

分布式驱动电动汽车转矩分配协调控制研究

王淑君, 刘华明[†]

(武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065)

摘要:操纵稳定性和驱动电机工作效率是电动汽车协调控制的重要指标。针对分布式驱动电动汽车,提出了以直接横摆力矩控制为主的分层控制策略。上层控制器采用滑模控制策略进行目标车速的追踪、滑移率的调整和附加横摆力矩的计算,下层控制器依据滑移率分别设计了前轮独立驱动分配算法和以轮胎利用率最优的分配算法。采用 MATLAB/Simulink 仿真实验对分层控制算法进行验证,结果表明,所提出的滑模控制策略能将质心侧偏角和横摆角速度控制在理想范围之内,下层控制器的两种分配算法提高了驱动电机的工作效率,且车轮滑移率也控制在较低的范围。研究结论可为分布式驱动电动汽车的协调控制提供一定理论依据。

关键词:电动汽车;协调控制;滑模控制;经济性;力矩分配

中图分类号:U469.72

文献标识码:A

Research on Coordinated Control of Torque Distribution for Distributed Drive Electric Vehicles

WANG Shujun, LIU Huaming[†]

(School of Automotive and Transportation Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430065, China)

Abstract:Control stability and drive motor efficiency are important indicators for the coordinated control of electric vehicles. For distributed drive electric vehicles, this paper proposes a layered control strategy based on direct yaw moment control. The upper controller adopts a sliding mode control strategy to track the target speed, adjust the slip rate and calculate the additional yaw moment. The lower controller designs the front wheel independent drive allocation algorithm and the optimal tire utilization algorithm respectively according to the slip rate. MATLAB/Simulink simulation experiments are used to verify the layered control algorithm. The results show that the proposed sliding mode control strategy can control the lateral deflection angle and yaw angle speed within the ideal range, and the two distribution algorithms of the lower controller can improve the working efficiency of the drive motor, and the wheel slip rate is controlled in a lower range. The research results can provide a theoretical basis for the coordinated control of distributed drive electric vehicles.

Key words:electric vehicle;coordination control;sliding mode control;economy;moment distribution

燃油汽车的快速发展给人们出行带来了巨大的便捷,但同时也造成了能源枯竭、环境污染等问题,为此,越来越多的国家和企业开始研发推广使用新能源汽车。分布式驱动电动汽车是新能源汽

车中的一种,其特点是每个车轮由轮毂电机独立控制转向,驱动/制动力矩精准可控,传动结构由硬连接变成软连接,省去了离合器、变速器、传动轴等一系列机械器具,传动效率和底盘空间大幅改善^[1]。

收稿日期:2024-04-23

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究项目(B2022023)

作者简介:王淑君(1999—),女,河南焦作人,硕士研究生,研究方向:分布式驱动电动汽车横向稳定性控制。

[†]通信联系人,E-mail: liuhuaming@wust.edu.cn

操作稳定性是汽车行驶安全的重要内容,目前,分布式驱动电动汽车的横向稳定性主要采用分层控制,即上层控制器计算直接横摆力矩,主要有 PID 控制器^[2-3]、模糊控制器^[4-5]、LQR 控制器^[6-7]等;而对于下层力矩分配,普遍采用垂直载荷分配^[8-9]、平均力矩^[10]等。文献[11]设计模糊控制器得到需要的横摆力矩,并采用差动制动和差动驱动协调控制来提高电机效率。文献[12]针对电机效率 Map 图分别设计了提高电机效率和电机响应速度的目标函数,基于模糊理论对两个目标函数进行实时权重分配,提出了一种转矩节能优化分配办法,提高了整车能耗效率。文献[13]以提高电机效率、减小电机转矩和降低轮胎利用率建立多目标函数,并利用麻雀搜索算求解目标函数,此策略能更好地适应各种工况,且有效提高车辆稳定性、经济性和舒适性。文献[14]设计了模型预测控制器,模型预测控制器中考虑了物理约束。该优化函数包含电机转矩最小化子函数,有助于降低能耗。然而,最小化电机扭矩会对车辆功率产生影响,并有可能使驾驶体验变差。文献[15]以实时性和经济性为目标,提出一种基于黄金比例搜索算法的分布式四轮驱动转矩分配优化策略。文献[16]所提出的控制策略在车辆稳定性可以达到与传统控制策略相同的效果,且能源经济学性提高了 2.4%。文献提出了一种以车辆能耗为目标函数,同时考虑电机实时性变化和驾驶员需求的动态转矩分配办法。

