

纯电动汽车机电复合制动控制策略分析

张庆永, 朱志亮

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为提高电动汽车能量利用率、改善车辆制动效果, 依照制动踏板的不同工作状态, 设计了一种并联制动控制策略。在制动踏板踩下的复合制动工况, 按照相关制动法规对机械制动和再生制动进行合理分配; 在滑行制动工况, 以能量回收效率为目标函数, 运用遗传算法优化电机在不同转速下的最佳制动转矩。分别在典型道路工况和常规制动工况下对该策略进行实车测试, 结果表明: 在中国轻型汽车行驶工况 (CLTC-P) 下, 该策略的节能贡献度可达 25.93%, 在滑行制动工况能量回收效率较原车提升 64.07%, 车辆制动距离也有明显缩减。

关键词: 纯电动汽车; 制动效果; 制动踏板; 能量回收效率; 遗传算法优化

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)03-0232-07

Control strategy analysis of electromechanical composite braking for pure electric vehicles

ZHANG Qingyong, ZHU Zhiliang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A parallel braking control strategy was designed based on the different working states of the brake pedal to improve the energy utilization rate and braking effect of electric vehicles. In compound braking conditions, the mechanical braking and regenerative braking were reasonably allocated in accordance with the braking regulations; in coasting braking conditions, the energy recovery efficiency was used as the objective function, and the genetic algorithm was used to optimize the optimal braking torque of the motor at different speeds. Finally, a real vehicle test was carried out to verify the effectiveness of the designed parallel braking control strategy. Test results show that the energy-saving contribution of this strategy can reach 25.93% under the Chinese automotive cycle (CLTC-P), the energy recovery efficiency in the coasting braking condition is increased by 64.07%, and the vehicle braking distance is also significantly shortened.

Keywords: electric vehicles; braking effect; brake pedal; energy recovery efficiency; genetic algorithm optimization

城市工况下, 车辆制动频繁, 制动消耗的能量占总驱动能量的一半以上。车辆再生制动可有效防止这部分能量的浪费。再生制动技术在提升车辆能量利用率、增加车辆续航里程的同时, 可施加电机驱动力于主动轴, 改善车辆制动性能。该技术的研究对电动汽车的推广具有重要意义^[1-2],

国内外学者对其进行了诸多研究。Gurunath K^[3]等利用 V/F、标量控制方法和磁场定向控制等手段实现感应电机的再生制动, 并提出了同步速度和转子速度之间的理论关系, 实现了驱动到制动间的模式变化。Xu Z^[4]等人研究了电动汽车的制动能量回收控制技术, 缓解了车辆制动时的能

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 福建省财政厅资助项目 (GY-Z21004)

第一作者简介: 张庆永 (1980—), 男, 山东枣庄人, 副教授, 博士, 研究方向: 新能源汽车动力总成开发, 汽车电子控制。

量流失,延长了电动汽车的行驶里程。Li Q C^[5]等利用 AVL Cruise 构建纯电动汽车模型,利用 Matlab/Simulink 建立制动能量回收控制策略,并在 NEDC 工况完成联合仿真,与无能量回收的车辆相比续航里程提升了 100 km。Biao J^[6]等采用优化分布算法的再生制动控制策略,利用最佳制动力分布及相关约束条件,设计了满足制动稳定性和最大能量回收效率的控制策略,制动能量效率提高了 51.9% 以上。Kumar M^[7]等提出了纯电动汽车再生制动系统实施的有效途径,还提出了优化再生制动系统转化效率方法。Han J^[8]等在改善车辆横向稳定性的基础上,定义了具有约束的成本函数,以确定电机制动转矩的最佳分布,有效保证再生制动过程车辆的横向稳定性。

目前,大部分学术研究还停留在仿真层面,并未考虑实际制动时制动踏板的工作状态。本研究以前置前驱电动车为研究对象,通过分析制动系统结构,综合考虑多种影响因素,测量计算制动力踏板与制动强度的关系,提出一种基于制动踏板的并联制动能量回收控制策略,并对制动踏板无动作的滑行制动能量回收策略进行优化,通过实车测试,分别验证策略的能量回收效果及制动效果。

