·2026中国汽车工程学会年会优秀论文(选登)·

基于多源信息融合的电动汽车自适应能量回收控制研究

曾柯　蔡旭　周志荣　方虹璋　张明　张雅　吴波　李婉婷

(岚图汽车科技有限公司,武汉 430056)

【欢迎引用】曾柯, 蔡旭, 周志荣, 等. 基于多源信息融合的电动汽车自适应能量回收控制研究[J]. 汽车文摘, 2026(10): 23-30.

【Cite this paper】ZENG K, CAI X, ZHOU Z R, et al. Research on Adaptive Energy Recovery Control for Electric Vehicles Based on Multi-Source Information Fusion[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(10): 23-30.

【摘要】针对电动汽车滑行能量回收强度固定、复杂工况适应性不足以及电池回收受限时,减速度一致性下降等问题,提出一种基于多源信息融合的自适应能量回收控制方法。该方法融合导航限速、前车及多动态目标、道路坡度、前方路面和电池可回收功率等信息,构建"感知-决策-执行"跨域协同架构,并设计信号有效性判定、动态回收扭矩计算和电液协同补偿策略。电液补偿仅在电池可回收功率不足时介入,用于补足减速度缺口并提升安全冗余。以岚图梦想家车型为例开展道路验证,结果表明:在多限速和轻度拥堵工况下,平均能耗改善率为4.02%,制动频次减少44.64%,减速度波动控制在±0.02 g以内,所提方法可在保证安全性的同时改善能耗和驾驶平顺性。

关键词:电动汽车;能量回收;多源信息融合;电液协同;预测控制;安全冗余

中图分类号:U469.72;U463.5　　**文献标志码:**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260160

Research on Adaptive Energy Recovery Control for Electric Vehicles Based on Multi-Source Information Fusion

Zeng Ke, Cai Xu, Zhou Zhirong, Fang Hongzhang, Zhang Ming, Zhang Ya, Wu Bo, Li Wanting

(Voyah Automobile Technology Co., Ltd., Wuhan 430056)

【Abstract】An adaptive regenerative braking control method based on multi-source information fusion is proposed to address the fixed recovery intensity of conventional electric vehicles, insufficient adaptability to complex conditions and degraded deceleration consistency when battery recovery capability is limited. Navigation speed limits, preceding and multiple dynamic targets, road grade, road-surface state and available battery recovery power are integrated in a perception-decision-execution architecture. Signal validity judgment, dynamic regenerative torque calculation and electro-hydraulic compensation are then designed. The hydraulic compensation is activated only when the available battery recovery power cannot meet the deceleration demand, thereby improving redundancy and deceleration consistency. Road tests on the Voyah Dreamer vehicle model show that the proposed method improves energy consumption by 4.02%, reduces braking frequency by 44.64%, and limits deceleration fluctuation within ±0.02 g under multi-speed-limit and mildly congested conditions. The method improves energy economy and drivability while maintaining vehicle safety.

Key words: Electric vehicles, Regenerative braking, Multi-source information fusion, Electro-hydraulic coordination, Predictive control, Safety redundany

0　引言

随着全球"双碳"目标的推进及新能源汽车产业的快速迭代,电动汽车渗透率持续攀升,2025年全球市场占有率已达30%[1]。在新能源汽车快速发展的背景下,能量回收技术已成为提升续驶里程、降低使用成本和优化整车能耗的重要途径。其控制直接影响车辆经济性、制动平顺性、驾驶体验以及低附着路面稳定性[2-3]。

现有量产车型能量回收多采用低、中、强等固定回收挡位,主要存在以下不足:(1)难以随坡度、拥堵、限速切换和异常路面等工况动态调整回收强度,复杂道路条件下节能潜力有限;(2)在满电、低温等

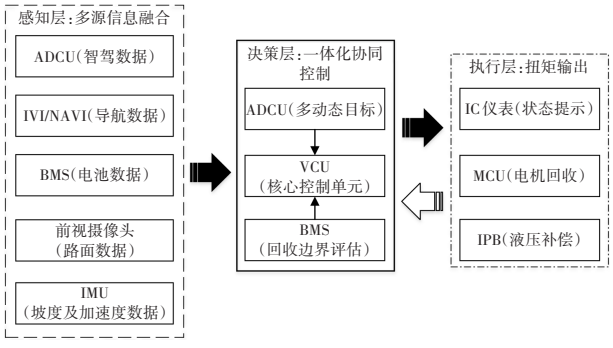
场景下电池回收能力下降，易造成减速度波动；（3）固定拖拽感可能降低驾驶与乘坐舒适性，低附着路面还可能引起车轮滑移风险[4-7]。

