

# 新能源汽车液压制动力优化分配控制系统设计

颜翠翠

(西安思源学院 工学院, 西安 710038)

**摘要:** 在新能源汽车制动过程中, 为合理分配制动力, 确保车辆在各种工况下实现稳定制动, 避免车轮抱死、侧滑等危险情况的发生, 提高车辆的制动安全性, 设计新能源汽车液压制动力优化分配控制系统; 基于硬件采集数据获得新能源汽车前轴制动力分配系数与电液制动力分配比, 采用粒子群算法实现液压制动力多目标优化分配; 基于多目标优化分配结果, 设计协同控制器, 基于最优液压制动力多目标优化分配方案实现液压制动与电机再生制动协同控制; 实验测试结果表明, 设计系统的高附着路面制动吻合度、低附着路面制动吻合度、低附着路面转向制动吻合度均较高, 说明设计系统的安全性、稳定性较高。

**关键词:** 新能源汽车; 传感器; 液压制动力; 粒子群算法; 优化分配控制; 协同控制器

## Design of Optimization Distribution Control System for Hydraulic Braking Force of New Energy Vehicles

YAN Cuicui

(School of Engineering, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In the braking process of new energy vehicles, in order to allocate braking force reasonably, ensure stable braking of vehicles under various working conditions, avoid dangerous situations such as wheel lock up and side slip, and improve the braking safety of vehicles, a hydraulic braking force optimization distribution control system for new energy vehicles is designed, which obtains the front axle braking force distribution coefficient and electro-hydraulic braking force distribution ratio of new energy vehicles according to the collected data of the system hardware, and uses a particle swarm optimization algorithm to achieve multi-objective optimization distribution of hydraulic braking force. According to the multi-objective optimization allocation results, a collaborative controller is designed, and the optimal hydraulic compression power multi-objective optimization allocation scheme is used to achieve the coordinated control of hydraulic braking and motor regenerative braking. Experimental results show that the designed system has a high matching degree for high adhesion road braking, low adhesion road braking, and low adhesion road steering braking, indicating that the designed system has high safety and stability.

**Keywords:** new energy vehicles; sensor; hydraulic braking force; particle swarm optimization algorithm; Optimized allocation control; collaborative controller

## 0 引言

当前, 液压制动系统由于控制响应滞后与机械摩擦损耗的双重约束, 成为制约智能驾驶体验与新能源汽车整车能效的核心瓶颈。在城市工况下, 传统液压制动系统会将 15%~20% 的动能直接转化为热能, 导致该部分动能直接散失, 这会造成新能源汽车城市续航里程产生 18%~25% 的折损。传统液压制动与 L3 级自动驾驶

系统要求制动响应时间低于 80 ms 的需求产生冲突, 当前液压制动系统存在 150ms 的响应延迟, 使复杂工况下新能源汽车必须依赖保守冗余策略, 导致新能源汽车的通行效率间接降低 15%~20%<sup>[1]</sup>。在极端工况下, 该矛盾进一步激化: 在低温环境下, 液压油黏度会大幅增加, 使踏板力一减速度线性度偏差增大, 在高 SOC 状态下会导致电机回收扭矩的阶梯式衰减, 从而带来液压系统介入冲击的问题, 损害新能源汽车的制动信心与

收稿日期:2025-05-22; 修回日期:2025-06-27。

基金项目:西安思源院校长基金科研项目(XASYB24ZD05)。

作者简介:颜翠翠(1989-),女,硕士,副教授。

引用格式:颜翠翠. 新能源汽车液压制动力优化分配控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(5):172-179.

驾乘舒适性。在该背景下，新能源汽车液压制动力优化分配控制系统成为提升智能驾驶体验与新能源汽车整车能效的关键技术载体。

当前该方向的研究主要聚焦于多系统协同、智能算法应用等，其中国外的研究主要侧重于全工况自适应控制、冗余架构与容错控制、控制算法与硬件的深度耦合等。而国内的研究则主要侧重于自适应控制算法、多传感器融合、协同控制等，同时还依托硬件在环与数字孪生等技术，实现了覆盖极端工况验证平台的构建，以减少物理测试成本。文献 [2] 设计电子液压制动系统，对该系统实施建模分析，与电机控制相结合，设计了一种基于自抗扰控制方法的主缸液压力串级控制器，通过 AMEsim 软件进行建模标定，并实施仿真分析。然而自抗扰控制需实时估计系统状态和扰动，计算量大，易引发控制指令延迟，在一些工况下会导致控制精度下降。文献 [3] 通过主缸液压力来控制 ABS 电机负载，利用系统配备实现滤波功能，最终设计了电驱液压系统闭环控制方案，并给出了利用 PI 调节器实施调速控制的方法。然而 PI 调节对参数变化敏感，复杂工况下往往很难兼顾快速性和稳定性。文献 [4] 设计了一种自适应压力控制策略。设计一种外环压力控制器，在设计中引入液压特性的动态线性化模型，通过滑模观测器实现模型参数辨识，最终达成对非线性液压特性的自适应。并设计了一种内环伺服控制器，通过反步动态面控制与基于压力的连续摩擦补偿应对传动机构摩擦阻碍。然而传统自适应控制难以同时补偿全部干扰，容易导致压力控制精度下降。文献 [5] 设计了自适应压力控制策略。首先设计了外层液压控制器，在设计中引入鲁棒滑模理论与自适应径向基函数神经网络来克服液压时变不确定性。接着设计了中间层位置控制器，该控制器采用滑模控制与 Karnopp 摩擦前馈补偿来应对传动机构非线性摩擦阻碍。最后设计了内层电流控制器，基于李雅普诺夫理论克服电机电磁特性耦合问题。然而自适应控制需实时估计和补偿多维扰动，可能导致控制指令延迟，在一些工况下会导致控制精度下降。因此设计新能源汽车液压制动力优化分配控制系统。

