

纯电动汽车制动能量回收策略研究

康俊朋

太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2024年6月24日; 录用日期: 2024年7月4日; 发布日期: 2024年8月15日

摘要

为了提高纯电动汽车的制动能量回收效率, 本文对汽车制动动力学, 制动能量回收的基本结构和原理进行了分析, 提出了一种纯电动汽车制动能量回收控制策略, 该策略综合考虑了影响纯电动汽车制动能量回收的因素, 包括前, 后轴制动力分配, ECE法规, 车速, 电机扭矩, 电池SOC值等。然后分别利用AVL-Cruise, MATLAB/Simulink搭建了控制策略模型和整车模型, 并进行了联合仿真。仿真结果显示, 在该策略运行NEDC工况下, 制动能量回收率达到了10.8%, 因此, 该策略能够有效提升制动能量回收效率, 增加纯电动汽车的续驶里程。

关键词

纯电动汽车, 制动能量回收, 联合仿真

Research on Braking Energy Recovery Strategy for Pure Electric Vehicles

Junpeng Kang

College of Mechanical and Transportation Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Jun. 24th, 2024; accepted: Jul. 4th, 2024; published: Aug. 15th, 2024

Abstract

In order to provide the braking energy recovery efficiency of pure electric vehicles, this paper analyzes the basic structure and principle of automobile braking dynamics and braking energy recovery, and proposes a brake energy recovery control strategy for pure electric vehicles, which comprehensively considers the factors affecting the braking energy recovery of pure electric vehicles, including front and rear axle braking force distribution, ECE regulations, speed, motor torque, battery SOC value, etc. The simulation results show that the braking energy recovery rate reaches 10.8% under the NEDC working condition of the strategy, so the strategy can effectively improve

the braking energy recovery efficiency and increase the driving range of pure electric vehicles.

Keywords

Battery Electric Vehicles, Braking Energy Recovery, Joint Simulink

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 能源短缺, 环境污染等全球问题日益突出[1]。与传统燃油汽车相比, 纯电动汽车具有能量利用率高, 结构简单, 维修方便, 噪音低, 行驶过程中零污染等优点, 因此纯电动汽车大有取代传统燃油汽车的趋势[2] [3]。然而现有的纯电动汽车普遍具有续航里程普遍较短和充电速度较慢等问题, 这严重制约了纯电动汽车的发展。由于现有技术的制约, 很难有效通过增加动力电池的数量或者提升电池密度等方法来增加纯电动汽车的续航里程[4]。因此, 需要从其他方面入手提升纯电动汽车的续航, 制动能量回收便是其一。

研究表明, 汽车在行驶过程中, 有大量的能量被消耗在制动过程中, 这部分能量大约占到 50%左右, 最终以热能的形式消散, 未能得到有效利用[5]。纯电动汽车在制动过程中, 电动机的功能可转化为发电机, 将汽车的部分动能转化为电能。与此同时, 电机发电产生的电制动力矩, 可以为纯电动汽车提供一定的再生制动力矩, 使得机械制动需要承担的制动摩擦力矩减少, 从而减缓制动器摩擦片磨损, 提高汽车行驶安全性[6] [7]。

Meng [8]设计了一种再生制动控制策略, 该策略基于模糊控制, 使其在满足汽车制动要求的同时, 尽可能地回收制动能量。Montazeri-Gh 和 Mahmoodi-k [9]提出了一种电动汽车最优能量管理系统, 该种控制策略基于遗传算法。根据该种控制策略又对电池初始荷电状态(SOC)和混合因子对混合动力汽车性能进行研究, 分析了 SOC 和混合因子对制动回收的影响, 并且评估了混合动力汽车的油耗和排放。试验结果表明, 与原先配置相比, 提出的控制策略可以使平均油耗降低约 14%。而多种道路条件下可以减少大约 10%的污染排放, 有效的降低了汽车尾气排放带来的环境污染。美国北卡罗来纳州立大学的 Gao [10]提出串联, 并联两种控制策略, 其中并联控制策略只采用固定比例分配方式, 能够有效提升续航里程, 其结构相对简单, 目前在现有纯电动客车上得到了广泛的应用。

本文基于前轮驱动式纯电动汽车, 提出了一种控制策略, 该策略综合考虑了汽车制动时的车速, 电池 SOC 值等因素, 在保证汽车制动稳定性的前提下, 将制动时的部分动能转化为电能。经过仿真结果验证, 在 NEDC 工况下, 汽车再生制动能量回收效率为 10.8%, 证明该策略能够有效提升纯电动汽车的能量利用率, 增加纯电动汽车的续航里程。