已有研究从路面附着系数、前方路况和模型预测控制等角度优化能量回收策略[8-14]。相关方法提升了单一场景下的回收效果，但在多源信息融合、信号异常降级、电液冗余补偿及量产实时性方面仍存在局限性，难以同时兼顾能耗、舒适性和安全性。本文提出一种基于多源信息融合的自适应能量回收控制方法。主要工作包括：构建跨域控制器协同架构，融合导航、智驾、制动和电池数据；建立信号有效性判定与动态扭矩计算方法；设计仅在电池回收能力不足时介入的电液协同补偿策略；通过实车道路试验验证能耗、制动频次和减速度一致性改善效果。

1　系统架构设计

1.1　系统总体架构

自适应能量回收系统采用分布式协同控制架构，遵循“感知–决策–执行”的逻辑，如图1所示。感知层采集车辆、道路和交通目标信息；决策层完成信息融合、场景识别和目标扭矩计算；执行层完成电机回收、液压补偿和状态反馈，形成闭环控制。



注：ADCU为智能驾驶控制器（Advanced Driving Domain Control），IVI/NAVI为车机/导航系统（In Vehicle Infotainment/Navigation），BMS为电池管理系统（Battery Management System），VCU为整车/动力域控制器（Vehicle Control Unit），IPB为集成式电子制动系统（Integrated Power Brake），MCU为电机控制器（Motor Control Unit），IC为仪表控制模块（Instrument Control Module），IMU为惯性测量单元（Inertial Measurement Unit）。

图1　自适应能量回收系统总体架构

1.1.1　多源数据感知层

感知层采集车辆状态、道路环境和交通参与者信息，为决策层提供实时数据支撑，主要数据源如下。

（1）智驾数据：由ADCU采集前车相对距离、相对车速和多动态目标状态。车距测量精度为±0.5 m，相对车速精度为±0.1 m/s，可用于跟车及目标闯入风险判断。

（2）导航数据：由IVI/NAVI提供道路限速、道路类型和限速点距离等信息。限速识别准确率大于95%，位置误差小于10 m，可用于限速场景预判。

（3）电池状态数据：由BMS采集电池荷电状态（State Of Charge，SOC）、许用充电功率和许用放电功率，用于评估电池可回收功率并约束回收扭矩。

（4）路面状态数据：由前视摄像头识别约200 m范围内的减速带、颠簸路、湿滑路和冰雪路；当特征匹配度不低于80%时，判定路面状态有效。

（5）坡度数据：由坡度传感器或融合估计算法获取道路坡度角，为坡道回收强度修正提供依据。

1.1.2　协同决策控制层

决策层以VCU为核心，联合ADCU、IVI/NAVI、BMS和IPB完成多源数据融合、目标减速度确定和执行指令下发。

（1）VCU：负责回收扭矩计算、自适应功能使能判断和液压补偿请求下发。液压补偿仅在电池回收能力不足时触发；扭矩控制精度为±5 N·m，响应时间小于100 ms。

（2）ADCU：输出前车状态、多动态目标闯入风险和智驾系统状态，为跟车及横穿目标场景下的回收扭矩调整提供依据。

（3）IPB：反馈液压制动可用状态和实际制动扭矩，在电池回收能力不足时补足目标减速度。

（4）BMS：反馈SOC、许用充电功率和电池回收能力，限制回收扭矩上限并参与补偿触发判断。

1.1.3　执行与反馈层

执行层接收控制指令，完成能量回收、冗余补偿和状态提示，并反馈执行状态。

（1）MCU：根据VCU/PDCM的回收扭矩请求控制电机发电，将滑行或制动过程中的部分动能转化为电能并存储至动力电池。

（2）IPB：在电池回收能力不足时提供液压制动扭矩，补足减速度缺口并保持总减速度连续。

（3）IC仪表：显示自适应能量回收状态、当前回收强度和异常提示信息。

1.2　控制器交互接口设计

VCU通过CAN和SomeIP与各控制器及感知模块双向通信，核心交互参数如表1所示。

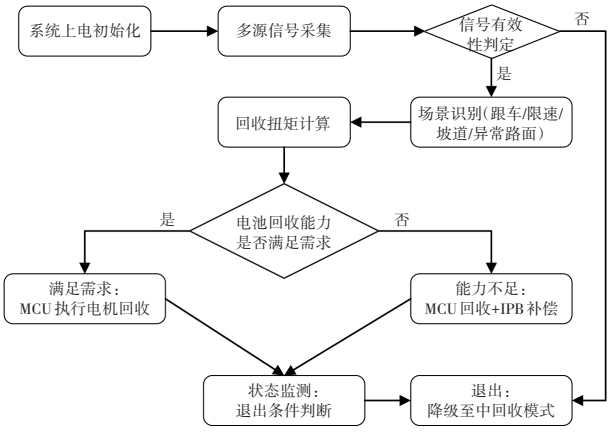
通过上述接口，系统可协同分配电机回收扭矩和液压制动扭矩。当电池回收能力不足时，VCU可在100 ms内触发IPB液压制动补偿，以降低减速度突变风险。

