

# 重度混合动力汽车分层多模式 联合制动协同控制方法

高聪聪<sup>1</sup>, 郭忠庆<sup>1</sup>, 蒋渊德<sup>2</sup>

(1. 陕西职业技术学院 汽车工程学院, 西安 710038;  
2. 长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 针对车辆处于紧急制动状态时, 电机和液压制动之间难以实现平稳过渡的问题, 提出重度混合动力汽车分层多模式联合制动协同控制方法; 对重度混合动力汽车车速、轮速以及加速度数据的多传感器数据进行融合处理, 利用融合后数据搭建重度混合动力汽车的纵向动力学方程, 利用车轮滑移率与纵向动力学方程计算获得重度混合动力汽车行驶中的路面附着系数; 设计不同工况下的重度混合动力汽车联合制动协同控制方法, 引入分层控制模式实现制动系统的平稳过渡和协调控制, 减少制动力波动问题的发生频率; 在 ABS 触发后减小电机制动矩至稳态范围的工况下, 根据路面附着系数判断 ABS 激活后电机与液压制动力的分配策略, 实现复合制动的协调控制; 在 ABS 触发前退出电机制动动力的工况下, 根据 ABS 抱死趋势预测结果动态调整电机制动动力与液压制动力分配, 确保平稳过渡至合适的制动模式; 测试结果表明, 设计方法均能保持较低的制动距离, 最高不超过 133 m, 电池 SOC 回收率均较高, 最高达到 65%, 电机力矩变化均较为平稳, 未出现短时较大频繁波动。

**关键词:** 重度混合动力汽车; 多传感器融合; 分层多模式; 车轮滑移率; 联合制动协同控制

## Layered Multi Mode Joint Braking Collaborative Control Method for Heavy Hybrid Electric Vehicles

GAO Congcong<sup>1</sup>, GUO Zhongqing<sup>1</sup>, JIANG Yuande<sup>2</sup>

(1. College of Automotive Engineering, Shaanxi Vocational and Technical College, Xi'an 710038, China;  
2. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** With a vehicle in an emergency braking state, it is difficult to achieve a smooth transition between the motor and its hydraulic braking system. For this issue, a layered multi-mode joint braking cooperative control method for heavy-duty hybrid electric vehicles is proposed. Fuse multi-sensor data on the vehicle speed, wheel speed, and acceleration of heavy-duty hybrid electric vehicles, construct longitudinal dynamic equations for heavy-duty hybrid electric vehicles using the fused data, and calculate the road adhesion coefficient of heavy-duty hybrid electric vehicles during driving using wheel slip ratio and longitudinal dynamic equations. Design a joint braking collaborative control method for heavy-duty hybrid electric vehicles under different operating conditions, introduce a layered control mode to achieve the smooth transition and cooperative control of the braking system, and reduce the frequency of braking force fluctuations; Under the condition of reducing the motor braking torque to the steady-state range after ABS triggering, the distribution strategy of the motor and hydraulic braking force after ABS activation based on the road adhesion coefficient is determined to achieve coordinated control of composite braking; Under the condition of exiting the motor braking force before ABS triggering, the distribution of motor braking force and hydraulic braking force based on the predicted ABS lock-up trend is dynamically adjusted to ensure a smooth transition to the appropriate braking mode. The test results show that the designed method can maintain a low braking distance, with a maximum of no more than 133 m. The battery SOC recovery rate is high, reaching up to 65%, indicating

收稿日期:2025-02-08; 修回日期:2025-03-20。

基金项目:2025 年度陕西省教育厅一般专项科学计划项目(25JK0411)。

作者简介:高聪聪(1991-),女,硕士研究生,讲师。

蒋渊德(1990-),男,博士,副教授。

通讯作者:郭忠庆(1991-),男,硕士,讲师。

引用格式:高聪聪,郭忠庆,蒋渊德. 重度混合动力汽车分层多模式联合制动协同控制方法[J]. 计算机测量与控制,2026,34(2):

119-125.

that the motor torque changes are relatively stable without short-term large and frequent fluctuations.

**Keywords:** heavy hybrid electric vehicles; multi-sensor fusion; layered multi-mode; wheel slip ratio; joint braking co-operative control

## 0 引言

重度混合动力汽车的制动系统涉及多个动力学参数，包括车辆质量、速度、轮胎与路面的摩擦系数、制动盘和制动片的热效应等，相比传统汽车更为复杂<sup>[1]</sup>。重度混合动力汽车在原液压摩擦制动系统的基础上增加了再生制动系统，这一系统能够有效回收制动时损失的车辆动能，提高车辆的燃油经济性<sup>[2]</sup>。但是，再生制动力矩的引入也使得混合动力汽车的制动稳定性发生了变化<sup>[3-4]</sup>。因此，需要通过联合制动协同控制策略，实现再生制动与液压制动之间的协调配合<sup>[5-6]</sup>，以确保制动过程的稳定性和安全性。

