

# 分布式驱动电动汽车车轮转矩分配控制策略

刘晓童,赵红\*,路来伟,徐福良,孙传龙

青岛大学机电工程学院,山东 青岛 266071

**摘要:**为提高分布式驱动电动汽车横摆稳定性,同时减少控制器启动次数,设计基于电机特性的横摆力矩平均分配的双层控制器。在上层控制器中,建立车辆二自由度理想数学模型,计算其与实际车辆模型横摆角速度偏差,结合相平面法判断车辆当前状态是否需进行控制,若需要,则采用比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制,并计算维持车辆稳定所需的附加横摆力矩;下层控制器接受上层控制器的信号,基于电机特性的横摆力矩平均分配法对车轮施加相应的纵向力。采取 Simulink 软件与 Carsim 软件进行联合仿真验证,结果表明:该控制器可降低整车质心侧偏角和横摆角速度,有效提高汽车的行驶稳定性。

**关键词:**分布式驱动;操纵稳定性;转矩分配;联合仿真

**中图分类号:**U469.72

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)02-0050-06

**引用格式:**刘晓童,赵红,路来伟,等. 分布式驱动电动汽车车轮转矩分配控制策略[J]. 内燃机与动力装置, 2023,40(2):50-55.

LIU Xiaotong, ZHAO Hong, LU Laiwei, et al. Control strategy of wheel torque distribution for distributed drive electric vehicle[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(2):50-55.

## 0 引言

随着新一轮科技革命的兴起,新能源汽车技术越来越成熟,逐渐代替传统燃油汽车实现了商业化发展,对服务国家发展战略具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。轮毂电机驱动技术为新能源汽车分布式驱动技术的一种,结构简单、各轮转矩独立可控,使得分布式驱动电动汽车的操纵稳定性和行驶稳定性更为优异<sup>[3]</sup>。众多学者对电动汽车的控制策略进行了研究:靳立强等<sup>[4]</sup>提出一种自适应电子差速控制策略,通过对轮毂电机进行转矩指令控制和转速随动,使车轮根据自身受力状态实现差速;姚芳等<sup>[5]</sup>设计了一种基于自抗扰控制的电子差速控制策略,有效提高了控制器的抗干扰能力;Ge 等<sup>[6]</sup>提出了考虑路面参数辨识的四轮转向与电子差速器联合控制策略,提高了车辆稳定性。上述学者侧重从车轮转速控制方面设计合理的电子差速控制策略,以提高车辆稳定性。也有学者基于转矩控制制定控制策略:张缓缓等<sup>[7]</sup>采用基于反向传播神经网络的比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制方法,通过控制车辆横摆角速度与质心侧偏角分配转矩;Amine 等<sup>[8]</sup>提出一种人工神经网络控制器,采用二次规划算法计算汽车稳定所需的直接横摆力矩,提高了横向稳定性并降低电机能耗;时培成等<sup>[9]</sup>为提高车辆稳定性,设计了具有双层控制策略的四轮毂驱动电动汽车驱动容错控制系统,通过模糊控制分配转矩;马晓军等<sup>[10]</sup>设计了基于横摆角速度和质心侧偏角联合控制的横摆力矩滑模控制方法,与经典 PID 控制相比,车辆稳定性更好。

**收稿日期:**2023-02-10

**基金项目:**青岛市民生科技计划项目(19-6-1-88-nsh)

**第一作者简介:**刘晓童(1998—),男,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为车辆节能减排与新能源技术,E-mail:1448911140@qq.com。

**\*通信作者简介:**赵红(1973—),女,河南新乡人,副教授,主要研究方向为车辆节能减排与新能源技术,E-mail:qdlizh@163.com。

与控制转速相比,直接控制转矩方法在高速工况下更易控制汽车稳定性<sup>[11]</sup>,因此本文中基于车轮转矩控制策略和相平面法,设计基于电机特性的横摆力矩平均分配的双层控制器,提高分布式驱动电动汽车的操控稳定性。

## 1 模型

### 1.1 汽车线性二自由度模型

汽车线性二自由度模型作为理想车辆模型<sup>[12]</sup>如图 1 所示。图 1 中, $\delta$  为前轮转向角, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为前、后轮侧偏角, $\beta$  为质心侧偏角, $\omega_r$  为横摆角速度, $a$ 、 $b$  分别为前后轴到质心的距离, $L$  为轴距, $u$  为纵向车速, $v$  为侧向车速。