2. 纯电动汽车制动能量回收理论

2.1. 纯电动汽车制动过程动力学分析

纯电动汽车在制动过程中受到阻力主要有滚动阻力 F_f , 空气阻力 F_w , 坡度阻力 F_i 和复合制动力 F_b , 这四个力之和, 使汽车能够减缓车速乃至停车[11]。由整车动力学可知

$$F_m = F_f + F_w + F_i + F_b \quad (1)$$

其中，滚动阻力 F_f

$$F_f = mg \cos \alpha \quad (2)$$

空气阻力 F_w

$$F_w = \frac{C_D A u_a^2}{21.15} \quad (3)$$

坡度阻力 F_i

$$F_i = mg \sin \alpha \quad (4)$$

复合制动力 F_b

$$F_b = F_u + F_m \quad (5)$$

式中， F_u 为前后轮地面制动力， F_m 为电机制动力

$$\begin{cases} F_u = \mu mg \\ F_m = T_m \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t / r \end{cases} \quad (6)$$

其中 μ 为地面附着系数， T_m 为电机输出扭矩， i_0 为主传动比， i_g 为主传动比， η_t 为传动系效率， r 为车轮半径。

2.2. 制动能量回收的基本结构和原理

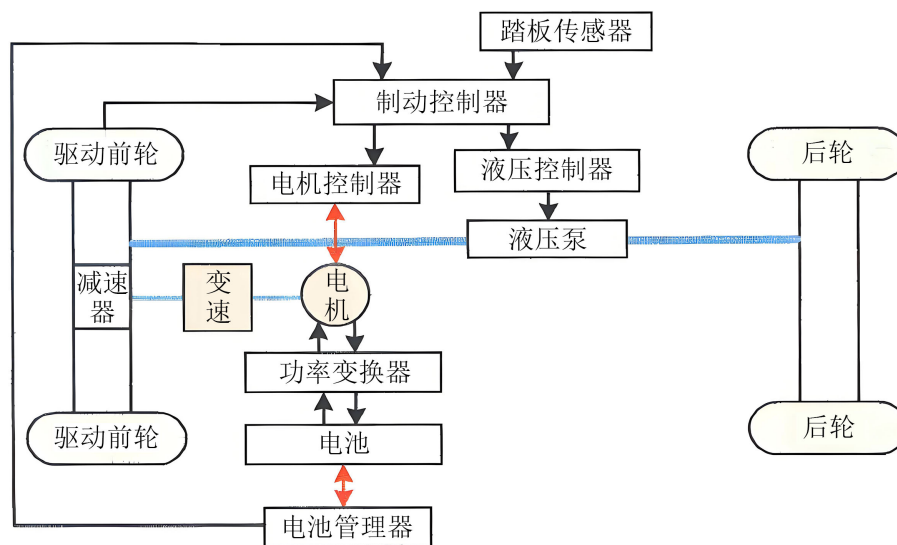


Figure 1. Basic structure of the regenerative braking system

图 1. 制动能量回收系统的基本结构

与传统燃油汽车相比，制动能量回收是纯电动汽车独有的功能[12]。纯电动汽车的唯一动力来源是电机。制动能量回收控制策略集成在制动控制器中，在制动过程中，相关传感器将采集到的制动踏板信号传输到制动控制器中，随后制动控制器计算所需总的制动力，并对车速，SOC，电机转矩，汽车行驶状态等进行分析，分配机械制动和再生制动的比例，如果满足条件，能够进行制动能量回收，电机控制器就会收到信号后控制电机反转，在此期间，电机用作为发电机，将汽车的一部分动能转化为电能通过

功率转换器储存到电池当中。因此，该功能可以有效的提升纯电动汽车的续驶里程。(图 1)

2.3. 制动能量回收评价指标

纯电动汽车制动能量回收可以用制动能量回收的效果可以用制动能量回收率 η 来评价[13]。在制动过程中，汽车动力电池释放的能量为：

$$E_b = \frac{1}{2}m(v_2^1 - v_1^2) \quad (7)$$

动力电池实际回收的能量为：

$$E_q = \int P_b dt (P_b = 0) \quad (8)$$

其中， v_2 为制动后的车速； v_1 为制动前的车速；

所以汽车再生制动能量回收率 η 为：

$$\eta = \frac{E_q}{E_b} \times 100\% \quad (9)$$

3. 制动能量回收关键影响因素分析

对于纯电动汽车来说，在满足制动稳定性的前提下，将制动时的动能尽可能的转化为电能。但是许多因素都对制动回收产生重要影响，如汽车 ECE 制动法规，蓄电池的充电功率，电机性能约束以及行驶工况等[14]。

3.1. ECE 制动法规约束

3.1.1. 前后轮制动力分配

纯电动汽车在制动过程中，一般会发生一下三种情况。(1) 当前轮比后轮先抱死时，在这种情况下，汽车车辆不能够完全利用道路的附着条件，同时丧失转向能力，应当避免。(2) 当后轮比前轮先抱死时，如果汽车制动时的车速较高，则极易发生侧滑，所以必须避免。(3) 当前、后轮同时抱死时，在这种情况下汽车处于稳定的状态，可以充分利用地面的附着条件，所以是三种情况中较为安全的情况。

