

煤矿电动车辆单踏板再生制动效能分析

任志勇^{1,2,3*} 石琴^{1,4} 闫凯^{2,3}

- 1.合肥工业大学汽车与交通工程学院,合肥,230009
- 2.中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,太原,030006
- 3.煤矿采掘机械装备国家工程实验室,太原,030006
- 4.安徽省智慧交通车路协同工程研究中心,合肥,230009

摘要:针对煤矿无轨辅助运输电动车辆提出了一种基于加速踏板的单踏板再生制动控制策略,以进一步提高再生制动能量回收率和能源利用效率。基于车辆制动动力学和能量守恒定律,对再生制动过程进行了理论建模。结合煤矿无轨辅助运输电动车辆驱动系统以及加速踏板的结构特征,建立了基于加速踏板开度的再生制动转矩求解模型,同时,为满足大强度制动工况需求,建立了由加速踏板切换至制动踏板时的再生制动转矩计算模型,对车辆加速、滑行及制动过程中控制策略的工作原理依次进行了分析。针对典型的驾驶循环工况,在底盘测功机上对单踏板再生制动控制策略的能耗经济性进行实车测试,结果显示 NEDC 和 WLTC 工况续驶里程分别增加了 41.65 km 和 35.86 km。实车综合路试结果表明,加速、制动踏板切换过程中再生制动转矩过渡平稳,整车加减速过程平顺。研究结果为再生制动系统的优化开发奠定了技术基础,有利于煤矿电动车辆的推广和普及。

关键词:煤矿电动车辆;加速踏板;再生制动;能量回收;控制策略

中图分类号:U469;TP273

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Single Pedal Regenerative Braking Efficiency of Coal Mine Electric Vehicles

REN Zhiyong^{1,2,3*} SHI Qin^{1,4} YAN Kai^{2,3}

- 1.School of Automotive and Traffic Engineering,Hefei University of Technology,Hefei,230009
- 2.CCTEG Tai Yuan Research Institute Co.,Ltd,Taiyuan,030006
- 3.National Engineering Laboratory for Coal Mining Machinery,Taiyuan,030006
- 4.Engineering Research Center for Intelligent Transportation and Cooperative Vehicle-Infrastructure of Anhui Province,Hefei,230009

Abstract: A single-pedal regenerative braking control strategy was proposed based on the accelerator pedal for electric vehicles used in coal mine trackless auxiliary transportation, aiming to significantly enhance the regenerative braking energy recovery rate and energy utilization efficiency. Theoretical modeling of the regenerative braking process was conducted based on vehicle braking dynamics and the law of conservation of energy. Considering the structural characteristics of the driving system and accelerator pedal of mine trackless auxiliary electric transportation vehicles, a regenerative braking torque solution model was established based on the accelerator pedal opening. Furthermore, to meet the requirements of high-intensity braking conditions, a regenerative braking torque calculation model was developed for the transition from the accelerator pedal to the brake pedal. The working principles of the control strategy during vehicle acceleration, coasting, and braking were sequentially analyzed. For typical driving cycle conditions, an actual vehicle test was conducted on a chassis dynamometer to evaluate the energy consumption economy of the single-pedal regenerative braking control strategy. The results show that the driving range increases by 41.65 km and 35.86 km under the NEDC and WLTC conditions, respectively. Comprehensive on-road test results demonstrate a smooth transition of regenerative braking torque during the switching between the accelerator and brake pedals, ensuring a seamless acceleration and deceleration processes for the entire vehicles. This paper lays a technical foundation for the optimized development of regenerative braking systems and contributes to the promotion and popularization of coal mine electric vehicles.

收稿日期:2024-08-23

基金项目:国家自然科学基金(52204173);山西省科技成果转化引导专项(202104021301067);山西省基础研究计划(20210302124118)

Key words: coal mine electric vehicle; accelerator pedal; regenerative braking; energy recovery; control strategy

0 引言

国家对清洁能源、绿色发展的重视程度与日俱增,近年来,煤矿燃油车辆暴露出了诸多弊端。一方面,能源消耗量大、高噪声、高排放问题亟待解决;另一方面,煤矿井下巷道狭隘、通风有限,“二次污染”问题日益凸显,严重危害井下人员的职业健康,某些矿区甚至出现了“油肺病”现象^[1]。煤矿电动车辆的出现有效缓解了这一问题,已成为未来煤矿运输装备的发展方向,但能量利用率低、续驶里程不足严重问题制约了其进一步推广应用^[2-3],而解决这一问题最有效的方法就是最大限度地提高煤矿电动车辆的能源利用效率。

再生制动技术作为电动车辆核心能效提升机制之一,巧妙地将车辆减速阶段释放的动能转化为电能进行储存与再利用,此举对改善车辆能耗经济性、提高能源利用率具有显著作用^[4-7]。LIU等^[8]针对公路乘用车在市区及市郊环境下的十种典型循环工况(涵盖 FTP75、HWFET、UDDS、NEDC及WLTP等标准)的统计分析结果显示,超过90%的行驶循环中,车辆所经历的最大制动强度维持在0.2g以下,且高达74%的情境下制动强度低于0.1g,这些数据明确显示了城市行驶工况下良好的制动能量回收潜力。YU等^[9]进一步提出,在日常驾驶实践中,通过精细调控加速踏板即可满足超过九成的加减速需求,而传统制动踏板保留的主要原因为应对紧急制动场景。与此同时,文献^[10-13]均强调了单一踏板控制策略的优势,指出该策略不仅有效减少了加速与制动踏板间的切换操作,还极大提高了能量回收效率,为电动车辆的续航性能带来了积极贡献。值得一提的是,宝马公司于2012年推出的i3车型率先在加速踏板上集成了再生制动功能,实现了仅凭踩踏与释放加速踏板即可完成绝大多数加减速操作的创新设计。此后,日产、雪佛兰、吉利、北汽和江淮等多家汽车制造商积极响应,在保持传统制动踏板配置的同时也为加速踏板增添了再生制动功能,共同推动了电动车辆制动技术的智能化与高效化发展^[14-17]。尤其要关注的是单踏板控制系统并不能完全取代传统的制动踏板,因为在紧急情况下仍然需要机械制动,以确保车辆安全驾驶。