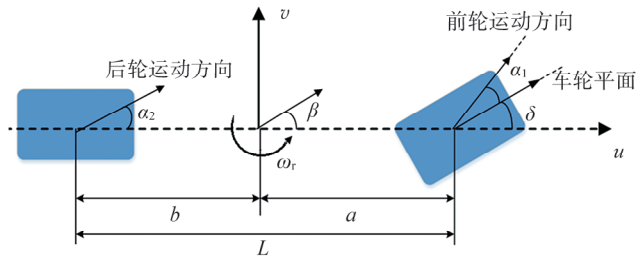


图 1 线性二自由度车辆模型

线性二自由度车辆模型的运动方程为：

$$\begin{cases} m(\dot{v} + u\omega_r) = -(C_f + C_r)v/u - (aC_f - bC_r)\omega_r/u + C_f\delta \\ I\dot{\omega}_r = -(aC_f - bC_r)v/u - (a^2C_f + b^2C_r)\omega_r/u + aC_f\delta \end{cases} \quad (1)$$

式中： $m$  为汽车总质量，kg； $C_f$ 、 $C_r$  分别为前、后轮胎侧偏刚度，N/rad； $I$  为汽车绕  $z$  轴的转动惯量，kg·m<sup>2</sup>。

车辆侧向速度  $v$  和横摆角速度  $\omega_r$  为状态变量，即  $\mathbf{X} = [v \ \omega_r]^T$ ，系统输入  $\mathbf{U}$  为前轮转向角  $\delta$ ，可将式 (1) 整理为状态空间方程：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{cases}$$

$$\text{式中：} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(C_f + C_r)/(mu) & -(aC_f - bC_r)/(mu) - u \\ -(aC_f - bC_r)/(Iu) & -(a^2C_f + b^2C_r)/(Iu) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} C_f/m \\ aC_f/I \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \ 1], \quad \mathbf{D} = 0.$$

### 1.2 电机模型

Carsim 模型只针对传统内燃机汽车建模,因此,断开传统汽车的传动系统,加入基于 Simulink 建立的电机模型,从而获得所需的分布式驱动电动汽车模型<sup>[12]</sup>。电机模型可简化为一个二阶系统,其实际输出转矩  $T_o$  和期望输入转矩  $T_i$  的传递函数

$$G(s) = T_o/T_i = 1/2\xi^2s^2 + 2\xi s + 1,$$

式中  $\xi$  为电机特性常数。

## 2 控制策略

本文中采用双层控制器对汽车操纵稳定性进行控制。分层控制器控制流程如图 2 所示。上层控制器通过分析 Carsim 模型与理想模型的误差判断当前车辆状态是否需要附加横摆力矩,若需要,应用 PID 控制计算需附加的横摆力矩并传递给下层控制器;下层控制器接受上层控制器的信号,对各电机进行力矩分配,保证汽车稳定性。这种上、下层控制器配合的控制方法可大幅减少整车控制器的计算量。

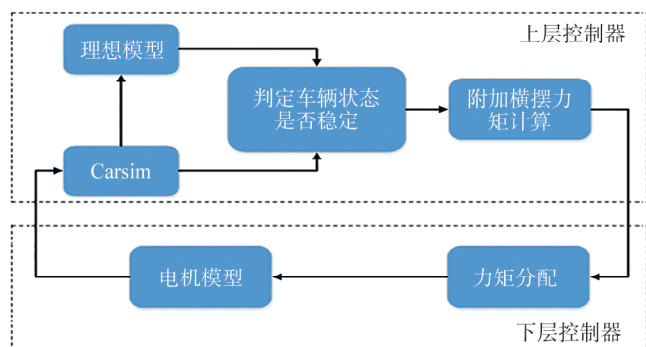


图 2 分层控制器控制流程

## 2.1 上层控制器

上层控制器采用质心侧偏角-质心侧偏角速度相图( $\beta-\dot{\beta}$ 相图)判断车身稳定性, $\beta-\dot{\beta}$ 相图如图3所示。由图3可知:2条红线间的每条相轨迹都收敛于质心侧偏角和质心侧偏角速度为0的点,这个点为车辆稳定点,而在红线之外的相轨迹均发散,所以,红线间的区域为稳定区域,其余为不稳定区域。

