

# 基于多目标并行混沌优化的分布式驱动电动汽车 横摆稳定性研究

肖祥慧<sup>1,2</sup>, 宋运豪<sup>1</sup>, 史 可<sup>3</sup>, 袁小芳<sup>3</sup>

(1. 佛山大学机电工程与自动化学院, 广东佛山 528000; 2. 广东省工业智能检测技术重点实验室, 广东佛山 528000;  
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘 要:** 横摆稳定性是分布式驱动电动汽车(Distributed Drive Electric Vehicle, DDEV)稳定性研究中的重要难题. 为解决 DDEV 横摆稳定性结构复杂、强耦合等问题, 基于 DDEV 轮毂电机的独立可控性, 本文提出一种基于多目标并行混沌优化的 DDEV 横摆稳定性控制系统. 该控制系统由 2 个部分组成; 上层控制器利用多目标优化策略, 通过多目标并行混沌优化算法来计算 DDEV 维持横摆稳定所需的理想横摆角速度和期望滑移率; 下层控制器为执行单元, 根据上层控制器输出的最优期望变量, 采用 2 个模糊控制器分别修正主动前轮转向角和分配驱/制动转矩, 改善 DDEV 横摆稳定性. 模型构建和仿真过程在 Matlab/Simulink 平台上完成, 结果表明: 该控制系统优化协调主动前轮转向角和驱/制动转矩, 保证了 DDEV 横摆稳定性.

**关键词:** 电动汽车; 多目标优化; 模糊控制; 分布式驱动; 横摆稳定性

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2023YFB2504703); 国家自然科学基金(No.52177132)

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2024)12-4166-09

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20240845

## Yaw Stability Control of Distributed Drive Electric Vehicle Based on Multi-Objective Parallel Chaos Optimization

XIAO Xiang-hui<sup>1,2</sup>, SONG Yun-hao<sup>1</sup>, SHI Ke<sup>3</sup>, YUAN Xiao-fang<sup>3</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Industrial Intelligent Inspection Technology, Foshan, Guangdong 528000, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Yaw stability is an important problem in the stability study of distributed drive electric vehicles (DDEV). In order to solve the problems of complex structure and strong coupling in yaw stability, a control system based on multi-objective parallel chaos optimization is proposed for DDEV in this paper. This control system consists of two parts. The upper controller employs a multi-objective optimization strategy, leveraging a multi-objective parallel chaotic optimization algorithm, to determine the optimal yaw rate and desired slip rate essential for maintaining lateral stability in a distributed drive electric vehicle. The lower controller is execution unit, two fuzzy logic controllers are adopted to correct front wheel steering angle and distribute drive/brake torque respectively, according to the optimal desired variables computed by the upper controller. The modeling and simulation process is completed on the Matlab/Simulink platform, and the results show that the control system optimally coordinates the active steering angle of the front wheels and the driving/braking torque to ensure the lateral stability of the DDEV.

**Key words:** electric vehicle; multi-objective optimization; fuzzy control; distributed drive; yaw stability

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB2504703); National Natural Science Foundation of China (No.52177132)

## 1 引言

在车辆运行过程中,空气阻力或者不同路面附着系数都可能会使其丧失横摆稳定性. 一般情况下,一旦车辆丧失横摆稳定性,驾驶员无法在短时间内做出反应<sup>[1]</sup>,因此研究车辆的横摆稳定性并实现有效控制以避免车辆的失控十分必要. 通过将驱动电机分别安装在驱动轮内来为车辆提供动力是分布式驱动电动汽车(Distributed Drive Electric Vehicle, DDEV)的主要结构特征<sup>[2]</sup>. 与传统结构汽车相比,DDEV的动力学控制依靠分布在驱动轮内的电机驱/制动转矩的独立控制实现,这为提高横摆稳定性提供了便利,但也对更精确的车辆状态估计和高效稳定的控制算法提出了更加严格的要求<sup>[3-5]</sup>.

研究表明,通过调整前轮提供的主动转向角或者各轮提供的转矩可有效地对车辆横摆稳定性进行控制. 彭晓燕等人<sup>[6]</sup>针对DDEV在驱动电机故障时的操纵稳定性问题,提出了一种通过整合前轮转向和驱动力分配的控制策略. 刘阳辉<sup>[7]</sup>开发了一种基于车轮滑移率监控与控制的方法,提升了DDEV的操纵稳定性和驾驶舒适性. Guo等人<sup>[8]</sup>开发并验证了一种实用的实时非线性模型预测控制策略,用于控制DDEV的直接横摆力矩. Chen等人<sup>[9]</sup>通过利用递归高阶神经网络(Recursive Higher-Order Neural Networks, RHONN)模拟车辆的非线性动力学行为,开发了一种新型的数据驱动非线性模型预测控制策略,实现了对DDEV横向稳定性的显著提升. 宋强等人<sup>[10]</sup>通过分析轨迹跟踪和转矩分配中的多参数进行控制,有效增强了车辆的横摆稳定性. 可见,对DDEV直接横摆的控制可以通过对车辆的驱动力或制动力的有效分配实现.