表1　核心控制器交互接口参数

交互对象	发送信号(VCU→交互对象)	接收信号(交互对象→VCU)	通信协议	通信周期或响应时间/ms
VCU↔ADCU	自适应回收使能状态、目标减速度	前车相对距离/车速、智驾工作状态、多目标闯入信息	CAN	通信周期≤20
VCU↔IVI/NAVI	自适应回收功能状态、仪表提示请求	导航限速值/道路类型、导航信号有效性	SomeIP/CAN	通信周期=100
VCU↔IPB	液压补偿请求(仅电池回收不足时发送)、目标补偿扭矩	液压补偿可用状态、实际液压制动扭矩	CAN	响应时间≤100
VCU↔BMS	回收扭矩请求	电池许用充放电功率、SOC状态、电池回收能力评估	CAN	通信周期=10
VCU↔IC	自适应回收状态、异常提示		CAN	通信周期=100

2　控制策略开发

基于上述架构,本文设计自适应能量回收控制策略,包括多源信号融合、自适应使能与退出、动态扭矩计算、电液协同补偿和多场景专项控制。控制流程如图2所示。



注:系统完成多源信号采集和有效性判断后进行场景识别与扭矩计算;当电池回收能力满足需求时由MCU执行电机回收,否则由MCU与IPB协同满足减速需求;满足退出条件时平滑降级至中回收模式。

图2　自适应能量回收控制策略流程

在跟车、限速、坡道等场景中,系统构建了专属的协同控制模型,如图3所示。在跟车场景中,采用自适应巡航与能量回收协同策略,根据前车车速与相对距离,自动调节四驱扭矩分配与回收强度,在保持安全车距的前提下最大化回收效率;在限速路段,采用前瞻式平滑回收策略,通过识别前方限速标识,提前预测车速变化,平滑调节回收扭矩与四驱扭矩,避免紧急制动与能量浪费;在坡道场景中,构建坡道协同补偿模型,根据坡度大小与方向,动态调节四驱扭矩分配与回收强度,在下坡时增强回收使能量回收最大化,在上坡时减弱回收并优化扭矩分配以保证动力输出,确保车辆在坡道工况下的经济性与动力性平衡。

2.1　多源动态信号融合机制

多源动态信号融合是自适应能量回收的基础。系统先进行信号有效性判定,再对关键参数进行标准化处理和融合分析,以提高场景识别可靠性。

2.1.1　信号有效性判定

为避免无效信号引起控制误判,制定如下判定规则:(1)前车信号:智驾信号许用状态为True且报文有效。异常持续超过3个通信周期(60 ms)时判定为不可信,并启用缓存数据过渡;(2)导航信号:导航信号许用状态为True且报文有效。异常持续超过5个通信周期(500 ms)时判定为不可信,并维持上一时刻有效限速值;(3)路面信号:前视摄像头无遮挡且路面特征匹配度不低于80%。遮挡时启用缓存数据并按500 ms周期更新,超时后重新扫描;(4)电池信号:BMS报文有效且SOC波动不超过±1%。异常时默认电池回收能力受限,并触发液压补偿冗余保护。

2.1.2　关键参数处理

对有效信号中的关键参数进行标准化处理,保证

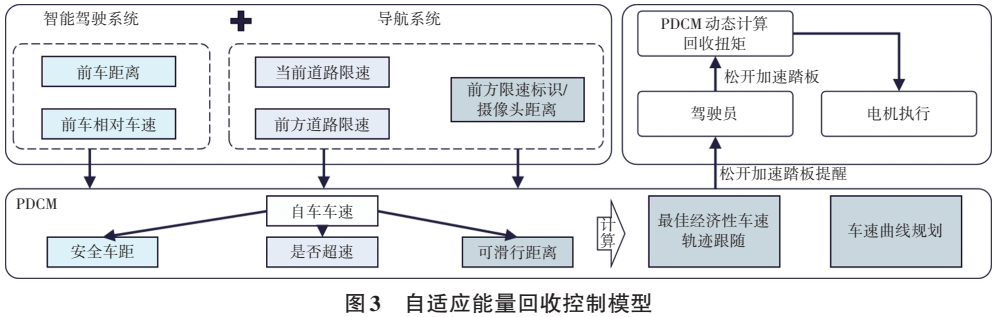


图3　自适应能量回收控制模型

扭矩计算输入一致。

(1)导航限速值V_3:导航信号无效时维持上一时刻有效限速值,并与默认最低限速20 km/h对比取较大值;初始值设为255 km/h,避免初始化阶段误触发减速。

(2)道路类型编码:高速路、干道、县道和其他道路分别编码为0x1、0x2、0x3和0x4;信号无效时维持上一时刻编码,默认值为0x3。

(3)坡度计算:结合整车加速度和车速变化率估算道路坡度角,并利用坡度传感器修正,其计算公式为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a - \dot{v}}{g}\right) \tag{1}$$