相较于地面电动车辆的多样化行驶工况,煤矿电动车辆的运行路径展现出高度的单一性,主要局限于辅运大巷内的往返作业。由于煤矿开采

地形的特殊性,辅运大巷普遍呈现 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 的平均坡度,而部分斜井区域坡度更是陡增至 $12^{\circ}\sim 14^{\circ}$,更有极端情况下,长达数千米的坡道坡度持续不低于 6° ,这种显著的地势差异在车辆长距离下坡时孕育了庞大的制动能量回收潜力^[18-20]。当前,煤矿电动车辆广泛采取机械-再生并行制动控制策略,该策略在有效回收部分制动能量的同时,也缓解了驱动桥制动摩擦片的热负荷累积,从而延长了机械制动系统的使用寿命^[20-23]。然而,值得注意的是,受限于现有脚踏阀-本安电位计复合型制动踏板的并行设计架构,煤矿电动车辆的制动过程仍以机械与再生并行制动为主,且在实际操作中,液压制动系统的介入时机较早,且占比较大,这极大地限制了制动能量的回收效率,使得当前能量回收程度仍显不足^[24-26]。

本文提出了一种以加速踏板为主的单踏板再生制动控制策略,以期在并行制动策略的基础上进一步提高再生制动能量回收率。同时,基于新标欧洲循环测试(new european driving cycle, NEDC)和轻型车辆测试循环(world light vehicle test cycle, WLTC)标准,针对矿下辅运大巷的典型作业场景设计了2种实验工况,在底盘测功机上对所提策略进行测试,以充分验证策略的可行性和有效性。同时,为满足制动强度较大时的工况需求,本文还进一步考虑制动踏板的介入条件以及加速踏板向制动踏板过渡时的驾驶平顺性,并在厂区水泥硬质路上对矿车的加速、减速过程中加速踏板与制动踏板切换时再生制动转矩变化的平滑特性进行测试,以确保车辆加减速过程运行平顺稳定。

1 单踏板再生制动理论基础

煤矿电动车辆得益于驱动电机的四象限工作特性,当输出转矩与实际转速方向一致时,电机处于驱动状态;当输出转矩与实际转速方向相反时,电机处于再生制动回馈状态,此时驱动电机作为发电机工作,兼顾制动能量回收与车辆减速制动需求。并且不同于传统液压制动系统通过踏板开度调节制动力,当制动强度需求不大时,煤矿电动车辆可完全由加速踏板和车速来控制驱动电机输出再生制动转矩大小,而无需液压机械制动器的额外制动力介入,从而有效提高了能量回收率、减轻了驾驶员工作负担。

在单踏板工作模式下,车辆减速和制动完全由驱动电机执行,不涉及其他机械或液压制动系统。再生制动过程中的阻力可表示为

$$F_d = ma = F_f + F_w + F_i + F_{rb} \quad (1)$$

式中: m 为车辆质量,kg; a 为车辆加减速度,m/s²; F_f 、 F_w 、 F_i 分别为滚动阻力、空气阻力和坡道阻力,N; F_{rb} 为再生制动力,N。

煤矿电动车辆制动时克服各种行驶阻力所需的总能量可表示为

$$W_d = \int F_d u dt = E_f + E_w + E_i + E_{rb} = \int F_f u dt + \int F_w u dt + \int F_i u dt + \int F_{rb} u dt \quad (2)$$

式中: u 为车辆的行驶速度,m/s; t 为行驶或制动过程时间,s; E_f 为车辆克服滚动阻力所消耗的能量,J; E_w 为车辆克服空气阻力所消耗的能量,J; E_i 为车辆克服坡道阻力所消耗的能量,J; E_{rb} 为车辆克服再生制动力所消耗的能量,J。

根据能量守恒定理,在兼顾电机效率的情况下,实际回收的制动能量 E_{rec} 可以表示为

$$\Delta E_{rec} = E_{rb} \eta_{rec} = (\Delta E - E_f - E_w - E_i) \eta_{rec} = \left[\frac{1}{2} m (u_0^2 - u_1^2) - E_f - E_w - E_i \right] \eta_{rec} \quad (3)$$

式中: t_0 、 t_1 分别为制动初始、结束时间,s; u_0 为 t_0 时的车辆行驶速度,km/h; u_1 为 t_1 时的车辆行驶速度,km/h; η_{rec} 为电机自身机械效率与发电效率之和。

单踏板再生制动控制策略的目的是提高车辆能量利用效率,提高车辆行驶里程,本文选择能量回收率和行驶里程作为评价指标,以评估能量回收效果。

能量回收率 η_{recy} 是制动过程中回收的能量与整个驾驶循环中消耗的能量之比,可表示为

$$\eta_{recy} = \frac{E_{rb}}{E_b + E_k} \quad (4)$$

式中: E_{rb} 为克服再生制动力矩 T_{reg} 所消耗的能量,J; E_k 、 E_b 分别为车辆行驶和制动所消耗的能量,J。

行驶里程 L 是指车辆从电池充满电到电池荷电状态(state of charge,SOC)值为0完全耗尽所有能量能够行驶的距离,可以表示为

$$L = \frac{E_1 + E_2}{W} S_{cyc} \quad (5)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为电池的初始能量和再生制动系统回收的能量,J; W 为整个驾驶循环所消耗的能量,J; S_{cyc} 为单个驾驶循环的范围。

2 SPRB 控制策略

2.1 SPRB 模式下加速踏板控制策略

常规的再生制动控制策略在一定范围内再生制动扭矩与制动踏板行程成正比,再生制动扭矩恒定不变,为确保操作舒适性设置较小,能量回收

有限^[27-28]。而在单踏板控制策略(single pedal regenerative brake,SPRB)中,驾驶员必须通过踩下或松开加速踏板实现车辆加速和减速,当驾驶员减速意图较强时才需要踩下制动踏板。配备单踏板控制系统的电动车辆具有较高的能量回收率,再生制动减速度较大且可控^[29-30]。SPRB 模式下转矩计算公式如下^[31]:

$$T_a = T_L + \alpha(T_H - T_L) \quad (6)$$

式中: α 为加速踏板开度,%; T_a 、 T_H 、 T_L 分别为加速踏板开度为 α 、100% 和 0 时的电机目标扭矩,N·m。

当 $u \geq 0$ 时,有

$$T_H = T_{max_e} \quad (7)$$

当 $u < 0$ 时,有

$$T_H = T_{max_r} \quad (8)$$

$$T_L = \begin{cases} T_{reg1} & u \geq u_c \\ T_{cp} - \frac{u}{u_c}(T_{reg1} + T_{cp}) & 0 \leq u < u_c \\ T_{cp} - \frac{u}{u_c}(T_{reg2} - T_{cp}) & -u_c \leq u < 0 \\ T_{reg2} & u < -u_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: T_{reg2} 、 T_{reg1} 分别为加速踏板开度为 0 时驱动电机在前行和后退时所能达到的最大再生制动扭矩,N·m; T_{cp} 为车辆低速起步时所需的蠕行扭矩,N·m; T_{max_e} 、 T_{max_r} 分别为加速踏板最大开度 100% 时,驱动电机在驱动和发电回馈两种状态下的最大输出转矩标定值,N·m; u 、 u_c 分别为车辆的实际车速和驱动电机期望转矩的拐点车速,m/s。