当前国内外学者对重度混合动力汽车的制动控制效果进行了深入研究。文献[7]介绍了一种基于转鼓转速传感技术的中低速新能源汽车联合制动系统控制方案。该方法依据系统传递函数特性设计了 PID 控制器的参数配置，通过该控制器输出电—液联合制动指令，实现对汽车联合制动系统的控制。然而，PID 控制器的参数配置虽然基于系统传递函数特性设计，但在实际应用中，由于车辆状态具有实时变化特性，固定的 PID 参数无法适应所有工况，从而影响制动力的精确分配。文献[8]提出了一种考虑一般和紧急制动状态的电动汽车双层机电复合制动协调控制策略。首先，在一般制动状态下，设计了一种拉格朗日二次插值预测算法，提前启动气动制动。在紧急制动状态下，提出了一种模型预测控制方法。该方法虽然考虑了不同制动状态下的制动需求，并设计了相应的控制策略，但没有考虑不同工况下参数的调整情况，难以实现精准的控制。文献[9]聚焦于提升混合动力汽车(HEV)的制动稳定性和最大化能量回收，融合了智能控制理论，在制动稳定性范围内创新性地设计了一种多智能体系统(MAS)再生制动动态协调策略。然而多智能体系统的协调控制本身就是一个复杂的问题，需要处理大量的信息和决策过程。在混合动力汽车制动系统中，这种复杂性会影响响应速度和控制精度，从而影响制动力的精确分配。文献[10]提出了两项创新策略：一是建压阶段的电机制动力修正策略，二是基于前馈—反馈机制的协调控制策略。然而 PID 控制器的参数配置和适应性可能受到工况和路面条件的影响。如果参数配置不当或适应性不足，容易导致 ABS 策略无法完全发挥其作用，从而影响制动力的精确分配。

因此设计重度混合动力汽车分层多模式联合制动协同控制方法。

## 1 重度混合动力汽车协同控制方法设计

### 1.1 车速、轮速、车辆加速度的多传感器数据融合

设计 FWA-BP 多传感器数据融合模型，利用其实施多个磁电式车速传感器、霍尔型轮速传感器、加速度传感器的数据融合，以获取更准确的重度混合动力汽车车速、轮速以及车辆加速度数据。以磁电式车速传感器为例说明 FWA-BP 多传感器数据融合模型的数据融合步骤：首先构建一个 BP 神经网络作为多传感器数据融合的基础模型，其结构设计如下：将基础多传感器数据融合模型的输出层节点数设置为磁电式车速传感器的个数。将输出层节点数量设置为 1 个，输出的是多个磁电式车速传感器的数据融合结果<sup>[11]</sup>。隐含层节点数量的设置通过下式决定：

$$\tau = \sqrt{\vartheta + q} + \epsilon \quad (1)$$

式中， $\vartheta$  为基础多传感器数据融合模型输入层节点即磁电式车速传感器的设置个数； $q$  为输出层节点数量即 1； $\epsilon$  为调节常数。

多磁电式车速传感器数据之间存在复杂的非线性关系，通过烟花算法(FWA)优化 BP 神经网络，使神经网络能够更准确地拟合多磁电式车速传感器数据之间的非线性关系，提高数据融合的准确性。在优化中，将 BP 神经网络中的所有参数(包括权重和阈值)编码为烟花个体的形式，建立起烟花维度空间与神经网络参数之间的映射关系。每个烟花的维度由输入层到隐含层的权重数量  $\rho_{IW(1,1)}$ 、隐含层神经元的阈值数量  $\rho_{b(1,1)}$ 、隐含层到输出层的权重数量  $\rho_{IW(2,1)}$  以及输出层神经元的阈值数量  $\rho_{b(2,1)}$  共同决定，具体如下式：

$$K = \rho_{IW(1,1)} + \rho_{b(1,1)} + \rho_{IW(2,1)} + \rho_{b(2,1)} \quad (2)$$

随机初始化各个烟花，将各烟花维度的范围设置在  $[-1, 1]$  之间。为评估每个烟花个体的优劣，采用神经网络的平方误差和(SSE)作为 FWA-BP 多传感器数据融合模型的适应度函数。通过下式计算每个烟花个体所对应的 BP 神经网络 SSE 值，将其作为衡量烟花个体(即基础多传感器数据融合模型参数组合)优劣的关键指标：

$$H(\alpha_i) = SSE = \tau K \sum_{i=1}^q (r_i - \beta_i)^2 \quad (3)$$

式中， $H(\alpha_i)$  为适应度函数； $r_i$  为网络的期望输出即期望的多个磁电式车速传感器数据融合结果； $\beta_i$  为网络实际输出的多个磁电式车速传感器数据融合值。通过最小化 SSE 值来优化神经网络的参数，从而提高模型对磁电式车速传感器多传感器数据的融合精度<sup>[12]</sup>。

在烟花种群中, 计算每个烟花的爆炸火花范围和爆炸火花的个数<sup>[13]</sup>。基于计算结果实施每个烟花的爆炸操作<sup>[14]</sup>。为进一步增加新解即最优多传感器数据融合模型参数组合的多样性, 通过偏移操作产生爆炸火花, 并通过高斯变异操作产生高斯火花, 以在磁电式车速传感器多传感器数据融合过程中增加种群的多样性。

