

电动商用车的串联制动控制策略

刘祥

(中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122)

摘要:为改善电动商用车制动系统的能量回收效率以及制动效果,在电动商用车电-气负荷制动系统的基础上施加 ECE 法规、蓄电池、电机和制动感受等约束条件,提出一种制动感受更加舒适的串联制动控制策略。通过制动强度和 I 曲线对电气和气压的制动力进行分配,基于 Cruise 和 Matlab 联合仿真环境建立制动控制策略模型,并分别采用以 60 km/h 初速度制动以及 NEDC 循环两种工况对串联制动控制策略性能进行验证。仿真结果表明:在制动感受舒适的同时, $z=0.1$ 和 $z=0.5$ 一次制动工况的制动能量回收率分别为 19.4% 和 17.4%,NEDC 工况的能量回收率为 18.6%。所提出的电动商用车设计的串联制动控制策略可以使车辆具有良好的制动舒适性,能够提高车辆的制动能量回收效率,从而有效改善车辆的制动性和经济性。

关键词:电动商用车;串联制动;控制策略;能量回收

中图分类号:U461 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)04-0215-05

Series Braking Control Strategy for Electric Commercial Vehicles

LIU Xiang

(China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: In order to improve the energy recovery efficiency and braking experience of the braking system of electric commercial vehicles, a series braking control strategy with more comfortable braking experience was proposed based on the electro-pneumatic load braking system of electric commercial vehicles by applying ECE regulations, battery, motor and braking experience. The braking force of electric and air pressure was distributed by braking strength and I curve. The braking control strategy model was established based on Cruise and Matlab -simulation environment. The performance of series braking control strategy was verified by braking at the initial speed of 60 km/h and NEDC cycle respectively. The simulation results show that the recovery rate of braking energy under $z=0.1$ and $z=0.5$ braking conditions is 19.4% and 17.4%, and the energy recovery rate under NEDC conditions is 18.6% when the braking feeling is in comfort. Therefore, with the proposed series braking control strategy for electric commercial vehicle, the vehicle has good braking comfort and its braking energy recovery efficiency of the is enhanced, which effectively improves the maneuverability and economy of the vehicle.

Keywords: electric commercial vehicles; series braking; control strategy; energy recovery

0 引言

近年来,电动化已成为国内外汽车发展的主流方向,商用车领域也逐渐向电动化转型。在电动汽车行驶过程中,可将制动时对电机的反作用能量回收到特定的储能装置里面,进一步利用能量,提高车辆的续航里程^[1-3]。但目前再生制动技术主要应用于乘用车领域,商用车方面的应用还相对较少。文献[4]根据 ECE 制动法规以及制动稳定性的有关要求,优化车辆的制动力分配,提高了车辆的制动能量回收效率。文献[5]设计了一种前轮电子制动、后轮液压制动的制动控制系统,对混合动力汽车的再生制动能量进行再次利用,可改善车辆的经济性。

本文以电动商用车为研究对象,该类商用车具有气压和再生制动两种制动方式,设计了制动舒适性强、能量回收率高的串联制动控制策略,并基于建模和联合仿真对制

动性能进行验证分析,可为商用车的串联制动控制提供参考与借鉴。

1 设置串联制动约束条件

1.1 ECE 法规对制定力的分配要求

汽车制动时的前后轴制动力分配结果将对制动稳定性和附着条件的利用产生显著影响。一般有前轮抱死拖滑、后轮抱死拖滑以及前后轮同时抱死拖滑 3 种工况。根据汽车动力学理论可知,当前后轮同时抱死拖滑为理想工况时,其前后轮的制动力分配曲线称为 I 曲线,如式(1)所示^[6-7]。

$$\begin{cases} F_{bf} + F_{br} = G_z \\ \frac{F_{bf}}{F_{br}} = \frac{L_b + zh_g}{L_a - zh_g} \end{cases} \quad (1)$$

作者简介:刘祥(1992—),男,重庆人,工程师,本科,研究方向为商用车制动系统开发及测试。

式中: F_{bf} 和 F_{br} 分别为质心到前后轴的距离; z 为制动强度 ($z = a/g$); h_g 为质心高度。

根据车辆所要满足的制动效能, 车辆的制动力分配要符合有关法规, 以后轮驱动电动商用车为例, 根据 ECE 法规设置如下的约束条件^[8]:

$$\begin{cases} F_{br} = \frac{z+0.07}{0.85} \cdot \frac{G}{L_a+L_b} (L_a+zh_g) \\ F_{bf} = Gz - F_{br} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 电机约束