按照电机正转负载区、反转负载区、反转正载区和正转正载区四象限运行状态,将上述控制策略的参数进行定义,如图 1 所示。

矿山电动车辆在滑行状态时,车辆在惯性力作用下会滑行一段距离,该模式类似于车辆在空挡行驶,滑行时制动力为零,滑行减速度 a_c 可以表示为

$$a_c = (F_f + F_w + F_i)/m \quad (10)$$

当踩下制动踏板时,矿山车辆处于制动能量回馈状态,再生制动力保持恒定,车辆在不同加速踏板行程下的减速度与行驶速度息息相关,能量回馈加速度 a_{rb} 可以表示为

$$a_{rb} = \frac{F_{rb}}{m} = a - g f - \frac{C_D A \rho u^2}{2m} \quad (11)$$

式中: g 为重力加速度,m/s²; f 为滚动阻力系数; C_D 为车辆空气动力学阻力系数; A 为车辆的有效横截面积,m²; ρ 为空气密度,kg/m³。

为了进一步分析单踏板模式中车辆行驶时的回馈、滑行和加速,以及对应驱动电机的负扭矩、零扭矩和正扭矩的分布,参照相关文献的校准结果,将单踏板行程按照开度分别定义为:回馈状态(0~30%)、滑行状态(30%~35%)和加速状态

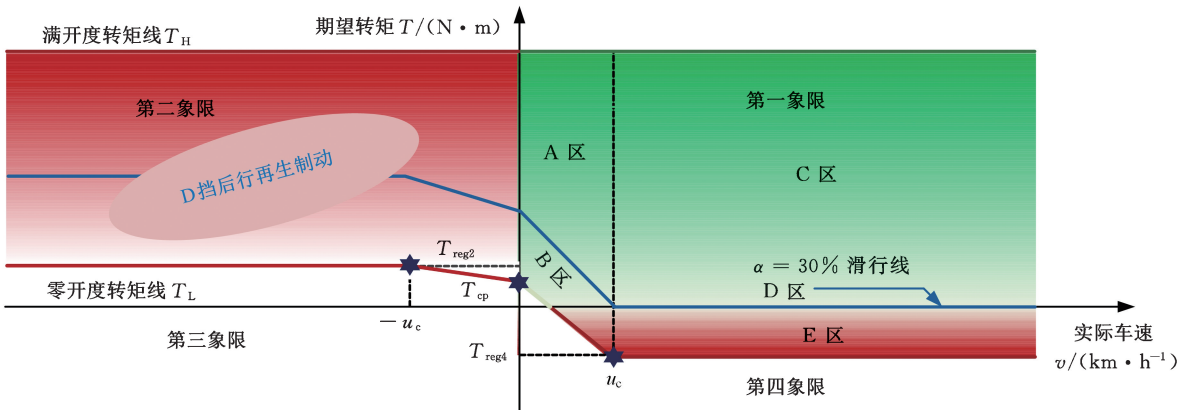


图 1 SPRB 制动转矩求解模型

Fig.1 SPRB braking torque solving model

(35%~100%)进行分配,分别对应电机的负扭矩状态、零扭矩状态和正扭矩状态,且随车速的变化各自状态不断变化。

依据国家安全生产监督管理局编制的《煤

矿安全规程》(2023 版)中煤矿电动车辆最高行驶车速不超过 40 km/h 的要求,列出不同车速下的单踏板行程分配,见表 1,其中,A、C 和 R 分别代表加速、滑行和回馈。

表 1 不同车速下的单踏板行程分配

Tab.1 Single-pedal travel allocation varying with different vehicle velocity

踏板开度/%	车辆行驶速度/(km·h ⁻¹)														
	0	1	2	3	4	5	6	7	9	12	15	20	25	30	40
0	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
5	A	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
10	A	A	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
15	A	A	A	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
20	A	A	A	A	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
25	A	A	A	A	A	C	R	R	R	R	R	R	R	R	R
30	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C	C
35	A	A	A	A	A	A	A	C	C	C	C	C	C	C	C
40	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
60	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
80	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
100	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

由表 1 定义可知,当车速在 7 km/h 以上,踏板开度超过 35%时,车辆处于加速状态,驱动电机处于输出正扭矩状态,车辆的行驶速度不断增加,逐步达到期望车速,该区域无制动能量回收;踏板开度在 30%~35%时车辆处于滑行状态,驱动电机处于零扭矩输出状态,车辆完全依靠惯性力克服滚动阻力和空气阻力等行驶阻力,直至停车;踏板开度低于 30%时车辆处于回馈状态,驱动电机处于负扭矩状态,驱动电机进入再生制动能量回收状态。当车速在 6 km/h 以下,踏板开度在 0~30%时,随着车速的降低,滑行线的临界点在不断向踏板小开度方向移动,形成一条斜线,加速区域面积不断扩张,回馈区域面积不断缩小,车速越低该现象越明显,目的是增加低速时车辆的蠕动性能;当踏板开度在 30%以上时,车辆处于加速状态,驱动电机处于正扭矩输出状态。

2.2 加速踏板切换至制动踏板

1) 加速踏板切换为制动踏板的条件。在 SPRB 模式下进行减速制动,当加速踏板开度低于 30%时,首先会产生再生制动效果;加速踏板继续松开,再生制动效果随之增强;当加速踏板完全松开时,由加速踏板产生的再生制动力达到最大,所对应的加速踏板最大制动强度或最大制动减速度主要由预先标定的四象限再生制动力矩 T_{reg4} 所决定(图 1)。本文中,经过标定, T_{reg4} 取 150 N·m,假设路面附着条件充裕,忽略道路及空气阻力,SPRB 模式下可产生的最大再生制动减速度约为 0.94 m/s²。

在实际驾驶过程中,若完全松开加速踏板后的再生制动强度仍然无法满足减速需求,此时,驾驶员需主动踩下制动踏板,通过并行引入液压制动力以迅速减速。反之,若仅通过调节加速踏板

对应的制动减速度即可使当前车速在可接受的时间内达到期望车速,则无需切入制动踏板。需要强调的是,在整个减速制动过程中驾驶员并不需要关注最大再生制动减速度的具体数值,而是通过感受车速的变化即可判断是否需要制动踏板介入,这与我们平时的驾驶习惯也是一致的。