将高斯火花、爆炸火花以及烟花作为这一代的烟花种群全体, 利用式(3)计算所有烟花的适应度值, 并选择适应度最优的烟花作为下一代烟花, 以获得更准确、稳定的车速测量结果。重复以上步骤, 直到达到设定的最大迭代次数, 完成寻优, 获得最优适应度的烟花。解码该最优个体, 并将其赋值给基础多传感器数据融合模型, 构建FWA-BP多传感器数据融合模型<sup>[15]</sup>。利用其实施磁电式车速传感器的多传感器数据融合, 融合结果如下:

$$G_c = H(\alpha_i)(G_{c1}, G_{c2}, \dots, G_{cg}) \quad (4)$$

式中,  $G_{cg}$  是指第  $g$  个磁电式车速传感器采集的重度混合动力汽车车速数据。同理, 获得霍尔型轮速传感器、加速度传感器采集的重度混合动力汽车轮速以及车辆加速度数据的多传感器数据融合结果:

$$G_d = G_c(G_{d1}, G_{d2}, \dots, G_{dg}) \quad (5)$$

$$G_f = G_d(G_{f1}, G_{f2}, \dots, G_{fg}) \quad (6)$$

式中,  $G_{dg}$  是指第  $g$  个霍尔型轮速传感器采集的重度混合动力汽车轮速数据;  $G_{fg}$  是指第  $g$  个加速度传感器采集的重度混合动力汽车加速度数据<sup>[16]</sup>。利用  $G_c$ 、 $G_d$ 、 $G_f$  计算重度混合动力汽车行驶中的路面附着系数。

## 1.2 路面附着系数计算

根据多传感器融合后的重度混合动力汽车车速、轮速数据计算重度混合动力汽车的车轮滑移率, 基于车轮滑移率与基于多传感器融合后的重度混合动力汽车加速度数据获得的纵向动力学方程计算获得重度混合动力汽车行驶中的路面附着系数, 作为重度混合动力汽车从小强度制动到紧急制动的工况下联合制动协同策略的一个判断参数。重度混合动力汽车的车轮滑移率的计算公式如下:

$$s = \frac{G_c - G_f G_d}{G_c G_d} \times 100\% \quad (7)$$

基于多传感器融合后的重度混合动力汽车加速度数据  $G_f$  构建其纵向动力学方程, 描述其行驶方向上的动态响应, 具体如下式:

$$F_x = cs + F_{roll} + F_{drag} \quad (8)$$

式中,  $c$  为重度混合动力汽车的质量;  $F_{roll}$  为重度混合动力汽车行驶中的滚动阻力;  $F_{drag}$  为重度混合动力汽车行驶中的空气阻力。其中重度混合动力汽车行驶中的滚动阻力  $F_{roll}$  的计算公式如下:

$$F_{roll} = F_f \cdot F_z \cdot F_x \quad (9)$$

式中,  $F_f$  为重度混合动力汽车行驶中的滚动阻力系数,  $F_z$  为重度混合动力汽车轮胎法向力。重度混合动力汽车行驶中的空气阻力  $F_{drag}$  的计算公式如下:

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \cdot F_{roll} \cdot C_d \cdot \rho \cdot \gamma \cdot u \quad (10)$$

式中,  $C_d$  为重度混合动力汽车行驶中的空气阻力系数,  $\rho$  为空气密度,  $\gamma$  为迎风面积。通过拟合获得轮胎纵向力  $F_x$  与重度混合动力汽车滑移率  $s$  之间的函数关系, 如公式(11)所示:

$$F_x = \zeta(s) \cdot F_z \quad (11)$$

式中,  $\zeta(s)$  为重度混合动力汽车滑移率  $s$  对应的路面附着系数。基于上式推算重度混合动力汽车滑移率  $s$  对应的路面附着系数  $\zeta(s)$  的计算如公式(12)所示:

$$\zeta(s) = \frac{F_x}{F_z} \quad (12)$$

将重度混合动力汽车滑移率  $s$  对应的路面附着系数  $\zeta(s)$  作为重度混合动力汽车从小强度制动到紧急制动的工况下联合制动协同策略的一个判断参数。该方法在湿滑路面、冰雪路面等低附着条件下同样适用, 通过实时计算滑移率与路面附着系数的对应关系, 能够有效反映路面状况变化, 为制动系统提供准确的控制依据, 增强车辆在不同路况下的制动稳定性和安全性。

## 1.3 分层多模式联合制动协同控制策略设计

当前的混合动力汽车制动协同控制方法无法精确地在电机制动和液压制动之间分配制动力, 导致制动效能不佳, 因此设计重度混合动力汽车分层多模式联合制动协同控制方法。通过不同工况下的三层协同控制与3种制动力协调控制模式相结合, 实现混合动力汽车电机制动和液压制动之间制动力的精准分配, 降低制动力波动。

