

电动汽车电液复合制动系统平顺性控制研究

王成^{1,2}, 田韶鹏^{1,2}, 王博^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070;
2. 先进能源科学与技术广东省实验室佛山分中心(佛山仙湖实验室), 广东, 佛山 528200)

摘要: 为减小电液复合制动系统制动模式切换时的整车冲击以及制动力波动, 以前后双电机驱动电动汽车为研究对象, 提出一种电液复合制动控制策略, 包含轮缸压力跟随控制策略和电机补偿控制策略。轮缸压力跟随控制策略在液压制动介入时, 利用 H_∞ 鲁棒控制使液压制动系统能快速精确地控制制动力大小, 保证制动系统的稳定性控制。电机补偿控制策略在液压制动与再生制动介入或撤出时, 利用基于模糊PID的电机补偿控制策略减少复合制动系统因系统响应差异带来的冲击问题, 提高制动舒适性。通过Simulink-AMESim-CarSim联合仿真平台进行仿真验证, 结果表明, 液压制动系统能快速精确跟随目标制动力, 同时, 制动力波动较无控制情况减小了90%, 冲击度减小74%, 显著提高了制动平顺性。

关键词: 电动汽车; 复合制动; 轮缸压力跟随; 制动补偿; 平顺性

中图分类号: U461.4 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.01.06

Research on Smoothness Control in Electro-Hydraulic Composite Brake Systems for Electric Vehicles

WANG Cheng^{1,2}, TIAN Shaopeng^{1,2}, WANG Bo^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Foshan Sub-Center of Guangdong Laboratory of Advanced Energy Science and Technology (Foshan Xianhu Laboratory), Foshan 528200, Guangdong, China)

Abstract: To reduce the impact on the vehicle and minimize brake force fluctuations during mode transitions in the electro-hydraulic composite braking system, a control strategy for electro-hydraulic composite braking has been proposed, focusing on dual-motor driven electric vehicles with both front and rear wheel drive. This strategy includes a wheel cylinder pressure following control approach and a motor compensation control approach. The wheel cylinder pressure control, activated during hydraulic brake intervention, utilizes H_∞ robust control to enable the hydraulic braking system to swiftly and precisely manage the magnitude of braking force. As a result, the braking system is stabilized, ensuring reliable vehicle control. To enhance braking comfort, a fuzzy PID-based motor compensation control strategy is employed during the intervention or withdrawal of hydraulic and regenerative brakes. This strategy reduces the impact on the

收稿日期: 2023-11-27 改稿日期: 2024-01-17 网络首发日期: 2024-06-06

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA22068063): 面向多场景的模块化电驱动平台技术研究及应用

参考文献引用格式:

王成, 田韶鹏, 王博. 电动汽车电液复合制动系统平顺性控制研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(1): 49-58.

WANG Cheng, TIAN Shaopeng, WANG Bo. Research on Smoothness Control in Electro-Hydraulic Composite Brake Systems for Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(1): 49-58. (in Chinese)



composite braking system caused by variations in system response. The simulation conducted on the Simulink-AMESim-CarSim platform has verified that the hydraulic braking system can rapidly and accurately follow the target braking force. Furthermore, the results show that compared to an uncontrolled situation, the fluctuation in braking force is reduced by 90% and the shock is reduced by 74%, thereby significantly improving braking smoothness.

Keywords: electric vehicle; compound braking; wheel cylinder pressure following; brake compensation; ride comfort

典型城市工况下因制动消耗的能量约占驱动总能量的一半，而新能源汽车复合制动技术可以显著降低制动时的能量消耗，增加行驶里程。纯电动汽车电液复合制动系统包括电液制动系统和再生制动系统，可实现单液压制动、单电机制动和电液复合制动等多种制动方式^[1-2]，复合制动系统相较于传统的液压制动系统增加了再生制动力子系统，制动时优先考虑再生制动进行能量回收，不能满足制动需求时液压制动开始介入。由于电机受到SOC、电机转速、防抱死介入等因素的影响会退出制动，同时，电机与液压系统的响应速度存在差异，会导致切换制动模式时产生冲击，降低乘坐舒适性^[3-4]。目前，针对电动汽车能量回收的经济性问题，大量学者进行了广泛且深入的研究，而关于制动模式切换时减小冲击的平顺性问题研究较少，因此，通过开展复合制动系统协调控制研究来改善制动平顺性具有重要意义。

高级辅助驾驶、稳定性控制及制动能量回收都离不开电子液压制动系统^[5-6]。电子液压制动系统的工作性能受电磁阀的影响较大，目前，电子液压制动系统使用的电磁阀多为成本低且可靠性高的高速开关阀，通过控制电磁阀的占空比来改变阀口的开度可以调节轮缸压力^[7-8]。早期的电磁阀控制主要依靠优化电磁阀的响应特性参数，QI Xue等^[9]通过建立研究ABS电磁阀动态响应的有限元模型和仿真模型，提出了几种提高电磁阀性能的有效方法，较好地提升了控制效果。随着汽车性能的快速发展，精确的制动压力控制变得尤为重要。吴中华等^[10]提出一种BangBang-模糊PI组合控制的轮缸压力跟踪方法，使制动系统能快速跟踪制动压力。