现有文献关于转矩分配策略的研究,多以控制提高电机效率为主,忽略了复杂路况行驶条件下汽

车需要更大的横摆力矩以实现驱动防滑的要求。为此,提出了一种改进的转矩分配协调控制策略,首先分析车辆行驶状态,通过控制前轮进行力矩分配,以减少汽车能量消耗。当前轮提供的横摆力矩不能满足汽车稳定行驶且轮胎某一轮滑移率大于最佳滑移率时,防滑控制系统介入,同时采用轮胎利用率最小的最优分配算法分配四轮转矩。最后,利用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真,验证所提出转矩协调控制策略的有效性。

1 操纵稳定性控制策略设计

本文提出控制策略采用分层控制,如图 1,在上层控制器中,二自由度车辆模型计算得到理想质心侧偏角和横摆角速度,滑模控制器使实际的横摆角速度和质心侧偏角跟随理想值,速度追踪器计算汽车总的驱动力,以及滑移率控制器计算最佳滑移率。下层控制器根据实际横摆角速度和期待横摆角速度来判断车辆行驶状态,当车轮滑移率不大于最佳滑移率时,只考虑前轮控制,提高电机效率和能源利用率。反之,驱动模式切换至四轮驱动模式,以轮胎利用率最小的最优分配方法分配力矩,保证汽车的稳定性和安全性。

1.1 参考模型

为了得到理想状态下质心侧偏角和横摆角速度的值,将整车模型简化为二自由度模型。该模型只考虑车辆横摆和侧向运动,轮胎力处于线性区域,能够使驾驶员更好地感知车辆的运动状态,稳定轻松地驾驶汽车。

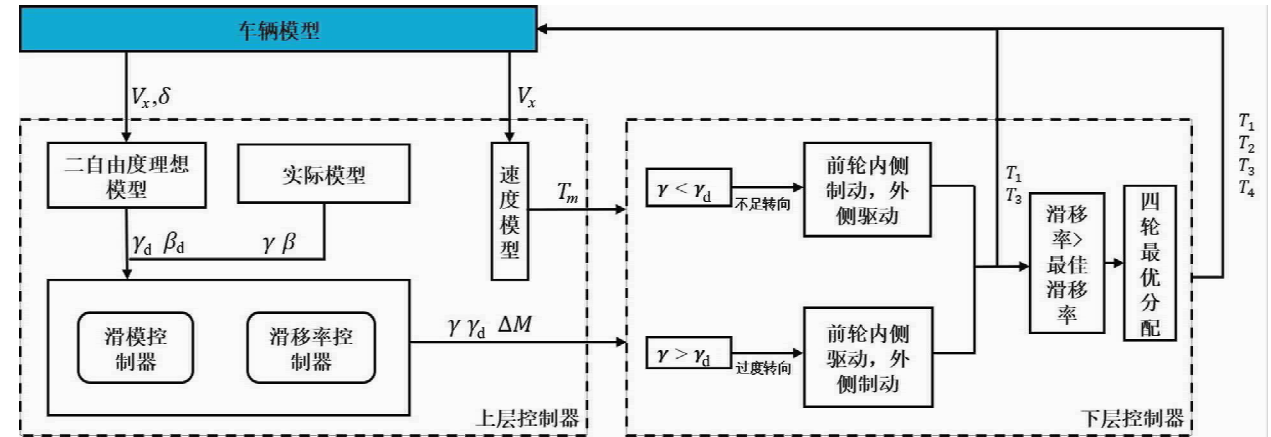


图 1 横向稳定性控制策略

二自由度车辆动力学模型微分方程为:

$$\dot{\beta} = \frac{K_f}{mv_x} \beta + \left(\frac{aK_f - bK_r}{mv_x^2} - 1 \right) \gamma - \frac{K_f}{mv_x} \delta \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{aK_f - bK_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 K_f + b^2 K_r}{I_z v_x} \gamma - \frac{aK_f}{I_z} \delta \quad (2)$$