### 1.3.1 分层多模式控制方法设计

设计策略共包括3层协同策略, 其中协同策略一为ABS触发后完全退出电机制动力工况下的协同控制策略, 其设计如下: 当ABS系统被激活而直接中断电机制动力时, 可能会影响到重度混合动力车辆在ABS制动初始阶段的行驶稳定性。针对这一挑战, 在ABS启动的瞬间, 需要采取策略性措施适度降低电机制动力, 并同步调整液压制动力, 确保在不影响整体制动效能的前提下, 迅速平稳地转换至纯液压防抱死状态<sup>[17]</sup>。为此, 在传统ABS防抱死逻辑的基础上, 引入3种控制模式: 1) 制动力协调增加模式; 2) 制动力协调保持模式; 3) 制动力协调减小模式。在这3种不同控制模式下, ABS触发后电机与液压的制动力分配策略设计如下:

$$G_l(m+1) = G_{req}(m) - G_n(m) + \dot{G}T \quad (13)$$

其中:  $G_n(m+1)$  为  $m+1$  时刻的电机制动力, 也就是在下一时刻重度混合动力汽车电机应提供的制动力,  $G_l(m+1)$  为  $m+1$  时刻的液压制动力, 也就是下一时刻

重度混合动力汽车液压系统应提供的制动力：

$$G_l(m+1) = G_{\text{req}}(m) - G_n(m) \quad (14)$$

式 (14) 为制动力协调保持模式下的 ABS 触发后电机与液压的制动力分配策略。

$$G_n(m+1) = G_n(m) - V_{d_n} T \quad (15)$$

式 (15) 为制动力协调减小模式下的 ABS 触发后电机与液压的制动力分配策略。其中  $G_n(m)$  为  $m$  时刻的电机制动力,  $G_{\text{req}}(m)$  为  $m$  时刻所需的重度混合动力汽车总制动力矩,  $\dot{G}$  为重度混合动力汽车瞬时制动力矩变化量,  $T$  为从当前时刻  $m$  到下一个时刻  $m+1$  的时间长度,  $V_{d_n}$  为重度混合动力汽车电机转矩递减速率,  $V_d$  为当前系统总转矩递减速率,  $q_i$  为重度混合动力汽车增压阀信号,  $q_d$  为减压阀信号<sup>[18]</sup>。

在这 3 种控制模式下, 该协同策略的具体运行流程如下: 当重度混合动力汽车开始制动时, 在制动踏板行程的增加下, 制动力增加, 依据滑移率评估当前是否存在电机制动力。当滑移率在 10%~35% 之间时, 认为存在电机制动力。若不存在电机制动力, 车辆一旦激活 ABS, 即切换至纯液压制动模式。若电机制动已介入, 则在重度混合动力汽车触发 ABS 后直接进入纯液压制动模式。反之, 则参照纯液压 ABS 制动, 通过判断门限值来确定此时应采取的控制模式: 若滑移率有上升趋势且未达到抱死临界值, 同时制动力需求较大, 进入制动力协调增加模式。若滑移率稳定且制动力需求适中, 进入制动力协调保持模式。若滑移率过高或制动力需求减小, 进入制动力协调减小模式。在制动力协调保持模式下, 电机与液压制动力量均维持不变, 如式 (14) 所示。在制动力协调减小模式下, 重度混合动力汽车电机以最大可能速率降低制动力量, 同时液压制动力的降低速度需受一定限制, 以适应电机力矩的缩减, 如式 (15) 所示。而在制动力协调增加模式下, 电机制动力量保持不变, 液压制动力的增加量则根据总需求制动力量与电机制动力量的差值来确定, 如式 (13) 所示。这一过程循环进行, 旨在降低制动力波动问题的发生频率。最终, 通过逐步减小电机制动力量, 整个 ABS 制动系统能够平稳过渡至纯液压 ABS 制动模式。

### 1.3.2 动力汽车电机制动力矩稳定控制设计

协调策略二为 ABS 触发后减小电机制动力矩至稳定范围的工况下的协同控制策略。其设计如下: 针对重度混合动力汽车从小强度制动到紧急制动的工况, 本策略专注于从单独电机制动平稳过渡到复合制动的协调控制。在此工况下, ABS 激活后的电机与液压制动力的分配策略具体设计如下:

$$G_l(m+1) = \kappa_l G_{\text{req}}(m) - G_n(m) + \dot{G}T \quad (16)$$

式中,  $\kappa_l$  为重度混合动力汽车 ABS 稳态转矩系数, 其计算公式如下:

$$\kappa_l = \frac{P(Y_m j_0 \zeta W + 2L_3 J)}{HW^2(c + fu_g)} \quad (17)$$

式中,  $P$  为比例系数,  $u_g$  为重度混合动力汽车质心高度,  $f$  为汽车质心到后轴的距离,  $H$  为汽车重力,  $J$  为重度混合动力汽车车轮转动惯量,  $\zeta$  为重度混合动力汽车传动效率,  $Y_m$  为电机转矩,  $W$  为重度混合动力汽车车轮半径,  $j_0$  为主减速比,  $j_g$  为重度混合动力汽车的 CVT 速比,  $L_3$  为固定的路面其门限值<sup>[19]</sup>。当重度混合动力汽车的 ABS 稳态转矩系数低于当前路面附着系数时, 说明电机制动力处于 ABS 稳态制动力矩的安全区间内, 因此在 ABS 制动期间, 维持当前电机制动力矩不变。反之, 若该稳态转矩系数超出路面附着系数, 则需按照式 (17) 调整电机制动力矩, 确保其降至稳态许可的范围内。