王祥^[11]设计了一种电流生成模块和反馈修正控制模块，通过神经网络训练获得电磁阀的控制电流和控制信号占空比来跟踪制动力。初亮等^[12]根据常规制动和冗余制动分别提出了基于轮缸p-V特性和电磁阀溢流特性的压力控制算法。基于对电磁阀的各种研究，通过控制算法一定程度上改善了电磁阀的控制效果，但再生制动与液压制动的响应特性仍存在一定差异，这个问题亟待解决。

制动力子系统之间的响应差异会使制动模式切换时产生制动力矩突变，降低制动过程中的舒适性。MUTOH等^[13]提出用“不适指数”来评价实际电动汽车中乘客乘坐的不舒适程度，不适指数由减速度和减速度的导数来确定，将1到5分为5个等级来评判不适等级。目前，针对制动冲击问题的制动力协调控制方法主要分为以下3类：

- 1) 调整再生制动与液压制动系统响应速度使两者保持一致；
- 2) 通过改变再生制动和液压制动介入或退出的时机来减小冲击；
- 3) 利用电机补偿制动力矩偏差。

KWON等^[14]通过并发控制算法利用PI控制器同步再生制动与液压制动的响应速度来减小冲击。杨阳等^[15]利用模糊控制限制电机、液压目标制动力变化率，减小两系统的响应差异。同步两个制动力子系统响应速度的方法在一定程度上可以改善平顺性，但这种方法会导致整个制动系统响应滞后，制动需求得不到快速跟随。张雷等^[16]通过提前介入液压制动来消除制动间隙造成的响应延迟，缩短液压制动系统的响应时间。YANG Yang等^[17]提出一种基于制动踏板行程及其变化率的新型扭矩协调控制策略，以修正目标液压制动力矩并反映驾驶员的

制动意图，同时，利用电机驱动力矩来补偿液压制动造成的制动力矩不足，实现制动模式之间的平滑过渡。YU Zhuoping 等^[18]、刘平等^[19]提出了双闭环反馈和电机力校正的协调策略，通过电机力来补偿液压制动系统液压的跟踪误差。

针对再生制动和液压制动模式切换冲击度问题，本研究以一款前后双电机驱动纯电动汽车为研究对象。首先，为保证液压制动系统对目标制动力的精准跟踪，提出了一种鲁棒控制策略；然后，针对制动模式切换时造成的冲击问题提出一种电机补偿控制策略；最后，基于 Simulink-AMESim-CarSim 联合仿真平台进行仿真验证，证明策略满足制动模式切换时的平顺性要求。

1 电液复合制动系统

由前后双电机驱动的纯电动汽车电液复合制动系统结构如图 1 所示。

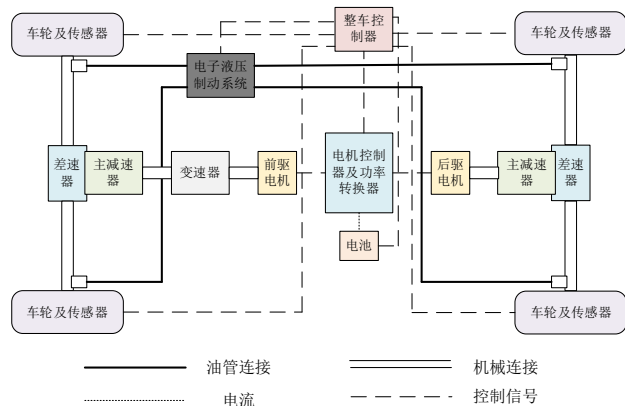


图 1 电液复合制动系统结构

该系统前后轴均存在电机制动和液压制动两套系统，电机制动系统包括电池组、电机控制器、电机等，液压制动系统包括制动踏板、电动助力器、液压控制器、液压调节单元、制动轮缸、制动器等。当驾驶员踩下制动踏板进行制动时，整车控制器通过踏板位移计算出制动强度和所需制动力，然后根据车辆的当前状态指示电机控制器和液压控制器。电机控制器控制前后电机，将电机制动转矩施加到相应的车轮上，同时，液压控制器控制液压制动单元，使液压制动扭矩施加到相应的车轮上，完成制动动作。

1.1 电机模型

电机将储存在电池中的直流电能转换为机械能，以提供驱动力推动车辆。在制动时，电机可以充当发电机的角色，将制动过程中产生的动能转化为电能，然后将其储存回电池中，这种能量回收机制提高了整个系统的能源效率，减少了能源浪费。