1 制动能量回收系统分析

1.1 制动系统结构分析

车辆制动惯性带动电机持续运转电机反向扭矩产生制动力,提升制动强度的同时,收集制动能量并将其存储在动力电池中,可实现能量的再次利用^[9]。

本研究在传统交叉式液压制动系统的基础上,基于制动踏板开度,在原来机械制动的基础上增加电机制动。制动控制中心 ECU 通过采集车轮转速、制动踏板等信号,根据制动控制策略实现电机反向扭矩的输出,不仅避免了对传统液压制动的改动,还实现了复合制动增强了车辆制动响应速度和能量回收效果^[10]。

1.2 整车制动策略分析

车辆常规制动再生制动策略有两种:一种是优先考虑电机制动的串联再生制动,其制动系统较为复杂;另一种是结构简单的并联再生制动,为电动机制动和传统液压制动的叠加,成本较低,易于实现,在半解耦式制动系统中较为常见。

基于并联制动分配策略,结合电动汽车的理

想制动力分配曲线,建立能量回收率较高的新型并联制动分配策略。本研究的纯电动车机械制动力为半解耦式,取前、后轴机械制动力分配系数 $\beta = 0.71$,通过改变电机制动力大小,使得制动力分配系数在合理取值范围内变化,在保证制动稳定性和安全性的前提下,提出整车制动策略。

2 制动能量回收控制策略

在能量回收过程中,电机制动力受到行驶车速、电池 SOC、控制策略等诸多因素的影响,在制定能量回收策略时考虑其运行条件满足 $v > 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $\text{SOC} < 90\%$,并结合驾驶员制动需求制定出合理的控制策略。

2.1 复合制动能量回收控制策略

对车辆液压制动系统进行测量及标定,得到制动踏板开度与制动强度关系如图 1 所示。其中,制动踏板开度为 0~19% 时为机械制动踏板空行程,行驶过程中空行程能够有效防止制动拖滞和误触。之后,为提升制动响应速度,在制动踏板开度达到 10% 时增加电机制动力,增加再生制动后制动踏板空行程为 10%。

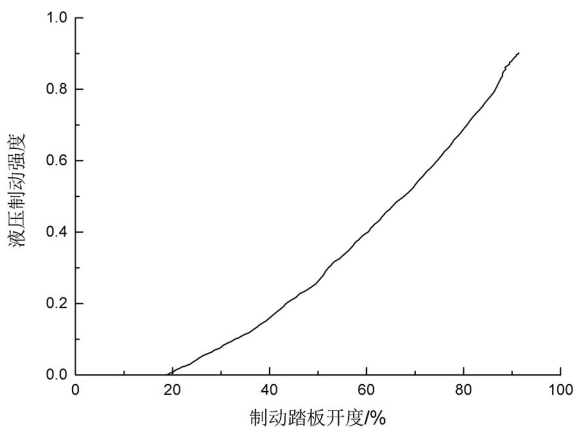


图1 机械制动踏板关系

Fig.1 Mechanical brake pedal relationship

在液压制动基础上增加电机制动后,随着制动踏板的踩下,复合制动能量回收控制策略开始运行。为最大限度回收制动能量,同时保证制动安全,在不同制动强度 z 下采用不同的制动策略。当 $0 < z \leq 0.1$ 时,只产生电机制动;当继续踩下踏板时, $0.1 < z \leq 0.8$,再生制动与机械制动共同作用,减速车辆;当 $z > 0.8$ 时,再生制动退出,仅由机械制动进行作用。

根据 ECE 制动曲线及前、后轮利用附着系数^[11],对制动力分配系数 β 的范围进行确定,可求得 $0.68 \leq \beta \leq 0.86$ 。如图2所示,在制动强度满足 $0.2 < z \leq 0.8$ 时,其制动力分配范围为 $D-E-F-G-H$ 区域。在合理的前、后轴制动力分配范围内,为使车辆在复合制动过程中的电机制动力可以达到最大,尽量将制动力分配给前轴,即为曲线 $O-A-B-C-D$ 所示。