式中:θ为道路坡度角(上坡为正、下坡为负),a为整车加速度,$\dot{v}$为车速变化率,g为重力加速度。

2.2 自适应使能与退出逻辑

为保证功能安全运行,系统根据车辆状态、用户设置和执行机构状态制定使能、退出与降级逻辑。

2.2.1 使能判定条件

自适应能量回收功能需同时满足以下条件:(1)前车信号与导航信号均判定为可信;(2)车辆处于Ready状态,且用户将回收等级设置为自适应模式;(3)IPB处于可用状态,或电池许用充电功率能够满足当前目标回收扭矩需求。

2.2.2 退出与降级策略

当满足以下任一条件时,系统退出自适应能量回收并平滑切换至中回收模式,同时通过IC仪表提示:(1)前车信号或导航信号判定为不可信(上升沿触发);(2)用户手动切换至低、中、强任一固定回收等级;(3)电池许用充电功率不足且IPB故障,无法提供冗余补偿。退出优先级为:信号异常退出(0x2)>回收能力受限退出(0x3)>无法进入自适应(0x1)。

2.3 自适应回收扭矩计算

系统采用多目标加权优化方法,根据跟车、限速和坡道需求计算自适应回收扭矩,在保证安全距离和舒适性的前提下提高回收效率。请求扭矩计算公式为:

$$T_{\mathrm{qAuto}} = \max\left\{T_{\mathrm{q3}}, \min\left[\left(T_{\mathrm{q1}} \times r_{\mathrm{t1}} + T_{\mathrm{qslope}}\right), \left(T_{\mathrm{q2}} + T_{\mathrm{qslope}}\right), 0\right]\right\} \tag{2}$$

式中:T_{qAuto}为自适应回收扭矩请求值;T_{q1}为跟车场景回收扭矩;r_{t1}为跟车扭矩修正系数;T_{qslope}为坡度补偿扭矩;T_{q2}为限速场景回收扭矩;T_{q3}为回收扭矩下限,取值不小于−2 000 N·m,对应最大减速度不超过0.2 g,低速区回收扭矩限制为0。

2.3.1 前车场景扭矩(T_{q1})

根据前车相对距离、相对车速和安全距离计算跟车目标减速度及回收扭矩,以维持安全车距并减少制动频次,计算公式为:

$$a_1 = (-1) \times \frac{\min[V, 0]V}{\max[(L_x - L_s), 0.1] \times 2} \tag{3}$$

$$T_{\mathrm{q1}} = a_1 mr / i_{\mathrm{g}} i_0 \eta \tag{4}$$

式中:a_1为跟车场景目标减速度,V为相对车速,L_x为前车相对距离,L_s为安全距离,m为整车质量,r为车轮滚动半径,i_{g}为变速箱传动比,i_0为主减速器传动比,η为传动系统效率。

安全距离L_s由驾驶员反应时间、最小安全距离和当前车速确定,其计算公式为:

$$L_{\mathrm{s}} = \max[V_0 \times t, L_0] + 0.5 \times V_0 \tag{5}$$

式中:V_0为当前车速,t为驾驶员制动反应时间,L_0为最小安全距离。

2.3.2 限速场景扭矩(T_{q2})

根据导航限速值、限速点距离以及当前车速与目标限速的差值计算限速场景回收扭矩,实现提前减速并减少不必要制动,计算公式为:

$$a_2 = \frac{\min[(V_2^2 - V_0^2), 0]}{\max[L_2, L_1] \times 2} \tag{6}$$

$$T_{\mathrm{q2}} = a_2 mr / i_{\mathrm{g}} i_0 \eta \tag{7}$$

式中:a_2为限速场景目标减速度;V_2为含超速偏移量的限速值;L_2为限速点距离;L_1为最小减速距离,取50 m。

含超速偏移量的限速值V_2计算公式为:

$$V_2 = V_3/3.6 + V_{\mathrm{offset}} \tag{8}$$

式中:V_{offset}为超速偏移量,该偏移量用于避免微小超速造成频繁减速,也可依据V_3查表设定。

限速点距离L_2按道路类型估算:高速路取600 m,干道取300 m,县道及其他道路取100 m;电子限速区域优先采用导航电子眼距离。

2.3.3 坡度补偿扭矩($T_{\mathrm{q_{slope}}}$)