### 1.3.3 联合制动协同控制方法设计

协同策略三为 ABS 触发前退出电机制动力工况下的协同控制策略。在该策略中, 利用多层感知机实施 ABS 抱死的趋势预测, 依据重度混合动力汽车实时监测的轮速数据计算车轮加速度, 计算公式如下:

$$a_{\text{wheel}} = \frac{w_2 - w_1}{\zeta(s)\Delta t} \quad (18)$$

式中,  $w_2$  为  $t_2$  时刻测量到的轮速,  $w_1$  为  $t_1$  时刻测量到的轮速,  $\Delta t$  为  $t_2$  与  $t_1$  时刻之间的时间差。

将预测时间点  $K$ 、重度混合动力汽车滑移率  $s$  与车轮加速度  $a_{\text{wheel}}$  作为多层感知机的输入数据, 则构建的多层感知机的输入层神经元数量为 3, 而预测项为重度混合动力汽车在预测时间点的滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$ , 因此将输出层神经元数量设置为 2。隐藏层选用 ReLU 激活函数, 以在确保较高计算效率的同时缓解梯度消失问题。在隐藏层中, 通过前向传播计算输出值, 具体公式如下:

$$\begin{cases} z^{(l)} = \psi^{(l)} A^{(l-1)} + B^{(l)} \\ A^{(0)} = (K, s, a_{\text{wheel}}) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $\psi^{(l)}$  是指第  $l$  个隐藏层的权重矩阵;  $A^{(l-1)}$  为前一层的输出, 对于输入层,  $A^{(0)}$  即为输入特征;  $B^{(l)}$  是指第  $l$  个隐藏层的偏置向量。输出层的重度混合动力汽车在预测时间点的滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$  输出如下式:

$$A^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}}) = F[z^{(l)}] \quad (20)$$

式中,  $F$  为激活函数, 选用 ReLU。使用损失函数计算输出的预测时间点的滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$  与真实的预测时间点的滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$  之间的误差, 通过反向传播算法更新权重矩阵和偏置向量, 以最小化误差, 重复上述过程, 直到达到预设的迭代次数<sup>[20]</sup>。使用的损失函数为均方误差 MSE, 具体计算公式如下:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [A^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}})_i - \hat{A}^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}})_i]^2 \quad (21)$$

式中,  $N$  为多层次感知机在训练中使用的预测时间点  $K$ 、重度混合动力汽车滑移率  $s$  与车轮加速度  $a_{\text{wheel}}$  的样本总数;  $A^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}})_i$  为真实的预测时间点的滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$ ;  $\hat{A}^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}})_i$  是指第  $i$  个  $A^{(l)}(s', a'_{\text{wheel}})$ 。

在预测时域  $O$  内取每个时间点的重度混合动力汽车滑移率  $s'$  与车轮加速度  $a'_{\text{wheel}}$  预测结果作为预测时域  $O$  的预测值, 则预测时域  $O$  内滑移率及轮加速的预测值具体如下:

$$\begin{cases} \bar{s}' = \frac{\sum_{i=1}^O Y_{s',i}}{O} \\ i \in O \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \bar{a}'_{\text{wheel}} = \frac{\sum_{i=1}^O Y_{a'_{\text{wheel}},i}}{O} \\ i \in O \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $Y_{s',i}$  为预测时域  $O$  内时间点  $i$  的重度混合动力汽车滑移率预测输出,  $\bar{s}'$  为预测时域  $O$  内滑移率预测值,  $Y_{a'_{\text{wheel}},i}$  为预测时域  $O$  内时间点  $i$  的重度混合动力汽车轮加速预测输出,  $\bar{a}'_{\text{wheel}}$  为预测时域  $O$  内轮加速预测值。将触发 ABS 的概率定为:

$$\alpha = \max\left(\frac{\bar{s}'}{s'_{\text{low}}}, \frac{\bar{a}'_{\text{wheel}}}{a'_{\text{wheel high}}}\right) \quad (24)$$

其中:  $s'_{\text{low}}$  为双逻辑门限控制中滑移率的触发下限,  $a'_{\text{wheel high}}$  为双逻辑门限控制中轮加速度为负值时的触发上限。当触发 ABS 的概率  $\alpha > 0.5$ , 此时判断是否存在电机制动动力, 当不存在, 执行纯液压制动, 并等待触发 ABS; 反之则直接使其梯度快速减小, 将液压制动力作为补充。结束过渡后, 等待触发 ABS, 当未触发 ABS, 执行重度混合动力汽车的冗余制动系统, 反之, 则再次判断电机制动动力是否存在, 这是由于对于某些过渡时间极短的工况, 电机制动动力可能尚未完全退出就已经触发了 ABS。在这种情况下, 如果电机制动动力仍然存在, 则执行协同策略二; 如果电机制动动力不存在, 则依赖液压 ABS 实施制动。分层多模式控制流程如图 1 所示。