综上所述，为保证汽车制动时的安全性，在制动时前后轮应当同时抱死，此时汽车前，后轴制动力分配按照理想制动力分配曲线，即为 I 曲线。如图所示

$$F_{\mu 2} = \frac{1}{2} \left[\frac{G}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{G} F_{\mu 1} - \left(\frac{Gb}{h_g} + 2F_{\mu 1} \right)} \right] \quad (10)$$

见图 2，当前后轮制动分配位于 I 曲线下方时，汽车前轮先抱死，后轮后抱死，所以属于较为安全的工况；当位于 I 曲线上方时，汽车的后轮先抱死，属于危险工况。所以制动力分配应该在 I 曲线下方。

3.1.2. ECE 制动法规

欧洲经济委员会(ECE)明确规定了当汽车的利用附着系数 φ 值处于 0.2~0.8 之间时，制动时必须符合以下条件[15]：

$$z \geq 0.1 + 0.85(\varphi_i - 0.2) \quad (11)$$

其中， φ_i ：第 i 轴的制动力与地面对该轴的法向反力之比

这些条件使汽车在制动时可以兼顾稳定性和制动强度。同时为了保证制动时汽车的前轮先于或者同时与后轮抱死，ECE 还规定了前轴的利用附着系数要大于后轴的利用附着系数，所以综上可得：

$$\frac{(F_{\mu 1} + F_{\mu 2})^2 h_g}{mgL} + \frac{(F_{\mu 1} + F_{\mu 2})(0.07h_g + b)}{L} + \frac{0.07mgb}{L} - 0.85F_{\mu 1} = 0 \quad (12)$$

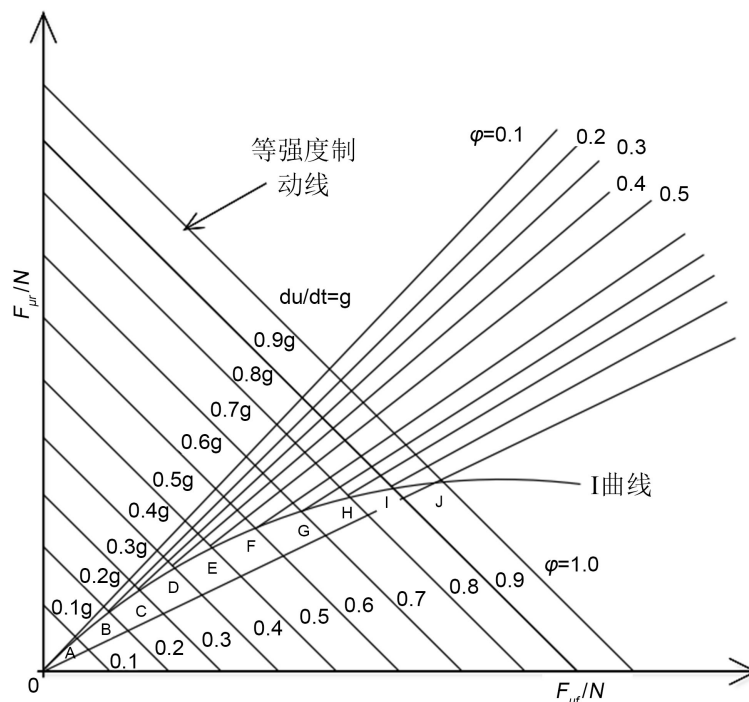


Figure 2. Ideal front and rear braking force distribution curve (I curve)
 图 2. 理想前后制动力分配曲线(I 曲线)

ECE 制动法规边界曲线又称为 M 曲线，见图 3

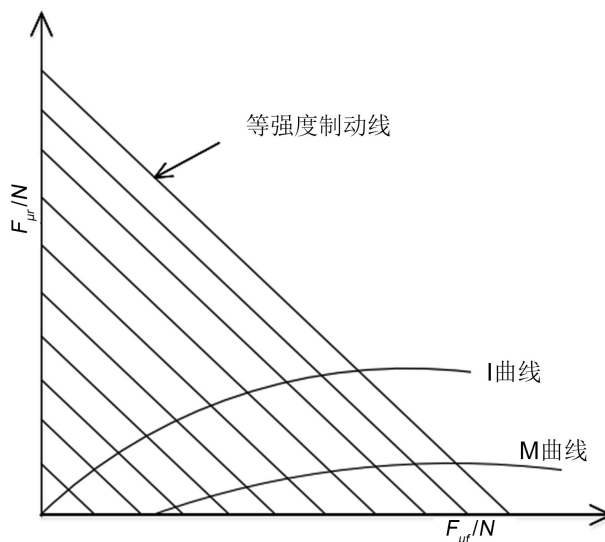


Figure 3. ECE brake regulation curve (M curve)
 图 3. ECE 制动法规曲线图(M 曲线)

综上所述，为满足纯电动汽车制动安全性和 ECE 法规，制动力分配区间应在 I 曲线和 M 曲线之间，

并且尽量靠近 I 曲线。

3.2. 电机制动力矩约束

制动过程中电机所提供再生制动转矩的大小影响着制动时电机所能够提供制动力的大小，而电机转速特性及车速等因素影响着电机所提供制动转矩的大小。电机的转矩特性可以用公式：