电机模型近似为一个一阶惯性环节，电机目标制动力与实际制动力关系为：

$$T_m = \frac{1}{\tau s + 1} T_{m_ref} \quad (1)$$

式中： T_m 为电机实际转矩； τ 为电机响应时间常数； T_{m_ref} 为目标制动力矩。

前后电机转矩特性曲线如图 2 所示。

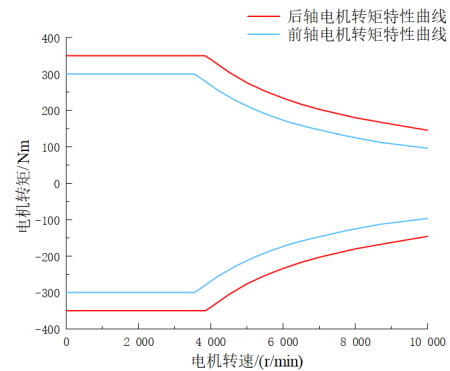


图 2 电机转矩特性曲线

1.2 液压系统模型

液压制动系统根据驾驶员的制动踏板力度进行制动力调节，通过改变轮缸内的液体压力，系统可以精确调整制动器上的制动力，确保车辆在不同驾驶条件下能稳定、安全地制动，为驾驶员提供了更好的操控性和行车安全性。

液压制动系统模型包含制动踏板、电动助力器模型、制动主缸、液压调节单元、制动轮缸、制动器等。利用 AMESim 对制动系统中的各部件进行建模，液压制动系统模型如图 3 所示。

2 轮缸压力控制策略

液压制动系统制动压力响应具有延迟性和时变性，并且液压制动系统工作时还可能会受到各种干扰，如制动轮缸阻力、电磁摩擦力以及其他外部干

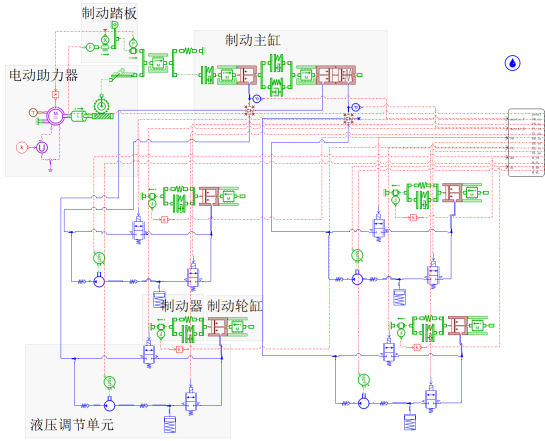


图3 液压制动系统模型

扰等, 这些干扰会使制动力跟随产生误差并影响制动安全性, 为消除这些干扰所造成的不确定性, 要求所设计的控制器具有充分的鲁棒性, 因此, 本文提出一种简单可靠、适应性高的 H_∞ 鲁棒控制方法。具体控制原理如图4所示, 通过轮缸压力传感器测得轮缸的实际压力, 求出实际压力与目标压力差值, 然后输入 H_∞ 鲁棒控制器, 计算得到高速开关阀的PWM占空比大小, 以脉冲宽度调制PWM信号为基础的电压信号作为控制输入, 对高速电磁阀进行控制, 从而控制各个轮缸的压力, 使其跟随目标压力。

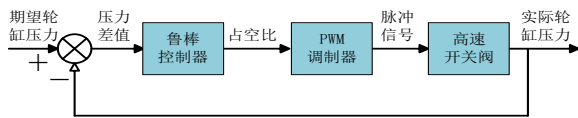


图4 轮缸压力鲁棒控制原理

2.1 液压系统数学模型

电磁阀的电磁线圈端电压方程为:

$$V = L \frac{di}{dt} + r_c i. \quad (2)$$

式中: V 为电磁线圈端电压; L 为线圈电感; r_c 为线圈电阻; i 为线圈产生的电流。

电磁阀阀芯力平衡方程为:

$$k_v i - p A_v = m_v \ddot{x}_v + C_v \dot{x}_v + K_v x_v. \quad (3)$$

式中: k_v 为电磁铁电流-力增益系数; p 为阀出口压力; A_v 为阀芯端面面积; m_v 为阀芯质量; x_v 为阀芯位移; C_v 为阀芯阻尼; K_v 为阀芯弹簧刚度。

电磁阀流量方程为:

$$Q = k_q x_v - k_p p. \quad (4)$$

式中: Q 为电磁阀流量; k_q 为位移-流量增益; k_p 为阀压力-流量增益。

液压制动系统采用固定钳盘式制动器, 忽略轮缸内部流量压力泄露, 制动轮缸流量方程为:

$$Q = A_c \dot{x}_c + \frac{V_c}{4\beta} \dot{p}. \quad (5)$$

式中: A_c 为轮缸活塞面积; x_c 为轮缸活塞位移; V_c 为轮缸液压腔体积; β 为液压油体积弹性模量。

制动轮缸活塞力平衡方程为:

$$F_p = p A_c = m_p \ddot{x}_c + C_p \dot{x}_c + K_p x_c. \quad (6)$$

式中: m_p 为活塞组质量; C_p 为活塞阻尼; K_p 为回位弹簧刚度。

根据式(2)~(6)可得:

$$\frac{k_v V}{r_c} - p A_v = m_v \ddot{x}_v + C_v \dot{x}_v + K_v x_v. \quad (7)$$

$$k_q x_v - k_p p = A_c \dot{x}_c + \frac{V_c}{4\beta} \dot{p}. \quad (8)$$

$$p A_c = m_p \ddot{x}_c + C_p \dot{x}_c + K_p x_c. \quad (9)$$

2.2 被控对象名义模型

综合式(7)~(9), 选取系统的状态变量 $x = [x_v, x_c, \dot{x}_v, \dot{x}_c, p]^T$; 系统的输入变量 $u = [V]$; 系统的输出变量 $y = [p]$ 。综合模型名义被控对象 G 可表示为:

$$G: \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx + Du. \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_v}{m_v} & 0 & -\frac{C_v}{m_v} & 0 & -\frac{A_v}{m_v} \\ 0 & -\frac{K_p}{m_p} & 0 & -\frac{C_p}{m_p} & \frac{A_c}{m_p} \\ \frac{4\beta k_q}{V_c} & 0 & 0 & -\frac{4\beta A_c}{V_c} & -\frac{4\beta k_p}{V_c} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_v}{r_c m_v} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]; \quad D = [0].$$

