

微型电动车再生制动模拟试验系统建模与仿真

周壮¹, 周长峰^{1*}, 王利民², 徐泽¹

1. 山东交通学院汽车工程学院, 山东 济南 250357; 2. 北汽福田汽车股份有限公司时代事业部, 山东 潍坊 262200

摘要:为准确模拟微型电动车再生制动工况,采用软件 MATLAB/Simulink 搭建微型电动车再生制动试验系统模型,进行再生制动仿真分析,计算驱动电机在强制制动和弱制动模式下微型电动车的再生制动效率。仿真结果表明:该微型电动车加速踏板开度为 95% 时,驱动电机在强、弱制动模式下的再生制动效率分别为 60.3% 和 14.6%,期望强、弱再生制动效率分别为 60.0%、15.0%,二者基本吻合;制动减速度越大、再生制动时间越长,再生制动能量越大,驱动电机强制制动模式可增大制动再生能量,延长微型电动汽车的续驶里程。

关键词:微型电动车;再生制动;试验系统;仿真

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)03-0094-08

引用格式:周壮,周长峰,王利民,等.微型电动车再生制动模拟试验系统建模与仿真[J].山东交通学院学报,2025,33(3):94-101.

ZHOU Zhuang, ZHOU Changfeng, WANG Limin, et al. Modeling and simulation of regenerative braking test system for micro electric vehicles[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(3): 94-101.

0 引言

全球能源危机与环境污染问题日益严峻,汽车产业逐渐从传统内燃机汽车向新能源汽车转型。在车辆运行过程中,制动系统消耗部分能量,若能有效回收并利用这部分能量,将显著提高电动汽车的续航里程^[1-3]。再生制动技术是将车辆制动时的动能转化为电能并存储于动力电池中,提高整车能量利用率,延长车辆续驶里程^[4-5]。研究再生制动技术对电动汽车的发展具有重要的理论意义和实践价值。

再生制动技术优化与控制策略已成为电动汽车领域的热点研究方向之一。宁水根等^[6]构建具有多功能性与良好扩展性的在环仿真再生制动试验平台,可加载不同的试验条件研究不同车辆的再生制动技术。秦揽悦等^[7]提出基于模糊控制的再生制动策略,设计并开发模糊控制器,在新欧洲驾驶循环(new European driving cycle, NEDC)及联邦测试程序-75(federal test procedure-75, FTP75)工况下整车能量再生效率分别提高 3.5% 和 6.8%。王培振^[8]分析制动能量回馈系统的结构和相关理论,提出一种新型制动能量回馈系统结构,将超级电容器串、并联切换技术与功率变换器结合,能在更大速度范围内回收能量,提高能量回馈效率;通过搭建制动能量回馈系统小型试验台,验证新型制动能量回馈系统和控制策略的准确性和有效性。方桂花等^[9]为提高电动汽车再生制动效率,分析传统再生制动模糊控制策略的优缺点,并结合电机变速变负载的发电特性,改进模糊控制策略,设计变搜索步长三点比较法,在软件 MATLAB/Simulink 与 Cruise 中搭建控制策略与整车模型进行联合仿真,结果表明设计的控制策略比传统模糊控制策略能量再生效率提高 10.12%。张兆龙^[10]分析车辆制动理论,设计并联式再生制动系统,仿真及试验结果表明整车在 NEDC 工况下续驶里程延长 15%,欧洲经济委员会(economic commission for

收稿日期:2024-06-14

第一作者简介:周壮(1997—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为汽车电机控制系统,E-mail:874150909@qq.com。

***通信作者简介:**周长峰(1976—),男,山东聊城人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为车辆动力学仿真及优化设计,E-mail:zcf1976@163.com。

Europe, ECE) 工况下续驶里程延长 23%。孙东升^[11]设计开发再生制动试验平台,完成以电惯量模拟车辆行驶负载的再生制动研发测试平台的总体设计,设计基于比例-积分控制器的系统速度控制结构,分析系统结构特点并搭建系统控制框图,通过经济性测试试验检验系统的再生制动经济贡献率,试验结果表明系统达到设计指标。