DDEV的稳定性控制还可以通过构建有效的模型和控制系统来实现. Li等人<sup>[11]</sup>设计了一种自适应滑模控制方案,通过自适应调整控制参数提升DDEV直接横摆控制性能,优化了车辆的操控性和稳定性. Tian等人<sup>[12]</sup>通过建立精确的非线性动力学模型和结合先进的控制策略(直接横摆力矩控制和模型参考滑模控制),开发了一种面对转向故障时能提高车辆稳定性的前轮差速转向系统. Ahmed等人<sup>[13]</sup>采用基于PID控制器的横摆力矩控制算法,实现了DDEV在变道机动和步进转向等复杂操纵条件下的稳定性控制. Jing等人<sup>[14]</sup>结合模型预测控制、主动操舵系统和高级稳定性控制算法,通过优化车辆的横摆稳定性和能源效率来增强车辆的操控性和经济性. Zhang等人<sup>[15]</sup>开发了一种基于高斯过程的模型预测控制框架,通过创新的双层控制结构,有效应对了横摆稳定性控制中的模型-车辆不匹配问题. 以上研究通过应用滑模控制、PID控制和模型预测控制等技术来实现车轮制动/驱动力的分配,这些方法通过优化制动与驱动的相互作用,提升了横摆控制的速度.

然而,由于主动前轮转向的修正与转矩分配之间存在强耦合,车辆的反应及操控可能会超出动力学的极限<sup>[16]</sup>,这表明在横摆稳定性控制的研究领域仍有较大的优化潜力.

本文为了增强DDEV的横摆稳定性,提出了一种基于多目标并行混沌优化的横摆稳定控制系统. 该系统的控制机制包含2个控制器:上层控制器协调优化DDEV稳定运行所需的最优期望横摆角速度和期望滑移率,采用多目标并行混沌优化算法实现;下层控制器为执行单元,根据最优期望横摆角速度和期望滑移率以及DDEV反馈的实际变量,分别设计2个模糊控制器修正主动前轮转向角和分配驱/制动转矩. 该控制系统突破了传统方法中主动前轮转向角调整或驱动/刹车转矩的限制,显著增强了DDEV的横摆稳定性. 最终,该系统的控制效果在Simulink平台上进行了仿真验证.

## 2 DDEV动力学模型

### 2.1 车辆模型

构建包含横摆和侧偏运动的8自由度汽车动力学模型<sup>[2]</sup>,如图1所示.

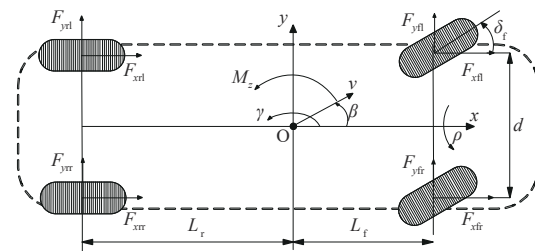


图1 8自由度汽车动力学模型

通过对复杂的车辆动力学理论的研究分析<sup>[17]</sup>,简化的汽车动力学模型描述如下:

$$\dot{\beta} = \frac{F_{yf} + F_{yr}}{mV} - \gamma \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{L_f F_{yf} - L_r F_{yr} + M_z}{I_z} \quad (2)$$

模型中的参数说明见表1.

假设  $\sin\delta \approx 0$  和  $\cos\delta \approx 1$  ( $\delta$  为车辆前轮转向角). 由轮胎纵向力产生的横摆力矩  $M_z$  可以表示如下:

$$M_z = \frac{d}{2} \times (-F_{xfl} + F_{xfr} - F_{xrl} + F_{xrr}) \quad (3)$$

### 2.2 轮胎模型

通过分析轮胎的纵向动力学特性<sup>[18]</sup>可知,轮胎纵向力  $F_z$  是每个车轮中电机驱/制动转矩  $T$  的非线性响应. 假设与地面直接接触的4个受力点(车轮)均匀地承载着车辆重量  $m$ , 轮胎动力学模型描述如下:

$$F_{yf} = C_f \times \alpha_f \quad (4)$$

表 1 简化的汽车动力学模型参数

| 参数       | 含义       |
|----------|----------|
| $\beta$  | 质心侧偏角    |
| $m$      | 汽车质量     |
| $V$      | 汽车速度     |
| $F_{yf}$ | 前轮侧向力    |
| $F_{yr}$ | 后轮侧向力    |
| $\gamma$ | 横摆角速度    |
| $L_f$    | 重心到前轴的距离 |
| $L_r$    | 重心到后轴的距离 |
| $I_z$    | 汽车横摆惯量   |

$$J\dot{\omega} = T - R_e \times F_x \quad (5)$$

假设车轮的纵向速度  $v_x$  与汽车的纵向速度  $V$  相等,  $C_f, C_r$  分别为前后轮侧偏刚度, 轮胎纵向力  $F_x = \lambda_k \times \kappa$ ,  $\lambda_k$  取决于轮胎的垂直负载  $F_z$ . 综上所述, 滑移率与驱/制动转矩的动力学关系表示如下:

$$\dot{\kappa} = \frac{\dot{\omega}R_eV - \omega R_e\dot{V}}{V^2} = \left[ -\frac{R_e^2}{JV} - \frac{\kappa + 1}{4mV} \right] \times C_k \times \kappa + \frac{R_e}{JV} \times T \quad (6)$$

其中,  $J$  表示每个车轮的惯性力矩,  $\omega$  表示轮胎角速度,

$R_e$  表示轮胎半径,  $T$  为驱/制动转矩.

### 2.3 参考模型

本节设计参考模型以确定和获取车辆的理想运动状态. 其中, 侧偏角状态响应  $\beta_r$  和偏横摆角速度状态响应  $\gamma_r$  主要反映稳定性能. 因此, DDEV 横摆稳定性控制问题可以归纳为跟踪参考模型产生的状态响应<sup>[19,20]</sup>.

$$\frac{\beta_r}{\delta} = \frac{2L_f(L_f + L_r) \times C_f C_r - mV^2 L_f C_f}{2L_r(L_f + L_r)^2 \times C_f C_r - mV^2(L_f C_f - L_r C_r)} \quad (7)$$

$$\frac{\gamma_r}{\delta} = \frac{2L_f(L_f + L_r) \times C_f C_r V}{2L_r(L_f + L_r)^2 \times C_f C_r - mV^2(L_f C_f - L_r C_r)} \quad (8)$$

通过分析提出的 DDEV 动力学模型可知: 与前轮转向角  $\delta_f$ 、驱/制动转矩  $T$  密切相关的主要是横摆角速度  $\gamma$ 、质心侧偏角  $\beta$ 、车轮滑移率  $\kappa$ .

