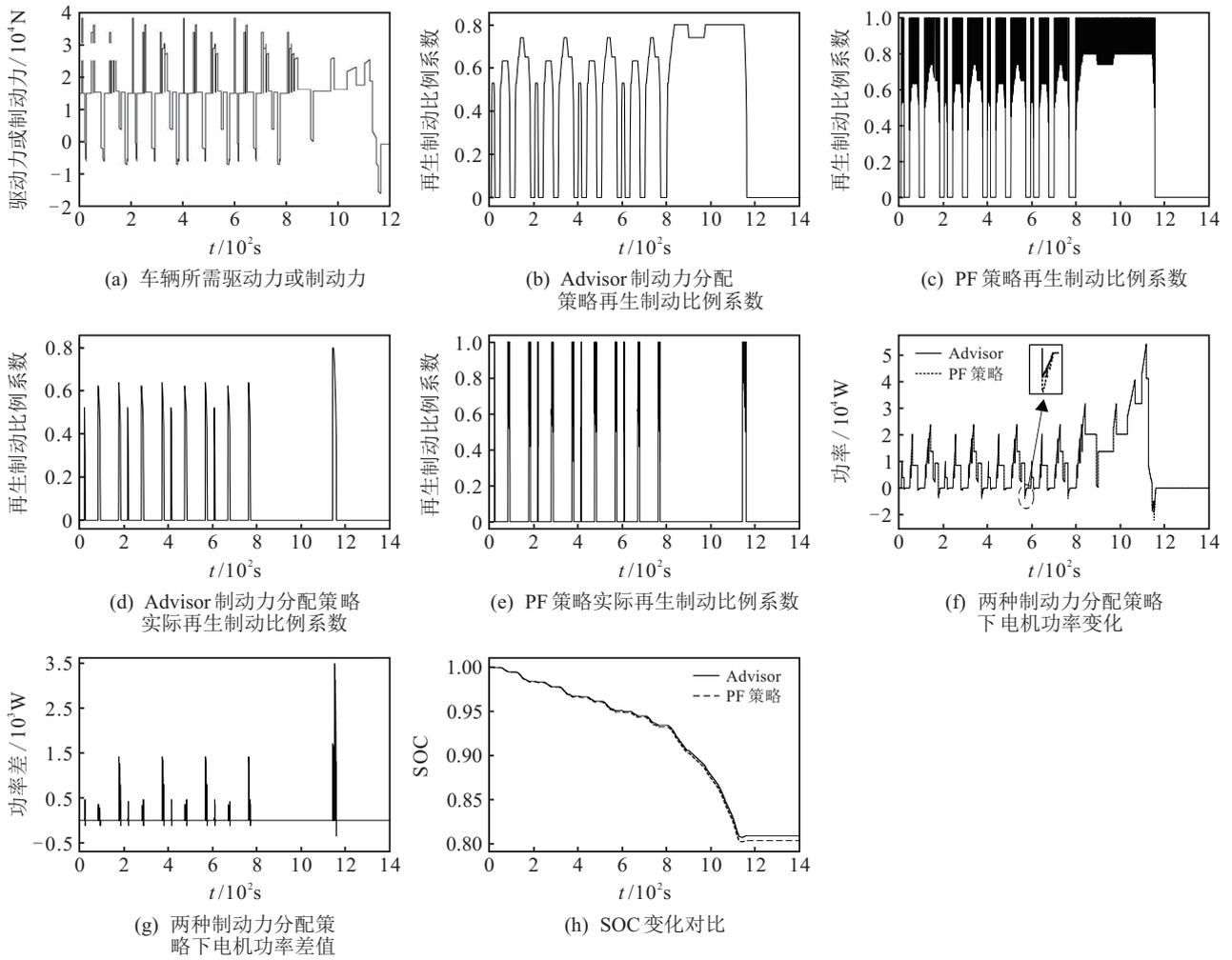


图5 NEDC工况下相关参数变化

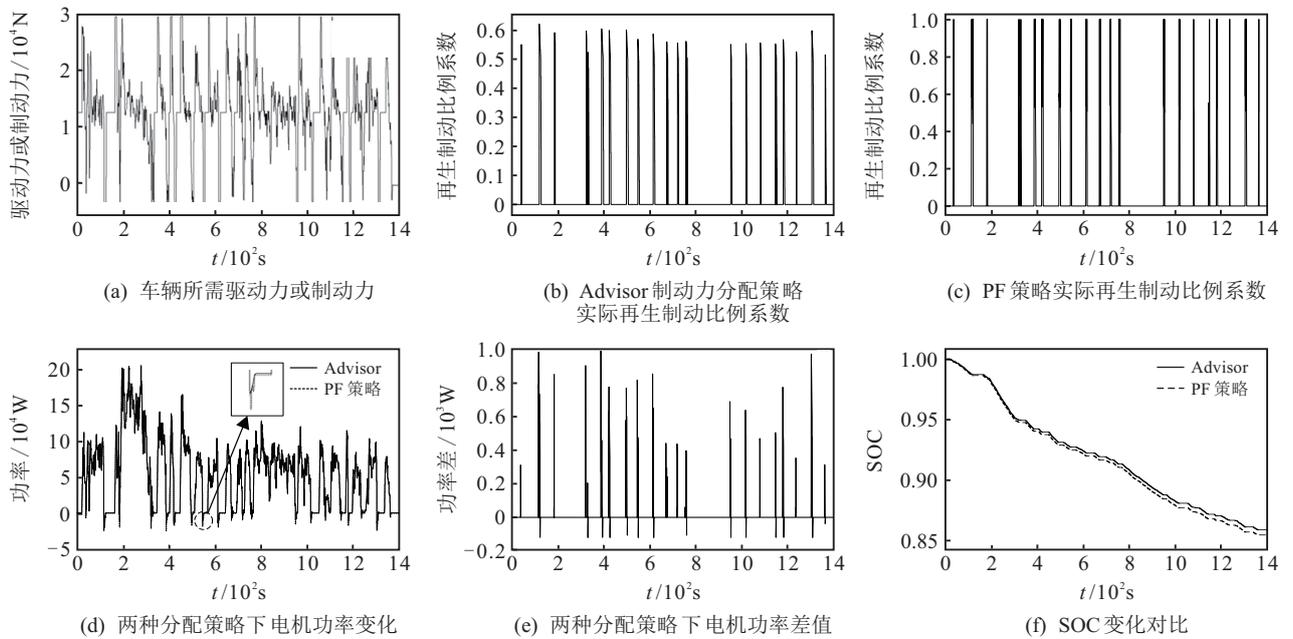


图6 NEDC工况下相关参数变化

与NEDC工况下相关参数的变化情况类似,通过两种方案的对比同样可以看出,在CYC_UDDS工况下,所提出的PF策略能够提高再生制动的比例系数。

设置相应的工况和风阻等系数,在轮毂试验台上进行相同工况的实车验证,图6(d)和图6(e)为两种制动力分配策略下电机功率及其差值变化图,结合两种制

方案对应的SOC变化图6(f)可以看出,一个工况过程中,PF策略对应的SOC的下降值更少,能量回收的效率更高。

两种制动方案能量回馈情况和续航里程(SOC由100%降为5%)对比如表3和表4所示。

表3 NEDC工况下两种控制策略能量回馈情况

对比项	Advisor制动力分配策略	PF策略	对比提升
整车消耗/kJ	10719	10161.05	557.95
SOC	0.8015	0.812	0.0105
制动总能量/kJ	1804.3	1804.3	-
回收能量/kJ	470.5	1028.45	557.95
回收效率/%	26.07	56.9	30.83
续航里程/km (SOC:100%~5%)	63.48	68.52	5.04

表4 CYC_UDDS循环工况下两种控制策略能量回馈情况

对比项	Advisor制动力分配策略	PF策略	对比提升
整车消耗/kJ	8073.4	7550.7	522.7
SOC	0.8505	0.8602	0.0097
制动总能量/kJ	1650.7	1650.7	-
回收能量/kJ	455.3	978	522.7
回收效率/%	27.58	59.25	31.67
续航里程/km (SOC:100%~5%)	75.28	80.08	5.52