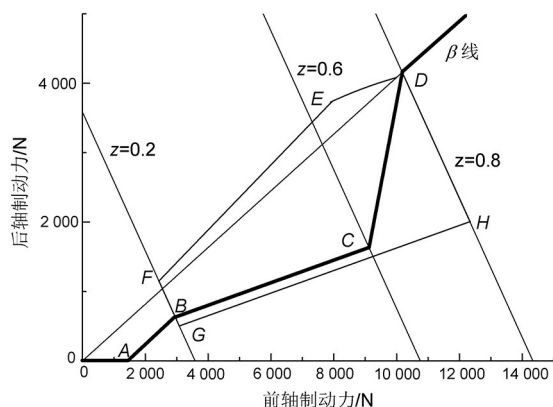


图2 复合制动前、后轴制动力分配范围

Fig.2 Compound braking front and rear axle braking force distribution range

(1) 纯电机制动: $O-A$ 段, $0 < z \leq 0.1$, 制动踏板开度为 $0 \sim 19\%$, 属于机械制动踏板自由行程。此时为轻度制动, 车辆仅靠电机制动即可满足制动需求, 制动强度较低, 制动法规没有要求, 可利用电机制动力产生 $z \leq 0.1$ 的制动强度。电机作用在制动盘的制动力 F_d 为:

$$\begin{cases} F_d = 0 & (\alpha \leq 10\%) \\ F_d = \frac{(\alpha - 10\%) \cdot 0.1 \cdot m \cdot g}{(19\% - 10\%)} & (10\% < \alpha \leq 19\%) \end{cases} \quad (1)$$

其中, 19% 为车辆机械制动踏板自由行程; 10% 为增加电机制动后制动踏板自由行程; α 为制动踏板开度; m 为车辆整备质量; g 为重力加速度。

(2) 中低复合制动: $A-B$ 段, $0.1 < z \leq 0.2$, 制动法规也没有限制。逐渐引入机械制动力, 在机械制动分配曲线 β 线的基础上叠加恒定电机制动力, 在不改变机械制动结构的基础上, 将制动强度提高 0.1 。电机制动力为:

$$F_d = 0.1 \cdot g \cdot m, (19\% < \alpha \leq \alpha_{z=0.2}) \quad (2)$$

其中, $\alpha_{z=0.2}$ 为复合制动强度为 0.2 时所对应的制

动踏板开度。

(3) 中等复合制动: $B-C$ 段, $0.2 < z \leq 0.6$, 为满足制动法规要求需要在制动分配边界范围将电机制动力最大化。此时, 前、后轴制动力分配系数 β 应尽量取最大值才能使得前轴制动力最大, 进而增大附加电机制动力。由于制动力分配系数的上限 $\bar{\beta}_0 = 0.86$, 本研究考虑车辆负载留取一定余量, 取 $\bar{\beta} = 0.8$, 则

$$F_d = \frac{(\alpha - \alpha_{z=0.2})[\bar{\beta} \cdot (z_0 + 0.1) - \beta_0 z_0] + 0.4 \cdot (\alpha_{z=0.6} - \alpha)}{\alpha_{z=0.6} - \alpha_{z=0.2}} \cdot g \cdot m, (\alpha_{z=0.2} < \alpha \leq \alpha_{z=0.6}) \quad (3)$$

其中, β_0 为机械制动前、后轴制动力分配系数, 为 0.71 ; z_0 为原制动踏板开度对应机械制动强度。

(4) 中高复合制动: $C-D$ 段, $0.6 < z \leq 0.8$, 此时制动强度较大, 制动稳定性为首要考虑因素, 制动能量回收为次要考虑因素。为避免制动过程中车轮出现抱死现象, 逐渐减小电机制动所占比例, 从而避免电机制动退出引起的驾驶感觉异常, 直至 $z = 0.8$, 电机制动力为 0 。

$$F_d = \frac{\alpha_{z=0.8} - \alpha}{\alpha_{z=0.8} - \alpha_{z=0.6}} \cdot [\bar{\beta} \cdot (z_0 + 0.1) - \beta_0 \cdot z_0] \cdot g \cdot m, (\alpha_{z=0.6} < z \leq \alpha_{z=0.8}) \quad (4)$$