## 3 基于多目标并行混沌优化的稳定性控制

### 3.1 控制系统设计

本文提出的基于多目标并行混沌优化的稳定性控制系统, 意在使车辆响应尽可能地跟踪驾驶员, 保证车辆稳定性. 控制变量之间存在的耦合作用<sup>[21]</sup>, 但会造成逻辑上的冲突, 使得车辆控制效果变差, 因此建立一个使控制输入、控制输出协调工作的控制系统变得至关重要. 该控制系统框架如图 2 所示.

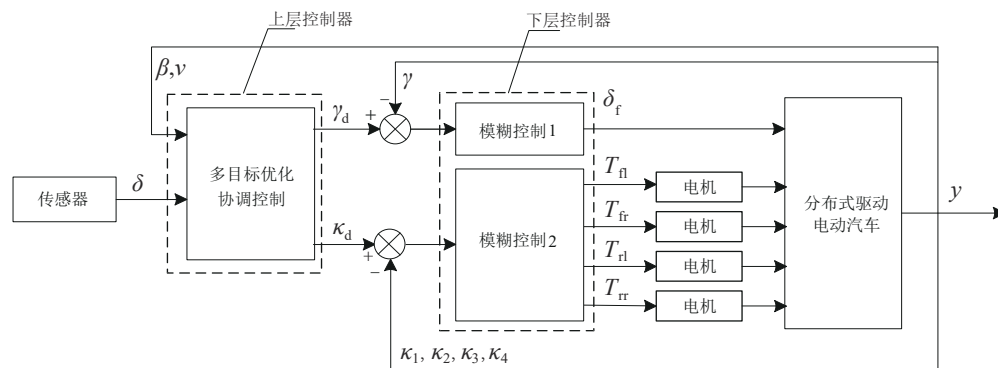


图 2 基于多目标优化协调的横摆稳定性控制系统框图

该控制系统由上层多目标优化协调控制器和下层双模糊控制器组成. 上层控制器优化协调最优期望横摆角速度  $\gamma_d$  和期望滑移率  $\kappa_{di} (i = fl, fr, rl, rr)$ , 采用多目标并行混沌优化算法实现. 下层控制器计算主动前轮转向角  $\delta_i$  和四轮驱/制动转矩  $T_i (i = fl, fr, rl, rr)$ , 采用 2 个模糊控制器实现: 第一个模糊控制器修正主动前轮转向角, 将实际横摆角速度  $\gamma$  与参考横摆角速度  $\gamma_d$  之间的误差及误差变化率输入控制器中得到输出变量主动前轮转向角  $\delta_i$ ; 第二个模糊控制器分配驱/制动转矩, 输入变量为实际滑移率  $\kappa_i (i = fl, fr, rl, rr)$  与参考滑移率  $\kappa_{di} (i = fl, fr, rl, rr)$  之间的误差及误差变化率, 输出为驱/制动转

矩  $T_i (i = fl, fr, rl, rr)$ .

### 3.2 基于多目标并行混沌优化的优化协调

该控制系统的上层控制器优化协调的目的是计算期望横摆角速度  $\gamma_d$  和期望滑移率  $\kappa_{di} (i = fl, fr, rl, rr)$ , 使车辆获得较好的操纵响应. 在衡量车辆横摆稳定性中,  $\gamma$  和  $\kappa_i (i = fl, fr, rl, rr)$  是重要的性能指标, 通过对式(2)、式(3)以及轮胎模型的分析可知:  $\gamma$  和  $\kappa_i (i = fl, fr, rl, rr)$  之间的横摆力矩  $M_z$  存在强耦合关系. 因此, 必须优化协调控制 2 种性能指标之间的相互影响, 使下层控制器输出的主动前轮转向角  $\delta_i$  和四轮驱/制动转矩  $T_i (i = fl, fr, rl, rr)$  能够有效提高车辆横摆稳定性, 由于二次型目标函数

具有明显的物理意义且结构简单,可以兼顾准确性和稳定性<sup>[22]</sup>,因此在建立综合性能指标基础上设计二次型目标函数:

$$J_1 = \|\gamma_d - \gamma_r\|_Q^2 \quad (9)$$

$$\kappa_{di} = \begin{cases} \frac{\kappa_{di} - \kappa_{\max}}{\kappa_{\max}}, & \kappa_{di} > \kappa_{\max} \\ 0, & -\kappa_{\max} < \kappa_{di} < \kappa_{\max} \\ \frac{\kappa_{di} + \kappa_{\max}}{\kappa_{\max}}, & \kappa_{di} < -\kappa_{\max} \end{cases}$$

$$J_2 = \|\kappa_{dfl}\|_R^2 + \|\kappa_{dfr}\|_R^2 + \|\kappa_{drl}\|_R^2 + \|\kappa_{drr}\|_R^2 \quad (10)$$

其中,  $\gamma_d, \kappa_{di} (i = fl, fr, rl, rr)$  为所求的最优期望变量,  $\gamma_r$  为驾驶员输入  $\delta$  的状态响应,  $\kappa_{\max}$  为稳定性范围内最大滑移率<sup>[23]</sup>,  $Q$  和  $R$  为权重系数.

