

Research on Coordinated Control of Differential Steering and Stability for Electric Vehicles Based on Hub Motor Driving Force Distribution

Jinling Ren

Shandong Vocational College of Science and Technology, Weifang, Shandong, 261000, China

Abstract

Aiming at the conflict between differential steering and stability control objectives in in-wheel motor driven electric vehicles, a hierarchical coordinated control strategy is proposed. A vehicle dynamics model was established, and a control architecture of "upper-level decision-making and lower-level allocation" was designed. The upper layer intelligently coordinates the outputs of sliding mode differential steering control and fuzzy PID stability control through a dynamic weight arbitration mechanism. The lower layer optimally distributes torque to the four wheels using a quadratic programming algorithm aimed at minimizing the tire load rate. CarSim/Simulink co-simulation shows that this strategy significantly improves path-tracking accuracy (maximum lateral deviation reduced by 57%) and lateral stability (sideslip angle limited within 4°) under conditions such as double lane change and low-adhesion road steering. The strategy is computationally efficient and demonstrates potential for engineering application.

Keywords

in-wheel motor driven electric vehicle; differential steering; stability control; coordinated control; hierarchical control

基于轮毂电机驱动力分配的电动汽车差速转向与稳定性协同控制研究

任锦玲

山东科技职业学院, 中国·山东 潍坊 261000

摘要

针对轮毂电机驱动电动汽车差速转向与稳定性控制目标易冲突的问题, 提出一种分层协同控制策略。研究建立了整车动力学模型, 并设计了“上层决策-下层分配”的控制架构。上层通过动态权重仲裁机制, 融合滑模差速转向控制与模糊PID稳定性控制的输出, 实现智能协调; 下层采用二次规划算法, 以轮胎负荷率最小化为目标优化分配四轮转矩。CarSim/Simulink联合仿真表明, 该策略在双移线、低附路面等工况下, 能显著提升路径跟踪精度(最大横向偏差降低57%)与横向稳定性(质心侧偏角限制在 4° 内), 且计算高效, 具备工程应用潜力。

关键词

轮毂电机驱动电动汽车; 差速转向; 稳定性控制; 协同控制; 分层控制

1 绪论

1.1 研究背景与意义

汽车电动化与智能化推动驱动系统向分布式演进。轮毂电机作为其核心形态, 通过对各车轮扭矩的独立精确控制, 为提升车辆动力学性能带来革新潜力。然而, 旨在提升灵活性的差速转向控制与保障安全的横摆稳定性控制常被独立设计, 在复杂工况下易产生冲突, 制约了技术优势的充分发挥。因此, 开展两者协同控制研究, 对挖掘车辆性能极限与提升主动安全具有重要理论及工程价值。

【作者简介】任锦玲(1979-), 中国山东潍坊人, 硕士, 从事汽车电子技术, 电机控制研究。

1.2 国内外研究现状

当前研究主要沿两个方向展开: 一是轮毂电机驱动扭矩的优化分配, 二是线控底盘的多系统集成控制。现有工作虽呈现集成趋势, 但将差速转向与稳定性控制进行深度动态融合, 实现平滑协同而非简单叠加的研究尚不充分, 在“人-车-路”闭环性能整体优化方面存在深化空间。

1.3 主要研究内容与技术路线

本文旨在设计一种深度协同的差速转向与稳定性控制系统。主要研究内容为: 1) 建立包含车辆、轮胎、电机及驾驶员的闭环动力学模型; 2) 设计“上层运动决策-下层力矩分配”的分层协同控制策略, 核心是上层的智能仲裁融合机制; 3) 通过多工况仿真验证策略性能。全文遵循“问题