根据道路坡度角θ修正回收扭矩:上坡减小回收强度以降低拖拽感,下坡增大回收强度以提升回收效率。坡度补偿扭矩$T_{\mathrm{q_{slope}}}$可表示为:

$$T_{\mathrm{q_{slope}}} = k\theta mgr / i_{\mathrm{g}} i_0 \eta \tag{9}$$

式中:k为坡度补偿系数,上坡时取0.8,下坡时取−1.2。

2.3.4 扭矩限制与信号冲突处理

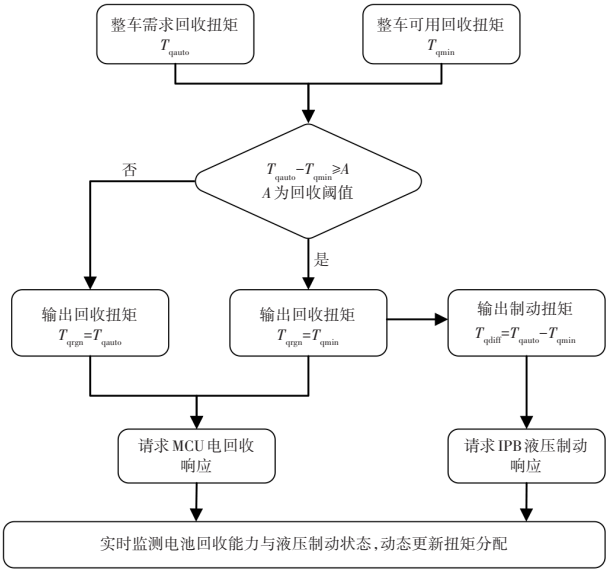
(1)扭矩限制:回收扭矩需满足电池许用充电功

率、电机能力和整车稳定性约束；回收扭矩下限为−2 000 N·m，低速区回收扭矩限制为0。

（2）信号冲突处理：当前车急减速需求与导航限速需求冲突时，优先采用跟车场景扭矩T_{q1}，以保证纵向安全。

2.4 电液协同补偿逻辑

电液协同补偿定位为安全冗余，仅在电池回收能力不足时介入，用于补足目标减速度并抑制减速度突变。补偿控制逻辑如图4所示。



注：当电池可用回收扭矩满足整车需求时，由MCU执行电机回收；当电池可用回收扭矩不足时，MCU执行可用回收扭矩，IPB根据扭矩差值提供液压补偿，并实时反馈执行状态[15]。

图4 电液协同补偿控制逻辑

2.4.1 补偿触发条件

电液协同补偿仅在以下条件同时满足时触发：（1）目标回收扭矩需求的绝对值大于电池可用回收扭矩的绝对值；（2）IPB处于可用状态，无故障报警；（3）非D挡或R挡切换等特殊安全工况；（4）自适应能量回收功能处于开启状态。

2.4.2 补偿扭矩分配

为保证液压补偿过程平顺，补偿扭矩优先分配至前轴，剩余部分分配至后轴，并根据车轮抓地力状态动态微调，其计算过程为：

$$T_{qfront}=0.7\times T_{qdiff} \tag{10}$$

$$T_{qrear}=0.3\times T_{qdiff} \tag{11}$$

式中：T_{qfront}为前轴液压补偿扭矩；T_{qrear}为后轴液压补偿扭矩；T_{qdiff}为电池回收不足对应的扭矩差值，按目标回收扭矩与可用回收扭矩的差值绝对值计算。

2.5 多场景专项控制策略

针对典型场景设计专项控制策略，以提升复杂工况下的经济性、舒适性和安全性。本文重点考虑异常路面、多动态目标和特殊工况。

2.5.1 异常路面控制策略

结合前视摄像头识别的路面状态（图5），系统针对不同异常路面采用差异化回收策略，避免回收扭矩突变引起顿挫或稳定性风险。

（1）不平道路：当前方5 m内识别到减速带或颠簸路时，将车速目标控制在20 km/h以下，并将回收扭矩限制为不低于−500 N·m；对非解耦制动踏板车型抑制液压补偿，以避免踏板下沉。

（2）湿滑道路：将电池回收能力限制在最大回收能力的60%以内，并将驱动扭矩变化率限制为不超过50 N·m/s，以降低车轮打滑风险。

（3）冰雪道路：切换至类雪地模式回收调校，将回收扭矩变化率控制在不超过30 N·m/s，以提升低附着路面稳定性。

2.5.2 多动态目标控制策略

基于ADCU采集的多动态目标信息，筛选自车道及周边可能闯入目标，并结合目标运动方向和距离进行分级控制，如图6所示。

（1）目标筛选与排序：筛选自车道内及周边可能闯入自车道的动态目标，并按距离由近及远排序。

（2）横穿目标控制：计算横穿目标通过自车道时间t_1与自车到达横穿点时间t_2。若$t_2\leqslant t_1+t_0$，其中t_0=1 s，则判定为危险目标，优先触发电回收减速；电池回收能力不足时触发液压补偿。