(5) 纯机械制动: 在 D 点之后的制动过程, $z > 0.8$, 属于紧急制动, 通常是汽车发生危险状况时的急剧、大强度制动工况, 考虑到安全因素, 应关闭再生制动系统, 完全依靠机械制动, 即:

$$F_d = 0, z > 0.8 \quad (5)$$

综上, 将整车参数带入式(1)~式(5)中, 由制动强度关系式 $z = F/mg$, 可求得总制动强度与制动踏板开度对应关系, 如图3所示。在制动过程中, 若电机制动失效, 则仍按照虚线中机械制动踏板工作方式制动, 此时制动力分配仍在安全范围内, 故本研究提出的策略具有一定的容错性。

2.2 滑行制动能量回收控制策略

车辆滑行多发生在高速行驶工况或城市拥堵路段的低速行驶工况, 车辆制动强度较低, 属于中低强度制动 ($z < 0.15$)^[12]。为减少驾驶员的操作, 并增大制动能量回收效率, 在车辆滑行过程中进行电机制动, 滑行制动减速度小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 不受 ECE 法规限制。

(1) 选择优化变量

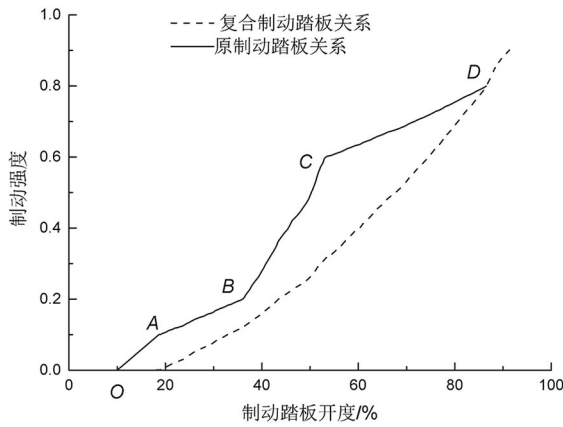


图3 复合制动踏板关系

Fig.3 Compound brake pedal relationship

滑行制动时,电机能够输出最大制动转矩与转速、电机外特性曲线及 SOC 影响的电池充电功率有关^[13],电机提供制动力同踩下制动踏板的电机制动条件相似,即车速 $v > 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 电池 $\text{SOC} < 90\%$ 。故选取 v 、SOC、以及回收能量 E_{reg} 为优化变量,即:

$$T_c = f(v, \text{SOC}, E_{\text{reg}}) \quad (6)$$

(2) 建立目标函数

为使滑行能量回收效率 η_{gen} 最大,设立目标函数为:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{bat}}} \quad (7)$$

其中,

$$\max E_{\text{reg}}(t) = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{Em}}(v, T_c) dt \quad (8)$$

为保护电池,发电功率不仅受到电机最大发电功率 P_{Em} 影响,受电池最大充电功率 P_{bat} 影响,如图4所示。综合考虑,制动时电机发电功率 $P_0 = \min\{P_{\text{Em}}, P_{\text{bat}}\}$ 。则回收最大能量可表示为:

$$\max E_{\text{reg}}(t) = \int_{t_0}^{t_1} P_0(v, T_c, \text{SOC}) dt \quad (9)$$

滑行期间消耗的总能量为:

$$E_{\text{bat}} = \int_{t_0}^{t_1} \int_{v_0}^{v_1} F_f dv dt \quad (10)$$

由于车辆滑行过程中阻力由两部分组成,分别为行驶阻力 F_u 和电机制动力 F_d , 即:

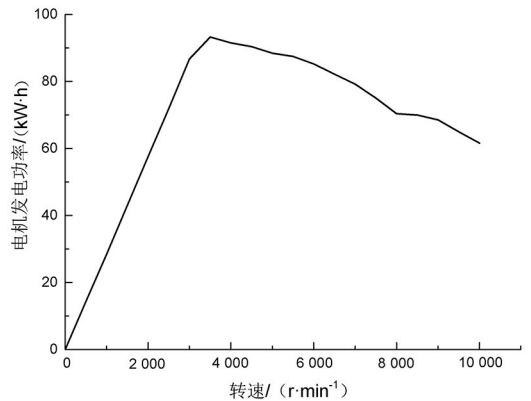
$$F_f = F_u + F_d = \frac{T_{lq} i_0 \eta_t}{r} + mgf \cos \varphi + \frac{C_D A v^2}{21.15} + mg \sin \varphi \quad (11)$$