2.3 H_∞ 混合灵敏度控制器设计

标准的 H_∞ 控制结构如图 5 所示，图中， r 为参考输入， u 为控制信号输入， e 为跟踪信号误差， y 为系统输出， z 为系统扰动输出信号， d 为干扰， $G_p(s)$ 为广义被控对象。

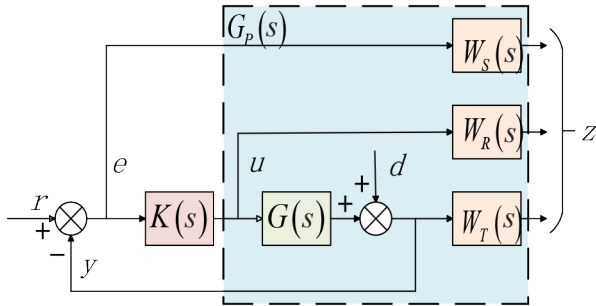


图 5 H_∞ 混合灵敏度控制模型

灵敏度函数 S 、输入灵敏度函数 R 、补灵敏度函数 T 的拉普拉斯变换形式定义为：

$$S(s) = (I + G(s)K(s))^{-1} \quad (11)$$

$$R(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}K(s) \quad (12)$$

$$T(s) = (I + G(s)K(s))^{-1}G(s)K(s) \quad (13)$$

灵敏度函数的无穷范数 $\|S\|_\infty$ 体现系统输出对干扰的抑制能力，为抑制干扰信号的影响， $\|S\|_\infty$ 越小越好；补灵敏度函数的无穷范数 $\|T\|_\infty$ 体现系统允许摄动幅度大小的度量， $\|T\|_\infty$ 越小越好； $\|R\|_\infty$ 是对加性摄动大小的度量。在同一频率下， $S + T = I$ ，两者不能同时减小，为能在抗干扰和稳定性之间做出取舍，引入灵敏度加权函数 W_S 和补灵敏度函数 W_T ，为避免执行器饱和，引入约束权函数 W_R ，限制控制信号输入。

H_∞ 混合灵敏度问题即转变成选择加权函数 W_S 、 W_T 和 W_R ，求解一稳定的控制器 $K(s)$ ，使 $\|H_{zw}\|_\infty$ 最小，即：

$$\|H_{zw}\|_\infty = \left\| \begin{matrix} W_S S \\ W_R R \\ W_T T \end{matrix} \right\| \leq 1 \quad (14)$$

加权函数选取原则：一个信号的高频成分代表抖动，低频成分代表常数和变化缓慢的部分，为使系统稳态误差很小，提高系统跟踪输入信号能力，则需要令 W_S 在低频段的增益尽可能地大，应该具

有高增益低通特性；同理，如果希望得到的控制器给出的控制信号 u 的抖动比较小，那么应令 W_T 的增益在高频段尽可能地大，应该具有高通滤波特性； W_R 一般取常数，用于限制输出信号的大小。进行多次试凑验证得到合适的加权函数 W_S 、 W_T 和 W_R ，然后利用 Matlab 软件求解 H_∞ 控制器。

将设计好的控制器用于轮缸压力控制，在 0.5 s 时输入阶跃信号命令，得到的制动力矩响应如图 6 所示。

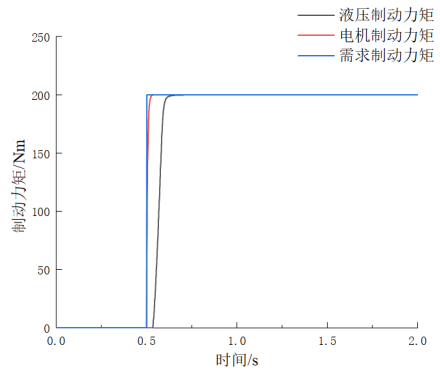


图 6 阶跃制动力矩响应曲线

可以得出实际液压制动力在接受命令 0.2 s 内可达到的目标制动力，不过电机响应速度要远快于液压制动。同时，由于液压系统存在黏滞阻力和节流现象，系统响应延迟不能完全消除，因此，在改善轮缸压力跟随精度的同时，还需要发挥电机响应快的特点对制动力不足的情况进行补偿，以提高制动舒适性。