本文采用课题组前期研究的多目标并行混沌优化算法<sup>[24-26]</sup>对目标函数(9)和(10)进行寻优. 该算法具有出色的多目标优化能力,能够同时处理多个优化目标,使得在横摆稳定性控制中同时考虑系统的稳定性、响应速度及能效等因素,并找到这些目标之间的最优权衡,产生一组解决方案,从中可以根据具体需求选择最适合的解决方案. 同时,该算法通过并行处理能够显著提高计算效率,可以同时进行多个优化任务的计算,快速适应和响应车辆动态变化的需求. 另外,混沌理论的引入增强了算法的全局搜索能力,降低了陷入局部最优的风险,可以更有效地探索解空间,找到更全面、更有效的解决方案,尤其是在高度非线性和复杂的系统动态中. 该算法由于具有较强的全局搜索能力和多目标处理能力,在面对输入参数的小幅变动或是外部环境的扰动时,能够保持较高的性能稳定性,这对于动态变化的实际驾驶环境尤为重要. 针对目标函数(9)和(10)的多目标并行混沌优化算法流程图如图3所示. 其中,  $l$  为当前迭代次数,  $S_1$  为一次载波迭代总次数,  $S_2$  为二次载波迭代总次数.

精英库存放2个目标函数(9)和(10)的最优解集,给定样本容量,根据支配关系进行更新. 迁移环节分别对目标函数(9)和(10)的多个并行解进行交叉操作. 合并环节分别从目标函数(9)和(10)的多个并行解中随机选择2个解并求平均值,代替原来的解. Pareto最优解定义如下:对于任意的  $X \in \Omega$ , 不存在  $X$  满足  $f(X) < f(X^*)$ , 则  $X^*$  是 Pareto 最优解,  $\Omega$  为变量  $X$  的可行域. 针对本文中主动前轮转向修正和驱/制动力矩分配侧重性问题,设计模糊元函数,对目标函数(9)和(10)进行重要性加权,从得到的 Pareto 解集中寻找最符合该工程问题的最优期望变量  $\gamma_d$  和  $\kappa_{di} (i = fl, fr, rl, rr)$ . 最后,将优化协调后的最优期望变量作为下层控制器的输入.

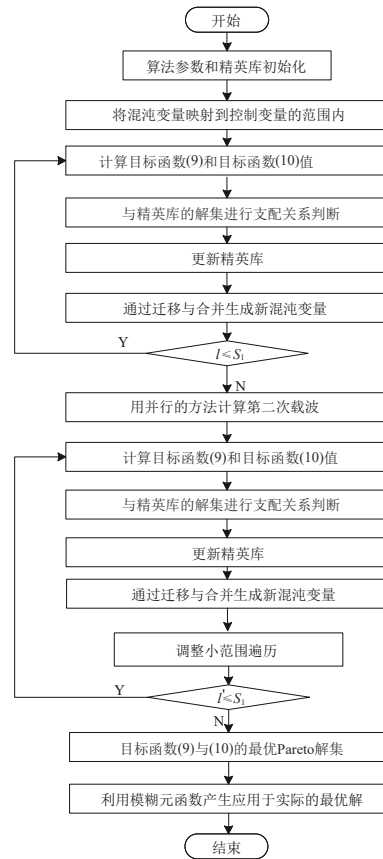


图3 多目标并行混沌优化算法流程图

### 3.3 基于模糊控制器的主动前轮转向控制

当车辆侧向力达到轮胎与路面间的附着极限,即车辆处于极限工况时,修正前轮转向角比调节车轮驱/制动转矩来实施横摆稳定性控制,具有更高的效率<sup>[27]</sup>.

主动前轮转向模糊控制器的输入变量:横摆角速度实际值和参考值之间的误差  $E_1 = \gamma - \gamma_d$  以及误差的变化率  $E_{c1} = \partial E_1 / \partial t$ . 输出变量为主动前轮转向角  $u_1 = \delta_f$ . 根据稳定性要求,得出横摆角速度模糊论域为  $(-0.3, 0.3)$ , 前轮转向角模糊论域为  $(-0.15, 0.15)$ , 模糊集皆为 {负大(NB), 正大(PB), 负中(NM), 正中(PM), 负小(NS), 正小(PS), 零(ZO)}<sup>[28]</sup>, 隶属度函数分布曲线如图4所示.

建立  $\delta_f$  的模糊规则(表2)并推理运算,实现对前轮

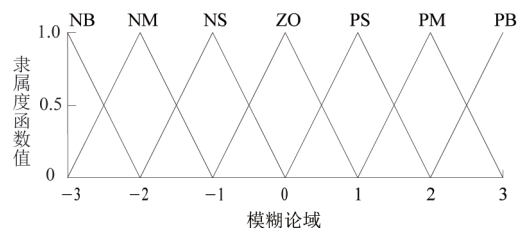


图4 主动前轮转向模糊控制器的隶属度函数曲线分布图

转向角合理修正. 所设计的主动前轮转向模糊控制器框架如图5所示.

表2  $\delta_f$ 的模糊规则表

|    |    |    |    |     |    |    |    |
|----|----|----|----|-----|----|----|----|
|    | NB | NM | NS | ZO  | PS | PM | PB |
| NB | PB | PB | PB | PB  | PM | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PB | PM  | PS | ZO | ZO |
| NS | PM | PM | PM | PM  | ZO | ZO | NS |
| ZO | PM | PM | PS | ZO  | ZO | NS | NM |
| PS | PS | PS | ZO | NM  | NM | NM | NM |
| PM | ZO | ZS | NS | NM  | NB | NB | NB |
| PB | NS | NS | NM | NBM | NB | NB | NB |

注: 第一行表示误差变化率  $E_c$ , 第一列表示横摆角速度实际值和参考值之间的误差  $E$ .