部分学者根据汽车行驶方程,对制动过程进行受力分析,得到汽车制动力方程,搭建制动系统力学模型,分析再生制动效率的影响因素。李学凯^[12]以混合动力汽车为研究对象,分析制动过程受力状况,得出制动行驶方程,构建混合动力汽车模型,在普通循环路况下分析再生制动效率与初始车速和制动减速度的关系。詹慧贞等^[13]通过梳理电动汽车能量流机理,建立车辆再生制动效率函数关系式,分析再生制动效率的影响因素。

部分学者以制动意图、制动力分配为研究对象,提出提高再生制动能量的控制策略。Li^[14]以前驱纯电动汽车为研究对象,采用模糊控制策略设计再生制动策略,设置车辆制动强度、行驶速度和电池充电状态 3 个输入参数,输出制动力分配系数,其设计的模糊控制再生制动策略可延长电动汽车的续驶里程,提高能量利用率。苏玉青^[15]提出复合制动系统的制动力分配策略,建立再生制动系统各部件的模型,验证所提出制动力分配策略的可行性和有效性。刘晋霞等^[16]提出模糊逻辑控制的再生制动控制策略,根据制动强度计算制动力曲线和 ECE 法规线,合理分配前、后轮电机制动力和制动器制动力,与查表法控制策略相比,模糊逻辑控制策略下电动汽车的行驶时间增加 12.2%。上述文献从再生制动系统设计、再生制动系统建模和仿真、再生制动控制策略等方面研究电动汽车再生制动,但对微型电动车再生制动的研究相对较少。

微型电动车是一类小型化、轻量化、低能耗的电动车辆,通常用于城市短途出行,具有经济、环保、灵活等优势。本文以某微型电动车为研究对象,通过软件 MATLAB/Simulink 建立再生制动模拟试验系统并进行仿真分析,研究微型电动车制动再生能量与再生制动效率,探讨再生制动效率的影响因素,为微型电动车再生制动试验台的试制奠定基础。

1 再生制动模拟试验系统建模

为满足再生制动模拟试验系统中汽车电机扭矩与环境电机转速协调控制的要求,通过软件 MATLAB/Simulink 建立微型电动车驱动工况及再生制动工况的动力学模型。微型电动车再生制动仿真模型主要包括整车扭矩管理模块和车辆运行模块两部分,其系统架构如图 1 所示。