当 $n < n_e$ 时

$$T_m = T_{\max} \quad (13)$$

当 $n \geq n_e$ 时

$$T_m = 9550P_e/n \quad (14)$$

其中， T_m ：电机的再生制动转矩(Nm)； T_{\max} ：电机的最大转矩(N·m)；

n_e ：电机的额定转速(r/min)； P_e ：电机额定功率(kw)。

当电机转速较低时，此时汽车速度较低，此时如果开启再生制动系统，不仅无法回收较多的能量，反而可能会对汽车制动时的安全性造成影响。

当电机转速小于 50 r/min 时，关闭再生制动。所以最终的公式为(16)所示：

$$T_m = \begin{cases} 0 & n < 50 \\ T_{\max} & 50 \leq n \leq n_e \\ 9550P_e/n & n > n_e \end{cases} \quad (15)$$

3.3. 电池 SOC 值约束

制动时，当汽车电池 SOC 大于 0.8 或者小于 0.2 时，应当关闭再生制动。因为是考虑到对电池的保护。若电池 SOC 值大于 0.8 时，为了避免电池过度充电，延长电池寿命，关闭再生制动；小于 0.2 时，汽车进入回家模式，在限制电量输出的同时制动能量回收系统也要关闭；所以当 $0.2 \leq \text{SOC} \leq 0.8$ 时，开启制动能量回收系统，由制动强度 z 来分配再生制动和机械摩擦制动。

3.4. 制动能量回收策略的具体设定

综上所述，当汽车车速 $v < 5 \text{ km/h}$ 且 $0.2 \leq \text{SOC} \leq 0.8$ 时，开启制动能量回收系统。

纯电动汽车的前后轴制动力分配策略根据制动强度大小可以分为电机制动，机电复合制动两个阶段：

(1) 电机制动($0 \leq z \leq 0.1$)

由上文 ECE 法规及式子(12)可知，M 曲线与横坐标的交点($F_{\mu 2} = 0$ 时)将相关数据代入(12)可得 z 约等于 0.1，此时在电机制动阶段，制动强度较小，此时整车所需制动力全部由电机提供，机械制动系统不参与工作。此时前后轴机械摩擦制动力为 0，所以制动力具体分配为：

$$\begin{cases} F_m = mgz \\ F_{\mu 1} = F_{\mu 2} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

(2) 机电复合制动($0.1 < z < 0.8$)

当制动强度 z 大于 0.1 时，机械制动和电机制动系统同时参与工作，前后轴制动力分配按照 I 曲线进行分配，其中又可分为两种情况：

当电机最大制动力大于前轴所需制动力时，前轴制动力由电机提供；当电机最大制动力小于前轴所需制动力时，电机提供其最大制动力，剩余前轮所需制动力由前轮机械摩擦制动力提供制动力由。后轴的机械摩擦制动力的分配按照 I 曲线来分配。

当前轴所需制动力能全部由电机提供时，制动力分配为：

$$\begin{cases} F_{\mu 11} = F_m = \frac{mgz(b+z h_g)}{L} \\ F_{\mu 2} = \frac{mgz(a-z h_g)}{L} \\ F_{\mu 1} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

当前轴所需制动力大于电机制动力时：

$$\begin{cases} F_{\mu 11} = \frac{mgz(b+z h_g)}{L} \\ F_{\mu 2} = \frac{mgz(a-z h_g)}{L} \\ F_m = \frac{mgz_A(b+z_A h_g)}{L} \\ F_{\mu 1} = F_{\mu 11} - F_m \end{cases} \quad (18)$$

(3) 机械制动($z > 0.8$)

当制动强度 z 较大时，属于紧急制动情况，以汽车的安全性为前提，所以仅有机械制动系统工作，电机制动系统不参与工作。

$$\begin{cases} F_{\mu 1} = \frac{mgz(b+z h_g)}{L} \\ F_{\mu 2} = \frac{mgz(a-z h_g)}{L} \end{cases} \quad (19)$$

综上所述，纯电动汽车控制策略流程见图 4：

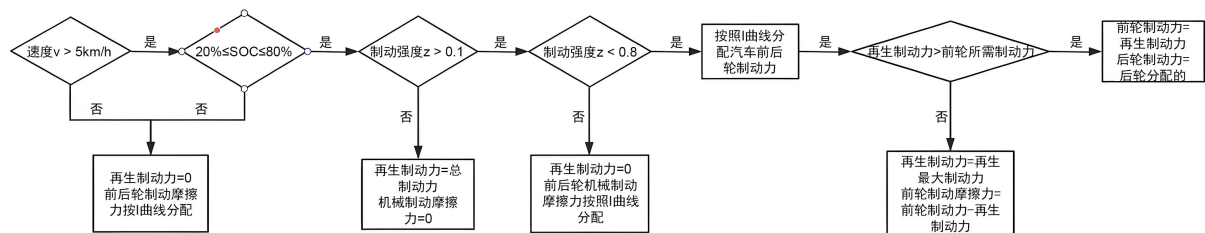


Figure 4. Flow chart of braking energy recovery control strategy for pure electric vehicles

