

基于工况识别的VCU能量回收控制模块 自适应策略设计与能耗优化

肖娟

广汽本田汽车研究开发有限公司 广州增城 511330

摘要:为提升电动汽车的能量利用效率,设计了一种基于工况识别的VCU能量回收控制模块自适应策略。该策略首先通过提取车速、加速度等特征参数,利用基于规则的在线识别方法,实时将行驶工况划分为市区、郊区、高速及紧急制动等类型,并分析不同工况下的能量回收潜力。在此基础上,构建了以工况适配为核心的自适应控制策略,动态调整电机与机械制动扭矩的分配比例,并根据车速与制动需求自适应调节能量回收强度,确保在最大化回收能量的同时保障制动安全。通过CarSim与Simulink联合仿真平台进行验证,结果表明,相较于传统固定策略,该自适应策略在市区、郊区及高速工况下均能有效降低整车能耗,综合能耗降低显著,并提升了能量回收效率与整车经济性。该策略为电动汽车的能量管理提供了一套高效、智能且具备实际应用价值的解决方案。

关键词:能量回收;工况识别;VCU

一、车辆行驶工况的特征识别与分类

车辆行驶工况的准确识别是自适应能量回收的前提,需通过特征参数提取、在线识别方法选择,明确不同工况的能量回收潜力,为后续策略设计提供依据。

(一) 典型行驶工况的特征参数提取

行驶工况的特征参数需能反映车辆运行状态与能量回收机会,核心参数包括四类,且各参数具有明确的物理意义。车速参数是基础,包括平均车速、车速波动范围与匀速行驶时间占比——平均车速低于60km/h、波动范围 ± 20 km/h、匀速占比低于30%,通常对应频繁启停的市区工况;平均车速高于90km/h、波动范围 ± 10 km/h、匀速占比超60%,则对应高速工况。

加速度与制动强度参数直接关联能量回收机会,包括平均加速度、制动频率与最大制动强度——市区工况加速度绝对值多在 $0.2\sim 0.5\text{m/s}^2$,制动频率超1次/分钟,制动强度多低于 $0.3g$ (g 为重力加速度);郊区工况加速度绝对值多在 $0.5\sim 1.0\text{m/s}^2$,制动频率约0.3次/分钟,制动强度集中在 $0.3\sim 0.5g$;紧急制动工况制动强度超 $0.8g$,但发生频率极低(< 0.1 次/小时)^[1]。

行驶时间占比参数用于区分工况类型,包括加速时间占比、制动时间占比与匀速时间占比——市区工况加速与制动时间占比合计超50%,匀速占比低;高速工况匀速占比超60%,加速与制动占比低;郊区工况三者占比相对均衡,加速与制动占比合计30%~40%。

(二) 工况的在线识别与分类方法

工况在线识别需满足实时性要求(识别延迟 $< 100\text{ms}$),常用基于规则的识别方法,该方法逻辑简单、运算量小,适配VCU的实时控制需求。其核心是预设工况分类规则,通过实时采集的车辆状态参数与规则阈值对比,判定当前工况类型。

具体识别逻辑为:首先采集VCU实时接收的车速、加速度、制动踏板行程信号(制动踏板行程 $> 5\%$ 判定为制动状态);其次计算10秒内的平均车速、加速度标准差、制动次数;最后与预设阈值对比——若平均车速 $< 60\text{km/h}$ 、加速度标准差 $> 0.3\text{m/s}^2$ 、10秒内制动次数 ≥ 1 次,判定为市区工况;若平均车速 $> 90\text{km/h}$ 、加速度标准差 $< 0.1\text{m/s}^2$ 、10秒内制动次数=0次,判定为高速匀速工况;若平均车速 $60\sim 90\text{km/h}$ 、加速度标准差 $0.1\sim 0.3\text{m/s}^2$ 、10秒内制动次数0~1次,判定为郊区工况;若制动踏板行程 $> 50\%$ (对应制动强度 $> 0.8g$),直接判定为紧急制动工况^[2]。

该方法无需复杂算法训练,仅通过参数阈值对比即可完成识别,在VCU中仅需占用少量运算资源,满足在线实时控制需求。

(三) 不同工况对能量回收潜力的影响分析

不同工况的行驶特征差异,直接决定能量回收潜力的大小,核心影响因素为制动频率与制动强度——制动越频繁、强度适中(非紧急制动),回收潜力越大;制动

频率低、强度过大或过小，回收潜力越小。

市区工况因频繁启停，制动频率高（1次/分钟以上）且多为中小制动强度（0.1–0.3g），电机可充分参与制动能量回收，回收潜力最大，单次制动可回收能量约占该次制动总能量的30%–40%；同时，市区车速低（<60km/h），能量回收时电机反拖对整车制动稳定性影响小，可最大化分配电机回收扭矩。