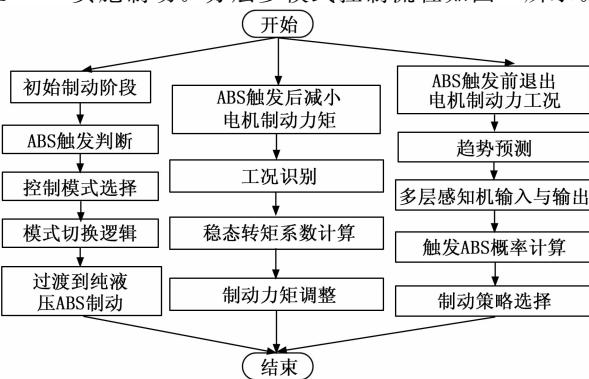


图 1 分层多模式控制流程图

## 2 实验测试

### 2.1 实验过程与评价指标

通过磁电式车速传感器、霍尔型轮速传感器、加速度传感器分别采集实验重度混合动力车辆的车速、轮速以及车辆加速度数据。在实验过程中, 车辆质量为 1 800 kg, 轮胎型号为 225/55 R17, 滚动阻力系数为 0.015, 轮胎法向力根据车辆质量与重力加速度计算; 空气阻力系数为 0.3, 空气密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>, 迎风面积为 2.5 m<sup>2</sup>。

利用设计的 FWA-BP 多传感器数据融合模型实施 3 种传感器的多传感器数据融合。在该过程中, 参数设置情况如表 1 所示。

表 1 参数设置情况

序号	参数项目	参数数据	序号	参数项目	参数数据
1	$\epsilon$	5	5	L-M 算法训练过程中的迭代次数	100
2	$W_r$	0.5	6	L-M 算法训练过程中的目标误差	$1 \times 10^{-5}$
3	$W_n$	5	7	高斯变异操作中的标准差	0.01
4	FWA 迭代次数	200	—	—	—

3 种传感器的多传感器数据融合结果示例如表 2 所示。

表 2 3 种传感器的多传感器数据融合结果示例

时间 戳/s	磁电式车速传感器 融合结果/(km/h)	霍尔型轮速传感 器融合结果/rpm	加速度传感器融 合结果/(m/s <sup>2</sup> )
5	98.764 4	1 795.123 9	0.566 8
10	102.342 6	1 820.987 1	0.654 0
15	105.676 9	1 845.331 0	0.741 2
20	108.901 2	1 870.654 2	0.827 6
25	112.123 3	1 895.986 1	0.913 0
30	130.432 0	2 100.567 7	1.453 7
35	132.788 8	2 125.124 2	1.542 2

根据多传感器融合后的重度混合动力汽车车速、轮速数据计算重度混合动力汽车的车轮滑移率, 基于车轮滑移率与重度混合动力汽车的纵向动力学方程计算获得重度混合动力汽车行驶中的路面附着系数, 作为重度混合动力汽车从小强度制动到紧急制动的工况下联合制动协同策略的一个判断参数。重度混合动力汽车的车轮滑移率及路面附着系数计算结果示例如表 3 所示。

利用设计的重度混合动力汽车分层多模式联合制动协同控制方法实现实验重度混合动力汽车的联合制动协同控制。在该步骤中, 实验参数设置情况如表 4 所示。

在 3 种工况下, 测试设计方法联合制动协同控制下的制动效能、能量回收效率以及电机制动变化情况。其中制动效能的评价指标为制动距离, 能量回收效率的评

表 3 车轮滑移率及路面附着系数计算结果示例

时间 截/s	车轮滑移 率/%	路面附 着系数	时间 截/s	车轮滑移 率/%	路面附 着系数
5	4.321 6	0.72	40	0.563 2	0.83
10	3.109 8	0.79	45	0.432 1	0.86
15	2.563 2	0.76	50	0.321 0	0.85
20	1.874 3	0.81	55	0.234 5	0.87
25	1.236 8	0.78	60	0.163 2	0.89
30	0.987 4	0.84	65	0.109 8	0.88
35	0.654 3	0.80	70	0.076 5	0.91

表 4 实验参数设置情况

序号	参数项目	参数数据	序号	参数项目	参数数据
1	多层感知机隐藏层神经元数量	10	5	双逻辑门限控制中滑移率的触发下限	0.25 m/s <sup>2</sup>
2	多层感知机训练迭代次数	1 000	6	双逻辑门限控制中轮加速度为负值时的触发上限	-5 m/s <sup>2</sup>
3	多层感知机学习率	0.001	7	冗余制动系统介入阈值(未触发 ABS 时)	0.01
4	预测时域长度	20	—	—	—

