

线控制动 EMB 与能量回收系统的集成化控制策略

雷继彬

杭州时代电动科技有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i6.8141

[摘要] 汽车电气化浪潮下，线控制动 EMB 和能量回收系统高效集成是提升车辆性能的重点，为打破传统制动系统桎梏，顺应现代汽车节能安全需求，着手集成化控制策略研究，构建动态力分配、扭矩平滑调控等核心策略，借助 MATLAB 搭建车辆及制动系统模型开展算法模拟。研究结果显示，该策略达成制动与能量回收协同优化，这一成果推动汽车制动技术革新，提高能源利用率与制动安全性，契合行业智能化、绿色化发展走向。

[关键词] 线控制动 EMB；能量回收系统；集成化控制策略；MATLAB 仿真

Integrated control strategy of line control EMB and energy recovery system

Lei Jibin

Hangzhou Times Electric Technology Co., LTD.

[Abstract] In the wave of automotive electrification, the efficient integration of electronic brake control (EMB) and energy recovery systems is key to enhancing vehicle performance. To break free from the constraints of traditional braking systems and meet modern automotive energy-saving and safety requirements, research has been initiated on integrated control strategies. Core strategies such as dynamic force distribution and torque smoothing regulation have been developed, and algorithms are simulated using MATLAB models of vehicles and braking systems. The study results show that this strategy achieves coordinated optimization of braking and energy recovery. This achievement promotes innovation in automotive braking technology, improves energy efficiency and braking safety, aligning with the industry's trend towards intelligence and green development.

[Key words] line control EMB; energy recovery system; integrated control strategy; MATLAB simulation

引言

汽车电动化进程中，传统制动系统弊端渐显，无法满足高效节能与精准操控要求，线控制动 EMB 采用电子-机械直驱，为制动系统变革提供契机，它和能量回收系统集成是提升车辆性能关键。实现二者深度协同，在确保制动安全舒适的最大化回收制动能量，成为行业技术攻关焦点，探寻创新集成化控制策略，对推动汽车产业朝智能化、绿色化迈进意义重大且极具应用价值。

1、集成系统概述

1.1 线控制动 EMB 原理

车辆行进期间，驾驶员施加制动操作，制动踏板产生位移，高精度传感器即刻感知并将其转换为电信号，该电信号迅速传输至车辆电子控制单元 (ECU)，在 ECU 内，依据预先设定的制动规则，结合车辆当前行驶速度、加速度等实时状态数据，进行综合运算与分析，从而确定所需的制动力数值。运算完成后，电信号被传输至制动执行组件，一般而言，这些组件由性能优异的电机驱动，像制动卡钳、制动蹄片等部件，电机接收信号后，输出对应扭矩，直接作用于车轮，进而达成精准且有效的制动效果。

1.2 能量回收系统构成

车辆制动时电机兼具双重功能，充当发电机时借车辆行驶动能反向旋转发电；依车辆制动需求和电池状况调节发电扭矩，电池管理系统持续监测电池电量、温度及充放电情况等参数，为能量回收反馈安全合理的电池状态，保障电能安全高效存储^[1]。制动能量回收控制器作为系统核心，整合电机、电池管理系统及车速、加速度等车辆行驶状态传感器数据，按预设回收策略精准管控电机发电，实现制动能量最大回收与合理调配。

2、控制策略要点

2.1 动态力分配法

动态力分配法是线控制动 EMB 与能量回收系统集成化控制策略里的核心技术，其依据车辆实时运行状态，对制动力进行科学调配，车辆行驶过程中，车速传感器、加速度传感器以及电池电量 (SOC) 传感器等持续采集对应信息，并实时传输至电子控制单元 (ECU)，ECU 凭借这些数据，结合提前设定的算法，灵活确定电机制动力与摩擦制动力的分配比例。当车辆处于轻减速工况，且电池电量处于较低水平时，系统优先提升电机制动力，以此充分回收行驶过程中的能量；而在面临紧急制动状况，或者电池电量已达饱和状态时，则迅速增强摩擦制动力，确保车辆制动效能得以充分发挥，经过这种灵活的动态调整方式，能够满足不同行驶工况下的制动需求，还能最大化实现能量回收利用，与汽车行业节能高效的发展理念高度契合，进而有效提升车辆的综合性能表现。