式中, η_t 为传动效率, φ 为滑行坡度, r 为传动半径,

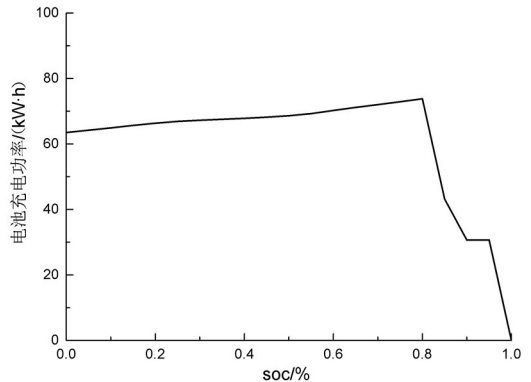
f 为滚动阻力系数, C_D 为风阻系数, A 为迎风面积。

假设 t_0 无限趋近于 t_1 , 则在 $t_0 \sim t_1$ 时间段内车速恒定,在该车速下能耗之比即为瞬时功率之比。将电机转速与车速转换关系 $v = \frac{0.377 r n}{i_0}$ 及式(9)(10)(11)代入式(7)可得到目标函数:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{bat}}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P_0(v, T_c, \text{SOC}) dt}{\int_{t_0}^{t_1} \int_{v_0}^{v_1} F_f dv dt} = \frac{P_0(v, T_c, \text{SOC})}{F_f v} = \frac{\frac{0.377 T_{lq} n \eta_t}{i_0} + mgf \cos \varphi + \frac{0.377^2 r^2 n^2 C_D A}{21.15 i_0^2} + mg \sin \varphi}{F_f v} \quad (12)$$



(a) 电机发电功率限制



(b) 电池充电功率限制

图4 制动功率限制条件

Fig.4 Braking power limitation

(3) 建立约束条件

在车辆滑行过程中需对滑行工况的最大减速度 a 进行限制,由文献[11]可知滑行制动强度 z 一般小于 0.15, 则

$$z = \frac{a}{g} = \frac{F_f}{mg} \leq 0.15 \quad (13)$$

由式(13)(14)可得到制动力矩限制条件:

$$T \leq \frac{ma_0 - mgf\cos\varphi + \frac{0.377^2 r^2 n^2 C_D A}{21.15 i_0^2} + mg\sin\varphi}{i_0 \eta_t} \quad (14)$$

(4) 优化求解

根据所建立优化变量、目标函数及约束条件,调用 Matlab 中 Sheffield 遗传算法工具箱,编写 M 文件,设置各项参数:种群大小为 30,最大进化代数为 50,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.01,个体长度为 20,代沟为 0.95。

滑行状态下不同电机转速对应最佳电机制动力矩不同。在不同电机转速下分别取点,计算其对应最佳转矩。同时,为确保车辆滑行过程中平缓制动,在转速为 $3\,500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时逐渐减小电机制动力矩直至车速为 $10\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时制动力矩为 0。最终求得不同转速下的电机制动力矩如图 5 所示。

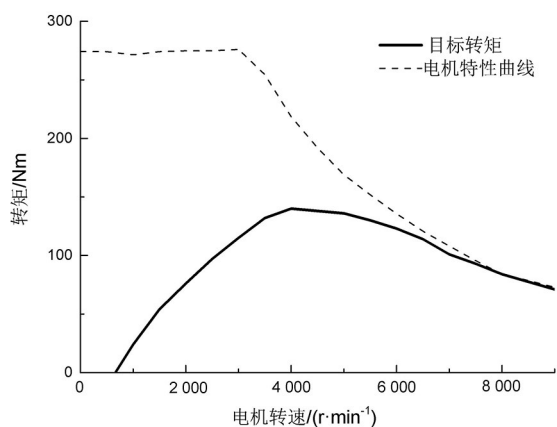


图 5 滑行状态不同转速下对应电机制动力矩

Fig.5 Corresponding motor braking torque at different speeds in coasting state

3 再生制动系统试验与分析

为验证策略的有效性,对搭载本研究控制策略的车辆分别进行循环工况试验和制动工况试验。数据采集过程中,采用 USB-CAN 设备接入车辆 CAN 总线,采集车速、电机制动力矩、踏板行程、电机端输出电流、电压等信号,通过 CANtest 分析采集到的数据,对分析结果进行可视化处理。