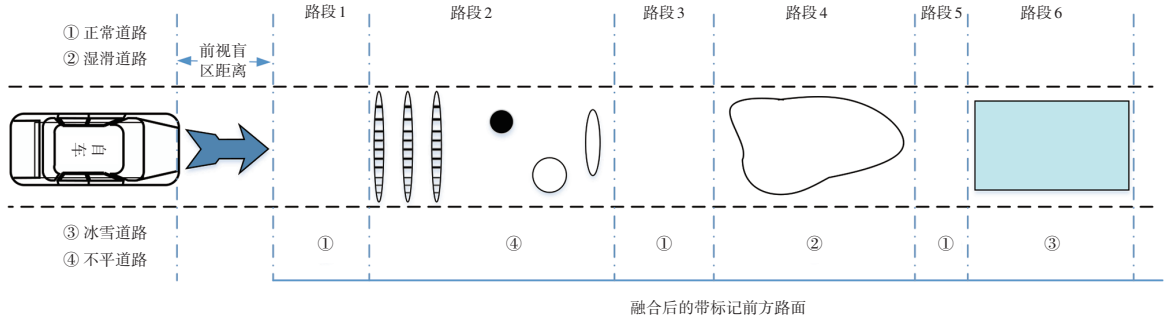


图5 前方路面信息融合与重组

（3）沿车道目标控制：若目标沿自车道行驶，则按前车处理，并依据2.3.1节动态调整回收强度，以维持安全车距。

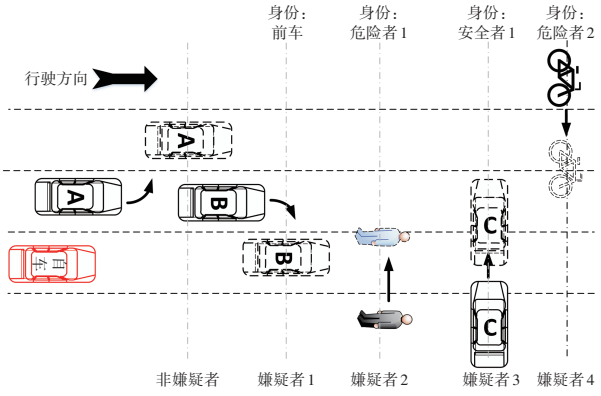


图6　前方盲区车辆与障碍物预测

2.5.3　特殊工况控制策略

针对满电、低温及D/R挡切换等工况，制定如下控制策略：

（1）满电/低温场景：电池回收能力不足时，IPB提前储备液压制动力，储备扭矩为需求扭矩的1.2倍，以维持减速度一致性。

（2）人机协同提示：车辆处于D挡、车速不低于10 km/h、加速踏板开度不低于5%，且T_{qAuto}≤−50 N·m时，仪表板提示“建议减速”。提示持续2 s，2次提示间隔不小于10 s。

3　实车验证

为验证所提方法的有效性和工程可行性，选取岚图梦想家车型开展道路试验，对比开启与关闭自适应能量回收功能（Predictive Control for Regeneration，PCR）时的车辆性能表现。

3.1　测试条件

本次实车测试参照企业道路试验规范及电动汽车能耗、制动安全相关测试要求开展，测试条件如下：

（1）测试车辆：选取2辆岚图梦想家车型，编号为603#（开启PCR功能）和604#（关闭PCR功能）。两车核心参数一致：整车质量为2 540 kg，电池容量为25.5 kW·h，电机最大功率为160 kW，最大回收扭矩为2 000 N·m。

（2）测试环境：天气多云，环境温度为13~15 ℃，相对湿度为50%~60%，无降雨、无大风，路面干燥（特殊路面测试除外）。

（3）车辆状态：两车初始SOC均为80%，统一设置为纯电模式优先，关闭空调及其他大功率用电设备，轮胎气压维持在0.25 MPa。

（4）测试路线：选取岚图汽车公司7号门至联投金色港湾往返路线，总长32 km，包含高速路8 km、城市高架10 km和城市道路14 km，覆盖跟车、限速、坡道和轻度拥堵等场景。

（5）测试方法：两车跟车行驶，车速尽量贴近道路限速；连续测试3轮，每轮间隔30 min。记录SOC消耗、制动频次、减速度波动和横摆角速度等数据，并进行对比分析。

3.2　测试结果与分析

3.2.1　能耗优化效果验证

两车的SOC消耗及能耗改善率如表2所示。开启自适应能量回收功能后，测试车辆平均SOC消耗由15.92%降至15.28%，能耗改善率为4.02%。其中，第3轮测试改善率达到6.46%，主要是因为该轮包含更多城市拥堵和跟车场景，预测性减速与动态回收策略减少了不必要的制动-加速循环；首次测试改善率较低，为1.27%，主要由于匀速行驶占比较高、可回收优化空间有限。

表2　实车测试SOC消耗与能耗改善率

测试轮次	603#（开启PCR）SOC消耗/%	604#（关闭PCR）SOC消耗/%	能耗改善率/%
1	15.50	15.70	1.27
2	15.15	15.80	4.11
3	15.20	16.25	6.46
平均	15.28	15.92	4.02