式中, m 为车身质量; v_x 为纵向车速; $\dot{\beta}$ 和 β

分别为质心侧偏角速度和质心侧偏角； I_z 为车身转动惯量； $\dot{\gamma}$ 和 γ 分别为横摆角加速度和横摆角速

度； K_f 、 K_r 分别为前后轮侧偏刚度； a 、 b 分别为车辆质心至前轴、后轴的距离； δ 为前轮转角。

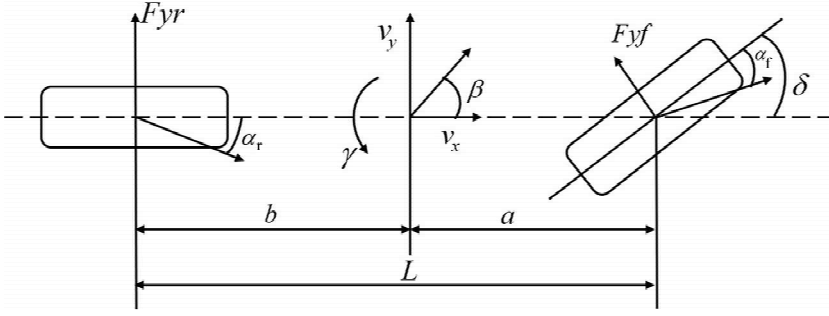


图2 线性二自由度模型

车辆在转弯工况下的理想横摆角速度 γ_d 和质心侧偏角 β_d 为：

$$\begin{cases} \gamma_d = \frac{v_x/L}{1 + Kv_x^2} \delta \\ \beta_d = \frac{b/L + mav_x^2/(L^2 k_r)}{1 + Kv_x^2} \delta_f \end{cases} \quad (3)$$

式中， $L = (a + b)$ 为前后轴距； K 为车辆稳定性系数：

$$K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{K_r} - \frac{b}{K_f} \right) \quad (4)$$

理想状态参考值忽略了路面附着条件的限制，轮胎侧向力受到轮胎与路面的附着力极限制约，因此，理想值的最大上限为：

$$\gamma_{\max} = \frac{0.85}{v_x} \mu g \quad (5)$$

$$\beta_{\max} = \mu g \left(\frac{b}{v_x^2} + \frac{ma}{k_r L} \right) \quad (6)$$

式中， μ 一路面附着系数。

综上，质心侧偏角和横摆角速度的最终期望值 β_{des} 、 γ_{des} 可表示为：

$$\begin{cases} \beta_{\text{des}} = \min \{ |\beta_d|, \beta_{\max} \} \text{sgn}(\delta) \\ \gamma_{\text{des}} = \min \{ |\gamma_d|, \gamma_{\max} \} \text{sgn}(\delta) \end{cases} \quad (7)$$

1.2 上层控制器

通过直接横摆力矩调整汽车行驶时姿态可达到保持汽车稳定的效果，避免在高速低附着路面行驶时发生危险状况。基于二自由度模型，本文以滑模控制策略设计的参考模型为：

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{K_f + K_r}{mv_x} \beta + \left(\frac{aK_f - bK_r}{mv_x^2} - 1 \right) \gamma - \frac{K_f}{mv_x} \delta \\ \dot{\gamma} = \frac{aK_f - bK_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 K_f + b^2 K_r}{I_z v_x} \gamma - \frac{aK_f}{I_z} \delta + \frac{\Delta m}{I_z} \end{cases} \quad (8)$$