3.1 循环工况测试

在循环工况试验中,根据国标 GB/T 38146.1-2019《中国汽车行驶工况第 1 部分:轻型汽

车》^[14]搭建 NEDC 和 CLTC-P 两种工况的试验环境及平台。其中,试验质量为电动汽车整车整备质量与试验所需附加质量的和,其中附加质量为 100 kg,车辆初始 SOC 为 90%。通过轮鼓试验,最终所得结果如图 6 所示。由图 6(a)可以看出在制动过程中,SOC 有明显上升;电机反向充电,电流为负;电机出现负扭矩,为车辆提供制动。

根据循环工况下,回收能量对车辆消耗总能量的贡献程度对该策略进行评价,即:

$$\delta_E = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{reg_off}}} \quad (15)$$

其中, δ_E 为车辆节能贡献度; E_{reg} 为电机回收能量; $E_{\text{reg_off}}$ 为关掉能量回收所消耗的能量。

经计算,NEDC 循环工况下的节能贡献度为:

$$\delta_{E_CLTC-P} = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{reg_off}}} = \frac{2\,685.6}{2\,685.6 + 7\,669.8} = 25.93\% \quad (16)$$

该工况下,节能贡献度均在 20% 以上,充分说明了控制策略在能量回收方面的有效性。

3.2 制动工况测试

制动试验选择在试验场分别进行 90 km/h 时速下的滑行和制动测试。通过控制制动踏板开度模拟滑行、轻度制动、中度制动和重度制动工况,测量不同工况下电机端输出电流 I 及电压 U ,计算出车辆制动能量回收效率 η_{gen} ,即

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{E_{\text{reg}}}{E_{\text{bat}}} \quad (17)$$

其中

$$E_{\text{reg}} = \int_{I \leq 0} UI dt \quad (18)$$

$$E_{\text{bra}} = \frac{1}{2}m(v_e^2 - v_0^2) -$$

$$mgf \int_{t_0}^{t_e} v dt - \frac{1}{2}C_D A \rho \int_{t_0}^{t_e} v^3 dt \quad (19)$$

式中, E_{bra} 为车辆制动过程,车速从 v_0 (t_0 时刻)到 v_e (t_e 时刻)除去滚动阻力和空气阻力消耗的能量。

为验证基于制动踏板的并联制动能量回收控制策略的有效性,将其与车上原来控制策略对比。分别测试在 $90 \sim 10\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滑行工况、制动踏板开度为 37% 的轻度制动工况、制动踏板开度为 55% 的中度制动工况、制动踏板开度为 74% 的重度制动工况,测试结果如图 7 所示。