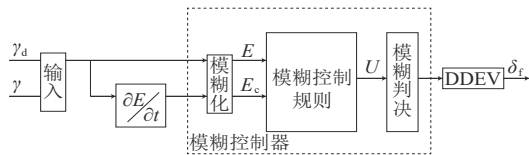


图5 模糊控制器框架图

### 3.4 基于模糊控制器的驱/制动转矩分配

根据 DDEV 的结构特点, 通过控制各轮的驱/制动转矩也可以有效改善车辆横摆稳定性.

由于车辆的4个轮胎动力学模型类似, 选取左前轮胎模型为例来设计驱/制动转矩分配模糊控制器<sup>[29]</sup>. 该模糊控制器的输入变量为: 实际滑移率与参考滑移率之间的误差  $E_2 = \kappa_2 - \kappa_d$  以及误差的变化率  $E_{c2} = \partial E_2 / \partial t$ , 输出变量为驱/制动转矩  $u_2 = T_{fl}$ . 根据稳定性要求, 滑移率模糊论域为  $(-0.02, 0.02)$ , 驱/制动转矩模糊论域为  $(-187, 187)$ , 模糊集皆为 { 负大 (NB), 正大 (PB), 负中 (NM), 正中 (PM), 负小 (NS), 正小 (PS), 零 (ZO) }<sup>[28]</sup>, 隶属度函数分布曲线如图6所示.

(ZO)}<sup>[28]</sup>, 隶属度函数分布曲线如图6所示.

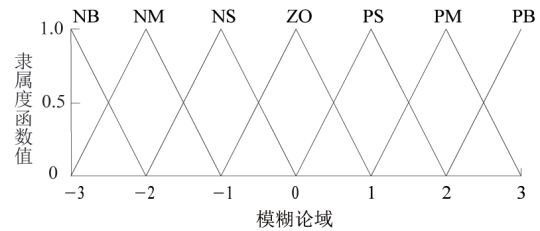


图6 驱/制动转矩分配模糊控制器隶属度函数分布图

通过建立  $T$  的模糊规则(表3)<sup>[28]</sup>并进行模糊推理运算, 得到控制器输出变量左前轮驱/制动转矩.

表3  $T$ 的模糊规则表

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS | PM | PM | PM | PS | ZO | NS | NS |
| ZO | PM | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM | PS | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

注: 第一行表示误差变化率  $E_c$ , 第一列表示横摆角速度实际值和参考值之间的误差  $E$ .

按照相同的规律依次建立4个轮毂电机的驱/制动转矩分配模糊控制器, 得到控制输出  $T_i (i = fl, fr, rl, rr)$ , 从而实现驱/制动转矩优化分配.

## 4 仿真结果分析

在先前研究<sup>[2]</sup>的基础上, 本文建立了一个基于 Simulink 的横摆稳定性控制系统仿真平台, 如图7所示.

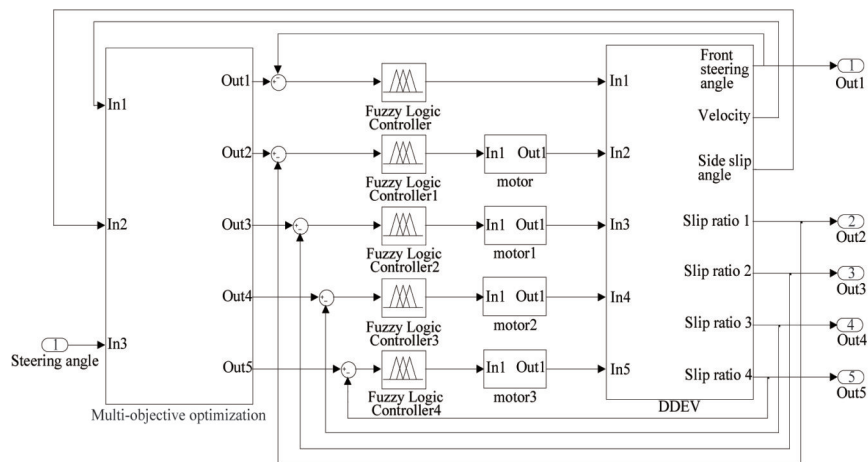


图7 Simulink 仿真框架图

为了评估提出的控制系统性能,本文在不同工况下将横摆稳定性控制系统与仅使用主动前轮转向(AFS)的效果进行比较. 具体的 DDEV 参数设置见表 4.

(1) 工况 1: 验证驾驶员转角为 0.1 rad 范围内的输入工况. 由图 8(a)可知,在基于主动转向和转矩控制优化协调的横摆稳定性控制系统作用下,主动前轮转向能较好跟踪驾驶员输入. 图 8(b)为驱/制动转矩分配,当车辆右转时,右侧轮制动,左侧轮驱动,反之亦然. 图 8(c)为横摆角速度  $\gamma$ ,进行横摆稳定性控制时, $\gamma$  响应更加精确和快速, $\gamma$  与参考横摆角速度  $\gamma_d$  之间最大差值仅为 0.006 rad,能较好地跟踪  $\gamma_d$ ;单独进行 AFS 控制时,横摆角速度  $\gamma$  会产生 10% 左右的偏差,且出现明显的滞后. 图 8(d)为质心侧偏角  $\beta$ ,进行横摆稳定性控制时, $\beta$  响应更加精确和快速, $\beta$  与参考质心侧偏角  $\beta_d$  之间最大差值为 0.02 rad/s,能较好地跟随  $\beta_d$ ;当仅使用 AFS 控制时,出现的最大偏差为 0.1 rad/s,且明显滞后. 图 8(e)为车轮滑移率,经过基于主动转向和转矩控制优化协调的横摆稳定性控制系统,稳定在 0.08 附近,保证最佳纵向稳定性. 图 8(f)为单独进行 AFS 控制时车