## 1 新能源汽车液压制动力优化分配控制系统设计

在本次设计的新能源汽车液压制动力优化分配控制系统中，控制器与传感器模块至关重要。控制器作为核心部件，主要功能包括接收来自各类传感器的数据，如车速传感器、踏板开度传感器、前后轴荷传感器等采集的车速、踏板开度、前后轴荷分布等数据；依据这些数据，基于预设算法进行计算，如利用车速、踏板开度等数据计算前轴制动力分配系数，借助电机转速、车轮滑移率等数据计算电液制动力分配比；根据计算结果，通

过基于粒子群算法的液压制动力多目标优化分配策略，确定最优的液压制动力分配方案，并向执行机构发送控制指令，实现液压制动与电机再生制动协同控制。

传感器模块则负责实时、准确地采集车辆运行过程中的各种参数，为控制器提供决策依据。在实现相关算法过程中，控制器首先对采集到的数据进行预处理，去除噪声和异常值。然后，将处理后的数据代入粒子群算法模型，通过不断迭代更新粒子的位置和速度，寻找最优解，最终得到最优的液压制动力分配目标，并据此控制制动系统。

### 1.1 控制器与传感器模块设计

在控制器与传感器模块中，采用的控制器硬件为 32 位微控制器，型号为 STM32F407VGT6。该型号的是一款高性能的 32 位微控制器，其基于 ARM Cortex-M4 内核，工作频率高达 168 MHz，具备强大的计算能力，能够快速处理复杂的控制算法和传感器数据。且内置 1 MB Flash 存储器和 192 kB SRAM，为程序运行和数据存储提供了充足的空间。丰富的外设接口，如多个 USART、SPI、I2C 等，方便与外部传感器和电机进行通信。

在外围电路设计中，为提高系统的抗干扰能力，在电源输入端添加了滤波电容，以滤除电源中的高频噪声。同时，在芯片电源引脚附近并联了去耦电容，进一步降低电源波动对芯片的影响。时钟电路中，晶体振荡器周围采用了屏蔽罩，减少外界电磁干扰对时钟信号的影响。此外，在 PCB 布局布线时，将模拟电路和数字电路进行分区布局，避免相互干扰，同时采用差分走线方式传输关键信号，提高信号的抗干扰能力。

利用高低电平信号线在 STM32F407VGT6 上外接 I/O 输入输出接口，以实现微控制器与新能源汽车电机以及外部传感器之间的信息交互<sup>[6]</sup>，从而完成控制指令的下发与传感器信息的处理。为 STM32F407VGT6 配置电源电路、JTAG 接口电路、时钟电路等外围电路，使 STM32F407VGT6 能够正常运行，且功能更加完整、灵活。其中电源电路的设计如图 1 所示。

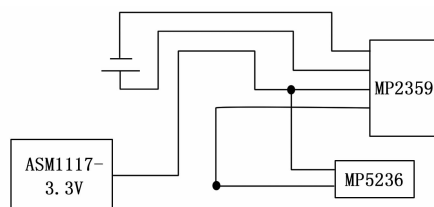


图 1 电源电路的设计

其中 MP2359 是一款电源芯片，能够产生 5 V 电源。MP5236 则是同步 DC-DC 变换器芯片，支持 4.5 V 至 23 V 的输入电压<sup>[7-8]</sup>。通过 MP5236 将 MP2359 的 5 V

电压变换为 3.3 V 的电压。接着通过 ASM1117-3.3 V 这一线性稳压器芯片稳定 MP5236 输出的 3.3 V 电压。同时 ASM1117-3.3 V 内置了过热保护功能，能够自动触发过热保护机制，使 STM32F407VGT6 能够在安全温度范围内稳定运行。ASM1117-3.3 V 还内置了短路保护功能，在检测到输出短路时 ASM1117-3.3 V 会主动切断输出，能够有效防止外围电路与 STM32F407VGT6 的损坏。

时钟电路的设计如下：在 STM32F407VGT6 上外置一个 25 MHz 的晶体振荡器。相比内部晶振，外部晶振具有更高的精度与稳定性，能够提供更加准确的时钟信号，可为 STM32F407VGT6 提供高达 168 MHz 的时钟脉冲。配置的传感器种类如图 2 所示。

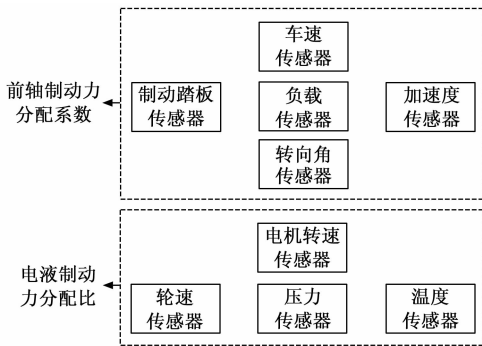


图 2 配置的传感器种类

通过配置的车速传感器采集新能源汽车车速数据  $B_Q$ ，通过制动踏板传感器采集新能源汽车踏板开度数据  $B_E$ ；通过负载传感器采集新能源汽车前后轴荷分布数据  $B_W$ ；通过加速度传感器采集新能源汽车纵向减速度数据  $B_T$ ；通过转向角传感器采集新能源汽车转向角数据  $B_U$ ，利用以上 5 种数据计算新能源汽车前轴制动力分配系数  $B$ ，计算公式如下：