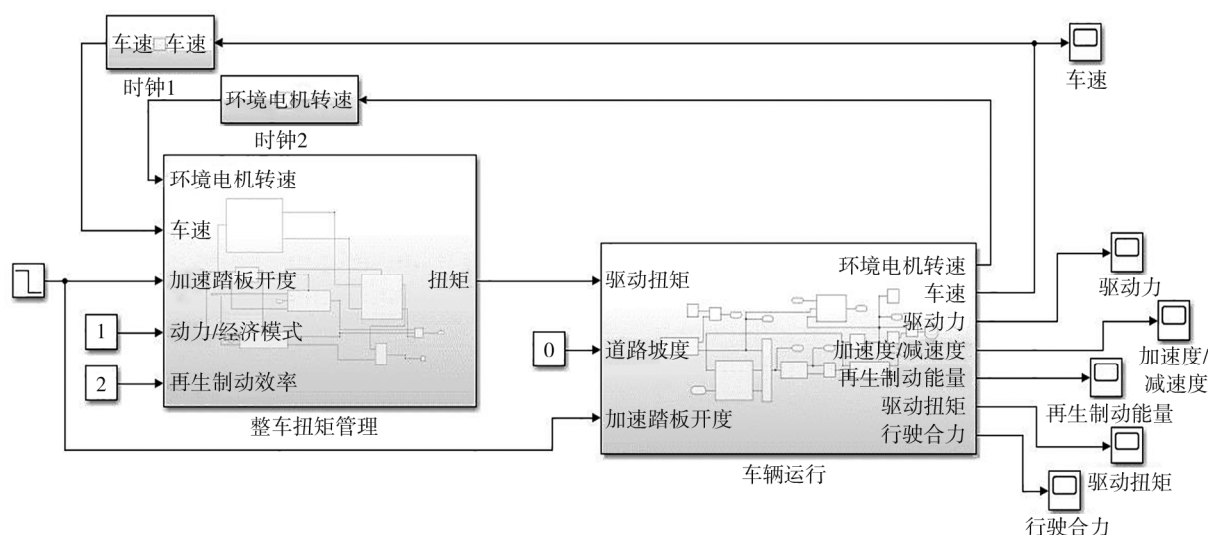


图 1 微型电动车再生制动仿真模型

整车扭矩管理模块输出扭矩信号,车辆运行模块输出车速及环境电机转速信号。通过调节整车扭矩管理模块中的“动力/经济模式”可调节车辆运行模式:0 为经济模式,1 为动力模式。“再生制动效率”可调节再生制动强度:0 为无再生制动;1 为驱动电机弱再生制动,期望再生制动效率为 15.0%;2 为驱动电机强再生制动,期望再生制动效率为 60.0%。整车扭矩管理模块将扭矩信号传递给车辆运行模块。

通过上位机由总控制器控制再生制动模拟试验系统中的控制器和测量系统,上位机内置车辆动力学模型并开发可视化操作界面,由上位机实现试验的启动与结束。在上位机操作界面中显示试验测量得到的转速、转矩等数据。微型电动车再生制动模拟试验系统工作流程如图 2 所示。试验系统启动时,将动力学模型计算的汽车电机驱动扭矩 T 和环境电机转速 n 分别传递给汽车电机控制器与环境电机控制器,扭矩、转速传感器测量实际扭矩并判断是否达到目标扭矩 T^* 和目标转速 n^* ,若未达到,则通过控制器重新调节,直至满足条件。当满足扭矩和转速条件,且加速踏板开度为 0 时,进入再生制动模式,直至 $n=0$,再生制动模拟试验系统停止工作。

1.1 整车扭矩管理

在进行整车行驶仿真时,需根据当前环境电机转速、加速踏板开度及其他部件的扭矩限制等计算整车扭矩。当整车进入准备状态,挡位为前进挡或倒车挡,加速踏板开度大于 0 时,汽车电机控制器发送驱动扭矩请求,请求驱动扭矩

$$T_r = T_{m,\max} \alpha, \quad (1)$$

式中: $T_{m,\max}$ 为当前环境电机转速对应的最大扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; α 为加速踏板开度, %。

电池最大允许放电功率对应的输出扭矩

$$T_{b,\max} = I_{\max} U_{\max} \eta_m, \quad (2)$$

式中: $I_{\max}$ 为最大允许放电电流, A; $U_{\max}$ 为最大允许放电电压, V; η_m 为当前环境电机转速对应的电机效率。

取 T_r 、 $T_{b,\max}$ 、当前环境电机转速对应的最大扭矩三者中的最小扭矩作为汽车电机控制器的请求扭矩信号,将其传递给车辆运行模块。整车扭矩管理模块如图 3 所示。

1.1.1 扭矩管理功能划分

扭矩控制是整车控制器的主要功能之一。微型电动车以蓄电池作为整车行驶能源,为最大限度提高微型电动车车载电源的利用效率,同时保证车辆动力性,整车扭矩管理主要包括扭矩分析和扭矩限值计算两部分内容。

1) 扭矩分析

根据驾驶员驾驶意图选择动力模式或经济模式,收到加速踏板开度信号后,计算车辆在前进挡位时所需扭矩百分比;分别分析车辆在动力模式和经济模式下 $T_{m,\max}$ 和 $T_{b,\max}$ 中的最小值,此时输出最大允许驱动扭矩