稳定区域边界公式<sup>[13]</sup>为:

$$B_3 \leq \beta + B_1 \dot{\beta} \leq B_2, \quad (2)$$

式中 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 为边界参数。

$B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 的计算式为:

$$B_1 = 1/(\lambda_1 v^3 + \lambda_2 v^2 + \lambda_3 v + \lambda_4),$$

$$B_2 = (\lambda_5 \mu + \lambda_6)(\lambda_7 v^{\lambda_8} + \lambda_9) + \delta,$$

$$B_3 = -(\lambda_5 \mu + \lambda_6)(\lambda_7 v^{\lambda_8} + \lambda_9) + \delta,$$

式中: $\lambda_1 = -9.9120 \times 10^{-4}$ ,  $\lambda_2 = 0.0791$ ,  $\lambda_3 = -2.1909$ ,  $\lambda_4 = 31.7100$ ,  $\lambda_5 = 0.0977$ ,  $\lambda_6 = -8.9185 \times 10^{-4}$ ,  $\lambda_7 = 79.0200$ ,  $\lambda_8 = -1.7930$ ,  $\lambda_9 = 0.7267$ 。

汽车的横摆角速度偏差不能过大。设 $\omega_d$ 为汽车期望角速度,则横摆角速度偏差<sup>[14-15]</sup>应满足:

$$|\omega_r - \omega_d| \leq 0.165 |\omega_d|. \quad (3)$$

车辆稳定应同时满足式(2)(3)。式(2)(3)同时成立时,控制器不工作,任意一个不满足时,控制器开启。PID控制器采用Simulink自带的PID模块,输入为理想模型与实际车辆间横摆角速度的差,输出为所需附加的横摆力矩。

## 2.2 下层控制器

分布式驱动电动汽车由4个轮毂电机共同驱动,每个电机独立可控,方便对车轮力矩直接控制,即通过对每个车轮施加纵向力(驱动力或制动力)达到预期的效果。

下层控制器接收上层控制器的信号,采用基于电机特性的横摆力矩平均分配方法,通过控制各车轮的附加纵向力使车辆两侧纵向力不同,产生所需附加横摆力矩,平均分配车辆左右两侧驱动力。

控制器不工作时,车轮转矩之和为驱动汽车所需的总力矩,4个车轮平均分配力矩,此时没有产生附加横摆力矩。每个车轮的力矩

$$M_{fl} = M_{fr} = M_{rl} = M_{rr} = M_d/4, \quad (4)$$

式中: $M_{fl}$ 、 $M_{fr}$ 、 $M_{rl}$ 、 $M_{rr}$ 、 $M_d$ 分别为汽车左前轮、右前轮、左后轮、右后轮、整车所需的转矩, N·m。

控制器工作时,需在满足驱动汽车的前提下,对车轮进行纵向力控制,以产生所需的附加横摆力矩。以左侧车轮增加转矩,右侧车轮减少转矩为例,车辆附加横摆力矩平衡图如图4所示,图中, $\Delta_F$ 为每个车轮附加的纵向力, $d$ 为轮距, $r$ 为车轮滚动半径。此时产生附加的横摆力矩

$$\Delta_M = 2d\Delta_F。$$

结合式(4)可得作用在每个车轮的纵向力矩为:

$$M_{fl} = M_{rl} = M_d/4 + \Delta_F r = M_d/4 + \Delta_M r/(2d),$$

$$M_{fr} = M_{rr} = M_d/4 - \Delta_F r = M_d/4 - \Delta_M r/(2d)。$$

同理计算右侧车轮增加转矩、左侧车轮减少转矩时的转矩分配。定义 $\delta > 0$ 为左转, $\delta < 0$ 为右转, $\Delta_\omega$ 为横摆角速度偏差,逆时针方向为正,直接转矩分配方法控制流程如图5所示。