提出→建模→控制器设计→仿真验证→总结”的技术路线展开。

2 轮毂电机电动汽车动力学建模

本章建立适用于协同控制研究的车辆动力学模型体系，

包含整车、轮毂电机、轮胎及驾驶员模型，为后续控制策略设计与验证提供基础。

2.1 整车动力学模型

建立如图 1 所示的三自由度车辆动力学模型，包含纵向、横向和横摆运动，推导其运动方程。

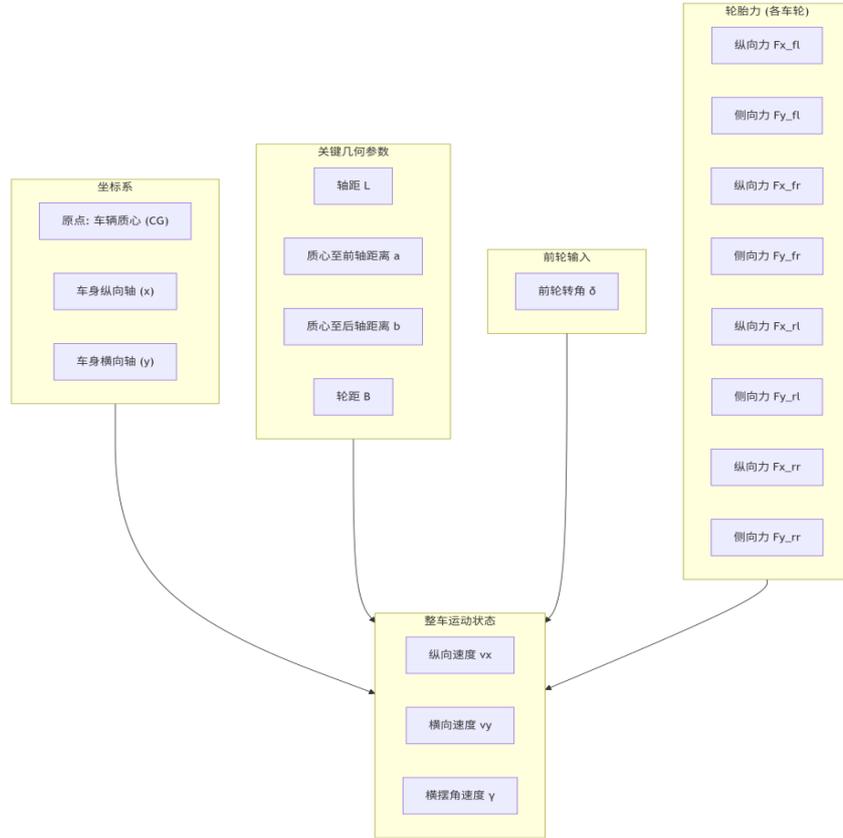


图 1 三自由度车辆动力学模型示意图

纵向运动方程：

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = \sum F_x \quad (2.1)$$

式中， m 为整车质量， v_x 、 v_y 为纵向、横向速度， γ 为横摆角速度， $\sum F_x$ 为四个轮胎纵向力之和。

横向运动方程：

$$m(\dot{v}_y + v_x \gamma) = \sum F_y \quad (2.2)$$

式中， $\sum F_y$ 为轮胎横向力之和。

横摆运动方程：

$$I_z \dot{\gamma} = \sum M_z \quad (2.3)$$

式中， I_z 为绕 z 轴转动惯量， $\sum M_z$ 为轮胎力产生的横摆力矩之和，计算式为：

$$\begin{aligned} \sum M_z = & a(F_{yfl} \cos \delta_f + F_{xfl} \sin \delta_f + F_{yfr} \cos \delta_f + F_{xfr} \sin \delta_f) - b(F_{yrl} + F_{yrr}) + B/2 [(-F_{xfl} \cos \delta_f + F_{yfl} \sin \delta_f + F_{xfr} \cos \delta_f - F_{yfr} \sin \delta_f) + (-F_{xrl} + F_{xrr})] \end{aligned} \quad (2.4)$$

式中， a 、 b 为质心至前、后轴距离， B 为轮距， δ_f 为前轮转向角， F_{xij} 、 F_{yij} (ij 代表 fl , fr , rl , rr) 为各轮胎纵向力和横向力。

2.2 轮毂电机模型与驱动特性分析

轮毂电机建模为一阶惯性环节的扭矩伺服系统，其动态响应为：

$$\tau_m \dot{T}_m + T_m = T_{cmd} \quad (2.5)$$

式中， T_{cmd} 为目标扭矩， T_m 为实际输出扭矩， τ_m 为响应时间常数（可低于 5ms），体现了轮毂电机的快速响应能力。

表 1 轮毂电机响应特性对比

特性	传统驱动系统	轮毂电机驱动系统
扭矩响应时间	~100 ms	< 5 ms
控制路径	发动机→离合器→变速箱→传动轴→差速器→车轮	指令直接至车轮电机
执行精度	相对较低，存在传动间隙	高精度，直接驱动