价指标为电池 SOC 的回收率。制动距离是指从驾驶员开始踩下制动踏板到车辆完全停止所行驶的距离，它是衡量制动效能最直观、最重要的指标之一。较短的制动距离意味着车辆能够更快地降低车速，从而提高行车安全性。在重度混合动力汽车中，由于车辆动力性能更强，因此要求制动系统具有更短的制动距离以迅速响应驾驶员的制动需求。电池 SOC 的回收率也是评价能量回收效率的重要指标。它表示制动过程中电池 SOC 值的上升值与电池初始 SOC 的比值。较高的 SOC 回收率意味着在制动或减速过程中，更多的能量能够被回收并储存到电池中，从而增加车辆的可用能量，延长续航里程。而电机力矩变化情况是评估电机运动性能优劣的一个重要指标，能够反映电机在制动过程中的动态响应能力和稳定性。在 3 次测试中，将基于转鼓转速传感的方法、基于 MAS 的方法以及多轴分布式电驱动车辆电液复合制动控制方法作为对比方法。

## 2.2 测试结果分析

在表 4 设置的实验参数下，设计方法与 3 种对比方法的制动效能即制动距离的测试结果如图 2 所示。

在 ABS 触发后完全退出电机制动力工况、ABS 触发后退出电机制动力减小电机制动力矩到稳态范围策略工况以及 ABS 触发前退出电机制动力工况下，设计方法控制下的制动距离相比 3 种对比方法是最小的，在第一种工况下，设计方法控制下的制动距离低于 105 m，在第二种工况下，设计方法控制下的制动距离低于 110 m，

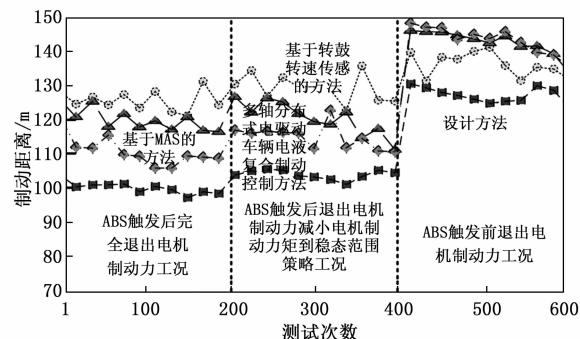


图 2 制动距离的测试结果

在最后一种工况下，设计方法控制下的制动距离低于 135 m。说明在 3 种工况下，设计方法控制下的实验重度混合动力汽车均能够更快地降低车速，从而提高行车安全性，同时说明设计方法更适用于重度混合动力汽车。

设计方法与 3 种对比方法的能量回收效率即电池 SOC 回收率的测试结果如图 3 所示。

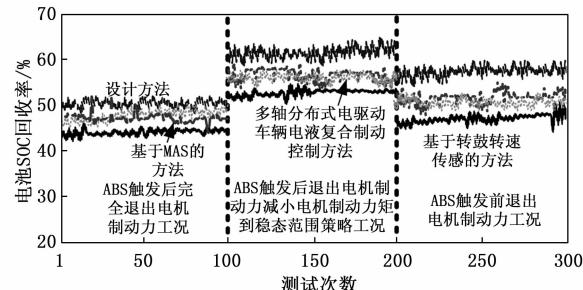


图 3 电池 SOC 回收率的测试结果

设计方法展现出了更高的电池 SOC 回收率。这意味着在制动过程中，设计方法能够更有效地回收并储存能量到电池中，反映了设计方法在能量回收效率方面的优势，有助于延长重度混合动力汽车的续航里程。这是由于：设计方法利用 FWA-BP 多传感器数据融合模型，提高了车速、轮速以及车辆加速度数据的准确性和可靠性。设计方法通过分层多模式联合制动协同控制策略，实现了电机制动和液压制动之间制动力的精准分配。而精准的制动力分配有助于在制动过程中更好地利用电机制动力进行能量回收，同时确保制动效能不受影响。

4 种方法的电机制动力矩变化情况如图 4 所示。

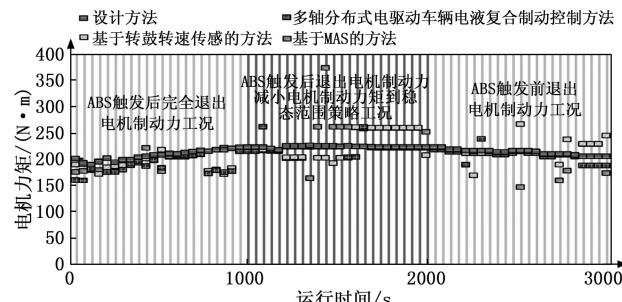


图 4 电机制动力矩变化率情况

在3种工况下, 设计方法的电机力矩变化均较为平稳, 而3种对比方法均出现短时较大频繁波动, 说明设计方法在制动过程中的动态响应能力和稳定性均高于3种设计方法。

为了测试本文方法的控制精度、鲁棒性以及实时性, 将卡尔曼滤波和粒子滤波作为对比方法, 测试结果如表5所示。

表5 不同方法的控制效果测试

指标	FWA-BP	卡尔曼滤波	粒子滤波
均方误差	0.0012	0.0025	0.0038
鲁棒性(噪声水平5%)	0.0015	0.0030	0.0045
鲁棒性(噪声水平10%)	0.0020	0.0040	0.0060
控制时间	15	25	40