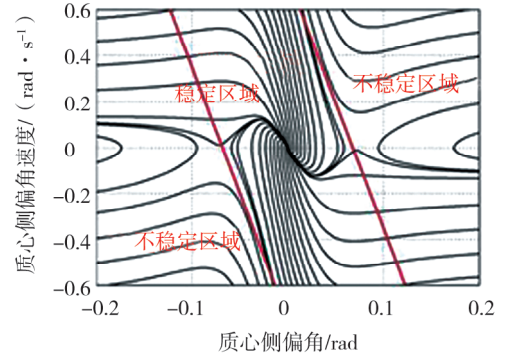


图3 质心侧偏角-质心侧偏角速度相图

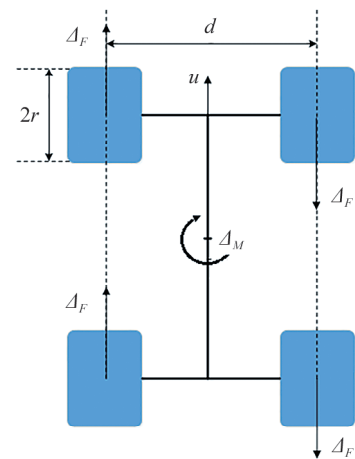


图4 车辆附加横摆力矩平衡图

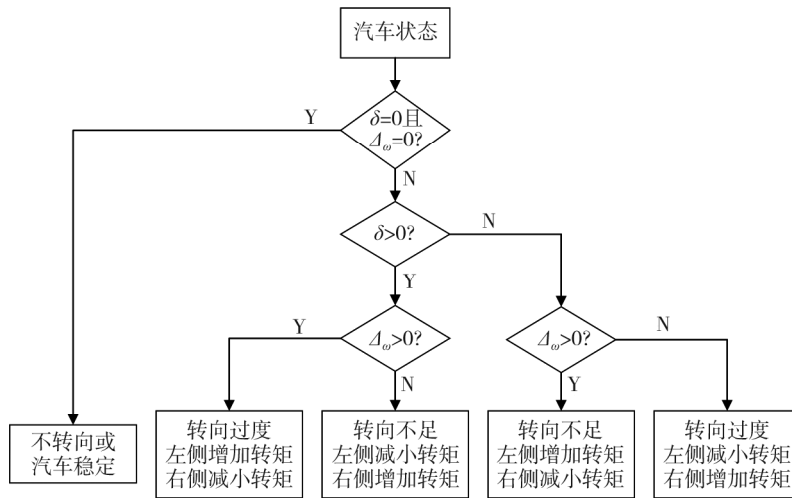


图 5 直接转矩分配方法控制流程图

### 3 仿真实验

本文中采用 Carsim 软件和 Simulink 软件联合仿真,车速分别设置为 30、80 km/h,选择双移线工况对设计的分层控制策略进行验证。整车主要技术参数如表 1, Carsim-Simulink 联合仿真模型如图 6 所示, Carsim 中设置的双移线试验轨迹如图 7 所示。

表 1 整车主要技术参数

整车质量/kg	轮距/m	前轴至质心距离/m	后轴至质心距离/m	质心高度/m
1 270	1.5	1.015	1.510	0.540
绕 z 轴转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	前轮侧偏刚度/(N·rad <sup>-1</sup> )	后轮侧偏刚度/(N·rad <sup>-1</sup> )	车轮滚动半径/m	
1 536	-108 861	-108 861	0.3	