电机再生制动力矩与其发电功率和效率有关, 在一定转速下, 再生制动产生的最大制动力矩受电机发电能力的限制^[9]。再生制动时电机的转矩输出特性为基速以下时以恒定的转矩输出, 在基速以上时以恒定的功率输出。另外, 为了保证制动时的安全性, 避免车速过低时电机转速和再生制动力矩过小, 将电机回馈制动转速阈值设置为 500 r/min, 一旦电机转速低于该阈值, 则不进行再生制动。在制动过程中, 当驱动轮需要的再生制动力超过电机所能提供的再生制动力时, 还需要利用摩擦制动补充部分制动力。因此, 可得如下的电机再生制动特性^[10]:

$$P_{m_reg} = \begin{cases} 0, & n \leq 500 \\ T'_{reg} \cdot n_b / 9550, & 500 < n \leq n_b \\ P_N, & n > n_b \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{m_reg} 为电机再生制动功率; T'_{reg} 为电机恒定转矩; P_N 为电机额定功率; n 为电机转速; n_b 为电机基速。

1.3 蓄电池约束

蓄电池的最大充电功率、电流以及电池荷电状态 (SOC) 是影响再生制动能量回收的重要因素。为了延长电池使用寿命, 考虑到再生制动过程充电的时间较短, 一般要求蓄电池所允许的最大充电功率和最大充电电流要大于该过程中充电功率和充电电流^[11]。同时, 考虑到过度充电和过度放电对蓄电池寿命会有影响, 需要对蓄电池的 SOC 状态进行限制。本文所采用的锂离子电池 SOC 运行范围设置在 30%~90%。当 SOC 值超过 90% 时, 不再进行再生制动。蓄电池的充电功率 P_{bat} 计算式如下:

$$P_{bat} = (U_{oc} + IR)I \quad (4)$$

式中: I 为充电电流; R 为电池内阻; U_{oc} 为开路电压, 它是关于电池 SOC 的函数。

1.4 制动舒适性约束

制动舒适感指的是驾乘人员对制动“急”或者“缓”的主观感受。人体对制动感受较为敏感, 过急的制动过程会使人产生强烈的不适感。因此, 制动感受也是影响车辆制动性的重要因素^[12]。为了使电动商用车具有较好的制动感受, 本文以车辆的减速度变化率 j (车辆的冲击度) 作为制动系统舒适性的评价指标, 其计算公式如下:

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2u}{dt^2} \quad (5)$$

根据文献^[13]的相关研究, 人体在感受较为舒适时所能承受的最大冲击度为 10 m/s^3 , 当超过该值时, 人体感受效果不佳。当汽车按照理想的制动力分配曲线对制动

力进行分配时, 车辆具有最佳的制动效能。因此, 车辆制动系统应尽量按照 I 曲线进行制动力分配。

2 串联制动控制策略

2.1 基本原理

如图 1 所示, 串联制动控制策略可以使再生制动力达到极限值后再启动摩擦制动, 可以使车辆具有较好的制动效能。在修改控制策略中, 串联制动与 ABS 系统集成后进行制动控制, 通过对单个车轮的气压制动力进行控制, 可以使车辆的总制动力达到路面附着极限。由此可见, 串联制动控制策略充分利用了再生制动, 具有较高的能量回收效率。

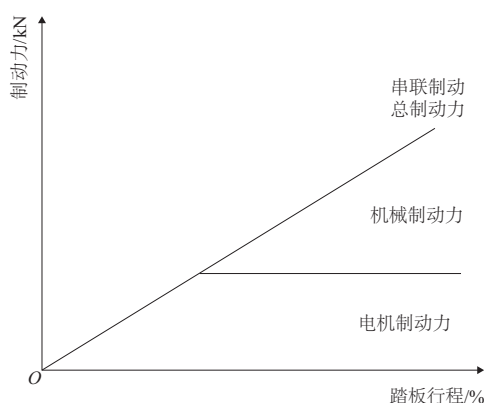


图 1 串联制动系统制动力的分配

2.2 电动商用车电-气复合制动系统

在电动商用车中制动系统一般采用电-气复合制动方式。由于气压制动系统回路压力响应较慢, 需要在设计电动商用车的电-气复合制动系统时, 对传统的气压制动系统中增加控制阀和传感器等装置, 从而实现前后管路压力的调节和电-气制动切换。如图 2 所示, 通过电磁阀的通断, 开关式调压阀能够对 PWM 信号进行控制, 由此完成对前后管路制动气压的调节; 在前后制动管路中安装有二位三通电磁阀, 通过对气压管路的通断控制可以实现气压制动与再生制动的快速切换。