由表5可知, FWA-BP多传感器数据融合模型在精度方面表现最优, 其MSE值最低, 说明融合结果更接近真实值。在不同噪声水平下, FWA-BP模型的性能变化较小, 表现出较好的鲁棒性。相比之下, 卡尔曼滤波和粒子滤波在噪声增加时性能下降较快。FWA-BP模型的处理时间最短, 说明其具有较高的实时性, 能够满足车辆控制系统对数据处理速度的要求。

### 3 结束语

本研究针对重度混合动力汽车的制动系统, 设计了一种分层多模式联合制动协同控制方法。通过FWA-BP多传感器数据融合模型, 基于这些数据, 计算了路面附着系数, 为制动策略的制定提供了关键参数。在制动策略设计上, 创新性地提出了3层协同策略与3种制动力协调控制模式相结合的方法, 提高制动效能、能量回收效率, 且制动过程中的动态响应能力较强, 稳定性较高。虽然本文方法取得了优异的成果, 但实验主要关注短期内的制动效能、能量回收效率和电机力矩变化, 而未考虑长期使用过程中车辆性能的变化以及制动系统的耐久性。因此, 在未来的研究中, 需要进行长期实验, 评估制动控制策略在长期使用过程中的性能变化以及制动系统的耐久性, 为车辆的实际使用提供更可靠的依据。

### 参考文献:

- [1] 王富云, 袁晓红, 汪怡平, 等. 基于DMPC的商用车队列高速换道控制 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46 (6): 94–101.
- [2] 李尧尧, 郭超然, 李杨, 等. 基于转向与制动协同的无人驾驶轨迹跟踪控制 [J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45 (4): 1185–1192.
- [3] 王世轩, 汪怡平, 苏楚奇, 等. 基于DMPC的多车协同自适应巡航控制研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (4): 72–79.
- [4] 李峰, 邓宇彤, 刘亦心, 等. 考虑路面摩擦性能的自动驾驶汽车安全制动策略 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52 (4): 489–500.
- [5] 陈松, 王剑. 基于载荷识别的汽车转向机电制动稳定性控制 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (9): 136–139.
- [6] 李洪亮, 张国靖, 樊平. 混合动力矿用卡车节能协同优化及最优实时控制综合研究 [J]. 机械传动, 2024, 48 (7): 30–39.
- [7] 宗明建, 马文胜, 袁望方, 等. 基于转鼓转速传感的中低速新能源汽车联合制动系统控制方法 [J]. 传感技术学报, 2024, 37 (7): 1244–1249.
- [8] ZHAO B, LI H, CHEN S R. A novel bilevel electromechanical compound braking coordinated control strategy for electric vehicles [J]. Energy Technology: Generation, Conversion, Storage, Distribution, 2024, 12 (3): 1–6.
- [9] 王儒, 张艺越, 方明月. 基于MAS的HEV再生制动动态协调控制策略研究 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2023, 41 (1): 88–91.
- [10] 靳立强, 李星辰, 田端洋, 等. 多轴分布式电驱动车辆电液复合制动控制研究 [J]. 汽车工程学报, 2024, 14 (2): 241–254.
- [11] 高凯, 罗攀, 谢进, 等. 基于数据融合的混合动力汽车速度轮廓预测 [J]. 机械工程学报, 2024, 60 (6): 342–353.
- [12] 范爱龙, 李永平, 杨强, 等. 船舶混合动力系统能量管理预测控制方法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (1): 162–173.
- [13] 陈慧勇, 李涛, 杨学青, 等. 车路协同的插电式汽车预测能量管理策略研究 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2023, 44 (2): 41–50.
- [14] 赵靖华, 张雨彤, 曹派, 等. 压缩天然气发动机增程式电动汽车能量管理优化 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54 (3): 600–609.
- [15] 付主木, 朱龙龙, 陶发展, 等. 基于Stackelberg博弈的燃料电池混合动力汽车跟车能量管理 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2024, 45 (4): 1–9.
- [16] 项鸿博, 裴晓飞, 刘杏, 等. 基于DP的混合动力汽车单踏板控制策略研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (11): 122–131.
- [17] 郭丹丹, 黄玉萍. 面向混合动力汽车液压再生能量控制策略研究 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (8): 93–103.
- [18] 李妍颖, 刘孟楠, 徐立友, 等. 基于非线性规划遗传算法的混合动力拖拉机控制策略 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2023, 44 (2): 166–172.
- [19] 刘禹贝, 林晓鸿, 赵云云, 等. 基于司机驾驶风格的混合动力有轨电车能量管理策略 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (3): 78–83.
- [20] 董晗, 金鑫, 李明达, 等. 前置式并联液压混合动力车辆控制系统研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (14): 45–53.