图 4. 纯电动汽车制动能量回收控制策略流程图

4. 建模与仿真

以某款前轮驱动纯电动汽车作为研究对象，首先在 AVL-Cruise 软件中搭建整车模型，整车基本参数见表 1 所示。

基于上文第三章设计的纯电动汽车制动能量回收策略，利用 MATLAB/Simulink 搭建控制策略模型，模型见图 5 所示。该控制策略模型主要包括制动强度计算模块，电机充电限制扭矩模块，电池充电限制模块，车速，SOC 值限制模块以及制动力分配计算模块等。然后生成 DLL 文件并嵌入到 AVL-Cruise 软件搭建的整车模型中，实现联合仿真。

Table 1. The basic parameters of the whole vehicle
表 1. 整车基本参数

整车参数	数值	整车参数	数值
整备质量(kg)	2100	主传动比	6.89
最大质量(kg)	2475	迎风面积 A (m ²)	1.75
轴距 L (m)	2.92	传动系效率(η_t)	0.95
前轴距 a (m)	1.48	滚动半径 r (m)	0.315
轮胎半径 r (m)	0.297	电机额定功率(kw)	90
空气阻力系数 C_D	0.233	电机额定转速(r/min)	3800
最大车速(km/h)	150	电池容量(A·h)	220
车长(mm)	4994	电池数量	500
车宽(mm)	1910	质心离地距离(m)	0.5
车高(mm)	1495		

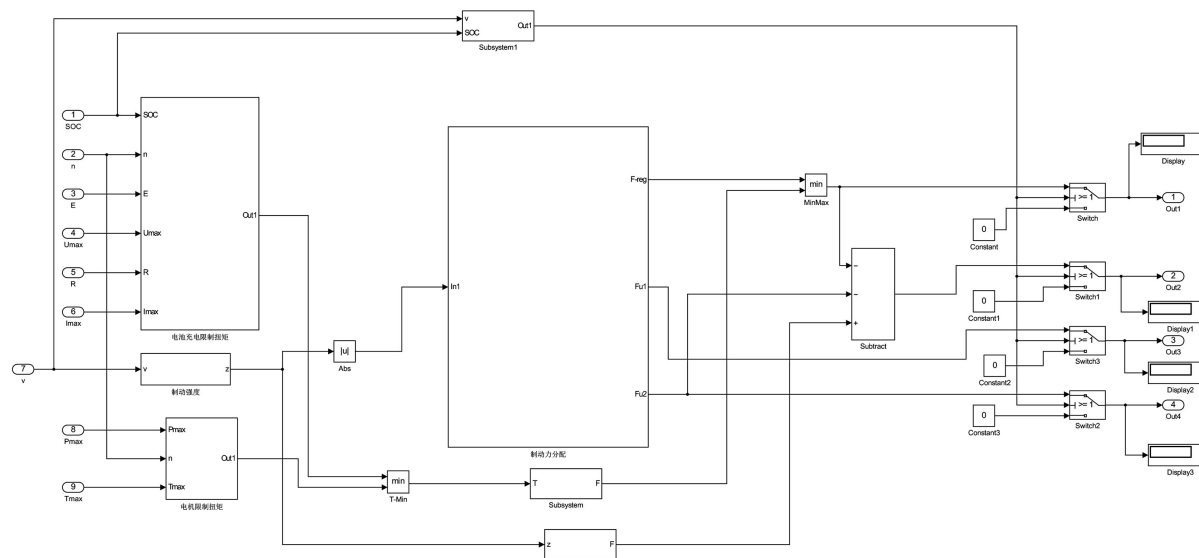


Figure 5. Braking energy recovery strategy model of pure electric vehicle
图 5. 纯电动汽车制动能量回收控制策略模型

5. 仿真结果分析

循环工况 NEDC (New European Driving Cycle)主要有欧洲、中国等国家或地区使用[16]。NEDC 循环工况共 1190 s, 该工况有 4 个市区和 1 个郊区循环工况。为了尽可能的模拟实际的市区市郊道路情况, NEDC 还对对不同的工况下的车速作了不同的规定, 同时会有不断的加速减速, 因此可以用来验证制动能量回收效果。电池 SOC 初始值定为 80%, 固定步长为 0.01 s, 循环时间为 1190 s。NEDC 循环工况车速变化见图 6 所示。(图 7)