$$B = \frac{B_Q B_E B_W B_T}{\sqrt{B_U}} \quad (1)$$

通过配置的电机转速传感器采集新能源汽车电机转速数据  $B_R$ ；通过轮速传感器采集新能源汽车车轮滑移率数据  $\kappa$ ；通过压力传感器采集新能源汽车主缸压力数据  $C_B$ ；通过温度传感器采集新能源汽车制动盘温度数据  $C_H$ ，利用以上 4 种数据计算新能源汽车电液制动力分配比  $A$ ，计算公式如下：

$$A = \frac{B_R C_B C_H}{2\kappa^2} \quad (2)$$

利用新能源汽车前轴制动力分配系数  $B$  与电液制动力分配比  $A$  实现新能源汽车液压制动力优化分配液压制动力<sup>[9]</sup>优化分配。

## 1.2 基于粒子群算法液压制动力多目标优化分配方法

在液压制动力优化分配模块中，设计一种基于粒子

群算法的液压制动力多目标优化分配策略。在该策略的设计中，首先需要选取设计变量：将新能源汽车前轴制动力分配系数<sup>[10]</sup>  $B$  与电液制动力分配比  $A$  作为设计变量，将二者的上限设置为  $(0.8, 0.9)$ ，下限设置为  $(0.1, 0.1)$ 。基于这两个设计变量确定液压制动力多目标优化分配策略的优化分配目标与物理边界：首先将新能源汽车电液复合制动系统在制动过程中回收的制动能量作为评价能量回收率的指标，具体计算公式如下：

$$\chi_{\text{recovery}} = \int \delta dt \quad (3)$$

$$\delta = \frac{uG \left[ UuG + l_e l_T \epsilon_m \left( 1 + \frac{1}{A} \right) \right]}{l_T^2 \left( 1 + \frac{1}{A} \right)^2} \quad (4)$$

式中， $\delta$  是指新能源汽车制动能量回收的功率； $t$  是指时间； $\chi_{\text{recovery}}$  是指新能源汽车电液复合制动系统在制动过程中回收的制动能量； $u$  是指新能源汽车车轮滚动半径； $U$  是指新能源汽车电阻； $G$  是指新能源汽车主阀芯弹簧力； $l_e$  是指新能源汽车电动机反电势系数； $l_T$  是指新能源汽车电动机转矩系数； $\epsilon_m$  是指新能源汽车车轮角速度<sup>[11]</sup>。则新能源汽车的能量回收率评价函数可以用下式来表示：

$$F_1(A) = \chi_{\text{recovery}} \quad (5)$$

根据新能源汽车前轴制动效率曲线与制动时质心偏移的等效距离以及坐标轴横轴围成图形的面积  $Z_1$ 、新能源汽车后轴制动效率曲线与制动时质心偏移的等效距离以及坐标轴横轴围成图形的面积  $Z_2$  将新能源汽车制动效率的性能指标定为下式：

$$F_2(B) = Z_1 + Z_2 \quad (6)$$

其中：新能源汽车前轴制动效率曲线与制动时质心偏移的等效距离以及坐标轴横轴围成图形的面积  $Z_1$  的计算公式如下：

$$\begin{cases} Z_1 = \int_0^{\frac{kB-c}{k_1}} \gamma_f d\eta \\ \frac{kB-c}{g_k} = \varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中， $\eta$  是指新能源汽车附着系数； $k$  是指新能源汽车轴距； $g_k$  是指新能源汽车质心高度； $c$  是指后轴到新能源汽车质心的水平距离； $\varphi$  是指制动时质心偏移的等效距离； $\gamma_f$  是指新能源汽车前轴制动效率曲线，其计算公式如下：

$$\gamma_f = \frac{s}{\iota_f} \quad (8)$$

式中， $\iota_f$  是指新能源汽车前轴利用附着系数； $s$  是指新能源汽车前轴车轮不发生抱死的最大制动强度<sup>[12]</sup>。新能源汽车后轴制动效率曲线与制动时质心偏移的等效距离以及坐标轴横轴围成图形的面积  $Z_2$  的计算公式如下：

$$Z_2 = \int_{\frac{kB-c}{\epsilon_4}}^1 \gamma_r dv \eta \quad (9)$$

式中,  $\gamma_r$  是指新能源汽车后轴制动效率曲线, 其计算公式如下:

$$\gamma_r = \frac{s}{\epsilon_r} \gamma_{r'} = \frac{s}{\epsilon_r} \quad (10)$$

式中,  $\epsilon_r$  是指新能源汽车后轴利用附着系数<sup>[13]</sup>。根据新能源汽车前轴利用附着系数  $\epsilon_f$  与新能源汽车附着系数  $\eta$  所围成图形的面积  $Z_3$ 、新能源汽车后轴利用附着系数  $\epsilon_r$  与新能源汽车附着系数  $\eta$  所围成图形的面积  $Z_4$  将新能源汽车利用附着系数指定为下式:

$$F_3(B) = Z_3 + Z_4 \quad (11)$$

其中: 新能源汽车前轴利用附着系数  $\epsilon_f$  与新能源汽车附着系数  $\eta$  所围成图形的面积  $Z_3$  的计算公式如下:

$$Z_3 = \int_0^1 |\epsilon_f| ds \quad (12)$$

新能源汽车后轴利用附着系数  $\epsilon_r$  与新能源汽车附着系数  $\eta$  所围成图形的面积  $Z_4$  的计算公式如下:

$$Z_4 = \int_0^1 |\epsilon_r| ds \quad (13)$$

根据新能源汽车的能量回收率评价函数  $F_1(A)$ 、新能源汽车制动效率的性能指标  $F_2(B)$ 、新能源汽车利用附着系数  $F_3(B)$  制定新能源汽车液压制动力优化分配的分配目标, 具体如下式:

$$H(E_f, E_r, \zeta_{pedal}) = \max F_1(A), F_2(B); \min F_3(B) \quad (14)$$

式中,  $E_f$  是指新能源汽车的前轴制动力;  $E_r$  是指新能源汽车的后轴制动力;  $\zeta_{pedal}$  是指新能源汽车的踏板力<sup>[14]</sup>。制定液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的物理边界, 首先将新能源汽车制动踏板的评价指标作为第一个物理边界, 以确保新能源汽车制动系统的法规符合性、操控性、舒适性、安全性, 并提升新能源汽车整体性能与用户体验。其公式以及约束值如下式所示:

$$F_4(A) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{\epsilon_0} \left| \frac{G_m}{G_f} \right|^2 d\epsilon > 0.0003 \quad (15)$$