$$T_p = \min(T_{m,\max}, T_{b,\max}) \alpha. \quad (3)$$

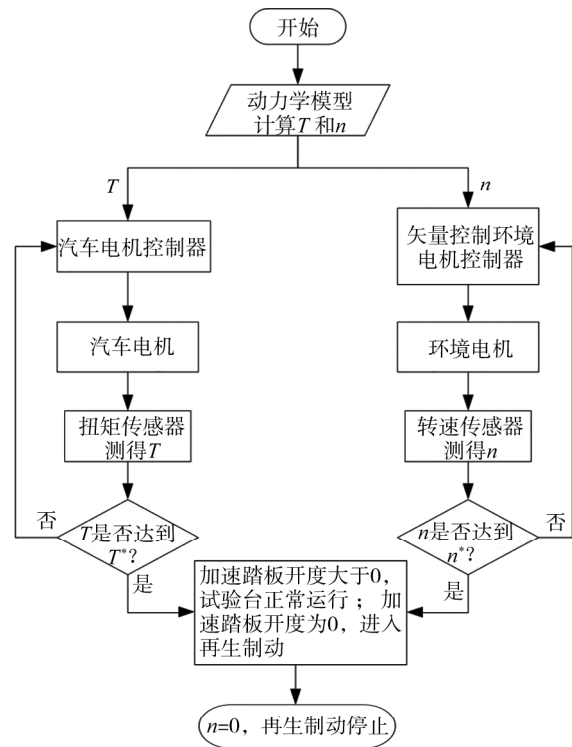
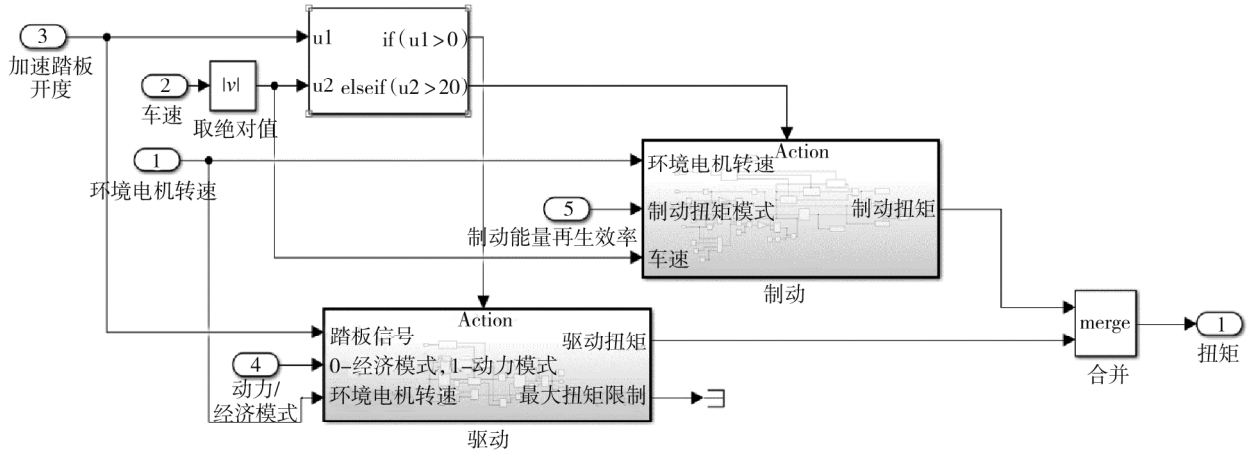


图 2 微型电动车再生制动模拟试验系统工作流程



注:u1 为判断当前加速踏板开度模块输入端口;u2 为判断当前车速模块输入端口;Action 为执行。

图3 整车扭矩管理模块

2) 扭矩限值计算

由式(2)(3)计算整车最大驱动扭矩限值

$$T_{\max, \lim} = \min(T_p, T_{b, \max}) \quad (4)$$

1.1.2 制动扭矩计算

当车辆挡位为前进挡,踩下制动踏板或加速踏板开度为0且车速大于15 km/h时,进行再生制动,提高整车经济性。通过查表法获取电机扭矩,查表时输入加速踏板的开度与电机转速,输出电机扭矩,由于电机处于发电机状态,输出负扭矩,当启用制动扭矩模式且为弱制动时,理论再生制动效率为15.0%,根据电机转速表得到输出扭矩,根据车辆行驶方程得到行驶阻力扭矩 T_{res} ,计算弱制动下制动扭矩

$$T_w = 0.15T_{\text{res}} / (1 - 0.15) \quad (5)$$

当制动模式为强制制动时,理论再生制动效率为60.0%,强制制动下制动扭矩

$$T_f = 0.60T_{\text{res}} / (1 - 0.60) \quad (6)$$

1.2 车辆运行模块

车辆运行模块是试验台运行过程的重要组成部分。车辆运行模块中扭矩信号为驱动扭矩时,模型运行行为驱动模式;扭矩信号为制动扭矩时,模型运行行为制动模式。根据驱动扭矩、制动扭矩及车辆受力,计算车辆加速度、环境电机转速,带动汽车电机运转。