2)加速踏板切换为制动踏板时再生制动转矩的连贯性。在加速踏板转入制动踏板过程中,一般在踩下制动踏板 9° 以后液压制动力才会由 0 开始逐渐产生,而在此之前,控制策略一般会提前优先标定出再生制动力矩以尽可能提高制动能量回收率。因此,在踏板切换瞬间,由控制策略给出的“完全松开加速踏板时的再生制动转矩值”与“刚刚踩下制动踏板时的再生制动转矩值”二者之间的衔接性是决定加速-制动踏板切换瞬间是否平稳的关键因素。为保证踏板切换过程中再生制动转矩的连贯性,在加速踏板与制动踏板的切换逻辑中,令“制动踏板零开度时采用的转矩线”与“加速踏板零开度转矩线”重合(见图 2a、图 2b 中的 ABCDE 线段),同时,在 0~100% 之间引入一个制动踏板特征开度,即 $BrkPerc_CrpCcl$ (消除蠕行效应的制动踏板开度值,即图 2b 中 ABODE 转矩线对应的制动踏板开度值,被设定为待标定参数,通常不超过 20%),该开度值将整个制动踏板行程分为两部分,不妨分别称之为“蠕行效应消除阶段”和“再生制动增长阶段”,如图 2 所示,现对其逻辑作以下阐述:

①蠕行转矩消除阶段。制动踏板开度从 0→ $BrkPerc_CrpCcl$,加速踏板零开度线上的蠕行转矩由初始标定值 T_{cp} →0,当制动踏板开度达到特征开度 $BrkPerc_CrpCcl$ 时,蠕行效应恰好完全消除,中间过程蠕行转矩 $CrpTrq$ 随着踏板开度的增加而线性减小,因此,在该阶段,再生制动转矩与制动踏板开度的关系为

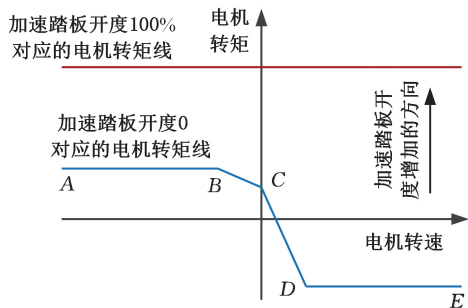
$$CrpTrq = T_{cp} - (BrkPerc / BrkPerc_CrpCcl) \times T_{cp}$$

式中: $BrkPerc_CrpCcl$ 为消除蠕行效应的制动踏板开度值; $CrpTrq$ 为蠕行转矩,即图 2b 中由点 C→点 O 运动过程中的转矩值; $BrkPerc$ 为当前制动踏板实际开度值。

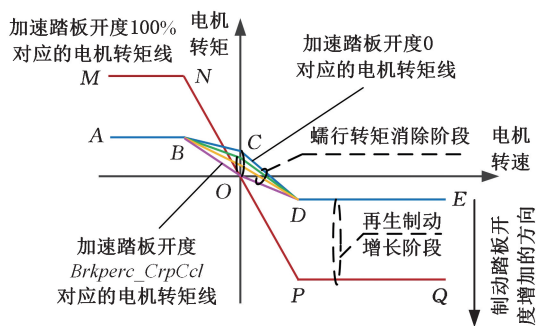
当加速、制动踏板开度为 0 时, $CrpTrq = T_{cp}$,即加速踏板零开度线上的蠕行转矩初始标定值。根据蠕行转矩 $CrpTrq$ 的变化即可确定该阶段每一制动踏板开度所对应的转矩线,即图 2b 中“线段 ABCDE”→“线段 ABODE”,在这一阶段,制动踏板开度的增加主要起到消除 SPRB 蠕行驱动效应的作

②再生制动增长阶段。制动转矩线由“线段

ABODE”→“线段 MNOPQ”,在这一阶段,制动踏板开度的增加主要起到增强再生制动力的作用。正是由于“制动踏板零开度时采用的转矩线”与“加速踏板零开度转矩线”的重合效应,使得“完全松开加速踏板时的再生制动转矩值”与“刚刚踩下制动踏板时的再生制动转矩值”在踏板切换过程中趋于一致、连续,从而确保了踏板切换过程稳定平顺。



(a) 电机转矩-加速踏板开度线



(b) 电机转矩-制动踏板开度线

图 2 加速踏板与制动踏板的切换逻辑

Fig.2 Logic of switching between accelerator and brake pedals

3 控制策略实验验证

3.1 测试环境

测试对象选择中国煤炭科工集团太原研究院有限公司生产的矿用防爆锂离子蓄电池 19 座运人车(WLR-19),测试车辆的主要参数见表 2。

为验证 SPRB 模式在实车测试条件下的能耗经济性表现,采用双滚筒底盘测功机完成指定循环工况的测试任务。在测试过程中,配置底盘测功机为转矩模式以模拟循环工况行驶阻力数据,并在整车控制器加速踏板开度解析模型上游增加目标车速 PID(proportional-integral-derivative)闭环跟踪控制模型,以实现由程控模式跟踪目标车速。算法控制器通过 CAN(controller area network)协议与底层电机驱动系统、电池管理系统以及整车控制器高效通信,确保了折腰控制算法的快速移植与稳定运行,实验数据由算法控

表 2 WLR-19 车辆基本参数

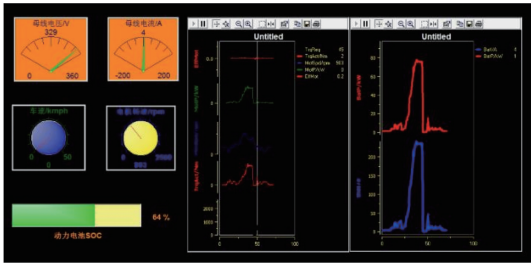
Tab.2 WLR-19 vehicle basic parameters

长×宽×高/mm	5990×2030×2350	电池单体总数	200
轮距 B/mm	1700	动力电池额定容量/(A·h)	100
满载质量 m/kg	7020	SOC 工作范围	5%~95%
传动系统总速比	18.8	驱动电机额定及峰值转速/(r·min ⁻¹)	1500/3500
滚动阻力系数 f	0.022	驱动电机额定功率/kW	55
轮胎滚动半径 r _w /m	0.383	驱动最大转矩/(N·m)	360(1h)
电池成组方式	100S2P	辅助电机功率/kW	3
动力电池能量/(kW·h)	64(100 串 2 并)	辅助电机额定及峰值转速/(r·min ⁻¹)	1000/2000
动力电池额定电压/V	320	辅助电机功率最大转矩/(N·m)	20(1 h)

制器统一时间轴后,通过 Intrepid ValueCAN3 双通道 CAN 卡发送至上位机 Vehspy3(第三方软件)进行本地记录。具体测试环境如图 3 所示。