式中,  $\epsilon_0$  是指路面信息有效频率范围的最高值;  $G_m$  是指新能源汽车踏板力信号的功率谱密度;  $G_f$  是指新能源汽车制动踏板力信号的频域表示;  $\epsilon$  是指路面信息有效频率。

同时在液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的制定中, 需要遵循 ECE 法规, 以提升新能源汽车的制动稳定性, 保障新能源汽车的制动安全性<sup>[15-16]</sup>。当新能源汽车前轴车轮不发生抱死的最大制动强度满足  $0.15 < s < 0.80$ , 此时新能源汽车前轴制动力分配系数  $B$  需要满足下式:

$$B \geq \frac{c + sg_k}{W} \quad (16)$$

当新能源汽车前轴车轮不发生抱死的最大制动强度满足  $0.10 \leq s \leq 0.52$ , 此时新能源汽车前轴制动力分配系数  $B$  需要满足下式:

$$B \leq \frac{(s + 0.04)(c + sg_k)}{0.7sW} \quad (17)$$

就此完成液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标及其物理边界的制定<sup>[17]</sup>。利用粒子群算法获取液压制动力多目标优化分配策略的最优分配目标。在处理复杂约束条件方面, 随着约束条件的增多和复杂度提升, 算法搜索可行解的难度大幅增加。如在新能源汽车液压制动力多目标优化中, 要同时满足踏板评价指标、ECE 法规等多方面物理边界约束, 粒子群算法可能因难以快速找到满足所有约束的可行解, 导致搜索效率降低, 甚至无法收敛到有效解集。为避免这种情况, 本文引入惯性权重动态调整机制, 使粒子在前期具有较大的搜索范围, 后期逐渐聚焦到最优解附近, 帮助算法跳出局部最优, 从而更好地实现新能源汽车液压制动力多目标优化分配。具体操作流程如下: 首先初始化实现液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的粒子群: 定义粒子位置为  $\alpha_i = [E_f, E_r, \zeta_{pedal}]$ , 用  $V_i$  表示粒子速度。在满足物理边界的前提下, 初始化实现液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的粒子群的位置, 以确保算法由可行解空间出发<sup>[18]</sup>。通过下式实施实现液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的粒子群速度的初始化处理:

$$-100 \text{N/s} \leq V_i \leq 100 \text{N/s} \quad (18)$$

对于各粒子, 通过式 (14) 计算液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标值。比较各粒子历史个体最优成本即历史液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标值与当前迭代中的总成本即当前迭代中的总液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标值, 当粒子的当前迭代中的总成本小于历史个体最优成本, 则更新粒子最优位置, 具体公式如下:

$$Q_{best,i} \leftarrow \alpha'_i \quad (19)$$

式中,  $\alpha'_i$  是指粒子  $i$  的当前位置向量, 也就是算法在搜索空间中针对液压制动力多目标优化分配策略的一个候选解;  $Q_{best,i}$  是指更新后的粒子最优位置<sup>[19]</sup>。否则, 保持原有的粒子全局最优位置不变。寻找当前迭代中全部粒子的最小总成本即当前迭代中的最小总液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标值, 当其小于全局历史最优成本即全局历史最优液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标值, 则更新粒子的全局最优位置, 具体公式如下:

$$R_{best,i} \leftarrow \alpha''_i \quad (20)$$

式中,  $\alpha_i^k$  是指最小成本的粒子位置;  $R_{\text{best},i}$  是指更新后粒子的全局最优位置。利用更新后的粒子最优位置  $Q_{\text{best},i}$  与更新后粒子的全局最优位置  $R_{\text{best},i}$  更新粒子速度, 具体公式如下:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + o_1 R_1 (Q_{\text{best},i} - \alpha_i^k) + o_2 R_2 (R_{\text{best},i} - \alpha_i^k) \quad (21)$$

式中,  $\omega$  是指惯性权重;  $R_1$ 、 $R_2$  是指 (0, 1) 范围内的随机数;  $o_1$ 、 $o_2$  是指学习因子;  $V_i^k$  是指第  $k$  次迭代中的粒子速度;  $\alpha_i^k$  是指第  $k$  次迭代中的粒子位置。利用更新后的粒子速度  $V_i^{k+1}$  更新粒子位置, 具体公式如下:

$$\alpha_i^{k+1} = \alpha_i^k + V_i^{k+1} \quad (22)$$

对更新后的粒子位置  $\alpha_i^{k+1}$  实施物理边界检查, 当违反踏板评价指标物理边界或 ECE 法规物理边界, 利用罚函数法修正液压制动力多目标优化分配策略。重复初始化实现液压制动力多目标优化分配策略优化分配目标的粒子群后的步骤, 直至达到最大迭代次数, 输出最优的新能源汽车前轴制动力、新能源汽车后轴制动力、新能源汽车踏板力, 获取新能源汽车液压制动系统与电机再生制动系统协同工作参数。