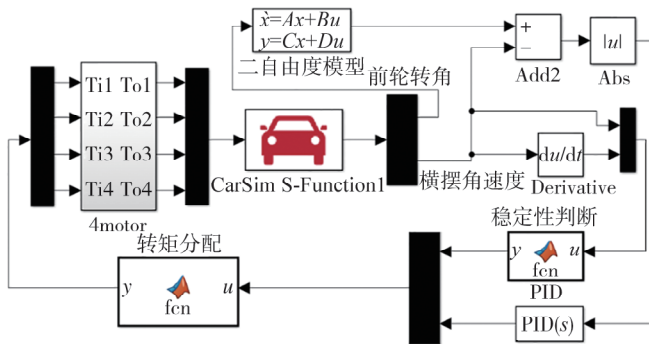


图 6 Carsim-simulink 联合仿真模型

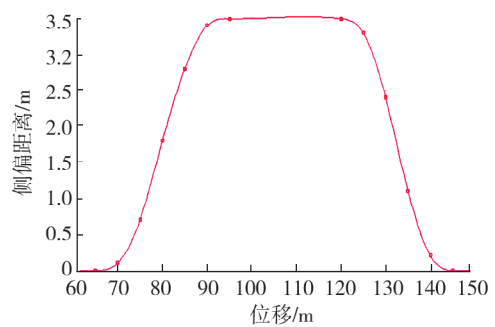


图 7 双移线试验轨迹

车速为 30 km/h 的分层控制器转矩控制仿真结果如图 8 所示。由图 8a)可知:车速为 30 km/h 时,未施加转矩控制的车辆与施加转矩分配控制策略的车辆均保持稳定;施加转矩分配控制策略后,汽车质心侧偏角在±0.5°之内,波动较小;未施加转矩分配控制策略汽车的最大质心侧偏角为前者的 3 倍;设计的分层控制转矩分配策略能有效降低车辆失稳的几率,提高了整车的稳定性。由图 8b)可知:在每次车轮转向与回正的过程中,即曲线出现波动之时,未施加转矩分配控制策略汽车的横摆角速度曲线斜率较为陡峭,这种激增对整车稳定危害极大;在施加转矩分配控制策略后,汽车的横摆角速度曲线斜率较为平缓,验证了分层控制转矩分配策略的可行性与有效性。

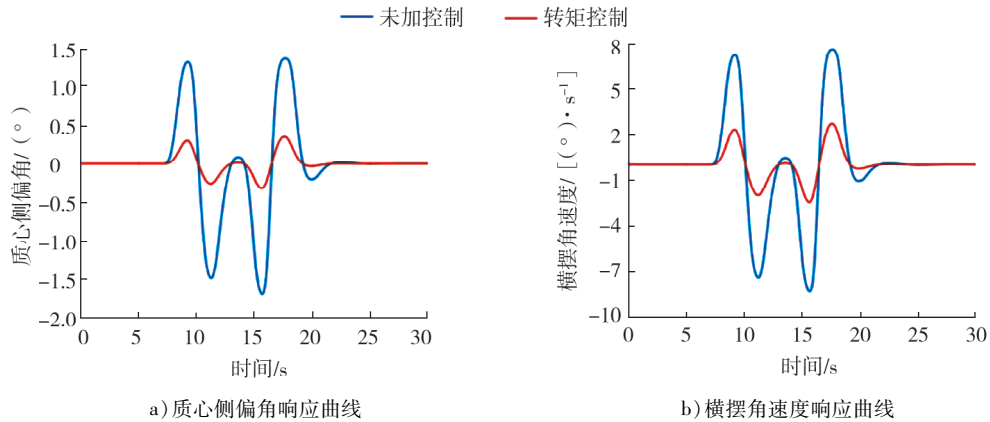


图8 车速为30 km/h的分层控制器转矩控制仿真结果

车速为80 km/h的分层控制器转矩控制仿真结果如图9所示。由图9a)可知:车速为80 km/h时,汽车质心侧偏角小于车速为30 km/h的质心侧偏角,方向相反,原因为质心侧偏角方向由横摆中心位置确定,随着车速的增加,横摆中心与质心的相对位置发生改变,从而影响质心侧偏角的大小与方向;在车速为80 km/h时,施加转矩控制策略的汽车质心侧偏角比未加控制的波动小,表明该转矩控制策略在80 km/h时仍有较好控制性。由图9b)可知:施加转矩控制策略后的汽车横摆角速度曲线斜率更为平缓,有效控制了车辆的横摆力矩,使车辆不会严重失稳。