从图 8 中可以看出循环工况开始后, 电池的 SOC 值总体上呈现下降的趋势, 但是从局部来看会有短暂的回升, 表明有制动能量回收。

图 9 为纯电动汽车的总的能量输出, 输入, 电池能量的输出, 输入。由该图可知, 运行完 NEDC 工

况后，纯电动汽车总的能量输出为 5994 KJ，总的能量输入为 645 KJ，所以可由公式(9)可知，汽车再生制动能量回收率 $\eta = 10.8\%$ ，所以可以证明本文所选用的制动能量回收控制策略有效，也证明了制动能量回收能够有效的延长汽车的续驶里程，对纯电动汽车的发展具有重要意义。

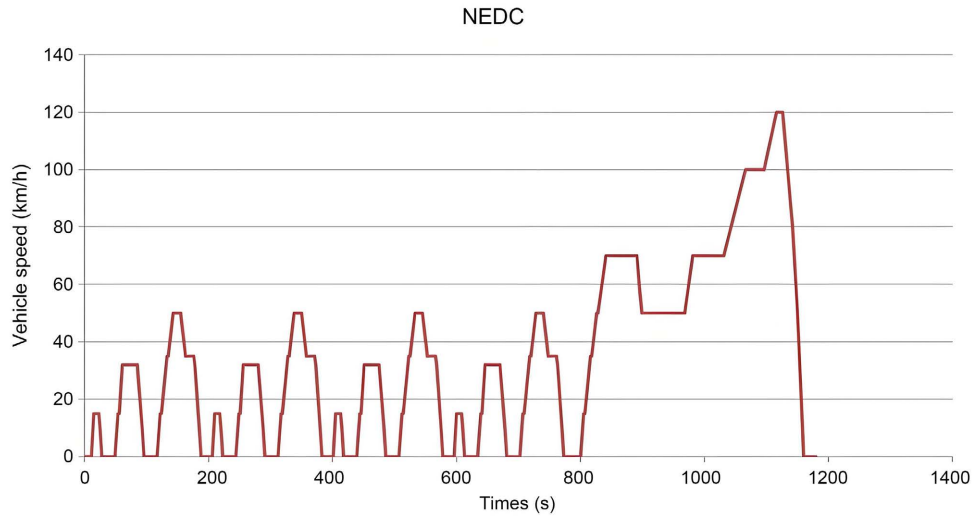


Figure 6. NEDC cycle vehicle speed change
图 6. NEDC 循环工况车速变化

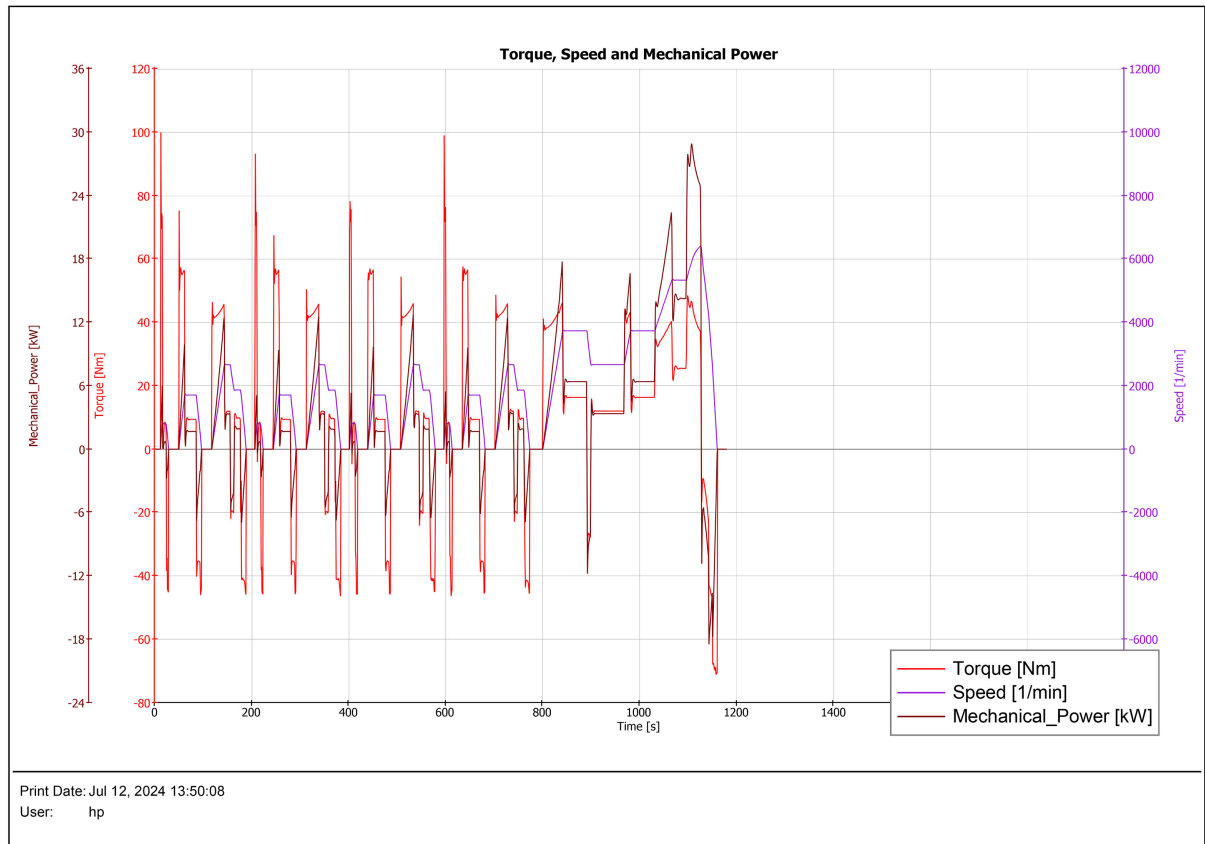


Figure 7. Motor torque, motor speed, motor power
图 7. 电机扭矩，电机转速，电机功率

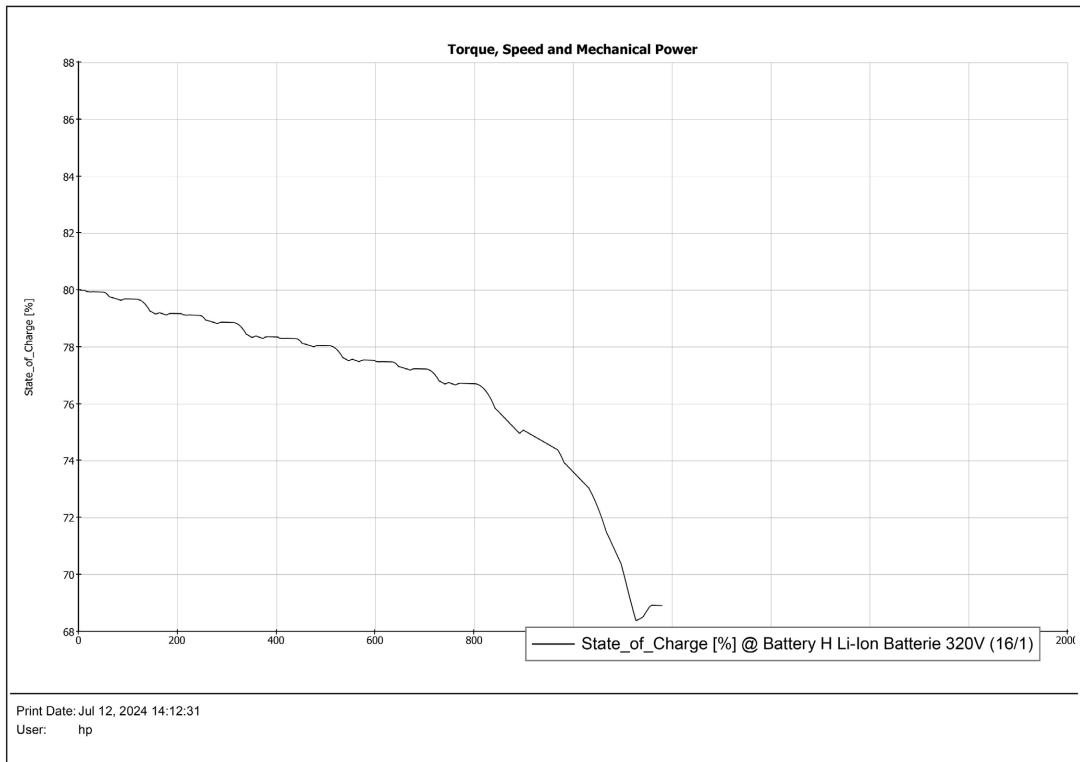


Figure 8. Variation of SOC value in the charge state of the power battery

图 8. 动力电池电荷状态 SOC 值变化图

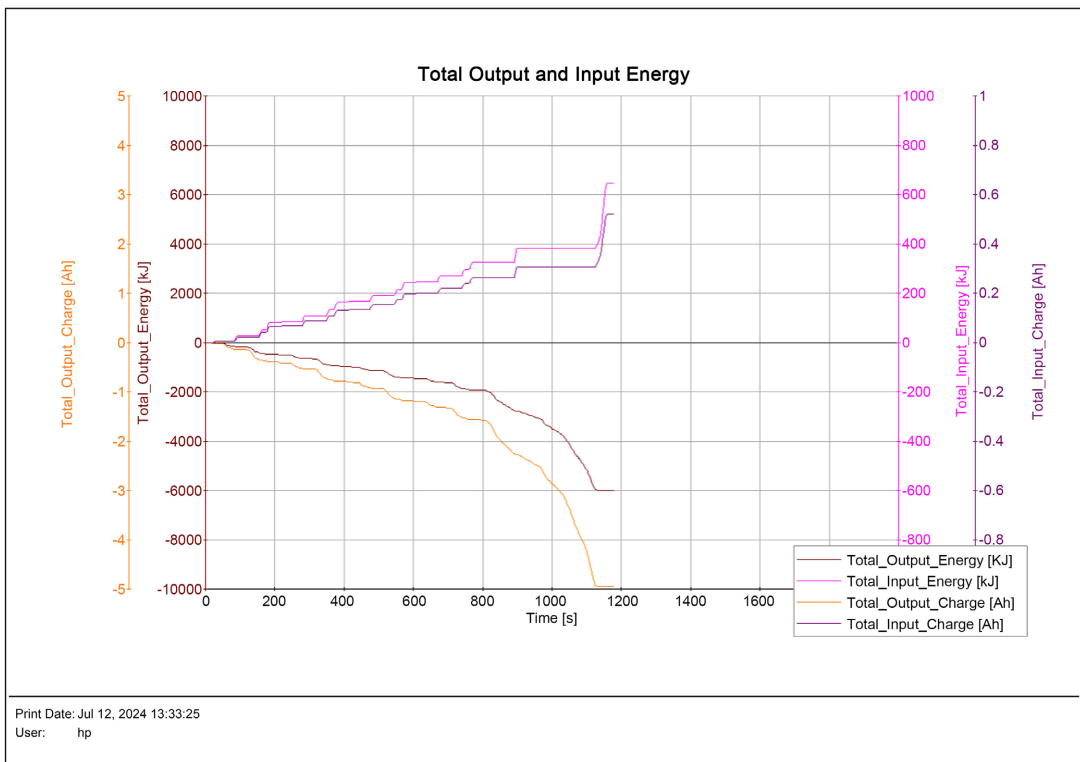


Figure 9. The total energy output and input of pure electric vehicles

图 9. 纯电动汽车总的能量输出输入

6. 结论

本文以前驱纯电动汽车为研究对象, 针对纯电动汽车续航里程普遍较短的问题, 从提高纯电动汽车制动能量回收效率为目标, 对整车制动过程动力学进行了分析, 分析了制动过程中前, 后轴制动力分配原则, 明确了汽车安全制动分配范围, 提出了一种纯电动汽车制动能量回收控制策略, 该策略综合考虑了制动过程中的车速, 电池 SOC 值, 电机再生制动力矩等因素。