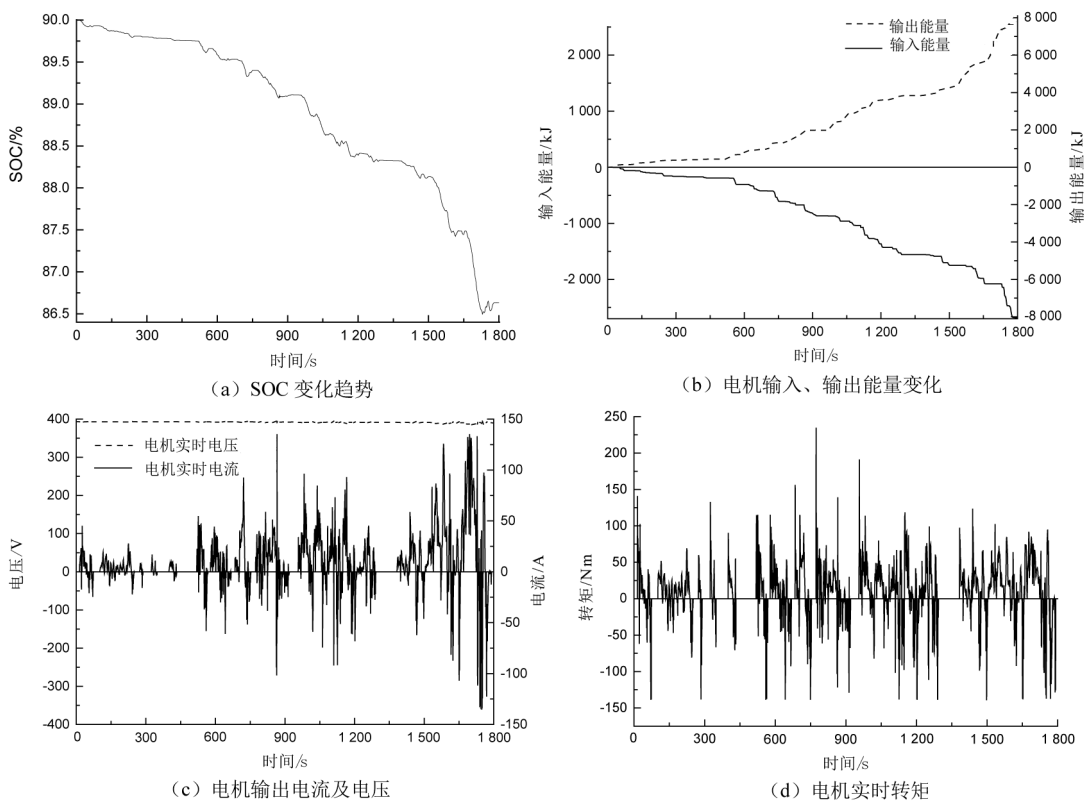


图 6 CLTC-P 循环工况测试结果
Fig.6 CLTC-P cycle test results

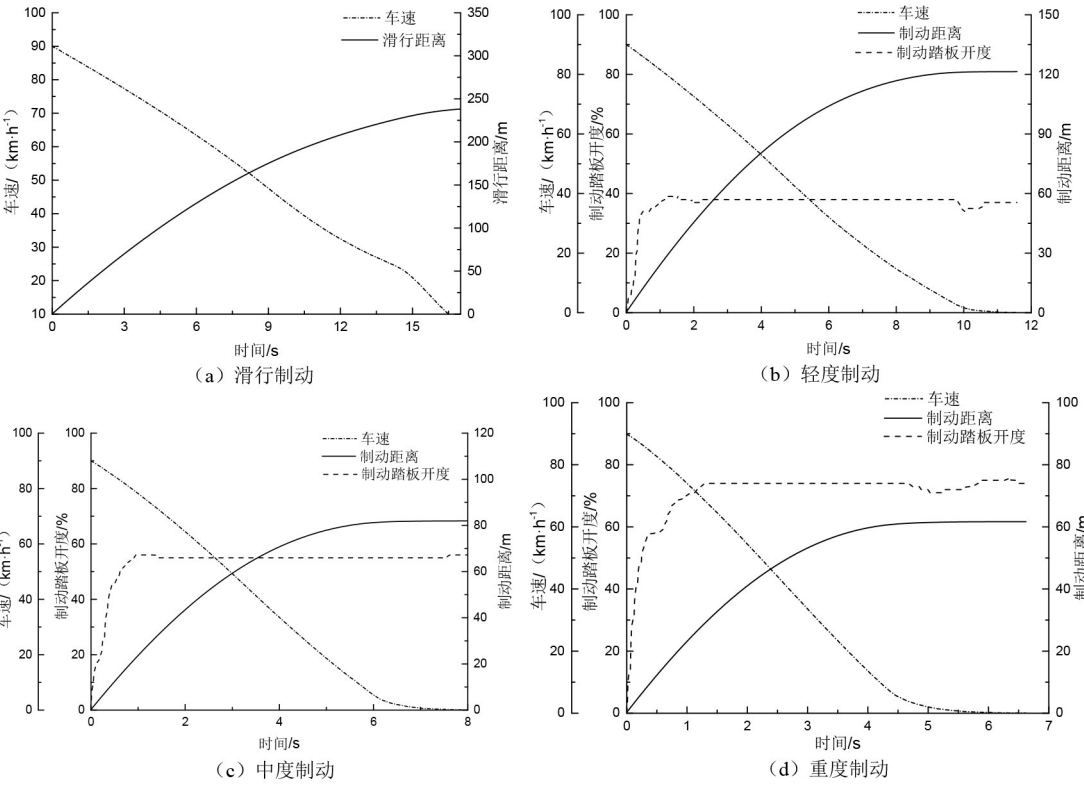


图 7 本文策略制动工况测试结果
Fig.7 Test results of this strategy under braking conditions

对比实验结果,由滑行制动测试结果可以看出,相较于电机制动转矩集中在 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下的原车策略,优化后的滑行制动车速变化更为平缓,大大提升了车辆滑行过程的制动舒适性;对比踏板制动的测试结果,本策略测试中制动踏板尽量与原车策略中制动踏板开度保持一致,优化后车辆的制动距离缩短,制动效果显著提升。由式 (17)~(19) 计算出制动能量回收效率 η_{gen} , 与原

来车上的电机制动策略进行对比如表 1 所示。

对比两种策略发现,本策略在滑行制动工况制动能量回收效率提升 64.07%,轻度制动工况提升 36.74%,中度制动工况提升40.71%,重度制动工况提升 1.11%。本策略能量回收率远高于原来的电机制动策略,从制动距离可以看出本策略对车辆的制动效果也有明显提高。

表 1 不同策略制动效果对比
Tab.1 Comparison of braking effects of different strategies

车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	工况	本文策略		原来策略		能量回收 优化率/%
		能量回收效率/ %	制动距离/ m	能量回收效率/ %	制动距离/ m	
90~10	滑行	70.78	238.98	43.14	312.36	64.07
	轻度制动	43.77	121.35	32.01	199.62	36.74
90~0	中度制动	38.68	81.96	27.49	162.66	40.71
	重度制动	16.41	61.67	16.23	76.71	1.11

分析不同制动踏板开度的工况实验结果发现,滑行时制动能量回收效率提升最明显;之后随着整车需求制动转矩变大,机械制动力参与制动、电机制动力所占比例越来越小,导致滑行制动到中度制动时能量回收效率降低;重度制动时,由于制动强度大,制动时间短、制动能量回收效率最低,提升效果也不明显。

4 结论

在对某前置前驱纯电动汽车进行制动系统结构分析的基础上,充分考虑影响能量回收的制约