3.2.2　驾驶稳定性与舒适性验证

根据道路试验记录，统计两台车辆的制动和加速介入频次，测试结果如表3所示。车辆全时域轮端扭矩，车速和加速度变化如图7~图9所示，其中轮端扭矩驱动为正，回收为负。

表3　实测路试中制动和加速介入频次

工况	行驶时长/s	制动频次/次	加速频次/次	踩制动持续总时间/s	加速踏板开度方差
开PCR功能	3 249.8	62	136	252.6	186.9
关PCR功能	3 293.7	112	436	500.5	230.9

由表3可知，开启PCR功能后，测试路线内制动踏板触发次数和加速踏板的触发次数较对照车辆分别减少44.64%和68.81%，制动踏板持续总时间较对照车辆减少了49.53%，加速踏板开度方差分别为186.9和230.9。表明预测性减速和动态回收策略可降低驾驶员加速和制动介入频次，并减少加速-制动-加速循环造成的能量损失。自适应策略根据限速、前车距离和坡度连续调整回收扭矩，可减小固定强度回收

导致的拖拽感突变；电池回收能力不足时，IPB补足减速度缺口，从而保持总减速度连续。

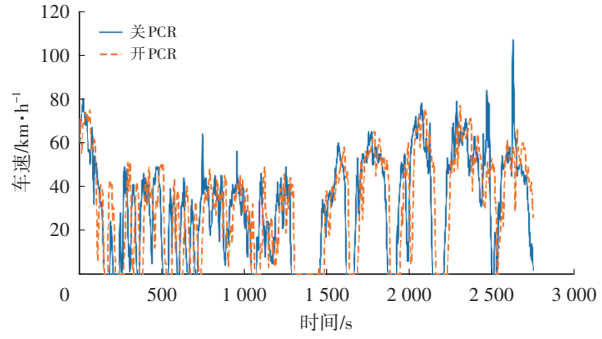


图7　全时域车速变化趋势

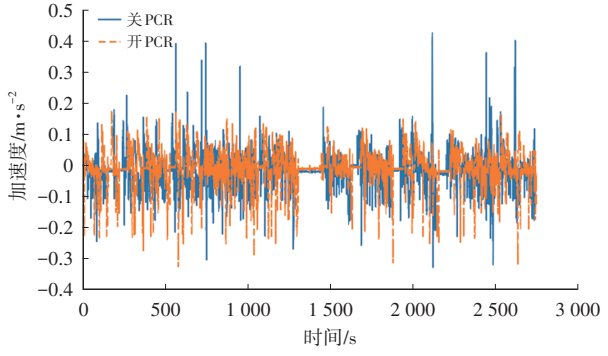


图8　全时域车辆纵向加速度变化趋势

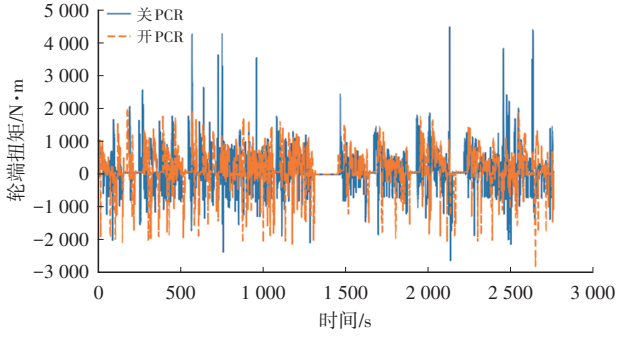


图9　全时域车辆轮端扭矩变化趋势

由图7可知，2种能量回收策略下车辆速度均呈现逐渐下降趋势，整体变化规律基本一致，说明2种策略均能够满足车辆制动需求。相比标准能量回收策略，PCR回收策略下车辆纵向加速度变化更加平稳，加速度波动范围降低约33.8%，并控制在±0.02 g内，有效减小了制动力变化对车辆平顺性的影响。同时，前后轴回收扭矩响应结果表明，PCR回收策略能够根据车辆状态实时调整扭矩分配，使回收扭矩变化更加连续，扭矩波动降低约9.87%。因此，PCR回收策略在保证车辆减速性能的基础上，有效改善了车辆动态响应特性，提高了制动过程的平顺性，实现了制动稳定性与能量回收效果的协调优化。

3.2.3　特殊工况安全冗余验证

在低附着路面、D/R挡切换和电池回收受限等专项工况中，系统按照异常路面识别、扭矩斜率限制和液压补偿逻辑进行控制。测试中，模拟车辆无电回收能力，实测结果如图10~图11所示。试验中车辆未出现明显回收拖拽突变和低速溜车现象，低附着路面转弯过程横摆响应保持稳定，验证了策略的安全冗余效果。