### 1.3 新能源汽车液压制动与电机再生制动协同控制方法

在新能源汽车液压制动与电机再生制动协同控制模块中, 设计一种协同控制器, 基于最优新能源汽车前轴制动力、新能源汽车后轴制动力、新能源汽车踏板力实现新能源汽车液压制动系统与电机再生制动系统的协同控制。该协同控制器由防抱死控制器、模糊控制器设计以及前馈补偿控制器构成。通过前馈补偿控制器使新能源汽车质心处侧偏角趋近于期望值零。前馈补偿控制器的设计具体如下: 将最优新能源汽车前轴制动力作为该前馈补偿控制器的输入, 则该前馈补偿控制器的输入控制力矩为:

$$N_{ff}(h) = E_f^* K_{ff} \psi_f(h) \quad (23)$$

式中,  $E_f^*$  是指最优新能源汽车前轴制动力;  $K_{ff}$  是指新能源汽车前轮阶跃的稳态响应;  $\psi_f(h)$  是指新能源汽车方向盘转角。假设新能源汽车在稳态响应时的控制力矩稳态值为  $N_{ff0}(h)$ , 在稳态响应时的方向盘转角稳态值为  $\psi_{f0}(h)$ , 则可以将式 (23) 写为:

$$N_{ff0}(h) = E_f^* K_{ff} \psi_{f0}(h) \quad (24)$$

假设在稳态响应时的横摆角速度稳态值为  $\xi_0$ , 在稳态响应时的侧偏角稳态值为  $\omega_0$ , 则可以将式 (24) 写为:

$$N_{ff0}(h) = E_f^* \frac{\xi_0}{\omega_0} \psi_{f0}(h) \quad (25)$$

通过上式即前馈补偿控制器的输入控制力矩使新能源汽车质心处侧偏角趋近于期望值零。接着设计模糊控制器, 以降低新能源汽车实际横摆角速度与期望横摆角

速度之间的偏差, 使新能源汽车具有良好的跟踪性, 并通过权系数的调整进一步降低新能源汽车质心处侧偏角。模糊控制器的设计具体如下: 利用最优新能源汽车后轴制动力计算新能源汽车实际横摆角速度与期望横摆角速度之间的偏差, 作为该模糊控制器的第一个输入, 其表达式如下:

$$\Delta r = E_r^* P_{r1} U_f (\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_D) \quad (26)$$

式中,  $E_r^*$  是指用最优新能源汽车后轴制动力;  $P_{r1}$  是指模糊控制器量化因子;  $\mathbf{Y}$  是指新能源汽车实际横摆角速度向量;  $\mathbf{U}_f$  是指权系数向量, 用于控制模糊控制器输入量中侧偏角偏差与横摆角速度偏差所占的比重;  $\mathbf{Y}_D$  是指新能源汽车期望横摆角速度向量<sup>[20]</sup>。

利用最优新能源汽车后轴制动力计算新能源汽车实际横摆角速度与期望横摆角速度之间偏差的变化率, 将其作为该模糊控制器的第二个输入, 其表达式如下:

$$\dot{\Delta r} = E_r^* P_{r2} U_f (\dot{\mathbf{Y}} - \dot{\mathbf{Y}}_D) \quad (27)$$

式中,  $P_{r2}$  是指模糊控制器量化因子;  $\dot{\mathbf{Y}}$  是指新能源汽车实际横摆角速度向量变化值;  $\dot{\mathbf{Y}}_D$  是指新能源汽车期望横摆角速度向量变化值。利用最优新能源汽车后轴制动力计算新能源汽车实际侧偏角与期望侧偏角之间的偏差, 作为该模糊控制器的第三个输入, 其表达式如下:

$$\Delta b = E_r^* P_{r1} U_f (\mathbf{I} - \mathbf{I}_D) \quad (28)$$

式中,  $\mathbf{I}$  是指新能源汽车实际侧偏角向量;  $\mathbf{I}_D$  是指新能源汽车期望侧偏角向量。利用最优新能源汽车后轴制动力计算新能源汽车实际侧偏角与期望侧偏角之间偏差的变化率, 将其作为该模糊控制器的第四个输入, 其表达式如下:

$$\dot{\Delta b} = E_r^* P_{r1} U_f (\dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{I}}_D) \quad (29)$$

式中,  $\dot{\mathbf{I}}$  是指新能源汽车实际侧偏角变化值;  $\dot{\mathbf{I}}_D$  是指新能源汽车期望侧偏角变化值。该模糊控制器的表达式设计如下:

$$\rho = J_d + L_d (\Delta r, \dot{\Delta r}, \Delta b, \dot{\Delta b}) \quad (30)$$

式中,  $L_d$  是指稳态状态增益常数;  $J_d$  是指稳态状态时间常数;  $\rho$  是指该模糊控制器的输出。采用高斯型隶属度函数作为该模糊控制器的四个输入与输出的语言变量, 并将该模糊控制器的四个输入与输出的语言值模糊子集选取为 {正大、正中、正小、零、负小、负中、负大}。

最后设计防抱死控制器, 防止在新能源汽车稳定性控制时出现车轮抱死现象。防抱死控制器的设计具体如下: 以最优新能源汽车踏板力为防抱死控制器滑移率闭环控制策略的输入。在新能源汽车滑移率误差大于 0.05 时, 滑移率闭环控制策略采取比例-积分-微分控制, 以快速缩小误差, 具体如下式:

$$\rho_{PID} = K_P \theta + K_I \int \theta dt \xi_{\text{pedal}}^* + K_D \frac{d\theta}{dt} \quad (31)$$