2.3 制动力分配策略

基于串联制动控制方法所增设的电机再生制动会影响车辆的前后制动力分配, 这就需要对前后轮气压制动和电机的再生制动进行调节, 以使得驾乘人员获得较好的制动感受。为了使车辆具有最佳的制动效能和制动稳定性, 制动力分配曲线应当按照理想的制动力分配线 I 曲线, 车辆的制动距离也最短^[14]。图 3 为车辆具有最佳制动感受的制动力分配曲线。

根据车辆的制动强度, 本文所设计的串联制动控制策略可以对电机制动力和机械制动力进行调整。当车辆处于轻度制动模式工况, 此时车辆仅进行再生制动, 制动力完全由电机输出; 当车辆处于中等制动模式工况, 此时气压制动与电机制动共同作用, 一旦制动强度达到设定的数

值,先提高前轮的气压制动力,后轮气压制动力保持为 0,直到前后轮制动力分配曲线恰好与理想的 I 曲线吻合时,前后轮制动力才会根据 I 曲线同时增加;当制动强度超过

0.7 时,车辆进行紧急制动,处于制动安全性的需求,ABS 介入工作,电机不再进行制动,但在 ABS 系统的控制下,车辆的制动力分配仍符合 I 曲线。图 4 是串联制动控制流程。

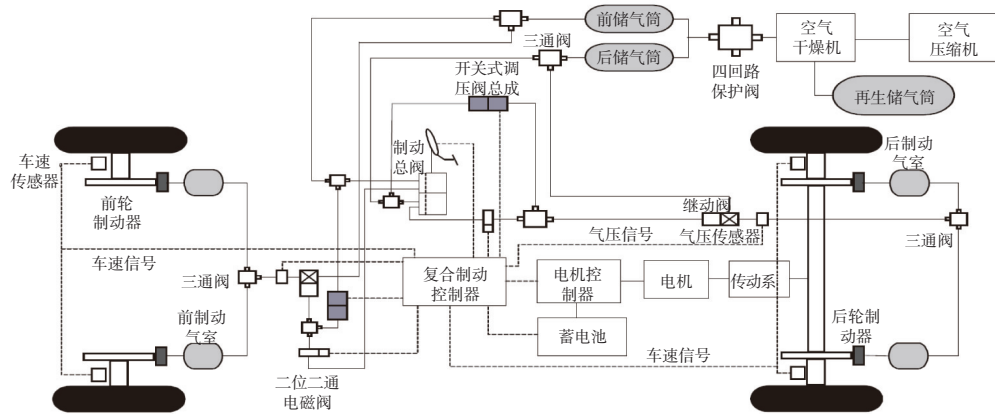


图 2 电动商用车电-气复合制动系统

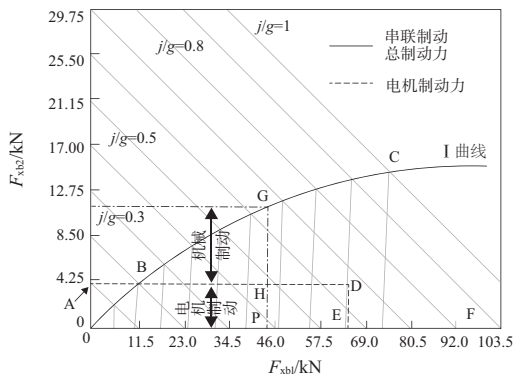


图 3 串联制动控制策略的制动力分配曲线

成控制策略与整车模型的结合,实现 Simulink 与 Cruise 的联合仿真。电动商用车的主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 电动商用车的主要仿真参数

| 参数 | 数值 |
|-------------|-------------------|
| 长×宽×高/mm | 7 950×2 580×2 870 |
| 前悬/mm | 1 500 |
| 后悬/mm | 1 850 |
| 轴距/mm | 4 680 |
| 整车整备质量/kg | 11 000 |
| 最大整车质量/kg | 17 500 |
| 最高车速/(km/h) | 90 |