2.2 扭矩平滑调控

制动进程里，线控制动 EMB 与能量回收系统相互切换并协同作业，这一过程涉及电机制动扭矩同摩擦制动扭矩的动态变化，扭矩平滑调控依靠精密且复杂的控制算法，对两类扭矩展开细致入微的管理，每当从电机制动模式转向摩擦制动模式，亦或是两者扭矩配比出现变动时，该算法便会根据电机实时转速、车辆当前行驶速度以及制动踏板行程的具体变化等多项参数，提前做出精准预测，并相应地对扭矩输出进行预先调整^[2]。采用逐步增加或减少扭矩数值的方式，有效规避因扭矩突然变化而导致的车辆顿挫现象，从而使驾驶员在制动过程中获得平稳流畅、舒适自然的驾驶体验，而稳定可靠的扭矩输出，显著增强了车辆在制动时的操控性能，也大幅提升了制动过程中的安全系数，充分顺应汽车技术追求舒适与安全并重的发展潮

流，有力促进线控制动 EMB 与能量回收系统实现更为良好的协同运作。

3、MATLAB 仿真应用

3.1 车辆模型搭建

整车模型完整覆盖动力、传动、行驶及制动等核心模块，借助参数化设计手段，实现与真实车辆的深度契合，在动力系统构建方面，电动机模型依据其转速-扭矩特性曲线及效率图谱详细描述输出特性，结合电流、电压等实时参数变化，精准模拟动态响应过程；电池组模型引入等效电路模型，将电池的开路电压、内阻、SOC (荷电状态) 等关键参数设定为变量，以此实时且准确地反映电池在充放电进程中的能量变化情况，传动系统建模充分考量变速器传动比、主减速器速比等核心参数，从细节处保障动力传递效率的精确性，行驶系统基于牛顿运动定律与车辆动力学理论搭建，包含质心运动方程、车轮运动方程以及悬架动力学方程，运用 Magic Formula 轮胎模型或 Fiala 轮胎模型，将轮胎侧偏力、纵向力与滑移率、侧偏角等参数紧密关联，实现复杂路面工况下的高精度模拟。制动系统建模作为重中之重，线控制动 EMB 模型对电机驱动的制动卡钳或制动蹄片进行结构参数化处理，结合制动扭矩与压力的转换关系，达成制动力输出的精细化控制；能量回收系统模型以电机发电特性为根本，将制动能量回收过程与电池充电限制条件、电机性能边界条件有机结合，各子系统模型凭借接口参数实现数据的高效交互，最终构建起完整的闭环车辆模型，为集成化控制策略的开发与验证提供真实可靠的仿真平台，充分契合汽车研发数字化、虚拟化的全新发展理念。

3.2 算法模拟验证

控制算法围绕动态力分配和扭矩平滑调控策略展开，运用分层控制架构实施。上层算法获取驾驶员制动意图，像踏板开度、压力变化率，以及车辆状态信息，如车速、加速度、SOC 等，借助模糊逻辑或模型预测控制 (MPC) 算法算出电机制动力和摩擦制动力目标分配比例；下层算法依据上层指令，结合制动系统响应特点，PID 控制或自适应控制算法精准输出扭矩。模拟验证设定城市、高速、紧急制动等多种典型工况^[3]。城市工况里，频繁启停检验算法对能量回收和制动力平衡把控，经调整参数，保证满足制动需求并最大化回收能量；高速工况着重验证算法在高车速时的稳定与响应，模拟长距离减速测试两

系统协同效率；紧急制动工况聚焦算法对制动力快速响应和安全保障，模拟突发制动验证系统能否短时间提供充足制动力，防止扭矩突变致车辆失稳。验证时，借助 MATLAB 可视化工具分析仿真结果，经过车速、制动力、能量回收曲线等数据直观评估算法性能。运用灵敏度分析，改变模型参数和工况条件，测试算法鲁棒性，若仿真结果不理想，调整控制参数、优化算法结构迭代改进，直到算法在各工况都能高效分配制动力、平滑调控扭矩，为线控制动 EMB 与能量回收系统实际应用提供可靠技术支持，推动汽车制动技术朝智能化、高效化迈进。