由式(1)可得不同加速踏板开度下电机驱动扭矩,汽车电机驱动力

$$F_t = T_r \eta_T i_0 / r \quad (7)$$

式中: η_T 为机械效率; i_0 为传动比; r 为车轮半径,m。

汽车行驶方程为:

$$F_t = F_w + F_f + F_i + F_j \quad (8)$$

式中: F_f 为滚动阻力,N; F_w 为空气阻力,N; F_i 为坡度阻力,N; F_j 为加速阻力,N。

汽车行驶加速度

$$a = F_j / (m\delta) \quad (9)$$

式中: m 为车辆整备质量,kg; δ 为车辆旋转质量系数。

对式(9)的加速度进行积分,得车辆行驶速度 v_a , v_a 与电机转速 n 的关系式为:

$$\{v_a\} = 0.377\{n\}\{r\} / i_0 \quad (10)$$

式中: $\{v_a\}$ 为以 km/h 为单位的 v_a 的数值, $\{n\}$ 为以 r/min 为单位的 n 的数值, $\{r\}$ 为以 m 为单位的 r 的数值。

驱动扭矩取决于加速踏板开度和电机的转矩特性曲线,根据式(7)计算驱动力,根据式(8)~(10)计

由图 5a)、b) 可知:车辆约在第 135 秒达到最大车速并稳定行驶,此时令加速踏板开度为 0,再生制动系统启动,车速减小,再生制动开始,制动时间约为 35 s。由图 5c)、d)、e) 可知:驱动扭矩、驱动力和加速度为正时车辆加速运行,在第 135 秒加速踏板开度为 0 时,驱动扭矩、驱动力与加速度由正逐渐降为 0,进入再生制动,驱动扭矩、驱动力和加速度为负,车辆电机为再生制动状态。由图 5f) 可知:加速踏板开度为 95% 时再生制动时间最长,再生制动能量最大,为 1.85×10^4 J,动能 $E = 3.07 \times 10^4$ J,再生制动效率为 60.3%,与期望效率 60.0% 基本吻合。