3 复合制动力矩协调控制策略

考虑到液压制动器应具有优异的压力跟随能力，上文设计了鲁棒控制器对高速开关阀进行控制，使实际制动轮缸压力能快速准确地跟随理想目标压力。同时，由于电机制动具有响应速度快、可控性好的特点，设计前馈反馈模糊 PID 控制器，使电机制动快速满足理想制动力要求，弥补液压响应不足的缺陷，以保证输出总制动力满足制动要求。控制器控制逻辑如图 7 所示。

3.1 冲击度限制模块

评价制动模式切换时的舒适性指标分为主观评

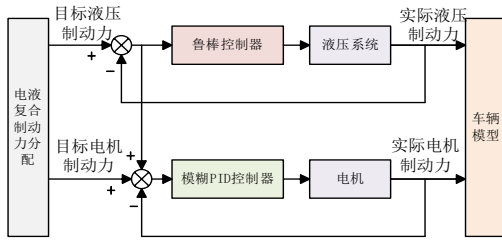


图7 电机力矩补偿控制策略框图

价和客观评价，主观评价因乘坐人员的差异具有较强的片面性，客观评价通过数据分析评判乘坐舒适性，评判结果较直观。本研究采用冲击度作为制动模式切换的平顺性评价指标，冲击度定义为车速的二阶导数，即：

$$j = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} \quad (15)$$

根据德国的冲击度限制标准，冲击度的推荐值为 $|j| \leq 10 \text{ m/s}^3$ ，冲击度超过 10 就会严重影响乘坐舒适性。为防止在制动冲击很小的情况下电机补偿频繁介入，选取电机补偿控制模块介入的冲击度限

制值为 3 m/s^3 ，当模式切换时的冲击度绝对值大于 3 m/s^3 时，电机才进行力矩补偿减小冲击度。

3.2 电机补偿控制模块

由图 6 可知，再生制动响应速度远快于液压制动，因此，将目标液压制动力与实际液压制动力之差作为再生制动的前馈变量。将再生制动过程中产生的误差作为反馈变量，设计前馈反馈模糊 PID 控制器对再生制动响应过程进行控制，保证车轮的总制动扭矩输出满足制动要求。

模糊控制器输入为电机与液压制动系统的期望制动力矩与输出制动力矩的差值之和 E 以及差值的变化率 E_c ，输出是 PID 的 3 项调整参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。将差值 E 及差值变化率 E_c 的模糊值负大到正大表示为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，其中，论域为 $[-5, 5]$ 。 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊集为 {ZE, PO, PS, PM, PB}，论域为 $[-1, 1]$ 。根据经验分别建立 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊控制规则表，模糊控制规则见表 1。

表 1 模糊控制规则

E	E_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PM/ZO	NS/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/PM	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PM
PB	ZO/ZO/PB	ZO/PS/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

4 仿真实验

4.1 仿真结果及分析

基于 Simulink、AMESim、CarSim 搭建电液复合制动系统仿真模型，研究对象为一前后双驱电动乘用车，整车及电机参数见表 2。

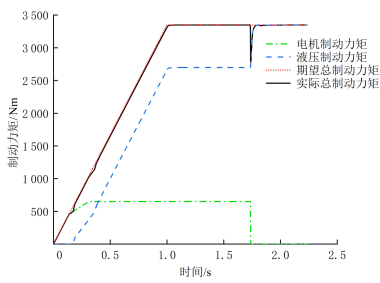
仿真初始车速设置为 40 km/h ， $0 \sim 1 \text{ s}$ 内总制动强度由 0 增长至 0.7，1 s 后制动强度保持不变，直至车速降低为 0。分别在不电机补偿控制以及有电机补偿控制的情况下进行仿真。

表 2 整车及电机参数

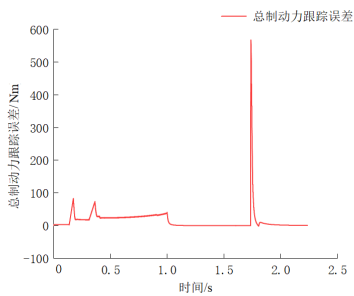
部件	参数	值
整车	整备质量/kg	1 502
前轴电机	峰值功率/kW	170
	峰值转矩/Nm	300
后轴电机	峰值功率/kW	230
	峰值转矩/Nm	350

无电机补偿控制策略的制动工况仿真结果如图 8 所示。由图可知，需求制动力在 $0 \sim 1 \text{ s}$ 内逐渐增加， 0.17 s 时电机力矩饱和，制动模式由纯电机

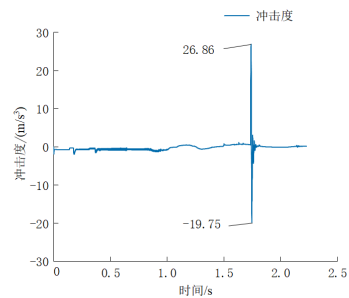
制动切换为电液复合制动，液压制动开始介入，实际总制动力矩在 0.17 s 和 0.35 s 左右有两次小幅度冲击，是由于前轴液压制动系统和后轴液压系统先后介入制动时存在响应延迟，导致液压制动力跟随不及时造成冲击。1.73 s 时车速降低至 10 km/h，电机开始撤出制动，制动模式由电液复合制动切换为纯液压制动，因为电机制动响应比液压制动响应快，导致总的实际制动力不能快速跟踪需求制动力，同时总制动力偏差较大，在复合制动模式向纯液压制动切换时产生较大的冲击度，最大达到了 26.86 m/s³。