式中， ΔM 为直接横摆力矩。

滑模控制器滑动模态可以根据自身需求进行

设计，且在工作时不会受到系统的外界干扰和自身参数的影响，故滑模控制器具备较强的鲁棒性。在整个滑模控制中控制过程有正常运动阶段和滑动模态阶段，正常运动阶段通过选取合适的趋近率来提高运动品质，滑动模态阶段选择合适的切换函数来提高运动阶段品质。横摆角速度和质心侧偏角之间存在一定的耦合关系，单独对 β 、 γ 进行控制和对 β 、 γ 联合控制的研究结果表明，对 β 和 γ 联合控制时算法的实时性和自适应性比单独控制时更有效。

滑模切换函数的设计为：

$$s = C(\gamma - \gamma_d) + D(\beta - \beta_d) \quad (9)$$

式中， C 、 D 为控制器调节参数，调节 β 、 γ 产生的附加横摆力矩值的比例。

研究中常用到的趋近率有等速趋近率、指数趋近率、幂次趋近率和一般趋近率。本论文选取指数趋近率^[18]：

$$\dot{s} = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s) - k \cdot s, \quad \epsilon > 0, \quad k > 0 \quad (10)$$

指数趋近率由等速趋近项 $\dot{s} = -\epsilon \cdot \text{sgn}(s)$ 和指数趋近项 $\dot{s} = -k \cdot s$ 组成，其趋近速度较快，但是抖振较大。可以同时减小 ϵ 增大 k 值来减小系统抖振。为了进一步减小抖振，本文用连续函数 $\text{sat}(s)$ 来替代符号函数 $\text{sgn}(s)$ 。定义饱和函数为：

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & s \geq q \\ \frac{s}{q}, & |s| < q \\ -1, & s \leq -q \end{cases} \quad (11)$$

式中， q 为边界层厚度，取值 0.2。

对式(9)进行求导，得：

$$\dot{s} = C(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_d) + D(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d) \quad (12)$$

由式(8)和式(10)得：

$$\Delta M = aK_f \delta_f - (aK_f + bK_r) \beta - \frac{a^2 K_f + b^2 K_r}{v} \gamma + \frac{I_z}{C} [C\dot{\gamma}_d - D(\dot{\beta} - \dot{\beta}_d)] - \epsilon \cdot \text{sat}(s) - k \cdot s \quad (13)$$

1.3 下层控制器

分布式驱动汽车相比于集中驱动汽车来说,突出特点为四轮独立可控,车辆不仅可以通过制动来产生横摆力矩,也可以通过驱动产生。制动和驱动相结合来产生的横摆力矩,可以降低轮的纵向力、电机的最大输出转矩以及对道路表面状况的要求,提高能源利用率。

当车辆发生不足转向时,需要产生向内侧的附加横摆力矩,可以通过驱动前外轮和后外轮、制动前内轮和后内轮和驱动外轮的同时制动内轮。同理,当汽车发生过多转向时,需要产生向外侧的附加横摆力矩,可以通过制动前外轮和后外轮、驱动前内轮和后内轮和制动外轮的同时驱动内轮。根据文献[19],可以得到驱动力和制动力同时作用时效率最高,并结合滑移率的控制,有效提高车辆操纵稳定性和使驾驶员更好的操控汽车。

本文设计了两种分配算法,当滑移率小于最佳滑移率且前轮产生的横摆力矩能满足车辆所需要的附加横摆力矩时,仅利用前轮调整汽车运动状态,保证车辆稳定性的同时,节约电机消耗能源。当车辆严重不足或过度转向时,仅对前轮控制不能满足附加横摆力矩的要求。此时,采用滑移率控制的轮胎利用率最低优化分配算法。

当车辆发生不足转向时,前轴左侧车轮制动,右侧车轮驱动;同时后轴不参与运动,前轴左右车轮输出的转矩分别为:

$$T_d = \frac{T_m}{2} - \frac{RM}{t_w} \quad (14)$$

$$T_b = \frac{T_m}{2} + \frac{RM}{t_w} \quad (15)$$

当车辆发生过度转向时,前轴左侧车轮驱动,右侧车轮制动;同时后轴不参与运动,前轴左右车轮输出的转矩分别如式(14)和式(15)计算。

轮胎利用率是指单个轮胎受到地面反作用力与地面提供的最大附着力之比,通常由它反映车辆的行驶稳定性。轮胎利用率越大,表示维持车辆稳定的轮胎附着能力越差,相反轮胎利用率越小,表示车辆越稳定。