式中,  $K_P$  是指 PID 比例项;  $\theta$  是指新能源汽车滑移率误

差； $K_I$  是指 PID 积分项； $\zeta_{pedal}^*$  是指最优新能源汽车踏板力； $K_D$  是指 PID 微分项。在新能源汽车滑移率误差小于等于 0.05 时，滑移率闭环控制策略切换为滑模控制，以抑制高频振荡，具体如下式：

$$\begin{cases} \vartheta_{SMC} = -l\zeta_{pedal}^* \operatorname{sgn}(\theta) - \lambda\theta \\ \operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (32)$$

式中， $l$  是指正的标量参数，通过  $l$  调节切换控制项的强度； $\operatorname{sgn}(\theta)$  是指新能源汽车滑移率误差  $\theta$  的符号函数； $\lambda$  是指正的标量参数，通过  $\lambda$  调节线性控制项的强度。

接着设计防抱死控制器的液压—电力协同制动力分配策略：在液压—电力协同制动力分配策略中，在制动初期，优先使用电力制动，尽量减少液压制动介入。在滑移率上升阶段，当新能源汽车滑移率大于 0.15，逐渐增加液压制动力，并减少电力制动力。在紧急制动阶段，当新能源汽车滑移率大于 0.2，液压制动力占比提升至 100%，以确保新能源汽车的最大制动力。具体如下式：

$$\begin{cases} M_{total} = M_{hydra} + M_{motor} \\ M_{hydra} = \begin{cases} 0 & \kappa \leq 0.15 \\ h_{hydra}(\kappa - 0.15) & 0.15 < \kappa \leq 0.2 \\ M_{max} & \kappa > 0.2 \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

式中， $M_{total}$  是指新能源汽车总制动力； $M_{max}$  是指新能源汽车最大液压制动力； $h_{hydra}$  是指新能源汽车液压制动力增益系数； $M_{hydra}$  是指新能源汽车液压制动力； $M_{motor}$  是指新能源汽车电力制动力。

通过由防抱死控制器、模糊控制器设计以及前馈补偿控制器构成的协同控制器实现新能源汽车液压制动与电机再生制动协同控制。

将控制算法与原有新能源车辆控制系统相结合，首先需对原有系统架构进行深入分析，明确各模块功能与接口。通过开发适配的通信协议，实现控制算法模块与原有系统间的数据高效交互，如获取车速、轮速等关键数据。在软件层面，将控制算法封装成独立模块，以插件形式集成到原有控制软件中，便于调用与更新。同时，设计合理的逻辑判断机制，确保新算法在满足特定条件时触发，与原有制动控制逻辑无缝衔接，在保障车辆安全稳定运行前提下，充分发挥控制算法优势，实现液压制动力优化分配。

## 2 系统测试

### 2.1 实验现场与实验过程

对于设计的新能源汽车液压制动力优化分配控制系统，利用其实施实验新能源汽车的液压制动力优化分配控制，测试设计系统的性能表现。首先在实验新能源汽

车上布设控制器与传感器模块中的等硬件。利用新能源汽车车速数据、踏板开度数据、前后轴荷分布数据、纵向减速度数据、转向角数据计算新能源汽车前轴制动力分配系数。利用新能源汽车电机转速数据、车轮滑移率数据、主缸压力数据、制动盘温度数据计算新能源汽车电液制动力分配比。计算结果如下：

- 1)  $B: 0.58$ ;
- 2)  $A: 2/3$ 。

利用设计的基于粒子群算法的液压制动力多目标优化分配策略实现实验新能源汽车的液压制动力优化分配。首先基于新能源汽车前轴制动力分配系数与电液制动力分配比确定实验新能源汽车的优化分配目标与物理边界。接着利用粒子群算法获取液压制动力多目标优化分配策略的最优分配目标。其中算法的实验参数设置情况如表 1 所示。

表 1 算法的实验参数设置情况

序号	实验参数项目	参数数值	单位
1	最大迭代次数	200	次
2	粒子数	50	个
3	$\omega$	0.4	—
4	$R_1$	0.52	—
5	$R_2$	0.31	—
6	$\sigma_1$	0.02	—
7	$\sigma_2$	0.05	—

最后利用设计的由防抱死控制器、模糊控制器设计以及前馈补偿控制器构成的协同控制器实现实验新能源汽车液压制动与电机再生制动的协同控制。其中实验参数设置情况如表 2 所示。

表 2 实验参数设置情况

序号	实验参数项目	参数数值	序号	实验参数项目	参数数值
1	$P_{f1}$	0.82	6	$K_p$	0.36
2	$P_{f2}$	0.63	7	$K_I$	0.16
3	$U_f$	0.23	8	$K_D$	0.98
4	$L_d$	0.56	9	$l$	0.48
5	$J_d$	0.68	10	$\lambda$	0.62

测试设计系统下的制动性能，测试指标包括高附着路面制动吻合度、低附着路面制动吻合度、低附着路面转向制动吻合度。其中高附着路面制动吻合度是指在高附着路面上实验车辆制动过程中车身速度曲线与四个车轮轮速曲线的吻合度。实验中选择的高附着系数路面为干水泥混凝土路面，将初速度设定为 80 km/h，初始 SOC 为 40%。在实验中前四秒是准备阶段，第四秒到第八秒是紧急制动的实验过程，第八秒后实验结束。当高附着路面制动吻合度较高，说明高附着路面下实验新能源汽车的车速与轮速没有出现较大分离，也就是车辆