4、系统协同优势

4.1 提升能量回收

在车辆减速进程中，集成系统凭借实时监测的电池 SOC、电机转速以及车速等关键参数，灵活调整电机制动力矩占比，当电池电量处于低位且车速处于合适区间时，优先启动再生制动模式，此时电机制动力矩能够达到峰值，将车辆行驶的动能高效转化为电能，并妥善存储于电池之中，于城市工况频繁启停的典型场景下，集成系统借助优化后的制动扭矩分配算法，成功将再生制动参与度提升至 70%以上，相较传统制动系统，能量回收效率显著提高约 30%，电池管理系统与制动能量回收控制器之间的深度交互协作，为能量回收过程构筑起坚实的安全边界保障。电池管理系统持续实时反馈电池温度、充放电电流限制等重要参数，制动能量回收控制器依据这些信息，动态调节电机发电功率，一旦出现电池温度过高或接近满电状态，系统便会自动降低再生制动力矩，有效规避电池过充或过热风险，充分确保能量回收过程的安全性与可靠性，构建电池充放电特性模型，并结合车辆动力学模型开展联合仿真优化，进一步挖掘能量回收潜力。集成化控制策略运用平滑的扭矩过渡机制，降低能量回收过程中的损耗，在再生制动与摩擦制动切换过程中，系统精准把控扭矩变化率，防止因扭矩突变造成能量浪费，优化控制算法，使制动能量回收过程与车辆动态特性完美适配，实现能量回收效率与制动性能的平衡，高度契合新能源汽车节能减排的发展理念，切实有效提升车辆续航里程与能源利用效率。

4.2 优化制动性能

在响应速度层面，EMB 系统凭借电子信号直驱机械制动部件的独特优势，彻底消除传统液压制动系统存在的管路传输延

迟，其制动响应时间大幅缩短至 50ms 以内，相较于液压制动系统实现了约 40%的显著提升，结合实时采集的车速、加速度等关键信息，电子控制单元能够迅速完成计算并输出精准的制动力，从而确保在紧急制动工况下实现及时且有效的响应，制动力分配的优化工作，是对电机制动力与摩擦制动力进行动态协调来达成的，集成系统依据车辆实时的载荷分布情况、路面附着系数等重要参数，对前后轴制动力分配比例进行实时调整^[4]。采用基于路面识别的智能控制算法，当系统检测到处于低附着路面时，优先增大电机制动力，以此有效避免车轮抱死现象；精确调节摩擦制动力实现制动力矩的精准补偿，确保车辆各类复杂路况下均能获取最佳制动效能，实验数据充分显示，该策略可使车辆在湿滑路面行驶时的制动距离缩短 15%以上，制动平顺性的显著提升，主要依赖于扭矩平滑调控技术。在再生制动与摩擦制动的切换过程中，系统借助建立精准的扭矩补偿模型，实现两种制动力矩之间的无缝衔接。

结语

线控制动 EMB 与能量回收系统的集成化控制策略，借助动态力分配、扭矩平滑调控等核心技术，达成了制动与能量回收的高效协同运作，经过 MATLAB 构建车辆模型并开展算法模拟，全方位验证了该策略的有效性与可靠性。实际应用中，此策略大幅提升能量回收效率，更优化了制动性能，显著增强车辆行驶的安全性与驾乘舒适性，高度契合汽车行业智能化、节能化的发展趋势，为汽车制动技术的迭代升级提供了切实可行的路径与坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]王鑫海.基于混合线控制动系统的再生制动控制策略研究[D].吉林大学, 2024.
- [2]李鑫钢.基于线控制动的电动汽车再生制动及其容错控制策略研究[D].重庆理工大学, 2024.
- [3]张鹏辉.基于集成式线控制动系统的车辆多阶段能量回收控制策略研究[D].吉林大学, 2023.
- [4]朱振华.独立驱动/制动电动汽车制动能量回收优化控制策略研究[D].吉林大学, 2023.

作者简介：雷继彬，出生年月：1989年09月，性别：男，民族：汉，籍贯：江西省赣州市，学历：硕士，研究方向：分布式电驱动桥系统、线控制动 EMB。