目标函数为四轮轮胎利用率平方和最小。

$$\min J = \min \sum_{i=1}^4 \frac{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}{(\mu_i F_{zi})^2} \quad (16)$$

式中, F_{xi} 为各轮纵向力; F_{yi} 为各轮侧向力; F_{zi} 为各轮垂向力; μ_i 为各轮附着系数; $i=1,2,3,4$, 分别表示左前轮、右前轮、左后轮和右后轮。忽略侧向力,且 $F_{xi} = T_i/R$ 。

最终目标函数为:

$$\min J = \min \sum_{i=1}^4 \frac{T_i^2}{(\mu_i F_{zi} R)^2} \quad (17)$$

下层控制器中,由上层控制器计算得到的附加横摆力矩和总的驱动力关系如下:

$$(T_1 + T_2) \cos \delta + T_3 + T_4 = T \quad (18)$$

$$\Delta M = \cos \delta \left(-\frac{t_w}{2R} T_1 + \frac{t_w}{2R} T_2 \right) - \frac{t_w}{2R} T_3 + \frac{t_w}{2R} T_4 \quad (19)$$

汽车状态失去稳定性时一般处于高速、低附着情况,此时的汽车转角可以忽略不计。

下层控制器中,输入变量为附总的驱动力和附加横摆力矩,输出变量为四个轮胎转矩,一般计算方法为二次规划法,但二次规划迭代复杂,实时性较差,故本文采用自我推导得到四轮最优转矩。

由式(18)、式(19)可得

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T}{2} - \frac{\Delta M}{t_w} R - T_3 \\ T_2 = \frac{T}{2} + \frac{\Delta M}{t_w} R - T_4 \end{cases} \quad (20)$$

将上式代入目标函数中的得

$$J = \frac{\left(\frac{T}{2} - \frac{\Delta M}{t_w} R - T_3 \right)^2}{(\mu_1 F_{z1} R)^2} + \frac{\left(\frac{T}{2} + \frac{\Delta M}{t_w} R - T_4 \right)^2}{(\mu_2 F_{z2} R)^2} + \frac{T_3^2}{(\mu_3 F_{z3} R)^2} + \frac{T_4^2}{(\mu_4 F_{z4} R)^2} \quad (21)$$

对上式进行求导得

$$\frac{\partial J}{\partial T_3} = -\frac{2 \left(\frac{T}{2} - \frac{\Delta M}{t_w} R - T_3 \right)}{(\mu_1 F_{z1} R)^2} + \frac{2 T_3}{(\mu_3 F_{z3} R)^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial J}{\partial T_4} = -\frac{2 \left(\frac{T}{2} - \frac{\Delta M}{t_w} R - T_4 \right)}{(\mu_2 F_{z2} R)^2} + \frac{2 T_4}{(\mu_4 F_{z4} R)^2} \quad (23)$$

令上式为零,可求得目标函数最小值。

$$T_3 = \frac{\frac{\mu_3^2 F_{z3}^2 T}{2} - \frac{\mu_3^2 F_{z3}^2 \Delta M R}{t_w}}{\mu_3^2 F_{z3}^2 + \mu_1^2 F_{z1}^2} \quad (24)$$

$$T_4 = \frac{\frac{\mu_4^2 F_{z4}^2 T}{2} + \frac{\mu_4^2 F_{z4}^2 \Delta M R}{t_w}}{\mu_4^2 F_{z4}^2 + \mu_2^2 F_{z2}^2} \quad (25)$$