(a)转鼓测试台架



(b)VehSpy 数据记录界面

图 3 底盘测功机测试环境

Fig.3 Chassis dynamometer test environment

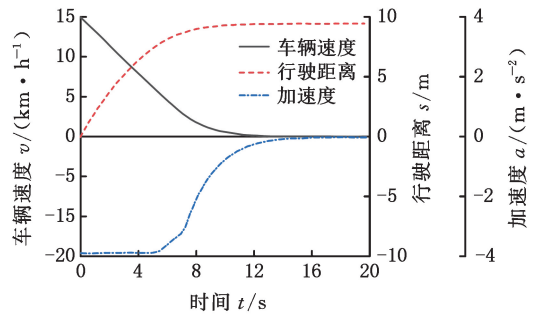
3.2 能耗经济性测试

SPRB 能耗经济性采用循环工况进行测试。NEDC 是最具代表性的城市驾驶循环,被欧洲、中国、澳大利亚等采纳,例如,中国工业和信息化部确定的车辆油耗就是通过 NEDC 测得的,它模拟了市区和郊区等不同工况下的阻力,让汽车在模拟道路行驶以测试其真实的续航能力。相比之下,WLTC 是一个全球统一的汽车测试标准,它提供了一个更为准确、公正且全面的车辆评估体系,它的测试周期比 NEDC 更长,但与实际驾驶情况高度相似。对于矿用车辆井下辅运巷道的测试工况,目前缺乏固定的标准,尽管 NEDC 和 WLTC 工况与之相比车速峰值较高,但在行驶阻力以及车速变化周期等方面相似,整体来讲仍然具备参考性,因此,以 NEDC 和 WLTC 工况为基础,通过调整最高车速制定相应的测试工况进行

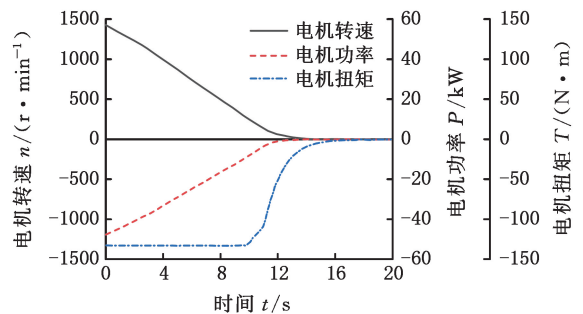
实验,以验证单踏板再生制动控制策略(SPRB)。

矿山电动车辆在下坡过程中为维持安全车速,需要提供足够强度的制动力,因此,以车辆跟踪该实际工况时的再生制动能量回收率为依据,对 SPRB 控制策略的有效性进行评估,具有实际意义和可行性,同时,为分析 SPRB 对整车能耗经济性的改善情况,对 WLR-19 原车液压与再生制动(hydraulic and regenerative braking, HRB)能耗也进行了对比分析。

实验时,在确保车辆安全操纵的前提下,按照不同的车速和制动强度进行实验。本文选择车辆行驶速度 15 km/h 和 30 km/h 的初始制动速度进行模拟实验,实验过程中驾驶员将车辆加速至初始制动速度后完全松开油门踏板。两种初始制动速度下得到的车辆测试曲线和电机响应曲线分别如图 4 和图 5 所示。



(a)车辆测试曲线



(b)电机响应曲线

图 4 常规制动的实验结果(15 km/h)

Fig.4 Experimental results of conventional braking

(15 km/h)

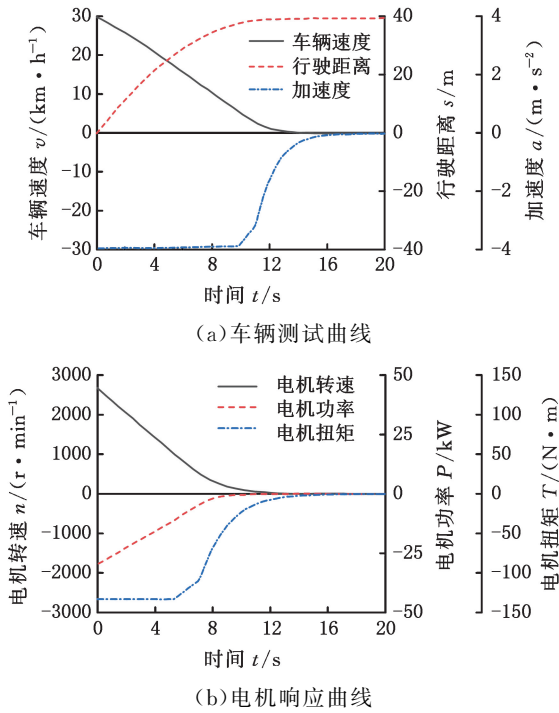


图 5 常规制动的实验结果(30 km/h)

Fig.5 Experimental results of conventional braking (30 km/h)

分析图 4 和图 5 可知,车辆制动要求和制动距离均能满足安全要求。当车辆行驶速度大于 5 km/h 时,电机的再生制动扭矩随着车速的降低而逐渐增大。然而,当车辆行驶速度低于 5 km/h 时,电机的再生制动扭矩随着车速的降低而迅速减小直至为 0,进一步验证了车辆在整个制动过程中,与本文策略的结果是一致的。同时对比分析可知,初始制动速度越大,回收的能量越大,能量的回收率也越高。

在进行测试循环实验时,初始电池 SOC 值设置为 95% 进行单个驾驶循环,2 种测试循环得到的曲线分别如图 6 和图 7 所示,其中,电机驱动用正值表示,电机制动用负值表示。分析图 6 和图 7 可知,车辆的实际运行速度能很好地跟踪车辆的期望运行速度,且整个系统能够较好地实现车辆的驱动和制动,证明本文策略是可靠、有效的。

在测试过程中,受驾驶员熟练程度的影响,在车速跟踪过程中会出现波动,但在机械制动并行作用下,车速基本能够跟踪目标车速。统计发现,SPRB 控制模型及控制参数值可满足典型工况跟踪测试中 80% 时间段内的工况需求,仅在约 20% 的时间段内因工况突变,制动需求较大而导致实际车速与目标车速发生一定偏离。