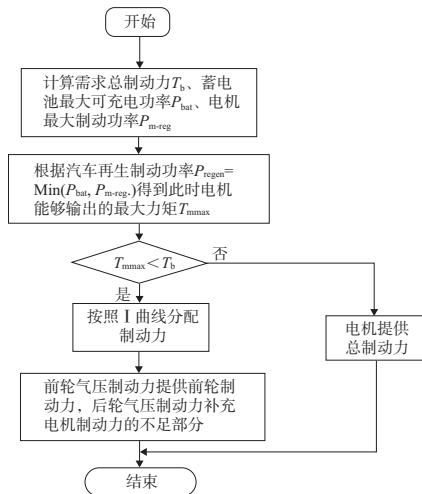


图 4 最佳感觉的串联制动控制策略流程

2.4 串联制动控制模型

基于串联制动控制策略可以在 Simulink 中建立串联制动控制模型,然后借助 Cruise Interfaces 中的 Matlab DLL 组件将生成的 DLL 文件与 Cruise 整车模型进行连接,完

3 仿真结果及其分析

将蓄电池的初始 SOC 值设定为 80%,为了验证串联制动控制策略的性能,选取以 60 km/h 的初速度进行制动以及 NEDC 循环这两种工况进行仿真试验。

3.1 以 60 km/h 的初速度进行制动

车辆的初速度为 60 km/h 时,在制动强度分别为 0.1、0.5、0.8 的条件下进行串联制动控制仿真试验,并比较制动结束后的能量回收情况、车速以及蓄电池 SOC 数值等关键因素。不同条件下的仿真结果如图 5-图 8 及表 2 所示。

从图 5 和表 2 中可以看出,随着制动强度增大其制动所需的时间逐渐减小,符合实际制动规律。从图 6 可以看出,制动强度低于 0.7 时,电机制动持续作用,将产生的能量回收蓄到蓄电池中。制动结束后蓄电池的 SOC 值升高。同时,随着制动强度的增加,蓄电池的 SOC 值变小。 $z = 0.1$ 时能量回收效率为 25.6%。这是由于轻度制动时,电机输出全部的制动力,回收的制动能量更多;当 $z = 0.8$ 时,车辆进行紧急制动,处于制动安全性的考虑,电机不进行工作,ABS 开始介入,蓄电池 SOC 值减小。由图 7 和表 2 可以看出,当 $z = 0.1$ 时,蓄电池的回收能量为 431 kJ,能量

回收率为 19.4%；当 $z=0.5$ 时，蓄电池回收能量为 386 kJ，能量回收率为 17.5%。由此可知，车辆的能量利用率有所提升，其经济性有一定的改善。从图 8 可以看出，在 3 种制动强度下，车辆的制动减速度变化率均不超过 10 m/s^3 ，车辆的冲击度处于较低的范围，可以改善制动感受，提升制动舒适性。