表 4 DDEV 仿真参数

| 参数  | 取值       |
|---|----------|
| 汽车质量 $m/\text{kg}$                          | 1 359.8  |
| 重心高度 $h/\text{m}$                           | 0.512    |
| 汽车速度 $V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$      | 60       |
| 前轴长度 $C_f/\text{m}$                         | 1.082 8  |
| 后轴长度 $C_r/\text{m}$                         | 1.082 8  |
| 采样周期 $T_s/\text{s}$                         | 0.005    |
| 纵向加速度 $a_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$    | 2.78     |
| 横向加速度 $a_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$    | 0.78     |
| 道路摩擦系数 $\mu$                                | 0.6      |
| 最大滑移率 $\kappa_{\max}$                       | 0.08     |
| 车轮惯性惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$    | 0.353 4  |
| 车辆横摆惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$  | 1 992.54 |
| 前轮侧偏刚度 $C_f/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$ | 23 540   |
| 后轮侧偏刚度 $C_r/(\text{N}\cdot\text{rad}^{-1})$ | 23 101   |
| 重心与前轴的距离 $L_f/\text{m}$                     | 1.062 8  |
| 重心与后轴的距离 $L_r/\text{m}$                     | 1.485 2  |
| 轮毂电机最大转矩 $T_{\max}/\text{N}$                | 187      |

轮滑移率,可见四轮滑移率出现较大差异,不能保证纵向稳定性.

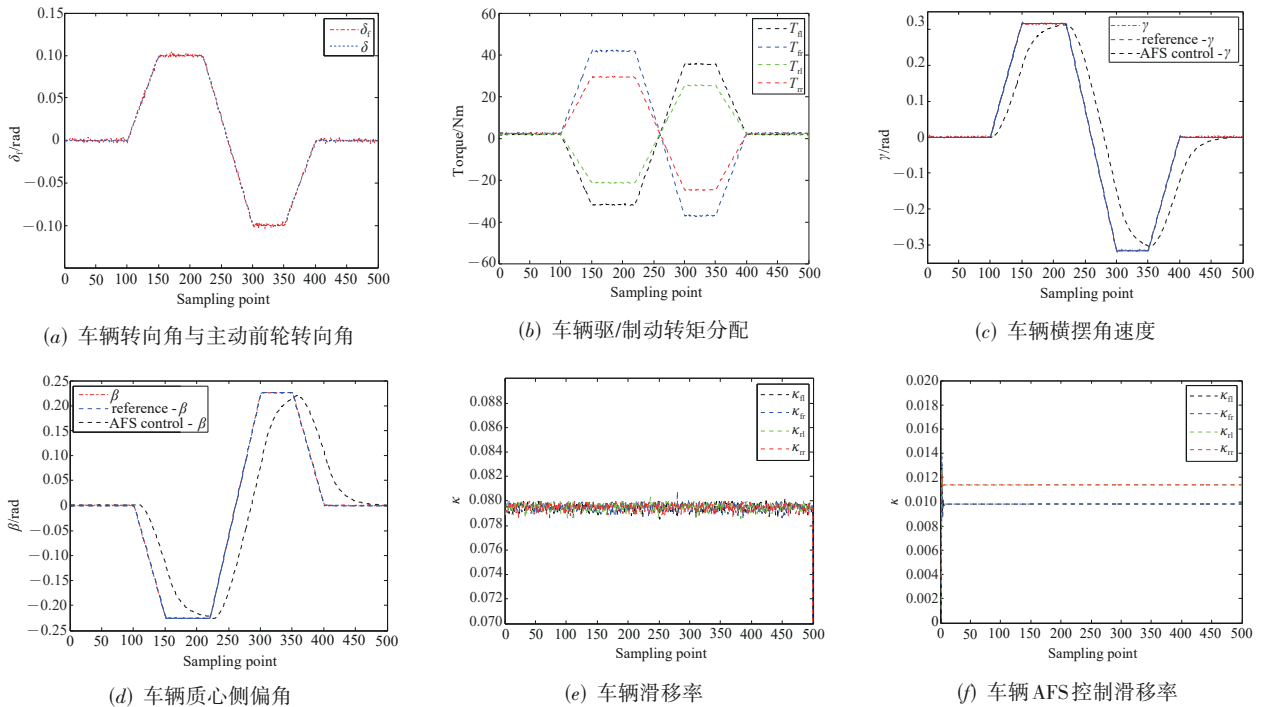


图 8 工况 1 下横摆稳定性控制系统与 AFS 控制系统仿真对比图

(2) 工况 2: 验证驾驶员转角为 0.1 rad 范围内正弦输入的工况. 由图 9(a)可见,主动前轮转向能较好地跟踪驾驶员输入. 图 9(b)为驱/制动转矩分配,当车辆右转时,右侧轮制动,左侧轮驱动,反之亦然. 图 9(c)为横摆角速度  $\gamma$ ,有

横摆稳定性控制系统时,响应更加精确和快速,横摆角速度  $\gamma$  响应与参考横摆角速  $\gamma_d$  之间最大差值为 0.008 rad,能较好地跟随  $\gamma_d$ ;当仅使用 AFS 控制时, $\gamma$  产生 20% 左右的偏差,且表现出明显的滞后. 图 9(d)为质心侧偏角  $\beta$ ,进行横

摆稳定性控制时,质心侧偏角 $\beta$ 响应更加精确和快速, $\beta$ 与参考质心侧偏角 $\beta_d$ 之间最大差值为 0.02 rad/s,能较好地跟随 $\beta_d$ ;当仅使用 AFS 控制时,出现的最大偏差为 0.02 rad/s,控制效果恶劣.图 9(e)为车轮滑移率 $\kappa$ ,经

过基于主动转向和转矩控制优化协调的横摆稳定性控制系统,车轮滑移率 $\kappa$ 稳定在 0.08 附近,保证最佳纵向稳定性.图 9(f)为单独进行基于 AFS 的控制时滑移率 $\kappa$ ,可见四轮滑移率出现较大差异,不能保证纵向稳定性.