因素,对车辆进行制动控制策略设计:在常规制动工况,当制动需求较小时,由前轴再生制动系统提供制动;当制动需求较大时前轴液压制动提供固定制动力,再生制动力辅助满足总制动力需求;当紧急制动时,仅由机械制动提供制动力;在滑行制动工况,以制动能量回收效率为评价指标设立相应目标函数,以加速度和制动力矩为限制条件,计算出电机在不同转速下的最佳制动扭矩。最后,在循环工况及制动工况下,对所设计能量回收策略进行试验分析,结果表明:该控制策略不仅能提升整车能量利用率,且有助于车辆制动。

参考文献:

[1] 欧阳明高. 能源革命与新能源智能汽车[J]. 中国工业和信息化, 2019(11): 21-24.
[2] 陈清泉, 高金燕, 何璇, 等. 新能源汽车发展意义及技术路线研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 68-73.
[3] GURUNATH K, VIJAYAKUMARI A. Regenerative braking control of induction motor in electric vehicles for optimal energy-recovery[M]//Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International Publishing, 2019: 229-238.
[4] XU Z Q. Design and important technical analysis of electric vehicle braking energy recoverysystem[M]//Recent Trends in Decision Science and Management. Singapore: Springer Singapore, 2020: 543-547.
[5] LI Q C, CHIU Y J. Research and simulation analysis of brake energy recovery control strategy for pure electricvehicles[M]//Advances in Intelligent Systems and Computing. Singapore: Springer Singapore, 2020: 103-110.
[6] JIANG B, ZHANG X W, WANG Y X, et al. Regenerative braking control strategy of electric vehicles based on braking stabilityrequirements[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(2): 465-473.