由表3和表4可知:在NEDC工况下,分段回馈策略的制动能量回收效率约为56.9%,比传统的Advisor回馈策略制动能量回收效率提高约30.83%;在CYC_UDDS循环工况下,分段回馈策略的制动能量回收效率约为59.25%,比传统的Advisor回馈策略制动能量回收效率提高约31.67%。因此,无论在哪种工况下,改进后的制动回馈方案较原方案在能量回收方面有较大提升。

5 结论

本文提出了一种基于信息融合架构下的新型再生制动控制策略,给出了再生制动过程中的再生制动比例系数、蓄电池SOC、车速与制动强度之间的逻辑关系和计算流程,最后在Matlab建立仿真模型进行验证。所提方法具有以下特点:

- 1)综合考虑了电池和电机的限制因素,增强了制动时的舒适性和安全性,提高了制动效能,并保证动力电池安全、可靠地工作;
- 2)基于信息融合架构的制动力分配策略,具有对不同工况的自适应性;
- 3)能够合理分配电磁转矩和机械转矩在制动过程中所占的比重,提高能量回收效率,所提出的控制策略相对于传统的Advisor制动力分配策略能量回收效率有较大提高。

参考文献(References)

[1] 欧阳明高. 中国新能源汽车的研发及展望[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 13-19.
(Ouyang M G. New energy vehicle research and development in China[J]. Science & Technology, 2016, 34(6): 13-19.)

[2] Nian X, Peng F, Zhang H. Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5798-5808.

[3] 宋士刚, 李小平, 孙泽昌. 基于混合系统理论的串联式再生制动控制策略分析[J]. 汽车工程, 2015, 37(3): 313-320.
(Song S G, Li X P, Sun Z C. Analysis on the control strategy for series regenerative braking based on hybrid system theory [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(3): 313-320.)

[4] Lu S, Weston P, Hillmansen S, et al. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles[J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2506-2515.

[5] Xu G, Li W, Xu K, et al. An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles[J]. Energies, 2011, 4(9): 1461-1477.

[6] 王耀南, 刘东奇. 电动汽车机电复合制动力分配策略研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 348-356.
(Wang Y N, Liu D Q. A study of mechanical and electrical compound braking force distribution strategy for electric vehicle[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 348-356.)

[7] 宋世欣, 王庆年, 王达. 电动轮汽车再生制动系统控制策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 2: 341-346.
(Song S X, Wang Q N, Wang D. Control strategy for regenerative braking system of in-wheel motor vehicle[J]. J of Jilin University: Eng and Technoled, 2015, 2: 341-346.)

[8] 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: 22-34.
(Li T H. Analysis on regenerative braking technology of new energy vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2016, 12: 22-34.)

[9] 王巢, 宋珂, 章桐. 电动汽车再生制动控制策略技术现状[J]. 机电一体化, 2016, 1: 43-72.
(Wang C, Song K, Zhang T. Technique status of regenerative braking control strategy for electric vehicle[J]. Mechatronics, 2016, 1: 43-72.)

[10] 何小路, 鲍久圣, 阴妍, 等. 混合动力车辆控制策略研究现状[J]. 机械传动, 2017, 1: 197-199.
(He X L, Bao J S, Yin Y, et al. Research status of control strategy for hybrid electric vehicle[J]. J of Mechanical Transmission, 2017, 1: 197-199.)