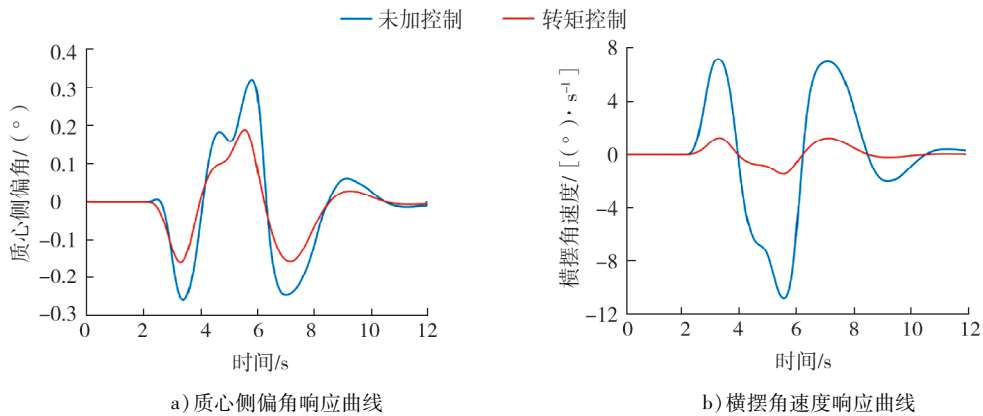


图9 车速为80 km/h的分层控制器转矩控制仿真结果

综上所述,设计的基于电机特性的分布式驱动电动汽车横摆力矩平均分配的双层控制器可有效降低汽车转弯过程中质心侧偏角和横摆角速度,提高汽车的横摆稳定性。

## 4 结论

1) 为提高汽车横摆稳定性,以分布式驱动电动汽车为对象,设计分层控制器,上层控制器以质心侧偏角-质心侧偏角速度相图为判别稳定性的基础,通过PID控制进行附加横摆力矩计算;下层控制器通过基于电机特性的直接转矩分配方法进行转矩平均分配,以获得所需附加横摆力矩。

2) 对Carsim软件中的传统燃油汽车模型进行调整,通过Simulink软件加入分布式驱动电动汽车的电机模型以及分层控制策略,联合仿真表明,分层控制器能有效降低汽车转弯过程中质心侧偏角和横摆角速度,提高汽车的横摆稳定性。

### 参考文献:

- [1] 温从众. 新能源汽车发展与环保机械零件结构的探讨研究[J]. 环境工程, 2021, 39(11): 212.

- [2] 李方生,赵世佳,胡友波. 我国新能源汽车产业国际化发展的关键问题与对策建议[J]. 科学管理研究,2021,39(5):72-78.
- [3] 殷国栋,金贤建,张云. 分布式驱动电动汽车底盘动力学控制研究综述[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(8):13-19.
- [4] 靳立强,田端洋,宋琪. 多轴轮毂电机驱动电动车电子差速控制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(12):123-132.
- [5] 姚芳,赵晓鹏,吴正斌,等. 一种基于自抗扰控制的电子差速控制策略研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(3):177-191.
- [6] GE G, LIU S, XU J. Research on joint control of four-wheel steering and electronic differential on account of pavement parameter identification[J]. Automatic Control and Computer Sciences,2021,55(3):222-233.
- [7] 张缓缓,向绪爱,叶克宝. 基于稳定性的四轮独立驱动电动汽车转矩分配策略研究[J]. 公路交通科技,2016,33(5):141-146.
- [8] AMINE S, MOKHIAMAR O. A study of stability and power consumption of electric vehicles using different modern control strategies[J]. Alexandria Engineering Journal,2018,58(4):1281-1290.
- [9] 时培成,章亮,陈晨,等. 四轮驱动电动汽车电机故障检测及容错控制策略[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(1):212-220.
- [10] 马晓军,王科涓,张征. 多轮独立电驱车辆横摆稳定性滑模控制研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(3):442-447.
- [11] 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):92-101.
- [12] 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [13] 陈建兵,向青青. 分布式驱动电动汽车 Simulink/Carsim 联合仿真平台的建立[J]. 机械科学与技术,2018,37(10):1496-1500.
- [14] HAN Z, XU N, CHEN H, et al. Energy-efficient control of electric vehicles based on linear quadratic regulator and phase plane analysis[J]. Applied Energy,2018,213:639-657.
- [15] PAN S, ZHOU H. An adaptive fuzzy pid control strategy for vehicle yaw stability[C]//Proceedings of 2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC 2017). New York, USA: IEEE, 2017:677-681.

## Control strategy of wheel torque distribution for distributed drive electric vehicle

LIU Xiaotong, ZHAO Hong\*, LU Laiwei, XU Fuliang, SUN Chuanlong

College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China

**Abstract:** To improve the yaw stability of distributed drive electric vehicles and reduce the number of controller starts, a dual layer controller based on the average distribution of yaw torque of the motor characteristics is designed. In the upper controller, the ideal mathematical model of the vehicle with two degrees of freedom is established, and the yaw rate deviation from the actual vehicle model is calculated. The phase plane method is used to determine whether the current state of the vehicle needs to be controlled. If it needs to be controlled, the proportional integral differential (PID) control will be used, and the additional yaw moment required to maintain vehicle stability is calculated. The lower controller receives signals from the upper controller and applies corresponding longitudinal forces to the wheels based on the average distribution method of yaw torque based on motor characteristics. The joint simulation verification is conducted using Simulink and Carsim software, and the results show that the controller can reduce the vehicle's center of mass sideslip angle and yaw rate, effectively improve the vehicle's driving stability.

**Keywords:** distributed drive; drive stability; torque distribution; co-simulation

(责任编辑:郎伟锋)