(a) 制动力矩



(b) 总制动力误差

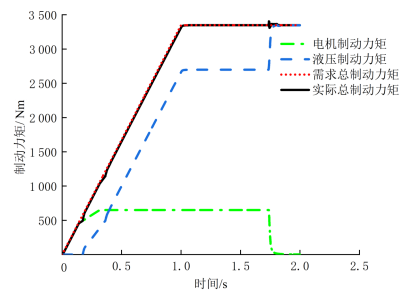


(c) 冲击度

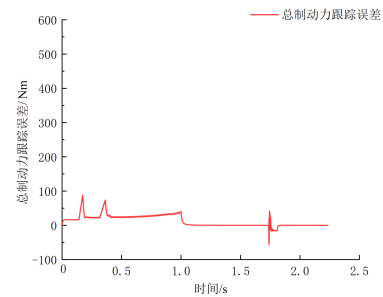
图 8 无控制策略仿真结果

使用电机补偿控制策略的制动工况仿真结果如图 9 所示。由图可知，0.17 s 时电机制动力矩饱和，

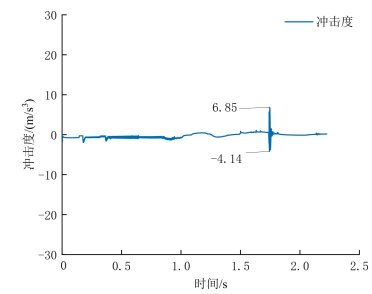
液压制动开始介入，在 0.17 s 和 0.35 s 左右前轴液压制动系统和后轴液压系统先后介入制动，实际总制动力矩产生两次小幅度波动。由于冲击度小于 3 m/s³ 不需要电机补偿调节，1.73 s 时复合制动切换为纯液压制动，冲击度大于 3 m/s³，电机补偿策略开始工作。使用电机补偿控制策略后总制动力跟踪较好，无明显的制动力波动，并且在电液复合制动切换为纯液压制动时，制动冲击度最大只有 6.85 m/s³。



(a) 制动力矩



(b) 总制动力误差



(c) 冲击度

图 9 电机力矩补偿控制策略仿真结果

如图 10 所示，1.73 s 时无电机补偿控制的电机开始撤出制动，完成撤出后电池 SOC 不再变化。有

电机补偿控制情况下的电机进行制动力补偿时可以回收部分能量，相较于无补偿控制有着更多的回收能量。

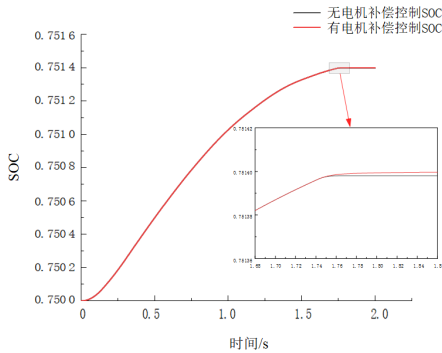


图 10 有无电机补偿控制 SOC 对比

复合制动模式切换纯液压制动工况有电机补偿控制策略与无电机补偿控制策略的仿真结果对比，见表 3。由表可知，使用电机补偿控制策略后，总制动力跟踪效果明显优于无控制工况下的跟踪效果，使用策略的情况下，电液复合制动切换为纯液压制动时制动冲击度最大为 6.85 m/s^3 ，总制动力最大跟踪误差为 -57.09 Nm ，无控制介入情况下冲击度最大为 26.86 m/s^3 ，总制动力最大跟踪误差为 567.38 Nm ，有控制策略较无控制策略情况下的最大总制动力偏差减小了 90%，冲击度减小了 74%。

表 3 有无控制策略仿真结果对比

	最大总制动力偏差/Nm	最大冲击度/(m/s^3)
有策略	- 57.09	6.85
无策略	567.38	26.86
降低百分比/%	90	74

4.2 实时仿真及结果分析

为验证控制策略的可靠性及实时性，基于 dSPACE 实时仿真系统搭建电动汽车电液复合制动控制系统仿真平台，其仿真方案如图 11 所示。平台主要包括上位机系统与硬件系统，上位机系统由两台电脑组成，分别为监控硬件系统的 SCALEXIO 仿真机柜系统与 MicroAutoBox II 控制器。电动汽车的整车 CarSim 模型以及电液制动系统 AMESim 模型下载到 dSPACE 处理器中作为实车模型。而电液复合制动系统控制策略模型则下载到 MicroAutoBox II 中，作为电动汽车的车载控制器原型。