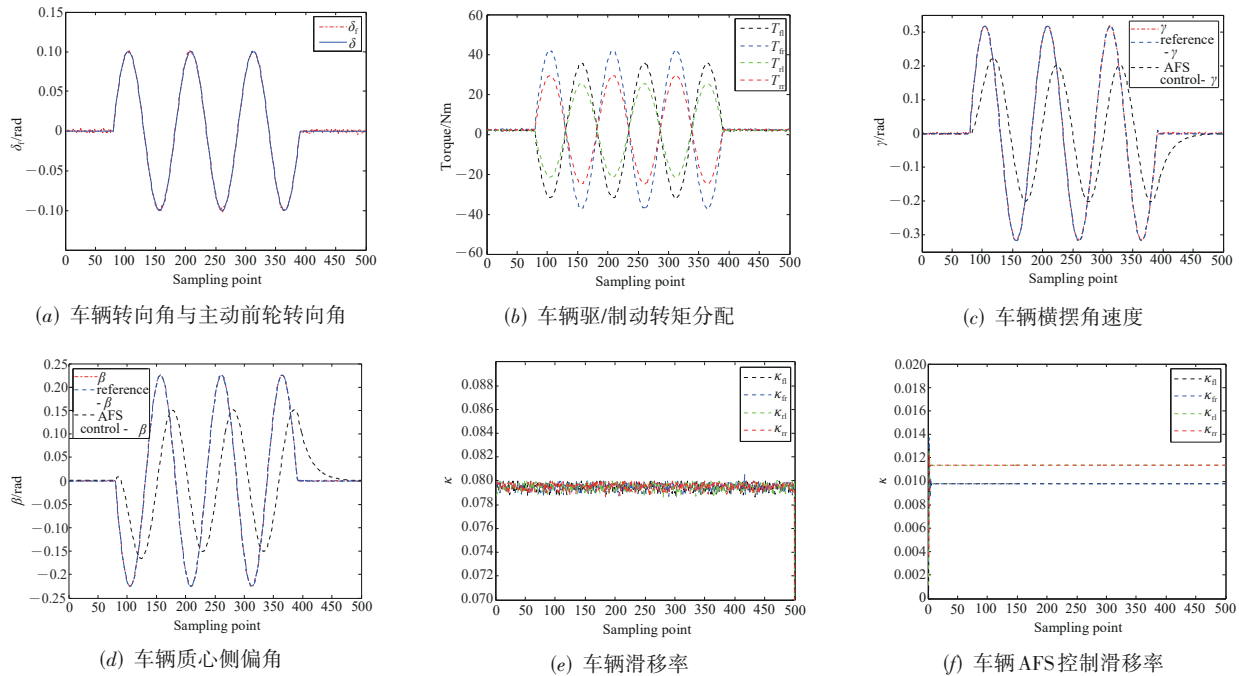


图9 工况2下横摆稳定性控制系统与AFS控制系统仿真对比图

## 5 结论

本文通过引入一种基于主动转向和转矩控制优化协调的控制系统,显著提升了DDEV的横摆稳定性.实质上,本文通过上层的多目标优化算法计算出最优的横摆角速度和车轮滑移率,并在下层通过2个模糊控制器实际调整前轮转向角和驱/制动转矩.通过Matlab/Simulink环境的仿真验证,证明了控制系统的有效性,表明可以实现更精确和稳定的车辆动态控制.

### 参考文献

- [1] 常文文, 闫光辉, 杨志飞, 等. 基于脑电熵值特征和功能连接的不同线型道路下驾驶状态检测[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2874-2883.  
CHANG W W, YAN G H, YANG Z F, et al. Detection of driving state under different curve road based on entropy and functional connectivity of EEG[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(10): 2874-2883. (in Chinese)
- [2] 肖祥慧, 史可, 袁小芳. 基于模型预测控制的电动汽车轮毂电机转矩控制研究[J]. 电子学报, 2020, 48(5): 953-959.  
XIAO X H, SHI K, YUAN X F. Model predictive controller-based in-wheel motor torque control system for distrib-

uted drive electric vehicle[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(5): 953-959. (in Chinese)

- [3] 林贤坤, 卢彦希, 王志福, 等. 分布式驱动车辆操纵稳定性控制综述[J]. 汽车技术, 2024(1): 1-12.  
LIN X K, LU Y X, WANG Z F, et al. Review on handling stability control of distributed drive vehicles[J]. Automotive Technology, 2024(1): 1-12. (in Chinese)
- [4] GAO F, ZHAO F K, ZHANG Y. Research on yaw stability control strategy for distributed drive electric trucks[J]. Sensors, 2023, 23(16): 7222.
- [5] 黄亚东, 郭桂芳. 分布式驱动电动汽车转矩分配策略综述[J]. 汽车实用技术, 2020, 45(22): 230-236, 248.  
HUANG Y D, GUO G F. Overview of torque distribution strategies for distributed drive electric vehicles[J]. Automotive Practical Technology, 2020, 45(22): 230-236, 248. (in Chinese)
- [6] 彭晓燕, 邢星飞, 崔庆佳, 等. 分布式电动汽车驱动力分配控制方法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(7): 1059-1068.  
PENG X Y, XING X F, CUI Q J, et al. Research on driving force distribution control method of distributed electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(7): 1059-