制动效果较好。低附着路面制动吻合度是指在低附着路面上实验车辆制动过程中车身速度曲线与四个车轮轮速曲线的吻合度。实验中选择的低附着系数路面为湿玄武岩瓦路面，将初速度设定为 80 km/h，初始 SOC 为 45%。在实验中，第 0 秒至第 10 秒是实验过程，第 10 秒后结束实验。当低附着路面制动吻合度较高，说明低附着路面下实验新能源汽车的车速与轮速没有出现较大分离，也就是车辆制动效果较好。低附着路面转向制动吻合度是指在低附着路面上实验车辆转向制动过程中车身速度曲线与四个车轮轮速曲线的吻合度。实验中选择的低附着系数路面为湿玄武岩瓦路面，将初速度设定为 30 km/h，初始 SOC 为 40%。在实验中，第 0 秒至第 3 秒是直线行驶时间，第 3 秒至第 8 秒是实验车辆制动减速并向右转向的时间，第 8 秒后结束实验。当低附着路面转向制动吻合度稳定较高，说明低附着路面下实验新能源汽车转向制动中车速与轮速没有出现较大分离，也就是此时车辆制动效果较好。

在测试中，将电子液压制动系统压力自抗扰控制方法（文献 [2] 方法）、汽车制动电驱液压系统闭环调速控制方法（文献 [3] 方法）以及集成式电液制动系统自适应压力控制方法作为对比测试方法（文献 [4] 方法）。

## 2.2 实验结果分析

### 2.2.1 高附着路面制动吻合度测试结果分析

在表 1 与表 2 的实验参数设置下，设计系统与三种对比方法的高附着路面制动吻合度对比测试结果如图 3 所示。

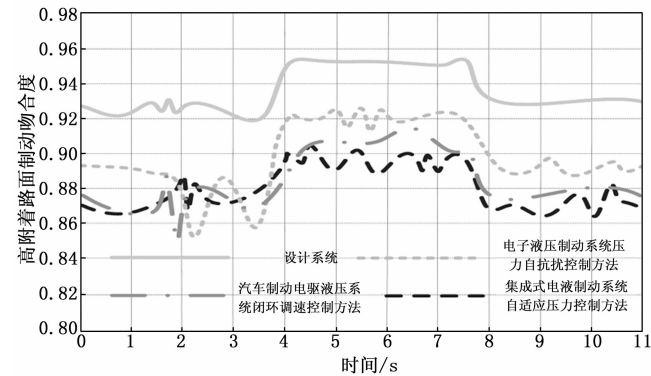


图 3 高附着路面制动吻合度对比测试结果

设计系统的高附着路面制动吻合度明显高于三种对比方法，同时其高附着路面制动吻合度的稳定性较强，整体波动较小。说明在高附着路面上，设计系统控制下实验新能源汽车的车速与轮速没有出现较大分离且其制动更加稳定，也就是设计系统控制下的车辆制动效果更好。这是由于设计系统在液压制动力多目标优化分配中，将新能源汽车前轴制动力分配系数与电液制动力分

配比作为液压制动力多目标优化分配策略的设计变量，能够优化前后轴制动力平衡，提升能量回收与制动力协同，降低失控风险，增强制动稳定性。

### 2.2.2 低附着路面制动吻合度测试结果分析

在上节的实验参数设置下，设计系统与三种对比方法的低附着路面制动吻合度对比测试结果如图 4 所示。

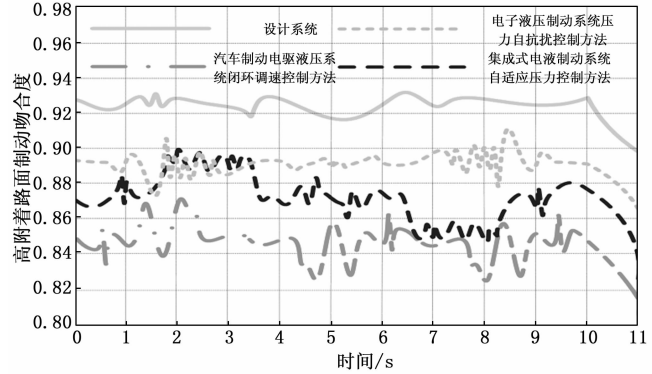


图 4 低附着路面制动吻合度对比测试结果

设计系统的低附着路面制动吻合度在四种测试方法中最高也最稳定，整体波动最小。这说明在低附着路面上，设计系统控制下实验新能源汽车的车速与轮速没有出现较大分离且其制动更加稳定，也就是设计系统控制下的车辆制动效果更好。这是由于设计系统利用设计的基于粒子群算法的液压制动力多目标优化分配策略实现实验新能源汽车的液压制动力优化分配，其多目标协同优化能力、全局最优解收敛性以及动态工况适应性能够有效提升新能源汽车制动性能。

### 2.2.3 低附着路面转向制动吻合度测试结果分析

设计系统与三种对比方法的低附着路面转向制动吻合度对比测试结果如图 5 所示。

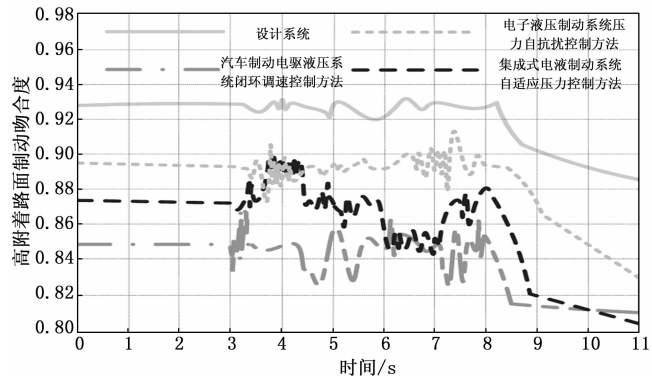


图 5 低附着路面转向制动吻合度对比测试结果

设计系统的低附着路面转向制动吻合度在四种测试方法中最高也最稳定，整体波动最小。这说明在低附着路面上，设计系统控制下实验新能源汽车在转向制动时车速与轮速没有出现较大分离且其制动更加稳定，也就是设计系统对于低附着路面转向制动的控制效果也更