分别使用 Simulink 和 Cruise 软件搭建控制策略模型和整车模型并进行联合仿真。依据仿真结果, 在循环一个 NEDC 工况下, 汽车 SOC 值整体呈现下降趋势, 但是局部有明显回收, 汽车能量总输出为 5994 KJ, 总输入为 645 KJ, 制动能量回收率为 10.8%。证明了本文设计的制动能量回收控制策略有效。

参考文献

- [1] 赵旭, 高胜辉, 李林. 单踏板模式下纯电动汽车制动能量回收[J]. 时代汽车, 2023(20): 136-138.
- [2] 胡建国, 龚春忠, 张永, 等. 电动汽车制动能量回收技术研究[J]. 汽车实用技术, 2019(2): 10-12.
- [3] 许妍妍, 樊宇, 潘毅, 等. 基于多目标优化的混合动力城市物流车制动能量回收控制策略研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(4): 528-538.
- [4] 孙文, 张涵睿, 张津硕, 等. 新能源汽车再生制动能量回收研究综述[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(4): 470-480.
- [5] 洪庆良, 王万顺, 孙仁杰, 等. 再生制动能量回收对制动系统开发的影响[J]. 北京汽车, 2022(4): 1-4+12.
- [6] 周豪. 纯电动汽车动力系统参数匹配及制动能量回收控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- [7] 徐海彤, 樊亚军, 贺赵豫. 纯电动汽车再生制动控制策略[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(1): 5-10.
- [8] Gao, Y. and Ehsani, M. (2010) Design and Control Methodology of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **57**, 633-640. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2027918>