郊区工况制动频率中等（0.3–1次/分钟），制动强度多为中强度（0.3–0.5g），回收潜力次之，单次制动回收能量占比约20%–30%；但郊区车速波动大（60–90km/h），需平衡回收强度与制动稳定性，避免高速下强回收导致电机过载。

高速匀速工况制动频率极低（<0.3次/分钟），且多为轻微制动（<0.1g）或紧急制动（>0.8g），回收潜力最小——轻微制动时可回收能量少，紧急制动时需优先保证机械制动安全，电机回收占比低，单次制动回收能量占比仅5%–15%。

二、VCU能量回收控制模块的自适应策略设计

VCU能量回收控制模块的自适应策略需围绕“工况适配”构建，通过制动扭矩分配、回收强度调节与软件实现，确保不同工况下能量回收效率与制动安全性的平衡。

（一）基于工况识别的制动扭矩分配策略

制动扭矩分配的核心是根据工况对应的制动强度与车速，动态分配电机回收扭矩与机械制动扭矩，避免单一分配逻辑导致的回收不足或制动失稳。

针对市区工况（中小制动强度、低速）：当制动强度<0.3g时，电机回收扭矩占总制动扭矩的70%–80%，机械制动扭矩占20%–30%——中小强度制动下，电机扭矩可快速响应，且低速下机械制动介入少，可最大化回收能量；当制动强度0.3–0.5g时，电机回收扭矩占比降至50%–60%，机械制动占比提升至40%–50%，平衡回收效率与制动减速度需求。

针对郊区工况（中强度制动、中高速）：当制动强度<0.3g时，电机回收扭矩占比60%–70%，机械制动占30%–40%；当制动强度0.3–0.6g时，电机回收扭矩占比40%–50%，机械制动占50%–60%——中高速下需提升机械制动占比，避免电机反拖扭矩过大导致车轮抱^[3]。

针对紧急制动工况（制动强度>0.8g）：电机回收扭矩占比降至20%–30%，机械制动占比70%–80%，同时触发ABS系统，优先保证制动安全性，仅通过电机回收

少量能量；针对高速匀速工况（轻微制动、高速）：电机回收扭矩占比50%–60%，机械制动占40%–50%，适当降低回收占比，避免高速下电机转速过高引发故障。

（二）能量回收强度的自适应调节机制

能量回收强度作为整车能量管理的关键环节，通常以电机最大回收扭矩的百分比来标定，其核心在于根据实时车速与驾驶员制动意图进行自适应调节，以兼顾能量回收效率与驾驶品质。在滑行能量回收工况中，当驾驶员松开加速踏板且车速高于约7km/h时，系统进入滑行能量回收模式，电机制动扭矩会模拟传统车辆的固定减速度特性，为驾驶员提供稳定且符合预期的滑行感受。具体而言，在高速阶段，即车速超过80km/h时，系统采用约30%至40%的弱回收强度，这既能安全捕获巨大动能，又可避免电机超载或影响高速稳定性。随着车速降至30至80km/h的中速区间，回收强度相应提升至50%至60%，以平衡可观的能量回收与平滑的滑行体验。当车速进一步降至30km/h以下时，系统则采用约80%的强回收强度，旨在动能有限的低速阶段最大化能量回收。

当滑行车速下降并低于约7km/h的阈值时，系统会平滑退出能量回收状态，电制动扭矩随之降为零。与此同时，车辆控制单元将请求电机输出一个轻微的正向驱动扭矩，使车辆无缝过渡至怠速蠕行模式，确保在拥堵路况下的平稳跟车。在制动介入方面，当整车控制器识别到制动踏板被轻踩，系统会在当前车速对应的回收基础上，主动提升10%至20%的电制动力，优先利用电制动捕获能量。整个系统始终遵循严格的上限保护策略，确保实际回收扭矩不超过电机额定扭矩的80%，且始终低于根据实时转速计算的安全阈值，从而保障电驱动系统的长期可靠运行。

（三）控制策略在VCU中的软件实现

策略在VCU中的软件实现需遵循“信号采集–工况识别–策略计算–指令输出”的逻辑，确保实时性与可靠性，核心分为三个模块。

信号采集模块：VCU通过CAN总线实时采集车辆状态信号，包括车速（来自ABS轮速传感器）、加速度（来自惯性测量单元IMU）、制动踏板行程（来自制动踏板传感器）、电机转速与扭矩（来自电机控制器MCU），采集频率为100Hz，确保信号实时性。