好。这是由于设计系统设计的由防抱死控制器、模糊控制器设计以及前馈补偿控制器构成的协同控制器，其中模糊控制器有着较强的鲁棒性，前馈补偿控制器与防抱死控制器的实时协同能够提升车辆实时响应性能，前馈补偿控制器具有出色的非线性预测能力，能够预测制动需求与系统响应偏差，模糊控制器对于复杂非线性问题具有出色的处理能力，能够提升制动效能一致性，实现能量回收优化，同时前馈补偿控制器的前馈补偿功能能够实现实时响应优化，前馈补偿控制器与防抱死控制器的实时协同能够提升车辆的动态工况适应性。

#### 2.2.4 低附着路面转向制动时间测试

以制动时间为测试指标，在不同车速下开展实验，测试结果如表3所示。

表3 不同方法的转向制动时间测试结果分析

车速/ (km/h)	不同系统的转向制动时间/s			
	设计系统	电子液压制动系统压力自抗扰控制方法	汽车制动电驱液压系统闭环调速控制方法	集成式电液制动系统自适应压力控制方法
20	1.8	2.2	2.0	2.1
40	2.5	3.0	2.8	2.9
60	3.2	3.8	3.5	3.7
80	4.0	4.8	4.5	4.6

由表3可知，随着车速的增加，四种方法的制动时间均有所增加。但设计系统的制动时间平均值始终低于4.0 s，说明在不同车速下，设计系统能够更有效地实现制动，缩短制动距离，制动性能更优。

### 3 结束语

设计系统将新能源汽车前轴制动力分配系数与电液制动力分配比作为液压制动力多目标优化分配策略的设计变量，能够提升能量回收与制动力协同，增强制动稳定性。设计了一种基于粒子群算法的液压制动力多目标优化分配策略，能够通过多目标协同优化提升新能源汽车制动性能。并设计了协同控制器，有着实时响应能力、非线性系统控制精度以及动态工况适应性的核心优势。最终实验测试结果表明，设计系统安全性、稳定性较高，也就是设计系统的协同控制性能较好。

#### 参考文献：

[1] 刘理想, 祝俊, 张立杰, 等. 混动叉车势能与制动能量联合回收系统设计及 AMESim-Simulink 仿真分析 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (9): 179-188.

[2] 李展鹏, 苏楚奇. 电子液压制动系统压力自抗扰控制研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46 (5): 125-131.

[3] 崔秀虹, 常浩. 汽车制动电驱液压系统闭环调速控制及仿真分析 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21 (2): 117-121.

[4] 赵健, 杜金朋, 朱冰, 等. 集成式电液制动系统自适应压力控制 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (8): 1479-1488.

[5] 朱冰, 唐衍鹏, 张东波, 等. 考虑多维非线性扰动的电子助力制动系统自适应压力控制 [J]. 汽车工程, 2024, 46 (6): 1096-1103.

[6] 孟佑铭, 张缓缓, 常笑宇, 等. E-booster 电液制动系统的主缸压力控制 [J]. 机械科学与技术, 2025, 44 (3): 421-429.

[7] 曾献勇, 何文德, 张国勇, 等. 力士乐回转液压系统的优化设计 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (16): 113-117.

[8] 刘朱铨, 冯金芝, 赵礼辉, 等. 考虑多失效形式的电子制动助力器主密封圈多目标优化设计 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (15): 206-214.

[9] 任行鹏, 陆艺, 胡晓峰, 等. 线控制动液压电磁阀气压检测动态性能分析 [J]. 液压与气动, 2024, 48 (6): 102-111.

[10] 史培龙, 符凯, 郭旭, 等. 重型载货汽车长下坡制动控制策略 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (10): 192-202.

[11] 马晓燕, 陶小松, 温利刚, 等. 矿用防爆电动胶轮车电液复合制动平顺性优化 [J]. 煤炭工程, 2023, 55 (s1): 248-251.

[12] 张兴琦, 宋杰, 宋雪梅, 等. 基于 AMESIM 的电动真空泵优化匹配研究 [J]. 南京理工大学学报, 2023, 47 (3): 397-403.

[13] 滕兴旺, 张向文. 爆胎汽车模糊优化协调稳定性控制研究 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (12): 2064-2075.

[14] 唐查强, 陈奇, 侯庆伟, 等. 集成式电子液压线控制动系统建模与仿真 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2024, 47 (4): 472-478.

[15] 李寿涛, 杨路, 屈如意, 等. 基于模型预测控制的滑移率控制方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2024, 54 (9): 2687-2696.

[16] 赵逸云, 林辉, 李兵强. 有轨电车电子机械制动系统夹紧力控制优化方法 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28 (7): 141-151.

[17] 于海龙. 基于 NSGA-II 的矿车复合制动多目标优化控制分析 [J]. 工矿自动化, 2024, 50 (S1): 156-160.

[18] 姚启明, 葛近近, 黄佳. 基于粒子群耦合灰狼算法汽车充电站选址研究 [J]. 计算机仿真, 2025, 42 (04): 190-197.

[19] 唐虎, 陈旭, 江腾, 等. 城市轨道交通列车保持制动的控制逻辑优化 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (7): 128-131.

[20] 杨书仪, 赵康康, 张鸿泰, 等. 风电机组偏航制动器制动稳定性分析 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (1): 188-195.