轮毂电机外特性受转速限制，最大扭矩 $T_{max}(\omega)$ 为：

$$T_{max}(\omega) = \begin{cases} T_{rated}, & |\omega| \leq \omega_{rated}; \\ P_{max} / |\omega|, & |\omega| > \omega_{rated} \end{cases} \quad (2.6)$$

式中, T_{rated} 为额定扭矩, ω_{rated} 为额定转速, P_{max} 为峰值功率。此特性是下层扭矩分配的约束条件。

2.3 轮胎模型

采用 Pacejka 魔术公式稳态模型描述轮胎非线性力学特性。其基本形式为:

$$y = D \sin \{ C \arctan [Bx - E(Bx - \arctan(Bx))] \}$$

$$Y(X) = y(x) + S_v$$

$$x = X + S_h$$
(2.7)

式中, Y 为输出变量 (F_x 或 F_y), X 为输入变量 (纵向滑移率 κ 或侧偏角 α), B 、 C 、 D 、 E 为拟合参数, S_h 、 S_v 为漂移量。

联合滑移工况下, 采用摩擦椭圆概念进行耦合修正:

$$F_x = F_{x0} * G_x(\alpha, \kappa, \mu, F_z)$$
(2.8)

$$F_y = F_{y0} * G_y(\alpha, \kappa, \mu, F_z)$$
(2.9)

式中, F_{x0} 、 F_{y0} 为纯滑移下的力, G_x 、 G_y 为耦

合衰减函数, μ 为路面附着系数, F_z 为垂向载荷。

2.4 驾驶员 - 车辆闭环系统模型

采用预瞄 - 跟随驾驶员模型模拟驾驶员行为, 其根据前方预瞄点 T_p 时间的横向偏差 e , 通过 PD 控制律输出转向指令:

$$\delta_d(t) = K_p * e(t) + K_d * \dot{e}(t)$$
(2.10)

式中, δ_d 为期望转向角, K_p 、 K_d 为比例和微分增益。

将整车模型、轮胎模型、轮毂电机模型与驾驶员模型集成, 构成完整的“驾驶员 - 车辆”闭环仿真系统, 为后续控制器设计与验证提供逼真环境。本章模型兼顾关键动力学特性与仿真效率, 为协同控制策略研究奠定基础。

3 差速转向与稳定性协同控制策略设计

本章提出一种“上层运动决策 - 下层力矩优化分配”的分层协同控制策略, 旨在解决差速转向灵活性与横摆稳定性之间的目标冲突。其总体架构如图 2 所示, 通过集成决策与优化分配, 实现车辆综合动态性能的最优。