2.2 弱再生制动

当车辆模式为动力模式,制动扭矩模式为弱再生制动,不同加速踏板开度下车速、电机转速、驱动扭矩、驱动力、加速度及弱制动再生能量的仿真结果如图 6 所示。

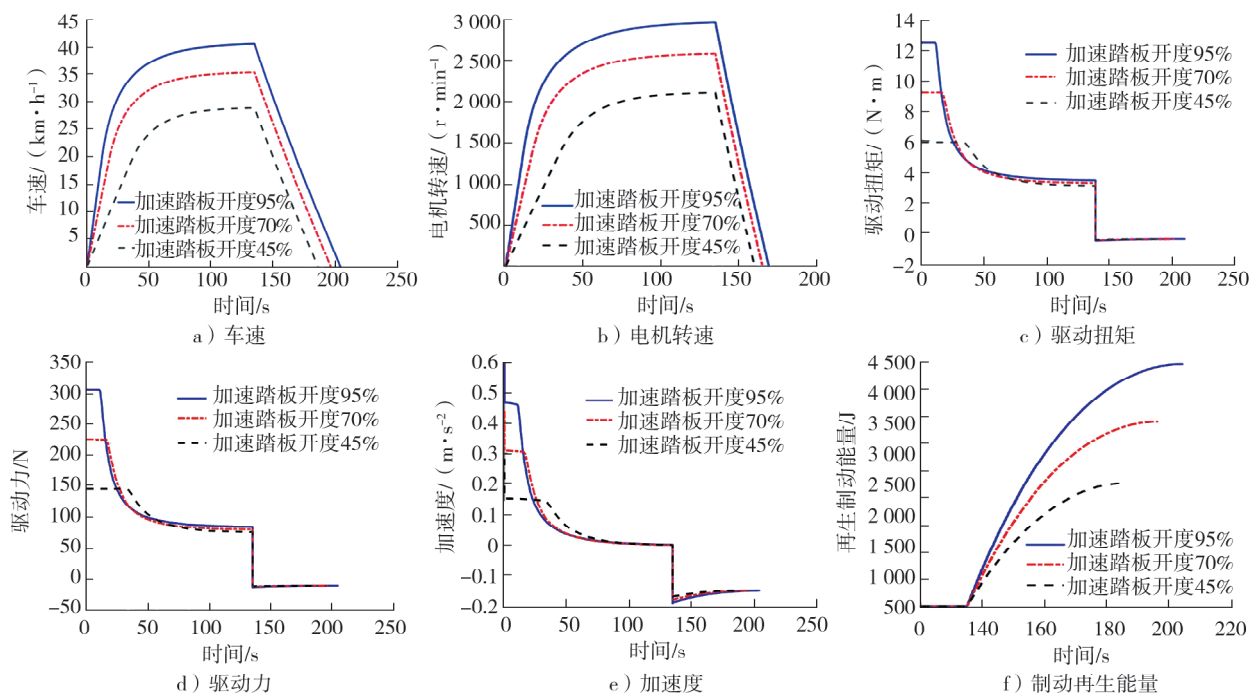


图 6 不同加速踏板开度下弱再生制动的仿真结果

由图 6a)、b) 可知:车辆约在第 135 秒达到最高车速并稳定行驶,此时令加速踏板开度为 0,再生制动系统启动,车速开始减小,再生制动开始,制动时间约为 70 s。由图 6c)、d)、e) 可知:驱动扭矩、驱动力和加速度为正时车辆加速运行,在第 135 秒加速踏板开度为 0 时,驱动扭矩、驱动力与加速度由正逐渐减至 0,进入再生制动,驱动扭矩、驱动力和加速度为负,汽车电机处于再生制动状态。由图 6f) 可知:加速踏板开度为 95% 时再生制动时间最长,再生制动能量最大为 4.47×10^3 J,动能 $E = 3.07 \times 10^4$ J,再生制动效率为 14.6%,与期望效率 15.0% 基本吻合。

加速踏板开度 95% 时,强、弱再生制动模式的加速度与再生制动能量对比如图 7、8 所示。

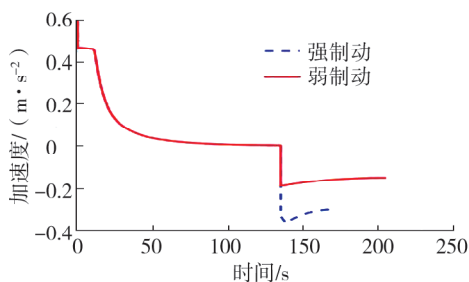


图 7 不同再生制动强度的加速度

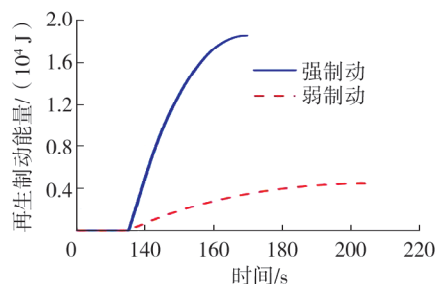


图 8 不同再生制动强度的再生制动能量

由图7、8可知:制动减速度越大、制动再生时间越长,制动再生能量越大。驱动电机强制再生模式下的制动减速度、制动能量远超弱制动再生模式,制动再生效果更明显,再生制动效率更大,采用驱动电机强制再生模式可提高制动再生能量效率,延长微型电动汽车的续驶里程。

3 结论

分析微型电动车再生制动模拟试验系统驱动电机扭矩与转速协调控制系统的需求,基于软件MATLAB/Simulink搭建微型电动车驱动过程及再生制动过程的动力学模型,主要包括整车扭矩管理模块和车辆运行模块两部分。整车扭矩管理模块主要考虑汽车电机控制器扭矩请求值、电池最大允许放电功率等因素,计算得到汽车电机对车辆的驱动扭矩;车辆运行模块根据电机驱动力、行驶阻力、坡度阻力等计算得到行驶合力,通过对加速度积分得到车辆行驶速度。由仿真结果分析再生制动系统在不同工况下的再生制动效率,微型电动车的加速踏板开度为95%时,驱动电机在强制再生和弱再生时的再生制动效率分别为60.3%和14.6%,与期望再生制动效率基本吻合。

参考文献:

- [1] 胡晓岚. 某混合动力SUV制动能量回收系统研究与开发[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [2] 袁善坤. 电磁耦合传动的飞轮式制动能量回收装置性能仿真研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2019.
- [3] 谢博臻,朱绍鹏,李俊杰,等. 四驱电动汽车再生制动力控制策略研究[J]. 机电工程,2018,35(1):83-88.
- [4] 张超,张鑫,谢战洪. 基于超级电容的新能源汽车复合储能控制策略优化[J]. 电器与能效管理技术,2021(11):58-66.
- [5] 邹恺睿. 电动汽车再生制动能量回馈控制方法研究[D]. 长春:长春工业大学,2020.
- [6] 宁水根,张庆永. 某制动能量回收试验台的研制[J]. 汽车工程师,2019(1):52-55.
- [7] 秦揽悦,李丽. 纯电动汽车制动能量回收策略研究与仿真分析[J]. 江苏理工学院学报,2022,28(6):96-106.
- [8] 王培振. 电动汽车制动能量回馈方法研究[D]. 烟台:烟台大学,2018.
- [9] 方桂花,王鹤川,曾标,等. 电机发电特性优化再生制动控制策略的方法[J]. 机械设计与制造,2021(1):134-137.
- [10] 张兆龙. 纯电动汽车制动能量回收系统设计研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
- [11] 孙东升. 电动汽车制动能量回收系统试验技术研究[D]. 北京:清华大学,2016.
- [12] 李学凯. 混合动力电动汽车制动能量回收分析及策略研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [13] 詹慧贞,陈正科. 电动汽车制动能量循环回收智能控制仿真[J]. 计算机仿真,2024,41(1):149-153.
- [14] LI X. Simulation analysis of fuzzy control strategy for braking energy recovery of a pure electric vehicle[J]. International Journal of New Developments in Engineering and Society, 2023,7(4):60-65.
- [15] 苏玉青. 汽车制动能量回收系统控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [16] 刘晋霞,王莉,刘宗锋. 四驱电动轮汽车模糊逻辑控制的再生制动系统[J]. 机械设计与制造,2021(12):164-168.

Modeling and simulation of regenerative braking test system for micro electric vehicles

ZHOU Zhuang¹, ZHOU Changfeng^{1*}, WANG Limin², XU Ze¹

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Times Division, Beijing Auto Foton Motor Co., Ltd., Weifang 262200, China

Abstract: To accurately simulate the regenerative braking conditions of micro electric vehicles, a regenerative braking test system model is developed using MATLAB/Simulink. The simulation analyzed regenerative braking performance and calculated the regenerative efficiency of the drive motor under forced braking and gentle

braking modes. The results show that when the accelerator pedal opening reaches 95%, the regenerative efficiencies under forced and gentle braking modes are 60.3% and 14.6%, respectively, which align closely with the target values of 60.0% and 15.0%. Additionally, higher braking deceleration and longer regenerative braking duration lead to greater recovered energy. The forced braking mode of the drive motor can significantly increase regenerative energy, thereby extending the driving range of micro electric vehicles.

Keywords: micro electric vehicle; regenerative braking; test system; simulation

(责任编辑:赵玉真)

.....
(上接第73页)

the impact of the amount of rejuvenator on the performance of recycled asphalt based on rheological performance parameters such as rutting factor, creep stiffness, creep rate, and critical temperature difference. It proposes a method for determining the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt based on the relationship between continuous high-temperature grades and continuous low-temperature grades. This method balances the high-temperature and low-temperature performance of asphalt to define the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt. Based on the determined quality ratio, asphalt mixtures are prepared, and the high-temperature and low-temperature performance of these mixtures is compared with those determined by the penetration method for the same quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt. The results indicate that as the quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt increases, the rutting factor of recycled asphalt measured by dynamic shear rheology gradually decreases, the creep stiffness measured by bending beam rheology decreases, the creep rate increases, and flexibility improves. The quality ratio of rejuvenator to reclaimed asphalt determined based on continuous high-temperature and low-temperature grades results in a slight decrease in the high-temperature performance of the recycled asphalt mixture, but the water-saturated Marshall residual stability increases by 9.4%, the freeze-thaw splitting tensile strength ratio increases by 7.9%, and the bending failure strain of the small beam increases by 5.5%, effectively balancing the high-temperature and low-temperature performance of the recycled asphalt mixture.

Keywords: geothermal regeneration; rejuvenator; rheological property; PG; balance of high and low temperature performance

(责任编辑:王惠)