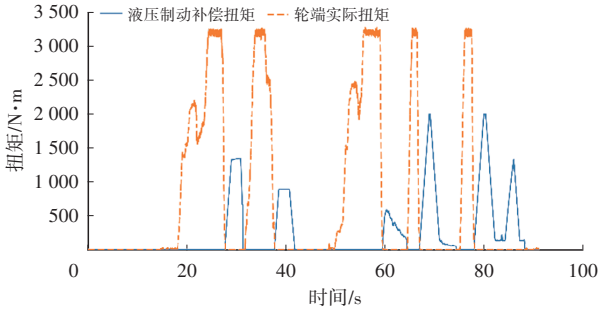


图10　特殊工况下车辆轮端扭矩及液压补偿扭矩变化趋势

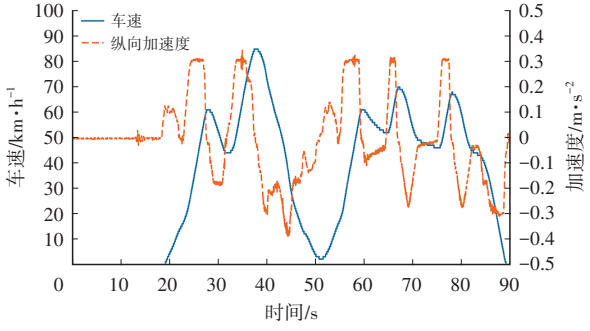


图11　特殊工况下车速及纵向加速度变化趋势

4　结论与展望

4.1　结论

针对传统电动汽车能量回收系统场景适应性不足、减速度一致性下降和驾驶体验欠佳等问题，本文提出基于多源信息融合的自适应能量回收控制方法，得到以下结论：

（1）构建了“感知-决策-执行”三层分布式协同控制架构，融合VCU/PDCM、ADCU、IVI/NAVI、BMS和IPB等控制器数据，实现了车辆状态、道路环境和交通目标的协同感知与控制。

（2）提出了包含信号有效性判定、动态扭矩计算、电液协同补偿和多场景控制的策略。该策略可在电池回收能力满足需求时优先电回收，在回收能力不足时由IPB补偿减速度缺口，从而兼顾能耗、平顺性和安全冗余。

（3）实车验证表明，在多限速和轻度拥堵路况下，所提方法使平均能耗改善率达到4.02%，制动频次减少44.64%，减速度波动控制在±0.02 g以内，具备工程应用价值。

4.2 展望

本文方法已完成道路验证并已在2025年9月上市的岚图梦想家车型量产应用，后续可从以下方面优化：(1)引入机器学习方法预测前车行为和路面状态，并结合实时交通流数据提升场景识别的前瞻性与鲁棒性。(2)结合电池寿命状态和电机效率特性，动态调整液压补偿比例与响应速度，以进一步降低能量损失并提升舒适性。(3)拓展至高阶辅助驾驶、智能充电和个性化驾驶模式，形成适用于纯电动汽车、插电式混合动力汽车的通用控制方案。

参 考 文 献

[1] 中国汽车工业协会. 2024年中国新能源汽车产业发展报告[R]. 北京: 中国汽车工业协会, 2024.

[2] 张承瑞, 李建秋, 欧阳明高. 电动汽车能量回收系统研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(10): 1-18.

[3] WANG Y, LI J, ZHANG H. Energy Recovery Control Strategy for Electric Vehicles Based on Driving Condition Recognition[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3215-3226.

[4] 李军, 王浩, 刘敏. 电动汽车固定强度能量回收系统的局限性分析[J]. 汽车工程, 2021, 43(8): 1123-1129.

[5] 陈全世, 林成涛. 电动汽车电池管理系统及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

[6] 赵福全, 刘宗巍. 新能源汽车用户体验优化路径研究[J]. 汽车技术, 2022(5): 1-7.

[7] 刘震, 李亮, 张磊. 电动汽车能量回收系统对行驶稳定性的影响研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 187-196.

[8] 华为技术有限公司. 一种基于路面附着系数的电动汽车能量回收方法: CN113320394A[P]. 2021-08-31.

[9] 比亚迪股份有限公司. 一种电动汽车能量回收控制方法及装置: CN113997792A[P]. 2022-02-01.

[10] 清华大学, 北京汽车集团有限公司. 基于模型预测控制的电动汽车能量回收方法: CN112660130A[P]. 2021-04-16.

[11] ZHANG L, CHEN Y, LI W. Predictive Energy Recovery Control for Electric Vehicles Based on Road Information[J]. Journal of Power Sources, 2022, 523: 231089.

[12] KIM J, PARK H, LEE J. Adaptive Regenerative Braking Control for Electric Vehicles Considering Battery State of Charge[J]. Applied Energy, 2023, 325: 119987.

[13] 全国汽车标准化委员会. GB/T 31498—2021. 电动汽车碰撞后安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[14] 孙逢春. 电动汽车原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.

[15] 曾柯, 蔡旭, 陈永宝, 等. 基于液压制动补偿的后轮驱动车辆能量回收控制研究[J]. 汽车工程师, 2025(10): 5-11.

（责任编辑 **梵玲**）