在初始电池 SOC 值为 95% 的情况下,在单个驾驶循环工况中进行实验,各种控制策略下电池 SOC 值随驾驶循环的变化如图 8 所示,其中曲

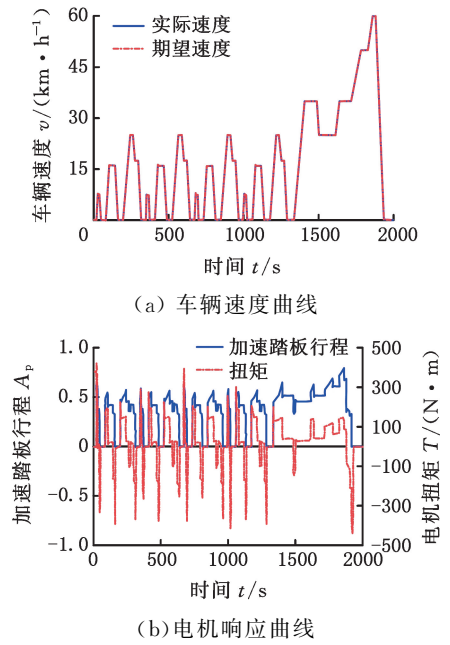


图 6 NEDC 测试循环下的实验结果

Fig.6 Experimental results under the NEDC test cycle

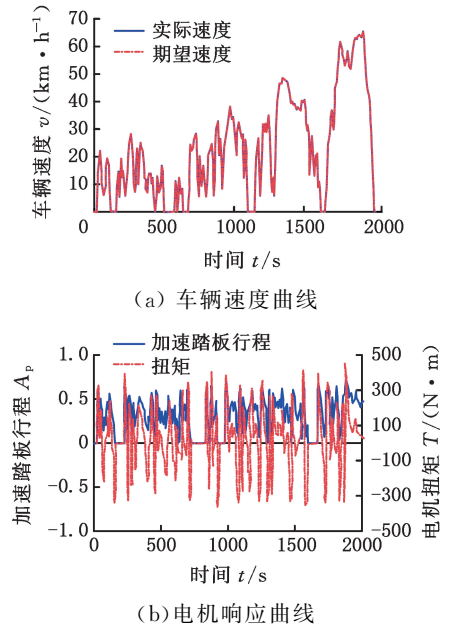
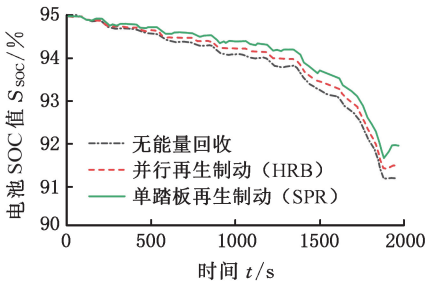


图 7 WLTC 测试循环下的实验结果

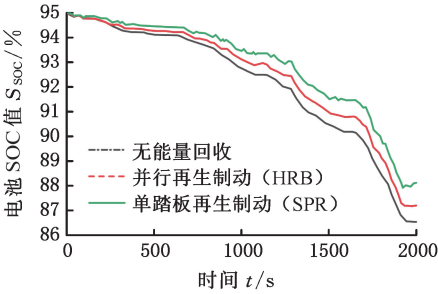
Fig.7 Experimental results under the WLTC test cycle

线上升代表制动和充电,下降代表行驶和放电,斜率代表充电和放电的速率。由图 8 可知,配备单踏板再生制动控制系统的车辆的电池 SOC 值下降最慢,并在模拟结束时保持最高值,这表明 SPRB 控制策略在整个驾驶循环中消耗的能量最小,车辆经济性最佳。

同时将车辆的 SOC 值设置为从 95% 开始一直到 5% 结束,在对应的工况下进行实验,在 NEDC 下使用不同控制策略获得的实验结果见表 3,在 WLTC 下使用不同控制策略获得的实验结果见表 4。



(a) NEDC 循环测试



(b) WLTC 循环测试

图 8 使用各种控制策略的电池模拟结果

Fig.8 Battery simulation results using various control strategies

表 3 NEDC 下使用不同控制策略的能量回收比较
Tab.3 Comparison of energy recovery using different control strategies under NEDC

控制策略	行驶距离/km	总能量消耗/kJ	回收能量/kJ	回收率/%
无能量回收	108.16	155 688.6		
并联再生制动	119.62	169475.7	16727.3	9.87
单再生制动	149.81	194792.6	49789.0	25.56

表 4 WLTC 下不同控制策略的能量回收比较

Tab.4 Comparison of energy recovery of different control strategies under WLTC

控制策略	行驶距离/km	总能量消耗/kJ	回收能量/kJ	回收率/%
无能量回收	80.36	192 772.9		
并联再生制动	100.40	210 578.5	17 562.2	8.34
单再生制动	116.22	240 338.5	47 659.1	19.83

由表 3 分析可知:单踏板控制系统的矿用电动车辆行驶里程延长了 41.65 km,而单踏板控制的能量回收率高达 25.56%,比并联再生制动高 158.97%。由表 4 分析可知:单踏板控制系统的矿用电动车辆行驶里程延长了 35.86 km,单踏板控制的能量回收率高达 19.83%,比并联再生制动高 137.77%。

3.3 加速-制动过程综合路试

进行加速-制动过程综合路试时,测试路面选择厂区的水泥硬质路面,在确保驾驶操纵安全的情况下,驾驶员将车辆从静止加速至 20 km/h 后,又制动至车速为 0 的完整过程。具体测试实验环境如图 9 所示。



图 9 加速踏板-制动踏板切换测试实验

Fig.9 Accelerator pedal-brake pedal switching test experiment

实验获得的车辆行驶速度、再生制动扭矩、制动率、油门开度、驱动能量曲线如图 10 所示。由图 10 分析可知:约 0.48 s 时驱动有效,此时在配置蠕行转矩的作用下,车辆速度开始以较小的加速度增大,由于此时并未踩下加速踏板,故随着车速的增大,驱动转矩有逐渐减小的趋势,确保车辆仅是蠕动。

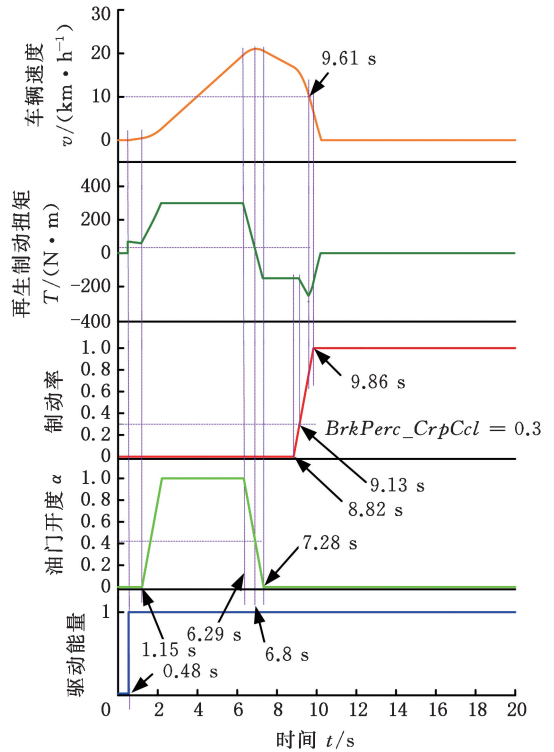


图 10 车辆加速减速综合测试结果

Fig.10 Vehicle acceleration and deceleration comprehensive test results

在约 1.15 s 附近,开始踩下加速踏板,并在约 1.1 s 内,踏板开度增加到 100%,且一直维持最大加速踏板开度至约 6.29 s,在此过程中,驱动转矩迅速攀升至 300 N·m 持续输出,车速随之以较大的加速度不断增大到约 19.3 km/h。