工况识别模块：基于采集的10秒内平均车速、加速度标准差、制动次数，通过预设的规则阈值判定当前工况（市区、郊区、高速匀速、紧急制动），识别结果每

100ms更新一次，若连续3次识别结果一致，确认当前工况，避免瞬时信号波动导致的误判。

策略计算与指令输出模块：根据确认的工况，调用对应的制动扭矩分配与回收强度逻辑，计算电机目标回收扭矩；同时，VCU与MCU、ESP控制器进行CAN通信，向MCU发送电机回收扭矩指令（精度 $\pm 5N \cdot m$ ），向ESP发送机械制动扭矩需求指令，实现电机与机械制动的协同控制；若出现传感器故障（如车速信号丢失），自动切换至默认的中强度回收策略，确保制动安全。

三、自适应能量回收策略的能耗优化效果评估

通过搭建仿真平台与设定典型测试工况，对比自适应策略与传统固定策略的能耗差异，评估自适应策略的优化效果，此处结合具体仿真实验数据展开分析（无年份信息）。

（一）仿真平台搭建与测试工况设定

仿真平台采用CarSim与MATLAB/Simulink联合仿真，CarSim构建整车模型（包括底盘、制动系统、电机模型，整车整备质量1500kg，电机额定功率60kW，电池容量50kWh），Simulink搭建VCU能量回收控制策略模型（含工况识别、扭矩分配、强度调节模块），两者通过接口实现数据交互，仿真步长为1ms，确保动态响应精度。

测试工况选择三类典型工况，覆盖不同行驶场景：

1. 市区工况（模拟城市拥堵路况）：平均车速30km/h，最大车速60km/h，制动次数20次/100km，制动强度多为0.1-0.3g；2. 郊区工况（模拟城郊公路路况）：平均车速60km/h，最大车速90km/h，制动次数8次/100km，制动强度多为0.3-0.5g；3. 高速工况（模拟高速公路路况）：平均车速100km/h，最大车速120km/h，制动次数3次/100km，制动强度多为0.1-0.2g或 $> 0.8g$ （紧急制动1次）。

（二）自适应策略与传统固定策略的能耗对比

传统固定策略采用“中强度回收（50%最大回收扭矩）+固定扭矩分配（电机占比50%，机械占比50%）”，与自适应策略在三类测试工况下的能耗对比结果如下：

市区工况：自适应策略的百公里能耗为12.5kWh/100km，传统策略为14.2kWh/100km，能耗降低11.9%——因市区频繁中小制动，自适应策略通过高电机扭矩分配（70%-80%）回收更多能量，单次制动回收能

量比传统策略多25%-30%。

郊区工况：自适应策略百公里能耗11.8kWh/100km，传统策略为12.8kWh/100km，能耗降低7.8%——郊区中高速下，自适应策略适当降低回收强度，避免电机过载，同时在中强度制动时优化分配比例，回收效率比传统策略高15%-20%。

高速工况：自适应策略百公里能耗11.2kWh/100km，传统策略为11.6kWh/100km，能耗降低3.4%——高速制动少，回收潜力有限，但自适应策略在轻微制动时提升回收强度，仍实现小幅能耗降低；紧急制动时优先保证安全，回收能量与传统策略基本持平。

三类工况综合（市区：郊区：高速=4：3：3）下，自适应策略百公里能耗11.9kWh/100km，传统策略为13.1kWh/100km，综合能耗降低9.2%，优化效果显著。

结语

基于工况识别的VCU能量回收控制模块自适应策略，标志着电动汽车能量管理从被动适应向主动智能调控的重要转变。它通过精准识别行驶工况，实现了能量回收策略的动态优化，不仅显著提升了整车的能量利用效率，更在保障制动安全与驾驶平顺性方面取得了良好平衡。仿真结果验证了该策略在不同工况下的有效性与优越性，展现了其在实际应用中的巨大潜力。展望未来，随着人工智能算法与车辆传感器技术的深度融合，工况识别的精度与速度将进一步提升，能量回收策略也将朝着更加个性化、预测化的方向发展，从而最大限度地挖掘每一份制动能量的价值，为推动电动汽车产业的持续创新与发展注入强劲动力。

参考文献

- [1] 张兵. 基于模糊控制的纯电动汽车制动能量回收研究[D]. 中原工学院, 2020.
- [2] 葛柳钦, 林国贤, 段珍珍, 等. 一种电动汽车制动能量回收控制系统和方法[J]. 汽车实用技术, 2022, 47(23): 6.
- [3] 樊生文, 李睿智, 杨濛, 等. 后轮独立驱动FSEC控制策略的研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(11): 6.