代入式(20),得:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T}{2} - \frac{\Delta M}{t_w} R - \frac{\frac{\mu_3^2 F_{z3}^2 T}{2} - \frac{\mu_3^2 F_{z3}^2 \Delta M}{t_w}}{\mu_3^2 F_{z3}^2 + \mu_1^2 F_{z1}^2} \\ T_2 = \frac{T}{2} + \frac{\Delta M}{t_w} R - \frac{\frac{\mu_4^2 F_{z4}^2 T}{2} + \frac{\mu_4^2 F_{z4}^2 \Delta M}{t_w}}{\mu_4^2 F_{z4}^2 + \mu_2^2 F_{z2}^2} \end{cases} \quad (26)$$

车辆行驶过程中最终车轮输出转矩必须满足电机最大输出转矩限制,轮胎纵向力和侧向力两者的合力应满足附着椭圆公式,即要小于路面提供的最大附着力。

$$-\frac{T_{bmax}}{R} \leq F_{xij} \leq \frac{T_{dmax}}{R} \quad (27)$$

$$-\sqrt{(\mu F_{zij})^2 - F_{yij}^2} \leq F_{xij} \leq \sqrt{(\mu F_{zij})^2 - F_{yij}^2} \quad (28)$$

其中, T_{bmax} 、 T_{dmax} 分别表示电机输出的最大驱动、制动转矩。

结合上面两个式子,得到转矩约束条件:

$$\begin{aligned} \max(F_{ximin}, -\sqrt{(\mu_i F_{zi})^2 + F_{yi}^2}) &\leq F_{xi} \\ &\leq \min(F_{ximix}, \sqrt{(\mu_i F_{zi})^2 + F_{yi}^2}) \end{aligned} \quad (29)$$

2 仿真实验验证

在 MATLAB/Simulink 中搭建上文建立的数学模型和控制器,得到电动汽车协调控制仿真平台。为检验本文设计的横摆稳定性控制策略以及转矩优化分配算法的有效性,选用车辆行驶时容易失去稳定性的双移线工况进行仿真分析,其中车辆模型参数如表 1 所示。

图 3 为方向盘转角输入的时间历程曲线,图 4、图 5 为车速 33 m/s、路面附着系数 0.3 时方向盘变道输入下车辆质心侧偏角和车辆横摆角速度的仿真结果,结果表明,在高速低附着状态下行驶时,无控制策略很难稳定地跟随理想横摆角速度值且质心侧偏角随着时间的增加变得失去控制,极易使车辆陷入不稳定状态。

相比于平均分配策略,本文研究的最优控制能更好地使车身横摆角速度跟随理想值,质心侧偏角也得到了很好的抑制,稳定在理想范围内。由此可见,相比于平均控制而言,本文设计的稳定性控制策略能极大提高车辆在极端路况下的稳定性。

从图 6、图 7 可以看出,在 3.6 s 之前滑移率一直处在最佳滑移率之下,此时前轮转矩分配以式(13)、式(14)进行分配,而后轮一直处于不工作状态。在 3.6 s 之后,前轮纵向滑移率超过最佳滑移

率,此时四轮转矩的输出以轮胎利用率最小分配,前轮相对于后轮来说会输出更多力矩。在两轮驱动模式下,前轴两个车轮输出转矩 300 N·m 时,转速 17.12 r/s,功率为 5.02 kW。后轮分担了一部分前轮力矩,计算出每个车轮功率为 2.71 kW,电机额定功率为 6 kW。部分前轮力矩,计算出每个车轮功率为 2.71 kW,电机额定功率为 6 kW。由此可见本文设计的转矩优化分配算法极大地提高了电机驱动效率。

表 1 车辆主要参数

参数名称	数值	单位
整车质量 m	1765	kg
车身绕 z 轴转动惯量 I_z	2700	$N \cdot m^2$
质心至前轴的距离 a	1.2	m
质心至后轴的距离 b	1.4	m
前轴侧偏刚度 K_f	-86430	N/rad
后轴侧偏刚度 K_r	-86430	N/rad
轮距 t_w	1.6	m
车轮滚动半径 R	0.354	m