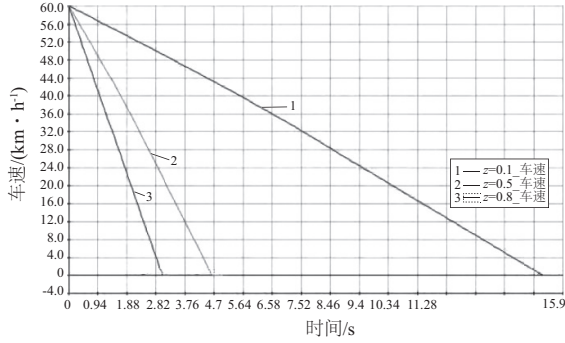


图 5 不同制动强度时的车速比较

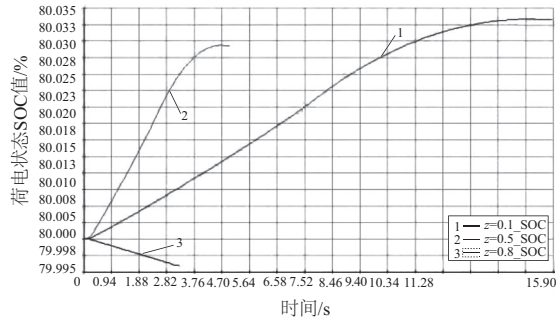


图 6 不同制动强度时的蓄电池 SOC 比较

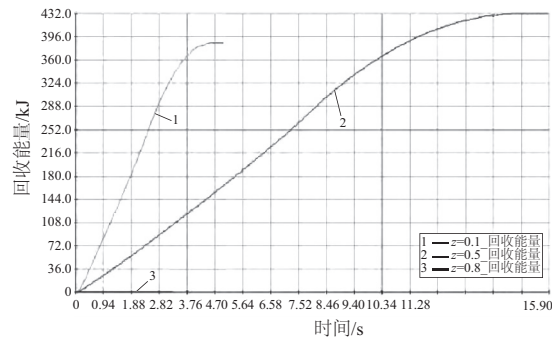


图 7 不同制动强度时的回收能量比较

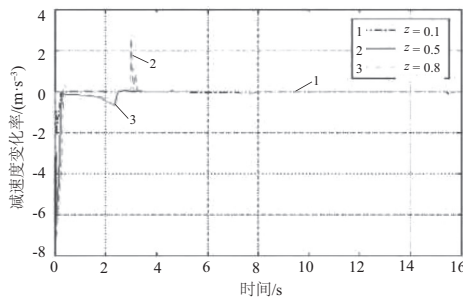


图 8 不同制动强度时的车辆减速度变化率比较

表 2 不同制动强度下串联制动性能仿真情况

| 制动性能 | 制动强度 | | |
|-------------|---------|---------|---------|
| | $z=0.1$ | $z=0.5$ | $z=0.8$ |
| 制动时间/s | 15.4 | 4.5 | 3.1 |
| 结束时 SOC 值/% | 80.033 | 80.029 | 79.996 |
| 总制动能量/kJ | — | 2 230 | — |
| 蓄电池回收能量/kJ | 431 | 386 | 0 |
| 能量回收率/% | 19.4 | 17.5 | 0 |

3.2 NEDC 循环工况的仿真结果分析

为了验证所提出的串联制动控制策略有效性，设定蓄电池初始 SOC 为 80%，采用 NEDC 循环工况进行仿真测试，比较串联制动控制策略与无能量回收机制策略的仿真试验效果，如图 9—图 12 及表 3 所示。

从图 9 可以看出，NEDC 工况中实际车速能够很好地跟随期望车速。因此，串联制动控制策略可满足 NEDC 循环工况要求。从图 10 中可以看出，采用串联制动控制策略进行控制时，车辆减速过程中蓄电池电流为正，说明电机通过再生制动为蓄电池充电。采用无制动能量回收策略时，蓄电池电流为负，说明没有电流反馈给蓄电池。采用串联制动控制策略循环工况结束后，蓄电池的 SOC 达到 74%，表明可以降低蓄电池 SOC 的下降率，减少电能消耗。从图 11 和表 3 中可以看出，采用串联制动控制策略后能量回收率可达到 19%，有效提高了能量利用率，车辆的续航里程有所增加。从图 12 中可以看出，车辆的减速度变化率最大值也远 $< 10 \text{ m/s}^3$ ，车辆的冲击度处于良好范围内，制动感受较好，可以满足驾驶人员对制动感受的要求。