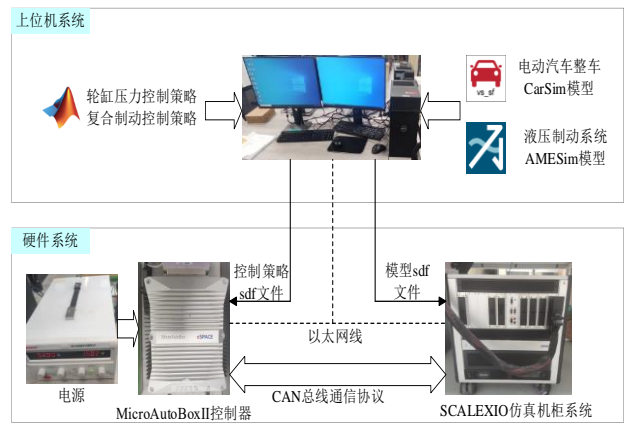
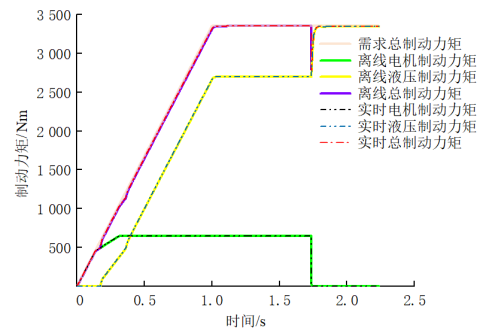
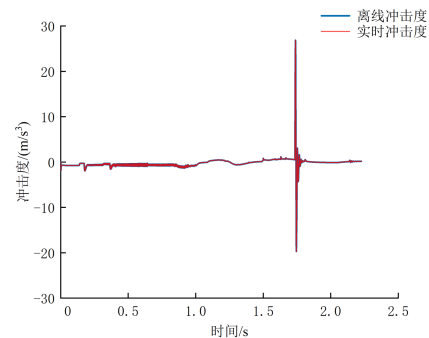


图 11 硬件在环仿真方案

设置同样的仿真工况，初始的车速为 40 km/h ， $0 \sim 1 \text{ s}$ 内总制动强度由 0 增长至 0.7，1 s 后制动强度开始保持不变，直至车速降低为 0，进行实时仿真试验。仿真结果如图 12~13 所示。实时仿真的曲线结果与离线的仿真曲线结果基本重合，通过 dSPACE 进行的仿真，说明复合制动控制策略具有实时性和可靠性。

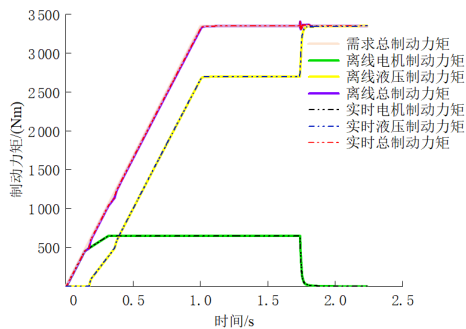


(a) 制动力矩对比

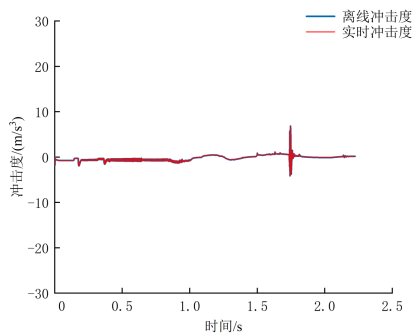


(b) 冲击度对比

图 12 无控制策略实时仿真对比结果



(a) 制动力矩对比



(b) 冲击度对比

图 13 电机力矩补偿控制策略实时仿真对比结果

5 结论

本文以双电机驱动汽车电液复合制动系统为研究对象，针对制动模式切换时的冲击度问题进行了研究。首先提出一种轮缸压力控制方法来提高轮缸压力跟随的速度和精度，然后提出了一种电机力矩补偿的控制方法，有效地减小了制动时的力矩波动和冲击度，改善了乘坐舒适性。

1) 针对液压制动系统，提出采用 H_∞ 鲁棒控制方法对轮缸压力进行调节，该控制方法能实现对轮缸压力快速且精确的跟随，减小液压制动系统与再生制动系统的响应差异。

2) 针对电液复合制动系统，提出基于模糊 PID 的电机力矩补偿控制方法，并通过 Simulink、AMESim、CarSim 联合仿真平台验证控制方法的可行性及有效性。仿真结果表明，与未施加协调控制方法的制动模式切换过程相比，采用协调控制的制动过程，最大总制动力偏差减小了 90%，最大冲击度减小 74%，显著提升了整车制动的平顺性。通过 dSPACE 实时仿真也验证了控制策略的实时性和可靠性。

参考文献 (References)