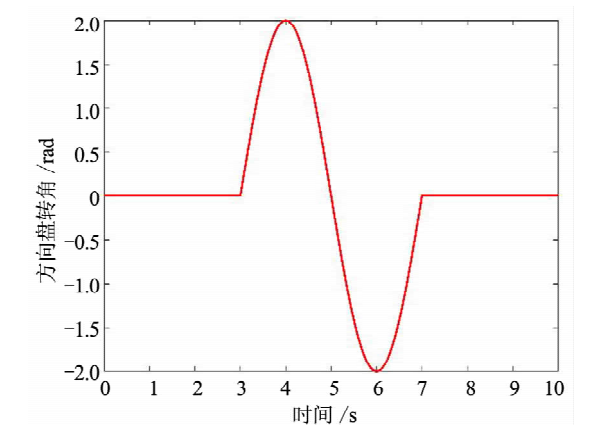


图 3 方向盘输入

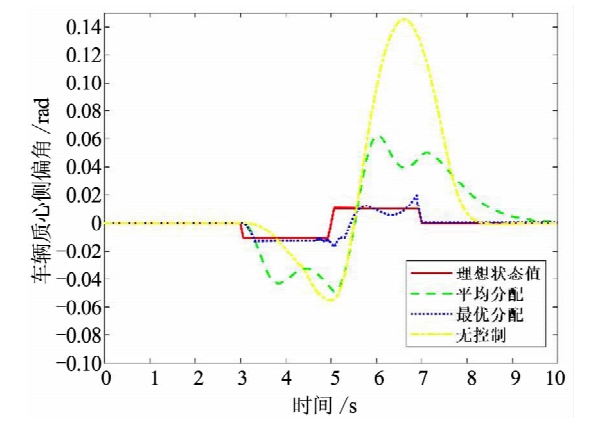


图 4 车辆质心侧偏角

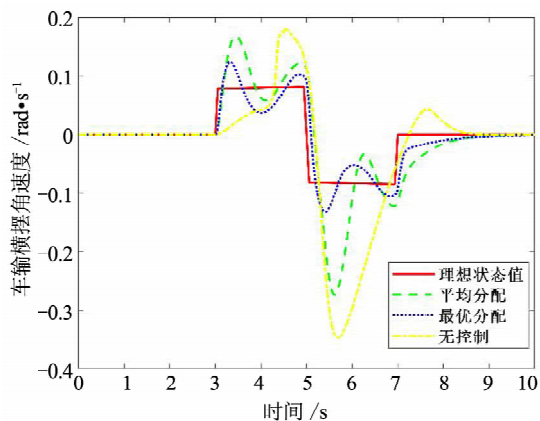


图 5 车辆横摆角速度

从图 7 可以看出,在滑移率超过最佳滑移率时,车轮转矩分配由两轮驱动直接切换为四轮驱动,单个车轮的纵向力下降,导致车轮的纵向滑移率迅速下降,有效控制车辆行驶的操纵稳定性。