在 6.29 s 以后,加速踏板开始逐渐释放,驱动转矩开始由最大转矩值 300 N·m 逐渐减小,车速增加速率也开始逐渐放缓,在约 6.8 s 附近,车

速达到最高点 20.9 km/h;之后,尽管电机输出转矩仍为驱动输出状态,但在地面滚动阻力的作用下,车辆开始缓慢减速,当加速踏板开度降低约 33%时,电机开始输出负转矩,即进入再生制动能量回收状态,直至约 7.28 s 处时加速踏板完全释放,此时电机输出 150 N·m 的再生制动转矩并保持。

在 8.82 s 附近,也即完全松开加速踏板后的 1.5 s 左右,制动踏板开始被踩下,此时,由控制策略根据制动踏板开度计算出的再生制动转矩值同样为 150 N·m,与加速踏板给出的再生制动转矩值之间无缝衔接,也保证了踏板切换过程中转矩的连贯性;同时,当制动踏板开度未超过 $BrkPerc_CrpCcl$ (标定为 30%)时,再生制动转矩始终维持在 150 N·m,这一阶段主要是为了消除加速踏板蠕行转矩的影响,这与 2.2 节中的控制策略曲线也是一致的。

在 9.13 s 附近,当制动踏板开度越过 30%后,再生制动转矩开始随其线性增长,车速也开始以较大的速率持续走低;在 9.61 s 附近,车速已降至 10 km/h,之后,尽管制动踏板开度仍在增大,但由于车速逐渐向零靠近,故再生制动强度开始随着车速的减小而逐渐减弱。

在 9.86 s,制动踏板开度为 100%且不再增大,再生制动转矩继续随着车速的减小以更快的速率减小,当车速降低至 0 时,再生制动转矩也同步减小至 0,制动过程至此完成。

4 结论

SPRB 控制策略将车辆驱动功能和部分再生制动功能同时集成到加速踏板上,通过优先使用加速踏板满足中小强度减速制动工况需求,既能提高能量回收效果,又能在一定程度上减轻驾驶员的操作负担。主要结论如下:

1)在典型循环工况跟踪测试中,SPRB 控制模型及控制参数值可满足 80%时间段内的工况需求,仅在约 20%的时间段内因制动需求较大而导致实际车速与目标车速发生一定偏离,实际场景中可通过叠加机械制动力进行补偿。

2)单踏板再生制动控制策略下,NEDC 和 WLTC 循环工况能量回收率分别达 25.56%和 19.83%,行驶里程分别延长了 41.65 km 和 35.86 km,对提高矿用电动车辆能量利用效率、延长车辆续航里程具有积极意义。

3)在加速踏板上集成再生制动功能,若控制策略开启蠕行转矩功能,则制动踏板处于零开度

时所标定的再生制动转矩应与加速踏板处于零开度时的再生制动转矩线一致,由此可确保加速、制动踏板切换平稳,整车加减速过程平顺。

参考文献:

- [1] 任志勇,石琴. 矿用电动无轨辅助运输装备发展现状及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7): 118-123.
REN Zhiyong, SHI Qin. Development Status and Key Technologies on Mine-used Electric Auxiliary Trackless Transport[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(7):118-123.
- [2] 任志勇. 纯电动防爆车辆续驶里程影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2):150-155.
REN Zhiyong. Research on Influence Factors Affecting Driving Range of Flame-proof Battery Electric Vehicles [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2):150-155.
- [3] 刘峰,曹文君,张建明,等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1):1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current Technological Innovation and Development Direction of the 14th Five-year Plan Period in China Coal Industry [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1):1-15.
- [4] 刘志强,濮喆. 电动汽车连续再生制动系统防抱死制动试验研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(7):804-811.
LIU Zhiqiang, PU Xian. An Experimental Study on Anti-lock Braking of Continuous Regenerative Braking System in Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(7):804-811.
- [5] 靳立强,孙志祥,王熠,等. 基于模糊控制的电动轮汽车再生制动能量回收研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(10):1101-1105.
JIN Liqiang, SUN Zhixiang, WANG Yi, et al. A Research on Regenerative Braking Energy Recovery of Electric-wheel Vehicle Based on Fuzzy Control [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(10):1101-1105.
- [6] 刘坤,杜长虹,吴维,等. 电驱动系统再生制动工况动力学特性研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(8):1121-1127.
LIU Kun, DU Changhong, WU Wei, et al. Research on Dynamic Characteristics of Electric Drive System under Regenerative Braking Condition [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(8):1121-1127.
- [7] 韩陌,何洪文,石曼,等. 基于学习的无人驾驶车辆模型预测路径跟踪控制研究[J]. 汽车工程, 2024,