- [1] 马建,李学博,赵轩,等.电动汽车复合制动控制研究现状综述[J].中国公路学报,2022,35(11):271-294.
MA Jian, LI Xuebo, ZHAO Xuan, et al. Review of Electro-Mechanical Composite Braking Control for Electric Vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(11): 271-294. (in Chinese)
- [2] LI Congcong, ZHOU Guirong, TANG Chen, et al. A Review of Electro-Mechanical Brake (EMB) System: Structure, Control and Application [J]. Sustainability, 2023, 15(5): 1-38.
- [3] XU Wei, CHEN Hong, ZHAO Haiyan, et al. Torque Optimization Control for Electric Vehicles with Four In-Wheel Motors Equipped with Regenerative Braking System [J]. Mechatronics, 2019(57): 95-108.
- [4] PAN Wang, Fan Xiaobin, ZHU Shuaiwei. Overview of Key Technologies for Torque Ripple Suppression in Four-Wheel In-Wheel Motor Drive Electric Vehicles [J]. Recent Patents on Engineering, 2023, 17(2): 60-80.
- [5] 甘桦福,廖兴华.电子液压制动系统EHB综述[J].内燃机与配件,2022(9):92-94.
GAN Huaifu, LIAO Xinghua. Survey of Electronic Hydraulic Brake System [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(9): 92-94. (in Chinese)
- [6] WANG He, CHEN Zhen, HUANG Jiahai, et al. Development of High-Speed On-Off Valves and Their Applications [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35(4): 37-57.
- [7] 梁光成,张帅,张浩.高速开关阀在汽车EHB系统中的高频PWM控制研究[J].交通节能与环保,2020,16(5):14-18.
LIANG Guangcheng, ZHANG Shuai, ZHANG Hao. Research on High-Frequency PWM Control of High-Speed Switching Valves in Automotive EHB Systems [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2020, 16(5): 14-18. (in Chinese)
- [8] 郝江脉,李立刚,张红波,等.高速开关电磁阀阀口几何特性对线控度影响研究[J].液压气动与密封,2021,41(8):83-87.
HAO Jiangmai, LI Ligang, ZHANG Hongbo, et al. The Effect of High-Speed Solenoid Valve Port Geometric Characteristics on Flow Linearity [J]. Hydraulic Pneumatics Seals, 2021, 41(8): 83-87. (in Chinese)

- [9] QI Xuele, SONG Jian, WANG Huiyi. Influence of Hydraulic ABS Parameters on Solenoid Valve Dynamic Response and Braking Effect[C]//SAE Technical Papers, 2005-01-1590, 2005.
- [10] 吴中华, 郝永常. 汽车 EHB 系统轮缸压力的 BangBang-模糊 PI 控制[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 188-192.
WU Zhonghua, HAO Yongchang. Vehicle EHB System Wheel Cylinder Pressure Control Based on BangBang-Fuzzy PI Controller[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(1): 188-192. (in Chinese)
- [11] 王祥. 电动轿车制动能量回收系统制动压力线性控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
WANG Xiang. Study on Linear Control Algorithm of Braking Pressure for Electric Car Braking Energy Recovery System [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [12] 初亮, 常城, 王旭, 等. 面向高级自动驾驶的线控制动系统及压力控制算法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(3): 308-318.
CHU Liang, CHANG Cheng, WANG Xu, et al. Research on Brake-by-Wire System and Pressure Control Algorithm for Advanced Automatic Driving [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(3): 308-318. (in Chinese)
- [13] MUTOH N, TAKITA K. A Control Method to Suitably Distribute Electric Braking Force Between Front and Rear Wheels in Electric Vehicle Systems with Independently Driven Front and Rear Wheels [C]//Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting, Oct. 3-7, 2004, Seattle, WA, USA. Piscataway NJ: IEEE, c2004: 2746-2753.
- [14] KWON M H, PARK J H, GWAK G.S, et al. Cooperative Control for Friction and Regenerative Braking Systems Considering Dynamic Characteristic and Temperature Condition [J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(3): 437-446.
- [15] 杨阳, 何云东, 王超, 等. 电液复合制动系统模式切换扭矩协调控制[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 107-117.
YANG Yang, HE Yundong, WANG Chao, et al. Torque Coordination Control of Electro-Hydraulic Brake System During Mode Transition [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, 40(6): 107-117. (in Chinese)
- [16] 张雷, 刘青松, 王震坡. 四轮轮毂电机驱动电动汽车电液复合制动平顺性控制策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 125-134.
ZHANG Lei, LIU Qingsong, WANG Zhenpo. Electro-Hydraulic Brake Control for Improved Ride Comfort in Four-Wheel-Independently-Actuated Electric Vehicles [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 125-134. (in Chinese)
- [17] YANG Yang, HE Yundong, YANG Zhong, et al. Torque Coordination Control of an Electro-Hydraulic Composite Brake System During Mode Switching Based on Braking Intention [J]. Energies, 2020, 13(8): 1-19.
- [18] YU Zhuoping, SHI Biaofei, XIONG Lu, et al. Coordinated Control Under Transitional Conditions in Hybrid Braking of Electric Vehicle [C]//SAE Brake Colloquium & Exhibition, Oct. 14-17, 2018, Palm, Desert, CA, USA. Piscataway NJ: IEEE, c2018: 42-48.
- [19] 刘平, 姚宇, 刘阳, 等. 电动汽车电-液复合制动协调控制方法[J]. 机械设计与制造, 2023(4): 251-256.
LIU Ping, YAO Yu, LIU Yang, et al. Coordinated Control Method of Electro-Hydraulic Composite Braking for Electric Vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(4): 251-256. (in Chinese)

作者简介



王成 (1999-), 男, 安徽淮北人, 硕士研究生, 主要研究方向为汽车动力学及控制技术。
E-mail: wangcheng_up@yeah.net