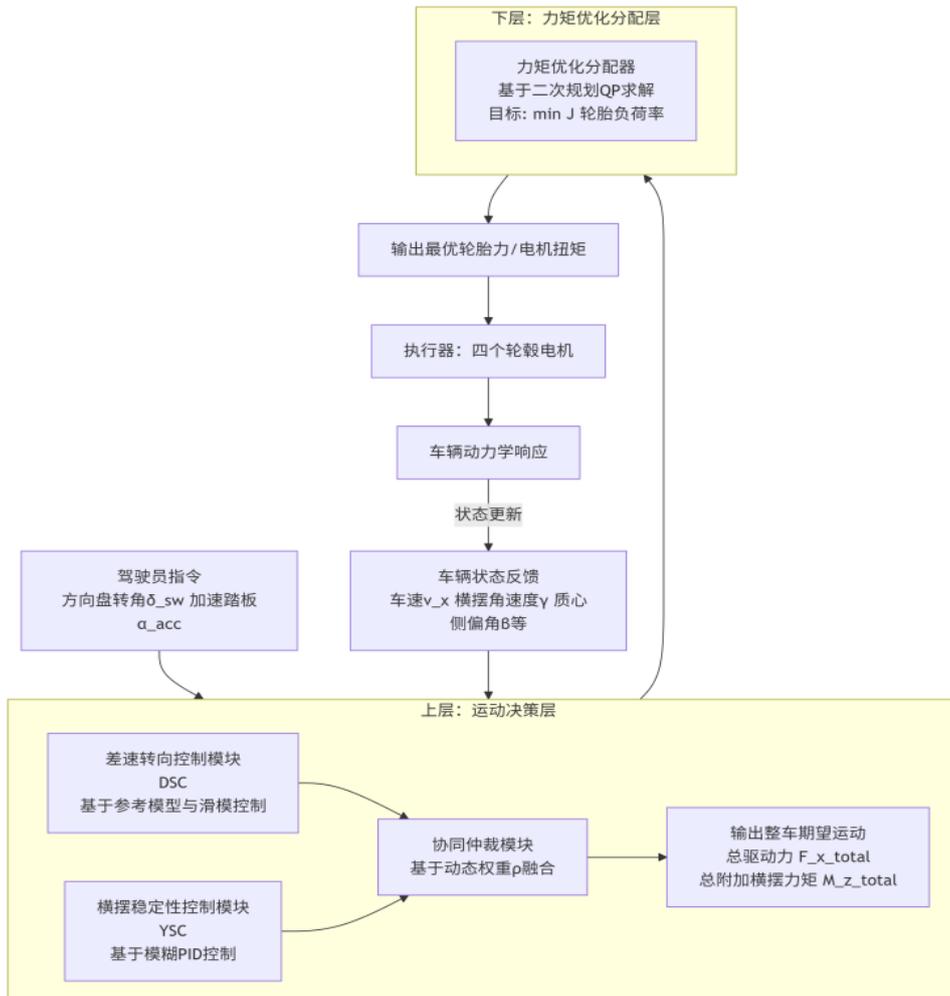


图 2 总体框架图

3.1 协同控制总体架构

系统输入为方向盘转角、加速踏板开度及车辆状态。上层运动决策层综合处理驾驶员意图与车辆稳定性状态，输出整车所需的总驱动力 F_{x_total} 和总附加横摆力矩 M_{z_total} 。下层力矩优化分配层将整车指令转化为四个车轮的最优驱动/制动扭矩 T_{ij} 。执行层由轮毂电机响应，最终实现精准控制。

3.2 上层控制器设计：运动决策与协同仲裁

上层控制器由三个核心模块构成，其协同关系如图2中“上层运动决策层”部分所示。

3.2.1 差速转向控制模块 (DSC)

基于参考模型生成期望横摆角速度 γ_{des} ，并通过滑模控制使实际横摆角速度 γ 对其进行跟踪。定义滑模面 $s = \gamma - \gamma_{des}$ ，并设计控制律输出附加横摆力矩需求 M_{z_dsc} 。

3.2.2 横摆稳定性控制模块 (YSC)

以质心侧偏角 β 及其变化率 $\dot{\beta}$ 为输入，采用模糊 PID 控制算法，计算维持稳定所需的横摆力矩修正量 M_{z_ysc} ，防止车辆进入失稳状态。

3.2.3 协同仲裁模块

此模块为协同控制的核心，负责动态融合 M_{z_dsc} 与 M_{z_ysc} 。引入与车辆稳定性裕度相关的权重系数 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$)，最终输出的总附加横摆力矩为：

$$M_{z_total} = (1 - \rho) * M_{z_dsc} + \rho * M_{z_ysc} \quad (3.1)$$

当车辆稳定时， ρ 趋近于 0，系统以转向需求为主；当有失稳风险时， ρ 趋近于 1，系统以稳定性需求为主，实现平滑过渡与深度协同。

3.3 下层控制器设计：力矩优化分配

下层控制器将上层指令 F_{x_total} 和 M_{z_total} 通过二次规划 (QP) 问题最优分配给四个车轮。

决策变量：轮胎纵向力向量 $F_x = [F_{xf}, F_{xr}, F_{xl}, F_{xr}]^T$ 。

目标函数：最小化轮胎负荷率平方和，以最大化附着裕度：

$$\min J = \sum ((F_{xij})^2 / (\mu * F_{zij})^2) \quad (3.2)$$

等式约束：确保实现上层指令。

$$\text{纵向力: } [1, 1, 1, 1] * F_x = F_{x_total} \quad (3.3)$$

$$\text{横摆力矩: } [-B/2, B/2, -B/2, B/2] * F_x = M_{z_total} \quad (3.4)$$

不等式约束：满足执行器与轮胎物理极限。

$$\text{电机扭矩: } -T_{\max}(\omega_{ij})/R \leq F_{xij} \leq T_{\max}(\omega_{ij})/R \quad (3.5)$$