- [9] Chen, Z., Tan, G., Lin, C., et al. (2014) Braking Energy Recovery of Pure Electric Vehicle Based on Fuzzy Algorithm. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, **25**, 32-37.
- [10] Gao, Y.M., Chen, L.P. and Ehsani, M. (1999) Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV.
- [11] 张瑞军. 纯电动汽车制动能量回收率的影响因素分析[J]. 现代盐化工, 2018, 45(5): 109-110.
- [12] 赵国宇, 张轶, 郭斌, 等. 纯电动轿车制动能量回收试验研究[J]. 汽车实用技术, 2017(18): 117-119.
- [13] Endo, H. (2003) Development of Toyota's Transaxle for Mini-Van Hybrid Vehicles. *JSAE Review*, **24**, 109-116. [https://doi.org/10.1016/s0389-4304\(02\)00238-2](https://doi.org/10.1016/s0389-4304(02)00238-2)
- [14] 孟祥飞, 卢衍彬, 王仁广, 等. 电动汽车制动能量回收相关技术[J]. 汽车工程师, 2019(2): 11-13+17.
- [15] 刘文亮, 张浩然, 黄成林, 等. 新能源车制动能量回收分析[J]. 北京汽车, 2022(4): 5-7+25.
- [16] 马文静. 电动汽车制动能量回收控制系统的设计[J]. 常州信息职业技术学院学报, 2019, 18(3): 35-38.