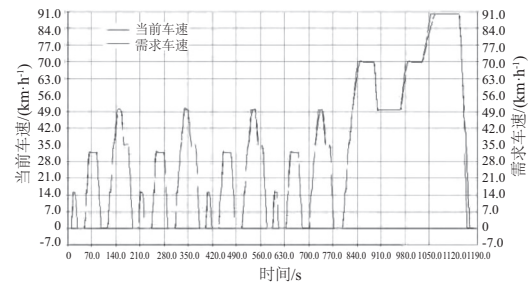


图 9 NEDC 工况下实际车速与期望车速

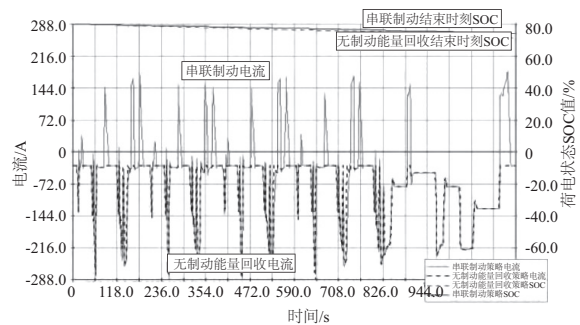


图 10 串联制动控制策略与无能量回收控制策略的 SOC 和电流比较

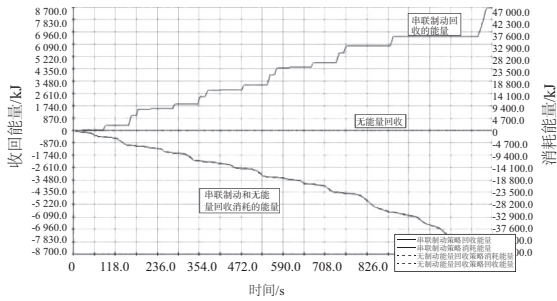


图 11 串联制动控制策略与无能量回收策略的能量回收情况比较

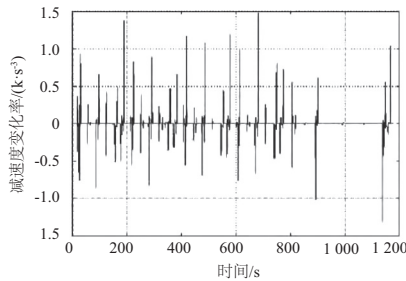


图 12 NEDC 工况车辆减速度变化率

表 3 NEDC 工况下两种控制策略的性能比较

| 性能指标 | 制动控制策略 | |
|---------------|---------|----------|
| | 无能量回收策略 | 串联制动控制策略 |
| 行驶里程/km | 10.622 | 10.622 |
| 结束时刻的 SOC 值/% | 72 | 74 |
| 蓄电池输出能量/kJ | 46 700 | 46 700 |
| 蓄电池回收能量/kJ | 0 | 8 647 |
| 制动能量回收率/% | 0 | 19 |

4 结语

本文对电动商用车的制动控制策略进行研究,基于电动商用车电-气复合制动方式,施加蓄电池、电机、制动感受等重要约束条件,设计了一种串联制动控制策略。为了使车辆具有最佳的制动感受和制动能量回收效率,基于 Cruise 和 Simulink 联合仿真环境搭建了串联制动策略控制模型,进行了相关仿真测试,验证了串联制动控制策略的有效性,得出如下结论。

1) 在以 60 km/h 初始车速制动和 NEDC 循环两种工况下,本文所设计串联制动控制策略可以对车辆的制动力分配进行优化,车辆的制动冲击度较小,车辆具有最佳的制动感受。

2) 在以 60 km/h 初始车速制动和 NEDC 循环两种工况下,基于串联制动控制策略,电动商用车的制动能量回收效果较好,提高了能量利用率,可以进一步改善电动商用车的经济性。

3) 在串联制动控制策略中,电机制动产生的制动力与摩擦制动方式具有不同的特性,如何利用电子控制算法对电机的制动力进行精确调节将是下一步的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 董开开. 商用车气压制动性能硬件在环测试系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [2] 梅宗信,李开国,马国华,等. 汽车防抱制动系统气压电磁调节器台架试验方法的探讨[J]. 汽车工程,2010,32(9): 807-813.
- [3] 刘今朝. 商用车 EBS 控制器及制动力控制策略设计[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [4] 张小龙,丁文俊,葛胜迅,等. 乘用车驻车制动性能转毂测试与评价方法[J]. 农业机械学报,2017,48(3):361-367.
- [5] 王琳琳. 重型商用车参数辨识及多目标制动力分配控制研究[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [6] 夏晓经,张小龙,冯启飞,等. 商用车气压 ABS 性能综合测试系统设计及试验[J]. 汽车工程,2020,42(2):215-221.
- [7] 赵辰. 重型汽车气压 ABS 控制系统研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
- [8] 郝茹茹,赵祥模,周洲. 整车防抱死制动系统台架检测与道路对比试验[J]. 农业机械学报,2013,44(4):21-26.
- [9] 任政焰. 基于电控制动系统的铰接式列车制动控制策略开发与验证[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [10] 郝茹茹,赵祥模,马建,等. 一种新型汽车 ABS 整车检测系统[J]. 交通运输工程学报,2011,11(5):69-75.
- [11] 冯澜. 商用车气压制动系统压力响应仿真模型建构及验证[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
- [12] 彭晓燕,章兢,陈昌荣. 基于 RBF 神经网络的最佳滑移率在线计算方法[J]. 机械工程学报,2011,47(14):108-113.
- [13] 冯瑶. 商用半挂汽车列车预测性紧急制动系统研究[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [14] 靳立强,孙志祥,郑迎. 电动轮汽车复合再生制动系统防抱协调控制[J]. 吉林大学学报(工学版),2017,47(5): 1344-1351.

收稿日期:2021-04-12