1068. (in Chinese)
- [7] 刘阳辉. 基于分布式驱动电动汽车车身稳定性提高的研究[J]. 机械工程与技术, 2023, 12(1): 53-59.  
LIU Y H. Research on improving the stability of electric vehicle body based on distributed drive[J]. Mechanical Engineering and Technology, 2023, 12(1): 53-59. (in Chinese)
- [8] GUO N Y, LENZO B, ZHANG X D, et al. A real-time nonlinear model predictive controller for yaw motion optimization of distributed drive electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(5): 4935-4946.
- [9] CHEN H, ZHANG J Z, LV C. RHONN modelling-enabled nonlinear predictive control for lateral dynamics stabilization of an in-wheel motor driven vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8296-8308.
- [10] 宋强, 王冠峰, 商赫, 等. 基于多参数控制的分布式驱动电动汽车操纵稳定性控制策略研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(11): 2104-2112, 2138.  
SONG Q, WANG G F, SHANG H, et al. Research on handling stability control strategy for distributed drive electric vehicle based on multi-parameter control[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2104-2112, 2138. (in Chinese)
- [11] LI X Y, XU N, GUO K H, et al. An adaptive SMC controller for EVs with four IWMs handling and stability enhancement based on a stability index[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10): 1509-1532.
- [12] TIAN J, WANG Q, DING J, et al. Integrated control with DYC and DSS for 4WID electric vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 124077-124086.
- [13] AHMED A A, AHMED A A, ALARGA A S D, et al. Simulation research on vehicle handling and stability enhancement based on PID control technology[C]//2021 IEEE International Conference on Power, Electrical, Electronic and Industrial Applications (PEEIACON). Piscataway: IEEE, 2021: 10-15.
- [14] JING C Q, SHU H Y, SHU R, et al. Integrated control of electric vehicles based on active front steering and model predictive control[J]. Control Engineering Practice, 2022, 121: 105066.
- [15] ZHANG Z M, XIE L, LU S, et al. Vehicle yaw stability control with a two-layered learning MPC[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(2): 423-444.
- [16] 周兵, 刘阳毅, 吴晓建, 等. 主动前轮转向和直接横摆力矩集成控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(12): 2330-2339.  
ZHOU B, LIU Y Y, WU X J, et al. Integrated control of active front steering and direct yaw moment[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(12): 2330-2339. (in Chinese)
- [17] GILLESPIE T. Fundamentals of Vehicle Dynamics[M]. PA: SAE International, 2021.
- [18] BELRZAEG M, AHMED A ALI, ALMABROUK A Q, et al. Vehicle dynamics and tire models: An overview[J]. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2021, 12(1): 331-348.
- [19] 张磊, 鲁凯, 高春侠, 等. 基于变增益自抗扰技术的机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 89-97.  
ZHANG L, LU K, GAO C X, et al. Path tracking control method of robot based on time-varying gain active disturbance rejection control[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(1): 89-97. (in Chinese)
- [20] 郭婧博, 刘飞. 基于双效滑模控制策略的轨迹跟踪仿真研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 867-877.  
GUO J B, LIU F. Simulation study of trajectory tracking based on dual-effect sliding mode control strategy[J]. Modeling and Simulation, 2023, 12(2): 867-877. (in Chinese)
- [21] SHI X Y, WU A Y, SUN Y, et al. Unique parameters selection strategy of linear canonical Wigner distribution via multiobjective optimization modeling[J]. Chinese Journal of Electronics, 2023, 32(3): 453-464.
- [22] STELLATO B, BANJAC G, GOULART P, et al. OSQP: An operator splitting solver for quadratic programs[C]//2018 UKACC 12th International Conference on Control (CONTROL). Piscataway: IEEE, 2018: 339.
- [23] LI C, XIE Y F, WANG G, et al. Lateral stability regulation of intelligent electric vehicle based on model predictive control[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles, 2021, 4(3): 104-114.
- [24] DU Y X, CHEN Y H. Time optimal trajectory planning algorithm for robotic manipulator based on locally chaotic particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(5): 906-914.
- [25] YUAN X F, ZHANG T, XIANG Y Z, et al. Parallel chaos optimization algorithm with migration and merging operation[J]. Applied Soft Computing, 2015, 35: 591-604.
- [26] SARANGI P, MOHAPATRA P. Chaotic-based mountain gazelle optimizer for solving optimization problems[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2024, 17(1): 110.
- [27] WEI J C, ZHENG Z A, CHEN J L. Research on the con-

trol strategy for handling stability of electric power steering system with active front wheel steering function[J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2024, 8: 10-8-01-0006.

- [28] 杜洪斌. 直线电梯磁悬浮导向系统的模糊自适应分数阶 $PI^{\alpha}D^{\beta}$ 控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.

DU H B. Fuzzy Adaptive Fractional  $PI^{\alpha}D^{\beta}$  Control of Magnetic Levitation Guidance System of Linear Elevator[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014. (in Chinese)

- [29] HA V T. Torque control of an in-wheel axial flux permanent magnet synchronous motor using a fuzzy logic controller for electric vehicles[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2023, 13(2): 10357-10362.

#### 作者简介



肖祥慧 男, 1983年生. 博士, 副教授, 研究方向为电机系统及其控制.  
E-mail: xiaoen3@126.com



宋运豪 男, 1998年生. 硕士生. 研究方向为分布式电动汽车及智能网联汽车的边缘计算.  
E-mail: yunhaosong618@163.com



史可 男, 1993年生. 博士. 研究方向为分布式电动汽车及其控制.  
E-mail: samkieth@hnu.edu.cn



袁小芳 男, 1979年生. 教授, 博士生导师. 研究方向为电机系统及智能控制.  
E-mail: yuanxiaofang@hnu.edu.cn