[11] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-91.
(Lu D B, Ouyang M G, Gu J, et al. Optimal regenerative

- braking control for permanent magnet synchronous motors in electric vehicles[J]. Proc of the CSEE, 2013, 33(3): 83-91.)
- [12] 陈志朴. 插电式CVT混合动力汽车再生制动控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学机械工程学院, 2014: 35-72. (Chen Z P. Study on regenerative braking control strategy for plug-in hybrid electric vehicle with CVT[D]. Chongqing: College of Mechanical Engineering, Chongqing University, 2014: 35-72.)
- [13] 郑大伟. 基于CVT的插电式混合动力汽车再生制动控制策略[D]. 重庆: 重庆大学汽车工程学院, 2016: 27-71. (Zheng D W. Study on regenerative braking control strategy for plug-in hybrid electric vehicle equipped with CVT[D]. Chongqing: College of Automotive Engineering, Chongqing University, 2016: 27-71.)
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 第5版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 3-129. (Yu Z S. Automobile theory[M]. 5th ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 3-129.)
- [15] 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): 1495-1499. (Guo J G, Wang J P, Cao B G. Braking force distribution for electric vehicles based on optimization[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1495-1499.)
- [16] Lu X, Sun K, Guerrero J M, et al. Double-quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy storage systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2015, 6(1): 147-157.
- [17] Sun F, Xiong R. A novel dual-scale cell state-of-charge estimation approach for series-connected battery pack used in electric vehicles[J]. J of Power Sources, 2015, 274: 582-594.
- [18] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 650-667. (Hou Z S, Xu J X. Retrospect and prospect of data driven control theory and method[J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 35(6): 650-667.)
- [19] 何耀, 张陈斌, 刘兴涛, 等. 基于信息融合的LiFePO₄动力电池组SOC估计[J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 189-192. (He Y, Zhang C B, Liu X T, et al. Estimation for LiFePO₄ high-power batteries based on information fusion[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 189-192.)
- [20] 吴倩. 机电联合制动系统控制策略研究[D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆学院, 2015: 16-92. (Wu Q. Research on control strategy for electro-mechanical braking system[D]. Beijing: College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, 2015: 16-92.)
- [21] 冯能莲, 么居标, 俞黎明, 等. 电动汽车再生制动控制策略[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(12): 1332-1338. (Feng N L, Yao J B, Yu L M, et al. Control strategy of regenerative brake for electric vehicle[J]. J of Beijing University of Technology, 2008, 34(12): 1332-1338.)
- [22] 俞林炯, 高松. 纯电动大客车制动能量回馈控制策略[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2011, 5: 98-102. (Yu L J, Gao S. Braking energy feedback control strategy for pure electric bus[J]. J of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 5: 98-102.)
- [23] 顾亚松. 基于ADVISOR的纯电动汽车再生制动控制策略研究[D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2014: 20-52. (Gu Y S. Research on regenerative braking control strategy of pure electric vehicle based on ADVISOR[D]. Xi'an: College of Automobile, Chang'an University, 2014: 20-52.)

(责任编辑: 齐 霁)

张嗣瀛优秀青年论文奖、《控制与决策》2017年度优秀论文奖以及 2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖颁奖仪式在沈举行

本刊讯 第30届中国控制与决策会议(2018 CCDC)于2018年6月9日~11日在沈阳玛丽蒂姆酒店召开. 在6月10日举行的第30届中国控制与决策会议颁奖仪式上, 共颁发了3个奖项: 张嗣瀛优秀青年论文奖、《控制与决策》2017年度优秀论文奖、2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖.

首先颁发的是“张嗣瀛优秀青年论文奖”. 国际程序委员会主席、美国纽约大学的姜钟平教授介绍评奖过程, 并宣布获奖者名单, 有5位学者获得该项提名. 最终, 香港城市大学的吕茂斌和同济大学的马志勋凭借其高质量论文和出色的报告共同赢得此奖项. 张嗣瀛院士向获奖者和提名奖获

得者颁发了证书和奖金.

第2项颁发的是“《控制与决策》2017年度优秀论文奖”. 经过评奖委员会评审, 有4篇文章获奖, 作者分别为: 北京航空航天大学的邵星灵教授, 中国科学技术大学的廖飞博士, 清华大学的王凌教授, 中南大学的许民利教授. 期刊主编东北大学王福利教授为获奖者颁发证书和奖金.

第3项颁发的是“2018年度张嗣瀛教育基金优秀博士生奖学金”. 东北大学信息科学与工程学院的4位博士生以其突出的研究成果获奖, 张嗣瀛院士为获奖者颁奖, 并鼓励学生要为祖国科研事业不懈努力.