$$\text{轮胎附着: } |F_{xij}| \leq \mu * F_{zij} \quad (3.6)$$

实时求解该 QP 问题，得到最优轮胎力 F_x^* 并转换为电机扭矩指令 T_{ij} 。

3.4 控制策略对比

表 2 对比了三种协同策略的核心特点，凸显了本文所采用策略的优势。

表 2 不同协同控制策略对比

策略类型	核心机制	优点	缺点
基于规则切换	设定车辆状态阈值，在差速转向与稳定性控制间切换。	逻辑简单，实时性极高。	阈值难设定，切换瞬间控制指令不连续，易引起车辆抖动。
基于权重融合 (本文采用)	设计连续变化的权重函数，动态融合两者输出。	控制输出平滑连续，能实现渐进、柔性的协同，驾驶体验好。	权重函数的设计与调参需要优化，对状态估计精度要求较高。
基于一体化优化	将转向与稳定目标统一在一个模型预测控制 (MPC) 框架下求解。	理论上是全局最优解，能显式处理多目标约束。	计算复杂度高，对车载处理器算力要求苛刻。

本章所设计的控制架构具有模块化特点，为未来集成自动驾驶指令或实现软件定义底盘功能预留了接口。

4 协同控制策略仿真验证与分析

本章基于 CarSim/Simulink 联合仿真平台，对第三章提出的协同控制策略进行多工况验证，并通过与传统独立控制策略的对比，量化评估其在路径跟踪、稳定性及综合性能方面的优越性。

4.1 仿真平台搭建与测试工况设计

为验证本文所提出的协同控制策略，基于 CarSim 与 Simulink 搭建了高保真度的联合仿真平台。仿真车辆主要参数如下：整车质量 1650 kg，绕 Z 轴转动惯量 3120 kg·m²，轴距 2.7 m，单个轮毂电机峰值扭矩 650 N·m。为全面评估控制性能，设计了三种典型测试工况：1) 双移线工况 (车速 100 km/h)，用于考核高速下的路径跟踪精度与瞬态响应；2) 正弦迟滞转向工况 (车速 80 km/h，路面附着系数 $\mu=0.9$)，用于分析系统的频响特性与操纵感；3) 低附着路面阶跃转向工况 (车速 60 km/h， $\mu=0.3$)，用于测试极限条件下的稳定性保持能力。在所有工况中，均对比以下三种控制策略：Case A (仅差速转向控制)、Case B (仅横摆稳定性控制) 以及 Case C (本文提出的协同控制)。

表 3 仿真车辆主要参数

参数	符号	数值	单位
整车质量	m	1650	kg
绕 Z 轴转动惯量	I _z	3120	kg·m ²
轴距	L	2.7	m
质心至前/后轴距离	a/b	1.2/1.5	m
轮毂电机峰值扭矩 (单轮)	T _{max}	650	N·m

4.2 协同控制性能对比分析

为综合量化评估不同控制策略的核心性能，将路径跟踪、稳定性保持及操纵频响三大维度的关键指标融合，形成综合性能对比表，如表 4 所示。

表 4 三种控制策略综合性能对比

评价维度	关键性能指标	CaseA 仅差速转向	CaseB 仅稳定性控制	CaseC 协同控制	备注 / 现象
路径跟踪性能 (双移线工况)	最大横向偏差 (m)	0.42	> 1.50	0.18	Case C 较 Case A 提升 57%
	横向偏差均方根 (m)	0.15	0.48	0.06	
横向稳定性 (低附路面阶跃转向)	质心侧偏角峰值 (°)	>10.0 (发散)	1.5	3.8	Case C 成功将 β 限制 在安全范围内
	横摆角速度稳定时间 (s)	-(失稳)	1.2	0.8	
操纵频响特性 (正弦扫频工况)	谐振峰增益 (dB)	+4.5	-10.0	+1.2	增益适中, 避免“过敏” 或“迟钝”
	相位滞后 @1.0 Hz (°)	-45	-5	-15	
综合主观评价	驾驶员操纵负担	重, 易振荡, 需频繁修正	重, 响应迟钝, 路感差)	轻, 响应与稳定性平衡	基于仿真模型与 指标推断

根据表 4 的数据对比分析如下:

差速转向性能: 在双移线工况下, Case A 因过度转向导致轨迹振荡, 误差最大; Case B 因过度抑制横摆响应而完全无法跟踪路径; Case C 则通过智能仲裁, 在保证稳定的同时实现了最高的跟踪精度, 最大横向偏差较 Case A 降低 57%。

稳定性保持能力: 在低附路面阶跃转向时, Case A 直接导致车辆侧滑失稳; Case B 虽能保持稳定但严重牺牲了转向能力; Case C 则在实现有效转向的同时, 将质心侧偏角稳定在 4° 的安全范围内, 并表现出最快的收敛速度。

综合性能与驾驶员感受: 从频响指标看, Case A 增益过大、相位滞后严重, 操纵负担重; Case B 增益被过度压制, 响应迟钝; Case C 获得了最为平衡的频响特性, 增益适中、相位滞后小, 预示着更自然、协调的“人-车”闭环操纵体验。

4.3 鲁棒性与实时性分析

为验证控制策略的实用性与可靠性, 对其鲁棒性及计算效率进行了测试分析。

参数与工况鲁棒性测试: 在车辆满载 (质量增加 20%) 情况下进行双移线测试, Case C 的最大横向偏差由 0.18m 增至 0.22m, 性能衰减可控 (约 22%), 且仍显著优于 Case A 与 Case B。在对接路面 (μ 从 0.9 突变为 0.4) 测试中, Case C 能在 0.3 秒内通过力矩重分配恢复稳定, 展现了良好的环境适应性。

控制算法实时性评估: 在工控机环境中, 对所提控制算法的 C 代码进行性能分析。上层协同决策模块平均计算耗时 0.12 ms, 下层优化分配模块平均耗时 0.35 ms。单步总计算时间平均为 0.47 ms, 远小于设定的 1 ms 控制周期, 满足车规级控制器对实时性的严苛要求。

5 总结与展望

本文针对轮毂电机驱动电动汽车差速转向与横摆稳定性控制冲突问题, 开展了系统性研究。通过建立“人-车”闭环仿真平台, 创新性提出了“上层运动决策-下层力矩分配”分层协同控制架构。其核心是上层的动态权重仲裁机制

$M_z_{total} = (1 - \rho) * M_z_{dsc} + \rho * M_z_{ysc}$, 能智能协调转向与稳定需求; 下层通过二次规划实现力矩最优分配。仿真表明, 该策略显著提升了路径跟踪精度 (最大横向偏差降低 57%) 与横向稳定性 (质心侧偏角限制在 4° 内), 且算法实时性强 (单步耗时 0.47ms)。

本研究主要创新在于提出了基于动态仲裁的深度协同控制框架, 实现了转向与稳定的智能融合; 并通过上下层有机结合, 兼顾了响应速度与全局最优性。未来研究可朝三个方向深入: 建立驱动-悬架耦合模型以研究平顺性协同; 融合车路协同 (V2X) 信息发展预见性控制; 推进硬件在环与实车测试, 并开发容错控制策略以提升系统实用性与鲁棒性。

参考文献

- [1] 屈小贞, 张昊, 李刚, 等. 四轮轮毂电机驱动汽车的差速转向控制研究[J]. 现代制造工程, 2025(9): 90-98.
- [2] 李胜琴, 刘夏蕾, 周洋. 轮毂电机驱动汽车差动助力转向与横摆稳定性协调控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2024, 38(8): 41-47.
- [3] 胡金芳, 颜春辉, 赵林峰, 等. 分布式驱动电动汽车转向工况转矩分配控制研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 105-116.
- [4] 赵南南, 史博. 分布式电动汽车转矩型电子差速控制策略研究[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(11): 1915-1922.
- [5] 邹渊, 郭宁远, 张旭东, 等. 分布式电驱车辆力矩分配控制研究现状综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 1-25.
- [6] 田杰, 杨明飞. 四轮轮毂电机电动汽车差速转向的分层控制[J]. PLOS ONE, 2023, 18(6): e0285485.
- [7] 王艳华, 孟永凯, 邓吉琛, 等. 分布式电动车转向横向稳定性力矩适应性分配策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(3): 46-54.
- [8] 陈江松, 许鑫, 王斌, 等. 考虑转矩波动的轮毂电机驱动汽车能耗优化方法[J]. 汽车工程, 2025, 47(4): 701-713.
- [9] 张雷. 四轮轮毂电机驱动智能电动汽车转向失效容错控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2021.