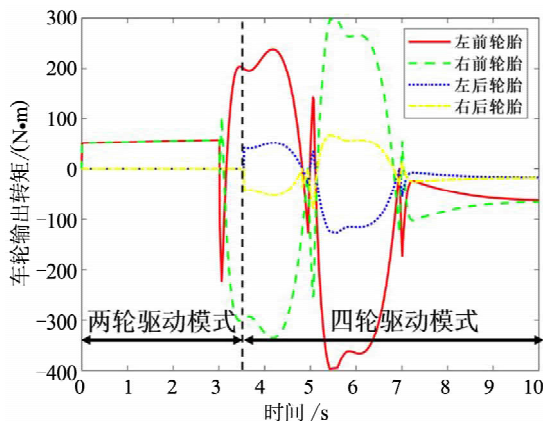


图 6 力矩变化

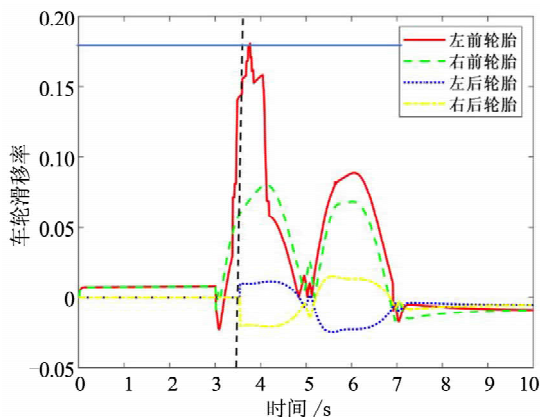


图 7 车轮滑移率

3 结 论

以分布式驱动电动汽车为研究对象,建立了横向稳定性分层控制结构。基于滑模控制算法设计

的上层控制器计算需要的附加横摆力矩,下层以提高电机效率和保证汽车稳定性为目标设计了前轮独立驱动分配算法和以轮胎利用率最优的分配算法。采用 MATLAB/Simulink 仿真实验对分层控制算法进行验证,结果表明,本文提出的控制策略使车辆在复杂路况行驶时也可以很好地跟踪理想值,进一步提高了分布式驱动电动汽车的稳定性和经济性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 严运兵,易振宇,杨勇. 低附着路面下四轮独立驱动电动汽车稳定性控制[J]. 机械设计与制造, 2022(9): 175-179+184.
- [3] 郭烈,葛平淑,许林娜,等. 转向工况下的分布式电动汽车稳定性控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 100-107.
- [4] 张征,马晓军,陈路明,等. 多轮独立电驱车辆直接横摆力矩模糊控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 166-169+180.
- [5] LIANG J, FENG J, LU Y, et al. A direct yaw moment control framework through robust T-S fuzzy approach considering vehicle stability margin[J]. IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, 2024, 29(1): 166-178.
- [6] 魏哈. 基于电动轮汽车四轮转向控制策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- [7] ZHENG Z, ZHAO X, WANG S, et al. Extension integrated control of electric vehicles AFS/DYC based on LQR[C]// 2023 7th IEEE International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS, 2023: 1642-1648.
- [8] YANG L, YUE M, TIAN H, et al. Tire blow-out control for direct drive electric vehicles using reconfiguration of torque distribution and vertical load[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2020, 42(8): 1547-1558.
- [9] 王蕊. 考虑垂直载荷转移的电动车稳定性控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [10] 李庆望,张缓缓,严帅,等. 四轮独立驱动电动汽车单轮失效稳定性控制[J]. 控制工程, 2021, 28(1): 155-163.
- [11] 卢丽霞,李刚,曹天琳. 分布式电动车差动驱动与差动制动协调控制[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 135-140+201.
- [12] 徐兴,陈特,陈龙,等. 分布式驱动电动汽车转矩节能优化分配[J]. 中国公路学报, 2018, 31(5): 183-190.
- [13] LU X X, WU X L, BAI Z F, et al. An optimized multi objective torque distribution strategy for distributed drive electric vehicle based on sparrow search algorithm[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2023, 14(1): 85-94.
- [14] OH K, JOA E, LEE J, et al. Yaw stability control of 4WD vehicles based on model predictive torque vectoring with physical constraints[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20(5): 923-932.
- [15] 朱绍鹏,匡晨阳,陈平,等. 分布式四轮驱动电动客车经济性最优转矩分配控制[J]. 汽车技术, 2022(9): 15-22.
- [16] HU J, TAO J, XIAO F, et al. An optimal torque distribution control strategy for four-wheel independent drive electric vehicles considering energy economy [J]. IEEE Access, 2019, 7: 141826-141837.
- [17] 陈浩,袁良信,郑四发,等. 基于能耗优化的电动轮汽车转矩动态分配[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(2): 132-138.
- [18] 王伟达,彭浩楠,黄国强,等. 四轮独立驱动电动汽车行驶稳定性分析与联合滑模变结构主动控制[J]. 机械工程学报, 2021, 57(4): 103-112.
- [19] 叶刚. 电动轮车辆直接横摆力矩控制策略研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.