- 46(7):1197-1207.
- HAN Mo, HE Hongwen, SHI Man, et al. Research on Learning-based Model Predictive Path Tracking Control for Autonomous Vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(7):1197-1207.
- [8] LIU Wei, QI Hongzhong, LIU Xintian, et al. Evaluation of Regenerative Braking Based on Single-pedal Control for Electric Vehicles[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, 15(1):166-179.
- [9] YU Jiawei, ZHENG Songlin, PHAM H, et al. Reliability Modeling of Multi-state Degraded Repairable Systems and Its Applications to Automotive Systems[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2018, 34(3):459-474.
- [10] QIU Chengqun, WANG Guolin. New Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electric Vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 119:389-398.
- [11] 任志勇, 石琴, 赵远, 等. 矿用双电机双轴驱动铰接车辆转矩协调控制[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53(3):173-179.
- REN Zhiyong, SHI Qin, ZHAO Yuan, et al. Torque Coordinated Control for Mine Articulated Vehicles Driven by Twin Motors and Twin Shafts[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3):173-179.
- [12] XU Guoqing, XU Kun, ZHENG Chunhua, et al. Fully Electrified Regenerative Braking Control for Deep Energy Recovery and Maintaining Safety of Electric Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(3):1186-1198.
- [13] BUNYAEVA E V, SKORIK V G, VLAS'EVSKII S V, et al. A Method for Improving the Energy Efficiency of an Alternating Current Electric Locomotive in the Regenerative Braking Mode[J]. *Russian Electrical Engineering*, 2016, 87(2):73-76.
- [14] LYU Chen, ZHANG Junzhi, LI Yutong, et al. Mechanism Analysis and Evaluation Methodology of Regenerative Braking Contribution to Energy Efficiency Improvement of Electrified Vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 92:469-482.
- [15] WU Jianing, YAN Shaoze, ZUO M J. Evaluating the Reliability of Multi-body Mechanisms; a Method Considering the Uncertainties of Dynamic Performance[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 149:96-106.
- [16] ZEFF S. My Electric Journey with a Nissan Leaf: a Classic Early-adopter Experience[J]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2016, 5(3):79-80.
- [17] TIE S F, TAN C W. A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20:82-102.
- [18] 刘志更. 架线式无轨胶轮车在长距离大坡度巷道中的可行性研究与试验[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(2):175-179.
- LIU Zhigeng. Feasibility Study and Test of the Stringing Trackless Rubber-tyred Vehicle in Long Distance and Large Slope Roadway[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(2):175-179.
- [19] 谢进. 防爆电动无轨胶轮车在神东矿区井下应用研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(增刊2):87-91.
- XIE Jin. Application of Explosion-proof Electric Trackless Rubber-wheel Vehicle in Underground Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(S2):87-91.
- [20] 王连柱, 张燕滨. 煤矿井下无轨辅助运输巷道设计研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(8):70-75.
- WANG Lianzhu, ZHANG Yanbin. Design and Research of Roadway for Trackless Auxiliary Transportation System in Underground Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(8):70-75.
- [21] 刘隽宁, 苏功富. 电动防爆无轨胶轮材料运输车控制策略研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(增刊2):345-351.
- LIU Junning, SU Gongfu. Research on Control Strategy of Electric Explosion-proof Trackless Rubber-tyred Material Transport Vehicle[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S2):345-351.
- [22] BRAVO R R S, de NEGRI V J, OLIVEIRA A A M. Design and Analysis of a Parallel Hydraulic-Pneumatic Regenerative Braking System for Heavy-duty Hybrid Vehicles[J]. *Applied Energy*, 2018, 225:60-77.
- [23] ZHAO Di, CHU Liang, XU Nan, et al. Development of a Cooperative Braking System for Front-wheel Drive Electric Vehicles[J]. *Energies*, 2018, 11(2):378.
- [24] 张传伟, 郭卫. 煤矿井下无轨胶轮电动车驱动控制策略研究[J]. *矿山机械*, 2012, 40(9):39-42.
- ZHANG Chuanwei, GUO Wei. Study on Driving Control Strategies for Underground Trackless Rubber-tired Electric Vehicles[J]. *Mining & Processing Equipment*, 2012, 40(9):39-42.
- [25] LIU L, LIU X T, WANG X L, et al. Reliability Analysis and Evaluation of a Brake System Based on Competing Risk[J]. *Journal of Engineering Research*, 2017, 5(3):150-161.
- [26] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社

- 社, 2009.
- YU Zhisheng. Automobile Theory [M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [27] 武仲斌, 谢斌, 迟瑞娟, 等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4):88-98.
- WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving Torque Management Model for Electric Tractor in Field Cruise Condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4):88-98.
- [28] WU Zhongbin, XIE Bin, LI Zhen, et al. Modelling and Verification of Driving Torque Management for Electric Tractor: Dual-mode Driving Intention Interpretation with Torque Demand Restriction[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182:65-83.
- [29] 王庆年, 杨阳, 贾一帆, 等. 基于电机参数设计的电动车辆经济性优化研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(4):375-381.
- WANG Qingnian, YANG Yang, JIA Yifan, et al. A Research on Energy Economy Optimization of Electric Vehicle Based on Motor Parameter Design [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(4):375-381.
- [30] 方培俊, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于车辆动力学混合模型的智能汽车轨迹跟踪控制方法[J]. 汽车工
- 程, 2022, 44(10):1469-1483.
- FANG Peijun, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. Trajectory Tracking Control Method Based on Vehicle Dynamics Hybrid Model for Intelligent Vehicle[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(10):1469-1483.
- [31] 武仲斌, 任志勇, 赵远, 等. 矿山辅运电动车辆加速踏板集成再生制动控制策略[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8):3677-3686.
- WU Zhongbin, REN Zhiyong, ZHAO Yuan, et al. Integrated Regenerative Braking Control Strategy for the Accelerator Pedal of Mine Trackless Electric Vehicle for Auxiliary Transportation[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(8):3677-3686.

(编辑 陈勇)

作者简介:任志勇*,男,1983年生,博士研究生、研究员。研究方向为矿山电动车辆研制与开发。E-mail:tymkyrzy@163.com。

本文引用格式:

任志勇,石琴,闫凯.煤矿电动车辆单踏板再生制动效能分析[J].中国机械工程,2025,36(2):209-219.

REN Zhiyong, SHI Qin, YAN Kai. Analysis of Single Pedal Regenerative Braking Efficiency of Coal Mine Electric Vehicles[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):209-219.

2024 智能制造科技进展交流专题活动在南京举办

2024年12月20日,由国际智能制造联盟、中国科协智能制造学会联合体、中国工程科技发展战略江苏研究院、e-works数字化企业网等共同承办的“2024 智能制造科技进展交流专题活动”在南京国际博览会议中心钟山厅召开。

国际智能制造联盟荣誉主席、中国工程院院士周济,国际智能制造联盟主席、中国工程院院士杨华勇,华中科技大学教授、加拿大工程院 Fellow 沈卫明,瑞典皇家理工学院教授、加拿大工程院 Fellow 王力翠,加拿大阿尔伯塔大学名誉教授、加拿大工程院 Fellow 左明健,德国机械制造业联合会北京代表处副总经理温斌,国际智能制造联盟主席助理、中国机械工程学会原常务副理事长张彦敏,中国科协智能制造学会联合体常务副秘书长、中国机械工程学会原副理事长陆大明,中国机械工程学会秘书长张喜军,国家智能制造专家委员会委员、国家智能制造标准化专家咨询组副组长、中国科协智能制造学会联合体专家委员会副主任郝玉成,入围“2024 世界智能制造十大科技进展”“2024 中国智能制造十大科

技进展”的项目代表,以及智能制造领域内的国内外专家、学者、企业代表等近 150 人出席了本次活动。共同交流探讨世界范围内智能制造科技进展成果,共享智能制造解决方案和应用实践。

杨华勇院士为本次活动致辞,他强调智能制造是制造业创新发展的主要技术路线,正经历从数字化制造到数字化网络化智能化制造的演进。周济院士、杨华勇院士共同为入围“2024 世界智能制造十大科技进展”的项目颁发证书。周济院士、陆大明研究员共同为入围“2024 中国智能制造十大科技进展”的项目颁发证书。

本次专题活动是一场智能制造领域的思想碰撞与智慧共享交流活动,不仅展示各自在智能制造实践中的技术成果和科技进展,同时也交流了实践过程中的体会和经验,搭建了相互合作、共同创新的桥梁,也为未来发展方向提供好的思路。我们坚信智能制造将引领制造业迈向更高效、可持续的未来。让我们携手共进,以开放的心态和合作的精神,共同开启智能制造的新篇章。

(工作总部)